

## แบบจำลองเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

### Mathematical model of Proton Exchange Membrane Fuel Cell

วินัย จันทรพิง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี  
จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3430 โทรสาร 0-2549-3432 E-mail: [winaic@en.mutt.ac.th](mailto:winaic@en.mutt.ac.th)

#### บทคัดย่อ

แบบจำลองเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง และศึกษาถึงการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระ โหลด ทางไฟฟ้า โดยแบบจำลองใช้สมการกฏอนุรักษ์พลังงาน สมการอนุรักษ์มวลและสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ในการสร้างแบบจำลอง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของกระแสที่มีการแลกเปลี่ยนในการเกิดปฏิกิริยา ค่าสัมประสิทธิ์การเกิดปฏิกิริยา ค่าความต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำไฟฟ้าของชั้นส่วนของเซลล์เชื้อเพลิง และค่าการสูญเสียของกระแสในเซลล์เชื้อเพลิง ผลที่ได้จากแบบจำลองพบว่า สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ที่กล่าวมา และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดของเซลล์เชื้อเพลิงในรูปแบบการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟแบบ ฟันเลื่อย แบบสลับ และแบบ ฟันเฟือง พบว่า การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง มีการตอบสนองอย่างทันทีซึ่งเป็นผลให้เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานและจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดได้ทันที

**คำสำคัญ:** เซลล์เชื้อเพลิง, เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน, สมรรถนะ

#### Abstract

Mathematical model of Proton Exchange Membrane (PEMFC) is developed in order to predict the performance of PEMFC and to study of the response of PEMFC when there is an electrical load changed. The model is developed under the energy conservation equation, mass equation and thermodynamics equation. An exchange current density for reaction, an activity coefficient, a resistance of ions flow in electrolyte and resistance of the flow of electrons through electrically conductive fuel cell components, and a limiting current density with constant value have been changed. The model results show that the PEMFC's performance is depending on those parameters as mention before. The electrical loads have been changed in various shape, such as step, saw tooth and gear shape. The results show that the output voltage of the PEMFC can immediately response to the electrical load change.

**Keywords:** Fuel Cell, Proton Exchange Membrane, Performance

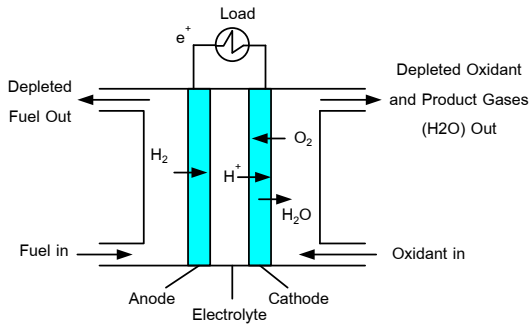
#### 1. คำนำ

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นเทคโนโลยีใหม่ในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้หลักการทาง ปฏิกิริยาเคมี การศึกษาทั้งการพัฒนาระบบจำลองเพื่อทำนายและดูพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่เกิดขึ้น รวมทั้งการสร้างชุดทดลองเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นมาเพื่อ ทดสอบและ ศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ ซึ่งมีกลุ่มนักวิจัยที่ได้ทำการศึกษา กันอย่างกว้างขวาง [1-12] เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้น เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของภาระ ทางไฟฟ้า [10, 12] หรือมีการจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า มีการศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง [2, 3, 10, 11, 12] จากการศึกษาที่ผ่านมา ยังมีข้อสันนิษฐานที่น่าสนใจในการศึกษา เช่น ผลของตัวแปรของวัสดุในการใช้ทำเซลล์เชื้อเพลิง ตัวแปรของอุณหภูมิอากาศ ความชื้นในอากาศ เป็นต้น

ดังนั้นในการวิจัยนี้ จึงได้สนใจที่จะทำการศึกษาดังกล่าว เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยได้พัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขขึ้นมา ภายใต้สมการ กฏอนุรักษ์พลังงาน กฏอนุรักษ์ มวลและสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยจะศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง รวมทั้งพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของเซลล์เชื้อเพลิงในกรณีที่เซลล์เชื้อเพลิงมีความสามารถในการผลิตไฟฟ้าไม่เท่ากันทุกเซลล์

