

**แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PROTON EXCHANGE MEMBRANE  
ร่วมกับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม  
MATLAB/SIMULINK**

**MODELING OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL  
WITH DC/DC CONVERTER USING MATLAB/SIMULINK**

**ประสิทธิ์ พรหมมินทร์**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PROTON EXCHANGE MEMBRANE  
ร่วมกับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม  
MATLAB/SIMULINK**

**ประสิทธิ์ พรหมมินทร์**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane ร่วมกับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
ชื่อ – นามสกุล	นายประสิทธิ์ พรหมมินทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ร่วมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทำการศึกษาเป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริงขึ้นซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าด้านเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC

โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ศึกษาระบบควบคุมและทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการร่วมกับการสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นรุ่น NEXA@1200 ของบริษัท Ballard ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 1200 วัตต์ แรงดันขาออกที่ 26-43 โวลต์ จากการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการพบว่า ผลการจำลองมีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองจริงโดยใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกันทั้งในระบบจำลองและในการทดลอง ส่วนที่สองคือ การออกแบบ สร้าง วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงใช้ มอสเฟต เป็นสวิทช์ ความถี่การสวิทช์ที่ 10 kHz ด้วยการเชื่อมต่อผ่านบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104

ผลการทดสอบได้มีการเปรียบเทียบแบบจำลองและการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าที่กระแสขาออก 10A แรงดันแบบจำลองมีค่า 38.9 V และแรงดันปฏิบัติมีค่า 35.2 V กำลังไฟฟ้าแบบจำลองมีค่า 389 W และกำลังไฟฟ้าปฏิบัติมีค่า 339 W มีประสิทธิภาพการทำงานอยู่ที่ร้อยละ 89.49 พบว่ามีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ

**คำสำคัญ:** เซลล์เชื้อเพลิง แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

<b>Thesis Title</b>	Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell with DC/DC Converter using MATLAB/Simulink
<b>Name - Surname</b>	Mr. Prasith Prommin
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Wanchai Subsingha, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2012

## ABSTRACT

This thesis presents mathematical model using MATLAB/ Simulink in order to analyze the performance of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) together with DC/DC buck converter model. It will lead to a building of a prototype of PEMFC simulator, which will be useful to study the behavior of the fuel cell.

It comprises in two major parts. The first part is a mathematical modeling of the fuel cell by MATLAB/Simulink program and constructs a prototype of the operation control system. The fuel cell in the project is a 1.2 kW, 26-43 output voltage NEXA@1200 from Ballard Company. The simulation result was compared with an actual experiment in laboratory by using the same parameters. The second part is to build a DC buck converter, MOSFET modules are used as switches in the converter with the switching frequency of 10 kHz, together with the modeled in MATLAB/Simulink program to a practical works using a proper interfacing board DS1104.

The experimental result is determined by comparing between the fuel cell model and experiment DC Converter at output current 10 A. The output voltage level 38.9 V, 35.2 V, output power level 389 W, 339 W, respectively. The proposed system can operate efficiency at 89.49%, results from both experiment and model simulation is approximately.

**Keywords:** fuel cell, fuel cell model, interfacing board

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยการให้คำแนะนำด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง ประธาน กรรมการ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง กรรมการและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภาพร พ่วงพรพิทักษ์ ผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาลดจนให้ความช่วยเหลือและแก้ไขข้อบกพร่อง ต่างๆเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษาที่ได้ให้เวลาและมอบทุนสนับสนุนเพื่อ พัฒนาบุคลากรตลอดระยะเวลาในการศึกษา ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาท วิชาบ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถ นำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ นอกเหนือจาก นี้ขอขอบคุณ คุณกุลเดชา อนุกุลภิมย์ ที่คอยให้คำแนะนำช่วยเหลือตลอดเวลาในการศึกษาของผู้วิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และ ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ประสิทธิ์ พรหมมินทร์



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	3
1.6 ข้อยกเว้นของการวิจัย.....	4
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell).....	9
2.3 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง.....	9
2.4 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells).....	10
2.5 ลักษณะสมบัติสภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิง.....	17
2.6 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	19
2.7 การออกแบบวงจรกำลังของวงจรแปลงผันกำลังไฟตรง.....	26
2.8 โปรแกรม MATLAB/Simulink.....	36
2.9 บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104.....	39
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	43
3.1 การทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	43

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2 การออกแบบแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC.....	50
3.3 การออกแบบแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง .....	55
3.4 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า.....	57
3.5 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าทำงานร่วมกับบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104 .	59
4 ผลการทดลอง .....	65
4.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ .....	65
4.2 การทดสอบแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริง .....	71
4.3 ผลการทดสอบแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริง .....	73
4.4 ข้อสังเกตจากการทดสอบ .....	78
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	80
รายการอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก ข้อมูลคุณลักษณะของบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104 .....	83
ภาคผนวก ข ข้อมูลคุณลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) ขนาด 1200W, 46A ยี่ห้อ Nexa™ รุ่น NEXA@1200 .....	89
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	91
ประวัติผู้เขียน.....	112

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ค่ากระแสแสะกับแรงดันที่ความดันของก๊าซไฮโดรเจน 1-3 บาร์.....	49
3.2	ค่าพารามิเตอร์ของเซลล์เชื้อเพลิง Ballard Nexa™ Power Module User's Manual.....	52
4.1	ความคลาดเคลื่อนที่ความดันของไฮโดรเจน 1 บาร์ .....	69
4.2	ความคลาดเคลื่อนที่ความดันของไฮโดรเจน 2 บาร์ .....	70
4.3	ความคลาดเคลื่อนที่ความดันของไฮโดรเจน 3 บาร์ .....	70
4.4	ผลการทดสอบแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริง .....	77





## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	6
2.2	ผลการจำลองกราฟ V-Time เมื่อมีการเปลี่ยนกระแส .....	6
2.3	แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	7
2.4	ผลการจำลองกราฟ V-I curve ที่ 1 Cell Stack.....	7
2.5	ผลการทดลองกราฟ V-I curve ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC.....	8
2.6	ผลการทดลองกราฟ Power Curve ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC .....	8
2.7	โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง .....	10
2.8	หลักการเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์.....	11
2.9	หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก.....	12
2.10	หลักการเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง .....	13
2.11	หลักการเซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนเดทลอม .....	14
2.12	โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM.....	15
2.13	หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC .....	16
2.14	สถานะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC.....	17
2.15	วงจรสมมูลของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	19
2.16	วงจรการทำงานของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	20
2.17	สัญญาณของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง .....	21
2.18	รูปคลื่นกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุและแรงดันขาออกในวงจรทอนระดับแรงดัน.....	24
2.19	ลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตเมื่อเริ่มนำและหยุดนำกระแส.....	31
2.20	ตัวเก็บประจุแผ่นที่ต่ออยู่ที่ขาต่างๆ ภายในตัวเพาเวอร์มอสเฟต .....	32
2.21	ตัวอย่างของ Gate Charge Chart .....	33
2.22	ลักษณะการชาร์จประจุที่ขาเกตตามเวลาที่มีผลต่อการเริ่มนำกระแสและผลเมื่อเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต.....	34
2.23	พิกัด FBSOA ของเพาเวอร์มอสเฟต .....	35
2.24	Block Diagram พื้นฐานใน Simulink Library Browser.....	36
2.25	หน้าต่างสำหรับสร้างระบบจำลองของ Simulink .....	37

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.26	กลุ่ม Block ของ Source ..... 37
2.27	กลุ่ม Block ของ Math Operations ..... 38
2.28	กลุ่ม Block ของ Signal Routing ..... 38
2.29	หน้าต่างที่ใช้กำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา ..... 39
2.30	บอร์ดประมวลผล dSPACE รุ่น DS1104 ..... 40
2.31	บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์ของบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104..... 41
2.32	บล็อก RTLib 1104 ..... 42
2.33	การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับ D/A ของ DS1104 ..... 42
2.34	การจำลองแบบสัญญาณจริงโดยใช้ Control Desk ..... 42
3.1	อุปกรณ์ประกอบการทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ..... 44
3.2	Power supply และสวิตช์ Run – Stop ..... 44
3.3	โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application..... 45
3.4	เปิดการอ่านข้อมูล ..... 45
3.5	การบันทึกค่าและปรับช่วงเวลาการเก็บค่า ..... 45
3.6	การปรับแรงดันก๊าซที่ถึงโดยสังเกตค่าแรงดันที่โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 ..... 46
3.7	โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application..... 46
3.8	เครื่องจ่ายโพลด KENIL ..... 47
3.9	การตั้งค่าของโปรแกรม ..... 47
3.10	หน้าจอแสดงผลของโปรแกรม ..... 48
3.11	หน้าจอแสดงสถานการณ์การจ่ายโพลด เครื่องจ่ายโพลด KENIL ..... 48
3.12	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความดันของก๊าซไฮโดรเจน 1-3 บาร์ ..... 49
3.13	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับอุณหภูมิ ..... 50
3.14	โครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง ..... 51
3.15	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูญเสียได้จากผลของแบบจำลอง ..... 53
3.16	ค่าแรงดัน กระแส และค่าพลังงานไฟฟ้าได้จากผลของแบบจำลอง ..... 54
3.17	แรงดันไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าในแบบจำลอง ..... 54

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.18	วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ..... 55
3.19	แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า ..... 57
3.20	ผลการทดลองของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับแบบจำลองวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า..... 58
3.21	วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าทำงานร่วมกับบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104 ... 59
3.22	วงจรตรวจจับกระแส ..... 60
3.23	วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา 10 kHz ..... 61
3.24	วงจรกำเนิดสัญญาณฟันเลื่อย..... 62
3.25	วงจรขับนำเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250..... 63
3.26	การมอดูเลตสัญญาณฟันเลื่อยกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง..... 64
3.27	สัญญาณพัลส์ขับเกตของมอสเฟตความถี่สวิตช์ 10 kHz ..... 64
4.1	ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ความดันของไฮโดรเจน 1 บาร์..... 65
4.2	ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ความดันของไฮโดรเจน 2 บาร์..... 65
4.3	ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ความดันของไฮโดรเจน 3 บาร์..... 66
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังงานที่ความดันของไฮโดรเจน 1 บาร์..... 67
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังงานที่ความดันของไฮโดรเจน 2 บาร์..... 68
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังงานที่ความดันของไฮโดรเจน 3 บาร์..... 68
4.7	โต๊ะปฏิบัติการทดสอบแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง..... 72
4.8	โปรแกรม MATLAB/Simulink ภายใน DS1104..... 72
4.9	สัญญาณขับขาเกตของมอสเฟตแบบสัญญาณจริงที่ควิตีไซเคิลร้อยละ 77.55..... 73
4.10	สัญญาณขับขาเกตของมอสเฟตแบบสัญญาณจริงที่ควิตีไซเคิลร้อยละ 84.74..... 74
4.11	ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าระหว่างแบบจำลองและการทดสอบที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ 74
4.12	ความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าระหว่างแบบจำลองและการทดสอบที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ .. 75
4.13	สัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออกและแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 75
4.14	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า ..... 76
4.15	สัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า ..... 76

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสภาวะปัจจุบัน พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งพลังงานต่างๆ ได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ ซึ่งการผลิตพลังงานไฟฟ้าตามชนิดของเชื้อเพลิงนั้นร้อยละ 71 มาจาก ก๊าซธรรมชาติ ดังนั้น แนวทางการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่หลากหลายจึงเป็นทางเลือกหนึ่ง เพื่อลดการพึ่งพาก๊าซธรรมชาติที่มีแนวโน้มที่จะขาดแคลนในอนาคต เมื่อนำพลังงานเหล่านี้มาใช้ก็จะมีปัญหาทางด้านมลภาวะและสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นปัญหาที่ร้ายแรงที่สุดในอนาคตอันใกล้นี้เชื้อเพลิงที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันก็กำลังหมดไป และราคาค่อนข้างสูง

พลังงานใหม่และพลังงานสะอาดเป็นพลังงานทางเลือกทางหนึ่งในอนาคต ถูกนำมาพิจารณาเพื่อทดแทนและลดการเกิดมลภาวะต่างๆ ที่จะนำมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ได้จากการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยไม่ต้องมีกระบวนการเผาไหม้ที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศมีสมรรถนะและประสิทธิภาพที่ดีเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด

การนำเซลล์เชื้อเพลิงมาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็กชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) มีข้อดีคือน้ำหนักเบาและมีขนาดเล็กให้ ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง ซึ่งเป็นที่สนใจในด้านพลังงานทดแทนและเป็นนโยบายของกระทรวงพลังงาน ที่มีการสนับสนุนงานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงเช่น ไฮโดรเจน พลังงานลม เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิง

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC จะมีข้อจำกัดในเงื่อนไขของการปรับอัตราการไหลของความดันไฮโดรเจน พัดลม กระแสโหลด และอุณหภูมิในสภาวะโหลดที่แตกต่าง ส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ทำงานร่วมกับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink สามารถที่จะใช้ประโยชน์ในการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC โดยสามารถจ่ายโหลดได้จริง หรือใช้เพื่อเป็นการศึกษาพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ในสภาวะต่างๆได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC จากโปรแกรม MATLAB/ Simulink โดยที่สามารถเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงได้

1.2.2 เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิง

1.2.3 เพื่อสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC แบบสัญญาณจริง โดยใช้หลักการควบคุมค่าความถี่ไซเคิลของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

## 1.3 สมมุติฐานการวิจัย

ในปัจจุบันราคาเซลล์เชื้อเพลิงมีราคาสูงมากและมีอายุการใช้งานที่จำกัด ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษางานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) ของบริษัท Ballard รุ่น NEXA@1200 ขนาด 1200W สามารถนำมาใช้ทำการทดสอบเพื่อทำการวิเคราะห์ผลต่างๆ ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์จริง นำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับการคำนวณโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ซึ่งจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถกำหนดคุณลักษณะตัวแปรที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันของก๊าซไฮโดรเจน ความดันของออกซิเจน อุณหภูมิ คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทำการพัฒนาให้เป็นแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงที่สามารถจ่ายโหลดได้จริง ทำให้สามารถศึกษาคุณลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงได้สะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้นเหมาะสำหรับใช้งานในห้องปฏิบัติการเพื่อพัฒนาการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 สร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ขนาดพิกัดกำลัง 1200 W โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงได้

1.4.2 สร้างเซลล์เชื้อเพลิงจำลองแบบสัญญาณจริงที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าตามคุณลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC โดยใช้วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกให้สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าขาออก โดยใช้หลักการควบคุมความถี่ไซเคิลผ่านผ่านบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104 ของบริษัท DSPACE GmbH. เพื่อให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในทางปฏิบัติได้สอดคล้องกับคุณสมบัติการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

1.4.3 เปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะของกระแส-แรงดัน ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink กับเซลล์เชื้อเพลิงจำลองที่ใช้หลักการของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

## 1.5 ขั้นตอนการวิจัย

### 1.5.1 ศึกษาความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ศึกษาการจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการต่างๆ

### 1.5.2 ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้น

- 1) ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC
- 2) ศึกษาคุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ความดันของก๊าซไฮโดรเจน ความดันของออกซิเจน อุณหภูมิการทำงาน แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูงสุด
- 3) ศึกษาการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink วิธีการใช้งาน และการเขียนโปรแกรม เพื่อการออกแบบและวิเคราะห์เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC
- 4) ศึกษาการใช้งานของบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104 และวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC - DC Converter) เพื่อการสร้างสัญญาณจริงของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC

### 1.5.3 การจำลองและออกแบบวงจรสำหรับคุณสมบัติการจ่ายกำลังงานขาออก

- 1) กำหนดสมการตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิง
- 2) ออกแบบสร้างเซลล์เชื้อเพลิงจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
- 3) ออกแบบสร้างวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าและวงจรควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า
- 4) ออกแบบวงจรที่ใช้ทดสอบที่โหลดเชิงเส้น

### 1.5.4 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) จำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 2) เปรียบเทียบผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ กับคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC จาก บริษัท Ballard รุ่น NEXA@1200 ขนาด 1200W
- 3) ทดสอบคุณลักษณะการจ่ายแรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC จำลองแบบสัญญาณจริงกับแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4) ทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โหลดแบบเชิงเส้น

1.5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง ตามผลขั้นตอนการทดลอง

1.5.6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

## 1.6 ข้อย้ำกัของการวิจัย

1.6.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) ของบริษัท Ballard รุ่น NEXA@1200 ขนาด 1200W

1.6.2 การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงจำลองกำหนดค่าคุณลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแบบ Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

1.6.3 การควบคุมอัตราการจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาออกให้สัมพันธ์กับกระแสขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงจำลองแบบสัญญาณจริงนี้ ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104

## 1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.7.1 มีความรู้ความเข้าใจในการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

1.7.2 มีความรู้ความเข้าใจในผลที่เกิดขึ้นที่มีการเปลี่ยนแปลงของความดันของก๊าซไฮโดรเจน ความดันของออกซิเจน อุณหภูมิและจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

1.7.3 มีความรู้ความเข้าใจ เชื่อมต่อแบบจำลองกับบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104

1.7.4 มีความรู้ความเข้าใจ ออกแบบสร้างวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC Converter)

1.7.5 มีความรู้ความเข้าใจ ต่อวงจรทดสอบโหลดแบบเชิงเส้นของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC

1.7.6 มีความสะดวกในการศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงมากขึ้น ส่งผลต่อการพัฒนาระบบควบคุมของระบบไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

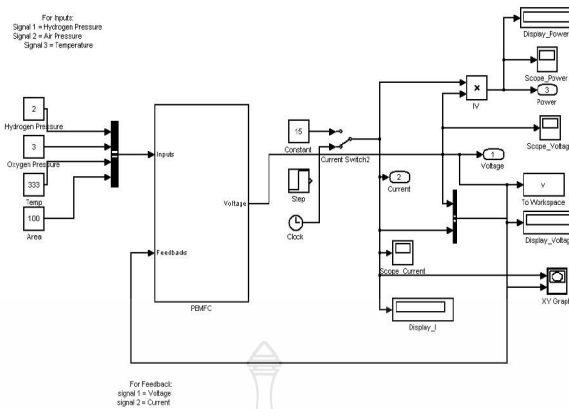
เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วย การทบทวนบทความที่เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เนื้อหาที่เกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิง ผลกระทบของตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และ การใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

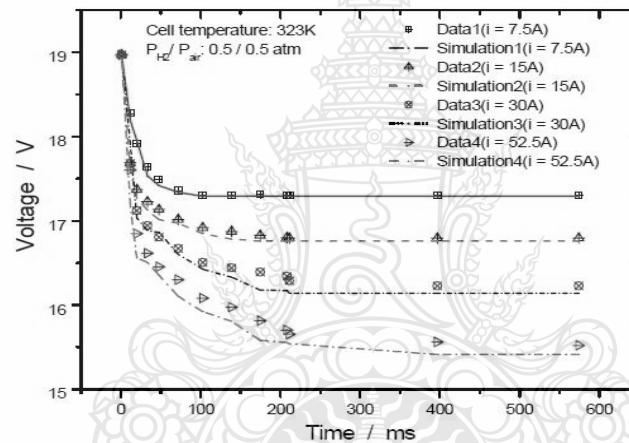
จากการทบทวนบทความงานวิจัยด้านการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC โดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น มีหลายงานที่นำเสนอถึงวิธีการศึกษาผลกระทบต่ออัตราการไหลของความดันไฮโดรเจน ออกซิเจน กระแสไหล และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อคุณสมบัติในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์เชื้อเพลิง ในงานวิจัยแต่ละงานมีความแตกต่างกันไปดังนี้

2.1.1 Dynamic Characteristic Study of Proton Exchange Membrane Fuel cell ปี 2008 โดย J. Jia, Y. Wang, M. Han [1] งานที่ได้นำเสนอคือการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC พิกัดขนาด 1000W, 20 Cell Stack โดยการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ด้วยโปรแกรม MATLAB /Simulink ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ในการศึกษาพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC แทนการทดลองในห้องปฏิบัติการ ผลของงานวิจัยนี้คือ สามารถเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ที่เป็นความดันไฮโดรเจน, ออกซิเจน, กระแสไหล, อุณหภูมิ และสามารถจำลองเป็นกราฟแรงดันไฟฟ้า-เวลา เมื่อปริมาณของกระแสไฟฟ้ามีค่าแตกต่างกันในสถานะที่จ่ายโหลดต่างกัน ดังภาพที่ 2.1 และภาพที่ 2.2 ในงานวิจัยนี้ สามารถจำลองขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ที่ 20 Cell Stack และเป็นเพียงการจำลองในคอมพิวเตอร์ไม่ได้มีการพัฒนานำแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ที่สร้างขึ้นมาทดสอบการจ่ายโหลดจริงเพื่อทำการเปรียบเทียบกัน





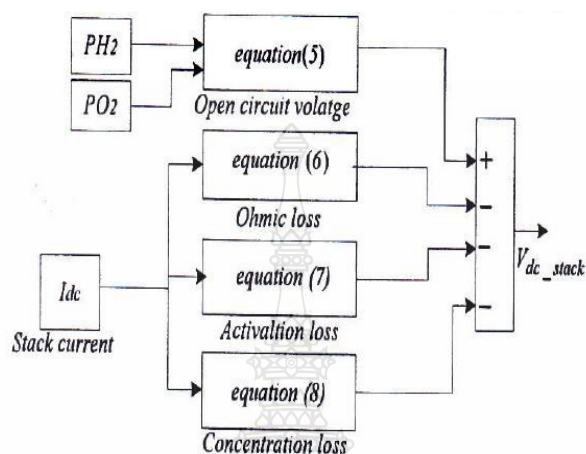
ภาพที่ 2.1 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB



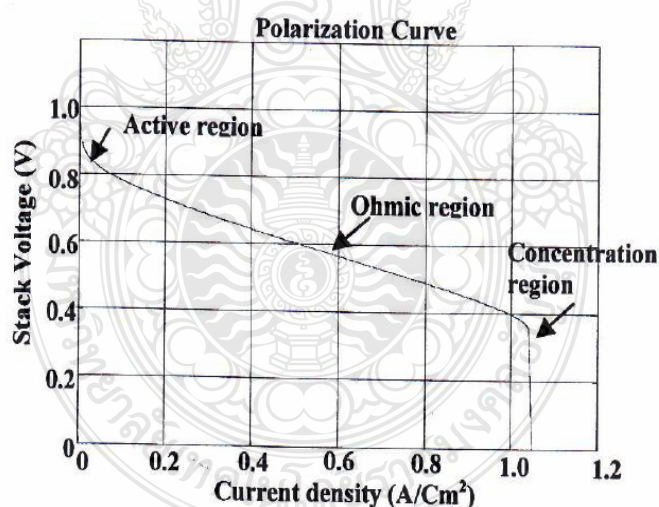
ภาพที่ 2.2 ผลการจำลองกราฟ V-Time เมื่อมีการเปลี่ยนกระแส

2.1.2 The PEM Fuel cell System with DC/DC Boost Converter: Design, Modeling and Simulation ปี 2009 โดย A.Kirubkran, Shailendra Jain, and R.K.Nema [2] ได้นำเสนอแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ของบริษัท Ballard รุ่น NEXA @1200 ขนาด 1200W , 1 Cell Stack โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลงานงานวิจัยนี้คือ สามารถเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ที่มีความดันไฮโดรเจน, ออกซิเจน, กระแสโหลด, อุณหภูมิ และสามารถจำลองกราฟแรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า (V-I curve) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการผลิตแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ และมีการนำเสนอการทำงานร่วมกับ DC-DC Boost

Converter ในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการทดสอบการแสดงผลแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC เปรียบเทียบกับการทดลองจากการปฏิบัติงานจริง เป็นเพียงการจำลองด้วยโปรแกรมในคอมพิวเตอร์ ไม่ได้มีการนำมาทดสอบการจ่ายโหลดจริงดังในภาพที่ 2.3 และภาพที่ 2.4



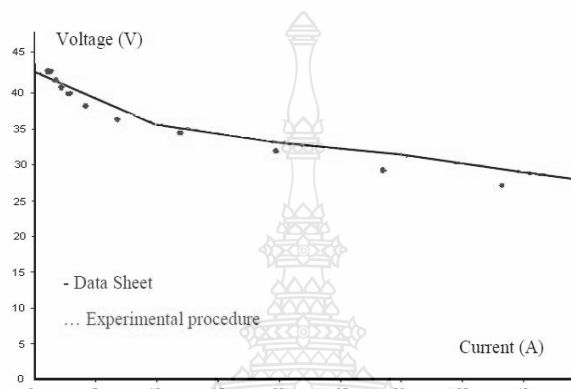
ภาพที่ 2.3 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB



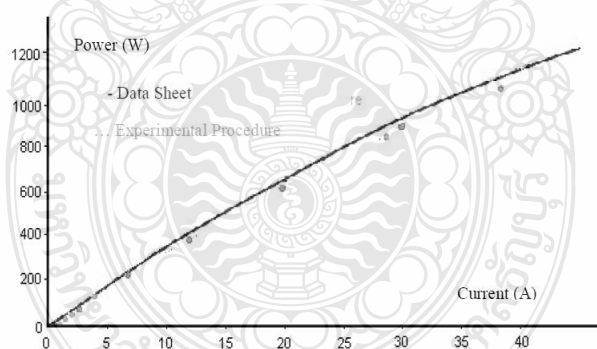
ภาพที่ 2.4 ผลการจำลองกราฟ V-I curve ที่ 1 Cell Stack

2.1.3 Analysis of a PEM Fuel Cell System dynamic response ปี 2010 โดย Marinis Andreas, Naxakis Ioanni and Nakis Stavros [3] งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ของบริษัท Ballard รุ่น NEXA @1200 ขนาด 1200W ผลของงานวิจัยนี้คือ แสดงผลการ

ทดลองจากการปฏิบัติงานจริงเพื่อทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลทางบริษัทผู้ผลิตได้คุณสมบัติเป็นกราฟแรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า (V-I curve) และ Power Curve ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดที่เป็นความต้านทานที่อุณหภูมิ 303°K ในงานวิจัยนี้ ขาดการทดสอบในการแสดงผลแบบจำลองเปรียบเทียบกับ การทดลองจากการปฏิบัติงานจริงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไม่ได้มีการนำเสนอข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ออกมาเป็นสัญญาณจริง ดังภาพที่ 2.5 และภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.5 ผลการทดลองกราฟ V-I curve ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC



ภาพที่ 2.6 ผลการทดลองกราฟ Power Curve ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC

ดังนั้นในการวิจัยนี้ขอเสนอแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC แบบสัญญาณจริง โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับ DC-DC Buck Converter ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC สามารถใช้ประโยชน์ในการศึกษา

ผลกระทบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด สามารถทดสอบการจ่ายกระแส-แรงดันไฟฟ้าตามพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ได้

## 2.2 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell)

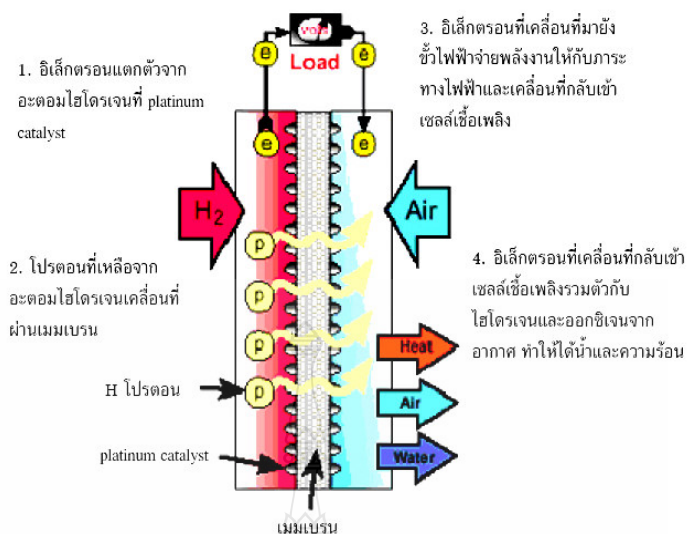
เซลล์เชื้อเพลิง คือ อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี-ไฟฟ้าระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจน ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานของเชื้อเพลิงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงไม่ต้องผ่านการเผาไหม้ ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงมีหลายแบบขึ้นอยู่กับสารที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเช่น เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน-ออกซิเจน โพรเพน-ออกซิเจน เป็นต้น เป็นที่นิยมใช้คือ เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน-ออกซิเจน เพราะเมื่อปฏิกิริยาในเซลล์ที่เกิดขึ้นแล้วนอกจากพลังงานจะได้น้ำบริสุทธิ์ และความร้อนไว้ใช้ตามความเหมาะสม นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ยังไม่ทำลายชั้นบรรยากาศโอโซนเพราะไม่ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เช่นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะคล้ายกับเซลล์สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่วหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าแบตเตอรี่มากในด้านที่สามารถอัดประจุใหม่ได้

## 2.3 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง

Fuel Cell มีอยู่ด้วยกันหลายประเภท โดยแบ่งตามประเภทของสารพาประจุ (Electrolyte) โดยกล่าวถึงการทำงานโดยละเอียดของเซลล์ประเภท Proton exchange membrane เซลล์เชื้อเพลิงจะแบ่งโครงสร้างออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่

2.3.1 ขั้วแอโนด (Anode) เป็นขั้วลบ มีหน้าที่ส่งอิเล็กตรอนออกจากขั้ว โดยอิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยา  $H_2 \implies 2H^+ + 2e^-$  โดยที่ขั้วจะมีช่องที่ติดกับตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งฉาบอยู่บนผิวหน้าของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยปฏิกิริยาจะเกิดเมื่อผ่านก๊าซไฮโดรเจนเข้าไป

2.3.2 ขั้วแคโทด (Cathode) เป็นขั้วบวก โดยมีช่องติดกับเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ทำหน้าที่รับโปรตอน และก๊าซออกซิเจนซึ่งถูกปล่อยออกมาที่ผิวหน้าของเยื่อซึ่งฉาบตัวเร่งปฏิกิริยาและทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนกลับมาจากวงจรภายนอก เพื่อรวมกันเป็นน้ำ ดังปฏิกิริยา  $O_2 + 4H^+ + 4e^- \implies 2H_2O$



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง [4]

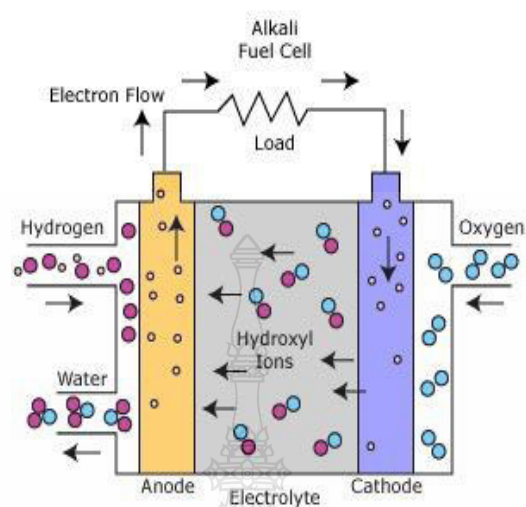
2.3.3 สารพาประจุ (Electrolyte) เป็นส่วนที่มีความสำคัญเพราะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนชนิดต่างๆ และเป็นส่วนที่เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภทแตกต่างกันโดยประเภทที่เรา กล่าวถึงอยู่นี้สารพาประจุจะเป็นเพียงเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane) เท่านั้น ซึ่งมีลักษณะเหมือนแผ่นพลาสติกโดยจะให้โปรตอนผ่านได้แต่จะไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน

2.3.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เป็นวัสดุพิเศษที่ช่วยให้ปฏิกิริยาในขั้นตอนต่างๆ เกิดได้ดี โดยส่วนใหญ่จะเป็นผงแพลทินัมเคลือบอยู่บนเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งจะมีลักษณะขรุขระเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน

## 2.4 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells) [4]

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดแต่ทุกชนิดให้ไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่สามารถนำไปใช้กับ มอเตอร์ หลอดไฟ หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆ ได้โดยชนิดของตัวเซลล์เชื้อเพลิงแบ่งโดยสารเคมีที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง และชนิดของอิเล็กโทรไลต์เพื่อวัตถุประสงค์ของการใช้งานที่แตกต่างกัน

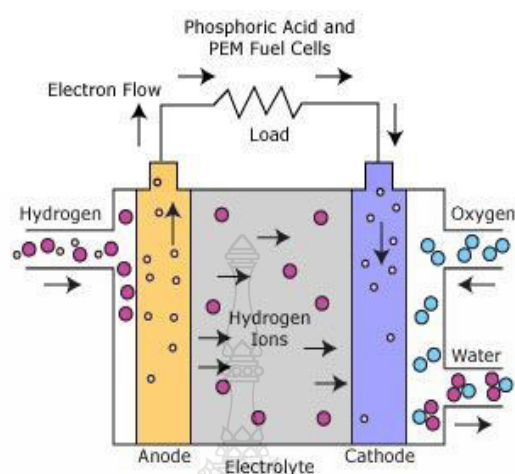
### 2.4.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cells, AFC)



ภาพที่ 2.8 หลักการเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์

เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์จะใช้ Potassium Hydroxide (KOH) เป็นอิเล็กโทรไลต์ (30-43%) เซลล์เหล่านี้จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิห้องและจะให้ค่าความต่างศักย์สูงที่สุดที่ค่าความหนาแน่นของกระแส (Current Density) เดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงอื่นๆ ก๊าซที่ป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์จะมีก๊าซ  $\text{CO}_2$  ไม่ได้ ทั้งนี้เพราะ  $\text{CO}_2$  จะเกิดเป็นคาร์บอเนตในเวลาสั้นตัวกลางที่เป็นด่างและทำให้รูปพอรอนดูดซับก๊าซ  $\text{CO}_2$  ถูกดึงออกจากอากาศโดยการดูดซับกับน้ำโซดา (Sodalime) การทำงานของระบบ AFC เคยถูกใช้ในยานอวกาศ เรือดำน้ำ รถยนต์ไฟฟ้า และผลิตน้ำใช้ในยานอวกาศ อายุการทำงานของเซลล์อาจมีค่าสูงถึง 10,000-15,000 ชั่วโมง ราคาต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้จะมีค่าสูง ทั้งนี้เพราะใช้โลหะตระกูลสูง ต้องใช้พลังงานในการอัดหรือทำให้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นของเหลว ก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์สูงด้วยข้อเสียดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ยากต่อการขยายขนาดให้ใหญ่ขึ้นประสิทธิภาพการผลิตพลังงานสูงถึง 70% เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์จะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 150-430°F หรือ 65-220°C และทำปฏิกิริยาที่ความดันประมาณ 15 psig (1 barg) นอกจากนั้นแล้วแต่ละเซลล์ยังสามารถผลิตแรงดันอยู่ที่ระหว่าง 1.1 และ 1.2 VDC

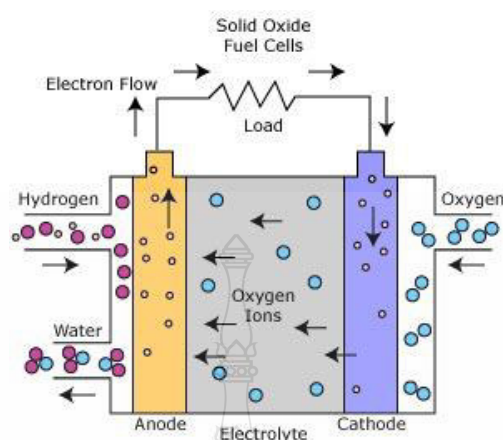
## 2.4.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC)



