

การศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

ในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

กรกฎ รัตนกรกาญจน์¹ วรรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์¹ และ อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการจำลองการถ่ายโอนโมเมนตัม พลังงาน มวล และประจุ ภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อในระบบ 2 มิติ โดยรูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแบบเซลล์เดี่ยวที่ประกอบด้วย แอร์พรีฮีตติ้งทิว ช่องทางการไหลของอากาศ ช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง แอโนด แคโทด และอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งผลของการคำนวณเชิงตัวเลขของแบบจำลองนี้นำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าที่ได้แตกต่างกันประมาณ 7.27 เปอร์เซ็นต์ และผลของการคำนวณนำมาวิเคราะห์ถึงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า พฤติกรรมการไหลของก๊าซ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสาร ซึ่งผลของการจำลองที่ได้สามารถนำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งและสามารถช่วยในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

คำสำคัญ : เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ/ การถ่ายโอนโมเมนตัม/ การถ่ายโอนพลังงาน/ การถ่ายโอนมวล/ การถ่ายโอนประจุ

ABSTRACT

A two-dimensional model of a tubular solid oxide fuel cell (SOFC) considering momentum, energy, mass and charge transport was developed. The model geometry of a single cell comprises an air-preheating tube, air channel, fuel channel, anode, cathode and electrolyte layers. The model was validated with experimental data and the deviation between experimental and model results was about 7.27%. The current density, gas flow behaviour, temperature and species concentration are analysed and discussed in detail. The result of this work can be used for studying the cell behaviour of a tubular SOFC and used to help develop efficient fuel cell designs.

Key words : Tubular SOFC/ Momentum transport/ Energy transport/ Mass transport/ Charge transport.

¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

²กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

1. บทนำ

ปัจจุบันวิกฤตการณ์เกี่ยวกับพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การพัฒนาเพื่อหาแหล่งพลังงานทดแทนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก โดยเป็นที่ทราบกันดีว่า เมื่อเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้จะเกิดพลังงานความร้อนขึ้นซึ่งสามารถแปรเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า พลังงานในรูปของการขับเคลื่อนเครื่องยนต์ เครื่องจักร หรือในรูปของการทำงานแบบอื่นๆ อีกมากมาย แหล่งเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นพลังงานหลัก ได้แก่ ถ่านหิน ปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากฟอสซิลที่สะสมทับถมกันตามธรรมชาติหลายล้านปี ถ้ามีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลอย่างไม่ระมัดระวังในไม่ช้าแหล่งพลังงานนี้ก็อาจหมดไป นอกจากนี้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ทำให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมาตรฐานคุณภาพชีวิตของมนุษย์รวมถึงสิ่งมีชีวิตบนโลก การพัฒนาเพื่อหาแหล่งพลังงานทดแทนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับการยอมรับและเป็นที่น่าสนใจ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นภายในแล้ว จะให้พลังงานไฟฟ้าออกมาอย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นทางเลือกของแหล่งพลังงานใหม่ที่ยังมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในยุโรป อเมริกา และญี่ปุ่น พลังงานที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงเกิดจากการเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ มีเทน เมทานอล โดยขบวนการทางเคมีไฟฟ้าไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง นอกจากนี้แล้วการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงยังให้ผลดีในแง่ที่ไม่เกิดการเผาไหม้ทำให้ปราศจากมลภาวะ จากข้อดีที่กล่าวถึงนี้ทำให้นักวิจัยพยายามที่จะพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน

การแบ่งชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถแบ่งได้โดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่เซลล์ทำงาน รวมถึงชนิดและธรรมชาติของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้วัสดุเซรามิกเป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยอุณหภูมิการทำงานเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 600 ถึง 1000 องศาเซลเซียส เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสำหรับโรงผลิตไฟฟ้า

เซลล์เชื้อเพลิงที่จะใช้นั้นต้องผ่านการออกแบบ การตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพจากการทดลอง เพื่อที่จะได้ประสิทธิภาพและกระแสไฟฟ้าตามที่ต้องการ แต่เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นมีราคาสูงและจะเป็นการสิ้นเปลืองอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งเป็นเทคนิคที่นำมาช่วยในการ

จำลองลักษณะการไหล เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการสิ้นเปลืองดังกล่าว โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อต้องการศึกษาถึงความเป็นไปได้สำหรับการใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

