

แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

Modeling of PEM Fuel Cell by MATLAB/Simulink

ทรงเกียรติ อภิชัย วันชัย ทรัพย์สิงห์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ 1 ถนนรังสิตนครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

Songkiat Apichai, Wanchai Subsingha

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Rangsit-Nakornnayok Patumthani 12110 Thailand E-mail: songkiat_int@hotmail.com

บทคัดย่อ

เซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane (PEMFC) เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าที่สะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และกำลังได้รับความสนใจต่อการประยุกต์ใช้งานอย่างมากในปัจจุบัน แต่เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบันยังมีราคาแพงและมีขอบเขตในการใช้งานค่อนข้างจำกัด จึงเป็นอุปสรรคต่อการศึกษาและค้นคว้าเพิ่มเติม หากสามารถสร้างเครื่องจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ขึ้นมาทดแทนได้ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้า บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC และวงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter) ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink จุดประสงค์เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เข้าไปโดยต่อร่วมกับโหลด เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในการจำลองระบบเป็นรุ่น NEXA1200 ของบริษัท Ballard มีขนาดพิกัดกำลัง 1200 วัตต์ ขนาดแรงดันขาออกที่ 22 – 36 โวลต์ จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB พบว่าผลการจำลองมีค่าสอดคล้อง และใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองวัดเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการทดลองด้านพลังงานของมหาวิทยาลัย โดยใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกันทั้งในระบบจำลองและในการทดลอง เช่น ค่าความดันของไฮโดรเจน และค่าอัตราการไหลของออกซิเจน และผลการจำลองให้ค่าแรงดันขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันเป็นที่น่าพอใจ

Abstract

The Proton Exchange Membrane Fuel Cell is one of an alternative energy source which is pollution-free and suitable in producing electricity. It is also widely use in versatile applications nowadays. However, it is hard to study, analyse and research further due to its cost and its strictly operation. This paper is presented in order to provide a proper mathematical modeling of

the NEXA1200 PEM Fuel Cell that is 1.2 kW. 22-36 VDC from Ballard inc. which is widely use in University's laboratory . The purpose is to simulated such PEMFC together with Buck Converter using MATLAB/Simulink software in order to study of its operational behavior. The simulation results also show that it is quite satisfying match with the practical PEM Fuel Cell from laboratory at the same parameters such as pressure and oxygen's flow rate.

คำสำคัญ : เซลล์เชื้อเพลิง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แหล่งพลังงานทางเลือก

Key words : PEM Fuel Cell, Mathematical Model, Alternative energy source

1. บทนำ

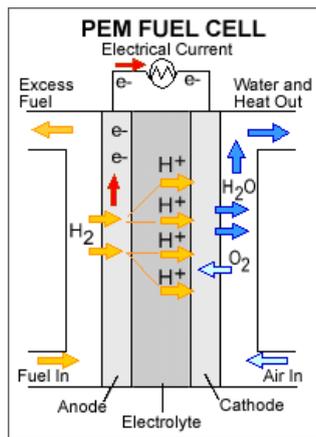
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC มีข้อดีคือน้ำหนักเบาและมีขนาดเล็กให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด ไม่สร้างมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ให้ค่าประสิทธิภาพสูงถึง 40-60% [1] เซลล์เชื้อเพลิงคืออุปกรณ์แปลงพลังงานซึ่งอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีจากก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนหรืออากาศ โดยพลังงาน(อิเล็กตรอน) จะถูกส่งออกมาเมื่อเชื้อเพลิง(ไฮโดรเจน) ทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนในอากาศและทำให้เกิดน้ำบริสุทธิ์และความร้อนออกมา ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้ให้พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงแต่มีแรงดันต่ำและความร้อน ปัจจุบันราคาเซลล์เชื้อเพลิงมีราคาสูงมากและอายุการใช้งานที่จำกัด ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม แนวคิดในการสร้างเครื่องจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC จึงเกิดขึ้น โดยอ้างอิงจากตัวเซลล์เชื้อเพลิงของบริษัท Ballard รุ่น NEXA1200 ขนาด 1.2kW แรงดันขาออก 22-36 โวลต์ ในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัย

แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงที่จำลองขึ้นมีสองส่วนคือส่วนที่เป็นระบบของแบบจำลอง PEMFC และส่วนตัวสร้างแรงดันขาออกที่เลือกใช้วงจรลดระดับแรงดัน (buck converter) ร่วมกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง โดยสร้างแบบจำลองทั้งสองส่วนด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่าค่าที่ค่าที่ได้สอดคล้องกับผลการวัดแรงดันขาออกเมื่อทำการเพิ่มกระแสไหลลด จากปัจจัยของอุณหภูมิ และความดันไฮโดรเจน เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองทั้งสอง โดยเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของเซลล์เชื้อเพลิงจะทำให้แรงดันขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลง ก่อนนำไปสร้างเป็นชิ้นงานจริงต่อไป

2. แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง

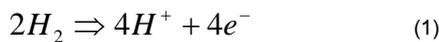
2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แสดงไว้ในรูปที่ 1 ก๊าซไฮโดรเจนป้อนเข้าด้านแอโนดมีเมมเบรนอยู่ตรงกลางอากาศป้อนเข้าด้านแคโทด เมมเบรนจะนำโปรตอนจากด้านแอโนดไปด้านแคโทด โมเลกุลของน้ำทำให้เมมเบรนเกิดความชื้น อิเล็กตรอนด้านแอโนดไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้จะถูกนำออกไปเมื่อต่อกับโหลดครบวงจรแล้วจึงไหลย้อนมาด้านแคโทด อิเล็กตรอนที่ได้สัมพันธ์กับความหนาแน่นของกระแส ในสภาพไม่มีโหลดเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์จะให้แรงดันประมาณ 0.6-0.7 V ที่พิกัดกระแสประมาณ 0.5 A/cm² ดังนั้น จึงต้องต่ออนุกรมหลายๆ เซลล์เข้าด้วยกันเป็นก้อนเซลล์เชื้อเพลิง หรือที่เรียกว่า Fuel-cell stack เพื่อให้ได้แรงดันที่สูงขึ้น [1], [5]

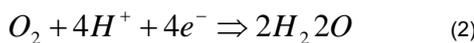


รูปที่ 1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

ปฏิกิริยาด้านแอโนดจะแยกโมเลกุลไฮโดรเจนเป็นโปรตอนไฮโดรเจนหรือไฮโดรเจนประจุบวกและอิเล็กตรอนดังสมการที่ (1)



ปฏิกิริยาด้านแคโทดจะมีโปรตอนไฮโดรเจนและอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดเมื่อรวมกับออกซิเจนจะได้น้ำออกมาดังสมการที่ (2)



ปฏิกิริยารวม $4H_2 + O_2 \Rightarrow 2H_2O$ (3)

2.2 สภาพะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิง

จาก Gibbs's free energy อธิบายไว้ว่าพลังงานเคมีจะให้แรงดัน OCV ออกมาได้เท่ากับ 1.229 VDC แต่อย่างไรก็ตาม จะพบว่าความเป็นจริงแรงดันขาออก OCV จะมีค่าลดลง โดยมีปัจจัยที่สำคัญดังในสมการที่ (4) สมการของ Nernst สามารถคำนวณค่าแรงดันขณะที่ไม่

ไหลลดจากปฏิกิริยาทางเคมีได้เมื่อ R คือค่าคงที่ของก๊าซซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.3144 J/mol T คือค่าอุณหภูมิมีหน่วยเป็นเคลวิน F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ 96,495 C/mol และ P คือค่าความดันของก๊าซ

$$V_{open} = N_o \left[E_o + \frac{R'T}{2F} \ln \left(\frac{PH_2 \sqrt{PH_{O_2}}}{PH_2O \sqrt{PO_2}} \right) \right] \quad (4)$$