ภาพที่ 2.9 หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก

เป็นระบบที่มีแนวโน้มที่จะถูกนำไปใช้ในสถานีไฟฟ้าขนาดเล็กเนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าแบบ PEMFC ทำให้ต้องใช้เวลาในการอุ่นระบบที่นานกว่า ทำให้มันไม่เสถียรในการนำมาใช้ในรถยนต์ กรดฟอสฟอริกจะถูกใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้ โดยที่กรดฟอสฟอริกถูกบรรจุในเมทริกซ์ของซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide) ปฏิกิริยาในตัวกลางที่มีฤทธิ์เป็นกรด สารอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเสถียรซึ่งจะทำงานโดยสามารถใช้อากาศที่มีก๊าซ  $\text{CO}_2$  อยู่ การที่เซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้มีสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูงปานกลาง จะช่วยลดความเป็นพิษของก๊าซ  $\text{CO}_2$  ที่มีผลต่อตัว กะตะลิสต์ลง จากการทดสอบพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PAFC นี้มีอายุการใช้งานได้นานถึง 40,000 ชั่วโมงประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ามากกว่า 40% และใช้ไอน้ำที่ผลิตได้ 85% ในระบบผลิตความร้อนร่วม อุณหภูมิในการทำงานระหว่าง  $300\text{-}400^\circ\text{F}$  ( $150\text{-}200^\circ\text{C}$ ) และทำปฏิกิริยาที่ความดันประมาณ 15 psig โดยแต่ละเซลล์สามารถผลิตได้เท่ากับ 1.1 VDC ปัจจุบันมีขนาดใช้งานที่ 1 kW และ 1 MW การใช้อิเล็กโทรไลต์เหลว ทำให้เกิดปัญหาในการควบคุมของเหลวออกจากรันแล้วยังระเหยได้ช้าและกินเวลานานจึงต้องใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีคุณสมบัติในการกักตร้อนในสภาวะอุณหภูมิปานกลาง จึงอาจมีปัญหในเรื่องของการกักตร้อนต่อวัตต์ดูิบ, ทนต่อสภาวะที่มี Carbon Monoxide ได้เพียง 2%, ทนต่อสารประกอบกำมะถัน ได้เพียง 50 ppm, ไม่สามารถจะผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนได้เอง (Auto-Reform Hydrocarbon Fuels) ปล่อยให้ผลิตผลที่เป็นน้ำเข้าไปทำลายอิเล็กโทรไลต์ได้ มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก

### 2.4.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)

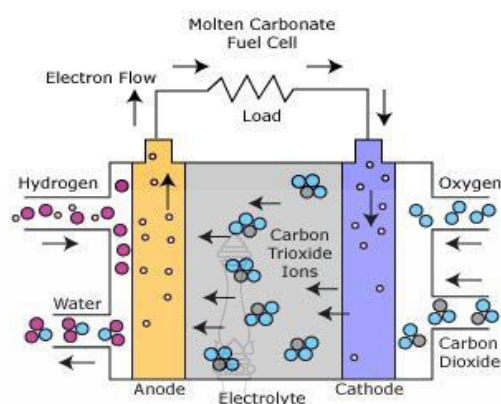


ภาพที่ 2.10 หลักการเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง

เป็นระบบที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่เนื่องจากสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มาก แต่เซลล์ไฟฟ้าชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิที่สูงมาก (ประมาณ  $1,832^{\circ}\text{F}$ ,  $1,000^{\circ}\text{C}$ ) ทำให้มีปัญหาเรื่องเสถียรภาพ แต่ก็มีข้อดีตรงที่ว่า ไอ้ความร้อนสูงที่เป็นผลผลิตจากกระบวนการนี้สามารถนำไปใช้ปั่นกังหันก๊าซต่อได้ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในระบบ SOFC จะใช้อิเล็กโทรไลต์ที่นำอะตอมของออกไซด์ ( $\text{O}_2^-$ ) จากขั้วลบไปยังขั้วบวก ซึ่งตรงกันข้ามกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นที่จะนำอะตอมของไฮโดรเจนจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ทั้งอิเล็กโทรดและสารอิเล็กโทรไลต์ต่างก็ทำมาจากวัสดุเซรามิกจำพวกออกไซด์แข็ง อาทิ อิทรีีย (Yttria) หรือเซอร์โคเนีย (Zirconia) วัสดุเหล่านี้จะสามารถเป็นตัวนำไอออน  $\text{O}_2^-$  ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $800^{\circ}\text{C}$  ถ้าเซลล์มีสภาวะการทำงานที่ประมาณ  $900^{\circ}\text{C}$  การไหลเวียนกลับของ  $\text{CO}_2$  จากทางออกขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซจากถ่านหินหรือเชื้อเพลิงเหลวที่ถูกทำให้ระเหยสามารถถูกปฏิรูปให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิง ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการสามารถถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้ ระบบ SOFC สามารถใช้ได้กับก๊าซธรรมชาติ ดังนั้น SOFC จึงมีศักยภาพสูงในอนาคต อันใกล้อุณหภูมิทำงานประมาณ  $1,800^{\circ}\text{F}$  ( $1,000^{\circ}\text{C}$ ) และที่ความดันประมาณ 15 psig (1 barg) ซึ่งแต่ละเซลล์สามารถผลิตแรงดันได้อยู่ที่ระหว่าง 0.8 และ 1 VDC ขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 100 kW เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (SOFC) จะทนต่อการเจือปนของกำมะถันได้สูงสุด



#### 2.4.4 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cell MCFC)

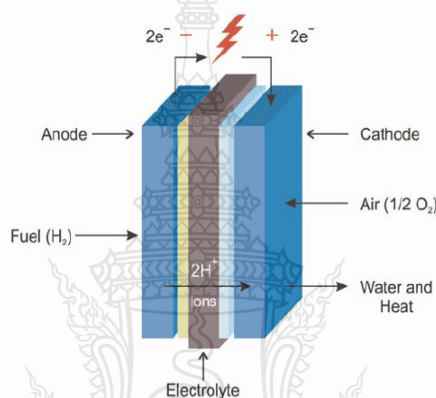


ภาพที่ 2.11 หลักการเซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตหลอม

เป็นประเภทที่เหมาะสมสำหรับสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่ แต่ชนิดนี้จะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 1,112 °F หรือ 600 °C ที่ความดันประมาณ 15 ถึง 150 psig และแต่ละเซลล์ผลิตแรงดันได้ระหว่าง 0.7 และ 1 VDC ทั้งยังสามารถให้อิออน้ำความดันสูงเพื่อมาช่วยผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วยของผสมของเกลือลิเทียมคาร์บอเนตกับเกลือโปแตสเซียมคาร์บอเนตที่เกาะอยู่บนตัวกลาง  $\text{LiAlO}_2$  จะถูกใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในระบบเซลล์เชื้อเพลิง MCFC ก๊าซ  $\text{CO}_2$  ที่ออกมาจากขั้วอะโนดจะถูกใช้ที่ขั้วแคโทด ซึ่งการไหลเวียนกลับของ  $\text{CO}_2$  นี้เป็นสิ่งสำคัญต่อการทำงานของเซลล์ อุณหภูมิการทำงานในระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้จะมีค่าอยู่ในช่วง 500-700 °C ด้วยสภาวะอุณหภูมิที่สูงนี้ปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดจึงไม่จำเป็นต้องมี Pt เป็นคะตะลิสต์ การกัดกร่อนทางเคมีเป็นปัญหาที่ไม่ธรรมดา และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด Nickel Oxide จากขั้วลบ เพื่อทำละลายในอิเล็กโทรไลต์ เกิดการกัดกร่อนทำให้ปริมาณอิเล็กโทรไลต์ลดลง ทำให้โลหะที่ใช้แบ่งเสื่อ และทำให้เกิดการไหลของอิเล็กโทรด โดยผลกระทบที่เกิดจากการกัดกร่อนทั้งหมดนี้ เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง อายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงสั้นลง แต่ถ้าแก้ปัญหาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นทองคำขาว (Platinum) ก็จะสามารถกำจัดปัญหาในจุดนี้ไปได้แต่ราคาของทองคำขาวมีราคาแพง ทำให้ราคาของเซลล์เชื้อเพลิงมีราคาสูงมากจึงไม่นิยมนำมาใช้ อย่างหนึ่งในกรณีที่วัตถุดิบที่ใช้เป็นถ่านหินที่มีธาตุกำมะถันอยู่ การผลิตก๊าซจากถ่านหินโดยปฏิกิริยาก๊าซซัลไฟเคชั่นอาจทำให้เกิด  $\text{H}_2\text{S}$  และ  $\text{COS}$  ซึ่งก๊าซ  $\text{H}_2\text{S}$  อุณหภูมิในการทำงานที่ 1,200 °F (650 °C) กำลังการผลิตไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 10 kW-20 MW

### 2.4.5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cells PEMFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่สามารถใช้ในรถยนต์ได้โดยไม่เพียงแต่สามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊สไฮโดรเจนเท่านั้น แต่ยังสามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวเช่นเมทานอลหรือเอทานอลซึ่งเป็นข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ เพราะการใช้เซลล์เชื้อเพลิงประเภท PEMFC สามารถใช้ของเหลวเป็นเชื้อเพลิงจะทำให้ง่ายต่อการจัดเก็บและการขนส่ง นอกจากนี้เชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวใน PEMFC ยังเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าได้ค่อนข้างว่องไวที่อุณหภูมิต่ำ และไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแลกเปลี่ยนโปรตอนเริ่มต้นจากการอัดก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) เข้าสู่ขั้วบวกของเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้ความดันเพื่อให้ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาไปได้ หลังจากก๊าซไฮโดรเจน ผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาไปแล้วจะทำการปล่อยอะตอมขั้วบวก (H+) ไปสู่ขั้วลบของเซลล์เชื้อเพลิง และปล่อยอิเล็กตรอน (e-) ผ่านขั้วออกมาไปสู่ระบบวงจรภายนอกเพื่อสร้างกระแสและย้อนกลับสู่ขั้วลบของ เซลล์เชื้อเพลิง สำหรับออกซิเจนจะถูกดันผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นกันแต่ผ่านทางขั้วลบแทน โดยทำหน้าที่ดึงอะตอมของ H+ ผ่านชั้นเมมเบรนเข้ามา และรับอิเล็กตรอนอิสระ จากวงจรภายนอก แล้วทำปฏิกิริยากัน ได้ผลลัพธ์คือ โมเลกุลของน้ำ (H<sub>2</sub>O) ดังภาพที่ 2.12

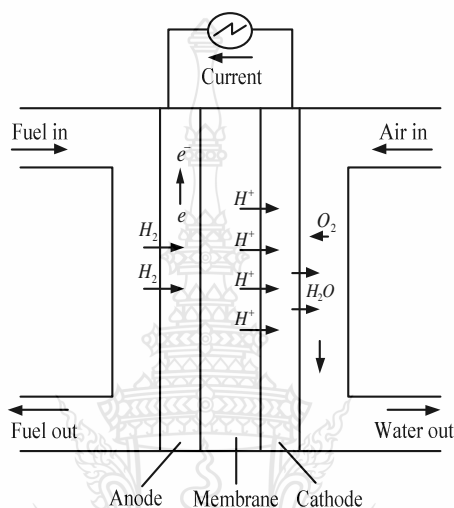
ปฏิกิริยาเคมีของขั้วแอโนด



ปฏิกิริยาเคมีระหว่างขั้วแคโทด

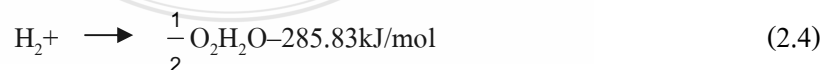


ปฏิกิริยาเคมีรวม



ภาพที่ 2.13 หลักการทำงานเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนเป็นปฏิกิริยาที่ปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งความร้อนหรือเอนทัลปีของการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ปล่อยออกมาจากระบบ คือ ผลต่างระหว่างความร้อนของการเกิดผลิตภัณฑ์กับสารตั้งต้น ซึ่งความร้อนของการเกิดสารผลิตภัณฑ์ (น้ำ) จากปฏิกิริยาเคมีข้างต้นมีค่าเท่ากับ  $-285.83 \text{ kJ/mol}$  และค่าความร้อนของการเกิดสารตั้งต้น (ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน) มีค่าเท่ากับ  $0 \text{ kJ/mol}$  ทำให้สมการที่ 2.3 สามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ 2.4

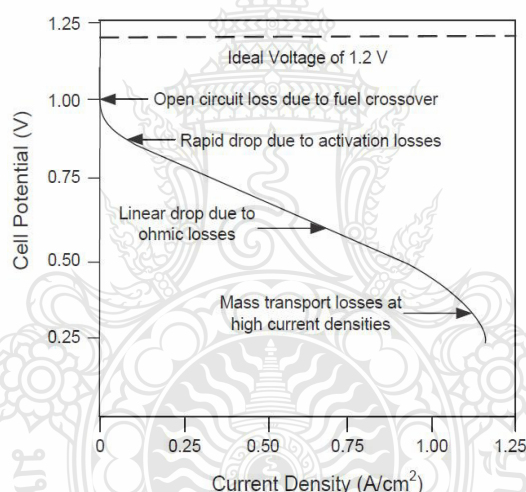


ในสภาพไม่มีโหลดเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์จะให้แรงดัน ประมาณ  $0.8-1.2 \text{ V}$  ที่พิกัดกระแสประมาณ  $0.5 \text{ A/cm}^2$  ดังนั้น จึงต้อง ต่อกันหลายๆ เซลล์เข้าด้วยกันเป็นก้อนเซลล์เชื้อเพลิง หรือที่เรียกว่า Fuel-cell stack เพื่อให้ ได้แรงดันที่สูงขึ้น

## 2.5 ลักษณะสมบัติสถานะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิง

แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในภาวะที่ดีที่สุดตามทฤษฎีควรจะเป็น 1.2 V แต่อย่างไรก็ตาม จะพบว่าความจริงว่าแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงจะสำเร็จเมื่อได้แรงดันไฟฟ้าที่สูงที่สุดจากผลผลิต เมื่อสื่อนำวงโคจรและแรงดันไฟฟ้าก็จะต่ำลง เมื่อวัตต์คูณที่ได้เพิ่มขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงในการดำเนินงานจริงนั้นจะเป็นระบบที่ผันกลับไม่ได้ หรือโดยทั่วไปมักเรียกว่า กระบวนการโพลาไรเซชัน (Polarization) เป็นภาวะที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการตามความเป็นจริงมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี หรือเกิดค่าแรงดันไฟฟ้าเกินตัวที่ต้องนำมาหักลบ โดยแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง ( $V_{cell}$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.5

$$V_{cell} = V_{open} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc} \quad (2.5)$$



ภาพที่ 2.14 สถานะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC

โดยที่  $V_{open}$  คือศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐาน หรือศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี  $V_{act}$  คือศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาไรเซชันเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี  $V_{ohmic}$  คือศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า  $V_{conc}$  คือ ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาไรเซชันเนื่องจากการถ่ายโอนมวล โดยศักย์ไฟฟ้าเกินตัวทั้ง 3 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{open} = V_o - \left[ \left( \frac{RT}{nF} \right) \ln \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \times \sqrt{P_{O_2}}} \right) \right] \quad (2.6)$$

โดยมีปัจจัยที่สำคัญดังในสมการที่ 2.6 สมการของ Nernst สามารถคำนวณค่าแรงดันขณะที่ไม่มีโหลดจากปฏิกิริยาทางเคมีได้เมื่อ  $R$  คือค่าคงที่ของก๊าซซึ่งค่าเท่ากับ  $8.3144 \text{ J/mol}$ ,  $F$  คือค่าคงที่ของฟาราเดย์  $96,487 \text{ C/mol}$ ,  $V_0$  คือค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์เชื้อเพลิง  $T$  คืออุณหภูมิ หน่วยองศาเคลวิน  $n$  คือจำนวนของอิเล็กตรอนต่อโมเลกุล  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  คือค่าความดันของน้ำ  $P_{\text{H}_2}$  คือค่าความดันของไฮโดรเจน  $P_{\text{O}_2}$  คือค่าความดันของออกซิเจน

สภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ดังภาพที่ 2.14 พบว่าเกิดการสูญเสียมีผลให้แรงดันลดลง ซึ่งมีทั้งหมดสามช่วงด้วยกันช่วงแรกจะเกิดการสูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ศักย์ไฟฟ้าส่วนหนึ่งถูกใช้ไปกับการขับเคลื่อนปฏิกิริยาเคมี ดังสมการที่ 2.7

$$V_{act} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left( \frac{I_{dc}}{I_0} \right) \quad (2.7)$$

ช่วงที่สองการสูญเสียแรงดัน มีค่าระหว่าง  $0.6-0.7 \text{ VDC}$  จะเป็นลักษณะเชิงเส้นเนื่องจากเกิดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic Polarization) คือการสูญเสียเนื่องมาจากความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดและเมมเบรน  $R_{fc}$  ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทานไอออนิกความต้านทานอิเล็กโทรนิกส์และความต้านทานหน้าสัมผัสของตัวนำหาได้จากสมการที่ 2.8

$$V_{ohmic} = I_{dc} R_{fc} \quad (2.8)$$

ช่วงสุดท้ายคือการสูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานอันเกิดจากความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ลดต่ำลงเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส เพราะสารถูกใช้ในอัตราที่สูง แต่การถ่ายเทมวลสารเข้าไปทำปฏิกิริยาเป็นไปได้ช้าจากสมการที่ 2.9

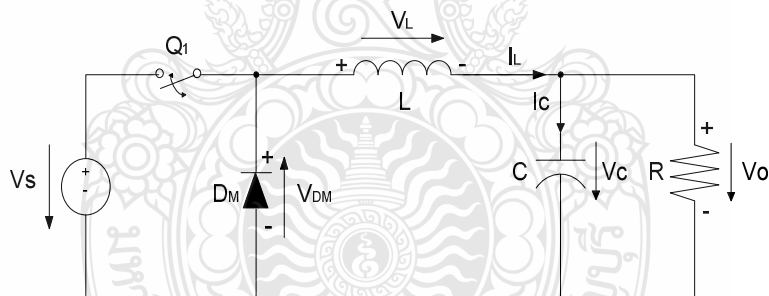
$$V_{conc} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left( 1 - \frac{I_{dc}}{I_{limit}} \right) \quad (2.9)$$

## 2.6 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง [5]

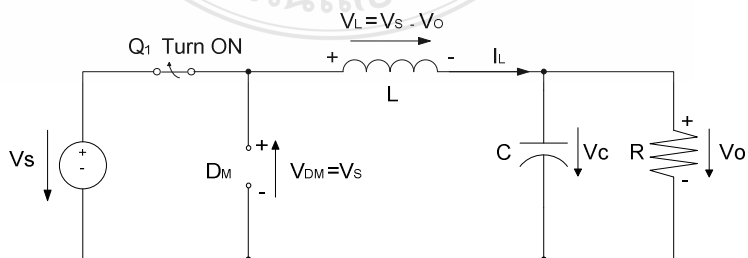
วงจร DC-DC Converter (วงจร DC Chopper) เป็นวงจรที่ใช้แปลงผันกำลังไฟตรง ด้วยอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถหยุดนำกระแสได้ด้วยสัญญาณควบคุม (Self Commutated Switching Devices) เช่น GTO Thyristor, Power Transistor, Power MOSFET, IGBT, หรืออื่นๆ วงจรแปลงผันกำลังไฟตรงอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่าเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟตรงแบบสวิตช์โหมด (Switch Mode DC-DC Converter) เนื่องจากใช้หลักการเปิด-ปิดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในวงจร

### 2.6.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟตรงแบบทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Buck Converter)

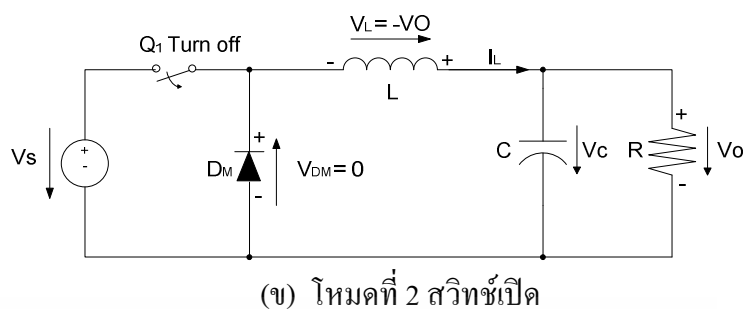
หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟตรงแบบทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เป็นการออกแบบเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตมีปริมาณต่ำกว่าด้านอินพุต และมีปริมาณแรงดันตามที่ต้องการ โดยเริ่มต้นจากเงื่อนไขที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นสามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ การวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด จะต้องวิเคราะห์ในสถานะอยู่ตัว วงจรสมมูลของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังภาพที่ 2.15 และวงจรการทำงานของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.15 วงจรสมมูลของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



(ก) โหมดที่ 1 สวิตช์ปิด



ภาพที่ 2.16 วงจรการทำงานของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

### 2.6.2 วิเคราะห์เมื่อสวิตช์ปิด

จากภาพที่ 2.16 (ก) เป็นการทำงานโหมดที่ 1 จะได้สัญญาณต่างๆ ดังปรากฏในภาพที่ 2.17 ( $0 < t \leq t_{on}$ ) มอสเฟต  $Q_1$  ทำงานสวิตช์ปิด ( $t = 0$ ) กระแสอินพุตไหลผ่าน  $Q_1$  และตัวเหนี่ยวนำ ทำให้กระแสของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจาก  $I_1$  ที่  $t = 0$  เป็นเวลา  $I_2$  ที่  $t = t_1$  โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะเท่ากับกระแสที่ไหลผ่าน  $R$  และแรงดันที่แหล่งจ่ายจะเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำบวกกับแรงดันที่ตกคร่อม  $R$  ดังสมการที่ 2.10

$$V_s = V_L + V_o \quad (2.10)$$

หรือ

$$V_L = V_s - V_o$$

แต่

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

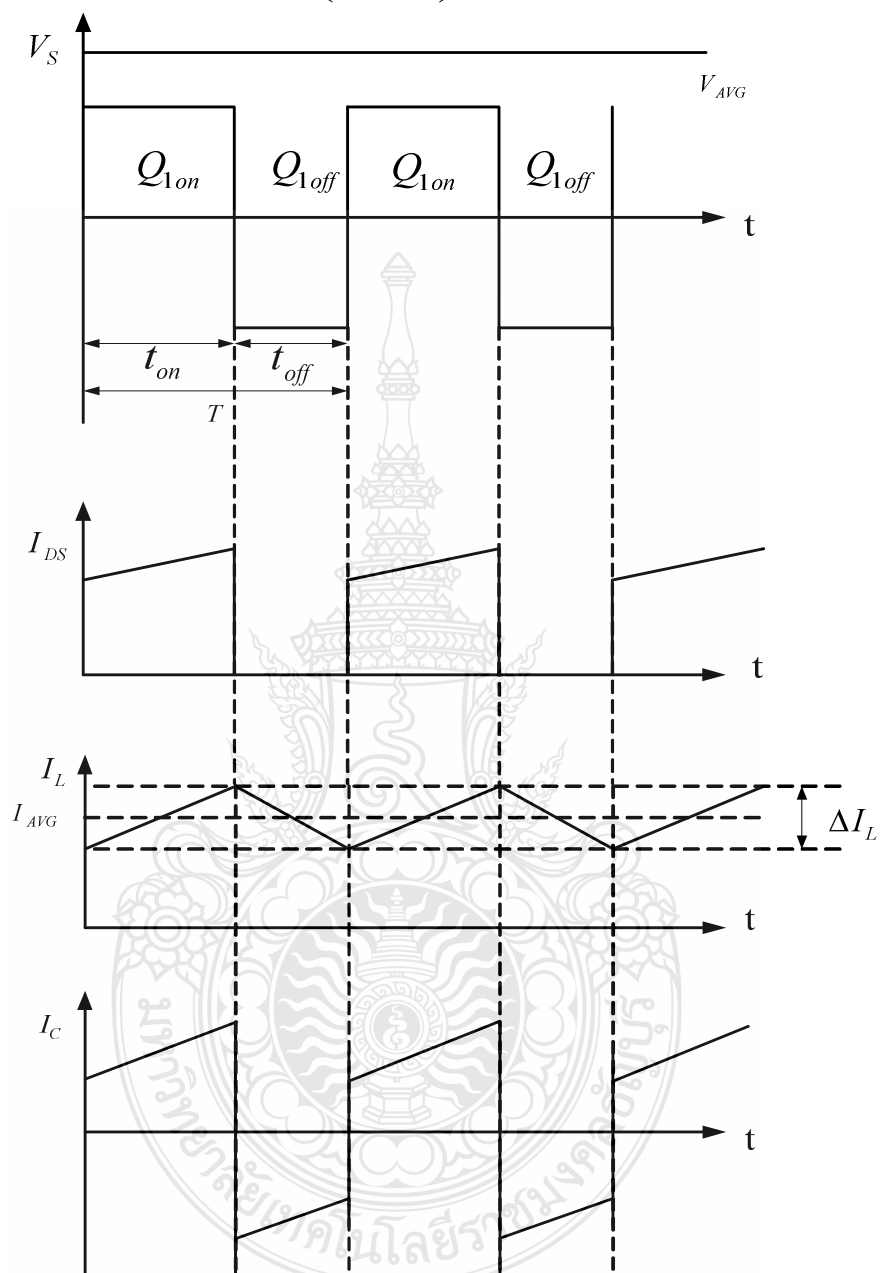
จะได้

$$L \frac{di_L}{dt} = V_s - V_o$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.11)$$

$dt$  ในกรณีอยู่ในช่วงเวลานำกระแส คือ  $dt = DT$

$$\Delta_{iL,on} = \left( \frac{V_S - V_o}{L} \right) DT \quad (2.12)$$



ภาพที่ 2.17 สัญญาณของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



### 2.6.3 วิเคราะห์เมื่อสวิตช์เปิด

จากภาพที่ 2.16 (ข) เป็นการทำงาน โหมด 2 จะได้สัญญาณ ดังปรากฏในภาพที่ 2.17 ( $t_1 < t \leq t_{off}$ ) มอสเฟต  $Q_1$  ทำงานสวิตช์เปิด ( $t = t_1$ ) แรงดันเหนี่ยวนำย้อนกลับของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน  $R$  ทำให้เอาต์พุตมีค่ามากขึ้นจนทำให้  $D_M$  ทำงานจึงทำให้ตัวเหนี่ยวนำคายพลังงานออกมาเปรียบเสมือนเป็นแหล่งจ่ายตัวหนึ่ง ทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวต้านทาน ดังสมการที่ 2.13

$$V_D = V_L + V_O \quad (2.13)$$

แต่  $V_D = 0V$  จะได้

$$V_L + V_O = 0$$

$$L \frac{d_{iL}}{dt} = \frac{\Delta_{iL,off}}{\Delta t} = \frac{-V_O}{L} \quad (2.14)$$

$dt$  ในกรณีอยู่ในช่วงเวลาหยุดนำกระแส คือ  $dt = (1-D)T$  สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 2.15

$$\Delta_{iL,off} = -\left(\frac{V_O}{L}\right)(1-D)T \quad (2.15)$$

แทนค่า  $t_{on} = DT$  และ  $t_{off} = (1-D)T$  ลงในสมการที่ 2.16 จะได้

$$\Delta_{iL,on} + \Delta_{iL,off} = 0$$

$$\left(\frac{V_s - V_O}{L}\right)DT + \left[\left(\frac{-V_O}{L}\right)(1-D)T\right] = 0$$

$$\left(\frac{V_s - V_O}{L}\right) - \left(\frac{V_O}{L}\right)(1-D) = 0$$

$$(V_s - V_O)D - (V_O)(1-D) = 0$$

$$V_s D - V_O D - V_O(1-D) = 0$$

$$V_s D - V_o D - V_o + V_o D = 0$$

$$\frac{V_o}{V_s} = D \quad (2.16)$$

#### 2.6.4 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดสำหรับวงจรทอนระดับแรงดัน

การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟตรงที่คี่นั้น กระแสขาออกและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำควรอยู่ในโหมดต่อเนื่อง การหาค่าตัวเหนี่ยวนำควรเริ่มต้นจากการคำนวณหาขนาดค่าที่เล็กที่สุดของตัวเหนี่ยวนำที่สามารถทำให้วงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องได้เสียก่อน โดยการคำนวณหาค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในสภาวะวิกฤติ ซึ่งเป็นสภาวะที่  $I_{L,\min} = 0$

$$I_{L,\max} = I_L + \frac{\Delta_{iL}}{2} \quad (2.17)$$

$$= I_L + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{V_o}{L} \right) (1-D) T \right] \quad (2.18)$$

$$I_{L,\min} = I_L - \frac{\Delta_{iL}}{2} \quad (2.19)$$

$$= I_L - \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{V_o}{L} \right) (1-D) T \right] \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.21)$$

$I_L$  เป็นค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นค่ากระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดขณะสภาวะวิกฤติที่ ( $I_{L,\min} = 0$ ) สามารถเขียนจากสมการที่ 2.18 และสมการที่ 2.21 ได้ดังนี้

$$I_{L,\min} = \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2} \left[ \frac{(1-D)T}{L} \right] = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{1}{R} = \left[ \frac{(1-D)}{2L.f} \right] = 0$$

จะได้ว่า

$$L_{\min} = \left[ \frac{(1-D)R}{2.f} \right] = 0 \quad (2.23)$$

และ

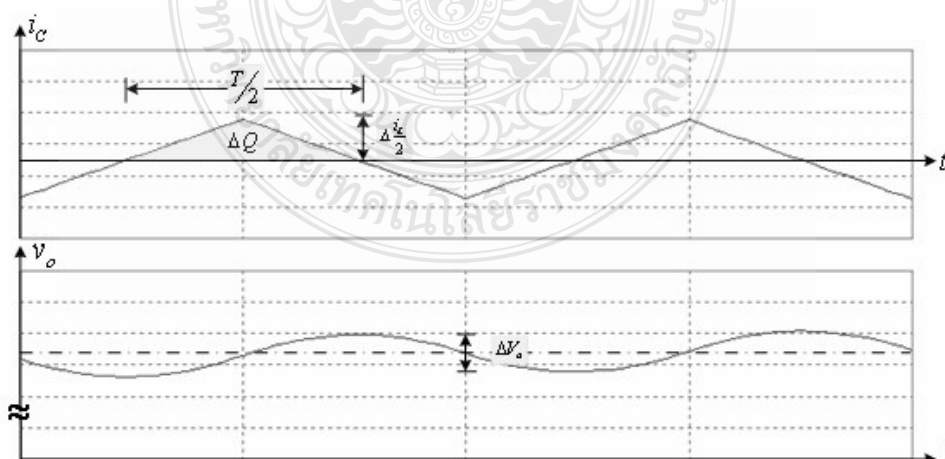
$$f = \left[ \frac{(1-D)R}{2.L_{\min}} \right] \quad (2.24)$$

เมื่อ  $f = \frac{1}{T}$  เป็นความถี่ของสัญญาณควบคุมสวิตช์

จากสมการที่ 2.23 ใช้คำนวณเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดเล็กสุดที่ทำให้วงจรยังทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องได้ ซึ่งในเชิงปฏิบัติสามารถใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่สูงกว่านี้ได้เช่นกัน แต่ไม่ควรสูงมากเกินไป และเมื่อกำหนดค่าตัวเหนี่ยวนำที่จะใช้แล้วจึงใช้สมการที่ 2.24 คำนวณหาค่าความถี่สวิตช์ของสัญญาณควบคุม จากการพิจารณาสมการที่ 2.16 จะเห็นว่าค่า Duty Cycle ใช้ในการควบคุมขนาดแรงดันขาออก และจากสมการที่ 2.23 จะเห็นว่าสามารถใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็กลงได้ ถ้าหากความถี่สวิตช์ของวงจรมีค่าสูงขึ้น

### 2.6.3 อัตราระลอกคลื่นของแรงดันขาออก (Output Voltage Ripple)

จากรูปคลื่นกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุและแรงดันขาออกในวงจรดังแสดงในภาพที่ 2.18 จะเห็นว่าการกระเพื่อมของแรงดันขาออกสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 2.18 รูปคลื่นกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุและแรงดันขาออกในวงจรทอนระดับแรงดัน

โดยทั่วไปการกระเพื่อมของระลอกคลื่นแรงดันขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันจะสัมพันธ์กับขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจร ในทางปฏิบัติจะไม่นิยมใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่ติดตั้งมาก ขนาดของตัวเก็บประจุซึ่งสัมพันธ์กับค่าระลอกคลื่นแรงดันขาออกนี้สามารถคำนวณได้โดยเริ่มต้นจากสมการกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังนี้

$$i_c = i_L - i_R \quad (2.25)$$

ในช่วงเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ซึ่งค่าประจุไฟฟ้าที่ได้จะเท่ากับ

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $\Delta V_o$  เป็นค่ายอดคลื่นถึงยอดคลื่น (Peak-Peak) ของระลอกคลื่นแรงดันขาออก  
 $\Delta Q$  เป็นการเปลี่ยนแปลงของค่าประจุไฟฟ้า ซึ่งในที่นี้จะหมายถึงพื้นที่ในสามเหลี่ยมที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุกับเวลา ซึ่งจะได้ว่า

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left( \frac{T}{2} \right) \left( \frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T \Delta i_L}{8} \quad (2.27)$$

แทนค่า  $\Delta Q$  จากสมการที่ 2.27 ลงในสมการที่ 2.26 จะได้

$$\Delta V_o = \frac{T \Delta i_L}{8C} \quad (2.28)$$

แทนค่า  $\Delta i_L = \left( \frac{V_o}{L} \right) (1-D)T$  จากสมการที่ 2.12 โดยพิจารณาเฉพาะขนาด จะได้

$$\Delta V_o = \frac{T}{8C} \cdot \left( \frac{V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (2.29)$$

$$V_{ripple} = \frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{(1-D)T^2}{8LC} = \frac{(1-D)}{8LC \cdot f^2} \quad (2.30)$$

จากการพิจารณาอัตราระลอกคลื่นในสมการที่ 2.30 จะเห็นว่าค่าระลอกคลื่นของแรงดันจะมีค่าน้อยลง ถ้าวงจรมีค่า Duty Cycle เข้าใกล้หนึ่ง ( $D \rightarrow 1$ ) หรือโดยการเลือกใช้ค่าความถี่สวิตช์ ( $f$ ) สูงๆ

จากการพิจารณา กำลังไฟฟ้าขาเข้าจะเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าขาออก

$$P_{in} = P_o \quad (2.31)$$

เมื่อ  $P_{in}$  เป็นค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของวงจร

$P_o$  เป็นค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของวงจร

ซึ่งจะเห็นว่า  $V_{in} \cdot I_{in} = V_o \cdot I_o$  จากสมการที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของวงจรจะเหมือนกับกรณีของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงเปรียบได้ว่าวงจรทอนระดับแรงดัน มีวงจรสมมูลเป็นหม้อแปลงไฟตรงแบบทอนแรงดัน

## 2.7 การออกแบบวงจรกำลังของวงจรแปลงผันกำลังไฟตรง

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า มีหน้าที่สำคัญมากในการเก็บพลังงานและคายพลังงานในวงจรแปลงผันกำลังไฟตรงแบบทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

### 2.7.1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ข้อกำหนดในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำสวิตซ์ซึ่ง

- 1) ขนาดและรูปร่างรวมทั้งความถี่ของกระแสและแรงดัน
- 2) กำลังสูญเสีย ประสิทธิภาพหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น
- 3) คุณสมบัติทางไฟฟ้าและเชิงกลอื่น

ขีดจำกัดในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำสวิตซ์ซึ่ง

- 1) ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัวของแกนเหล็ก
- 2) กำลังงานสูญเสียในลวดทองแดงหรือแกนเหล็ก
- 3) คุณสมบัติอื่นๆ เช่น Permeability ( $\mu$ ) เป็นต้น

โดยมีสมการของการออกแบบดังนี้

จากขีดจำกัดของแกนเหล็ก (Saturation or Core loss)

$$B_{\max} = \frac{\phi_{\max}}{S} = \frac{\lambda_{\max}}{SN} = \frac{LI_{\text{peak}}}{SN} \quad (2.32)$$

- เมื่อ  $B_{\max}$  คือ ความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก พิจารณาที่ 0.1 – 0.6 (เทสลา: T)  
 $\phi_{\max}$  คือ เส้นแรงแม่เหล็ก (เวเบอร์: Wb)  
 $S$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็ก (ตารางมิลลิเมตร:  $mm^2$ )  
 $N$  คือ จำนวนรอบของลวดที่พันรอบแกน  
 $\lambda_{\max}$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องขดลวดทั้งหมด  
 $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (เฮนรี: H)  
 $I_{peak}$  คือ ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (แอมแปร์: A)  
 จากขีดจำกัดของลวดทองแดง โดยคำนึงถึงความสูญเสีย (Copper Loss:  $P_{cu}$ )

$$R_{cu} = I_{rms}^2 R \quad (2.33)$$

- เมื่อ  $P_{cu}$  คือ ค่าความสูญเสียในขดลวด (วัตต์: W)  
 $I_{rms}$  คือ ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านขดลวด (แอมแปร์: A)  
 $R$  คือ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (โอห์ม:  $\Omega$ )

เมื่อ  $R$  หาได้จาก

$$R = \frac{l}{A_w} \quad (2.34)$$

- เมื่อ  $\rho$  คือ ค่าความต้านทานจำเพาะสำหรับทองแดงมีค่า  $1.724 \times 10^{-8} \Omega / m$   
 $l$  คือ ความยาวของลวดตัวนำ (เมตร: m)  
 $A_w$  คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (ตารางมิลลิเมตร:  $mm^2$ )

