

แบบจำลองการไหลของก๊าซภายในมานิโฟลด์สำหรับห่อเซลล์เชื้อเพลิง แบบออกไซด์ของแข็ง

Gas Flow Simulation in Manifolds of a Solid Oxide Fuel Cell Stack

ศุภกร อิสสระกุล* และ วิศนุรักษ์ เวชสถล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
126 ถนนประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Supakorn ISSARAKUL* and Wisanuruk WECHSATOL
Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
126 Pracha-u-tid Rd, Tungkhru, Bangkok 10140, Thailand
Corresponding E-mail : supakorn.is@hotmail.com

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของรูปทรงของมานิโฟลด์ที่มีต่อการกระจายตัวของก๊าซในแต่ละชั้นของห่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง เนื่องจากการกระจายตัวของก๊าซภายในห่อเซลล์เชื้อเพลิงจะส่งผลโดยตรงต่อเกรเดียนต์ของอุณหภูมิภายในห่อเซลล์เชื้อเพลิง อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและอัตราการถ่ายเทความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายได้ในระหว่างการทำงานที่อุณหภูมิสูง (800-1000 องศาเซลเซียส) พฤติกรรมการไหลของก๊าซในแต่ละชั้นของห่อเซลล์เชื้อเพลิงอันเป็นผลมาจากรูปทรงของมานิโฟลด์ซึ่งทำหน้าที่กระจายก๊าซและรวบรวมก๊าซที่ไหลผ่านเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกศึกษา รูปทรงของมานิโฟลด์ได้ถูกปรับเปลี่ยนไปตามมุม โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์การไหลได้ถูกนำมาประยุกต์เพื่อจำลองพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นภายในห่อเซลล์เชื้อเพลิง ผลที่ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของมานิโฟลด์และการกระจายตัวของอัตราการไหลในแต่ละชั้นของห่อเซลล์เชื้อเพลิง

คำสำคัญ: มานิโฟลด์, ตัวกระจายก๊าซ, เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์, ห่อเซลล์เชื้อเพลิงและองค์ประกอบของห่อเซลล์

Abstract

This project is aimed to study the geometric shape effects of manifolds on the gas distribution in a solid oxide fuel cell stack. Because the distribution of gases has direct effects on the temperature gradient across the stack and on the electro-

chemical reaction rate as well as on the heat release rate of the stacks which may cause damages to the cells during operation at high temperature (800-1000°C). The gas flow behavior in each layer of a fuel cell stack due to the geometric shapes of the manifolds which distribute and collect the gases was studied. The geometry of the manifolds was varied according to the slope. A commercial computational fluid dynamic program was used to simulate the flow behaviour inside the stack. The results show the relation between the geometry of the manifolds and the flow rate distribution in each layer of the fuel cell stack.

Keywords: Manifolds, Gas distributor, Solid Oxide Fuel Cells, Fuel cell stack and stack configuration.

1. บทนำ

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เซลล์เชื้อเพลิงเป็นเทคโนโลยีที่สะอาดมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยและให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงเนื่องจากกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นไปในลักษณะ ใกล้เคียงกับ quasi-static อย่างไรก็ดีตามเซลล์เชื้อเพลิงเพียงเซลล์เดียวสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงมาเชื่อมต่อกันเป็นห่อเซลล์ (Cell stack) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้เพียงพอตามที่ต้องการ

เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ชนิดแข็ง (Solid oxide fuel cells, SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูงจึงให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ดีกว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบอื่น แต่อาจประสบปัญหาเรื่องอายุการใช้งานของวัสดุอันเนื่องมาจากการเกิดออกไซด์บนชุด interconnect และการเกิดความเค้นเนื่องจากความร้อนภายในเซลล์

เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ชนิดแข็งที่ใช้กันแพร่หลายในขณะนี้ มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบแผ่น (Planar) และแบบท่อ (Tubular) โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นจะให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อขนาดของเซลล์ที่สูงกว่าแบบท่อ จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในงานด้านการขนส่ง เช่น เครื่องบินโดยสาร และเป็นแบบที่สนใจทำการศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้

