

การศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในการออกแบบ
เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

ปริญญานิพนธ์
ของ
กรกฎ รัตนกรกาญจน์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

เมษายน 2551

การศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในการออกแบบ
เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

ปริญญานิพนธ์
ของ
กรกฎ รัตนกรกาญจน์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

เมษายน 2551

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในการออกแบบ
เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

บทคัดย่อ
ของ
กรกฎ รัตนกรกาญจน์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
เมษายน 2551

กรกฎ รัตนกรกาญจน์. (2551). การศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง. ปรินซ์นิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์, พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง

งานวิจัยในปรินซ์นิพนธ์นี้ มุ่งเน้นศึกษาถึงความเป็นไปได้สำหรับการใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง รวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลเชิงมวล ความยาวของเซลล์เชื้อเพลิง และเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เชื้อเพลิง แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งเป็นเทคนิคที่นำมาช่วยในการจำลองลักษณะการไหล ดังนั้นก่อนการออกแบบหรือศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ จำเป็นต้องตรวจสอบผลการคำนวณกับผลการทดลองจริง โดยพบว่า ค่าความแตกต่างของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 7.27 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในทางวิศวกรรมนี้ถือว่าเป็นที่ยอมรับได้

สำหรับผลการคำนวณที่ได้จากการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้ ผลจากการคำนวณโดยการศึกษถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า, ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้าที่ได้ และมีประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง สำหรับกรณีที่ศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศนั้น พบว่า เมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า, ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นทำให้มีไฮโดรเจนที่เข้าไปทำปฏิกิริยามากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง สำหรับกรณีที่ศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวของเซลล์และเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ เมื่อมีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์เท่ากัน พบว่า เซลล์ที่มีความยาวมากขึ้น และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์น้อยลง ให้ค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์สูงที่สุด เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์ และลดระยะในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน

FEASIBILITY STUDY FOR THE USE OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN
SOLID OXIDE FUEL CELL DESIGN

AN ABSTRACT

BY

KORAKOT RATTANAKORNKAN

Presented in partial fulfillment of the requirements for the
Master of Engineering degree in Chemical Engineering
at Srinakharinwirot University

April 2008

Korakot Rattanakornkan. (2008). *Feasibility Study for The Use of Computational Fluid Dynamics in Solid Oxide Fuel Cell Design*. Master Thesis, M.Eng. (Chemical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst. Prof. Dr. Wanwilai Kraipech Evans, Lt. Col. Asst. Prof. Dr. Anotai Suksangpanomrung.

The simulations of the tubular solid oxide fuel cells (SOFC) were investigated in this work using FLUENT, CFD commercial package. The current density, power density, temperature profile and thermal efficiency were calculated. The I-V curve obtained from the simulations was compared with the results from the experiment. It was found that the difference between both results is 7.27% in average.

The effects of the gas inlet temperature, the gas inlet flow rate and the dimension of the cell on the cell performance, for the SOFC studied in this work, were investigated. It can be seen that an increase in the gas temperature does not improve the cell performance. An increase in the gas flow rate leads to increase the cell current density and power density but decrease the cell thermal efficiency. The dimension of the cell in terms of the size of cell diameter and length also have significantly influence on the cell performance. The cell performance of two types of SOFC cell with the same reaction area but difference in the size of diameter and length were compared, and it was found that the cell type which has smaller diameter but longer length gives better performance.

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในการออกแบบ
เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

ของ

กรกฎ รัตนกรกาญจน์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญศิริ จีระเดชากุล)

วันที่ เดือน พ.ศ. 2551

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน

.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์)

(อาจารย์ ดร. อุดมชัย จินะดิษฐ์)

.....กรรมการ

.....กรรมการ

(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง) (อาจารย์ ดร. รพีพงศ์ สุวรรณวรานกุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์)

.