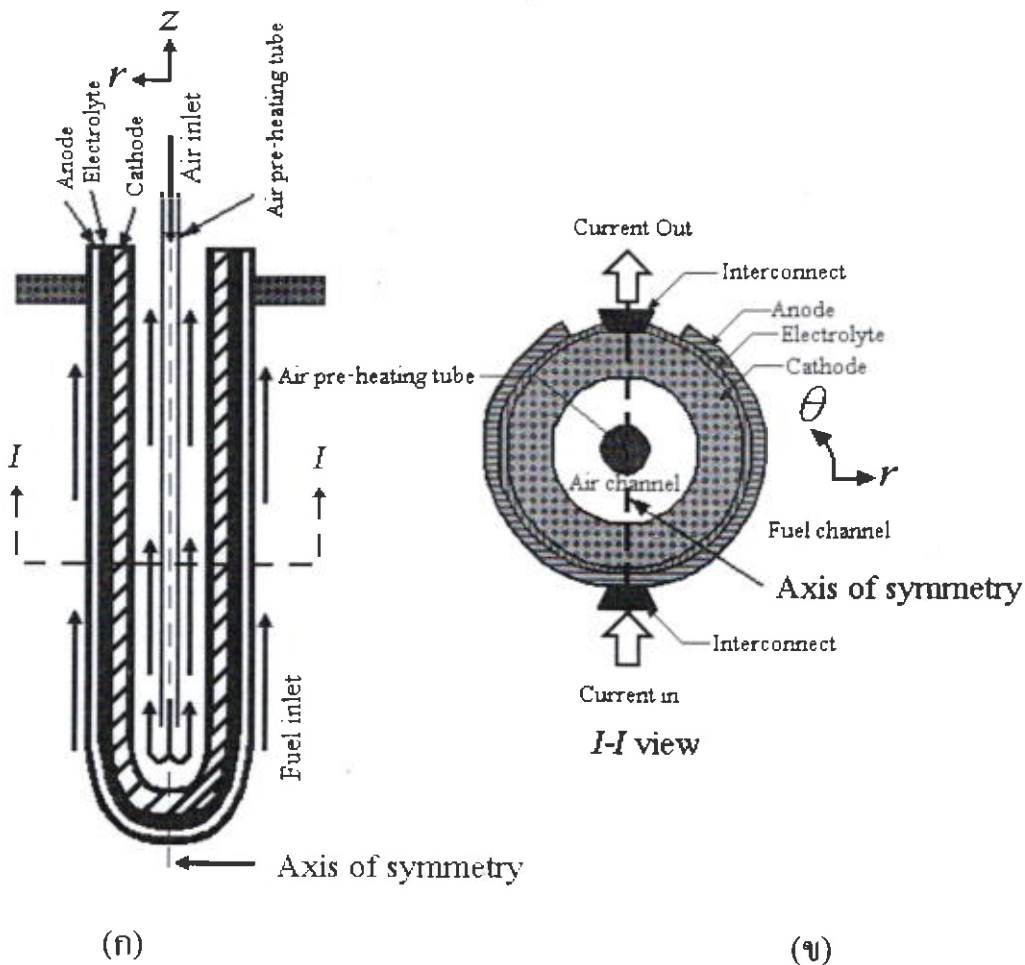
รายการสัญลักษณ์

ρ	ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
U	เวกเตอร์ความเร็วของของไหล
ε	ขนาดของรูพรุน
ζ	เทนเซอร์ความเค้นเฉือนของของไหล
μ	ความหนืดของของไหล ($\text{kg}\cdot\text{m/s}$)
κ	permeability (m^2)
X_i	สัดส่วนโดยมวลของสาร
J_i	ฟลักซ์การแพร่ของสาร ($\text{mol/cm}^2\cdot\text{s}$)
n_i	เลขวาเลนซ์อิเล็กตรอนของสาร i
M_i	มวลโมเลกุลของสาร i (kg/mol)
j	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (A/cm^2)
i_{elec}	อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในอิเล็กโทรด (A)
i_{ion}	ไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นอิเล็กโทรไลต์ (A)

2. วิธีการจำลอง

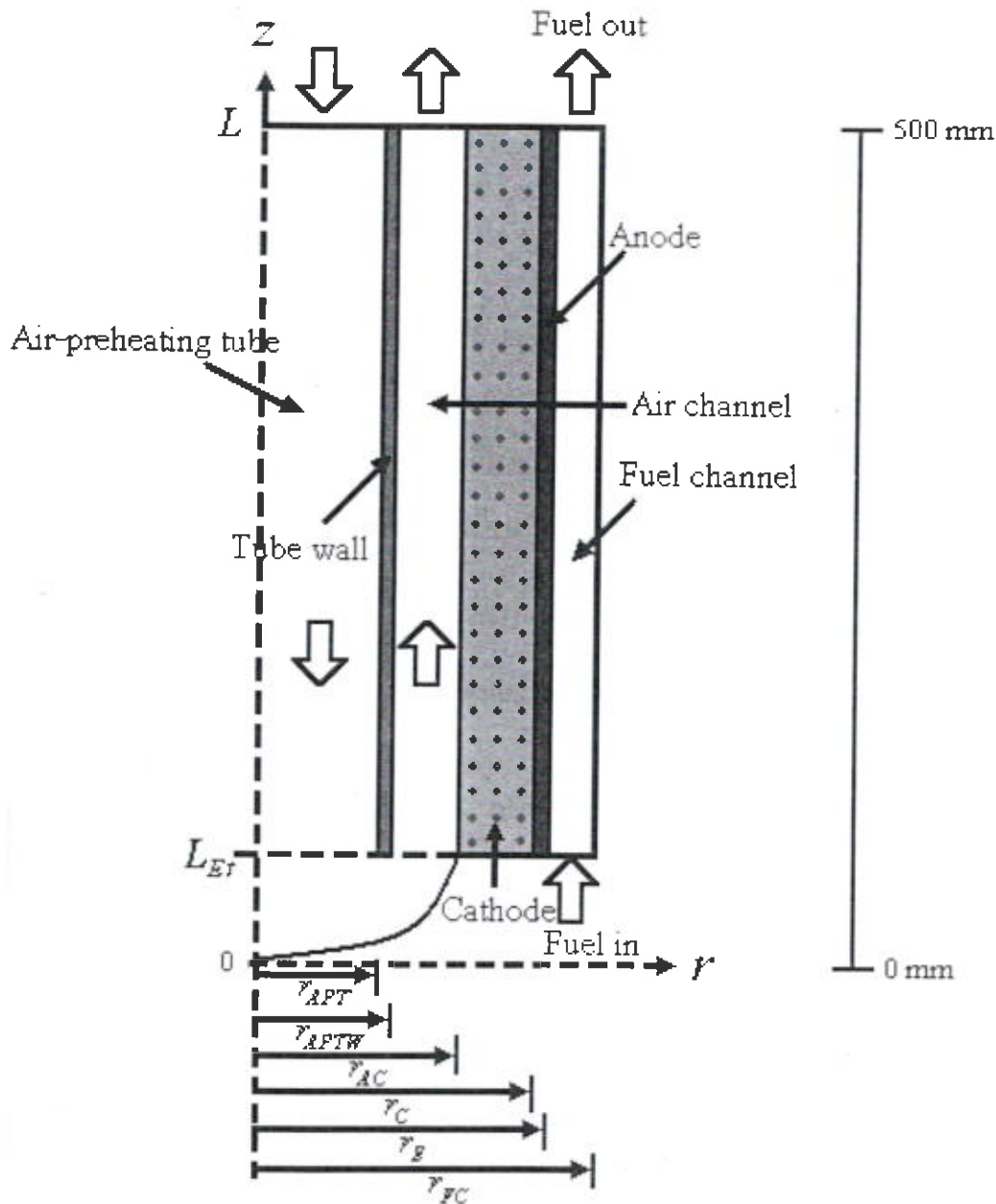
งานวิจัยนี้ทำการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง โดยนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Hagiwara et al [1] ซึ่งก่อนหน้านี้ Suwanwarangkul [2] ได้ทำแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Hagiwara et al [1] โดยแบบจำลองที่ใช้ นั้นใช้โปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS™ ในการคำนวณ ซึ่งเป็นการคำนวณโดยใช้วิธี Finite Element แต่สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม FLUENT และเป็นการคำนวณโดยใช้วิธี Finite Volume โดยกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วย ซัพพอร์ตที่ตั้งท่อ (Supporting tube) แคโทด อิเล็กโทรไลต์ และแอโนด ประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิงประเภทท่อที่มีปลายปิดหนึ่งด้าน ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่กำหนดให้ไม่มีความแตกต่างระหว่างซัพพอร์ตที่ตั้งท่อและแคโทด ดังนั้นแบบจำลองนี้สมการการถ่ายโอนพลังงานและการถ่ายโอนมวลผ่านซัพพอร์ตที่ตั้งท่อจึงเหมือนกับแคโทด

ในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง อากาศที่ใช้ถูกส่งผ่านทางแอร์พรีฮีตติ้งทิวบ์ (Air-preheating tube) ตรงปลายเปิดของเซลล์ เมื่ออากาศไปถึงบริเวณที่เป็นปลายปิดของท่อ อากาศจะไหลย้อนกลับเข้าสู่ช่องทางการไหลของอากาศ ซึ่งเป็นช่องว่างระหว่างแอร์พรีฮีตติ้งทิวบ์ด้านนอกกับด้านในของเซลล์ หลังจากนั้นออกซิเจนจะแพร่ผ่านรูพรุนของแคโทดไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแคโทดกับอิเล็กโทรไลต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนเกิดเป็นออกซิเจนไอออน (O^{2-}) โดยที่ออกซิเจนไอออนจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแคโทดกับอิเล็กโทรไลต์ไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแอโนดกับอิเล็กโทรไลต์โดยผ่านอิเล็กโทรไลต์ สำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้จะอยู่บริเวณด้านนอกของเซลล์ตลอดทั้งเซลล์ ในกรณีที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ไฮโดรเจนจะแพร่ผ่านรูพรุนของแอโนดไปทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับออกซิเจนไอออนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแอโนดกับอิเล็กโทรไลต์ เกิดน้ำเป็นผลิตภัณฑ์



รูปที่ 1 รูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ (ก) ทิศทางการไหลของก๊าซ (ข) พื้นที่ภาคตัดขวางของเซลล์ [2]

เนื่องจากแบบจำลองนี้ การไหลภายในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแบบสมมาตร ทำให้สามารถคำนวณในระบบสองมิติได้ โดยกำหนดให้แกนกลางของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเงื่อนไขขอบเขตเป็นสมมาตร ดังนั้นจึงคำนวณเพียงด้านเดียวของแกนสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณในระบบสองมิติโดยคิดเฉพาะในระนาบ $r-z$ เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และความเข้มข้นของก๊าซ



รูปที่ 2 รูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อตามแบบจำลอง [2]

2.1 สมการควบคุมสำหรับการคำนวณ

สมการควบคุมสำหรับการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลของเซลล์เชื้อเพลิง ใช้สมการการอนุรักษ์ทั่วไป ซึ่งประกอบด้วย

2.1.1 การอนุรักษ์มวล (Mass conservation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho) + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

\mathbf{U} คือ เวกเตอร์ความเร็วของของไหล

ε คือ ขนาดของรูพรุน ยกตัวอย่างเช่น $\varepsilon = 0.3$ สำหรับอิเล็กโทรด $\varepsilon = 1$ สำหรับช่องทางการไหล และ $\varepsilon = 0$ สำหรับอิเล็กโทรไลต์ โดยที่ขนาดของรูพรุนจะมีค่าเท่ากันในทุกสมการควบคุม สมการการอนุรักษ์มวลอธิบายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่อหน่วยปริมาตร โดยที่เทอมสุดท้ายทางซ้ายมือของสมการ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่อหน่วยปริมาตรเนื่องจากการพา

2.1.2 การอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho\mathbf{U}) + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\mathbf{U}\mathbf{U}) = -\varepsilon\nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon\boldsymbol{\zeta}) + \frac{\varepsilon^2\mu\mathbf{U}}{\kappa} \quad (2)$$

โดยที่ $\boldsymbol{\zeta}$ คือ เทนเซอร์ความเค้นเฉือนของของไหล

μ คือ ความหนืดของของไหล ($\text{kg}\cdot\text{m/s}$)

κ คือ permeability (m^2)

สมการการอนุรักษ์โมเมนตัมอธิบายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตร โดยที่เทอมสุดท้ายทางซ้ายมือของสมการ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรเนื่องจากการพา สำหรับทางขวามือของสมการ เทอมแรก เทอมที่สอง และเทอมสุดท้าย คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรเนื่องจากความต่างของความดัน ความหนืด และความพรุนของวัสดุ ตามลำดับ โดยที่เทอมสุดท้ายทางขวามือของสมการ เรียกว่า กฎของดาร์ซี (Darcy's law)

2.1.3 การอนุรักษ์มวลสารแต่ละชนิด (Species conservation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon\rho X_i) + \nabla \cdot (\epsilon\rho \mathbf{U}X_i) = \nabla \cdot \mathbf{J}_i + S_i \quad (3)$$

และ

$$S_i = M_i \frac{j}{n_i F} \quad (4)$$

โดยที่ X_i คือ สัดส่วนโดยมวลของสาร

\mathbf{J}_i คือ ฟลักซ์การแพร่ของสาร ($\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

n_i คือ เลขวาเลนซ์อิเล็กตรอนของสาร i

M_i คือ มวลโมเลกุลของสาร i (kg/mol)

j คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (A/cm^2)