รูปร่างของท่อเซลล์มีอิทธิพลโดยตรงต่อการไหลและการกระจายตัวของก๊าซ โดยลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศภายในช่องเซลล์ (Cell channels) มีผลต่อประสิทธิภาพและสมรรถนะของเซลล์โดยตรง การไหลที่ไม่สม่ำเสมอทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นอย่างไม่เหมาะสมและนำไปสู่การกระจายตัวของอุณหภูมิบนเซลล์ที่ไม่สม่ำเสมอ อันก่อให้เกิดความเค้นเนื่องจากความร้อนได้ ซึ่งหากมากเกินไปอาจทำให้เซลล์แตกได้ รวมทั้งยังมีผลต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เซลล์ผลิตได้อาจลดลงด้วย ดังนั้น การส่งเสริมให้มีการกระจายตัวก๊าซภายในท่อเซลล์เชื้อเพลิงให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์ให้ดีขึ้นได้

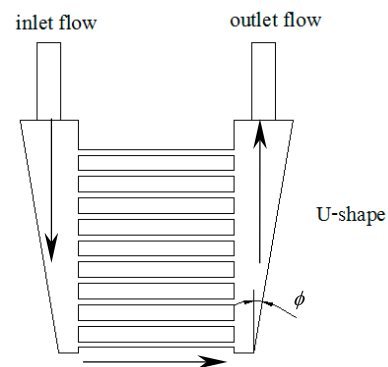
ท่อเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ชนิดแข็งมีส่วนประกอบที่เรียกว่า มานิโฟลด์ (Manifold) ซึ่งทำหน้าที่รวบรวมและกระจายก๊าซ (อากาศและเชื้อเพลิง) ให้แต่ละช่องเซลล์ ทั้งนี้มานิโฟลด์มีอยู่ 2 แบบด้วยกัน ได้แก่ มานิโฟลด์แบบภายใน (internal manifold) และ มานิโฟลด์แบบภายนอก (external manifold) สำหรับงานวิจัยนี้ได้มุ่งศึกษามานิโฟลด์แบบภายนอก ซึ่งมีลักษณะเหมือนอ่างเก็บก๊าซและกระจายก๊าซ รูปร่างและขนาดของมานิโฟลด์มีความสำคัญต่อลักษณะการกระจายตัวของการไหลของก๊าซในแต่ละช่องเซลล์ภายในท่อเซลล์

โครงการนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลของการออกแบบมานิโฟลด์สำหรับท่อเซลล์เชื้อเพลิงที่มีต่อการกระจายตัวของก๊าซในชั้นต่างๆ ของท่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ชนิดแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยไม่คำนึงถึงผลของการออกแบบที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาอัตราการไหลของก๊าซในแต่ละชั้นของท่อเซลล์เชื้อเพลิง ที่ประกอบด้วย 10 ชั้นของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นได้ว่าการปรับมุม (slope) สามารถช่วยปรับปรุงอัตราการไหลให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น

ในอดีตที่ผ่านมาลักษณะรูปร่างของช่องทางเดินของเซลล์เชื้อเพลิงและออกซิไดส์ เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อสมรรถนะของ Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) และถูกพิจารณาว่ามีความสำคัญน้อยต่อสมรรถนะของ Solid Oxide Fuel Cell (SOFCs) อย่างไรก็ตามเมื่อไม่นานมานี้ Kee และคณะ [4] ได้ทำการศึกษถึงการกระจายตัวของเชื้อเพลิงและออกซิไดส์ภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่น โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการพิจารณาความดันที่ลดลงในช่องการไหล (Pressure drop) และลักษณะของความสม่ำเสมอของการไหลของก๊าซในแต่ละช่องทางเดิน โดยแสดงผลอยู่ในรูปของ Optimum operating chart ต่อมา Lin และคณะ [5] ทำการศึกษาถึงผลของขนาดของครีป (Rip) ของ Interconnect ที่ใช้กันระหว่างแต่ละช่องของช่องการไหลของเชื้อเพลิง