.....กรรมการ

(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรรณวิไล ไกรเพ็ชร เควานส์ ประธานกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ และ พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ให้แนวคิดในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับปริญญานิพนธ์ ตลอดจนช่วยตรวจแก้ปริญญานิพนธ์จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. อุดมชัย จินะดิษฐ์ ประธานกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะในการวิเคราะห์และอภิปรายผลจากงานวิจัยในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ และ อาจารย์ ดร. รพีพงศ์ สุวรรณวรานกูร กรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ สำหรับคำปรึกษาและข้อมูลจากการทดลอง

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้การสนับสนุนโปรแกรมในการจำลองการไหล รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้การอุปการะเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน ให้ความรู้จนมีโอกาสดำเนินการโครงงานฉบับนี้ และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

กรกฎ รัตนกรกาญจน์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ผลงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทนำ.....	4
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	20
3 การกำหนดปัญหาและการตรวจสอบผลการคำนวณ.....	30
วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.....	30
การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
การกำหนดสมการและเงื่อนไขขอบเขตที่มีผลต่อการคำนวณ.....	33
การตรวจสอบผลการคำนวณกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา.....	37
สรุปผลท้ายบท.....	44
4 การศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง.....	46
การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย.....	46
ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์.....	48
สรุปผลท้ายบท.....	86

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะจากงานวิจัย.....	89
สรุปผลงานวิจัย.....	89
ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย.....	89
บรรณานุกรม.....	91
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	95
ภาคผนวก ข ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้พลังงานของ	
เชื้อเพลิงและอากาศ.....	118
ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	133
ภาคผนวก ง คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย.....	150
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	154

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	คุณลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบต่างๆ.....	5
2	ตารางค่าขอบเขตเงื่อนไข.....	36
3	ขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่ทดลองโดยฮากิวาระ มิชิบาตะ คิมูระ จ้าซคาร์ ทอมลินส์ และ เวโย.....	38
4	สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่ทดลอง โดยฮากิวาระ มิชิบาตะ คิมูระ จ้าซคาร์ ทอมลินส์ และ เวโย.....	38
5	ขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ.....	48
6	สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ.....	49
7	ตารางสรุปกรณีที่ทำการศึกษา.....	50
8	สรุปผลการคำนวณสำหรับทุกกรณีศึกษา.....	69
9	สรุปผลการคำนวณกรณีที่คำนึงถึงพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิง.....	83
10	สรุปผลการคำนวณสำหรับทุกกรณีศึกษา.....	88
11	รูปสมการส่งถ่ายสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน.....	106

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
1	การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	6
2	เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ.....	9
3	เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทแผ่น.....	9
4	เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทโมโนลิทิก.....	10
5	เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทเซกเมนต์เซลล์อินซีรัส.....	10
6	กราฟความสามารถของเซลล์ (Performance curve) แสดงค่าที่เกิดจาก ค่าความต่างศักย์เกินตัวทั้ง 3 ประเภท.....	24
7	รูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ (ก) ทิศทางการไหลของก๊าซ (ข) พื้นที่ภาคตัดขวางของเซลล์.....	32
8	รูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อตามแบบจำลอง.....	53
9	กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแส ไฟฟ้าระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองของฮากิواره มิชิบาตะ คิมูระ จัสซาคาร์ ทอมลินส์ และ เวโย กับผลของการคำนวณเชิงตัวเลข ของงานวิจัยนี้.....	39
10	ภาพแสดงรายละเอียดของตัวอย่างผลการคำนวณ โดยที่ A คือ ระยะ 0-100 มิลลิเมตร, B คือ ระยะ 100-200 มิลลิเมตร, C คือ ระยะ 200-300 มิลลิเมตร, D คือ ระยะ 300-400 มิลลิเมตร และ E คือ ระยะ 400-500 มิลลิเมตร.....	40
11	อุณหภูมิภายในเซลล์ (เคลวิน).....	41
12	ความเร็วในช่องทางการไหลของอากาศ (เมตรต่อวินาที).....	42
13	ความเร็วในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง (เมตรต่อวินาที).....	43
14	สัดส่วนโดยมวลของน้ำในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง.....	43
15	สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง.....	44
16	รูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ (ก) ทิศทางการไหลของก๊าซ (ข) พื้นที่ภาคตัดขวางของเซลล์.....	47