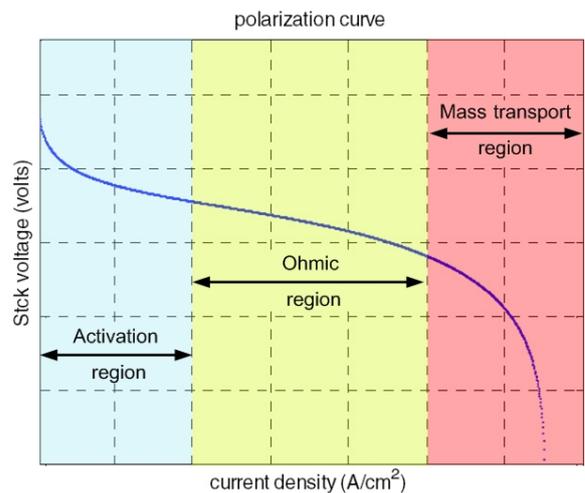
สภาพะอยู่ตัวของ PEMFC ดังรูปที่ 2 สอดคล้องกับสมการที่ (5) พบว่าเกิดการสูญเสียมีผลให้แรงดันลดลง ซึ่งมีทั้งหมดสามช่วงด้วยกัน ช่วงแรกจะเกิดการสูญเสียจากพลังงานจลน์เนื่องจากการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าหาได้จากสมการที่ (6) ช่วงที่สองการสูญเสียแรงดันมีค่าระหว่าง 0.6-0.7 VDC จะเป็นลักษณะเชิงเส้นเนื่องจากเกิดค่าความต้านทานภายในส่วนของอุปกรณ์ หรือ R_{FC} ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทานไอออนิก ความต้านทานอิเล็กทรอนิกส์และความต้านทานหน้าสัมผัสของตัวนำหาได้จากสมการที่ (7) และช่วงสุดท้ายคือการสูญเสียจากพลังงานจลน์ในการแตกตัวของก๊าซผ่านอิเล็กโทรด เพื่อส่งผ่านแรงดันและเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดแรงดันตกมากที่สุดหาได้จากสมการที่ (8) [2],[3],[4]

$$V_{DC_Stack} = V_{open} - V_{ohmic} - V_{act} - V_{con} \quad (5)$$

$$V_{activation} = N_o \frac{R'T}{n\alpha F} \ln \left(\frac{I_{dc}}{I_o} \right) \quad (6)$$

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

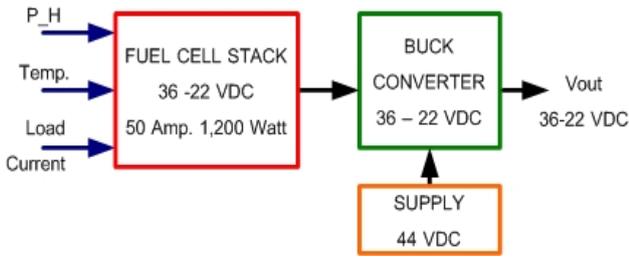
$$V_{concentration} = -c \ln \left(1 - \frac{I_{dc}}{I_{limit}} \right) \quad (8)$$



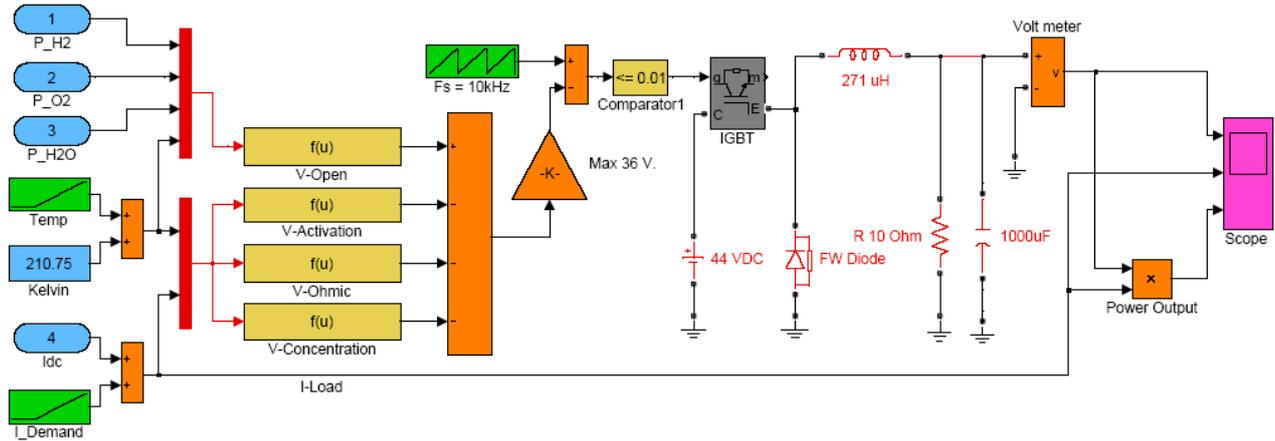
รูปที่ 2 สภาพะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC

2.3 แบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิง

จากรูปที่ 3 แนวคิดแบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิง สามารถทำการปรับค่าความดันก๊าซไฮโดรเจน อุณหภูมิ และกระแสไหลตัวอย่างอิสระได้ ซึ่งมีผลทำให้เกิดแรงดันขาออกที่เปลี่ยนแปลง แรงดันที่ได้จะนำไปสร้างสัญญาณควบคุมวงจรทอนระดับแรงดันที่รับไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทำการสร้างแรงดันให้เป็นไปตามค่าความดันไฮโดรเจนออกซิเจนอุณหภูมิและกระแสไหลลดให้สอดคล้องกับสมการที่ (4) ถึง (8)