### 2.7.2 การเลือกหรือกำหนดขนาดแกนเหล็กโดยใช้วิธีการคำนวณแบบ $A_p$ (Area Approach)

วิธีนี้เป็นการออกแบบที่ใช้ค่า  $T_{rise}$  ซึ่งอาศัยความหนาแน่นของกระแสของลวดตัวนำ ( $J = 100 - 1000 A / cm^2$ ) โดยคำนวณหาขนาดของแกนเหล็กดังนี้

$$N = \frac{LI_{peak}}{B_{\max} S} \quad (2.35)$$

$$kW = \frac{NI_{rms}}{J} = NA_w \quad (2.36)$$

แทนค่า  $N$  จะได้

$$kW = \frac{LI_{peak} I_{rms}}{B_{max} JS}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$A_p = WS = \frac{LI_{peak} I_{rms}}{B_{max} Jk} \quad (2.37)$$

เมื่อ  $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการนำมาออกแบบ (H)

$I_{peak}$  คือ ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (A)

$I_{rms}$  คือ ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (A)

$k$  คือ ขีดจำกัดของช่องหน้าต่างมีค่าระหว่าง 0.3-0.9

$W$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่ใช้พันขดลวด ( $mm^2$ )

### 2.7.3 ขั้นตอนการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดความหนาแน่นของกระแส ( $J$ ) ในช่วง  $2.5-10 A/mm^2$  ซึ่งขึ้นอยู่กับการระบายความร้อนกำหนดค่า  $k$  อยู่ในช่วง 0.3 - 0.6 ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของฉนวนที่หุ้มลวด และพื้นที่ช่องว่างระหว่างลวด

หาค่า  $\Delta I$  โดยที่  $\Delta I = 2(I_{max} - I)$

หาค่า  $\Delta B$  โดยที่  $\Delta B = \Delta I \times \Delta B_{max}$  (สำหรับแกนเฟอร์ไรต์  $\Delta B_{max} = 0.3T$ )

หาค่า  $B_{max}$  โดยที่  $B_{max} = \Delta B_{max} - \frac{\Delta B}{2}$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหา  $A_p$  จากสมการ

$$A_p = \frac{LI_{peak} I_{rms}}{B_{max} JK} \quad (2.38)$$

โดยที่  $L$  มีหน่วยเป็น Henry,  $I$  มีหน่วยเป็น Ampere,  $B$  มีหน่วยเป็น Tesla,  $J$  มีหน่วยเป็น  $A/m^2$  และ มีหน่วยเป็น  $mm^3$  หรือ  $mm^4$  (ตามขนาดของแกน)

ขั้นตอนที่ 3 เลือกขนาดของแกนเหล็กที่มี  $A_p$  ใกล้เคียงกับค่า  $A_p$  ที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณจำนวนรอบของขดลวดจากสมการที่ 2.34

$$N = \frac{LI_{peak}}{B_{max} S} \quad (2.39)$$

เมื่อ  $S$  มีหน่วยเป็น  $mm^2$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดจากสมการนี้

$$A_w = \frac{I_{rms}}{J} \quad (2.40)$$

คำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดได้จาก

$$d = \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} \quad (2.41)$$

เลือกใช้ลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับค่า  $d$  ที่คำนวณได้

ขั้นตอนที่ 6 ทดสอบว่าสามารถพันขดลวดลงใน  $W$  ได้หรือไม่ จากสมการ

$$W = (N \times \text{พื้นที่หน้าตัดขดลวดที่ใช้จริง}) / k$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาค่าความกว้างของ Air Gap ( $l_g$ ) ได้จากสมการ

$$l_g = \frac{\mu_0 N^2 S}{2L} \quad (2.42)$$

เมื่อพันขดลวดเสร็จแล้วทำการวัดค่า  $L$  ที่ได้ว่าตรงตามต้องการหรือไม่ ถ้าไม่ได้ตามต้องการให้ปรับขนาดความกว้างของ Air Gap จนกระทั่งได้ค่า  $L$  ตามต้องการ

#### 2.7.4 การเลือกตัวเก็บประจุในวงจรกำลังของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ในวงจรกำลังของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตัวเก็บประจุกำลังมีหน้าที่เก็บพลังงานในรูปประจุไฟฟ้าและทำการจ่ายแรงดันออกให้กับเอาต์พุตหรือคายประจุไฟฟ้าเมื่อมอสเฟตอยู่ในช่วงเวลา Turn On และเก็บประจุเมื่ออยู่ในช่วงเวลา Turn Off โดยจะต้องเลือกตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดันได้เท่ากับแรงดันทางด้านเอาต์พุต หากเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะช่วยให้ส่วนของการลดแรงดันกระแสเพื่อทางด้านเอาต์พุต



การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุจะพิจารณาได้จากสมการที่ 2.43 ทั้งนี้จะสัมพันธ์กับอัตราระลอกคลื่นของแรงดันขาออก (Output Voltage Ripple) ค่าตัวเหนี่ยวนำ ( $L$ ) ค่าความถี่ไซเคิลสูงสุด และความถี่ในการสับสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟตรง ( $f_s$ )

$$C = \frac{(1-D)}{8L \cdot f^2 \cdot V_{ripple}} \quad (2.43)$$

### 2.7.5 เพาเวอร์มอสเฟต (POWER MOSFET) อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ซึ่ง

มอสเฟตหรือที่รู้จักกันในนามเพาเวอร์มอสเฟตสามารถทำงานได้ดี ที่ความถี่สูง ตั้งแต่ 20 kHz ไปจนถึงประมาณ 200-400 kHz เวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น และการพัฒนาในปัจจุบันมีแนวโน้มจะทำให้เพาเวอร์มอสเฟตทำงานได้ที่ความถี่สูงขึ้นไปอีก ซึ่งจะเป็นผลดีในการลดขนาดของคอนเวอร์เตอร์ ในส่วนวงจรขับของเพาเวอร์มอสเฟตนั้นสามารถทำได้ง่าย เพาเวอร์มอสเฟตจึงเข้ามาแทนที่ไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ได้อย่างรวดเร็วในระบบสวิตช์ซึ่งเพาเวอร์ซัพพลาย

กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน จะเป็นไปได้ 2 ลักษณะคือกำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะและกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแส เพาเวอร์มอสเฟตจะมีช่วงเวลาเริ่มนำกระแส และช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสสั้นมากเพราะตาม โครงสร้างของเพาเวอร์มอสเฟตจะไม่มีการสะสมประจุเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามเพาเวอร์มอสเฟตจะมีค่าความต้านทานขณะนำกระแสค่อนข้างสูง การสูญเสียกำลังขณะนำกระแสจึงสูงกว่าไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ถึงแม้ว่าช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแสของเพาเวอร์ มอสเฟตจะค่อนข้างสั้นแต่โดยทั่วไปเพาเวอร์มอสเฟตมักใช้งานที่ความถี่สูง การคิดค่ากำลังงานสูญเสียขณะทำงานจำเป็นต้องนำค่ากำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะมาคิดด้วย และเนื่องจากช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (Turn Off Time) กับช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (Turn On Time) ของเพาเวอร์มอสเฟตมีค่าใกล้เคียงกันจึงต้องนำมาคิดทั้งสองช่วงเวลาดังนั้นกำลังงานสูญเสียเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน  $P_D$  จะมีค่าเท่ากับ

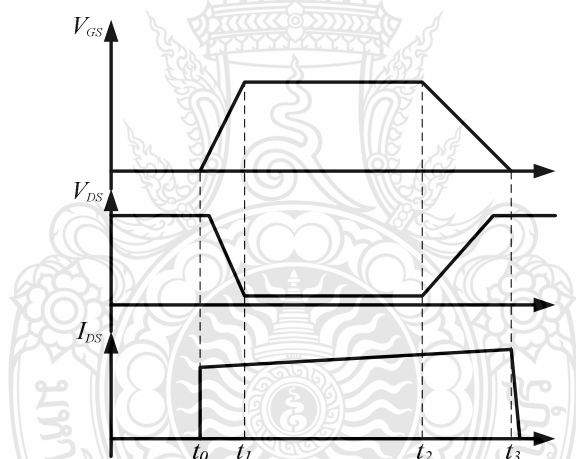
$$P_D = P_{SW(on)} + P_{SW(off)} + P_C$$

$$P_{SW(on)} = \frac{0.5 I_{PK(on)} V_{in} t_r}{T}$$

$$P_{SW(off)} = \frac{0.5 I_{PK(on)} V_{in} t_f}{T}$$

$$P_C = I_{D,rms}^2 \times R_{DS} T_j \quad (2.44)$$

เมื่อ	$P_{SW(on)}$	คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
	$P_{SW(off)}$	คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มหยุดนำกระแส
	$P_C$	คือ กำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
	$I_{PK(on)}$	คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มนำกระแส
	$I_{Drms}$	คือ ค่ากระแส rms
	$R_{DS}$	คือ ค่าความต้านทานระหว่างเดรนกับซอร์ส
	$T_{(j)}$	คือ อุณหภูมิรอยต่อสูงสุดขณะทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต
	$t_r$	คือ ช่วงเวลาเริ่มนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
	$t_f$	คือ ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

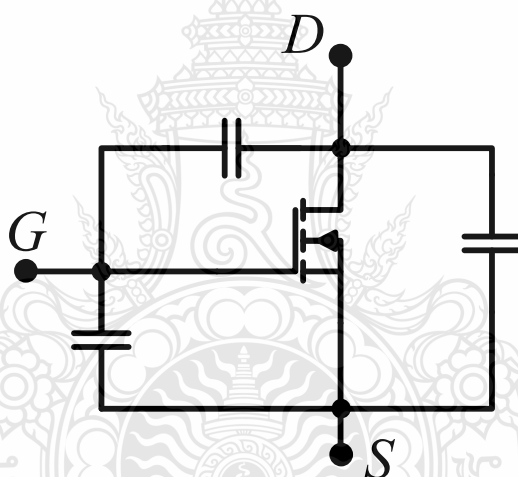


ภาพที่ 2.19 ลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตเมื่อเริ่มนำและหยุดนำกระแส

การขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสที่แตกต่างจากการขับกระแสไบแอสในไบโพลาร์ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เนื่องจากมีเงื่อนไขในการไบแอสแตกต่างกัน สำหรับไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กระแสจะไหลผ่านคอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์ได้ก็ต่อเมื่อมีกระแสไบแอสไหลผ่านที่เบสและอิมิตเตอร์ แต่เพาเวอร์มอสเฟตจะมีกระแสไหลผ่านเดรนและซอร์สได้ก็ต่อเมื่อ แรงดันตกคร่อมที่ขาเกตและซอร์สมีค่าอย่างต่ำเท่ากับค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) ของเพาเวอร์มอสเฟต แต่ใช้กระแสต่ำในการขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสจึงทำงานง่าย และยุ่งยากน้อยกว่า

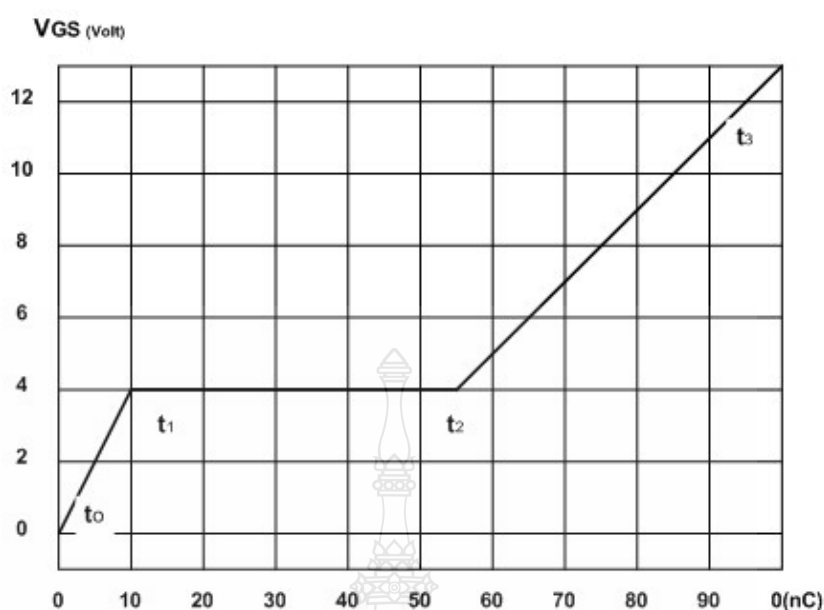
ไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ อย่างไรก็ตามเพื่อให้เพาเวอร์มอสเฟตทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงจำเป็นต้องศึกษาเงื่อนไขต่างๆ สำหรับการบังคับให้เพาเวอร์มอสเฟตนำกระแสเป็นอันดับแรกเสียก่อน

เนื่องจากลักษณะโครงสร้างภายในตัวเพาเวอร์มอสเฟตเหมือนมีตัวเก็บประจุต่ออยู่รอบๆ ขาต่างๆ ของเพาเวอร์มอสเฟตดังภาพที่ 2.20 ตัวเก็บประจุเหล่านี้ บังคับให้เพาเวอร์มอสเฟตต้องชาร์จประจุเข้าไปที่ตัวเก็บประจุเสียก่อน เพื่อให้แรงดันตกคร่อมที่ขาเกต  $V_{GS}$  มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันขีดเริ่ม เพาเวอร์มอสเฟตจึงเริ่มนำกระแส ในทางกลับกันการหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตจะต้องทำให้ตัวเก็บประจุทำการคายประจุออกไปจนแรงดันที่ตกคร่อมที่ขาเกต  $V_{GS}$  มีค่าลดลงต่ำกว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม เพาเวอร์มอสเฟตจึงหยุดนำกระแส โดยทั่วไปแล้วค่าความจุของตัวเก็บประจุในตัวเพาเวอร์มอสเฟตนี้เองจะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์มอสเฟต



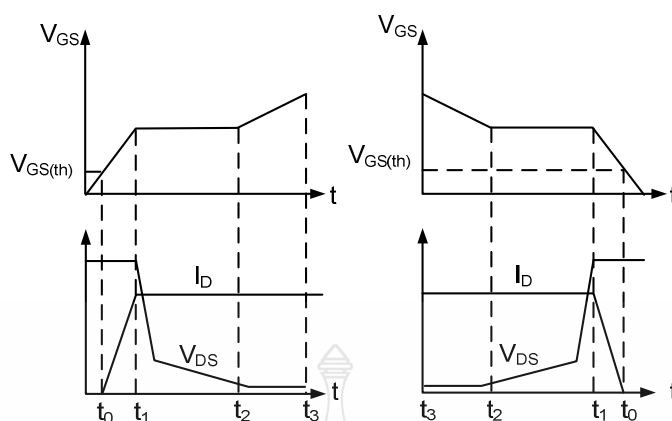
ภาพที่ 2.20 ตัวเก็บประจุแฝงที่ต่ออยู่ที่ขาต่างๆ ภายในตัวเพาเวอร์มอสเฟต

ปกติแล้วผู้ผลิตมักจะให้กราฟของค่าแรงดัน  $V_{GS}$  ที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าประจุสะสมที่ขาเกตเพิ่มขึ้นหรือที่เรียกว่า Gate Charge Chart มาในคู่มือมอสเฟตด้วย กราฟนี้มีประโยชน์มาก ในการคำนวณค่ากระแสไบแอสเกต และเวลาในการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์มอสเฟต



ภาพที่ 2.21 ตัวอย่างของ Gate Charge Chart

เมื่อเพาเวอร์มอสเฟตเริ่มชาร์จประจุที่ขาเกตจนกระทั่งพ้นช่วงเวลาหน่วงก่อนเริ่มนำกระแส เมื่อแรงดันที่ขาเกตมากกว่า แรงดันขีดเริ่ม ( $V_{GS(th)}$ ) จึงเริ่มมีกระแสไหลผ่านเดรนและซอร์สที่เวลา  $t_0$  ของแรงดันจะยังไม่ลดลงจนกว่าจะผ่านเวลาเท่ากับ  $t_1$  แรงดันตกคร่อมเดรนและซอร์ส  $V_{DS}$  จึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจากค่าแรงดัน ที่ประมาณ ร้อยละ 90 จนเหลือเพียงร้อยละ 10 ของค่าแรงดันตกคร่อม  $V_{DS}$  สูงสุด เพาเวอร์มอสเฟตจะนำกระแสได้อย่างเต็มที่ในช่วงเวลาเริ่มนำกระแส  $t_1$  ถึง  $t_2$  นี้เอง และแรงดันที่ตกคร่อมขาเกต  $V_{GS}$  จะคงที่จนกว่าเพาเวอร์มอสเฟตจะสามารถนำกระแสได้อย่างเต็มที่ ดังแสดงในภาพที่ 2.21 ในช่วงเวลาสะสมประจุส่วนเกิน ค่าความต้านทานระหว่างเดรนและซอร์ส จะมีค่าลดลงได้เรื่อยๆ หากมีการสะสมประจุต่อไป ในช่วงเวลา  $t_1$  ถึง  $t_2$  แต่ประจุสะสมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการหน่วงขณะเริ่มหยุดนำกระแส เนื่องจากเพาเวอร์มอสเฟตจะต้องใช้เวลามากในการคายประจุส่วนเกินทิ้งไป ดังนั้นการขับเพาเวอร์มอสเฟตที่ขาเกตด้วยแรงดันสูงเกินความจำเป็นจะทำให้ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.22 ลักษณะการชาร์จประจุที่ขาเกตตามเวลาที่มีผลต่อการเริ่มนำกระแสและผลเมื่อเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

เนื่องจากเพาเวอร์มอสเฟตไม่เกิดประจุสะสมขึ้นขณะนำกระแส การหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตจึงทำได้ง่าย ๆ ด้วยการคายประจุที่ขาเกตทิ้งไปเช่นเดียวกับขณะเริ่มนำกระแส และถ้าขนาดกระแสเพื่อชาร์จประจุและคายประจุมีค่าเท่ากัน ช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสจะมีค่าเท่ากันด้วยยกเว้นหากมีประจุสะสมมากในช่วงเวลา  $t_2$  ถึง  $t_3$  การหยุดนำกระแสจะมีช่วงเวลานับเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องใช้เวลาส่วนหนึ่งในการคายประจุส่วนเกินทิ้งไป จากภาพที่ 2.22 เพาเวอร์มอสเฟตแต่ละเบอร์ จะนำมาหาค่าช่วงเวลาเริ่มนำกระแส  $t_r$  และช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส  $t_f$  ได้จากสมการที่ 2.45

$$t = \frac{Q_G}{I_G} \quad (2.45)$$

เมื่อ  $Q_G$  คือ ค่าประจุที่ได้จากกราฟ มีหน่วยเป็น คูลอมบ์  
 $I_G$  คือ ค่ากระแสที่ใช้ชาร์จประจุที่ค่ากระแสคงที่ มีหน่วยเป็น แอมป์

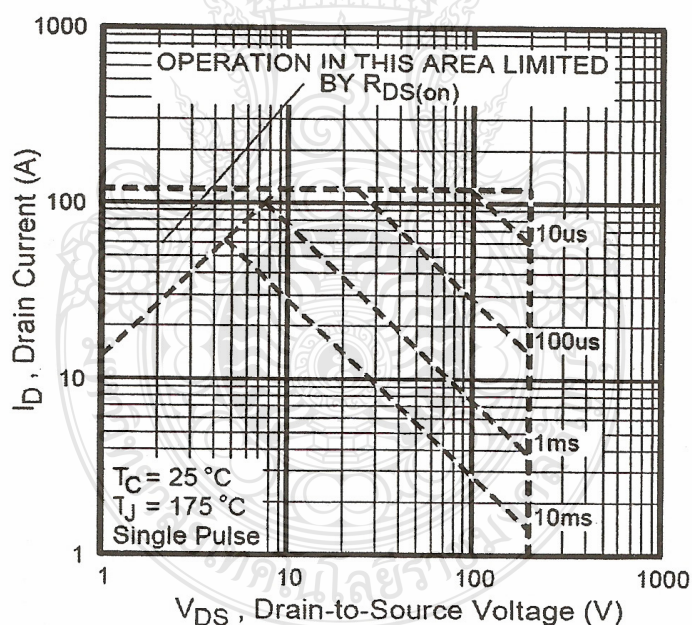
กราฟ Gate Charge Chart ที่ได้จากคู่มือ ปกติในการวัดผู้ผลิตจะกำหนดให้กระแสเกต  $I_G$  สำหรับชาร์จประจุค่าคงที่ในการใช้งานจริงแล้ววงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตอาจให้ค่า  $I_G$  ไม่คงที่ จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลทีนอกเหนือจากข้อมูลใน Gate Charge Chart จะเห็นได้ว่าการขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสได้นั้น จะต้องมีการชาร์จประจุและคายประจุที่ขาเกต วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟต

จะต้องมีลักษณะของการจ่ายและรับกระแส (Source and Sink) ได้ที่ประมาณ 200 ถึง 400 มิลลิแอมป์ ด้วยและต้องให้แรงดันที่ขาเกต  $V_{GS}$  มีค่ามากพอจะระบุไว้ในคู่มือแต่ละเบอร์ เพื่อที่เพาเวอร์มอสเฟท จะทำงานได้อย่างเต็มที่ด้วย

ค่าความต้านทานระหว่างเดรนและซอร์สขณะนำกระแส  $R_{DS(on)}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีค่าน้อยลง เพาเวอร์มอสเฟทจึงมีพิกัดความปลอดภัย ใน กราฟ FBSOA กว้าง อัตราทนกำลังสูญเสียสูงสุดจะถูกจำกัดด้วยค่าความร้อนที่เกิดขึ้นที่รอยต่อภายใน ตัว

ขีดจำกัดกำลังความปลอดภัย FBSOA ของเพาเวอร์มอสเฟทต้องพิจารณา 4 ส่วนดังนี้

- 1) ขีดจำกัดแรงดันตกคร่อมเดรนและซอร์สสูงสุดที่สามารถทนได้ ( $V_{DS(max)}$ )
- 2) กระแสเดรน  $I_D$  สูงสุดที่สามารถไหลผ่านได้และไม่ทำให้โครงสร้างภายในเสียหาย
- 3) ขีดจำกัดเนื่องจากความต้านทานขณะนำกระแส ( $R_{DS(on)Limit}$ )
- 4) ขีดจำกัดการระบายความร้อนของตัวถัง (Package Limit)



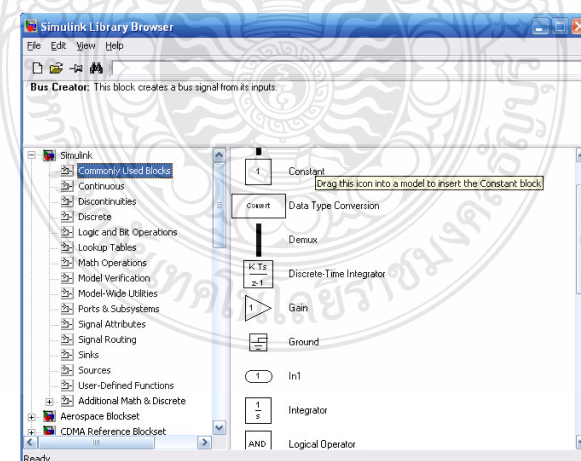
ภาพที่ 2.23 พิกัด FBSOA ของเพาเวอร์มอสเฟท

### 2.7.6 ไดโอดชนิดกลับคืนสภาวะใหม่ได้เร็ว (Ultra Fast and Hyper Fast Diode)

ไดโอดชนิดกลับคืนสภาวะใหม่ได้เร็ว (Ultra Fast and Hyper Fast Diode) เหมาะสำหรับงานที่มีความถี่สูงมาก การทำงานจึงต้องการให้ไดโอดที่นำกระแสอยู่ เปลี่ยนสถานะหยุดนำกระแสอย่างรวดเร็วขณะที่ไดโอดนำกระแสจะมีประจุไฟฟ้าที่รอยต่อของสารพีและเอ็นเหมือนตัวเก็บประจุ และเมื่อมีแรงดันไบอัสย้อนกลับอย่างทันทีทันใด จะมีกระแสไหลย้อนกลับผ่านไดโอดในเวลาชั่วขณะหนึ่ง ช่วงเวลานี้เรียกว่าช่วงเวลาในการฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse Recovery Time) ซึ่งไดโอดชนิดกลับคืนสภาวะใหม่ได้เร็ว Ultra Fast Diode มีช่วงเวลาในการฟื้นตัวย้อนกลับประมาณ 100 ถึง 75 นาโนวินาที ส่วนไดโอดชนิดกลับคืนสภาวะใหม่ได้เร็ว Hyper Fast Diode มีช่วงเวลาในการฟื้นตัวย้อนกลับมีค่าน้อยกว่า 55 นาโนวินาที การทำงานของไดโอดนั้นมิจำกัด ทั้งทางด้านกระแสและแรงดัน สามารถหารายละเอียดของข้อมูลได้จากบริษัทผู้ผลิต

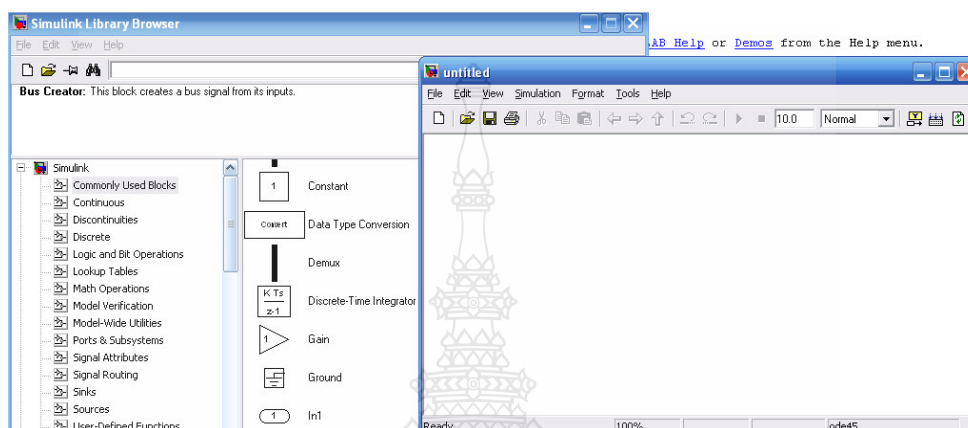
## 2.8 โปรแกรม MATLAB/Simulink

โปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นโปรแกรมคำนวณเชิงตัวเลขที่มีประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น การใช้งานฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง การคำนวณในเชิงตัวแปรเพื่อแก้สมการ เป็นต้น ในส่วนของ Simulink นั้นเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้รูปแบบของ block Diagram เป็นองค์ประกอบของโปรแกรมสามารถสร้างแบบจำลองได้โดยใช้ Building Blocks ที่มีมาให้จาก Simulink Library Browser ดังภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 Block Diagram พื้นฐานใน Simulink Library Browser

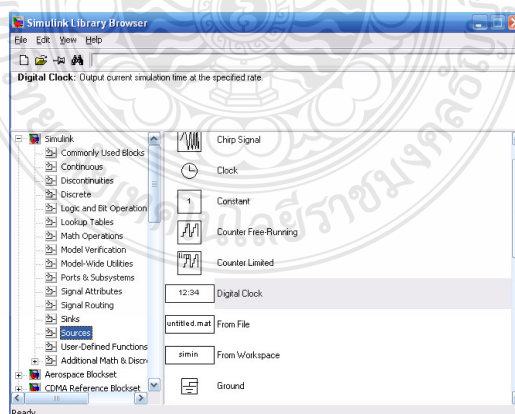
ในโปรแกรม Simulink นั้น การจำลองปัญหาจะอาศัยการสร้างแผนภูมิ (Simulation Diagram) เพื่อการกำเนิด การรับ และส่งผ่านสัญญาณ ข้อมูลจาก block หนึ่งจะถูกส่งผ่านไปอีก block หนึ่ง โดยผ่านเส้นเชื่อมต่อระหว่างกัน โดยที่สามารถผลลัพธ์ของข้อมูลได้หลายลักษณะทั้ง Oscilloscope หรือ Display โดยสามารถเลือกจากในส่วนของ Sink ดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 หน้าต่างสำหรับสร้างระบบจำลองของ Simulink

### 2.8.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณ (Source)

กลุ่มของ Source ที่กำหนดมาให้จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดข้อมูลหรือสัญญาณ เช่น แหล่งกำเนิดค่าคงที่ แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ ฯลฯ ที่มีค่าใช้จ่ายเวลาการจำลองปัญหา ดังภาพที่ 2.26

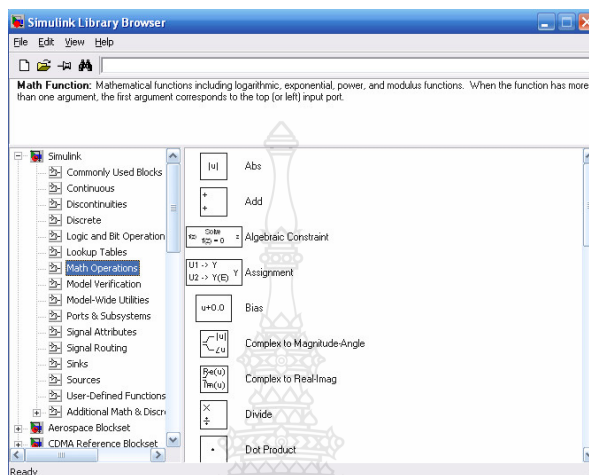


ภาพที่ 2.26 กลุ่ม Block ของ Source



## 2.8.2 การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Math Operations)

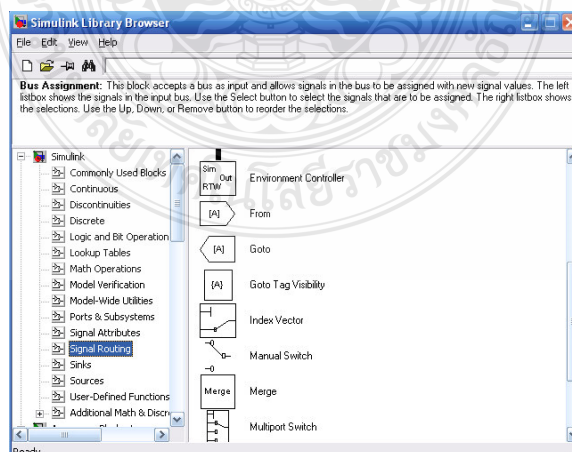
กลุ่ม Math Operations มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เช่น การบวก(Add) ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ (Math Function) การคูณตัวแปร (Gain ) เป็นต้นดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 กลุ่ม Block ของ Math Operations

## 2.8.3 ทางเดินสัญญาณ (Signal Routing)

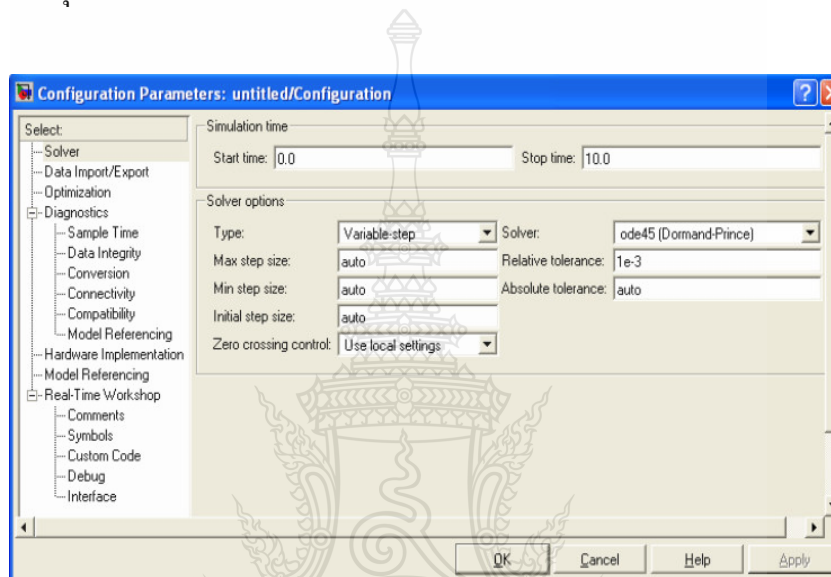
ในการจำลองระบบที่มีความจำเป็นต้องการรับส่งสัญญาณจากส่วนหนึ่งของระบบ ไปสู่อีกส่วนหนึ่งของระบบ ซึ่ง Block ในกลุ่มนี้เป็นประเภท GOTO, FROM, Multiplexing จะทำให้แผนภูมิมีความเป็นระเบียบมากขึ้นดังภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 กลุ่ม Block ของ Signal Routing

#### 2.8.4 การกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Parameters Configuration)

การจำลองปัญหา ที่ต้องพึงระวัง คือระยะเวลาที่สนใจในการจำลองปัญหากับระยะเวลาในการจำลองปัญหา การจำลองปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ Step Size มีค่าไม่คงที่ (Variable Step Size) Step Size ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดสามารถกำหนดได้ อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ Step Size มีค่าคงที่ (Fixed Step Size) เป็นวิธีที่มักจะนิยมใช้ในการจำลองปัญหา เนื่องจากสามารถระบุช่วงเวลาหรือจุดของเวลาที่สนใจได้อย่างแม่นยำ ดังภาพที่ 2.29



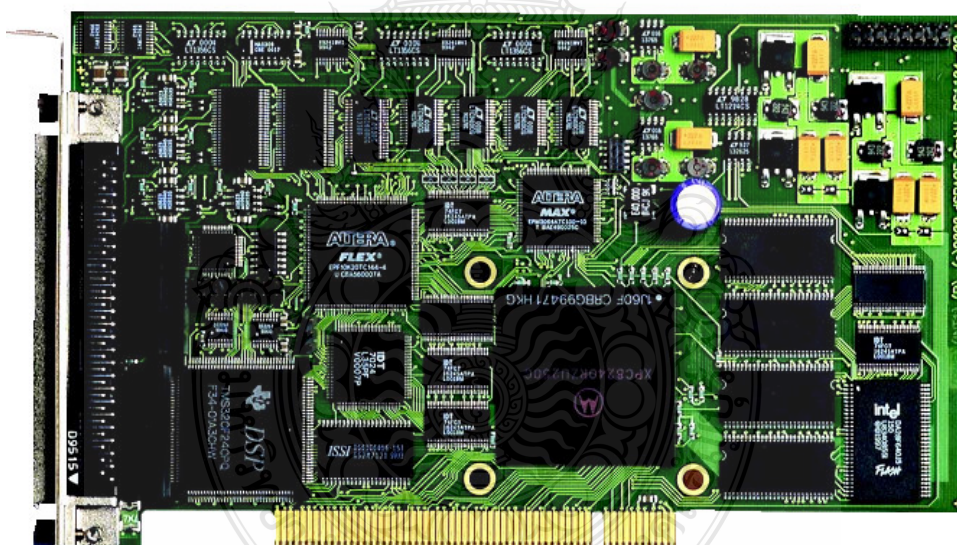
ภาพที่ 2.29 หน้าต่างที่ใช้กำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา

### 2.9 บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104

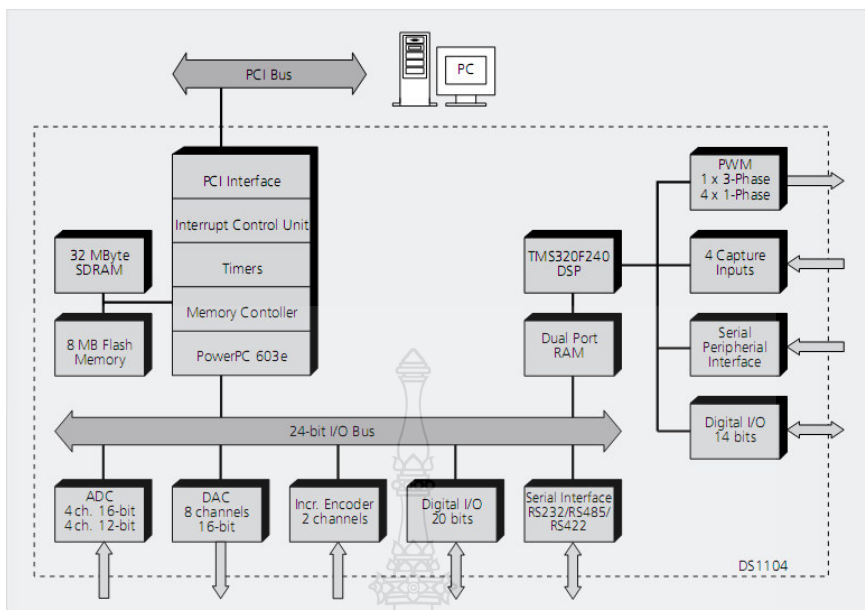
บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104 ทำหน้าที่เชื่อมต่อแบบจำลองการทำงานระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink กับกระบวนการจริง สามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ออกแบบด้วยเวลาจริง บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ประกอบด้วยจำนวนช่อง A/D, D/A, PWM, Digital I/O และ Encoder ใช้สำหรับระบบควบคุม คุณลักษณะของบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104 มีดังต่อไปนี้