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

17	กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ.....	53
18	กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ.....	54
19	กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 1 ถึง 3 ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ.....	54
20	กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ในกรณีศึกษาที่ 1 ถึง 3 ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ.....	55
21	ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน.....	55
22	ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน.....	56
23	ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน.....	57
24	ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน.....	57

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- | | | |
|----|--|----|
| 25 | <p>กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ.....</p> | 58 |
| 26 | <p>กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ.....</p> | 59 |
| 27 | <p>ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน.....</p> | 60 |
| 28 | <p>ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน.....</p> | 61 |
| 29 | <p>ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน.....</p> | 61 |
| 30 | <p>ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน.....</p> | 62 |
| 31 | <p>กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ.....</p> | 63 |

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- | | | |
|----|--|----|
| 32 | <p>กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ.....</p> | 63 |
| 33 | <p>ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน.....</p> | 64 |
| 34 | <p>ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน.....</p> | 64 |
| 35 | <p>ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน.....</p> | 65 |
| 36 | <p>ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน.....</p> | 65 |
| 37 | <p>กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....</p> | 67 |
| 38 | <p>กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....</p> | 67 |

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

39	กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอุณหภูมิ ขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ.....	68
40	กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ที่อัตราการไหลเชิงมวลของ เชื้อเพลิงและอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ.....	68
41	ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิง และอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที.....	69
42	ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อุณหภูมิ ขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวล ของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที.....	70
43	ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ เท่ากับ 873 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที.....	70
44	ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิง และอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที.....	71
45	กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของ กระแสไฟฟ้า ที่ความยาวของเซลล์ต่างๆ.....	72
46	กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของ กระแสไฟฟ้า ที่ความยาวของเซลล์ต่างๆ.....	73
47	กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้ากับพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ที่ความยาวของเซลล์เพิ่มขึ้น จาก 80.0 ถึง 200.0 มิลลิเมตร.....	73

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

48	กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์กับพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ที่ความยาวของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 80.0 ถึง 200.0 มิลลิเมตร.....	74
49	ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่ความยาวของเซลล์ (ก) 80.0 มิลลิเมตร (ข) 100.0 มิลลิเมตร (ค) 130.0 มิลลิเมตร (ง) 150.0 มิลลิเมตร (จ) 180.0 มิลลิเมตร และ (ฉ) 200.0 มิลลิเมตร.....	75
50	ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่ความยาวของเซลล์ (ก) 80.0 มิลลิเมตร (ข) 100.0 มิลลิเมตร (ค) 130.0 มิลลิเมตร (ง) 150.0 มิลลิเมตร (จ) 180.0 มิลลิเมตร และ (ฉ) 200.0 มิลลิเมตร.....	75
51	ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่ความยาวของเซลล์ (ก) 80.0 มิลลิเมตร (ข) 100.0 มิลลิเมตร (ค) 130.0 มิลลิเมตร (ง) 150.0 มิลลิเมตร (จ) 180.0 มิลลิเมตร และ (ฉ) 200.0 มิลลิเมตร.....	76
52	ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่ความยาวของเซลล์ (ก) 80.0 มิลลิเมตร (ข) 100.0 มิลลิเมตร (ค) 130.0 มิลลิเมตร (ง) 150.0 มิลลิเมตร (จ) 180.0 มิลลิเมตร และ (ฉ) 200.0 มิลลิเมตร.....	76
53	กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่น ของกระแสไฟฟ้า ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ต่างๆ.....	78
54	กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่น ของกระแสไฟฟ้า ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ต่างๆ.....	78
55	กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้ากับพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง ของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 4.0 ถึง 16.0 มิลลิเมตร.....	79
56	กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์กับพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 4.0 ถึง 16.0 มิลลิเมตร.....	79
57	ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ (ก) 4.0 มิลลิเมตร (ข) 6.0 มิลลิเมตร (ค) 8.0 มิลลิเมตร (ง) 12.0 มิลลิเมตร และ (จ) 16.0 มิลลิเมตร.....	80