รูปที่ 3 แนวคิดแบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 4 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC

แรงดันที่ได้จากสมการที่ (5) จะนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพื้นเลื้อยเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีค่าดีวีไอเคลืออยู่ระหว่าง 0.45 ถึง 0.75 เพื่อนำไปควบคุมมุมจุดชนวนของทรานซิสเตอร์ IGBT ซึ่งทำงานในลักษณะของวงจรทอนระดับแรงดันในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง ที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 44 VDC และใช้วงจรกรองความถี่ต่ำเพื่อให้อำนาจไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกมีค่ากระเพื่อมลดลง

2.4 แบบจำลองวงจรทอนระดับแรงดัน

จากข้อจำกัดในการใช้โปรแกรม MATLAB/simulink จำลองที่ความถี่มาก ๆ ทำให้ใช้เวลานาน จึงกำหนดให้ความถี่สวิตช์ของสัญญาณพื้นเลื้อยหรือ $f_s = 10 \text{ kHz}$ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับระดับแรงดันที่ได้จากแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ผลที่ได้คือสัญญาณพัลส์ที่มีค่าดีวีไอเคลือเปลี่ยนแปลงตามระดับแรงดันที่เข้ามาเปรียบเทียบกับไฟฟ้ากระแสตรง 44 VDC จะป้อนให้กับตัว IGBT ตัวเก็บประจุ 1,000 uF และความต้านทานของโหลด 10 โอห์ม จะสามารถคำนวณหาค่าอัตราขยายแรงดันได้ดังสมการที่ (8) หาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดที่ยังทำงานในโหมดกระแสไหลต่อเนื่องได้จากสมการที่ (9) และอัตราการกลืนของแรงดันไฟฟ้าด้านออกหาได้จากสมการที่ (10) [5]

$$D = V_o / V_s \quad (8)$$

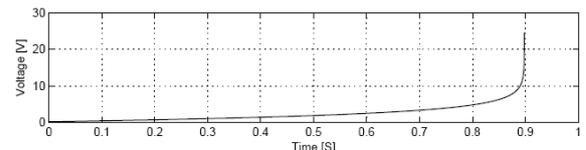
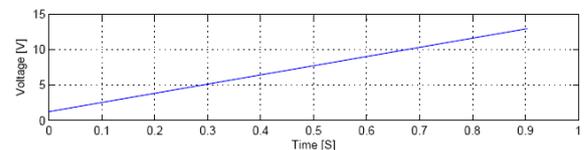
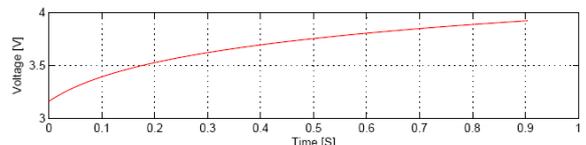
$$L_{\min} = [(1 - D_{\max})R'] / 2f_s \quad (9)$$

$$V_{\text{ripple}} = \frac{1 - D_{\max}}{8LCf_s^2} \quad (10)$$

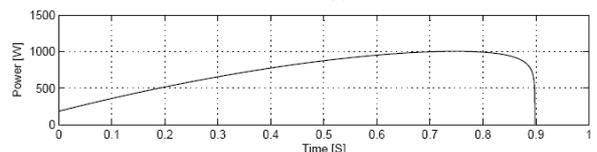
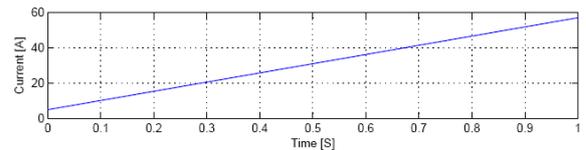
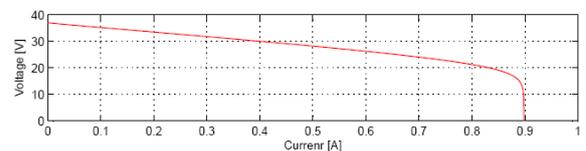
3 ผลของการจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิง

3.1 ผลการจำลองเซลล์เชื้อเพลิง

ผลการจำลองการวัดแรงดันสูญเสียของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีและสอดคล้องกับสมการที่ (6) ถึง (8) แสดงดังรูปที่ 5 ผลการจำลองการวัดแรงดันขาออกและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 6 เมื่อกำหนดให้ค่าความต้านทานโหลดเป็นเชิงเส้นออกซิเจน อุณหภูมิคงที่ แต่ทำการเพิ่มกระแสของโหลดเป็นเชิงเส้นจะพบว่าแม้ว่าจะยังไม่มีโหลดให้กับเซลล์เชื้อเพลิงก็ตาม ก็จะมีค่าพลังงานสูญเสียอันเนื่องมาจากการทำงานในสถานะเตรียมพร้อมนั่นเอง



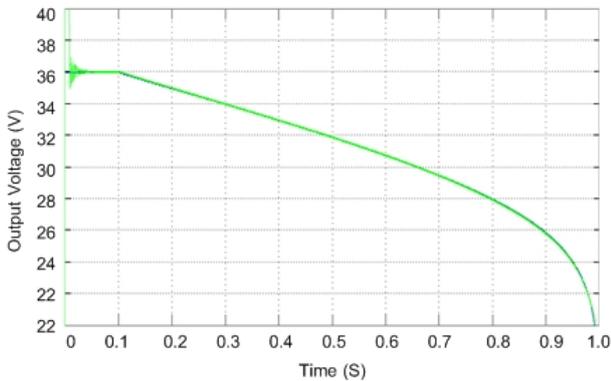
รูปที่ 5 ผลจำลองค่าแรงดันที่สูญเสียจากสมการที่ (6) (7) และ (8)



รูปที่ 6 ผลการจำลองค่าแรงดัน กระแส และค่าพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC

3.2 ผลการจำลองวงจรท่อนระดับแรงดัน

ผลการจำลองแรงดันขาออกของวงจรท่อนระดับเทียบกับแรงดันขาออกของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 7 พบว่าวงจรท่อนระดับแรงดันสามารถกำเนิดแรงดันได้ตามที่แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงกำเนิดได้นั่นเอง



รูปที่ 7 ผลการจำลองค่าแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ร่วมกับวงจรท่อนระดับแรงดันและเปรียบเทียบแรงดันขาออกทั้งสอง

4. ผลการทดลองวัดเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 8 แสดงตัวเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบร่วมกับโหลดอิเล็กทรอนิกส์รูปที่ 9 ที่สามารถกำหนดค่ากระแสในเวลาที่ต้องการได้ค่าที่นำมาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองนั้น นำค่ามาจากข้อมูลที่บันทึกไว้ในโปรแกรมควบคุมตัวเซลล์เชื้อเพลิง

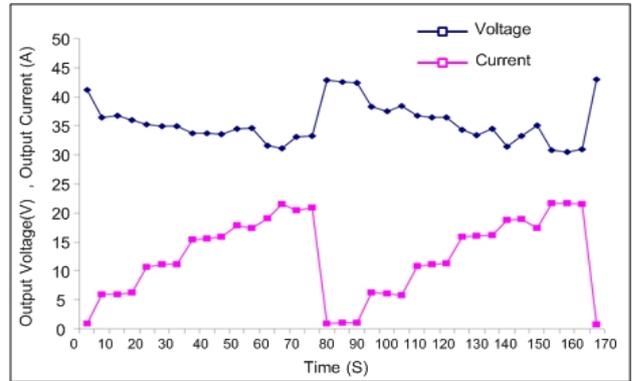


รูปที่ 8 ชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ในห้องปฏิบัติการ

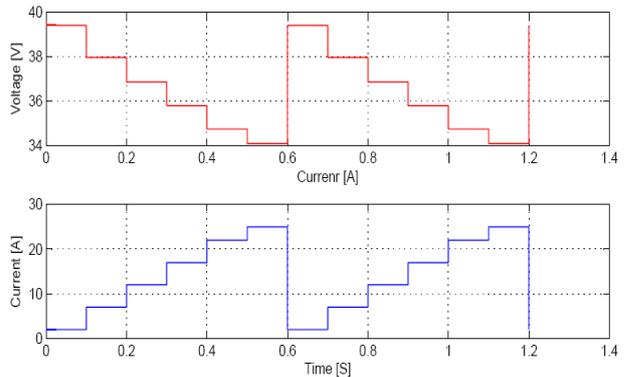


รูปที่ 9 อุปกรณ์ Electronics Load ENL-100V/50A

เนื่องจากสภาพสิ่งแวดล้อมในห้องทดลองไม่สามารถควบคุมให้อุณหภูมิและความชื้นมีค่าคงที่ตลอดเวลาได้ เป็นผลให้ค่าทดสอบที่ได้มีค่าที่คลาดเคลื่อนอยู่ และการทำงานของตัวเซลล์เชื้อเพลิงมีขีดจำกัดในการทดสอบที่กระแสพิกัดสูงสุด อาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วของอุปกรณ์ในตัวเซลล์เชื้อเพลิงเอง ดังนั้นการทดสอบจึงทดสอบที่กระแสสูงสุดเพียง 20 A. เท่านั้นด้วยเหตุผลดังกล่าว