และออกซิไดส์ ที่มีต่อขนาดความสูญเสียของความต่างศักย์เนื่องจากการลดลงของความเข้มข้นของเชื้อเพลิงและออกซิไดส์ (พบว่าขนาดของช่องการไหลที่เหมาะสมจะทำให้ความสูญเสียของความต่างศักย์เนื่องจากการลดลงของความเข้มข้นของเชื้อเพลิงและออกซิไดส์มีค่าต่ำที่สุดได้)

งานวิจัยก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่จะเน้นไปที่การออกแบบมานิโฟลด์สำหรับ PEMFCs เป็นหลัก เช่น งานวิจัยของ Vargas และคณะ [6] ได้ทำการศึกษารูปร่างของท่อเซลล์และการกระจายตัวของก๊าซซึ่งมีผลต่อสมรรถนะและการเกิดปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC อีกงานวิจัยหนึ่งที่มีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Vargas และคณะ ก็คือ งานวิจัยของ Maharudraya [7] ซึ่งได้ทำการศึกษาความดันตกคร่อมของ Inlet header และ Exhaust header ซึ่งเป็นช่องทางการไหลโดยคำนึงถึงเฉพาะการไหลที่เกิดขึ้นภายในเซลล์และผลกระทบบของค่า Reynolds number ที่มีต่อการกระจายตัวของก๊าซภายในช่องทางการไหลแต่ก็ไม่ได้ให้ความสำคัญกับการทำปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ Seo Young Kim และคณะ [8] ได้ศึกษาการไหลของอากาศภายในมานิโฟลด์ที่ไหลเข้าทางด้านคาโทดของท่อเซลล์เชื้อเพลิงที่ประกอบด้วย PEMFCs จำนวน 10 เซลล์ โดยออกแบบมานิโฟลด์ให้มีอัตราส่วนความโค้งของทางเข้ามานิโฟลด์ที่แตกต่างกันแต่ก็ไม่ได้ศึกษาผลกระทบที่มีต่อปฏิกิริยาเคมีของเซลล์



รูปที่ 1 แสดงลักษณะทางโครงสร้างของท่อเซลล์เชื้อเพลิงและทิศทางการไหลภายในท่อเซลล์แบบ U-shape

Lin และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาสภาวะการทำงาน และทำนายสมรรถนะของ Planar SOFC Stacks ที่ประกอบด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแข็งทั้งสิ้นจำนวน 50 เซลล์ โดยในแต่ละเซลล์มีการจัดเรียงของช่องทางเดินของเชื้อเพลิงและช่องทางเดินของอากาศเป็นแบบการไหลตามขวาง (Cross flow) และมีตัวเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ (Interconnect) ซึ่งอยู่ในรูปร่างเป็นครีป ซึ่งในแบบจำลองได้เริ่มคำนึงถึงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ด้วย หากแต่ยังขาดการทำ parametric study เพื่อหาจุดเหมาะสมในการออกแบบมานิโฟลด์ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ถ้าจะทำการศึกษา เพื่อหาจุดเหมาะสมในการออกแบบมานิโฟลด์สำหรับ Planar SOFC Stacks เพื่อส่งเสริมให้มีการกระจายตัวของก๊าซภายในท่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบแข็งที่สม่ำเสมอ อันเป็นจุดประสงค์หลักของโครงการนี้

2. ทฤษฎี สมมติฐาน และเงื่อนไขการศึกษา

ในโครงการนี้เราพิจารณาลักษณะการไหลและการกระจายตัวของก๊าซภายในหอเซลล์เชื้อเพลิง โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์เชื้อเพลิง จากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และการตรวจสอบค่า Reynolds number พบว่าการไหลภายในมานิโพลด์เป็นแบบปั่นป่วน ส่วนการไหลในช่องเซลล์เป็นแบบราบเรียบ เนื่องจากไดเวอร์เจนซ์ของความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงสามารถสมมติให้การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ สมการสมดุลโมเมนตัมแบบ $k-\varepsilon$ โมเดล ได้ถูกใช้เพื่ออธิบายการไหลแบบปั่นป่วนภายในหอเซลล์เชื้อเพลิง