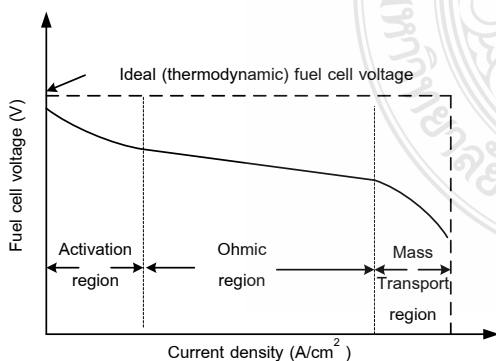
#### 2. ทฤษฎีและแบบจำลองเชิงตัวเลข

แบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนได้ถูกพัฒนาขึ้น ภายใต้สมการกฏอนุรักษ์พลังงาน สมการอนุรักษ์มวล และสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ในการเปลี่ยนพลังงานจากไฮโดรเจนเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น จะอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยา เคมี โดยมี การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ดังรูปที่ 1 ที่แสดง การทำงาน ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นก๊าซไฮโดรเจน ถูกป้อนเข้าทางด้าน ขั้วอาร์โนด และอากาศ หรือออกซิเจน จะถูกป้อนเข้าทางด้านขั้วคาร์โทด ซึ่งมีแผ่นเมมเบรนบาง ๆ กั้นอยู่ระหว่างกลางของก๊าซทั้งสอง [11]



รูปที่ 1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [11]

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง มีตัวแปรมากมายที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถแสดงได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ( $i$ ) และแรงดันไฟฟ้า ( $v$ ) หรือกราฟ  $i-v$  curve ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งลักษณะของกราฟ จะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาของเซลล์เชื้อเพลิงและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ ภาระโหลดทางไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงยังขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ มากมาย แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ผลิตได้ นั้น จะมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในทางทฤษฎีที่ได้จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การสูญเสียหลักภายในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 อย่าง คือ การสูญเสียแบบแรก เป็นการสูญเสียอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีภายในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงแรกของกราฟ การสูญเสียแบบที่สองเป็นการสูญเสียอันเนื่องมาจากความต้านทานของวัสดุที่ถูกนำมาใช้ จะเกิดขึ้นในช่วงกลางของกราฟ และการสูญเสียสุดท้ายเกิดจากการความเข้มข้นหรือความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ทำปฏิกิริยาและการเกิดการอุดตันการไหลจากน้ำที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งจะสามารถแสดงด้วยกราฟในส่วนท้ายสุด ซึ่งในแต่ละแบบของการสูญเสียที่เกิดขึ้น ในภายในเซลล์เชื้อเพลิงยังขึ้นอยู่กับขนาดทางกายภาพ ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงอีกด้วย



รูปที่ 2 กราฟเส้นโค้ง  $i-v$  ของเซลล์เชื้อเพลิง [11]

การสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน สามารถที่จะคำนวณหาขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่แท้จริงของเซลล์เชื้อเพลิงได้จากสมการที่ (1) ดังนี้ [11]

$$V = E_{thermo} - \Delta E_{act} - \Delta E_{ohmic} - \Delta E_{conc} \quad (1)$$

เมื่อ  $V$  คือแรงดันไฟฟ้าที่แท้จริงของเซลล์เชื้อเพลิง  
 $V_{thermo}$  คือแรงดันไฟฟ้าในทางทฤษฎีของเซลล์เชื้อเพลิง  
 $V_{act}$  คือการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาเคมี  
 $V_{ohmic}$  คือการสูญเสียอันเนื่องมาจากความต้านทานของวัสดุภายในเซลล์เชื้อเพลิง  
 $V_{conc}$  คือการสูญเสียอันเนื่องมาจากความเข้มข้นหรือความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

แรงดันไฟฟ้าที่แท้จริงของเซลล์เชื้อเพลิง ขึ้นอยู่กับ 4 เทอมหลักของ ดังสมการที่ (1) แต่ละเทอมก็สามารถแสดงถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าที่แท้จริงได้ ดังสมการที่ (2) ถึงสมการที่ (5) สมการที่ (2) แสดงการ คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าในทางทฤษฎีของเซลล์เชื้อเพลิง ( $V_{thermo}$ ) ที่มีตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งส่งผล กระทบต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของเชื้อเพลิง กับออกซิเจน ในที่นี้คือไฮโดรเจน เรียกสมการนี้ว่า Nernst equation

$$E_{thermo} = E_{thermo}^0 - \left[ \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2} \times \sqrt{p_{O_2}}} \right) \right] \quad (2)$$