สมการการอนุรักษ์มวลสารอธิบายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสารต่อหน่วยปริมาตร โดยที่เทอมสุดท้ายทางซ้ายมือของสมการ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสารต่อหน่วยปริมาตร เนื่องจากการพา สำหรับทางขวามือของสมการ เทอมแรกและเทอมสุดท้าย คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสารเนื่องจากการแพร่และปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ตามลำดับ

2.1.4 การอนุรักษ์ประจุ (Charge conservation)

$$\nabla \cdot \mathbf{i}_{elec} + \nabla \cdot \mathbf{i}_{ion} = 0 \quad (3-5)$$

โดยที่ \mathbf{i}_{elec} คือ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในอิเล็กโทรด (A)

\mathbf{i}_{ion} คือ ไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นอิเล็กโทรไลต์ (A)

2.2 ขอบเขตเงื่อนไข

ตารางที่ 1 ตารางค่าขอบเขตเงื่อนไข

สภาวะขอบเขต	ค่าขอบเขตเงื่อนไข
ทางเข้าของอากาศ ($z = L, r_E < r < r_{APT}$)	$\partial p_a / \partial z = 0$ (OMT); $v_a = -v_{a,in}, u_a = 0$ (MT); $c_{O_2} = c_{O_2,in}$ (ST); $T_a = T_{a,in}$ (ET)
ทางเข้าของเชื้อเพลิง ($z = L_{Et}, r_E < r < r_{FC}$)	$\partial p_f / \partial z = 0$ (Overall mass transport, OMT) $v_f = v_{f,in}, u_f = 0$ (Momentum transport, MT) $c_i = c_{i,in}$ (Species transport, ST) $T_f = T_{f,in}$ (Energy transport, ET)
ทางออกของอากาศ ($z = L, r_{APTW} < r < r_{AC}$)	$p_a = p_{a,out}; \partial u_a / \partial z = 0, \partial v_a / \partial z = 0; \partial c_{O_2} / \partial z = 0;$ $\partial T_a / \partial z = 0$
ทางออกของเชื้อเพลิง ($z = L, r_E < r < r_{FC}$)	$p_f = p_{f,out}; \partial u_f / \partial z = 0, \partial v_f / \partial z = 0; \partial c_i / \partial z = 0;$ $\partial T_f / \partial z = 0$
ปลายปิดของท่อ	$\nabla p_a(r, z) = 0; u_a = 0, v_a = 0; \nabla c_{O_2}(r, z) = 0;$ $T_a = T_{f,in}$
แกนสมมาตร ($0 < z < L, r = 0$) และ ($L_{Et} < z < L, r = r_{FC}$)	($0 < z < L, r = 0$): $\partial p_a / \partial r = 0; \partial u_a / \partial r = 0, \partial v_a / \partial r = 0; \partial c_{O_2} / \partial r = 0;$ $\partial T_a / \partial r = 0$ ($L_{Et} < z < L, r = r_{FC}$) $\partial p_f / \partial r = 0; \partial u_f / \partial r = 0, \partial v_f / \partial r = 0; \partial c_i / \partial r = 0;$ $\partial T_f / \partial r = 0$
ผนังของแอร์ฟริสตีที่ตั้งทูป ($L_{Et} < z < L, r = r_{APT}$) และ ($L_{Et} < z < L, r = r_{APTW}$)	($L_{Et} < z < L, r = r_{APT}$) $\partial p_a / \partial r = 0; u_a = 0, v_a = 0; \partial c_{O_2} / \partial r = 0$ ($L_{Et} < z < L, r = r_{APTW}$) $\partial p_a / \partial r = 0; u_a = 0, v_a = 0; \partial c_{O_2} / \partial r = 0$
ผิวสัมผัสระหว่างแคโทดกับช่อง ทางการไหลของอากาศ ($L_{Et} < z < L, r = r_{AC}$)	$\partial p_a / \partial r = 0; u_a = 0, v_a = 0$

สภาวะขอบเขต	ค่าขอบเขตเงื่อนไข
ผิวสัมผัสระหว่างแอโนดกับช่องทางไหลของเชื้อเพลิง ($L_{Et} < z < L, r = r_E$)	$\partial p_f / \partial z = 0; u_f = 0, v_f = 0$

ตารางที่ 2 ขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่ทดลองโดย Hagiwara et al. [1]

องค์ประกอบของเซลล์	ขนาด (มิลลิเมตร): เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก / หนา / ยาว
แอโรพรีสต์ตั้งทูป	9/0.50/495
ซีพพอร์ทตั้งทูป	13.8/1.50/500
แคโทด	15.8/1.00/500
อิเล็กโทรไลต์	15.9/0.05/500
แอโนด	16.2/0.15/500
ช่องทางไหลของเชื้อเพลิง	29.2/-/500

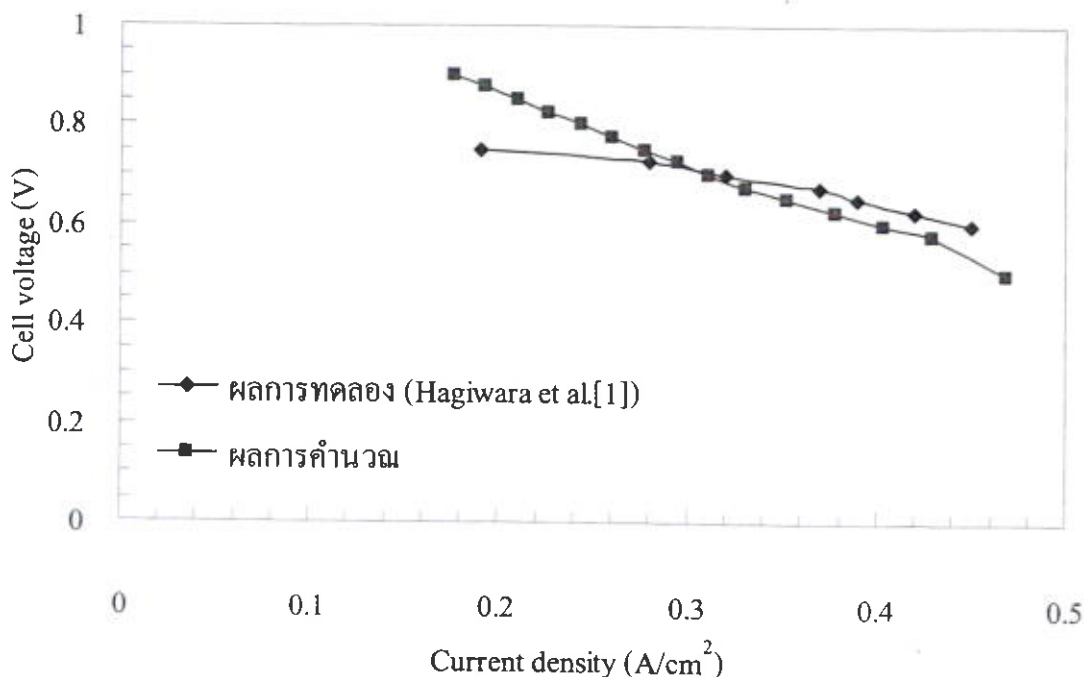
ตารางที่ 3 สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่ทดลองโดย Hagiwara et al. [1]