ก๊าซไหลเข้าและออกจากชุดหอเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 โดยก๊าซไหลเข้าช่อง (inlet) ด้วยความเร็วแบบสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดทางเข้า (uniform flow) และก๊าซไหลออกที่ระดับความดันอ้างอิง โดยที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับพื้นผิวภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีสภาวะความเร็วเป็นไปตาม logarithmic wall function

ความเร็วของก๊าซที่ทางเข้าพิจารณาที่ระดับความเร็วเท่ากับ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 เมตรต่อวินาที เพื่อความง่ายในการพิจารณาจึงกำหนดให้ก๊าซที่ทำการพิจารณาคืออากาศ เนื่องจากโดยปกติอากาศจะเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ถูกจ่ายให้แก่ขั้ว cathode เพราะฉะนั้นจึงต้องคำนึงถึงผลเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นจึงทำการพิจารณาคูณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

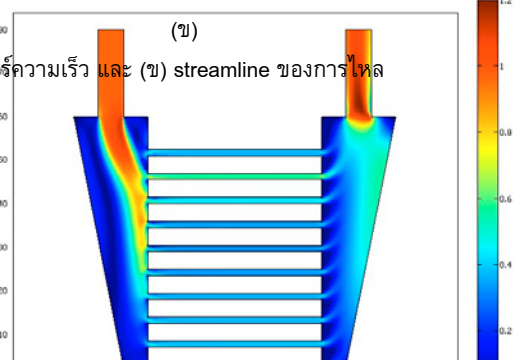
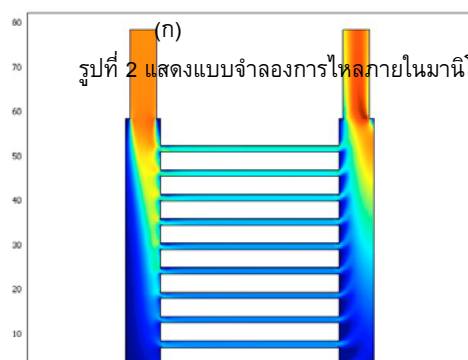
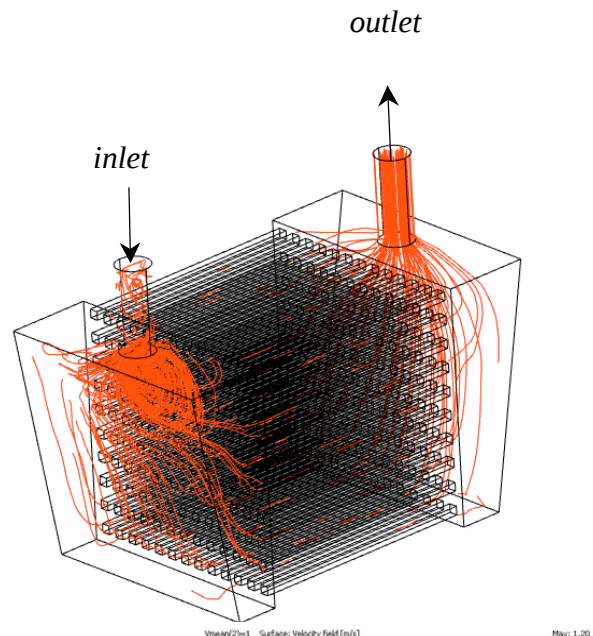
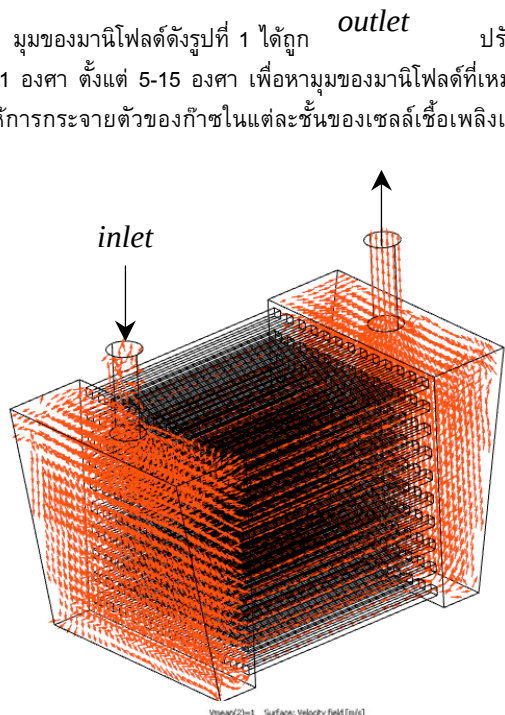
มุมของมานิโพลด์ดังรูปที่ 1 ได้ถูก *outlet* ปรับครั้งละ 1 องศา ตั้งแต่ 5-15 องศา เพื่อหามุมของมานิโพลด์ที่เหมาะสมให้การกระจายตัวของก๊าซในแต่ละชั้นของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นไป