รูปที่ 10 ผลทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 11 ผลการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงด้วย MATLAB/simulink

5. สรุป

บทความนี้แสดงให้เห็นว่าการสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อต้องการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจากการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆโดยเฉพาะค่าที่มีผลต่อแรงดันที่ได้คือความดันไฮโดรเจน ความดันออกซิเจน อุณหภูมิ และการตั้งกระแสของโหลดนั้น พบว่าแบบจำลองของ PEMFC เมื่อต่อร่วมกับแบบจำลองของวงจรท่อนระดับแรงดันนั้น สามารถให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกที่สอดคล้องกับหลักทฤษฎี และคุณสมบัติของตัวเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการด้านพลังงานของมหาวิทยาลัย ถึงแม้ว่าค่าแรงดันที่วัดได้จริงจะให้ค่าแรงดันที่สูงกว่าแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB เนื่องจากว่าตัวเซลล์เชื้อเพลิงที่ยังมีสภาพที่ใหม่และอายุการใช้งานที่ไม่มาก ปัญหาที่พบในงานวิจัยนี้คือการจำลองโดยใช้ความถี่สัญญาณพัวพันที่สูงกว่า 10kHz สำหรับสร้างสัญญาณจุดฉนวนอุปกรณ์ IGBT พบว่าจะทำให้ผลการจำลองที่ได้ใช้ระยะเวลาเวลานานมาก ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปประยุกต์เพื่อสร้างเป็นเครื่องจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับการศึกษาค้นคว้าในห้องปฏิบัติการทดลองต่อไป

6. ภาคผนวก

α	:	Charge Transfer Coefficient of Electrode
C	:	Capacitor
c	:	Coefficient of The Concentration Voltage
D	:	Duty Cycle
e^-	:	Electron
F	:	Faraday's Constant(96,495 C/mol)
f_s	:	Switching Frequency
H_2	:	Hydrogen
H_2O	:	Water
H^+	:	Proton of Hydrogen
I_{dc}	:	Current of Fuel Cell Stack
I_{lim}	:	Limiting Current of Fuel Cell Stack
L_{min}	:	Minimum of Inductance Buck Converter
N_o	:	Cell Number
n	:	number of electron
O_2	:	Oxygen
PH_2	:	Hydrogen Pressure
PH_2O	:	Water Pressure
PO	:	Standard Pressure Unit Use
PO_2	:	Oxygen Pressure
R'	:	Gas Constant (8.3144 J/mol)
R	:	Resistant
T	:	Temperature of Fuel Cell Stack
E_o	:	Open cell Voltage
V_o	:	Output Voltage Buck Converter
V_s	:	Voltage Source Buck Converter

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ห้องทดลองด้านพลังงานมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี ครอบครัวที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

1. A. Kirubakaran¹, 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. W.Chanpeng and Y. Khunatorn "Mathematical model of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell" 7th Eco-Energy and Materials and Engineering Symposium, Chiang Mai, Thailand 19-22 Nov, 2009
3. Winai Chanpeng and Yottana Khunatorn "Simulink of Dynamic Behavior of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell" International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009 Dec2-4,2009 ,Chiang Rai
4. M. Tanrioven and M. S. Alam "Modeling, Control and Power Quality Evaluation of a PEM Fuel Cell Based Power Supply System for Residential Use" Department of Electrical and Computer Engineering University of South Alabama
5. Gyu-Yeong Choe Jong- Soo Kim "Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Modeling for High Efficiency Fuel Cell Balance of Plant (BOP)" Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems 2007, Oct. 8~11, Seoul, Korea
6. รศ.วีระเชษฐ์ ชันเงินและวุฒิพล ธารารัตริเศรษฐ์ "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics)" กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ หจก. วี. เจ. พรินติ้ง, 2550 พิมพ์ครั้งที่ 7