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่กำหนด
ความดันขาเข้า (เอทีเอ็ม)	1.0
สัดส่วนโดยโมล (เปอร์เซนต์) เชื้อเพลิง อากาศ	98.6 H ₂ /1.4 H ₂ O 21 O ₂ /79 N ₂
อุณหภูมิขาเข้า (องศาเซลเซียส) เชื้อเพลิง อากาศ	870.0 600.0
เงื่อนไขการทำงานของเซลล์ ความต่างศักย์ของเซลล์ (โวลต์) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	0.6 ถึง 0.8 0.1 ถึง 0.5

3. ผลการจำลองและวิจารณ์ผลการจำลอง

ผลการจำลองที่ได้ต้องนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Hagiwara et al. [1] ซึ่งทำการศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ โดยที่ค่าขอบเขตเงื่อนไข ขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

จากผลของการคำนวณเชิงตัวเลข ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงค่าระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ Hagiwara et al. [1] พบว่า ในช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามี่ค่า 0.18 ถึง 0.26 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองสูงกว่าช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามี่ค่า 0.26 ถึง 0.47 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในช่วงนี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง โดยค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 7.27 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าผลของการจำลองที่ได้สามารถนำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

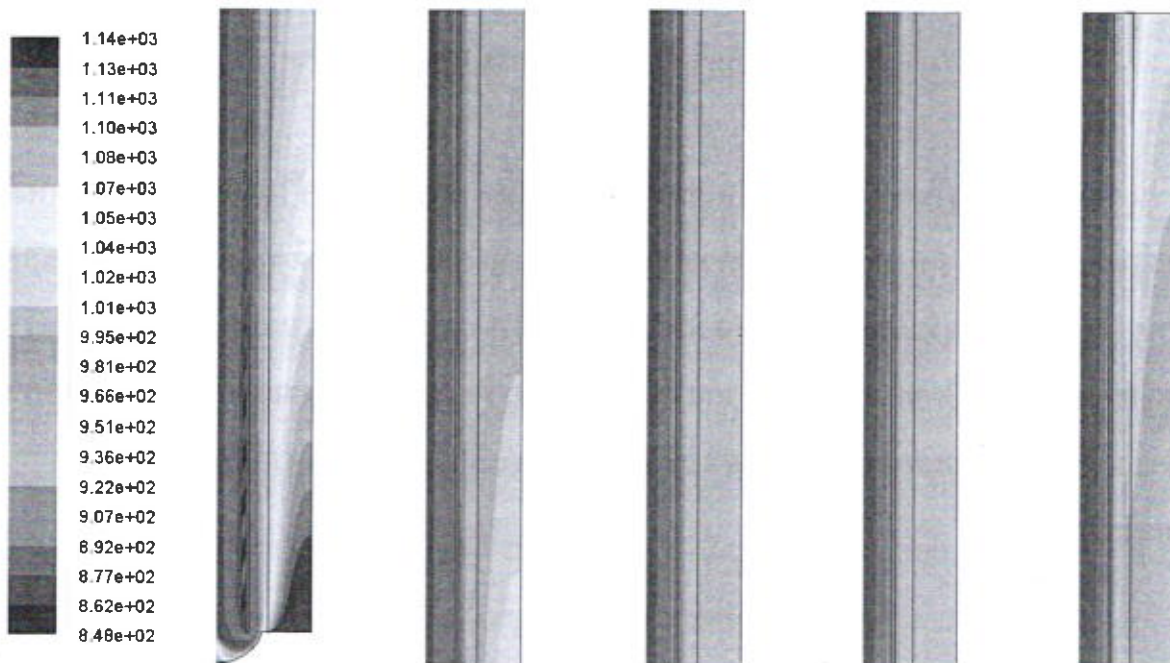


รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ Hagiwara et al. [1] กับผลของการคำนวณเชิงตัวเลขของงานวิจัยนี้