เมื่อ  $E_{thermo}^0$  เป็นแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานในทางทฤษฎี  $R$  คือค่าคงที่ของก๊าส (8.314 J/mol K),  $T$  คืออุณหภูมิในสเกลเคลวิน  $n$  เป็นจำนวนของอิเล็กตรอนต่อไอออนที่ทำปฏิกิริยาหรือโมเลกุล  $F$  คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,486 C/mol),  $p_{H_2O}$  เป็นความดันของน้ำ  $p_{H_2}$  เป็นความดันของไฮโดรเจนและ  $p_{O_2}$  เป็นความดันของออกซิเจน

สมการที่ (3) เป็นการแสดงสูญเสียเนื่องจากการทำปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง หรือเรียกว่าสมการ Tafel equation

$$\Delta E_{act} = \left( \frac{RT}{\alpha F} \right) \ln \left( \frac{i + i_{loss}}{i_0} \right) \quad (3)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือสัมประสิทธิ์การเกิดปฏิกิริยา  $i_{loss}$  คือการสูญเสียของกระแส  $i_0$  คือความหนาแน่นของกระแสที่มีการแลกเปลี่ยนในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีค่าคงที่และ  $i$  คือความหนาแน่นของกระแสที่จ่ายเข้าไป สมการที่ (4) เป็นแสดงการ การสูญเสียเนื่องจากการความต้านทานของการไหลของไอออนในขั้วและความต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำไฟฟ้าของชั้นส่วนของเซลล์เชื้อเพลิง ( $R_{ohmic}$ )

$$\Delta E_{ohmic} = i(R_{ohmic}) \quad (4)$$

และสมการที่ (5) แสดงการสูญเสียเนื่องจากการความเข้มข้นและความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

$$\Delta E_{conc} = \left( \frac{RT}{nF} \right) \ln \left( \frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (5)$$

เมื่อ  $i_L$  คือค่าขีดจำกัดความหนาแน่นของกระแส ซึ่งมีค่าคงที่ จากสมการทั้งหมด สามารถนำมา คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่แท้จริงของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังสมการที่ (6) โดยที่การสูญเสียอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาและการสูญเสียอันเนื่องมาจากความเข้มข้นและความหนาแน่นของเชื้อเพลิงสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งสองด้านของเซลล์เชื้อเพลิง (ด้านขั้วอาร์โนดและด้าน ขั้วคาร์โทด) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่แท้จริงของเซลล์เชื้อเพลิงจึงสามารถหาได้ดังนี้ [12]

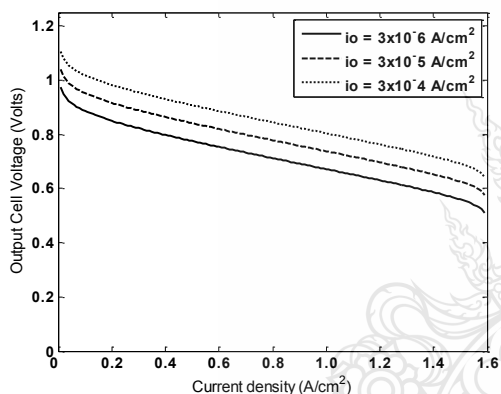
$$V_{cell} = E_{thermo} - \left( \frac{RT}{\alpha nF} \ln \left( \frac{i + i_{loss}}{i_{o,c}} \right) - \left( \frac{RT}{\alpha nF} \ln \left( \frac{i + i_{loss}}{i_{o,a}} \right) \right) - \left( \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{i_{L,c}}{i_{L,c} - i} \right) - \left( \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{i_{L,a}}{i_{L,a} - i} \right) - i(R_{ohmic}) \right) \right) \quad (6)$$

ตัวอักษรห้อย a และ c แสดงด้านของขั้วของเซลล์เชื้อเพลิงที่เป็นด้านอาร์โนดและคาร์โทดตามลำดับ

จากสมการ ที่แสดงด้าน บน ถูกนำมาพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการ วิเคราะห์และทำนาย ผลกระทบของ ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

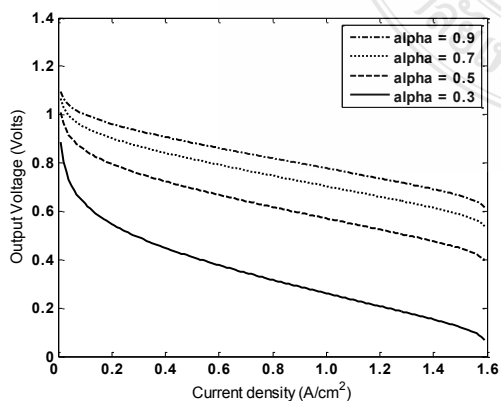
### 3. ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลที่ได้จาก แบบจำลอง เชิงตัวเลข สามารถแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 3 แสดงการผลกระทบของสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ค่าความหนาแน่นของกระแสที่มีการแลกเปลี่ยนในการเกิดปฏิกิริยา ( $i_0$ ) โดยทำการลดค่าความหนาแน่นของกระแส ครึ่งละ 10 เท่าของค่าเริ่มต้น จากผลที่ได้จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ก็จะลดลงด้วย