อย่างสม่ำเสมอ ในการศึกษาโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีใช้กันอย่างกว้างขวาง FAMILAB ได้ถูกนำมาใช้เพื่อแก้สมการอนุพันธ์ที่แสดงพฤติกรรมของการไหลและการกระจายตัวของก๊าซในหอเซลล์เชื้อเพลิง จำนวนของเอลิเมนต์ได้ถูกเพิ่มขึ้นจนค่าความเร็วเฉลี่ยในแต่ละชั้นของเซลล์เชื้อเพลิงแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นนัยสำคัญ

3. ผลการศึกษา

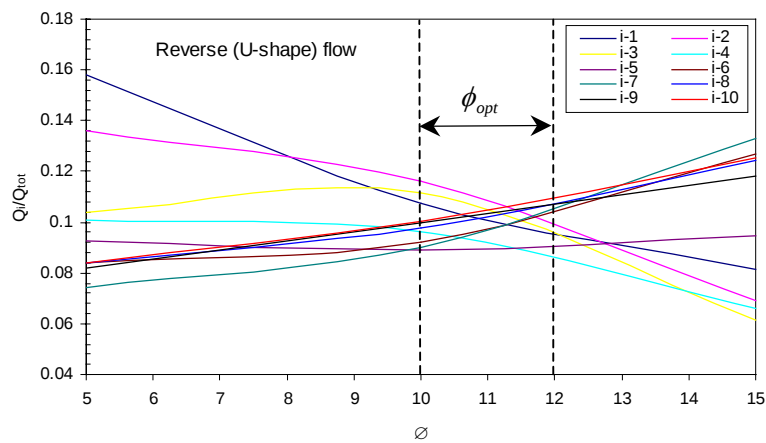
จากการแก้สมการสมดุลของโมเมนตัมแบบ $k-\varepsilon$ โมเดล ร่วมกับการอนุรักษ์มวล ทำให้ทราบทิศทางการไหลและการไหลวนที่เกิดขึ้นในหอเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยรูปที่ 2(ก) แสดงให้เห็นถึงเวกเตอร์ความเร็วของการไหลภายในหอเซลล์เชื้อเพลิง ในขณะที่รูปที่ 2(ข) แสดง streamline ของการไหลภายในเซลล์เชื้อเพลิง โดยจะมีลักษณะของการไหลวนขึ้นในบริเวณทางเข้ามานิโพลด์ ในขณะที่การไหลภายในช่องเซลล์หรือ interconnect เป็นแบบราบเรียบเนื่องจากช่องทางเดินของก๊าซมีขนาดเล็ก

การเปลี่ยนแปลงมุมของมานิโพลด์ ϕ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางและปริมาณการไหลในแต่ละชั้นของมานิโพลด์อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 รูปที่ 3 แสดงความแตกต่างของความเร็วในแต่ละชั้นของหอเซลล์เมื่อมุมของมานิโพลด์มีค่าเท่ากับ 0 และ 11 องศา เมื่ออากาศไหลเข้ามานิโพลด์ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะเห็นว่าอัตราการไหลในแต่ละชั้น i ของหอเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าใกล้เคียงกันและกันมากที่สุดเมื่อมุมของมานิโพลด์มีค่าเท่ากับ 11 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองการไหลภายในมานิโพลด์ (ก) เวกเตอร์ความเร็ว และ (ข) streamline ของการไหล