- 1) เป็นการ์ดอินเตอร์เฟสสำหรับควบคุมแบบเวลาจริง (Real-time) ผ่านสล็อต PCI 32 บิต ในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ใช้โปรเซสเซอร์หลัก PPC603e 250 MHz และตัวประมวลผลเชิงดิจิทัลรอง (Slave Digital Signal Processor) เบอร์ TMS320F240
- 2) ช่องสัญญาณ A/D จำนวน 8 ช่อง ความละเอียด 12 และ 16 บิต แรงดันอินพุต  $\pm 10V$

- 3) ช่องสัญญาณ D/A จำนวน 8 ช่อง ความละเอียด 16 บิต แรงดันอินพุต  $\pm 10V$
- 4) สัญญาณ PWM จำนวน 10 ช่อง แบบอิสระจาก DSP TMS320F240
- 5) ดิจิตอล I/O จำนวน 20 ช่อง แบบขนาน
- 6) ช่องสัญญาณสำหรับแอนะล็อกเคอร์จำนวน 2 ช่อง
- 7) ช่องสัญญาณอินเตอร์เฟซแบบอนุกรม RS232, RS485
- 8) อินเทอร์เน็ตฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์
- 9) แผงเชื่อมต่อสัญญาณ(Panel) สำหรับควบคุมกระบวนการ
- 10) Microtec C Compiler
- 11) ซอฟต์แวร์จัดการระบบฮาร์ดแวร์ ( Experiment and platform manager for hardware management)
- 12) ไดรเวอร์ซอฟต์แวร์สำหรับ MATLAB/Simulink และ Control Desk standard



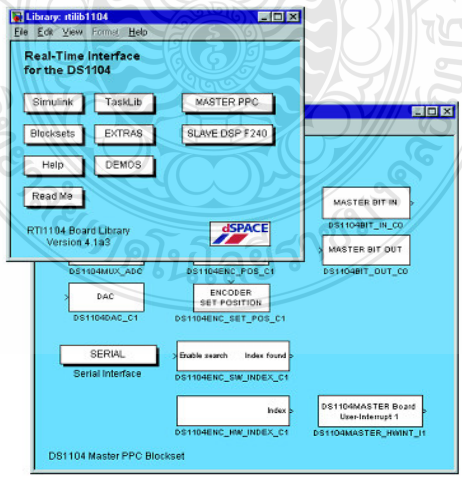
ภาพที่ 2.30 บอร์ดประมวลผล dSPACE รุ่น DS1104



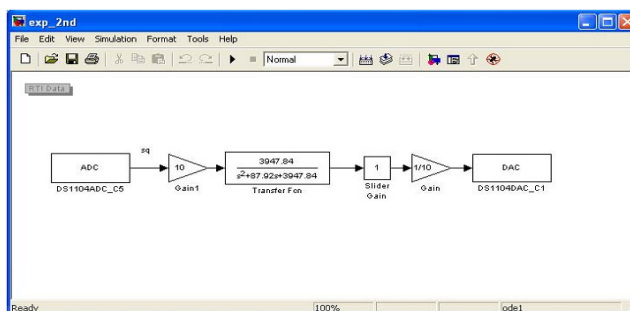
ภาพที่ 2.31 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์ของบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104

ซอฟต์แวร์สำหรับการ์ดคอนโทรลเฟส dSPACE ประกอบไปด้วย

1) Real-Time Library (RTLib 1104) เป็น Blocksets ที่ถูกติดตั้งบน Simulink สำหรับการใช้งานเชื่อมโยง A/D, D/A PWM Blockset กับโปรแกรม MATLAB/Simulink คอมไพล์โปรแกรมและจำลองการทำงานแบบเวลาจริง ดังภาพที่ 2.32 และ 2.33

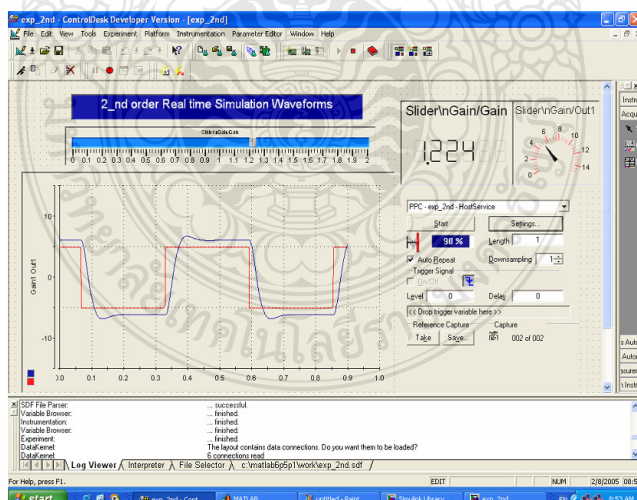


ภาพที่ 2.32 บล็อก RTLib 1104



ภาพที่ 2.33 การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับ D/A ของ DS1104

2) Control Desk ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์แบบ Graphic User Interface (GUI) โดยทำหน้าที่โหลดข้อมูล สั่งเริ่ม หรือหยุดทำงาน ปรับและแสดงค่าของตัวแปรต่างๆใน Simulink แบบเวลาจริงดังภาพที่ 2.34 การใช้ Real-time Library ซึ่งเป็น blocksets ที่ใช้หลักการของ Digital to Analog Converter เพื่อให้เป็นสัญญาณจริงในรูปแบบทันเวลา ภาพที่ 2.34 เป็นการใช้อุปกรณ์ Control Desk เพื่อควบคุมสัญญาณในรูปแบบทันเวลาโดยสามารถปรับค่าตัวแปรต่างๆที่สร้างขึ้นด้วย Simulink ซึ่งสามารถดูผลตอบสนองของระบบที่สร้างขึ้นเมื่อปรับเปลี่ยนตัวแปรข้างต้นได้ จึงมีความสะดวกเนื่องจากคอมไพล์ DSP Code เพียงครั้งเดียวจะได้ไฟล์ตัวแปรซึ่งสามารถนำไปใช้กับ Control Desk เพื่อการควบคุมแบบทันเวลา



ภาพที่ 2.34 การจำลองแบบสัญญาณจริงโดยใช้ Control Desk

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

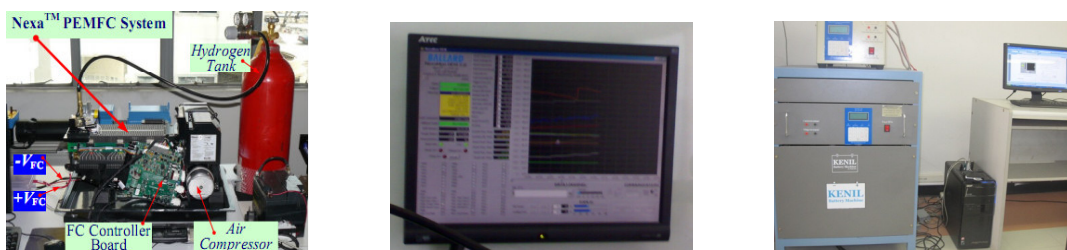
บทนี้เป็นการนำเสนอขั้นตอนและวิธีการดำเนินการในส่วนต่างๆ ของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ร่วมกับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ภายในงานวิจัยนี้จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ศึกษาควบคุมและทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ในห้องปฏิบัติการร่วมกับการสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อหาสถานะการทำงานที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ส่วนที่สองศึกษาระบบการสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริง โดยใช้หลักการควบคุมแรงดันขาออกให้สอดคล้องกับกระแสขาออก โดยการตรวจจับกระแสขาออกแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เพื่อส่งไปคำนวณหาค่าแรงดันควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งจะแบ่งเป็นขั้นตอนดำเนินการต่างๆ ได้ดังนี้

#### 3.1 การทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) ขนาด 1200W, 46A ยี่ห้อ Nexa™ Power Module User's Manual รุ่น MAN5100078 แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้อยู่ที่ประมาณ 43 V ที่ระบบยังไม่จ่ายโหลด ที่ระบบทำงานเต็มที่ Fuel Cell Stack มีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 26 V จะทำงานที่ความถี่ต่ำ, การสูญเสียต่ำ, เสี่ยงรบกวนน้อย และการทำงานของระบบมีความน่าเชื่อถือ

##### 3.1.1 การทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ

ประกอบด้วย อุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ ทำหน้าที่ควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เช่น อัตราการไหลของก๊าซ ชุดจ่ายโหลดอิเล็กทรอนิกส์ โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application และเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ขนาด 1200W, 46 A ยี่ห้อ Nexa™ Power Module User's Manual ดังภาพที่ 3.1

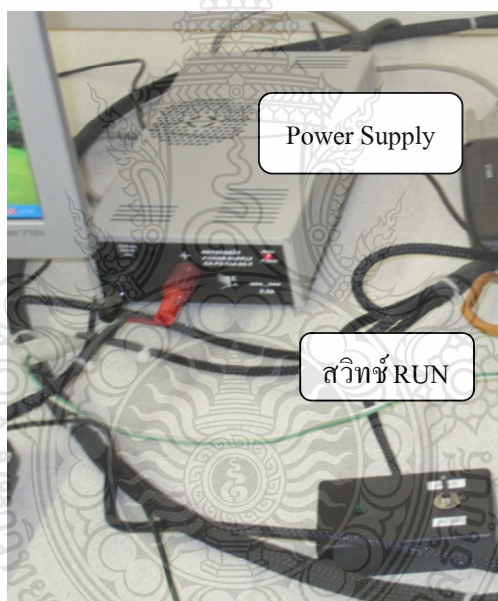


ภาพที่ 3.1 อุปกรณ์ประกอบการทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC

### 3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

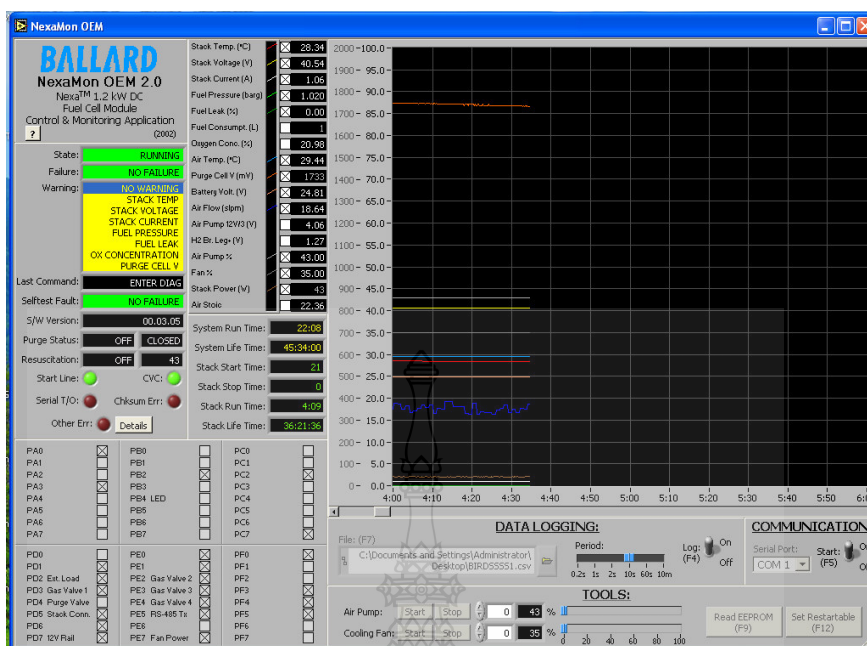
- 1) เปิดวาล์วที่ถังก๊าซเล็กน้อย
- 2) เปิดสวิตซ์ที่ Power Supply และ ปรับสวิตซ์มาที่ RUN ของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC

1200W 46A



ภาพที่ 3.2 Power supply และสวิตซ์ Run – Stop

3) เปิดคอมพิวเตอร์โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application เพื่อบันทึกข้อมูลการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำการทดสอบ ดังภาพที่ 3.3



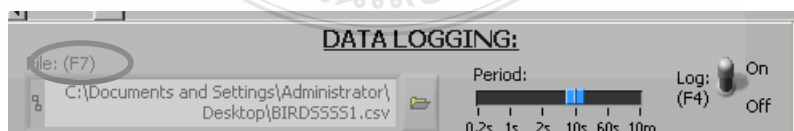
ภาพที่ 3.3 โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application

4) เปิดสวิตช์ที่ COMMUNICATION Start ON



ภาพที่ 3.4 เปิดการอ่านข้อมูล

5) ทำการบันทึกค่าข้อมูลที่ต้องการ ตั้งชื่อไฟล์ที่จะทำการบันทึกค่า กำหนดเวลาการบันทึกข้อมูลทุกๆ 10 วินาที และปรับ สวิตช์ F4 มาที่ตำแหน่ง ON



ภาพที่ 3.5 การบันทึกค่าและปรับช่วงเวลาการเก็บค่า

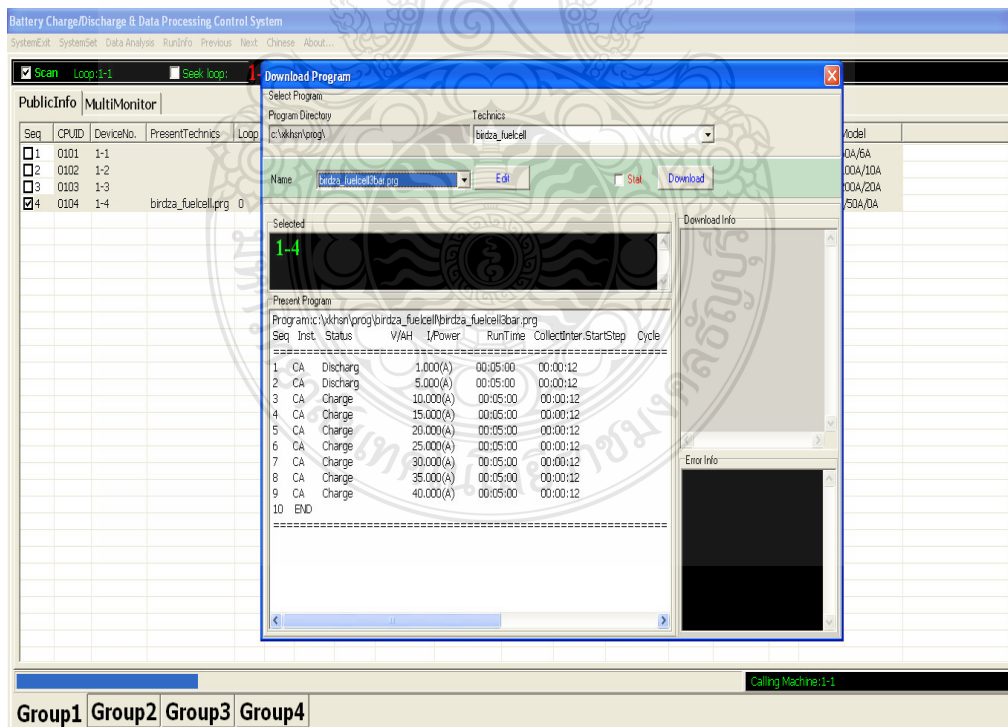


6) ปรับความดันของก๊าซไฮโดรเจน เพิ่มขึ้นครั้งละ 1บาร์ 2บาร์ 3บาร์ โดยสังเกตค่าความดันก๊าซที่ เข็มที่ตัวถังและค่าที่ปรากฏที่หน้าจอโปรแกรมที่ตำแหน่ง Fuel Pressure (Brag)



ภาพที่ 3.6 การปรับแรงดันก๊าซที่ถังโดยสังเกตค่าแรงดันที่โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0

7) เปิดคอมพิวเตอร์โปรแกรม Battery Charge/Discharge# Data Processing Control System ที่เครื่องชุดควบคุมโพลด



ภาพที่ 3.7 โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application

## 8) On Switch Power เครื่องจ่ายโหลด



ภาพที่ 3.8 เครื่องจ่ายโหลด KENIL

1) ทดลองจ่ายกระแสให้กับโหลด 5,10,15,20,25,30,35,40 เก็บค่าทุกๆ 10 วินาที บันทึกค่าเป็นกระแสและแรงดัน

Seq	CPUID	DeviceNo.	PresentTechnics	Loop	Step	Instr.	CH/DIS	Step Time	Run Time	volt(V)	Cur. (A)	AH(AH)	Status	DataCount	Br...	Machine Model
<input type="checkbox"/>	1	0101	1-1					00:00:00	00:00:00	39-300	0.000		Ready	18	1	ENL-100V/50A/0A
<input type="checkbox"/>	2	0102	1-2										NoLink			MT-20V/60A/6A
<input type="checkbox"/>	3	0103	1-3										NoLink			MT-20V/100A/10A
<input checked="" type="checkbox"/>	4	0104	1-4										NoLink			MT-20V/200A/20A

เลือก Seq ที่ 4

1.เลือก Constant Current

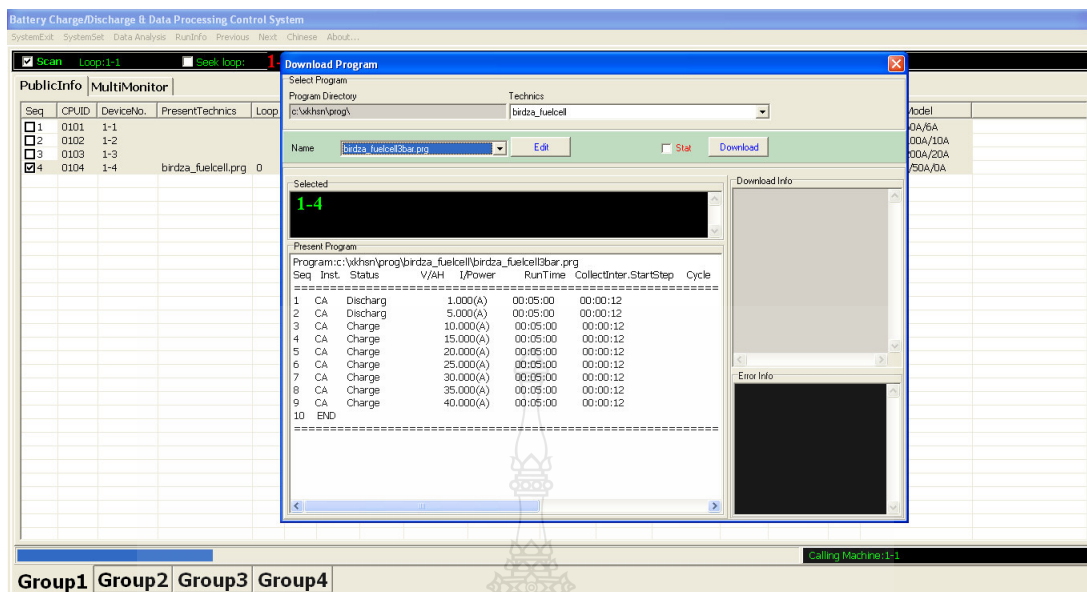
2.เลือก Discharge เพื่อจ่ายกระแส

3.เลือก Collect Inter

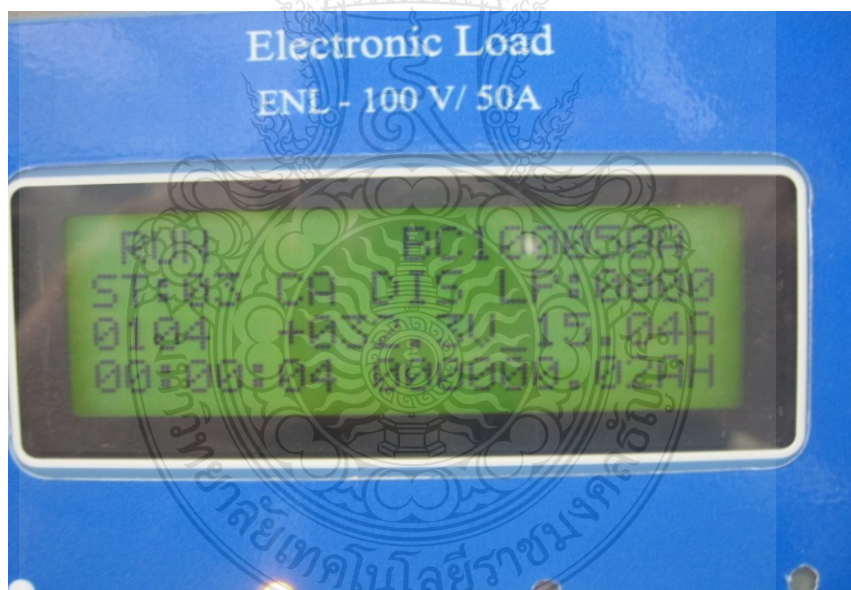
4.เลือกขนาดกระแสที่จ่ายโหลด (A)

5.ตั้งชื่อไฟล์ที่บันทึกข้อมูล

ภาพที่ 3.9 การตั้งค่าของโปรแกรม



ภาพที่ 3.10 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรม

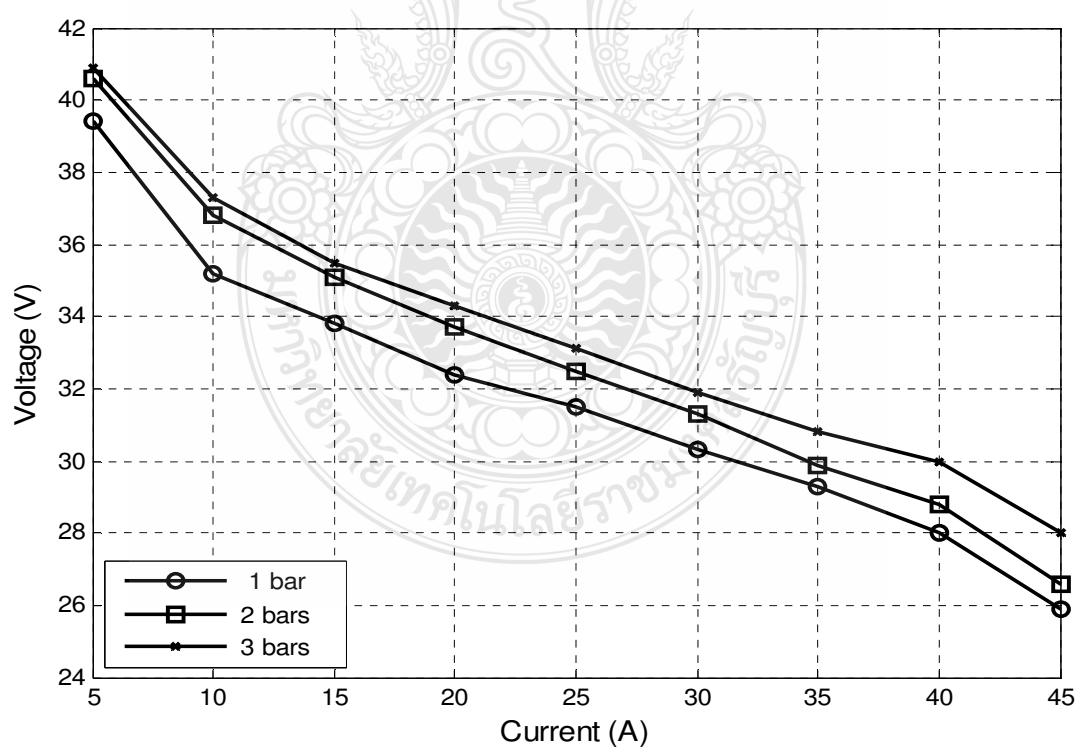


ภาพที่ 3.11 หน้าจอแสดงสถานการณ์จ่ายโหลด เครื่องจ่ายโหลด KENIL

## 3.1.3 ผลการทดลอง

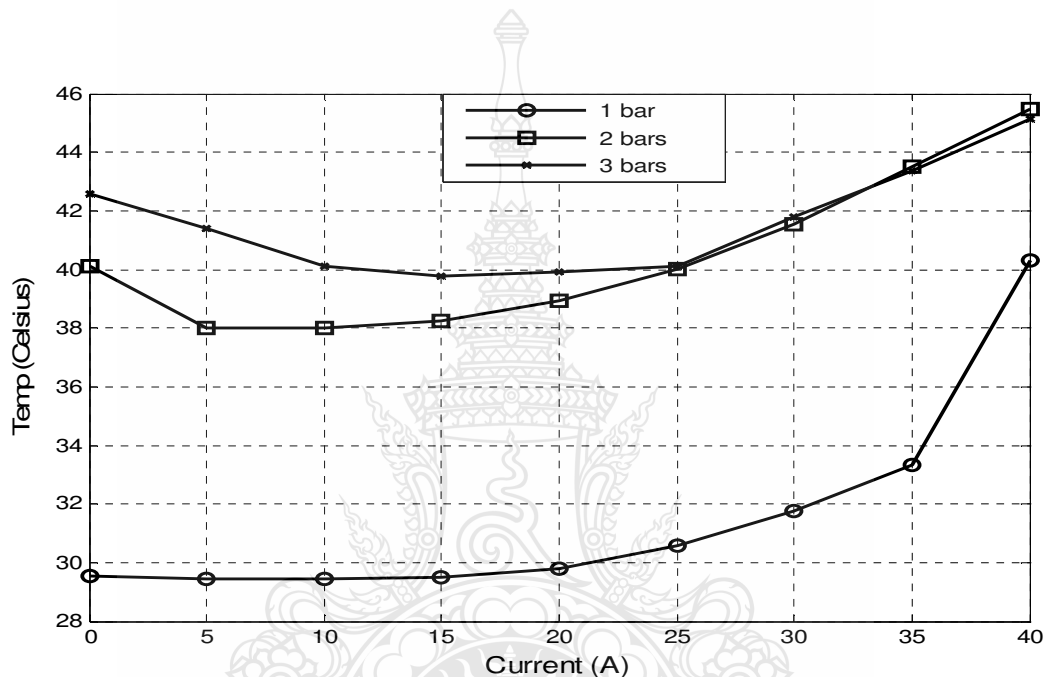
ตารางที่ 3.1 ค่ากระแสแกลกับแรงดันที่ความดันของก๊าซไฮโดรเจน 1-3 บาร์

Current (A)	Voltage@1 bars (V)	Voltage@2bars (V)	Voltage@3 bars (V)
5	39.4	40.6	40.9
10	35.2	36.8	37.3
15	33.8	35.1	35.5
20	32.4	33.7	34.3
25	31.5	32.5	33.1
30	30.3	31.3	31.9
35	29.3	29.9	30.8
40	28	28.8	30
45	25.9	26.6	28



ภาพที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแกลกับแรงดันที่ความดันของก๊าซไฮโดรเจน 1-3 บาร์

จากผลการทดลองในภาพที่ 3.12 เมื่อเพิ่มกระแสขึ้นครั้งละ 5 A โดยปรับความดันของก๊าซไฮโดรเจน เพิ่มขึ้นครั้งละ 1 บาร์ จนถึง 3 บาร์ จะมีผลทำให้ค่าแรงดันที่ได้จะแตกต่างกันมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากข้อจำกัดของการแพร่ของก๊าซ โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซจะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่าระบบที่มีความดันต่ำกว่า โดยค่าที่เหมาะสมอยู่ที่ 3 บาร์ และเมื่อนำไปเทียบกับคุณลักษณะสถานะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วเส้นกราฟมีลักษณะสอดคล้องไปในแนวทางเดียวกัน

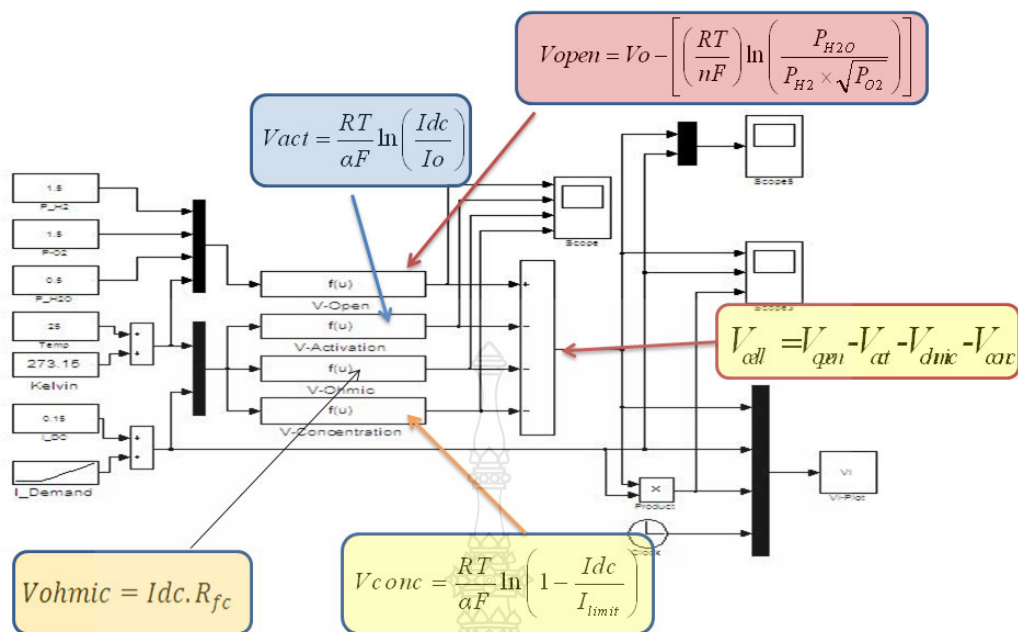


ภาพที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับอุณหภูมิ

อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามกระแสที่จ่าย อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ประมาณ 65 องศาเซลเซียส หากจ่ายกระแสต่อเนื่องเป็นเวลานานอาจทำให้ Capacitor ของวงจรควบคุม ชาร์จได้

### 3.2 การออกแบบแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC

แบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC เป็นการพัฒนามาบนพื้นฐานของสมการแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จากสมการที่ 3.1 ถึง 3.5 ในภาพที่ 3.14 แสดงโครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงใน MATLAB/Simulink เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า ขนาด 1200W 46A เป็นรุ่น NEXA1200 ของบริษัท Ballard



ภาพที่ 3.14 โครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง

จากภาพที่ 3.14 ตัวแปรคือ ปริมาณความดันของก๊าซไฮโดรเจน (P\_H2) ที่ได้จากการปรับตามที่ต้องการ ความดันของออกซิเจน (P\_O2) และความดันของน้ำ (P\_H2O) ซึ่งจะเปลี่ยนโดยอัตโนมัติตามความดันของก๊าซไฮโดรเจน อุณหภูมิในขณะที่ทำการทดสอบ กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการปรับที่โหลด โดยแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง ( $V_{cell}$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.1

$$V_{cell} = V_{open} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc} \tag{3.1}$$

โดยที่  $V_{open}$  คือศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานหรือศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี  $V_{act}$  คือศักย์ไฟฟ้าเกิดตัวจากโพลาริเซชันเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี  $V_{ohmic}$  คือศักย์ไฟฟ้าเกิดตัวจากโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า  $V_{conc}$  คือ ศักย์ไฟฟ้าเกิดตัวจากโพลาริเซชันเนื่องจากการถ่ายโอนมวล สมการของ Nernst สามารถคำนวณค่าแรงดันขณะที่ไม่มีโหลด

$$V_{open} = V_o - \left[ \left( \frac{RT}{nF} \right) \ln \left( \frac{P_{H2O}}{P_{H2} \times \sqrt{P_{O2}}} \right) \right] \tag{3.2}$$

สมการของศักย์ไฟฟ้าส่วนหนึ่งถูกใช้ไปกับการขับเคลื่อนปฏิกิริยาเคมี

$$V_{act} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left( \frac{I_{dc}}{I_o} \right) \quad (3.3)$$

สมการของศักย์ไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่องมาจากความต้านทานภายใน

$$V_{ohmic} = I_{dc} R_{fc} \quad (3.4)$$

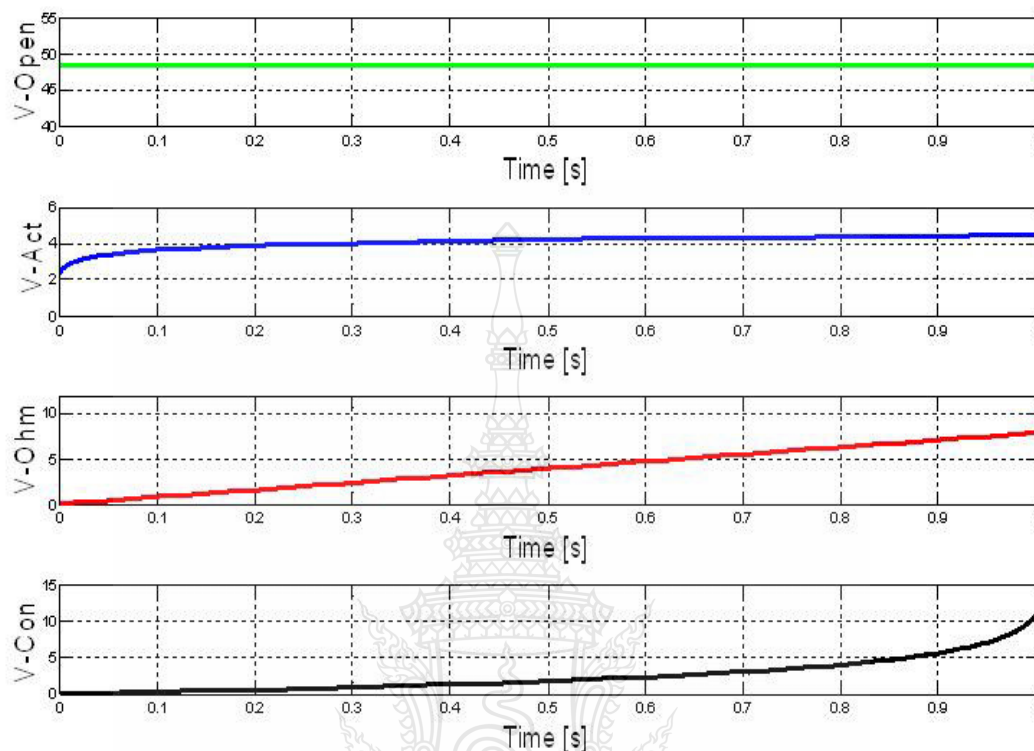
สมการของศักย์ไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานอันเกิดจากความเข้มข้นของสาร

$$V_{conc} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left( 1 - \frac{I_{dc}}{I_{limit}} \right) \quad (3.5)$$

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของเซลล์เชื้อเพลิง Ballard Nexa™ Power Module User's Manual

ตัวแปร	ค่า
N	2
Gibbs (J/mol)	237,340
R(J/mol K)	8.3144
F(C/mol,R)	96,487
T(°C)	40-80
P(hydrogen),bar	1-3
P(Air),bar	1-3
A	1.5
I <sub>o</sub>	6.54*10 <sup>-3</sup>
i <sub>L</sub>	230*10 <sup>-3</sup>
R <sub>ohmic</sub>	0.1-0.2

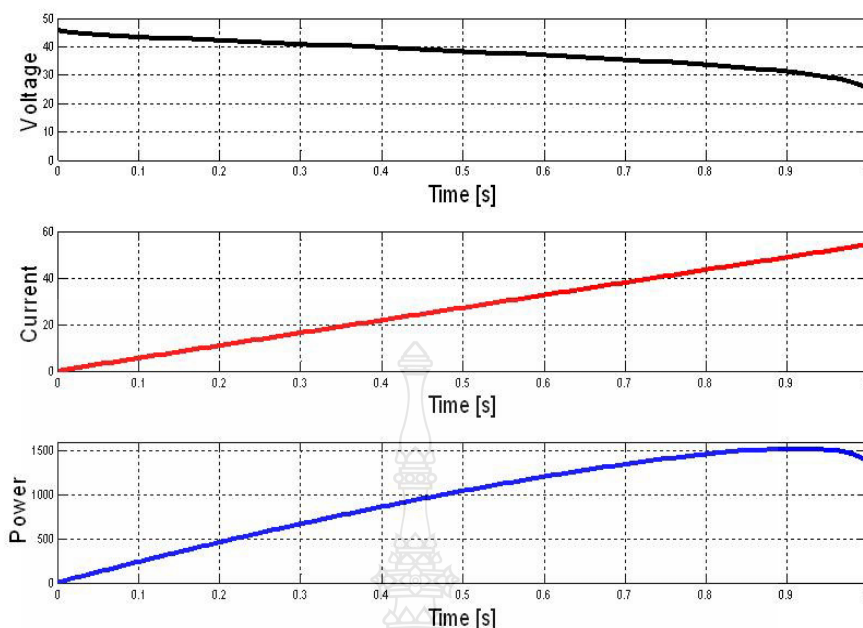
### 3.2.1 ผลการทดลองของแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC



ภาพที่ 3.15 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูญเสียได้จากผลของแบบจำลอง