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของกระแส

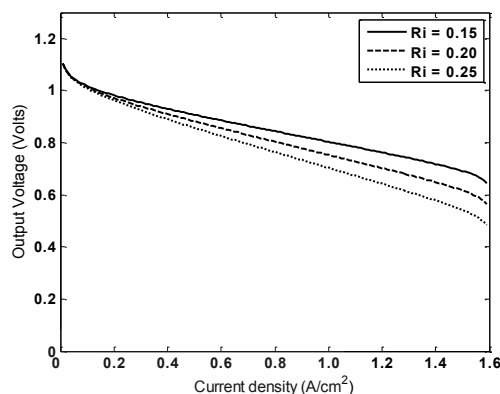
รูปที่ 4 แสดงผลการเปลี่ยนแปลง ค่าสัมประสิทธิ์การเกิดปฏิกิริยา ( $\alpha$ ) ในเซลล์เชื้อเพลิง เพิ่ม จาก 0.3 ถึง 0.9 ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเพิ่มขึ้น 12%



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การเกิดปฏิกิริยา ( $\alpha$ )

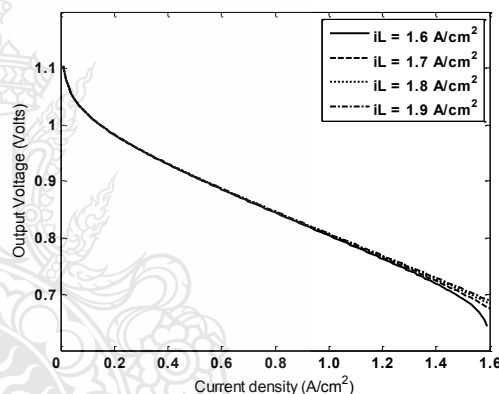
รูปที่ 5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำไฟฟ้าของชั้นส่วนของเซลล์เชื้อเพลิง

( $R_{ohmic}$ ) โดยทำการเพิ่มค่าดังกล่าวขึ้นจาก 0.15 ถึง 0.25 ผลที่ได้พบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง



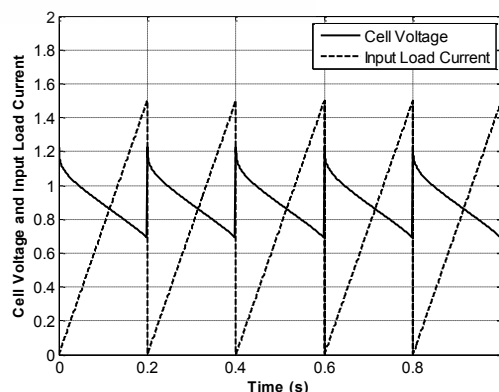
รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำไฟฟ้าของชั้นส่วนของเซลล์เชื้อเพลิง

รูปที่ 6 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงการสูญเสียของกระแส ( $i_{loss}$ ) จาก 1.6 A/cm² ถึง 1.9 A/cm² ผลที่ได้พบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น



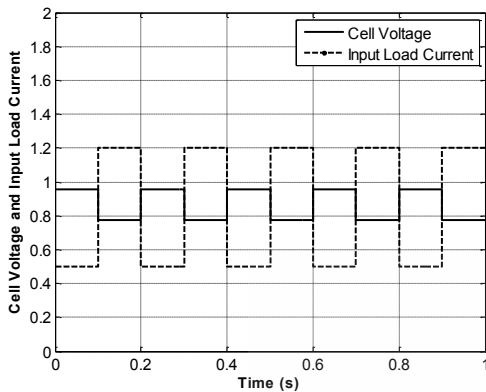
รูปที่ 6 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงการสูญเสียของกระแส

รูปที่ 7 แสดงผลการทำนายการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของลักษณะของภาระโหลดภายนอก โดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบฟันเลื่อย จะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของภาระโหลด แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เมื่อเพิ่มกระแสไฟของภาระ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะลดลง



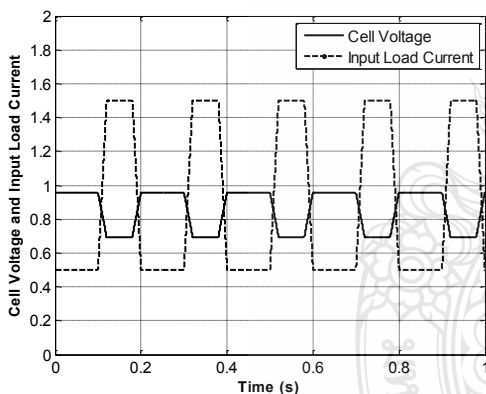
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงภาระโหลดแบบฟันเลื่อย

รูปที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดแบบสลับ ผลที่ได้พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดหรือการเพิ่มกระแสแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงก็จะลดลงดังรูป



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงภาระโหลดแบบสลับ

รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดแบบฟันเฟือง ผลที่ได้พบว่าการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีลักษณะคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของกระแส แต่มีทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือเมื่อกระแสเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะลดลง



รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดแบบฟันเฟือง

#### 4. สรุป

จากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้น สามารถทำนายผลการเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ภายใต้สมการอนุรักษ์พลังงาน สมการอนุรักษ์มวลและสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งพบว่า ตัวแปรที่ได้ทำการเปลี่ยนแปลง มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงสามารถที่จะนำแบบจำลองนี้ไปใช้ในการเลือกวัสดุที่มีค่าอยู่ในช่วงที่สามารถทำให้เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้ที่สมรรถนะสูงสุดได้ และในการออกแบบการควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต้องให้ความสนใจเป็นอย่างมาก ทั้งนี้ การตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงภาระโหลด จะมีผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งต้องการการควบคุมที่มีระบบควบคุมที่ดี และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดทันที

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ที่ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัยครั้งนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Cheng Wang, Zongqiang Mao, Fuyi Bao, Xiaoguang Li, and Xiaofeng Xie "Development and performance of 5 kW proton exchange membrane fuel cell stationary power system" International Journal of Hydrogen Energy 30, pp.1031-1034, 2005
- [2] Colleen Spiegel "PEM Fuel Cell Modeling and simulation Using MATLAB, Book, Elsevier Inc, 2008
- [3] Fang-Bor Weng, Ay Su, Guo-Bin Jung, Yen-Chiao Chiu, and Shih-Hung Chan "Numerical prediction of concentration and current distributions in PEMFC" Journal of Power Sources 145, pp.546-554, July 18, 2005
- [4] Frano Barbir "PEM Fuel Cells: Theory and Practice" Book, Elsevier Academic Press, 2005
- [5] J.-J. Hwang, and H.-S. Hwang "Parametric studies of a double-cell stack of PEMFC using Grafoil™ flow-field plates" Journal of Power Sources 104, pp.24-32, July 18, 2002
- [6] Lin Wang, Attila Husar, Tianhong Zhou, and Hongtan Liu "A parametric study of PEM fuel cell performances" International Journal of Hydrogen Energy 28, pp.1263-1272, 2003
- [7] Leonard J. Bonville, H. Russel Kunz, Ying Song, Anthony Mientek, Minkmas Williams, Albert Ching, and James M. Fenton "Development and demonstration of a higher temperature PEM fuel cell stack" Journal of Power Sources 144, pp.107-112, March 16, 2005
- [8] M.T. Outeiro, R. Chibante, A.S. Carvalho, and A.T. de Almeida "A parameter optimized model of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell including temperature effects" Journal of Power Sources, pp. 952-960, 2008
- [9] Ronald K.A.M Mallant "PEMFC systems: the need for high temperature polymers as a consequence of PEMFC water and heat management" Journal of Power Sources 118, pp.424-429, 2003
- [10] Sampath Yerramalla, Asad Davari, Ali Feliachi, and Tamal Biswas "Modeling and simulation of the dynamic behavior of a polymer electrolyte membrane fuel cell" Journal of Power Sources 124, pp.104-113, June 11, 2003
- [11] Winai Chanpeng and Yottana Khunatorn "Simulation of Dynamic Behavior of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell", International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009

- [12] Winai Chanpeng and Yottana Khunatorn  
"Mathematical model of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell", International Conference on 7th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, 2009

#### 7. ประวัติผู้เขียนบทความ



วินัย จันทรพิง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำ  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี มีความสนใจในงานวิจัยทางด้าน  
การเซลล์เชื้อเพลิง พลังงานร่วม และระบบทำ  
ความเย็น