รูปที่3 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศที่ 25 องศาเซลเซียสในชั้นต่างๆ ที่มุมมานิโพลต์เท่ากับ 0 และ 11 องศา

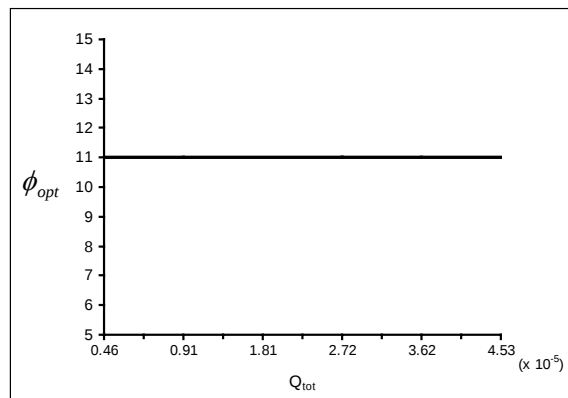


รูปที่4 แสดงความสัมพันธ์ของมุมของมานิโพลต์ที่มีต่ออัตราการไหลของอากาศในชั้นต่างๆภายในหอเซลล์เชื้อเพลิง

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นถึงผลของการปรับมุมของมานิโพลต์ที่มีต่อการกระจายตัวของก๊าซที่ชัดเจน เมื่ออากาศไหลเข้าสู่ชุดมานิโพลต์ที่มีความเร็วลมเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที โดยมุมของมานิโพลต์ที่เหมาะสม ϕ_{opt} ที่ให้อัตราการไหลของก๊าซในแต่ละชั้นของเซลล์เชื้อเพลิงที่สม่ำเสมอที่สุดอยู่ที่ 11 องศา จากการศึกษาเพิ่มเติมเมื่ออากาศไหลเข้าหอเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความเร็วต่างๆ หรือให้อัตราการไหลที่ค่าต่างๆ พบว่ามุมของมานิโพลต์ที่เหมาะสม ϕ_{opt} ยังคงมีค่าเท่ากับ 11 องศาเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 5

การศึกษาถึงผลของมุมมานิโพลต์ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในหอเซลล์เชื้อเพลิงและสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงยังคงมีความสำคัญและจะถูกดำเนินการศึกษาในขั้นต่อไป



รูปที่ 5 แสดงมุมของมานิโพลต์ที่ให้การกระจายตัวของก๊าซที่สม่ำเสมอที่สุดที่อัตราการไหลต่างๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการ
อนุรักษ์พลังงานและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
ทางคณะวิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณกองทุนทั้งสองดังกล่าวไว้ข้างต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Warsi, Z.V.A., Conservation Form of The Navier-Stokes Equations in General Non-steady Coordinates, AIAA Journal 19, 1981, pp. 240-242.
- [2] Larminie, Jame., Fuel Cell Systems Explained, 2nd ed., 2003.
- [3] B. E. Launder and D. B. Spalding. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England, 1972
- [4] Kee R., Korada P., Walters K. and Paval M., A generalized model of the flow distribution in channel networks of planar fuel cells, Journal of power Sources, V. 109, 2002, pp. 148-159.
- [5] Lin Z., Stevenson J.W. and Khaleel M.A., The effect of interconnect rib size on the fuel cell concentration polarization in planar sofc, Journal of power Sources, V. 117, 2003, pp. 92 – 97.
- [6] Vargas J.V.C., Ordonez J.C. and Bejan.A., Constructal PEM fuel cell stack design, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 48 (21-22), 2005, pp. 4410-4427.
- [7] Maharudrayya.S., Jayanti.S., Deshpande.A.P., Flow distribution and pressure drop in parallel-channel configurations of planar fuel cells, Journal of power Sources, Volume 144(1), 2005, pp. 94-106
- [8] Seo Young Kim., and Won Nyun Kim ., Effect of cathode inlet manifold configuration on performance of 10-cell proton-exchange membrane fuel cell, Journal of power Sources, V. 166 (2), 2007, pp. 430-430.
- [9] Lin, Y. and Beale, S.B., Numerical Simulations of the Performance of a Planar Solid-Oxide Fuel Cell Stack, Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 10 -12 December 2003.