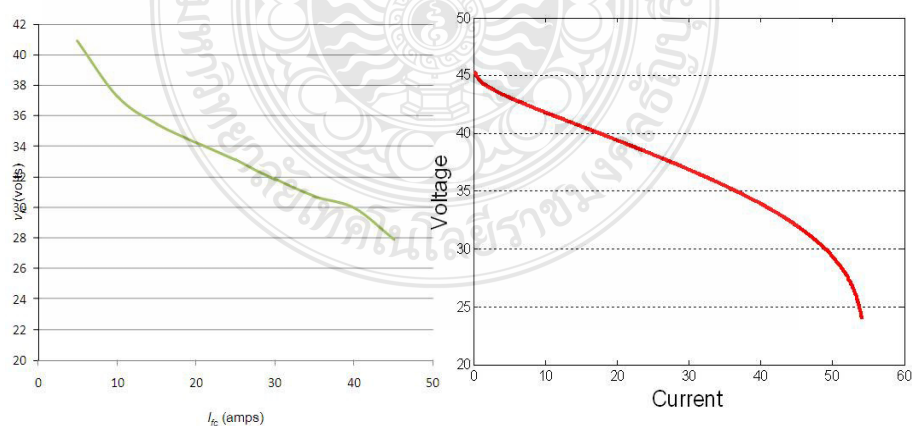
จากภาพที่ 3.15 สมการของ Nernst สามารถคำนวณค่าแรงดันขณะที่ไม่มีโหลดเป็น  $V_{open}$  จากกราฟอ่านค่าได้ 48 โวลต์ โดยรวมจำนวนของเซลล์ทั้งหมดที่มีอยู่ 43 เซลล์ สมการของศักย์ไฟฟ้าส่วนหนึ่งถูกใช้ไปกับการขับเคลื่อนปฏิกิริยาเคมี จากกราฟ  $V_{act}$  อ่านค่าแรงดันที่ได้มีการเปลี่ยนแปลง 2.2–4 โวลต์ จนมีค่าเกือบคงที่สมการของศักย์ไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่องมาจากความต้านทานภายใน จากกราฟ  $V_{ohmic}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นตามพื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิง สมการของศักย์ไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานอันเกิดจากความเข้มข้นของสารจากกราฟ  $V_{conc}$  อ่านค่าแรงดันที่ได้มีการเปลี่ยนแปลง 0–11 โวลต์





ภาพที่ 3.16 ค่าแรงดัน กระแส และค่าพลังงานไฟฟ้าได้จากผลของแบบจำลอง

จากภาพที่ 3.16 แสดงผลการทดลองของแบบจำลอง แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลาจะแสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าจะลดลงถึงค่าคงที่ที่พิกัด ส่วนกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะเชิงเส้นเพื่อทำการจำลองสถานการณ์ในการจ่ายโหลด ส่วนกำลังไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นไปถึงค่าคงที่ที่พิกัด โดยใช้ค่าแรงดันของก๊าซไฮโดรเจนที่ 3 บาร์

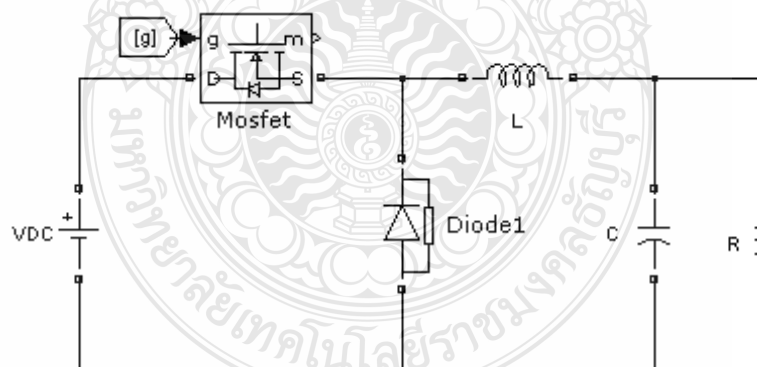


ภาพที่ 3.17 แรงดันไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าในแบบจำลอง

จากภาพที่ 3.17 แสดงผลแรงดันไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าในแบบจำลองโดยใช้ค่าแรงดันของก๊าซไฮโดรเจนที่ 3 บาร์ ที่กระแส 20 A ในแบบจำลองมีค่าแรงดัน 34 V ส่วนในห้องปฏิบัติการมีค่า 39 V และในสภาวะมีโหลดสูงสุดที่กระแส 45A ในแบบจำลองมีค่า 32 V ส่วนในห้องปฏิบัติการมีค่า 27.8 V ซึ่งผลในทางปฏิบัติจะมีค่าแตกต่างกันในแบบจำลอง ซึ่งเกิดจากค่าตัวแปรต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป ข้อจำกัดของการแพร่ของก๊าซ โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซจะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่าระบบที่มีความดันต่ำกว่า โดยค่าที่เหมาะสมอยู่ที่ 3 บาร์ และเมื่อนำไปเทียบกับคุณลักษณะสภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วเส้นกราฟมีลักษณะคล้ายกัน แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าสอดคล้องกันไปแนวทางเดียวกัน

### 3.3 การออกแบบแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรกำลังของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ ตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง ( $L$ ) อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์ และตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต วงจรกำลังต้องมีความสามารถทำงานได้ปกติที่ขนาดพิกัดกระแสและแรงดันที่ใช้ งาน โดยกำหนดให้ความถี่ที่ใช้ในงานวิจัยมีค่า 10 kHz ซึ่งเป็นความถี่ในการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ แต่เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงยังมีส่วนของแรงดันกระเพื่อม ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้มีวงจรกรองแรงดัน (Filter) เพื่อลดแรงดันกระเพื่อม



ภาพที่ 3.18 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากภาพที่ 3.18 เป็นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีเพาเวอร์มอสเฟสทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ในการออกแบบวงจรกำลังมีส่วนประกอบดังนี้ มีแรงดันขาออก 26 V เมื่อแรงดันขาเข้า 44

V และมีอัตราระลอกคลื่นแรงดันขาออกเป็น 1% ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 10 kHz และความต้านทานที่ต่ออยู่  $R = 10\Omega$  สามารถคำนวณหาค่า  $L_{\min}$  ได้จากสมการที่ 3.6

$$L_{\min} = \left[ \frac{(1-D)R}{2.f} \right] \quad (3.6)$$

เมื่อ Duty Cycle หาได้จาก

$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (3.7)$$

$$D = \frac{26}{44} = 0.6$$

ค่าตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าต่ำสุด  $L_{\min} = \left[ \frac{(1-0.6)10}{2 \times 10 \times 10^3} \right] = 2 \times 10^{-4} H$

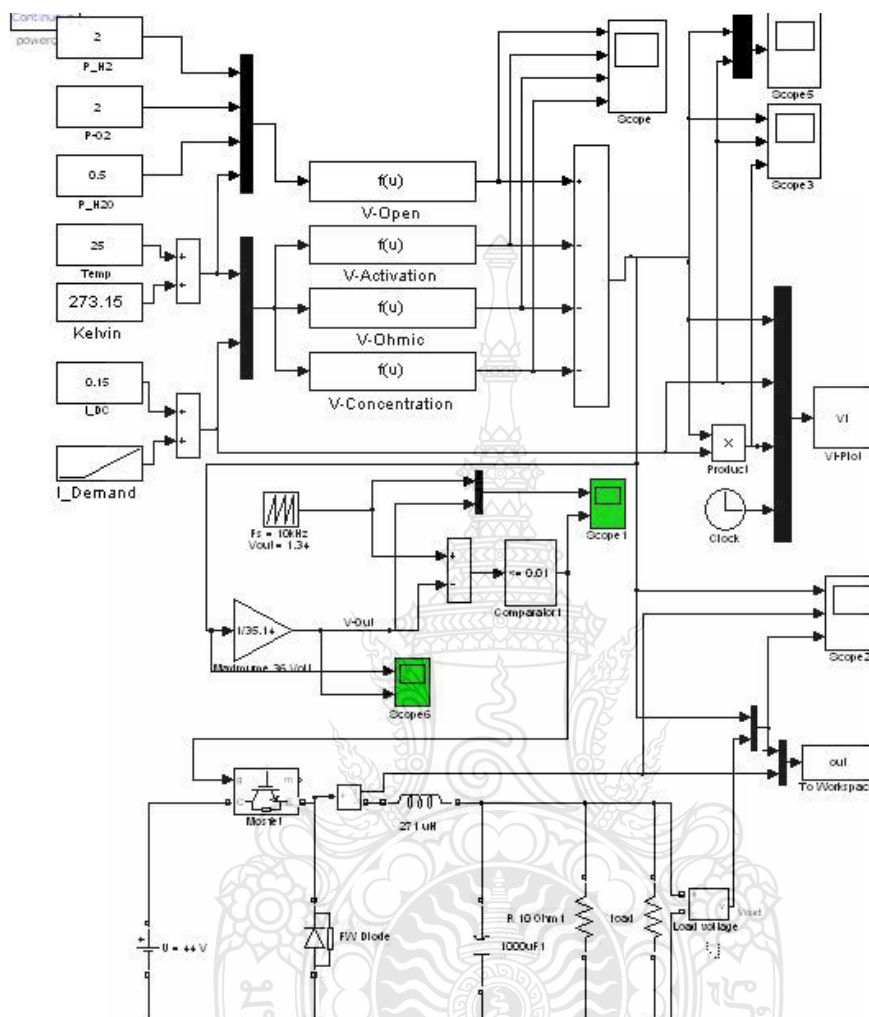
การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหาได้จากสมการที่ 3.8

$$C = \frac{(1-D)}{8L.f^2.V_{ripple}} \quad (3.8)$$

$$C = \frac{(1-0.6)}{8(2 \times 10^{-4})(10 \times 10^3)^2(0.01)} = 2.5 \times 10^{-4} F$$

อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งจะต้องเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานได้ดีที่ความถี่สูง เวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เพาเวอร์มอสเฟตทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง

### 3.4 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า

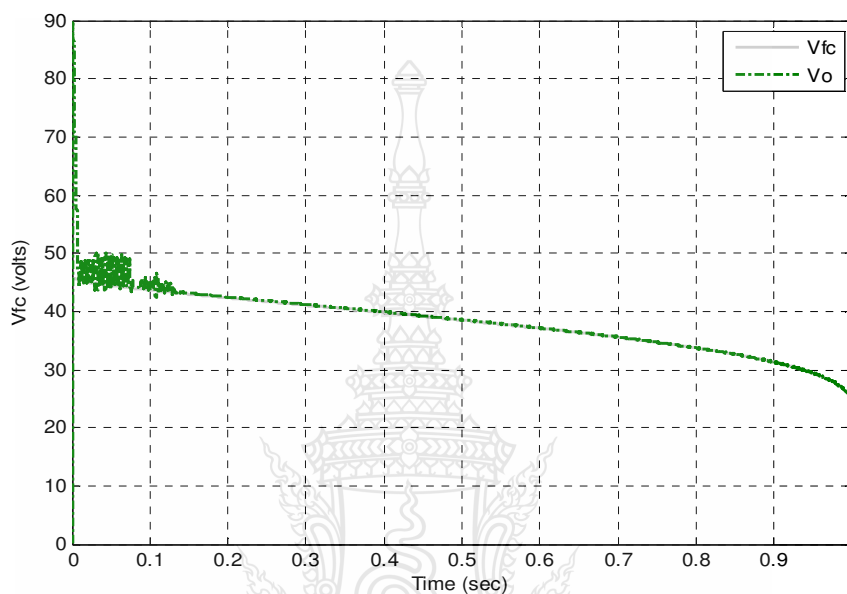


ภาพที่ 3.19 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า

จากภาพที่ 3.19 แสดงการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ร่วมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงเพื่อทำการศึกษาเป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC แบบสัญญาณจริงขึ้นมาทดแทนซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาในด้านเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC

เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นรุ่น NEXA@1200 ของบริษัท Ballard ขนาดพิกัดกำลัง 1200W แรงดันขาออกที่ 26 – 43 โวลต์

3.4.1 ผลการทดลองของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า



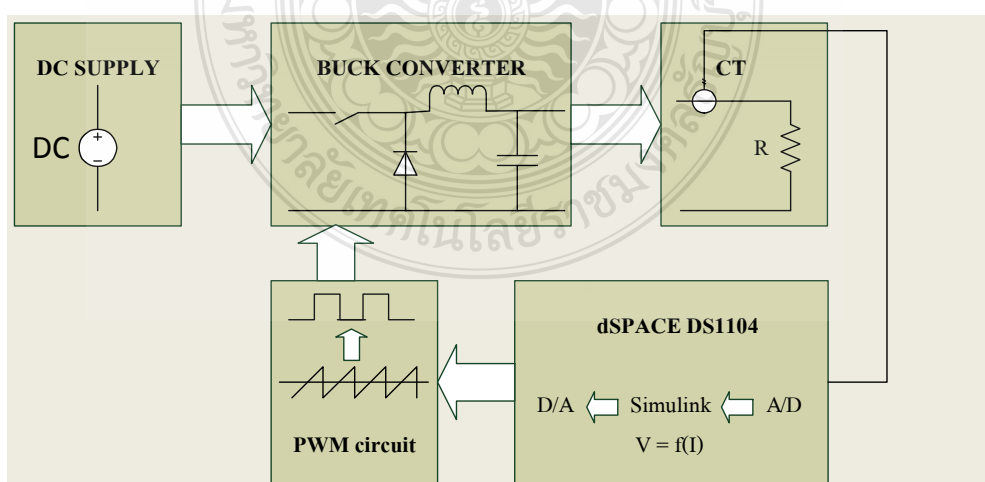
ภาพที่ 3.20 ผลการทดลองของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับแบบจำลองวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า

จากภาพที่ 3.20 แสดงผลการจำลองแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีการทำงานสอดคล้องใกล้เคียงกัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อต้องการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆพบว่าความดันของไฮโดรเจนมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งในขณะมีโหลด เมื่อเทียบกับแรงดันตามทฤษฎีแบบจำลองแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อต่อร่วมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันนั้น สามารถให้ค่าแรงดันไฟฟ้าตรงขาออกที่สอดคล้องกับหลักทฤษฎี และคุณสมบัติของตัวเซลล์เชื้อเพลิงถึงแม้ว่าค่าแรงดันที่วัดได้จริงจะให้ค่าแรงดันที่ต่ำกว่าแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB เนื่องจากข้อจำกัดของการแพร่ของก๊าซ โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซจะสามารถแพร่เข้าไปทำ

ปฏิบัติการได้มากกว่าระบบที่มีความดันต่ำกว่า ปัญหาที่พบในการจำลองของระบบวงจรทั้งสองโดยใช้ความถี่สวิตซ์ที่สูงกว่า 10 kHz อาจใช้เวลาในการจำลองค่อนข้างนานเกินไป อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปประยุกต์เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC แบบสัญญาณจริงสำหรับการใช้ในการศึกษาค้นคว้าในห้องปฏิบัติการทดลองต่อไป

### 3.5 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าทำงานร่วมกับบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104

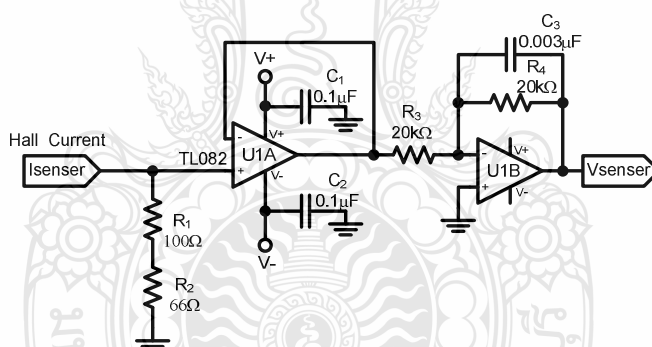
การสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC แบบสัญญาณจริงในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าทำงานร่วมกับบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล โดยมีหลักการการทำงานคือใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ตรวจสอบกระแสขาออกของวงจรแปลงผันแล้วแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าส่งไปยังบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล สัญญาณดิจิทัลดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณหา ค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) ด้วยแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง ค่าดิวตี้ไซเคิลที่คำนวณได้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณอนาล็อกเพื่อนำไปขับเกตมอสเฟต ให้วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า จ่ายแรงดันไฟฟ้าสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าตามพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC แบบสัญญาณจริงนี้สามารถที่จ่ายนำไปจ่ายโหลดได้จริง โดยสามารถปรับเปลี่ยนค่าความดันของไฮโดรเจน, ออกซิเจนและค่าอุณหภูมิที่แผงเซลล์ ได้โดยการเปลี่ยนที่แบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงและสามารถใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงได้อีก ดังแสดงในภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าทำงานร่วมกับบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104

### 3.5.1 การออกแบบวงจรส่วนตรวจจับกระแสขาออก

อุปกรณ์ตรวจจับกระแสที่นำมาทำหน้าที่ตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแรงดันจากนั้นเปลี่ยนจากสัญญาณกระแสไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยต่อตัวต้านทานเข้าไปที่ส่วนขาออก เพื่อส่งไปเข้ายังอุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อนำไปคำนวณค่าสัญญาณอ้างอิงในการสร้างสัญญาณพัลส์ขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์ มอสเฟตต่อไป ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ คือ ฮอลล์เซ็นเซอร์เลนทซ์เซนเซอร์ (Hall Current Sensor) เบอร์ LA55-P ของบริษัท LEM ซึ่งมี Conversion Ratio 1:1000 แบบใช้ลวดตัวนำค้ำผ่าน สัญญาณเอาต์พุตเป็นกระแสมีอัตราส่วน 50 A = 50 mA การนำสัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ไปใช้งานจะต้องมีวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน ตามภาพที่ 3.22 วงจรจะใช้หลักการของวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) คำนวณหา  $R_1$  และ  $R_2$  ได้จากสมการที่ (3.9) ใช้ลวดตัวนำค้ำผ่าน สามารถตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 50 A จากวงจรที่ออกแบบกระแสที่ไหลมีค่าสูงสุดที่ 46 A จะได้ค่ากระแสเอาต์พุต  $I_{out} = 46 \text{ mA}$  แต่เพื่อให้ได้ความละเอียดในการวัดสูงขึ้นจึงพันลวดตัวนำจำนวน 5 รอบ ซึ่งทำให้ได้กระแสเอาต์พุตเป็น 20 mA การเลือกค่าตัวต้านทานเพื่อแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าแสดงได้จาก



ภาพที่ 3.22 วงจรตรวจจับกระแส

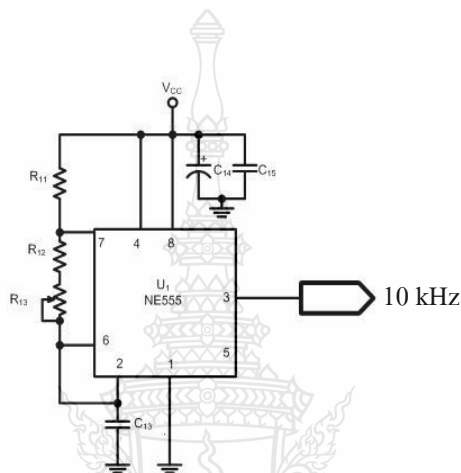
$$R_{div} = \frac{U_{ref}}{I_{sensor}} \quad (3.9)$$

$$R_{div} = \frac{10V}{60mA} = 166\Omega$$

- เมื่อ  $I_{sensor}$  คือ กระแสที่เซนเซอร์สามารถวัดได้เมื่อมีกระแสไหลผ่านเต็มพิกัด (Rated Current)  
 $U_{ref}$  คือ แรงดันที่เหมาะสมในการนำมาเข้าวงจรชัมมิ่ง (Comparator)  
 $R_{div}$  คือ ค่าความต้านทานสำหรับแบ่งแรงดัน (Voltage Divider)

### 3.5.2 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์อ้างอิง

ในการออกแบบวงจรมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์สัญญาณพาหะที่ใช้ในการมอดูเลตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม โดยก่อนที่จะได้สัญญาณสามเหลี่ยม งานวิจัยนี้ทำการสร้างสัญญาณพัลส์โดยใช้ไอซีเบอร์ NE555 สำหรับสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ 10 kHz กำหนดความถี่ได้จากค่า R และ C ดังที่ได้แสดงในวงจร แล้วส่งสัญญาณนาฬิกาความถี่ 10 kHz สัญญาณพัลส์นี้จะเป็นสัญญาณหลักที่ใช้ในการสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม



ภาพที่ 3.23 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา 10 kHz

จากคู่มือการใช้งานไอซีเบอร์ LM555/NE555/SA555 ของบริษัท Fairchild Semiconductor สามารถหาความถี่ที่วงจรในภาพที่ 3.23 กำเนิดออกมาได้จากสมการที่ 3.10

$$f = \frac{1.44}{(R_{11} + 2(R_A))C_{13}} \quad (3.10)$$

เมื่อ  $R_A = R_{12} + R_{13}$  ความถี่ที่ต้องการคือ 10 kHz เลือกค่า  $R_{11} = 1\text{k}\Omega$  และ  $C_{13} = 0.001\mu\text{F}$  สามารถคำนวณหาค่า ความต้านทาน  $R_A$  ได้ดังนี้

$$10 \times 10^3 = \frac{1.44}{(1 \times 10^3 + 2R_A) \times 0.001 \times 10^{-6}}$$



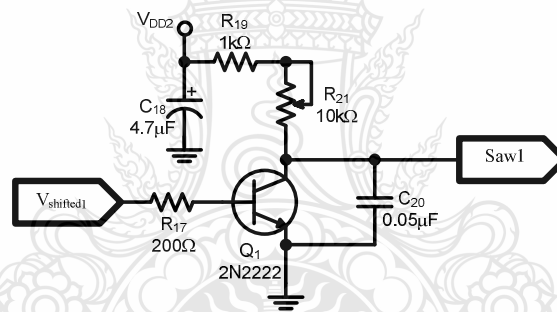
$$R_A = \frac{\left( \frac{1.44}{0.001 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^3} - 1 \times 10^3 \right)}{2}$$

$$R_A = 71.5k\Omega$$

ในการใช้งานจริงจะเลือก  $R_A$  เป็นแบบปรับค่าได้เพื่อป้องกันความผิดพลาด โดยตัวต้านทานปรับค่าได้คือ  $R_{13}$  ร่วมกับตัวต้านทานค่าคงที่  $R_{12}$  ทำให้วงจรนี้สามารถปรับความถี่ในการปฏิบัติจริงใกล้เคียงความถี่ 10 kHz ที่สุด

### 3.5.3 วงจรกำเนิดสัญญาณฟันเลื่อย

ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณฟันเลื่อย โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N2222 และวงจร RC ลักษณะวงจรแสดงดังภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 วงจรกำเนิดสัญญาณฟันเลื่อย

จากภาพที่ 3.24 กำหนด  $R_L = R_{19} + R_{21}$  ฟันเลื่อยมีความถี่ 10 kHz ซึ่งได้จากวงจรโมโนสเตเบิล จุดสูงสุดของสัญญาณฟันเลื่อยมีค่า 5V เราสามารถคำนวณหาค่า  $R_L$  ได้โดยสมการที่ 3.11

$$V_O = V_{DD2} - (V_{DD2} - V_{C0})e^{-t/R_L C_{20}} \quad (3.11)$$

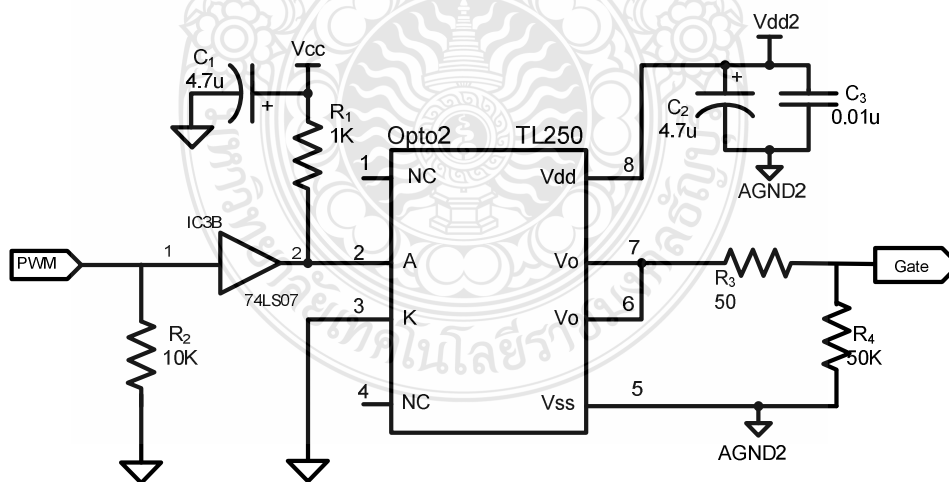
ดังนั้น

$$R_L = 800 \frac{\log e}{\log 1.47} = 2.1k\Omega$$

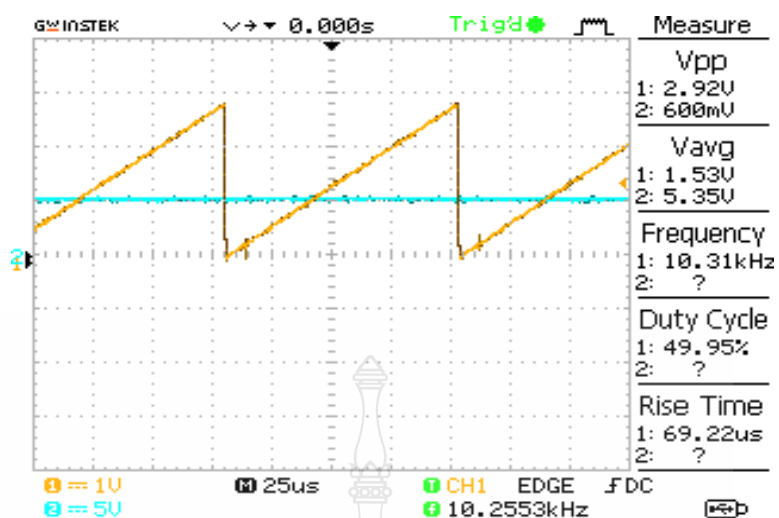
ในการใช้งานจะเลือกใช้  $R_L$  ปรับค่าได้ เพื่อป้องกันความผิดพลาดโดยให้ค่า  $R_L$  ครอบคลุมเลือกใช้งาน  $R_{19}$  ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานปรับค่า  $R_{21}$  เพื่อให้สามารถปรับสัญญาณพื่นเลื้อยให้ได้ตามที่ต้องการมากที่สุด

### 3.5.4 วงจรขับนำเกตด้วยไอซี TLP250

สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม สัญญาณนี้ถูกส่งไปยังวงจรสร้างสัญญาณขับนำเกต ด้วยไอซีสร้างสัญญาณขับนำเกต เบอร์ TLP250 เพื่อควบคุมการทำงานของมอสเฟต วงจรสร้างสัญญาณขับนำเกตแสดงดังภาพที่ 3.25 จากวงจรสัญญาณด้านเข้าเป็นสัญญาณที่ถูกส่งมาจากวงจรมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์มีขนาดแรงดัน 0 V ถึง 5 V สัญญาณนี้ถูกส่งเข้าไปไบอัสให้ LED ใน TLP250 นำกระแส โดยมี ความต้านทาน  $R_1$  ทำหน้าที่จำกัดกระแสในการไบอัส เมื่อ LED นำกระแส ทำให้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ทางด้านเอาต์พุตของ TLP250 นำกระแส แรงดันที่ขา 7 ของ TLP250 เทียบกับกราวด์เท่ากับ 15 V และแรงดันที่  $V_{GS}$  ของมอสเฟตเท่ากับ 15 V กับ 0 V เมื่อแรงดัน  $V_{GS}$  มีค่าเป็นบวกสามารถทำให้มอสเฟตนำกระแสได้ ส่วนในกรณีที่แรงดันอินพุตน้อยกว่า 0.7 V LED ภายใน TLP250 หยุดนำกระแสส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ทางด้านเอาต์พุตของ TLP250 หยุดนำกระแสเช่นเดียวกัน แต่ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP จะนำกระแสแทนส่งผลให้ที่สภาวะนี้แรงดันที่ขา 7 ของ TLP250 เทียบกับกราวด์มีค่าประมาณ 0 V เมื่อแรงดันที่  $V_{GS}$  มีค่าเป็น 0 V ทำให้มอสเฟตหยุดนำกระแสได้

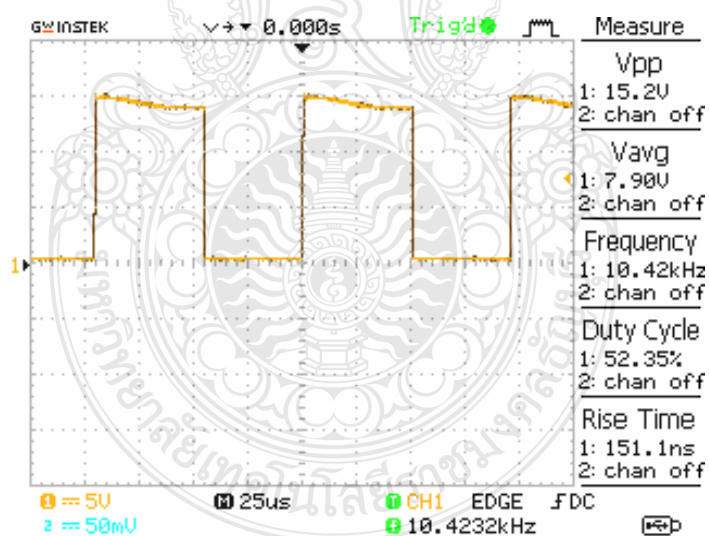


ภาพที่ 3.25 วงจรขับนำเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250



ภาพที่ 3.26 การมอดูเลตสัญญาณฟันเลื่อยกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง

ในภาพที่ 3.26 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณฟันเลื่อยและสัญญาณจากบอร์ดประมวลผลดิจิทัล DS1104 เพื่อกำหนดค่าตัวชี้แจงเกิดของสัญญาณพัลส์



ภาพที่ 3.27 สัญญาณพัลส์ขั้วเกิดของมอสเฟตความถี่สวิทซ์ 10 kHz

ในภาพที่ 3.27 ค่าตัวชี้แจงเกิดของสัญญาณร้อยละ 53.35 เป็นสัญญาณพัลส์ขั้วขาเกิดของมอสเฟตที่ออกมาจากไอซี TLP250 ขนาดแรงดัน 15.2V ที่ความถี่ 10.42 kHz

## บทที่ 4

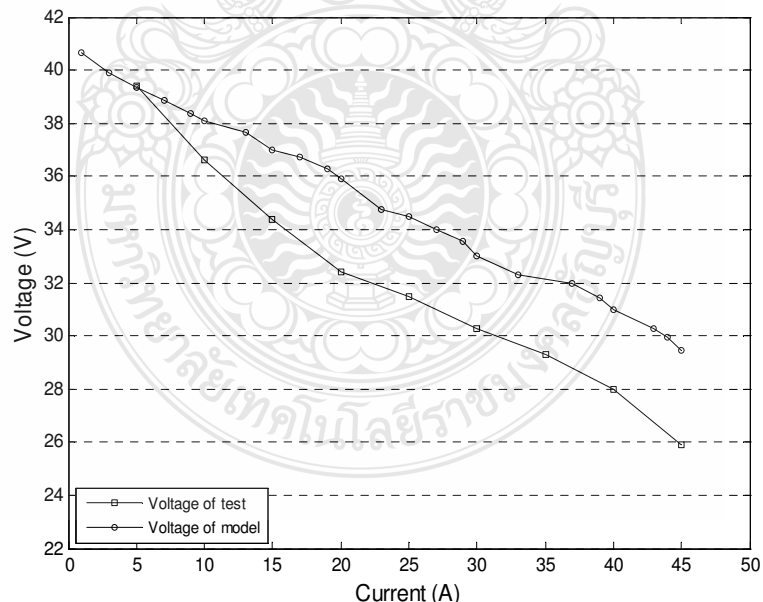
### ผลการทดลอง

บทนี้แบ่งการนำเสนอออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ MATLAB/Simulink เปรียบเทียบกับการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการและส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์ผลการทดสอบแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริงเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ MATLAB/Simulink เพื่อนำผลการทดสอบทั้งสองส่วนมาทำการเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

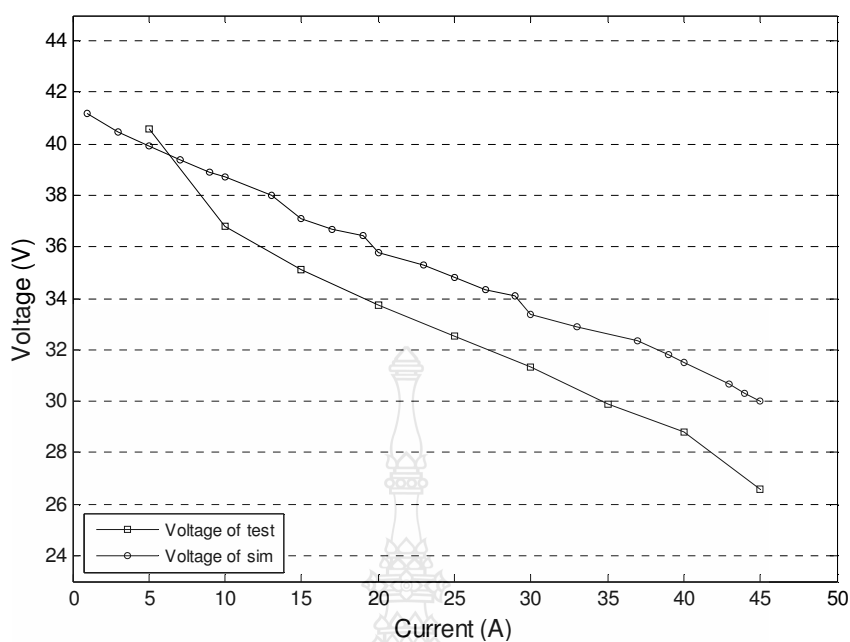
#### 4.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากแบบจำลองด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ MATLAB/Simulink ของเซลล์เชื้อเพลิงดังในภาพที่ 3.14 สามารถจำลองผลกระทบของตัวแปรต่างๆเปรียบเทียบกับผลการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าดังในภาพที่ 3.12 ได้ดังต่อไปนี้

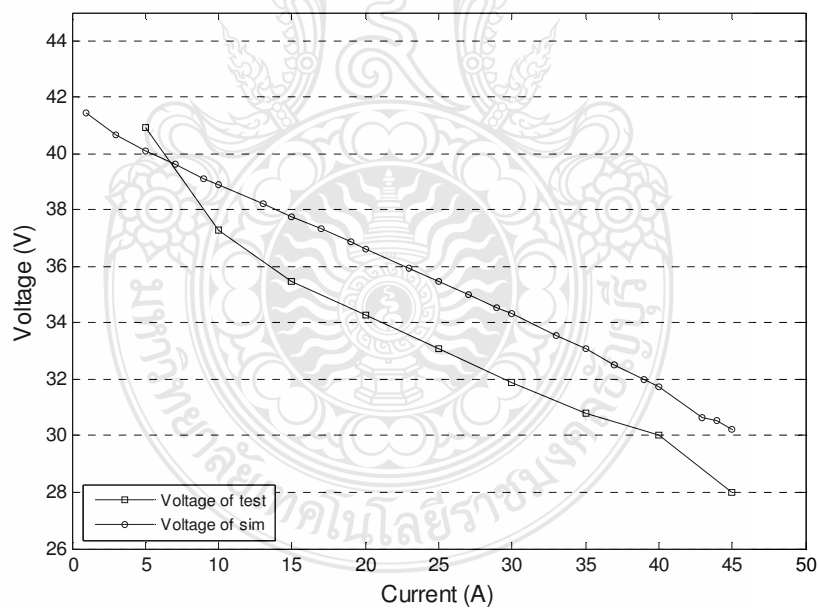
##### 4.1.1 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ความดันของไฮโดรเจน 1 บาร์