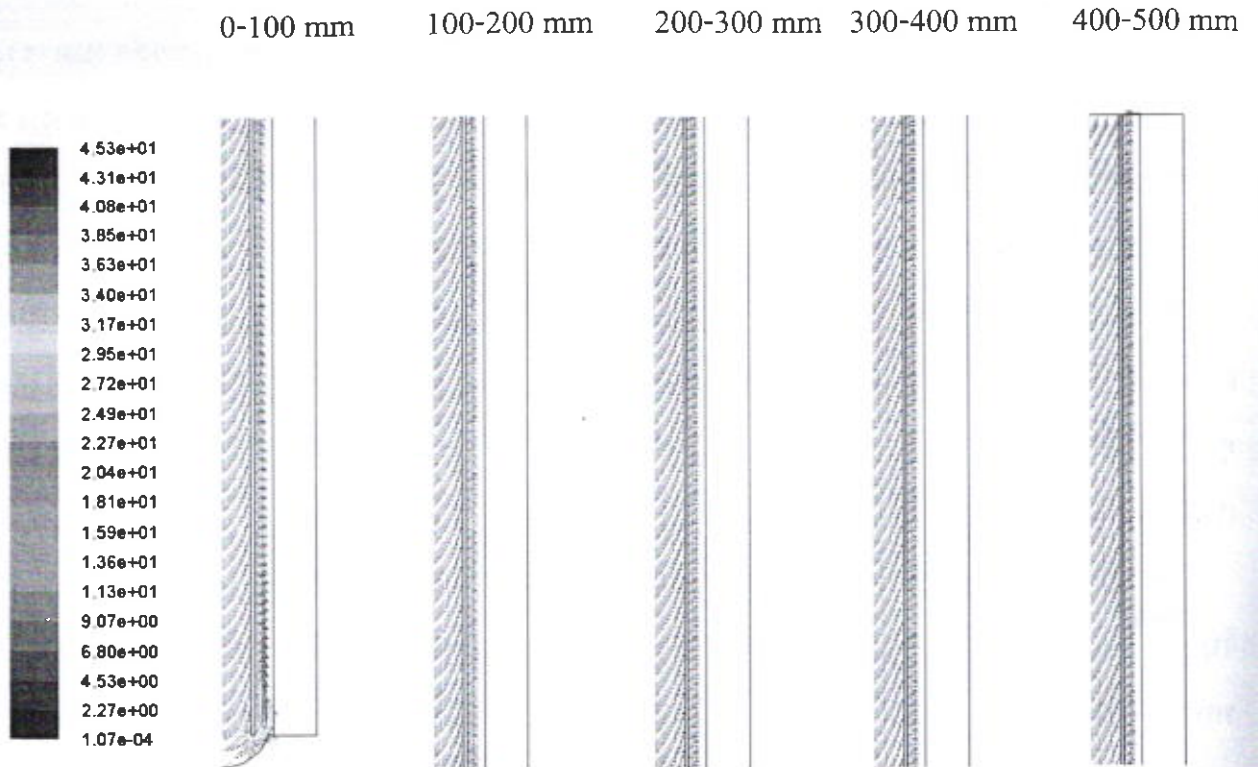
ตัวอย่างผลการคำนวณที่ 0.7 โวลต์ ที่สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์ตามตารางที่ 2 และ 3 โดยแสดงผลของอุณหภูมิ ความเร็วภายในช่องทางการไหลของอากาศและเชื้อเพลิง รวมถึงสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนและน้ำภายในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง ซึ่งผลของอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1143 เคลวิน ที่ทางเข้าของเชื้อเพลิง โดยอุณหภูมิของอากาศในแอร์พริชที่ดังทูบมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเข้าสู่ช่องทางการไหลของอากาศเนื่องจากอุณหภูมิที่ปลายปิดของท่อมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ทางเข้าของอากาศ และอุณหภูมิของอากาศในช่องทางการไหลของอากาศพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับอุณหภูมิของเชื้อเพลิงในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง พบว่า อุณหภูมิของเชื้อเพลิง ในช่วง 0 ถึง 300 มิลลิเมตร มีค่าลดลงเรื่อยๆ หลังจากนั้นอุณหภูมิของเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้นเนื่องจาก พลังงานความร้อนที่ได้รับจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง