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ความดันของไฮโดรเจน 2 บาร์

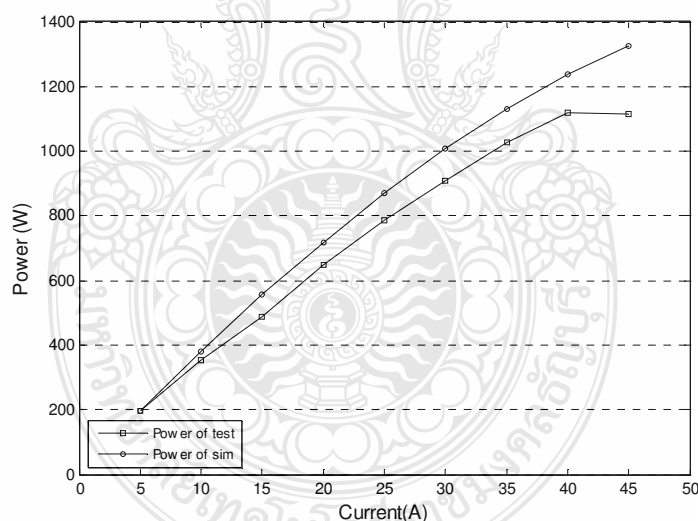


ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ความดันของไฮโดรเจน 3 บาร์

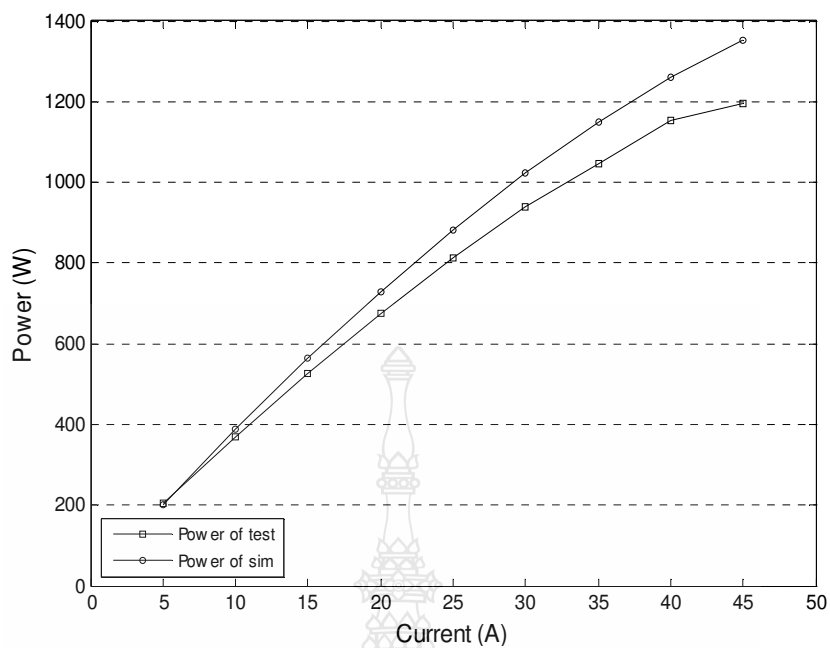
ผลการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการเมื่อปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนไปที่ค่า 1 บาร์ เซลล์เชื้อเพลิงจึงจะสามารถทำงานได้ ซึ่งจากการทดสอบทำการปรับอัตรา

การไหลของก๊าซไฮโดรเจนไปจนถึง 3 บาร์ ซึ่งจะมีผลการทดสอบ ดังภาพที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบกระแสกับแรงดัน เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันของไฮโดรเจน เมื่อกระแสสูงขึ้น มีผลทำให้แรงดันที่ได้แตกต่างกัน เนื่องจากข้อจำกัดของการแพร่กระจายของก๊าซ โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซจะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่า จากผลการทดลองที่ความดัน 3 บาร์ จะมีแรงดันสูงสุด แสดงให้เห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงจะมีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุดในช่วงความดันที่ 3 บาร์ซึ่งให้ค่าแรงดันสูงกว่าช่วงอื่น ๆ ไม่ว่าจะเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนให้มากขึ้นไปอีกก็ตามเมื่อมีการปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ก็จะมีผลต่ออุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยเมื่อมีการปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน และกระแสไฟฟ้าที่ปรับเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อมีไหลสูงอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงก็จะเพิ่มสูงตามไปด้วย

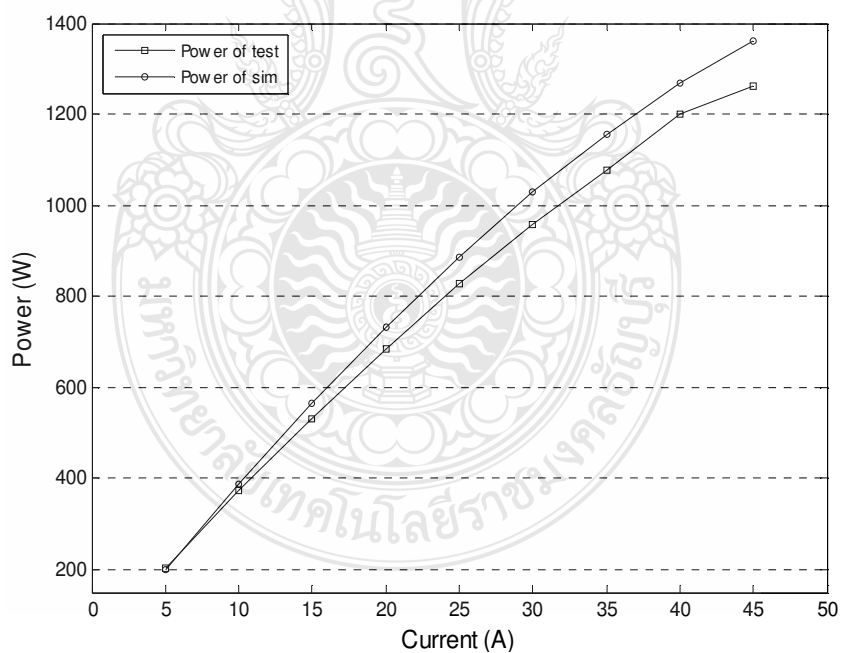
4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังงานเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติการทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยปรับกระแส 0 – 45 A เพิ่มขึ้นครั้งละ 5 A และปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนจาก 1 บาร์ จนถึง 3 บาร์ โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 บาร์ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังงานที่ได้



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังงานที่ความดันของไฮโดรเจน 1 บาร์



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังงานที่ความดันของไฮโดรเจน 2 บาร์



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังงานที่ความดันของไฮโดรเจน 3 บาร์

เริ่มต้นปรับกระแสที่ค่า 1 A จนถึง 45 A โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 A ปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนไปที่ค่า 1 บาร์ โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 บาร์จนถึง 3 บาร์ ซึ่งจะมีผลการทดสอบ ดังภาพที่ 4.4-4.6 ผลการทดลองเปรียบเทียบกระแสกับกำลังงาน เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันของไฮโดรเจน กระแสสูงขึ้น มีผลทำให้กำลังงานที่ได้แตกต่างกัน ค่ากำลังงานที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่ากำลังงานที่ให้ผลการทดสอบใกล้เคียงกับคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงมากที่สุด คือค่า 1200 W คือความดันของก๊าซไฮโดรเจนที่ 3 บาร์มีค่ากำลังงาน 1260 W ซึ่งมีค่ากำลังงานที่ดีที่สุด เมื่อก๊าซไฮโดรเจนมีความดันเพิ่มขึ้นดังในภาพ 3.13 จะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงตามไปด้วยเช่นกัน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ เมื่อมีการปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน และกระแสไฟฟ้าที่ปรับเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อมีโหลดสูงอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงก็จะเพิ่มสูงตามไปด้วย อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ประมาณ 65 องศา

#### 4.1.3 ความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.1 ความคลาดเคลื่อนที่ความดันของไฮโดรเจน 1 บาร์

Hydrogen; 1 bars ; 25 °C							
FC (math model)			FC (Experiment test bench)			ความคลาดเคลื่อน	
Voltage	Current	Power	Voltage	Current	Power	V (%)	P (%)
39.47	5	197.35	39.4	5	197	0.17	0.17
38.1	10	381	35.32	10	353.2	7.87	7.87
37.02	15	555.3	32.4	15	486	14.25	14.25
35.9	20	718	32.4	20	648	10.80	10.80
34.75	25	868.75	31.5	25	787.5	10.31	10.31
33.57	30	1007.1	30.3	30	909	10.79	10.79
32.32	35	1131.2	29.3	35	1025.5	10.30	10.30
30.98	40	1239.2	28	40	1120	10.64	10.64
29.47	45	1326.15	25.9	45	1165.5	13.78	13.78



ตารางที่ 4.2 ความคลาดเคลื่อนที่ความดันของไฮโดรเจน 2 บาร์

Hydrogen; 2 bars ; 25 °C							
FC (math model)			FC (Experiment test bench)			ความคลาดเคลื่อน	
Voltage	Current	Power	Voltage	Current	Power	V (%)	P (%)
40.9	5	204.5	40.6	5	203	0.73	0.73
38.69	10	386.9	36.8	10	368	5.13	5.13
37.56	15	563.4	35.1	15	526.5	7.0	7.0
36.43	20	728.6	33.7	20	674	8.10	8.10
35.29	25	882.25	32.5	25	812.5	8.58	8.58
34.1	30	1023	31.3	30	939	8.94	8.94
32.86	35	1150.1	29.9	35	1046.5	9.89	9.89
31.51	40	1260.4	28.8	40	1152	9.40	9.40
30.01	45	1350.45	26.6	45	1197	12.82	12.82

ตารางที่ 4.3 ความคลาดเคลื่อนที่ความดันของไฮโดรเจน 3 บาร์

Hydrogen 3 bars ; 25 °C							
FC (math model)			FC (Experiment test bench)			ความคลาดเคลื่อน	
Voltage	Current	Power	Voltage	Current	Power	V (%)	P (%)
41.11	5	205.55	40.9	5	204.5	0.51	0.51
38.9	10	389	37.3	10	373	4.28	4.28
37.77	15	566.55	35.5	15	532.5	6.39	6.39
36.64	20	732.8	34.3	20	686	6.82	6.82
35.5	25	887.5	33.1	25	827.5	7.25	7.25
34.31	30	1029.3	31.9	30	957	7.55	7.55
33.07	35	1157.45	30.8	35	1078	7.37	7.37
31.72	40	1268.8	30	40	1200	5.73	5.73
30.22	45	1359.9	28	45	1260	7.92	7.92

ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ความดันของไฮโดรเจนที่ 3 บาร์ตามภาพที่ 4.3 โดยทำการปรับ กระแสแบบมีโหลด (5 A) แรงดันแบบจำลองจะมีค่า 40.11 V และแรงดันจากปฏิบัติมีค่า 40.9 V ส่วนการปรับกระแสแบบมีโหลดสูงสุด (45 A) แรงดันแบบจำลองจะมีค่า 30.2 V และแรงดันจากปฏิบัติมีค่า 28 V ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังงานที่ความดันของไฮโดรเจน 3 บาร์ตามภาพที่ 4.6 โดยทำการปรับกระแส 5 A กำลังงานแบบจำลองจะมีค่า 200.55W และกำลังงานจากปฏิบัติมีค่า 204.5 W ส่วนการปรับกระแสแบบมีโหลดสูงสุด (45 A) กำลังงานแบบจำลองจะมีค่า 1359.9 W และกำลังงานจากปฏิบัติมีค่า 1260 W ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ของทั้งสองแบบนี้มีค่าคลาดเคลื่อนจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจากตารางเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ความดันของไฮโดรเจน 1-3 บาร์จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ดีและมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดอยู่ที่ความดันของไฮโดรเจน 3 บาร์ เป็นไปตามคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง จะมีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุดอยู่ในช่วงความดันนี้ ซึ่งให้ค่าแรงดันและกำลังงานสูงกว่าช่วงอื่นๆ ไม่ว่าจะเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนให้มากขึ้นไปอีกก็ตาม

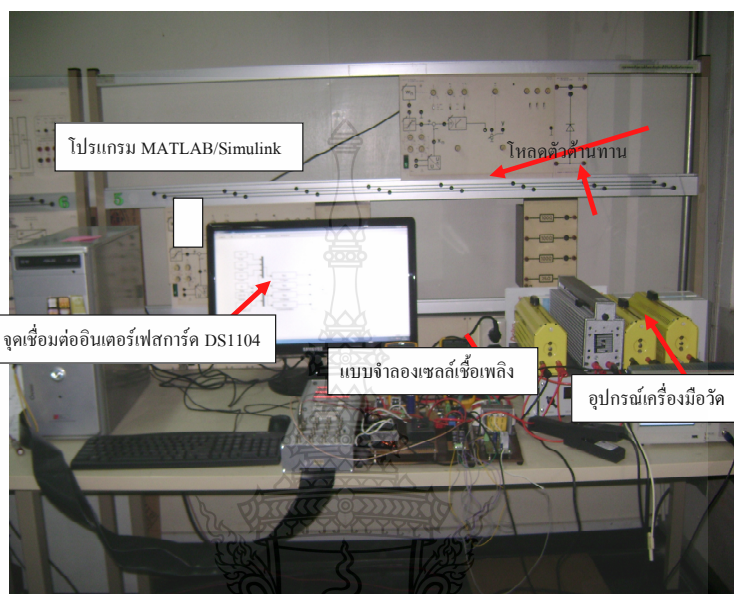
#### 4.2 การทดสอบแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริง

แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริงจะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ MATLAB/Simulink อยู่ใน บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104 ซึ่งทำหน้าที่คำนวณแรงดันอ้างอิงสำหรับการกำหนดค่าตัวรีเลย์ให้กับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า (DC-DC Converter) โดยใช้ค่ากระแสขาออกของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าแบบทอนระดับแรงดันเป็นอินพุต และส่วนที่เป็นวงจรภาคกำลังซึ่งเป็นส่วนจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดที่เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้

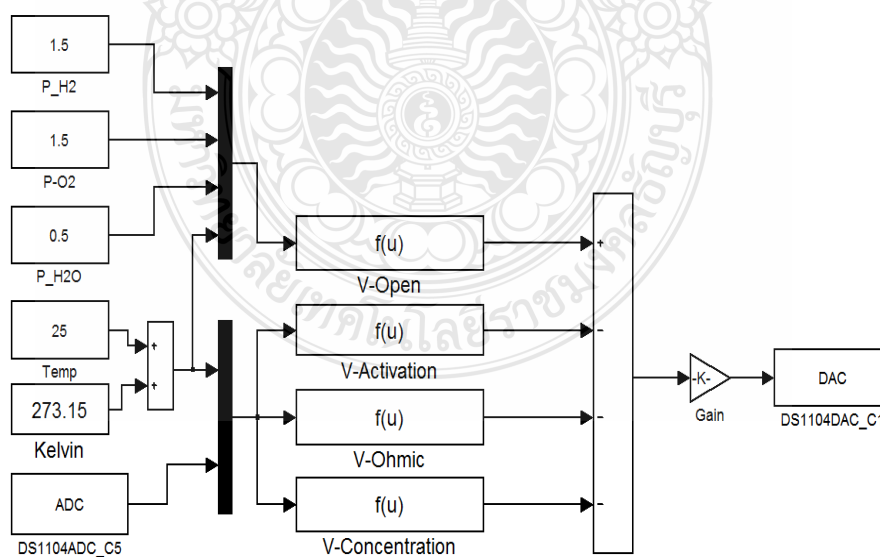
##### 4.2.1 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

1) Power Supply (Delta Elektronika SM 52-30)	1	เครื่อง
2) DS1104 Controller Board	1	เครื่อง
3) Computer (PC)	1	เครื่อง
4) แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง	1	แผง
5) ตัวต้านทานปรับค่าได้ 325 $\Omega$ ,1.2A	1	ตัว
6) ตัวต้านทานปรับค่าได้ 170 $\Omega$ ,1.7A	1	ตัว
7) ตัวต้านทานปรับค่าได้ 15 $\Omega$ ,5.5A	1	ตัว
8) ตัวต้านทานปรับค่าได้ 500 $\Omega$ ,500W	1	ตัว

- |                                    |   |         |
|------------------------------------|---|---------|
| 9) ดิจิตอล ออสซิลโลสโคป            | 1 | เครื่อง |
| 10) ดิจิตอล มัลติมิเตอร์           | 2 | เครื่อง |
| 11) Current Probe (Probe วัดกระแส) | 1 | ตัว     |



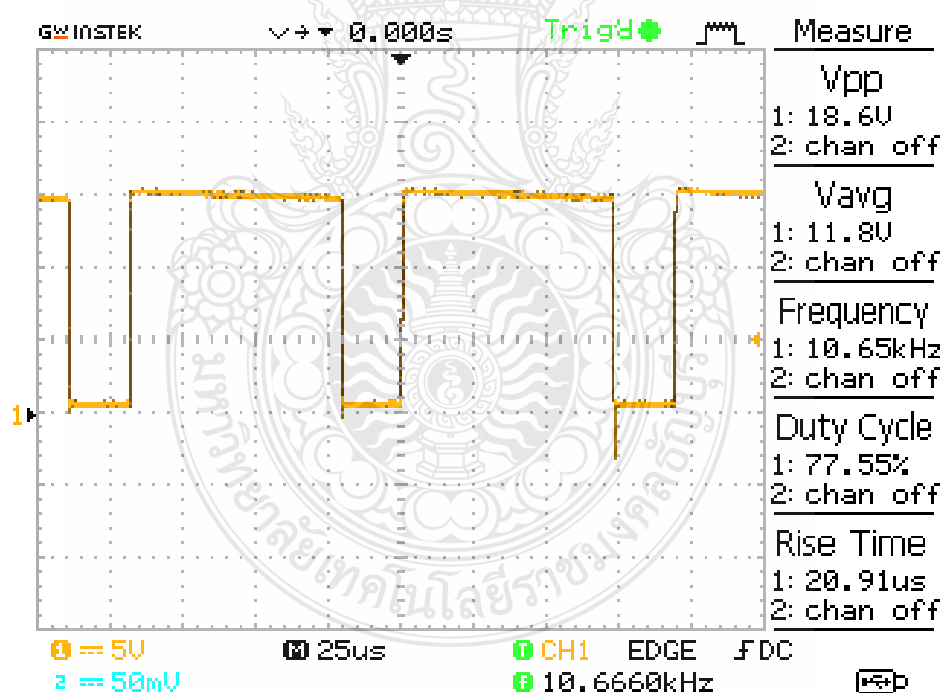
ภาพที่ 4.7 โต๊ะปฏิบัติการทดสอบแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง



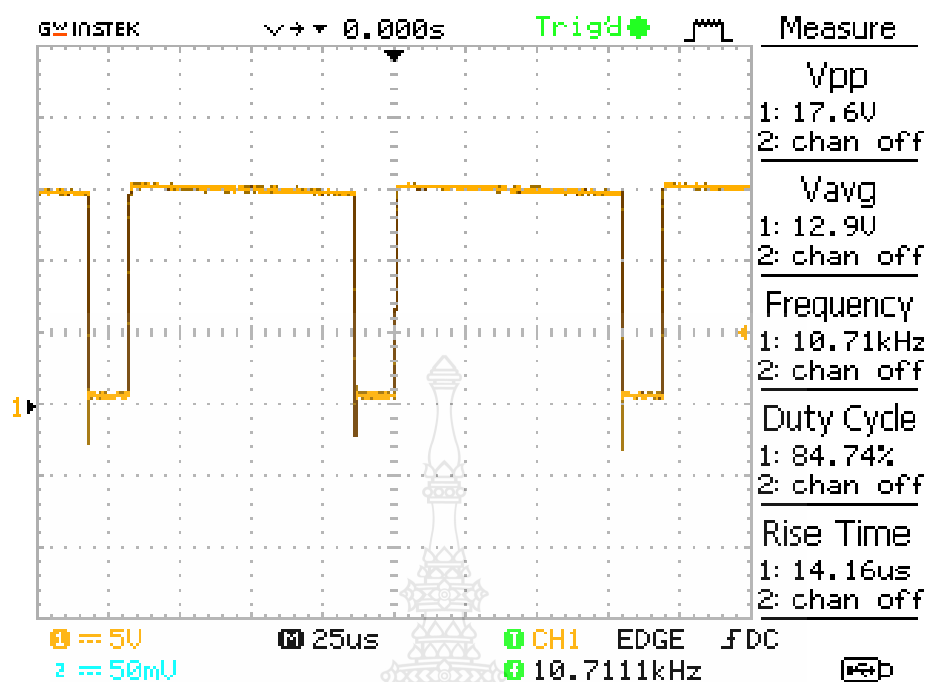
ภาพที่ 4.8 โปรแกรม MATLAB/Simulink ภายใน DS1104

### 4.3 ผลการทดสอบแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริง

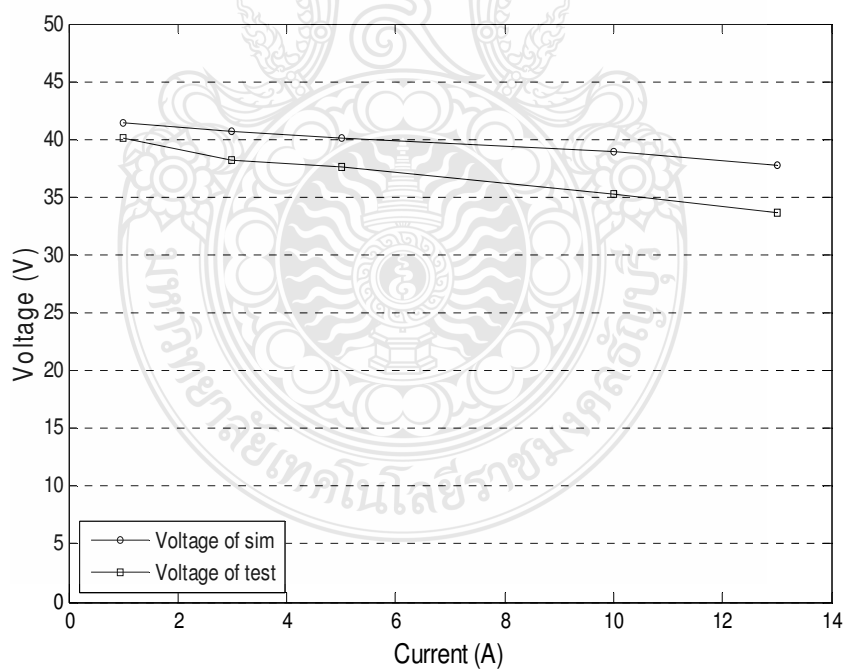
จากการหาความคลาดเคลื่อนที่ได้ในหัวข้อ 4.1.3 นั้นจะเห็นได้ถึงความคลาดเคลื่อนที่ดีและมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดเป็นไปตามคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง จะมีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุดในช่วงความดันที่ 3 บาร์ การทดสอบแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงจึงเลือกค่าตัวแปรที่เหมาะสมทางด้านขาเข้าที่ความดันของไฮโดรเจนที่ 3 บาร์ ทำการปรับแต่งโหลดโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานปรับค่าได้ เพื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดลองเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากระแสไฟฟ้าของแบบจำลอง ค่ากระแสไฟฟ้าจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแส จะทำหน้าที่ตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าจากนั้นเปลี่ยนจากสัญญาณกระแสไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยต่อตัวต้านทานเข้าไปที่ส่วนขาออก เพื่อส่งไปเข้ายังบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104 เพื่อนำไปคำนวณค่าสัญญาณอ้างอิงในการสร้างสัญญาณพัลส์ขับเกตของ มอสเฟต เพื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าแบบทอนระดับแรงดันที่มีค่าต่าง ๆ กันดังแสดงในภาพที่ 4.9 ถึง 4.10



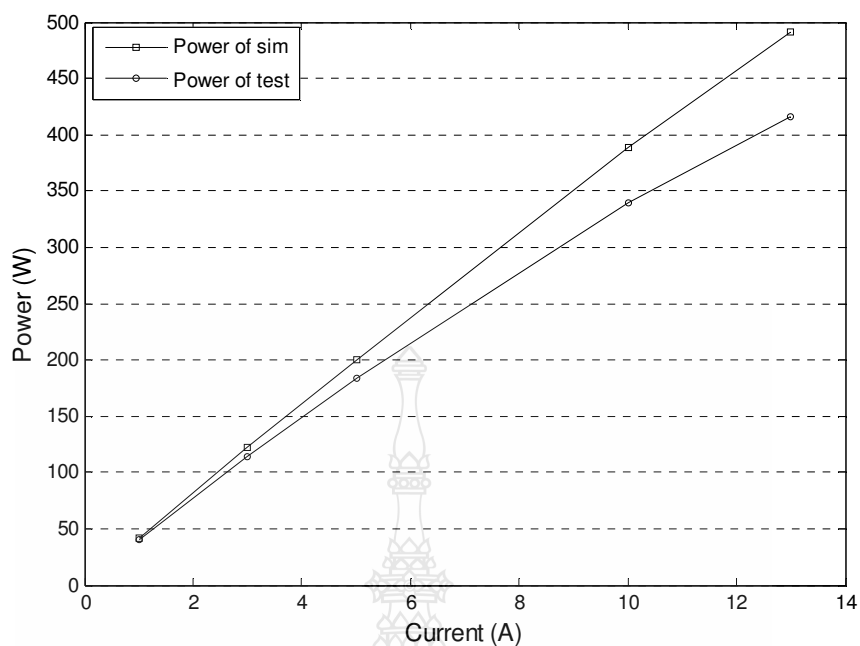
ภาพที่ 4.9 สัญญาณขับขาเกตของมอสเฟตแบบสัญญาณจริงที่ควิตซ์ไจเกิลร้อยละ 77.55



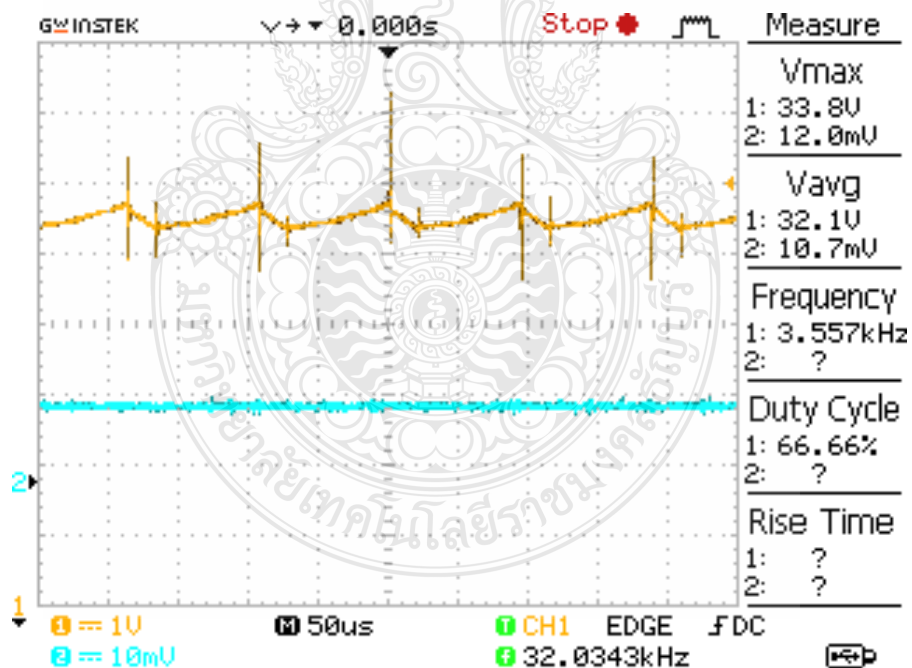
ภาพที่ 4.10 สัญญาณขั้วขาเกตของมอสเฟตแบบสัญญาณจริงที่วัดได้ใช้เคล็ร้อยละ 84.74



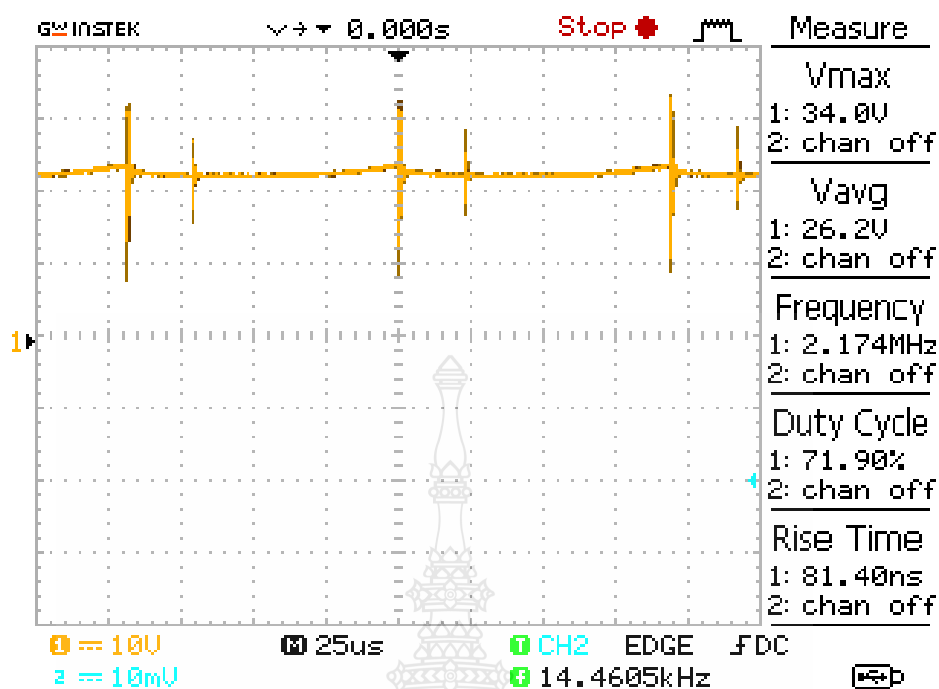
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าระหว่างแบบจำลองและการทดสอบที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ



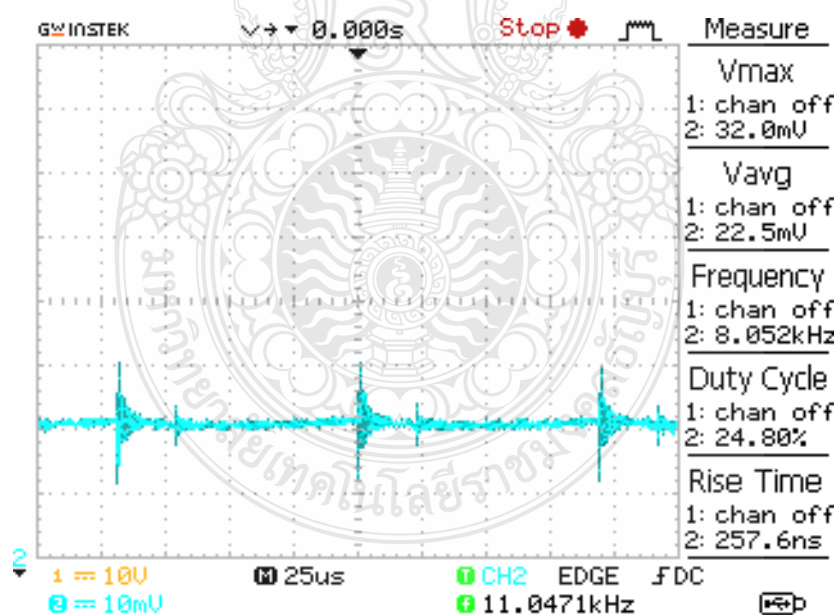
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าระหว่างแบบจำลองและการทดสอบที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ



ภาพที่ 4.13 สัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออกและแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า



ภาพที่ 4.14 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า



ภาพที่ 4.15 สัญญาณกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ เพื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดลองเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากระแสไฟฟ้าในแบบจำลอง ค่ากระแสไฟฟ้านี้จะถูกส่งไปคำนวณค่าตัวชี้ ไซเคิล ในการขับขาเกิดของมอเตอร์ โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink (ผ่านอุปกรณ์ DS1104) เพื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจร ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.4 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบของแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริงจะได้กราฟทั้งสองคือ V-I Curve และ Power Curve ดังภาพที่ 4.11 และภาพที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าผลการทดลองที่ได้มาเป็นในแนวทางเดียวกันกับคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง

**ตารางที่ 4.4** ผลการทดสอบแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริง

FC (math model)			FC (Experiment test bench)			ความคลาดเคลื่อน	
Voltage	Current	Power	Voltage	Current	Power	V (%)	P (%)
41.42	1	41.42	40.1	0.99	39.699	3.29	1.01
40.66	3	121.98	38.2	2.99	114.218	6.43	0.33
40.11	5	200.55	37.6	4.89	183.864	6.67	2.24
38.9	10	389	35.2	9.63	338.976	10.51	3.84
37.77	13	491.01	33.7	12.33	415.521	12.07	5.43

จากผลการทดสอบเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระของโหลดจะพบว่าแรงดันและกระแสของเอาต์พุตจะมีการเปลี่ยนแปลงจากค่า แรงดันแบบจำลองจะมีค่า 41.42 V และแรงดันจากปฏิบัติมีค่า 40.1 V ส่วน กระแสแบบจำลองจะมีค่า 1A และกระแสจากปฏิบัติมีค่า 0.99 A ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ของทั้งสองแบบนี้มีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ จากตารางผลการทดสอบแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงจะความคลาดเคลื่อนของกระแส และแรงดันอยู่ที่ร้อยละ 1 และ 3.29 ตามลำดับ ตรงตามคุณสมบัติแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง จากภาพที่ 3.20 แสดงผลการจำลองแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีการทำงานสอดคล้องใกล้เคียงกัน โดยการสังเกตได้จากผลของการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรทอนระดับในภาพที่ 4.13 และภาพที่ 4.14 พบว่าพฤติกรรมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปในทิศทางทางสอดคล้องกัน



#### 4.4 ข้อสังเกตจากการทดสอบ

จากการทดสอบทดสอบแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการออกแบบไว้พบว่า

4.1.1 แรงดันด้านขาออกก่อนข้างเรียบและสมำเสมอแม้จะอยู่ในสภาวะจ่ายโหลดโดยแรงดันจะตกลงขณะจ่ายโหลด โดยแรงดันตกระดับนี้ไม่ส่งผลใด ๆ ต่อโหลด ทำให้เห็นถึงเสถียรภาพของแหล่งจ่ายมีประสิทธิภาพดีพอสมควร

4.4.2 ในขณะที่ต้องจ่ายโหลดที่ 400 วัตต์แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงจะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงกว่าจ่ายโหลดที่วัตต์ต่ำกว่า

4.4.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงมีผลที่ได้ออกมาคล้ายกันกับผลของการจำลองด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ MATLAB/Simulink



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบ สร้าง และทดสอบ วงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC โดยทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ในห้องปฏิบัติการร่วมกับการสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อหา สภาพการทำงานเหมาะสมต่อการสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริง ซึ่งผลการทดสอบนี้จะทดสอบถึงค่าความ เปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ จากจุดต่างๆ ของระบบ ของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิด PEMFC พิกัด 1200 W, 26 V, 46A ส่วนวงจรแปลงผันจะใช้ MOSFET เป็นสวิทช์ ความถี่การสวิทช์ที่ 10 kHz ด้วยการเชื่อมต่อผ่านทางบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104 และใช้ความต้านทานปรับค่าได้ชนิดกำลังสูงขนาด 500W เป็นโหลด ในการทดสอบวิเคราะห์ ผลการทำงานของระบบ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 แบบจำลองกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการของเซลล์เชื้อเพลิง

ผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการสรุปได้ว่า อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเมื่อปรับกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้น จะมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้แตกต่างกัน จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและแบบจำลองที่ความดัน 3 บาร์ จะมีแรงดันสูงที่สุด และมีความสอดคล้องกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้มีแนวโน้มไปทางเดียวกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน จึงทำให้การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพดีสรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันกระแสแบบมีโหลด (5A) แรงดันแบบจำลองจะมีค่า 40.11 V และแรงดันจากปฏิบัติมีค่า 40.9 V ส่วนการปรับกระแสแบบมีโหลดสูงสุด (45A) แรงดันแบบจำลองจะมีค่า 30.2 V และแรงดันจากปฏิบัติมีค่า 28 V ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังงานโดยทำการปรับกระแส 5 A กำลังงานแบบจำลองจะมีค่า 200.55W และกำลังงานจากปฏิบัติมีค่า 204.5 W ส่วนการปรับกระแสแบบมีโหลดสูงสุด (45 A) กำลังงานแบบจำลองจะมีค่า 1359.9 W และกำลังงานจากปฏิบัติมีค่า 1260 W ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ของทั้งสองแบบนี้มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.5%, 7.9% ตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีค่าคลาดเคลื่อน

เกิดขึ้น โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในห้องทดสอบเพราะขณะที่ทำการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ต้อง ให้ก๊าซไฮโดรเจนได้ระบายออกสู่อากาศภายนอก

### 5.1.2 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริง

แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริงจะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ MATLAB/Simulink กับวงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC Buck Converter) ส่วนภาคควบคุมนั้นจะเป็นการควบคุมการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104 ผลที่ได้คือความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองกับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าที่กระแสขาออก 10A แรงดันแบบจำลองจะมีค่า 38.9 V และแรงดันจากปฏิบัติมีค่า 35.2 V กำลังไฟฟ้าแบบจำลองจะมีค่า 389 W และกำลังไฟฟ้าจากปฏิบัติมีค่า 339 W มีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ 10.51 พบว่าพฤติกรรมทั้งสองไปในทิศทางเดียวกันตรงไปตามคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง ผลการจำลองแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกับแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ามีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกสอดคล้องใกล้เคียงกัน นำผลการทดลองไปเขียนกราฟเปรียบเทียบกับผลการจำลองพบว่าพฤติกรรมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสัญญาณจริงมาศึกษาพฤติกรรมแทนเซลล์เชื้อเพลิงได้จริง

## 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการศึกษาและพัฒนาสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) เพื่อการพัฒนาขั้นต่อไป

5.2.1 ควรปรับปรุงระบบตรวจจับแรงดันและกระแสเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออกจาก PEMFC based Converter ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก Math model

5.2.2 ควรมีการนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง (PEMFC) ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าต่างกันเพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้

5.2.3 การทดสอบในการจ่ายโหลดที่มีกำลังงานสูงใช้ความต้านทานปรับค่าได้เป็นโหลดจะทำให้เกิดความร้อนสูงอาจจะทำค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงเกิดความเสียหายได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Jia, Y. Wang, M. Han, Dynamic Characteristic Study of Proton Exchange Membrane Fuel cell, ICEST 2008.
- [2] A. Kirubkran, Shailendra Jain, and R. K. Nema, The PEM Fuel cell System with DC/DC Boost Converter: Design, Modeling and Simulation, Department of Electrical Engineering, May 2009.
- [3] Marinis Andreas, Naxakis Ioannis, and Nakis Stavros, Analysis of a PEM Fuel Cell System dynamic response, September 2010.
- [4] บุญยัง ปลั่งกลาง, Energy Technology Laboratory, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553
- [5] Wanchai Subsingha. 2008, Power Electronic (Academic book), Thailand. RMUTT printing
- [6] Courtesy of Ballard Nexa™ Power, User's Manual System, Inc, January 2003
- [7] EG&G Technical Services, Inc, Fuel Cell Handbook (Seventh Edition), November 2004.
- [8] Erdmann, G. (2003), Future economics of the fuel cell housing market, International Journal Hydrogen, 28, pp.685-694.
- [9] Colleen Spiegel, PEM fuel cell modeling and simulation using Matlab, USA: Elsevier; 2008.
- [10] Alejandro J. del Real, Alicia Arce, Carlos Bordons, 2007, Development and experimental Validation of a PEM fuel cell dynamic model, Journal of Power Sources 173(2007), pp.310-324
- [11] EG&G Technical Services, Inc, Fuel Cell Handbook (Seventh Edition), November 2004.
- [12] P. Thounthong and P. Sethkul, Fuel cell Power Generator, EECON-29, pp. 309-312, Nov 2006
- [13] Winai Chanpeng and Yottana Khunatorn, 2009, Simulation of Dynamic Behavior of Proton Exchange Membrane Fuel Cell, International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009, Chiang Rai.
- [14] นิพนธ์ เกตุจ้อย, วัฒนพงษ์ รัถย์วิเชียร และ สุขฤดี นาทกรณกุล, เซลล์เชื้อเพลิง: เทคโนโลยีพลังงานสำหรับอนาคต, Naresuan University Journal.
- [15] ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข, MATLAB/Simulink for Real-time control system with DS1104, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



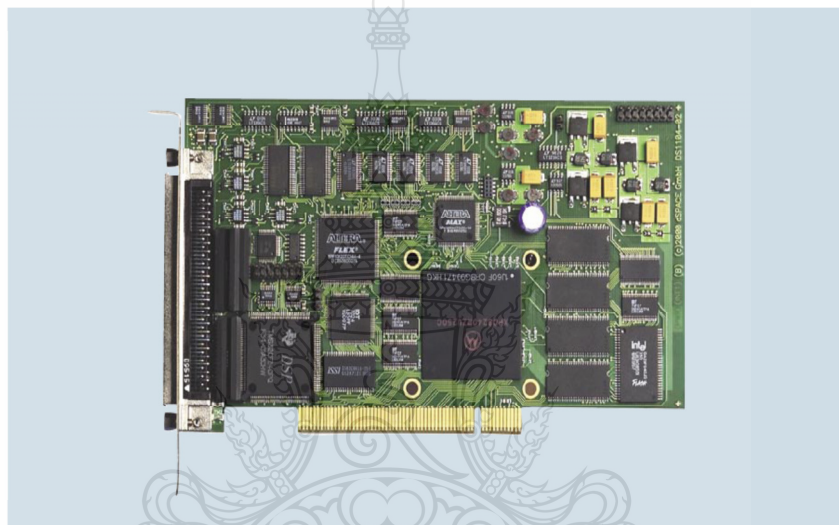
ภาคผนวก



**ภาคผนวก ก**

ข้อมูลคุณลักษณะของบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DS1104

## DS1104 R&D Controller Board



- Single-board PCI hardware for use in PCs
- Set of intelligent I/O on-board



# DS1104 R&D Controller Board

Cost-effective system for controller development



## Key Features

- Single-board PCI hardware for use in PCs
- Set of intelligent I/O on-board
- Incremental encoder interface
- Serial interface (UART)

## Description

### Application Areas

The real-time hardware based on PowerPC technology and its set of I/O interfaces make the controller board an ideal solution for developing controllers in various fields, such as drives, robotics, aerospace and automotives.