0-100 mm 100-200 mm 200-300 mm 300-400 mm 400-500 mm



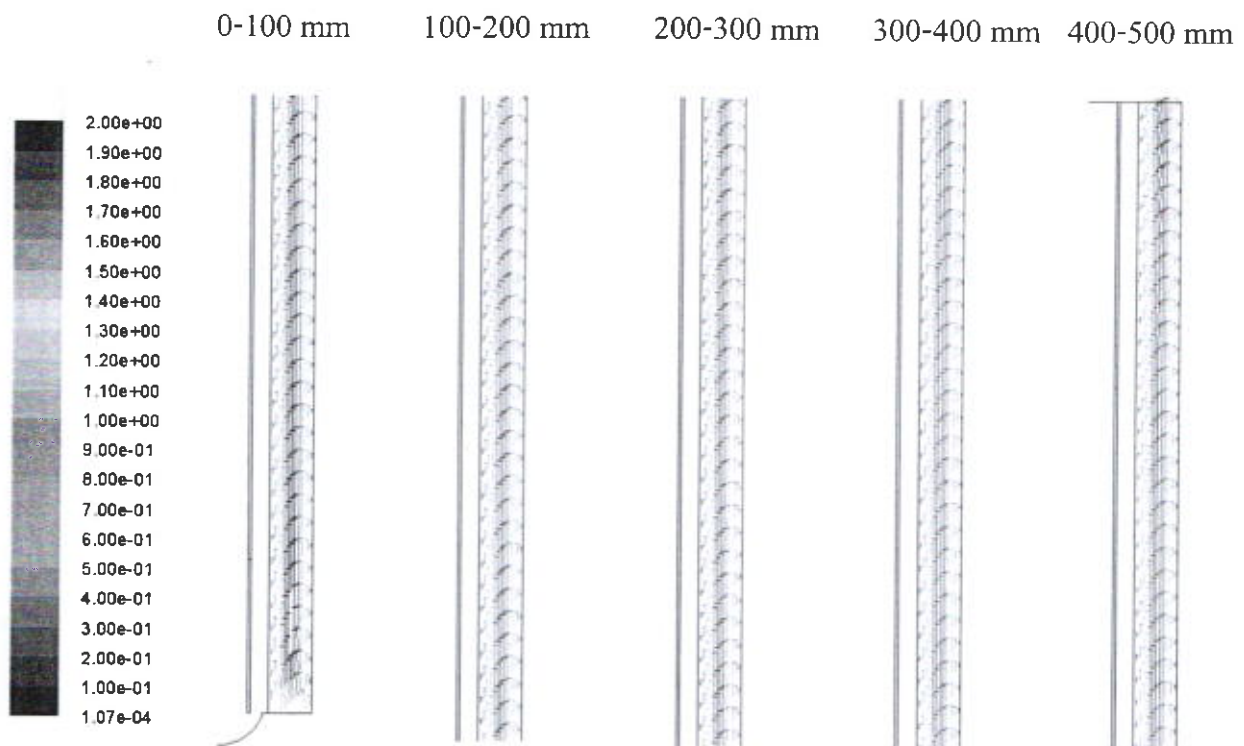
รูปที่ 4 อุณหภูมิ



รูปที่ 5 ความเร็วในช่องทางการไหลของอากาศ

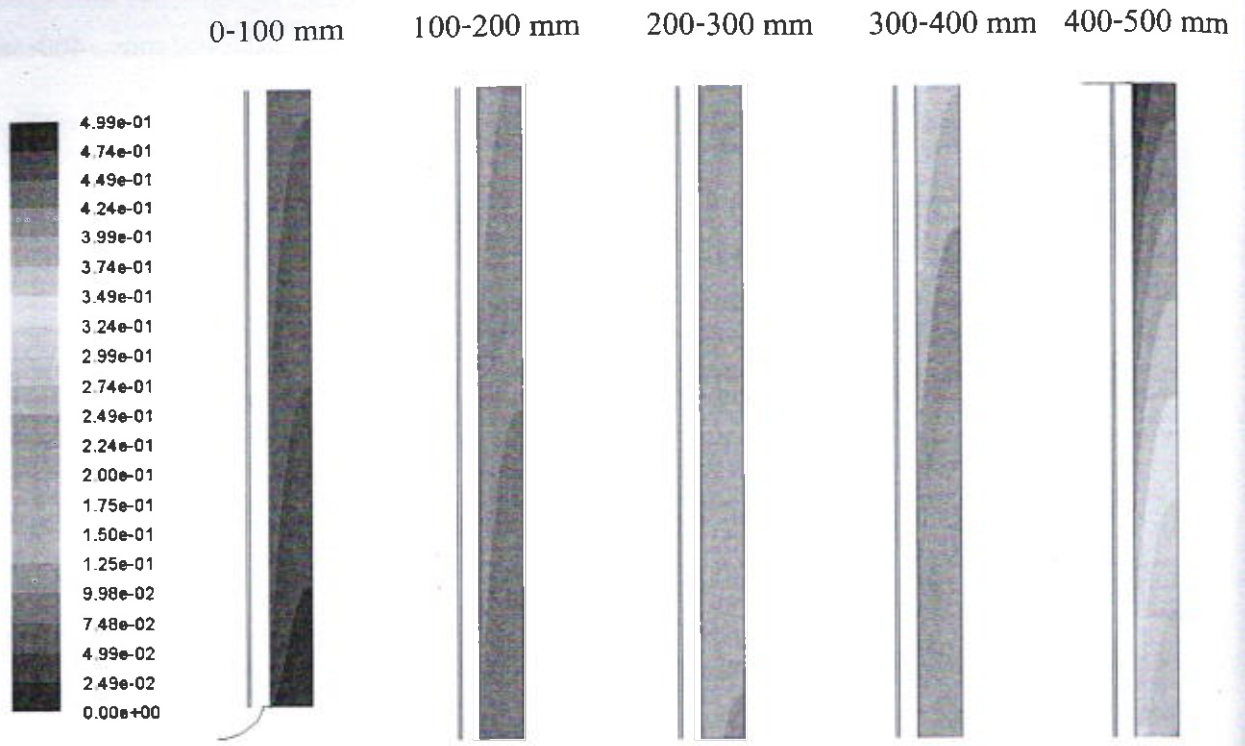
ความเร็วภายในช่องทางการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงโดยใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ โดยความเร็วของอากาศในแอร์พริสที่ติดตั้งทูปมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะของท่อ แล้วมีค่าลดลงเมื่ออากาศไหลออกจากแอร์พริสที่ติดตั้งทูปเข้าสู่ปลายปิดของท่อ เพราะว่าขนาดที่ใหญ่กว่าของปลายปิดของท่อ หลังจากอากาศไหลเข้าสู่ช่องทางการไหลของอากาศ พบว่า ความเร็วของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตลอดระยะของเซลล์เนื่องจากอุณหภูมิในบริเวณนี้เปลี่ยนแปลงไม่มาก