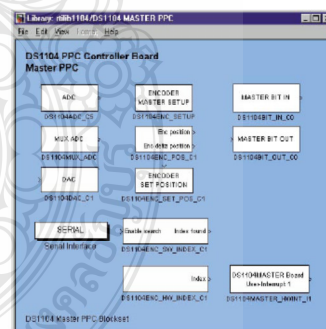
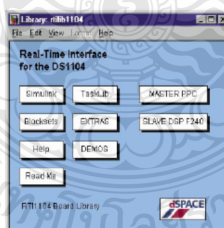
### Key Benefits

The DS1104 upgrades your PC to a powerful development system for rapid control prototyping („R&D“ stands for research & development). Real-Time Interface provides Simulink® blocks for graphical configuration of A/D, D/A, digital I/O lines, incremental encoder interface and PWM generation, for example. The board can be installed in virtually any PC with a free 5-V PCI slot.

## Real-Time Interface

### Using Real-Time Interface

With Real-Time Interface (RTI), you can easily run your function models on the DS1104 R&D Controller Board. You can configure all I/O graphically by dragging RTI blocks and reduce the implementation time to a minimum.





## Single-Board Hardware

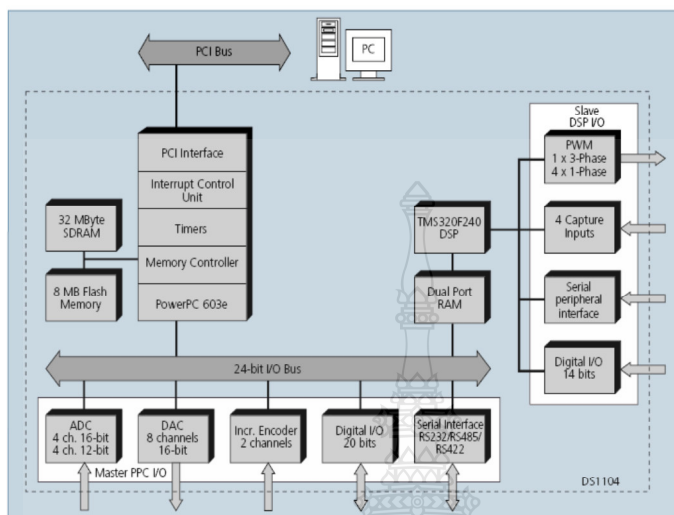
Parameter		Specification
Digital incremental encoder interface	Channels	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 2 independent channels</li> <li>■ Selectable single-ended (TTL) or differential (RS422) input (software programmable for each channel)</li> </ul>
	Position counters	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 24-bit resolution</li> <li>■ Max. 1.65 MHz input frequency, i.e., fourfold pulse count up to 6.6 MHz</li> <li>■ Counter reset or reload via software</li> </ul>
	Sensor supply voltage	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 5 V/0.5 A</li> </ul>
Serial interface	Configuration	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Single UART (universal asynchronous receiver and transmitter) with FIFO</li> <li>■ PLL-driven UART for accurate baud rate selection</li> <li>■ RS232/RS422/RS485 compatibility</li> </ul>
	Baud rate	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Up to 115.2 kBd (RS232)</li> <li>■ Up to 1 MBd (RS422/RS485)</li> </ul>
Slave DSP	Type	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Texas Instruments TMS320F240 DSP</li> <li>■ 16-bit fixed-point processor</li> </ul>
	Clock rate	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 20 MHz</li> </ul>
	Memory	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 64Kx16 external code memory</li> <li>■ 28Kx16 external data memory</li> <li>■ 4Kx16 dual-port memory for communication</li> <li>■ 32 KB flash memory</li> </ul>
	I/O channels	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 10 PWM outputs</li> <li>■ 4 capture inputs</li> <li>■ 1 serial peripheral interface</li> </ul>
	Input voltage range	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ TTL input/output level</li> <li>■ A/D converter inputs: 0 ... 5 V</li> </ul>
	Output current	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Max. ±13 mA</li> </ul>
Host interface	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Requires one 33 MHz / 32-bit 5-V PCI slot</li> </ul>	
Physical characteristics	Physical size	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 185 x 107 mm (7.28 x 4.2 in)</li> </ul>
	Ambient temperature	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 0 ... 55 °C (32 ... 131 °F)</li> </ul>
	Cooling	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Active cooling by fan</li> </ul>
	Power consumption	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 18.5 W</li> </ul>
	Power supply	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ +5 V ±5%, 2.5 A</li> <li>■ +12 V ±5%, 0.3 A</li> <li>■ -12 V ±5%, 0.2 A</li> </ul>

### Order Information

Product	Order Number
DS1104 R&D Controller Board	■ DS1104

### Relevant Software and Hardware

Software	Order Number	
Included	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ DS1104 Real-Time Library</li> <li>■ Experiment and Platform Manager for hardware management</li> </ul>	–
	Required	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Real-Time Interface</li> <li>■ Microtec C Compiler</li> </ul>
Optional		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ControlDesk Standard – Operator Version</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ControlDesk Standard – Developer Version</li> </ul>	■ CS_D
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ MLIB/MTRACE</li> </ul>	■ MLIB/MTRACE
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ CLIB</li> </ul>	■ CLIB
Hardware	Order Number	
Optional	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Connector Panel</li> </ul>	■ CP1104
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Combined Connector/LED Panel</li> </ul>	■ CLP1104



Block Diagram

### Induction Motor Control

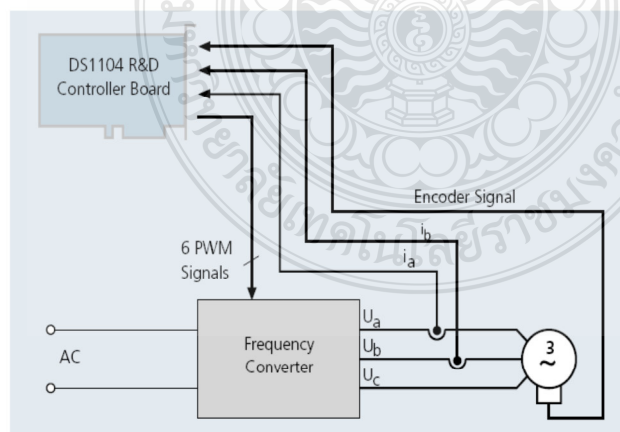
#### Drive Control

In this use case, an induction motor controller is developed with the DS1104. The slave DSP system was designed for applications in drive control, and the PowerPC's calculation power supports convenient simulation and a smooth development process. In combination with Simulink®, the board makes it easy to verify and optimize control algorithms and parameters.

#### Determining Values

One of the board's incremental encoder interfaces picks up the encoder signal of the motor, while two A/D converters are required to analyze the motor currents. The controller board calculates the control algorithm on the basis of the measured values and determines the corresponding pulse width modulation (PWM). The three-phase PWM signals are generated on the board's DSP subsystem and determine the converter's output voltage and frequency.

#### Use Case



**Headquarters in Germany**

dSPACE GmbH  
 Technologiepark 25  
 33100 Paderborn  
 Tel.: +49 5251 1638-0  
 Fax: +49 5251 66529  
 info@dspace.de

**United Kingdom**

dSPACE Ltd.  
 Unit B7 · Beech House  
 Melbourn Science Park  
 Melbourn  
 Hertfordshire · SG8 6HB  
 Tel.: +44 1763 269 020  
 Fax: +44 1763 269 021  
 info@dspace.ltd.uk

**France**

dSPACE Sarl  
 Parc Buroospace  
 Bâtiment 20  
 Route de la Plaine de Gisy  
 91573 Bièvres Cedex  
 Tel.: +33 1 6935 5060  
 Fax: +33 1 6935 5061  
 info@dspace.fr

**Japan**

dSPACE Japan K.K.  
 10F Gotenyama Trust Tower  
 4-7-35 Kitashinagawa  
 Shinagawa-ku  
 Tokyo 140-0001  
 Tel: +81 3 5798 5460  
 Fax: +81 3 5798 5464  
 info@dspace.jp

**USA and Canada**

dSPACE Inc.  
 50131 Pontiac Trail  
 Wixom · MI · USA 48393-2020  
 Tel.: +1 248 295 4700  
 Fax: +1 248 295 2950  
 info@dspaceinc.com



[www.dspace.com](http://www.dspace.com)



**ภาคผนวก ข**

ข้อมูลคุณลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิด Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)

ขนาด 1200W, 46A ยี่ห้อ Nexa<sup>TM</sup> รุ่น NEXA@1200

Ballard® fuel cell power module

Nexa™

power  
generation**BALLARD®**  
power to change the world®**NEXA™**

Ballard Power Systems introduces the Nexa™ power module, the world's first volume-produced proton exchange membrane (PEM) fuel cell module designed for integration into a wide variety of stationary and portable power generation applications. Using Ballard's PEM technology, the Nexa™ power module converts hydrogen fuel and oxygen in a non-combustive electrochemical reaction to generate up to 1200 watts of unregulated DC electrical power.

Emitting heat and water as by-products of power generation, the Nexa™ power module allows original equipment manufacturer products to be used in indoor environments and other locations not possible with conventional internal combustion engines. The Nexa™ power module's quiet operation and compact size make it ideal for integration into uninterruptible power supply systems, emergency power generators, and recreational and portable products. And unlike battery technology with limited run-times, the Nexa™ power module is capable of providing full extended run backup or intermittent electrical power for as long as fuel is supplied to the unit.

Brought to you by Ballard—the world leader in PEM fuel cell technology, the Nexa™ power module is backed by over 15 years of experience in the development of premium fuel cell products for transportation, stationary and portable applications.

**Specifications**

<b>Performance :</b>	Rated net output	1200 watts <sup>1</sup>
	Current	46 Amps <sup>2</sup>
	DC voltage	26 Volts <sup>2</sup>
	Operating lifetime	1500 hours
<b>Fuel :</b>	Composition	99.99% dry gaseous hydrogen
	Supply pressure	10 to 250 PSIG
	Consumption	≤ 18.5 SLPM <sup>3</sup>
<b>Operating Environment :</b>	Ambient temperature	3°C to 30°C (37°F to 86°F)
	Relative humidity	0% to 95% <sup>4</sup>
	Location	Indoors and outdoors <sup>4</sup>
<b>Physical :</b>	Length x width x height	56 x 25 x 33 cm (22 x 10 x 13 in)
	Weight	13 kg (29 lbs)
<b>Certification :</b>		CSA, UL
<b>Emissions :</b>	Liquid water	0.87 liters (30 fluid oz.) maximum per hour <sup>2</sup>
	Noise	≤ 72 dBA @ 1 meter
<b>Integration :</b>	Fuel interface	45° flared tube fitting for 1/4" OD tubing – metallic
	Electrical interface	#8 AWG electrical wire
	Control interface	Full duplex RS 485

<sup>1</sup> Beginning of life, sea level, rated temperature range.

<sup>2</sup> At rated net output.

<sup>3</sup> Non-condensing.

<sup>4</sup> Unit must be protected from inclement weather, sand and dust.

Specifications and descriptions in this document were in effect at the time of publication. Ballard Power Systems Inc. reserves the right to change specifications or to discontinue products at any time (03/02).

Ballard, **BALLARD** and Power to Change the World are registered trademarks and Nexa is a trademark of Ballard Power Systems Inc. © 2002 Ballard Power Systems Inc. SPC5000039-0C PRINTED IN CANADA

t) 604 454 0900  
f) 604 412 4700  
www.ballard.com

Ballard Power Systems Inc.  
9000 Glenlyon Parkway  
Burnaby, British Columbia  
Canada V5J 5J9






ภาคผนวก ค  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ท.1 Modeling of PEM Fuel Cell with DC/DC Buck Converter by MATLAB/Simulink.





การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8

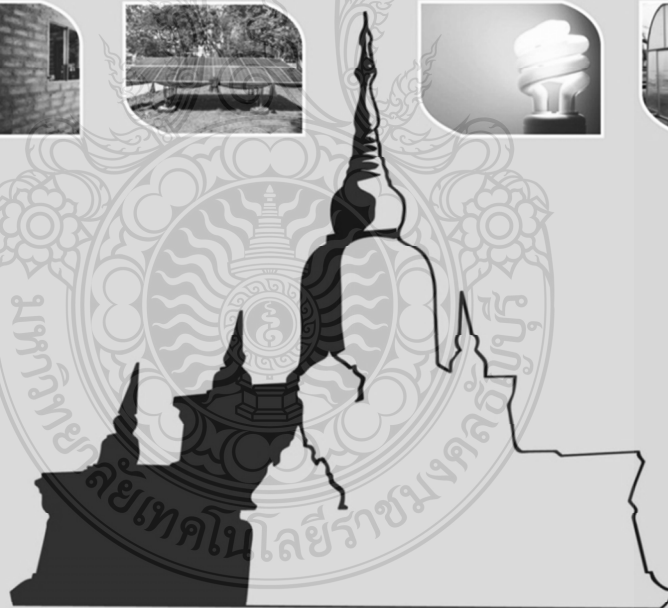
การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8  
The 8<sup>th</sup> Conference on Energy Network of Thailand; E-NETT 8

คณวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พลังงานและนวัตกรรมสีเขียวเพื่ออนาคตอาเซียน  
Green Energy and Innovations for ASEAN's Future



วันที่ 2-4 พฤษภาคม 2555 โรงแรมตักสิลา จังหวัดมหาสารคาม



### รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

รศ.ดร. กุลเชษฐี เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร. สุานิตย์ เมธิยานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รศ.ดร. ภูมิรัฐ กาศยปน์นันทน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. นรินทร์ วัฒนกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร. มานะ อมรกิจบำรุง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. สมเกียรติ ปรัชญารากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. อติศักดิ์ นาดกรณกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. สัมพันธ์ ฤทธิเดช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร. สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร. เสริม จันทรฉาย	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร. จินดา เจริญพรพาณิชย์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร. กิตติ สภาพรประสารณ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร. จุฬารภรณ์ เบญจปิยะพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร. ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. ธนรัฐ ศรีวีระกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. อำไพศักดิ์ ทีบุญมา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร. นริส ประทีนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. ปรีชา เต็มสุขสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. จิรวรรณ เตียรดีสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. ธนิต สวัสดิ์เสวี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ. สมบูรณ์ เวชกามา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. วันชัย นิมนวี	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
ผศ.ดร. ศักดิ์ระวี ระวังกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผศ.ดร. ศิริ ทวงพร	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรธานี
ผศ.ดร. สมชาย มณีวรรณ	มหาวิทยาลัยแรศวร
ผศ.ดร. นิพนธ์ เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยแรศวร
ผศ.ดร. จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. เจริญพร เลิศสถิตธนกร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. บพิตร บุปผโชติ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. ภูมิล ภูมิสะอาด	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม





### รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ(ต่อ)

ผศ.ดร. ทรงชัย วีริยะอำไพวงศ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. มณีรัตน์ องค์กรรัตติ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อติศักดิ์ บัณฑิตยะ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อนุสรณ์ แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อภินันท์ อรุโสภา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร. กันย์ วงศ์เกษม	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ดร. ดาเรศน์ กิตติโยภาส	กรมส่งเสริมการเกษตร
	และสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
อ.ดร. ชลิดา เนียมนุ้ย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร. ชัยยันต์ จันทร์ศิริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อ.ดร. ณรงค์ อึ้งกิมบัว	มหาวิทยาลัยบูรพา
อ.ดร. เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. จักรมาส เลหาวิช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. ณัฐวุฒิ สุวรรณเทา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นเรศ มีโส	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นิวัตร อังควิเศษฐพันธ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นุชิตา สุวแพทย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. พลภุชณ์ จิตต์โต	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. ละมุล วิเศษ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. สุนันทา เลาวินัยศิริ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. สุพรรณ ยั่งยืน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. อรุมา ลาสุนนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ. ปรีชา ศรีประภาคาร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ. ศิริลักษณ์ วงศ์เกษม	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. วทัญญู รอดประพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร. กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร. ระวี พรหมหลวงศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8  
วันที่ 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 จังหวัดมหาสารคาม

### สารบัญ (ต่อ)

รหัสบทความ	ชื่อบทความ
RE27	แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ร่วมกับวงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink <u>ประสิทธิ์ พรหมมินทร์ และ วันชัย ทวีพิสัยงษ์</u>
RE29	การศึกษาปริมาณและคุณสมบัติของน้ำมันสบู่ออกจากวิธีการสกัดสบู่ออกเพื่อศึกษาคุณสมบัติของน้ำมัน สบู่ออกจากการเก็บเมล็ดและน้ำมัน ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ <u>ชนากานต์ อาสาสุจริต, อมรรัตน์ ส้อมโนธรรม, ยุทธนา ฐานมงคล, ธนิตา สนิธิเศวต, นัฐวิ ตีรณานนท์ เทพฤทธิ์ กัณหานนท์ และปิยะนันท์ ศรีศิริ</u>
RE31	แบบจำลองของสัดส่วนรังสีกระจายต่อรังสีรวมสำหรับประเทศไทย <u>เสริม จันทร์ฉาย, เจษฎา ประทุมสิทธิ์, สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย, รุ่งรัตน์ วัฒนา</u>
RE32	การออกแบบและทดสอบระบบการรวมแสงอาทิตย์โดยแผ่นเรืองแสงเพื่อประยุกต์ใช้ในการผลิต กระแสไฟฟ้า <u>ฉัตรชัย คำคำ และ วัฒนา รติสมิทธิ์</u>
RE33	การตรวจวัดพลังงานจากรังสีและความสว่างของแสงอาทิตย์ด้วยสถานีวัดอย่างง่าย <u>สมพร หงษ์กุง, นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์, วัชรายุทธ ลำดวน, สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์</u>
RE34	แบบจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับสำหรับแหล่งกำเนิด พลังงานทดแทน <u>นาวิน ยุกตานนท์, ณัฐภัทร พันธุ์คง และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์</u>
RE35	ผลของฝุ่นละอองที่มีต่อคุณสมบัติทางแสง และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ <u>ทรงเกียรติ กิตติสินธิรักษ์, วิชิต แสงสุวรรณ, จริญญา ศรีธรรมาธิคุณ, อมรรัตน์ ลิ้มมณี และ กอบศักดิ์ ศรีประภา</u>
RE36	ผลของไฮโดรเจนในชั้นไอทีที่มีต่อการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน <u>ณัฐกานต์ อุดมเดชาณัติ, ทรงเกียรติ กิตติสินธิรักษ์, กมลพรรณ ชุมพลรัตน์, วิทวัส มกรพงศ์, วิชิต แสง สุวรรณ, จริญญา ศรีธรรมาธิคุณ, อมรรัตน์ ลิ้มมณี และ กอบศักดิ์ ศรีประภา</u>
RE37	สมรรถนะของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 2.2kWp ชนิดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเป็นเวลา 1ปี ติดตั้งที่สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(สวทช.) <u>วิทวัส มกรพงศ์, ทรงเกียรติ กิตติสินธิรักษ์, กมลพรรณ ชุมพลรัตน์, ณัฐกานต์ อุดมเดชาณัติ, วิชิต แสง สุวรรณ, จริญญา ศรีธรรมาธิคุณ, อมรรัตน์ ลิ้มมณี และ กอบศักดิ์ ศรีประภา</u>
RE38	การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งแบบเบส <u>พรสวรรค์ ศรีสุพรรณ, อาทิตย์ เนรมิตตภพพงศ์</u>
RE41	สมรรถนะทางความร้อนของตู้อบแห้งแสงอาทิตย์แบบอากาศร้อนไหลลง <u>วรรณุช แจงสว่าง และ อนุชิต กลั้วประสิทธิ์</u>
RE42	การประยุกต์ใช้ชุดเก็บรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมโซฟอนชนิดแบนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิในหม้อต้มข้าวของ การกลั่นเอทานอล <u>ชนากร เปรมประยูร, สัมพันธ์ ฤทธิเดช และ บพิช บุปผไชติ</u>



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8  
วันที่ 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 จังหวัดมหาสารคาม

**แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ร่วมกับวงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับ  
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink  
Modeling of PEM Fuel Cell with DC/DC Buck Converter by MATLAB/Simulink**

ประสิทธิ์ พรหมมินทร์ และ วันชัย ทวีพิสัยงษ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ศาลากลางตึก อำนวยการบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-89959-2677 E-Mail: sil777@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ร่วมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทำการศึกษาเป็นแนวทางในการสร้างเครื่องจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ขึ้นมาทดแทนซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา ค้นคว้า ด้านเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นรุ่น NEXA@1200 ของบริษัท Ballard ขนาดพิกัดกำลัง 1200 วัตต์ แรงดันขาออกที่ 26 – 43 โวลต์ จากการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการพบว่าผลการจำลองมีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองจริงโดยใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกันทั้งในระบบจำลองและในการทดลอง นอกจากนี้ผลการจำลองของวงจรเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับวงจรทอนระดับแรงดัน แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกับการทดลองในห้องปฏิบัติการอย่างเป็นที่น่าพอใจ

**คำหลัก:** เซลล์เชื้อเพลิง, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง

**Abstract**

This paper presents mathematical model using MATLAB / Simulink in order to analyze the performance of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) together with DC/DC buck converter model. It will lead to a building of a prototype of PEMFC simulator, which will be useful to study the behavior of the fuel cell. The fuel cell in the project is a 1.2 kW, 26-43 output voltage NEXA@1200 from Ballard Company. The simulation result was compared with an actual experiment in laboratory by using the same parameters, such as pressure of hydrogen and oxygen flow rate. In addition, the simulation results show that output voltage from the DC/DC buck converter model is approximately closed to the actual PEMFC in an experimental lab.

**Keywords:** Fuel cell, Mathematical Model, Fuel cell Model



## 1. บทนำ

พลังงานใหม่และพลังงานสะอาดเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งในอนาคต ถูกนำมาพิจารณาเพื่อทดแทนและลดการเกิดมลภาวะต่าง ๆ ที่จะนำมาทำเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ได้จากกาเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยไม่ต้องมีกระบวนการเผาไหม้ที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC มีข้อดีคือน้ำหนักเบาและมีขนาดเล็กให้ความหนาแน่นกำลังไฟสูงปัจจุบันราคาเซลล์เชื้อเพลิงมีราคาสูงมากและอายุการใช้งานที่จำกัด ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมแนวคิดในการสร้างเครื่องจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC จึงเกิดขึ้น โดยอ้างอิงจากตัวเซลล์เชื้อเพลิงของบริษัท Ballard รุ่น NEXA 1200 ขนาด 1.2kW ให้แรงดันไฟฟ้าขาออก 26-43 โวลต์ในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเครื่องจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC มีสองส่วนคือส่วนที่เป็นระบบของแบบจำลอง PEMFC และส่วนที่เป็นแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำงานร่วมกันโดยสร้างแบบจำลองทั้งสองส่วนด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่าค่าที่ค่าที่ได้สอดคล้องกับผลการวัดแรงดันขาออกเมื่อทำการเพิ่มกระแสไหลจากปัจจัยของอุณหภูมิ และความดันไฮโดรเจน เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองทั้งสอง โดยเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของเซลล์เชื้อเพลิงจะทำให้แรงดันขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลง ก่อนนำไปสร้างเป็นชิ้นงานจริงต่อไป

## 2. ทฤษฎี

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ได้จากการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นพลังงานสะอาดไม่เกิดควันทันพิษจากการเผาไหม้ จึงปราศจากมลพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต แหล่งพลังงานที่ใช้เป็น

เชื้อเพลิงหลักของเซลล์เชื้อเพลิงมาจาก ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) ทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซออกซิเจน (Oxygen) ในรูปของอากาศ ปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemically) ผลลัพธ์ที่ได้จากปฏิกิริยานี้คือ ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันต่ำ ความร้อน และน้ำ ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถนำไปใช้กับโหลดทางไฟฟ้าได้หลากหลาย

### 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC เริ่มต้นจากการอัดก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) เข้าสู่ขั้วบวกของเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้ความดันเพื่อให้ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาไปได้ หลังจากก๊าซไฮโดรเจน ผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาไปแล้วจะทำการปล่อยอะตอมขั้วบวก (H+) ไปสู่ขั้วลบของเซลล์เชื้อเพลิง และปล่อยอิเล็กตรอน (e<sup>-</sup>) ผ่านขั้วออกมาไปสู่ระบบวงจรภายนอกเพื่อสร้างกระแสและย้อนกลับสู่ขั้วลบของเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับออกซิเจนจะถูกดันผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นกันแต่ผ่านทางขั้วลบแทน โดยทำหน้าที่ดึงอะตอมของ H+ ผ่านชั้นเมมเบรนเข้ามาและรับอิเล็กตรอนอิสระ (e<sup>-</sup>) จากวงจรภายนอก แล้วทำปฏิกิริยากันได้ผลลัพธ์คือ โมเลกุลของน้ำ (H<sub>2</sub>O) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 [1]

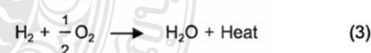
ปฏิกิริยาเคมีของขั้วแอโนด



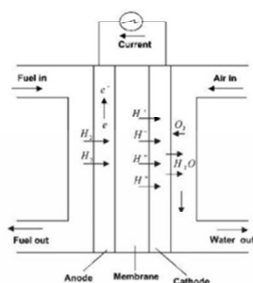
ปฏิกิริยาเคมีระหว่างขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาเคมีรวม



ในสภาพไม่มีโหลดเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์จะให้แรงดัน ประมาณ 0.8-1.2 V ที่ศักย์กระแสประมาณ 0.5 A/cm<sup>2</sup> ดังนั้น จึงต้อง ต่ออนุกรมหลายๆ เซลล์เข้าด้วยกันเป็นก้อนเซลล์เชื้อเพลิงหรือที่เรียกว่า Fuel-cell stack เพื่อให้ได้แรงดันที่สูงขึ้น



รูปที่ 1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC

## 2.2 ลักษณะสมบัติสภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิง

แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในภาวะที่ดีที่สุดตามทฤษฎีควรจะเป็น 1.2 V แต่อย่างไรก็ตาม จะพบว่าความจริงว่าแรงดันไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงจะสำเร็จเมื่อได้แรงดันไฟฟ้าที่สูงที่สุดจากผลผลิต เมื่อสื่อนำวโคจรและแรงดันไฟฟ้าก็จะต่ำลง เมื่อวัดดูดีบที่ใดเพิ่มขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงในการดำเนินงานจริงนั้นจะเป็นระบบที่ผันกลับไม่ได้ หรือโดยทั่วไปมักเรียกว่ากระบวนการโพลาไรเซชัน (Polarization) เป็นภาวะที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการตามความเป็นจริงมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี หรือเกิดค่าแรงดันไฟฟ้าเกินตัวที่ต้องนำมาหักลบ โดยแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้อจริง ( $V_{cell}$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการ [2]

$$V_{cell} = V_{open} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc} \quad (4)$$

โดยที่  $V_{open}$  คือ ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐาน หรือ ศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี  $V_{act}$  คือ ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาไรเซชันเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี,  $V_{ohmic}$  คือ ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า,  $V_{conc}$  คือ ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาไรเซชันเนื่องจากการถ่ายโอนมวล โดย ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวทั้ง 3 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{open} = V_o - \left[ \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \times \sqrt{P_{O_2}}} \right) \right] \quad (5)$$

โดยมีปัจจัยที่สำคัญดังในสมการที่ (5) สมการของ Nernst สามารถคำนวณค่าแรงดันขณะที่ไม่มีโหลดจากปฏิกิริยาทางเคมีได้เมื่อ R คือค่าคงที่ของก๊าซซึ่งค่าเท่ากับ 8.3144 J/mol, F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ 96,487 C/mol,  $V_o$  คือ ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์เชื้อเพลิง, T คืออุณหภูมิ หน่วยองศาเคลวิน, n คือจำนวนของอิเล็กตรอนต่อโมเลกุล,  $P_{H_2O}$  คือค่าความดันของน้ำ,  $P_{H_2}$  คือค่าความดันของไฮโดรเจน,  $P_{O_2}$  คือค่าความดันของออกซิเจน

สภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ดังรูปที่ 2 พบว่าเกิดการสูญเสียมีผลให้แรงดันลดลง ซึ่งมีทั้งหมดสามช่วงด้วยกันช่วงแรกจะเกิดการสูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ศักย์ไฟฟ้าส่วนหนึ่งถูกใช้ไปกับการขับเคลื่อนปฏิกิริยาเคมี เขียนได้ดังสมการที่ (6)

$$V_{act} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left( \frac{I_{dc}}{I_o} \right) \quad (6)$$

ช่วงที่สองการสูญเสียแรงดัน มีค่าระหว่าง 0.6-0.7 VDC จะเป็นลักษณะเชิงเส้นเนื่องจากเกิดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic Polarization) คือการสูญเสียเนื่องมาจากความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดและเมมเบรน  $R_c$  ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทานไอออนิกความต้านทานอิเล็กทริกและค่าความต้านทานหน้าสัมผัสของตัวนำหาได้จากสมการที่ (7)

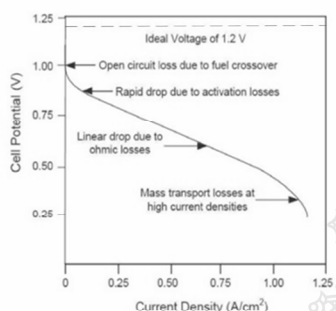
$$V_{ohmic} = I_{dc} \cdot R_{fc} \quad (7)$$

ช่วงสุดท้ายคือการสูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานอันเกิดจากความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ลดต่ำลงเมื่อ



เพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส เพราะสารถูกใช้ในอัตราที่สูง แต่การถ่ายเทมวลสารเข้าไปทำปฏิกิริยาเป็นไปได้น้อยจากสมการที่ (8)

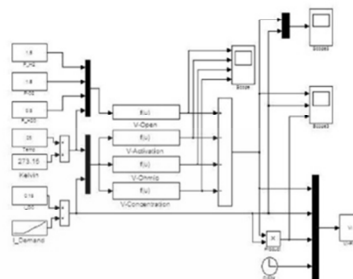
$$V_{conc} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left( 1 - \frac{I_{dc}}{I_{lim}} \right) \quad (8)$$



รูปที่ 2 สภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC

**2.3 แบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิง**

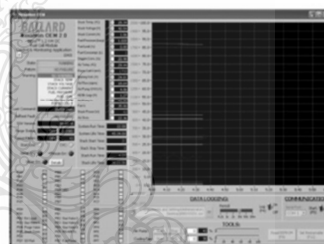
แบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงทางคณิตศาสตร์เป็นการพัฒนามาบนพื้นฐานของสมการแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จากสมการที่ (4) ถึง (8) ในรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงใน MATLAB เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า ขนาด 1.2 kW 46A เป็นรุ่น NEXA1200 ของบริษัท Ballard สามารถทำการปรับค่าความดันก๊าซไฮโดรเจน ออกซิเจน อุณหภูมิและกระแสไหลได้อย่างอิสระ ซึ่งมีผลทำให้เกิดแรงดันขาออกเปลี่ยนแปลง ทดลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการซึ่งในสภาวะไร้โหลด ขณะมีโหลดเมื่อเทียบกับแบบจำลอง เพื่อทราบหลักการงานในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งพบว่าความดันของก๊าซไฮโดรเจนมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าให้เป็นไปตามค่าความดันไฮโดรเจนออกซิเจน อุณหภูมิและกระแสไหลให้สอดคล้องกับสมการที่ (4) ถึง (8) [1,2]



รูปที่ 3 โครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 4 ชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ในห้องปฏิบัติการ

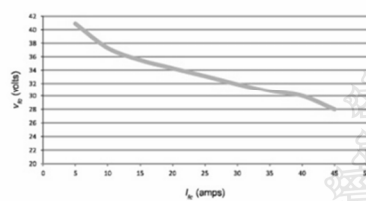


รูปที่ 5 โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application

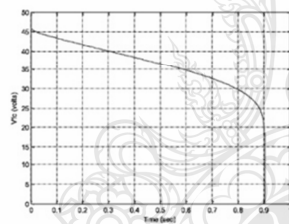
จากผลการทดลองในรูปที่ 6 แสดงแรงดันไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการทำการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าในแบบจำลองในรูปที่ 7 ซึ่งผลที่ได้ในสภาวะไร้โหลดในแบบจำลองมีค่า 45.3 V ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 40.8 V และในสภาวะมีโหลดสูงสุดในแบบจำลองมีค่า 30 V ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 27.8 V ซึ่งผลในทางปฏิบัติจะมีค่าผิดพลาดมากกว่า ในแบบจำลอง ซึ่งเกิดจากค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อเป็นการรักษาระดับ



แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกให้มีค่าความผิดพลาดน้อยลง การสร้างแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำงานร่วมกับแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงให้มีการทำงานสอดคล้อง และใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการโดยใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกันทั้งในระบบจำลองและการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยทำการปรับค่าความดันก๊าซไฮโดรเจน ออกซิเจน อุณหภูมิและกระแสไหลดัดได้อย่างอิสระ



รูปที่ 6: ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความดันของก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ ในสภาวะไร้โหลด

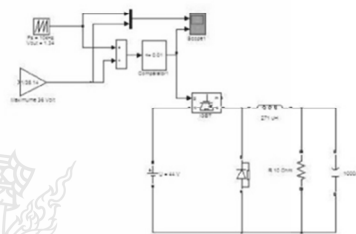


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาที่ความดันของก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ ในสภาวะไร้โหลด จากรูปที่ 6 และ รูปที่ 7 แรงดันไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการทำการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าในแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าสอดคล้องเป็นไปในแนวทางเดียวกัน

3. การสร้างแบบจำลอง และส่วนประกอบ

กระแสตรงโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink กำหนดให้

ความถี่สวิตช์ของสัญญาณพัลส์หรือ  $f_s = 10$  kHz นำไปเปรียบเทียบกับระดับแรงดันที่ได้จากแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ผลที่ได้คือสัญญาณพัลส์ที่มีค่าตัวชี้ไขเคลเปลี่ยนแปลงตามระดับแรงดันที่เข้ามาเปรียบเทียบกับไฟฟ้ากระแสตรง 44 VDC จะป้อนให้กับตัว IGBT ตัวเก็บประจุ 1,000 uF และความต้านทานของโหลด 10 โอห์ม จะสามารถคำนวณหาค่าอัตราขยายแรงดันได้ดังสมการที่ (9) การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดที่ยังทำงานในโหมดกระแสไหลดัดต่อเนื่องได้จากสมการที่ (10) และอัตราการลอคคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกหาได้จากสมการที่ (11) [3]



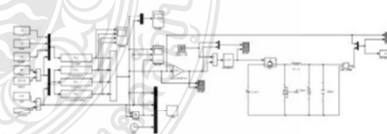
รูปที่ 8 แบบจำลองของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า

$$D = \frac{V_o}{V_s} \tag{9}$$

$$L_{min} = [(1 - D_{max})R] / 2f_s \tag{10}$$

$$V_{ripple} = \frac{1 - D_{max}}{8LCf_s^2} \tag{11}$$

4. การจำลอง และผลการจำลองระบบ

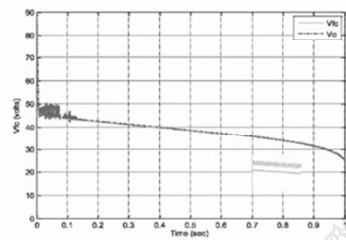


รูปที่ 10 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกับแบบจำลองของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า



#### 4.1 ผลการจำลองของระบบ

ผลการจำลองของระบบที่ทำงานร่วมกันแสดงดังรูปที่ 11 พบว่าวงจรทอนระดับแรงดันสามารถกำเนิดแรงดันได้ตามที่แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงและเปรียบเทียบแรงดันขาออกทั้งสองมีผลใกล้เคียง



รูปที่ 11 ผลการจำลองแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกับวงจรทอนระดับแรงดันและเปรียบเทียบ

จากรูปที่ 11 แสดงผลการจำลองแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกับวงจรทอนระดับแรงดันและเปรียบเทียบขนาดแรงดันไฟฟ้าได้ที่ 24 – 45 โวลต์ มีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกันโดยใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกันทั้งในระบบจำลองโดยทำการปรับค่าความดันก๊าซไฮโดรเจน ออกซิเจน อุณหภูมิและกระแสไหลตได้เพื่อให้ค่าแรงดันที่เหมาะสมตามเงื่อนไขของพารามิเตอร์ต่างๆ

#### 5. สรุป

ผลการจำลองแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกับแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีการทำงานสอดคล้องกัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อต้องการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆพบว่าความดันของไฮโดรเจนมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งในขณะไว้ไหลต เมื่อเทียบกับแรงดันตามทฤษฎี แบบจำลองแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อต่อ

ร่วมกับแบบจำลองของวงจรทอนระดับแรงดันนั้นสามารถให้ค่าแรงดันไฟฟ้าตรงขาออกที่สอดคล้องกับหลักทฤษฎี และคุณสมบัติของตัวเซลล์เชื้อเพลิง ถึงแม้ว่าค่าแรงดันที่วัดได้จริงจะให้ค่าแรงดันที่ต่ำกว่าแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB เนื่องจากข้อจำกัดของการแพร่ของก๊าซ โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซจะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่าระบบที่มีความดันต่ำกว่า ปัญหาที่พบในการจำลองระบบวงจรทอนแรงดันโดยใช้ความถี่สวิตช์ที่สูงกว่า 10kHz อาจใช้เวลาในการจำลองค่อนข้างนานเกินไป อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปประยุกต์เพื่อสร้างเป็นเครื่องจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับใช้ในการศึกษาค้นคว้าในห้องปฏิบัติการทดลองต่อไป

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Kirubakaran<sup>1</sup>, Shailendra Jain "The PEM Fuel Cell System with DC/DC Boost Converter: Design, Modeling and Simulation" International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol 1, No. 3, May 2009
- [2] Alejandro J. del Real, Alicia Arce, Carlos Bordons, 2007, "Development and experimental validation of a PEM fuel cell dynamic model", Journal of Power Sources 173(2007) 310-324.
- [3] รศ.วีระเชษฐ์ ชันเงินและวุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์ "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics)" กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ หจก.วี. เจ. พรินติ้ง, 2550 พิมพ์ครั้งที่ 7



# 10<sup>th</sup> Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium

Energy Technology, Environmental  
and Social Impact, Nanotechnology  
and Material Technology, Energy  
Economic and Management, Nuclear  
Technology, New Technology and  
Other topics related to energy field.

**On December 5-8, 2012**

**Sunee grand hotel,  
Ubon-ratchathani**

Organized by



Co-organized by



10<sup>th</sup> EMSES 2012**International Scientific Advisory Committee:****General Chair:**

Assoc.Prof.Dr. Namyoot SONGTHANAPITAK RMUTT, Thailand

**General Co-Chair:**

Prof. Dr. Kiyoshi YOSHIKAWA Kyoto Uni., Japan  
Asst.Prof.Dr. Panpetch CHININTORN RMUTT, Thailand

**Organizing Chair:**

Asst. Prof. Dr.Sommai PIVSA-ART RMUTT, Thailand  
Prof. Dr. Takeshi YAO Kyoto Uni., Japan

**Organizing Co-Chair:**

Prof. Dr. Hideaki OHGAKI Kyoto Uni., Japan

**International Scientific Committees:**

Prof. Dr. Susumu YOSHIKAWA Kyoto Uni., Japan  
Prof. Dr. Phadungsak RATTANADECHO TU, Thailand  
Prof. Dr. Shiro SAKA Kyoto Uni., Japan  
Prof. Dr. Hitomi OHARA Kyoto Uni., Japan  
Prof. Dr.-Ing. Habil Ingo STADLER FH Koeln, Germany  
Prof. Dr. Young S. CHAI Korea  
Prof. Dr. Nipon TANGTHAM KU, Thailand  
Prof. Dr. Masayoshi OKUBO Osaka Uni, Japan  
Prof. Dr. Somchai WONGWISES KMITL, Thailand  
Prof. Dr. Nadarajah MITHULANANTHAN UQ, Australia  
Prof. Dr. Yukio OGATA Kyoto Uni., Japan  
Prof. Dr. Yuichi ANADA Hokkaido Info. Uni., Japan  
Prof.Dr. Narongrit SOMBATSOMPOP KMUTT, Thailand  
Assoc. Prof. Dr. Bandit FUNGTAMMASAN KMUTT, Thailand  
Assoc. Prof. Dr. K. Srinivas REDDY IIT-Madras, India  
Assoc. Prof. Dr. David Jan COWAN IUPUI, USA  
Assoc. Prof. Dr. Per B ZETTERLUND Australia  
Assoc. Prof. Dr. Vjitt KINNARES KMITL, Thailand  
Assoc. Prof. Dr. Yoshikazu SUZUKI Japan  
Assoc. Prof. Dr. Thawatch KERDCHEUN RMUTI, Thailand  
Assoc. Prof. Dr. Wakin PIYARAT SWU, Thailand  
Assoc. Prof. Dr. Seiichi KAWAHARA Nakaoga Uni., Japan  
Assoc.Prof.Dr. Kawee SRIKULKIT CU, Thailand  
Asst. Prof. Dr. Somchai HIRANVAROMDOM RMUTT, Thailand  
Asst. Prof. Dr. Wanchai SUBSINGHA RMUTT, Thailand  
Asst. Prof. Dr. Thanapong SUWANNASRI KMUTNB, Thailand  
Asst. Prof. Dr. Napapom PHUANGPORNPIITAK KU, Thailand  
Asst. Prof. Dr.Boonrit PRASARTKAEW RMUTT, Thailand  
Asst.Prof.Dr.Supakit SUTTIRUENGWONGSU, Thailand  
Asst. Prof. Dr. Vallop PHUPA RMUTP, Thailand  
Asst.Prof.Dr.Pramook UNAHALEKHAKA RMUTSB, Thailand

## 10<sup>th</sup> EMSES 2012

Dr.Arthit Sode-Yome	EGAT, Thailand
Dr. Sei-ichi AIBA	Japan
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Dr. Yuttana KAMSUWAN	RMUTT, Thailand
Dr. Jakkree SRINONCHAT	RMUTT, Thailand
Dr. Chatchai SOPPAPITAKSAKUL	RMUTT, Thailand
Dr. Pinit SRITHORN	RMUTI, Thailand
Dr. Uthen KAMNAN	RMUTL, Thailand
Dr. Cattariya SUWANNASRI	KMUTNB, Thailand
<b>ASEAN Committee:</b>	
Prof. Dr. Yoyok Wahyu Subroto	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Wega TRISUNAYANTI	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Tumiran	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Jun LI	NYU, Singapore
Prof. Dr. INTHAN	ITB, Indonesia
Prof. Dr. Khamphone NANTHAVONG	NOL, Laos
Prof. Dr. Kampui SOUTHISOMBHAT	NOL, Laos
Prof. Dr. Yew Wei LEONG	NYU, Singapore
Prof. Dr. Nguyen Minh TAN	HU, Vietnam
<b>General Secretary:</b>	
Asst. Prof. Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
Dr. Sumonman NIAMLANG	RMUTT, Thailand
<b>Technical Program Chair:</b>	
Asst. Prof. Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
<b>Area: Energy Technology (ET)</b>	
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Boonrit PRASARTKAEW	RMUTT, Thailand
Dr. Sathapron THONGWIK	RMUTT, Thailand
Dr. Nathabhat PHANKONG	RMUTT, Thailand
<b>Area: Environmental and Social Impact (ES)</b>	
Dr. Nithiwat CHOOSAKUL	RMUTT, Thailand
<b>Area: Nanotechnology and Materials Science (NM)</b>	
Dr. Sorapong PAVASUPREE	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Kitipong KIMAPONG	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Sirichai TORSAKUL	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Warunee ARIYAWIRIYANANT	RMUTT, Thailand
<b>Area: Energy Economic and Management (EM)</b>	
Assoc. Prof. Dr. Natha KUPTHASTHIEN	RMUTT, Thailand
Dr. Surin NGAEMNGAM	RMUTT, Thailand
Dr. Pimnapat IEMSOMBOON	RMUTT, Thailand
<b>Area: New Energy Technology (NT)</b>	
Dr. Boonyang PLANGKLANG	RMUTT, Thailand
<b>Area: Nuclear Technology (NU)</b>	
Asst. Prof. Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand

## 10<sup>th</sup> EMSES 2012

### Exhibition Chair:

Dr. Amnoiy REUNGWAREE RMUTT, Thailand  
 Dr. Winai CHANPENG RMUTT, Thailand

### Local Arrangement Chair

Dr. Sorapong PAVASUPREE RMUTT, Thailand  
 Dr. Natee SRISAWAT RMUTT, Thailand

### Registration and Finance Chair

Dr. Sumonman NIAMLANG RMUTT, Thailand  
 Dr. Suporn THOMSORN RMUTT, Thailand  
 Weeraporn PIVSA-ART RMUTT, Thailand

### Publicity Chair

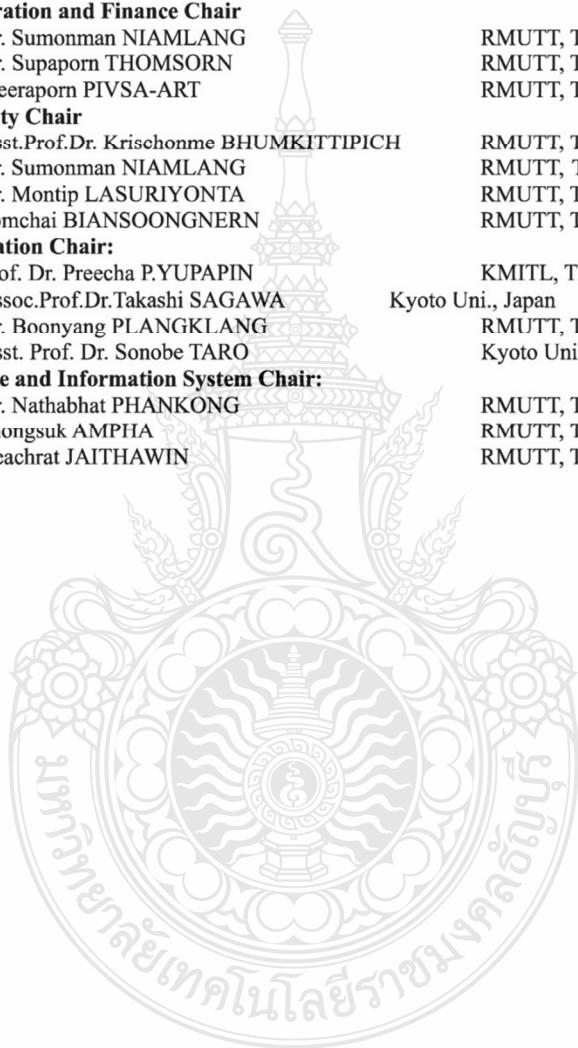
Asst.Prof.Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH RMUTT, Thailand  
 Dr. Sumonman NIAMLANG RMUTT, Thailand  
 Dr. Montip LASURIYONTA RMUTT, Thailand  
 Somchai BIANSOONGNERN RMUTT, Thailand

### Publication Chair:

Prof. Dr. Preecha P.YUPAPIN KMITL, Thailand  
 Assoc.Prof.Dr.Takashi SAGAWA Kyoto Uni., Japan  
 Dr. Boonyang PLANGKLANG RMUTT, Thailand  
 Asst. Prof. Dr. Sonobe TARO Kyoto Uni., Japan

### Website and Information System Chair:

Dr. Nathabhat PHANKONG RMUTT, Thailand  
 Phongsuk AMPHA RMUTT, Thailand  
 Deachrat JAITHAWIN RMUTT, Thailand



---

**CONTENT**

<b>ET13</b>	Numerical Simulation of a Solar-biomass Hybrid Cooling System: Model Validation <i>Boonrit Prasartkaew</i>	123
<b>ET14</b>	Mathematic Model and Experiment of Temperature Effect on Discharge of Lead-Acid Battery for PV Systems <i>Pornchai Pornharuthai Boonyang Plangklang and Sompol koksri</i>	128
<b>ET15</b>	Recycling CO <sub>2</sub> in Bio-gas by Green Microalgae for Lipid Production <i>Wassa Tongprawhan and Benjamas Cheirsilp</i>	132
<b>ET16</b>	Double-Sided Linear Induction Motor Control Using Space Vector Pulse Width Modulation Technique <i>Aunnon Bua-sre and Wanchai Subsingha</i>	138
<b>ET17</b>	Performance Evaluation of the Desiccant Bed Solar Dryer <i>Wisut Chramsard, Sirinuch Jindaruksa, Chatchai Sirisumpunwong, Sorawit Sonsaree</i>	142
<b>ET18</b>	Performance Evaluation of 35 kW LiBr – H <sub>2</sub> O Solar Absorption Cooling System in Thailand <i>Nipon Ketjoy Rawipa yongphayoon and Kongrit Mansiri</i>	147
<b>ET19</b>	Study to the Voltage Stability of 22kv Pea Bus Connected by Lamtakong Wind Turbine <i>J.Chanasith and K. Bhumkittipich</i>	153
<b>ET20</b>	Modeling of PEM Fuel Cell with DC/DC Buck Converter by MATLAB/Simulink <i>P. Prommin and W. Subsingha</i>	158
<b>ET21</b>	Applicability of Pressure Retarded Osmosis Power Generation Technology in Sri Lanka <i>H.D.S.S.Karunaratne and S.Walpolage</i>	163
<b>ET22</b>	Effect of Pilot Fuel Quantity on the Performance and Emission of a Dual Producer Gas – Diesel Engine <i>Pisarn Sombatwong, Prachasanti Thaiyasuit and Kulachate Pianthong</i>	167

---

## Modeling of PEM Fuel Cell with DC/DC Buck Converter by MATLAB/Simulink

P. Prommin and W. Subsingha

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110  
E-mail: sit777@hotmail.com

**Abstract**— This paper presents mathematical model using MATLAB / Simulink in order to analyze the performance of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) together with DC/DC buck converter model. It will lead to a building of a prototype of PEMFC simulator, which will be useful to study the behavior of the fuel cell. The fuel cell in the project is a 1.2 kW, 26-43 output voltage NEXA@ 1200 from Ballard Company. The simulation result was compared with an actual experiment in laboratory by using the same parameters, such as pressure of hydrogen and oxygen flow rate. In addition, the simulation results show that output voltage from the DC/DC buck converter model is approximately closed to the actual PEMFC in an experimental lab.

**Keywords**— Proton Exchange Membrane Fuel cell (PEMFC), Mathematical Model, DC Converter.

### 1. INTRODUCTION

Nowadays a renewable energy and clean energy are considered as a resource for the future. In the field of generating the electrical supply the reduction of the pollution have to be considered firstly. Solar energy, wind energy are renewable energy source as mentioned above etc. Fuel cell is one of the clean energy, which transforms chemical energy into electrical energy. This electrochemical process have a combustion without causing environmental pollution. Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell is one kind of fuel cells that can work in a comparatively high efficiency and low temperature condition. PEM fuel cells has an advantage in small size, light weight and high power density. But, its high prices and a limit of lifetime is obstacle to further research. Nevertheless, PEM fuel cell simulator in the project can fulfil the opportunity of the further research. PEM fuel cell that used in this project is based on NEXA@1200 from Ballard GmbH., which is the 1.2kW, Output voltage 26-43V. The PEMFC Simulator in this project has two parts: a PEMFC mathematical model and a model of a DC-DC converter using MATLAB/Simulink program. The results shows that the increasing of current by effects of temperature and hydrogen pressure will results in the change of the PEMFC out put voltage. After the studying the PEMFC, it will leads a build of a PEMFC real time simulator in the near future.

### 2. PEM FUEL CELL

PEMFC is a fuel cell which can produce an electricity from the chemical energy. Electrochemical reaction was clean energy, which has no fumes of the combustion and no harmful pollution. The main energy source of PEMFC is hydrogen which will be reacts with oxygen from the air. This reaction was called Electrochemical reaction. PEM fuel cells can actually operate continuously as long as the necessary flows are maintained. The result of this reaction leads into a production of electrical energy, of a low DC voltage and it also produce heat and water. Electrical energy from the PEM fuel cell can be used with a variety of electrical load.

#### A. The principle of the PEMFC

PEM fuel cell consists of a negatively charged electrode (anode), a positively charged electrode (cathode), and an electrolyte membrane. Hydrogen is oxidized on the anode and oxygen is reduced on the cathode. Protons are transported from the anode to the cathode through the electrolyte membrane, and the electrons are carried to the cathode over the external circuit. The electrons are attracted to conductive materials and travel to the load when needed. On the cathode, oxygen reacts with protons and electrons, forming water and producing heat. Both the anode and cathode contain a catalyst to speed up the electrochemical processes, as shown in Figure 1[1].

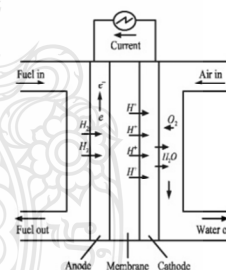


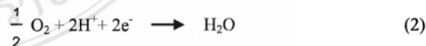
Fig.1. Principle of the fuel cell PEMFC.

A typical PEM fuel cell stack has the following reactions:

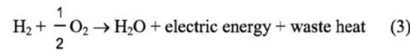
Anode:



Cathode:



Overall:



The open circuit voltage of the single cell is in the range of 0.8-1.2V. For higher requirements of power, several cells should be connected in series forming a stack. PEM fuel cells are considered to be an efficient energy source for supplying stationary – state power, but they are not suitable for fast load changes.

**B.Polarization Characteristics of a PEMFC**

The ideal standard potential of a PEM fuel cell which is obtained for standard state conditions (25 °C and 1 atm) is 1.229V with liquid water product. Figure 2 shows the V - I characteristic curve of a single cell operating at room temperature (25°C) and normal air pressure(1atm) [1].

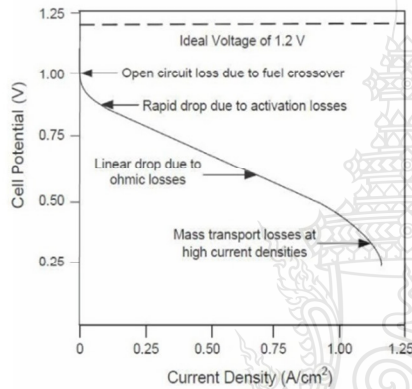


Fig.2. The polarization curve for a PEMFC.

As we can see in Figure2., the polarization curve consists of three different regions: the active region, the ohmic region and the concentration region . The output of the actual cell voltage is given by the equation (4)-(8):

$$V_{cell} = V_{open} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con} \quad (4)$$

where,  $V_{open}$  is a thermodynamic potential,  $V_{act}$  due to an activation losses,  $V_{ohmic}$  due to Ohmic losses,  $V_{con}$  due to a is concentration losse. The thermodynamic potential can be written as.

$$V_{open} = V_o - \left[ \left( \frac{RT}{nF} \right) \ln \left( \frac{P_{H2O}}{P_{H2} \times \sqrt{P_{O2}}} \right) \right] \quad (5)$$

where,  $R$  is a gas constant,  $F$  is Faraday’s constant,  $T$  is a reference temperature (°K),  $P_{H2}$  is an effective partial pressure of hydrogen,  $P_{O2}$  is an effective partial pressure of oxygen.

The activation voltage drop of PEMFC is caused by the sluggish kinetics of the voltage reactions taking place on the active surface of electrodes and it can be computed as Eq. (6)

$$V_{act} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left( \frac{I_{dc}}{I_o} \right) \quad (6)$$

where,  $I_{dc}$  is the current density and  $I_o$  is the exchange current density. The constant  $\alpha$  is called the charge transfer coefficient that proportion at to as a electrical energy which is in changing by the rate of an electrochemical reaction.

The ohmic voltage loss is due to the resistances of the polymer electrolyte membrane effect by the ions and the imperfect electrodes. This loss is approximately linear in this region. It can be shown as Eq. (7).

$$V_{ohmic} = I_{dc} R_{fc} \quad (7)$$

The concentration polarization relates to the change in the concentration of the reactants at the surface of the electrodes as the fuel is used. The concentration of the fuel and oxidant is reduced at various points in the fuel-cell gas channels and is less than the concentration at the inlet value of the stack. This loss becomes significant at higher currents when the fuel and oxidant are used at higher rates and the concentration in the gas channel is a minimum. In general, the mass transportation losses are given by the equation (8).

$$V_{conc} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left( 1 - \frac{I_{dc}}{I_{limit}} \right) \quad (8)$$

where,  $I_{dc}$  is the current density and  $I_{limit}$  is the current density when Pressure falls linearly down to zero.

**C. The modeling of PEMFC**

The PEM fuel cell model is designed based on the state equations and output voltage equation as mention above. Figure. 3 shows the simulink model that developed for the fuel cell stack based on the above five equations (4)-(8) [1],[2].

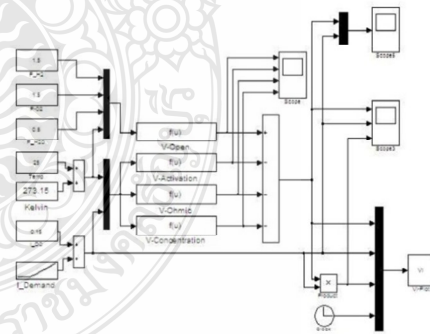


Fig.3. PEM fuel cells modeling.

In this paper, Matlab/ Simulink is utilised in order to describe the state equations. Its nominal power of the PEMFC is about 1.2kW, and the maximum output current is 46A. The output characteristic of the fuel cell is shown in Figure.4.

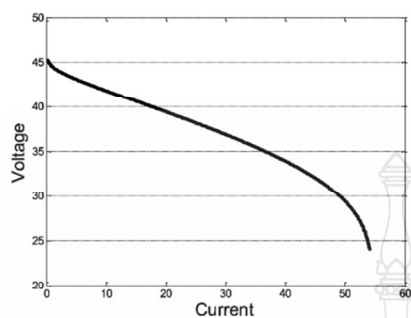


Fig. 4. PEM fuel cell characteristic simulated in Simulink

It can be seen that at low current condition, the ohmic loss becomes less significant and the output voltage is increasing which is mainly due to an activity of slowness of chemical reactions. So this region is also called as "active polarization". At very high current density the voltage fall down significantly because of the reduction of gas exchange efficiency. This is mainly due to an over flooding of the water in the catalyst. This region is also called as "concentration polarization". Between the active region and concentrations region, there is a linear slope which is mainly due to internal resistance offered by various components of the fuel cell, which is generally called as "ohmic region" [1].

#### D. Experiment comparison

The experimental test has been performed with a 1.2kW Ballard NEXA 47 cells stack and other auxiliary subsystems including hydrogen system, oxidant air system, cooling system, electronic control system and safety system with sensors and microprocessors integrated on board. The dry hydrogen (>99.99%) is supplied by prepared high pressurized hydrogen cylinder, while the oxidant air is supplied by air pump and humidified in a humidity exchanger before entering the FC stack in order to maintain water saturation of the membrane. A cooling fan at the base of the unit is utilized to blow air through vertical cooling channels.



Fig. 5. Experimental test bench

The goal is a better understanding of the electrical behavior of the PEMFC, as a result of the electrochemical processes, via the cell's voltage characteristic during transient response. While changing the load, the

performance of significant parameters affected such as Temperature, Pressure, Purge status etc are registered and evaluated.

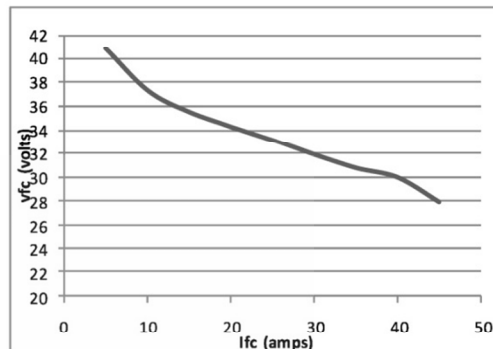


Fig.6. Measured Output Characteristics of the Nexa 1.2 kW

Figure 6 shows that the measured output characteristics of the Nexa 1.2kW PEM fuel cell model. The fuel cell output voltage can be operated safely in the linear range of voltages from 26V to 43V and the stack currents also varied from 5A. to 46A. For a constant hydrogen input fuel supply. The operation temperature is about 303°K, pressure of hydrogen of 3 bars. As it has been mentioned before, lower of current and the increasing of output voltage while load decreasing otherwise, higher current and lower voltage when load is increased. It is observed that the simulated characteristic curve is almost same as experimental result.

### 3. DC/DC BUCK CONVERTER DESIGN

According to the previous aspects, it seems to build a PEMFC simulator. Thus, in this first procedure, it has to simulate a PEMFC model together with the proper DC Converter using matlab/simulink. In order to achieve the desired Ballard 1.2 kW NEXA fuel cell stack emulation performance, the converter characteristics should be:

- Converter output power: 1,200 W
- Output voltage range: from 26 V to 43 V
- Output current range: from 1 A to 46 A
- Buck converter supply voltage: 60 V DC
- Frequency switch: 10 kHz

A DC/DC buck converter diagram is presented below to control the power of the fuel cell emulator.

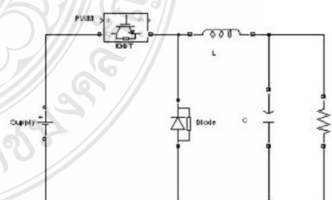


Fig. 7 DC/DC buck converter diagram



**A. Converter Inductance**

The converter inductance value is calculated from the converter minimum current, in order to ensure that the converter is always working in Continuous-Conduction Mode (CCM). CCM is required for a linear operation of the converter, and the minimum current is guaranteed by the auxiliary power required to run a fuel cell.

In order to calculate the values for the output filter (inductance and capacitance) for the buck converter, the Switching frequency ( $f_s$ ), the converter supply voltage  $V_s$  (V), voltage output  $V_o$ (V), and resistance connect at 10 ohms are required. Knowing these values, the minimum value of inductance can be obtained [3].

$$D = \frac{V_o}{V_s} = \frac{26}{60} = 0.433 \tag{9}$$

$$L_{min} = [(1 - D_{max})R] / 2f_s = 0.28 \times 10^{-3} H \tag{10}$$

Thus,  $L = 1$  mH is chosen for the converter

**B. Converter Capacitance**

From figure 7, the capacitance is used in order to filter the converter output voltage ripple. Generally the DC/DC converter output voltage ripple should be less than 1 % of the output voltage.

The converter capacitance value should be chosen to meet the converter dynamic response needs. With the fixed inductance value  $L$  (H) and the maximum value of converter capacitance can be obtained.

$$V_{ripple} = \frac{1 - D_{max}}{8LCf_s^2} \tag{11}$$

$$C = \frac{(1 - D)}{8L f_s^2 V_{ripple}} = 253 \times 10^{-6} F \tag{12}$$

Thus,  $C = 1000$  uF is chosen for the converter.

**4. MODELING AND RESULTS**

**A. System Combination**

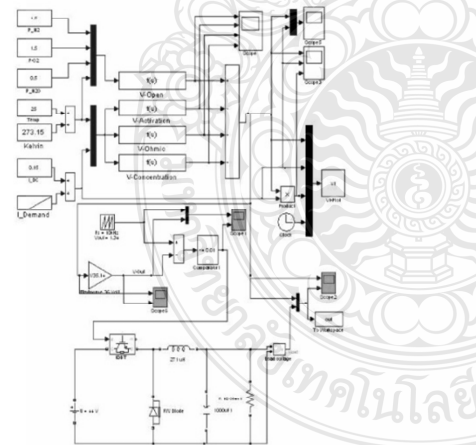


Fig.8. Modeling of PEMFC together with DC/DC buck converter by Matlab/ Simulink

In this paper, the Matlab/Simulink is used to setup the PEMFC system steady-state model together with DC/DC buck converter environment as shown in Figure 8.

Parameters that used in the simulation are: Number of cells is 47, Anode partial pressure is 3.0 bars, Cathode partial pressure is 1.5 bars, Temperature is 25 °C and Limit current is 54 A.

Simulink® is a software package for modeling and simulating which can be used in the evaluation of the system performance, and optimization of the system design. The Simulink modeling the simulation diagram of the PEMFC steady-state model together with DC/DC buck converter based on Eqs. (4) - (12).

**B. Experiment comparison**

In order to verify the validity of the Modeling of PEMFC together with the modeling of DC/DC buck converter, the simulation results of such models have to be conducted. Figure 9 shows the measurement results of the Steady-state voltage of both Simulations.

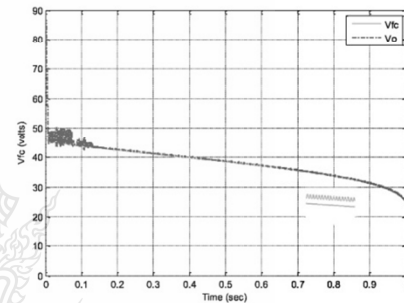


Fig. 9 Experimental results from both Steady-state voltage of PEMFC mathematical model and DC Converter model

Figure. 9 shows the designed DC/DC buck converter output voltage compared to the model PEMFC voltages. From the experimental results, it can be concluded that the buck converter output voltage follows the model predicted value with a very good accuracy. In addition, the voltage of the fuel cell emulator shows a good dynamic agreement compared to the real stack voltage curve. Thus, the real stack can be well emulated.

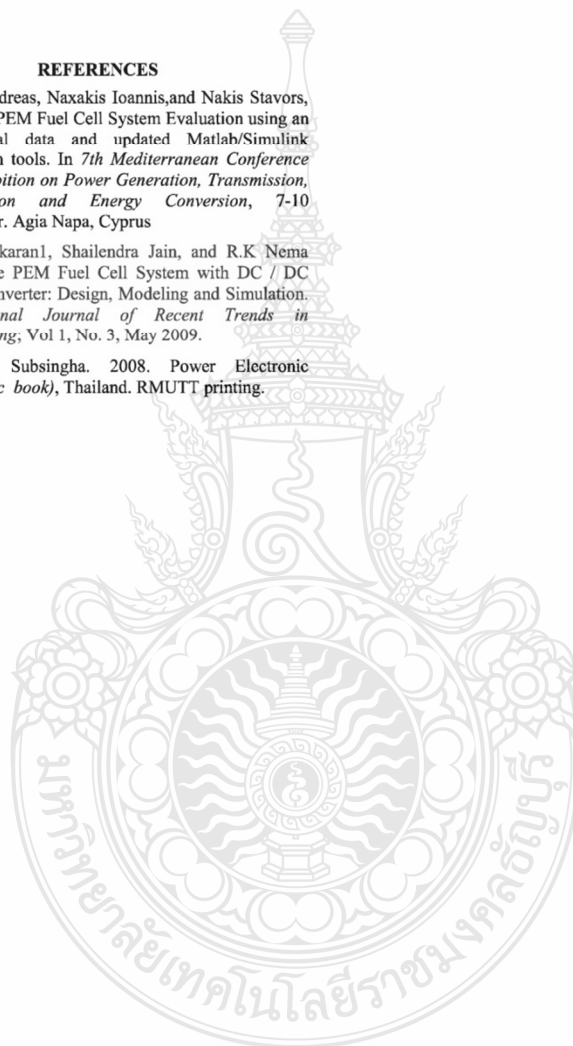
**5. CONCLUSION**

The results shows that the increasing of current by effects of temperature and hydrogen pressure will results in the change of the PEMFC out put voltage. A model based PEMFC emulator with a DC/DC buck converter design is presented in this paper. An appropriate control strategy for the converter is also discussed. The simulation experimental results are validated with a commercial Ballard NEXA 1.2 kW fuel cell. Finally aiming at the formation of stable output voltage a simple PEMFC - DC/DC buck converter system was simulated in Matlab/simulink. The Simulation results were compared with those came from the mesurment, showing the effectiveness of the proposed method and the necessity of a dc/dc buck converter in such type of systems. The

emulation results are presented and discussed. The converter output has a very good accuracy compared to the model predicted value. The converter ripple is less than 1 % at different voltage levels. It can also predict and evaluate the performance of the fuel cell well and truly. The further improvement of the model would be helpful for the performance analysis, design optimization and real time control. After the studying the PEMFC, it will lead to a build of a PEMFC real time simulator. Such a PEMFC emulator is of great interest for Hardware applications to be used for real time hardware validation of fuel cell systems.

#### REFERENCES

- [1] Marinis Andreas, Naxakis Ioannis, and Nakis Stavros, N. 2010. PEM Fuel Cell System Evaluation using an operational data and updated Matlab/Simulink simulation tools. In *7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, 7-10 November. Agia Napa, Cyprus
- [2] A. Kirubakaran, Shailendra Jain, and R.K. Nema. 2009. The PEM Fuel Cell System with DC / DC Boost Converter: Design, Modeling and Simulation. *International Journal of Recent Trends in Engineering*; Vol 1, No. 3, May 2009.
- [3] Wanchai Subsingha. 2008. *Power Electronic (Academic book)*, Thailand. RMUTT printing.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายประสิทธิ์ พรหมมินทร์
วัน เดือน ปีเกิด	7 กุมภาพันธ์ 2512
ที่อยู่	1837 หมู่ที่ 1 ต.สลกบาตร อ.ขามเฒ่าล็กษบุรี จ.กำแพงเพชร 62140
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ปี พ.ศ. 2536
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2537 – พ.ศ. 2551	อาจารย์ประจำแผนกวิชาช่างไฟฟ้า วิทยาลัยสารพัดช่างตาก จังหวัด ตาก
พ.ศ. 2551 – พ.ศ. ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำแผนกวิชาช่างไฟฟ้า วิทยาลัยการอาชีพขามเฒ่าล็กษบุรี จังหวัด กำแพงเพชร