ฟ
เ
ที่
เก
ข
ช

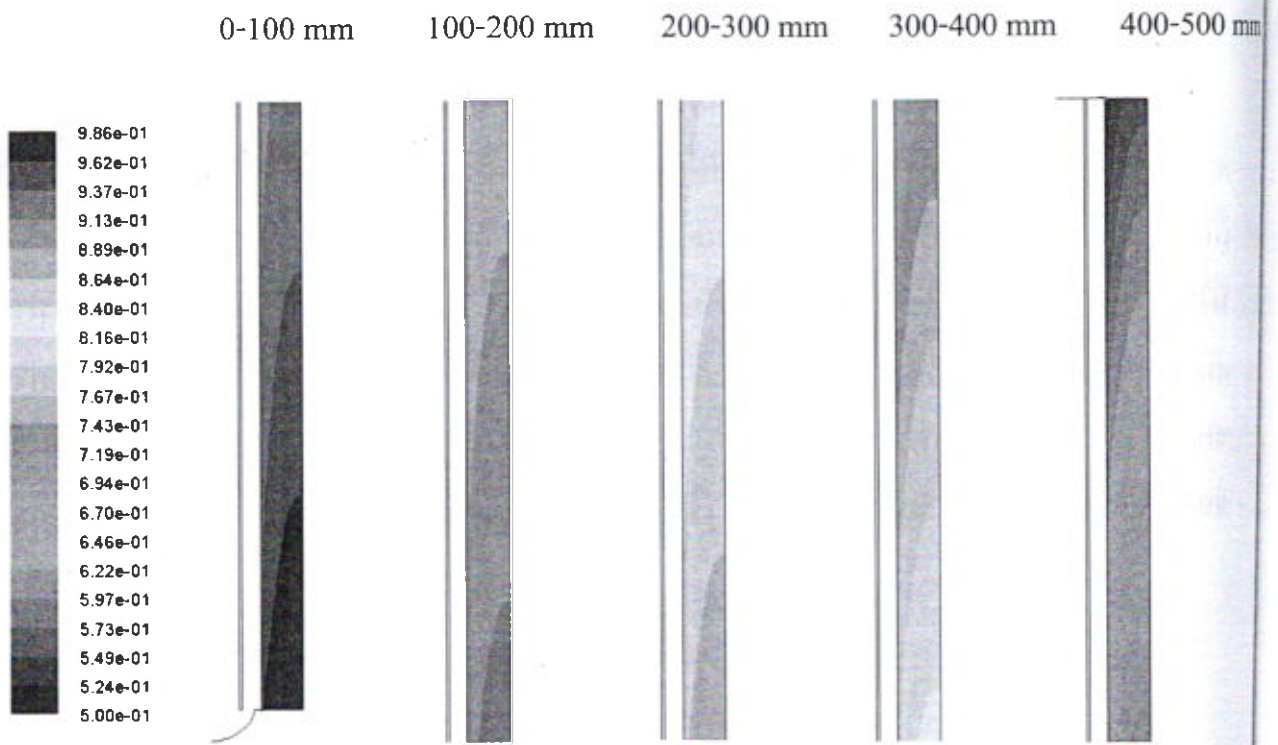


รูปที่ 6 ความเร็วในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง

สำหรับความเร็วของเชื้อเพลิงภายในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง พบว่า มีค่าลดลงตลอดความยาวของเซลล์ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปริมาณของไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เปลี่ยนรูปไปเป็นน้ำภายในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง ถึงแม้ว่าอัตราเชิงโมลของปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้จะมีค่าเท่ากับอัตราเชิงโมลของปริมาณการเกิดของน้ำ แต่สำหรับอัตราเชิงมวลของปริมาณการเกิดของน้ำมีค่ามากกว่าอัตราเชิงมวลของปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้ถึง 9 เท่า จากเหตุผลดังกล่าว ความเร็วของเชื้อเพลิงมีค่าลดลงเพราะว่ามวลที่เพิ่มขึ้นของน้ำ ซึ่งสัดส่วนโดยมวลของน้ำและไฮโดรเจนในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิงได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 7 สัดส่วนโดยมวลของน้ำในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง



รูปที่ 8 สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง

1
2
3
4
5
6
[1]
[2]
[3]
[4]
[5]

4. สรุปผลการจำลอง

การตรวจสอบผลการจำลองโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่า ในช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่า 0.18 ถึง 0.26 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองสูงกว่าช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่า 0.26 ถึง 0.47 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในช่วงนี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง โดยค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 7.27 เปอร์เซ็นต์ ทำให้แบบจำลองในงานวิจัยนี้ รวมถึงโปรแกรมที่ใช้พื้นฐานของวิธี Finite Volume สามารถนำมาเป็นเครื่องมือในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลและนำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งสำหรับงานวิจัยนี้ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ และศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้การสนับสนุนโปรแกรมในการจำลองการไหล นอกจากนี้ขอขอบคุณ ดร.รพีพงศ์ สุวรรณวารังกุล สำหรับคำปรึกษาและข้อมูลจากการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hagiwara, A., Michibata, H., Kimura, A., Jaszcar, M.P., Tomlins, G.W. and Veyo, S.E., in *Proceedings of the Third International Fuel Cell Conference*, D2-4, 369, 1999.
- [2] Suwanwarangkul, R., "Model development and validation of solid oxide fuel cells using H₂-H₂O-CO-CO₂ mixtures: from button cell experiments to tubular and planar cells," *A thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Chemical Engineering*, University of Waterloo, Canada, 2005.
- [3] Aguiar, P., Adjiman, C. S. and Brandon, N. P., "Anode-supported intermediate temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I: model-based steady-state performance," *Journal of Power Sources*, vol. 138, pp. 120-136, 2004.
- [4] Autissier, N., Larrain, D., Van Herle, J. and Favrat, D., "CFD simulation tool for solid oxide fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 131, pp. 313-319, 2004.
- [5] Campanari, S. and Iora, P., "Definition and sensitivity analysis of a finite volume SOFC model for a tubular cell geometry," *Journal of Power Sources*, vol. 132, pp. 113-126, 2004.

- [6] Jiang, W., Fang, R., Khan, J. A. and Dougal, R. A., "Parameter setting and analysis of a dynamic tubular SOFC model," *Journal of Power Sources*, vol. 162, pp. 316-326, 2006.
- [7] Lockett, M., Simmons, M. J. H. and Kendell, K., "CFD to predict temperature profile for scale up of micro-tubular SOFC stacks," *Journal of Power Sources*, vol. 131, pp. 243-246, 2004.
- [8] Mallon, C. and Kendall, K., "Sensitivity of nickel cermet anodes to reduction conditions," *Journal of Power Sources*, vol 145, pp. 154-160, 2005.
- [9] Ramakrishna, P. A., Yang, S. and Sohn, C. H., "Innovative design to improve the power density of a solid oxide fuel cell," *Journal of Power Sources*, vol. 158, pp. 378-384, 2005.
- [10] Saunders, G. J. and Kendall, K., "Reactions of hydrocarbons in small tubular SOFCs," *Journal of Power Sources*, vol. 106, pp. 258-263, 2002.
- [11] Suwanwaranggul, R., Croiset, E., Entchev, E., Charojrochkul, S., Pritzker, M. D., Fowler, M. W., Douglas, P. L., Chewathanakup, S. and Mahaudom, H., "Experimental and modeling study of solid oxide fuel cell operating with syngas fuel," *Journal of Power Sources*, vol. 161, pp. 308-322, 2006.
- [12] Suzuki, T., Awano, M., Jasinski, P., Petrosky, V. and Anderson, H. U., "Composite (La, Sr) MnO₃ -YSZ cathode for SOFC. Solid," *State Ionics*, vol 177, pp. 2071-2074, 2006.
- [13] Wang, J., Lu, Z., Huang, X., Chen, K., Ai, N., Hu, J. and Su, W., "YSZ films fabricated by a spin smoothing technique and its application in solid oxide fuel cell," *Journal of Power Sources*, vol 163, pp. 957-959, 2007.
- [14] Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., "An introduction to computational fluid dynamics," 1995.
- [15] ชาลูนรงค์ วันทา, "การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์," *ปริญญานิพนธ์ (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 2548.
- [16] วรรัชช วัฒนนะ, "การศึกษากาโรไลนในชั้นวางเซลล์และชุดกระจายการไหลสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง," *วิทยานิพนธ์(วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*, 2547.