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

58	ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ (ก) 4.0 มิลลิเมตร (ข) 6.0 มิลลิเมตร (ค) 8.0 มิลลิเมตร (ง) 12.0 มิลลิเมตร และ (จ) 16.0 มิลลิเมตร.....	81
59	ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ (ก) 4.0 มิลลิเมตร (ข) 6.0 มิลลิเมตร (ค) 8.0 มิลลิเมตร (ง) 12.0 มิลลิเมตร และ (จ) 16.0 มิลลิเมตร.....	81
60	ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ (ก) 4.0 มิลลิเมตร (ข) 6.0 มิลลิเมตร (ค) 8.0 มิลลิเมตร (ง) 12.0 มิลลิเมตร และ (จ) 16.0 มิลลิเมตร.....	82
61	รูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำการศึกษา (ก) เซลล์เชื้อเพลิงที่ทำการลดและเพิ่ม ความยาวของเซลล์ (ข) เซลล์เชื้อเพลิงที่ทำการลดและเพิ่ม เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์.....	84
62	กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้ากับพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ที่ความยาวเพิ่มขึ้น จาก 80.0 ถึง 200.0 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เพิ่มขึ้น จาก 4.0 ถึง 16.0 มิลลิเมตร.....	85
63	กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์กับพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ที่ความยาวเพิ่มขึ้นจาก 80.0 ถึง 200.0 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง ของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 4.0 ถึง 16.0 มิลลิเมตร.....	85
64	ปริมาตรควบคุมสำหรับปัญหาสองมิติ.....	107
65	พลั๊กซ์การพาและพลั๊กซ์การแพร่บนผิวของปริมาตรควบคุม.....	111
66	การจัดวางตัวแปรแบบ Staggered grid $\rightarrow u \uparrow = v, o =$ ตัวแปรอื่นๆ.....	113
67	กระบวนการหาคำตอบของวิธีซิมเพล็กซ์.....	117
68	กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของ กระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 973 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	120

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

69	กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 973 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	120
70	ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 973 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที.....	121
71	ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 973 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที.....	122
72	ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 973 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที.....	122
73	ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 973 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที.....	123
74	กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1073 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	124
75	กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1073 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	125

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- | | | |
|----|---|-----|
| 76 | <p>ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิง และอากาศเท่ากับ 1073 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที.....</p> | 126 |
| 77 | <p>ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1073 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที.....</p> | 126 |
| 78 | <p>ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิง และอากาศเท่ากับ 1073 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที.....</p> | 127 |
| 79 | <p>ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1073 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที.....</p> | 127 |
| 80 | <p>กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1173 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....</p> | 129 |
| 81 | <p>กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1173 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ.....</p> | 129 |
| 82 | <p>ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิง และอากาศเท่ากับ 1173 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที.....</p> | 130 |

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- 83 ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)
ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1173 เคลวิน ที่อัตราการไหล
เชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7}
กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที..... 131
- 84 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ
เท่ากับ 1173 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7}
กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ
(ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที..... 131
- 85 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิง
และอากาศเท่ากับ 1173 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง
(ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที
และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที..... 132

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวิกฤตการณ์เกี่ยวกับพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การพัฒนาเพื่อหาแหล่งพลังงานทดแทนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก โดยเป็นที่ทราบกันดีว่า เมื่อเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้จะเกิดพลังงานความร้อนขึ้นซึ่งสามารถแปรเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า พลังงานในรูปของการขับเคลื่อนเครื่องยนต์ เครื่องจักร หรือในรูปของการทำงานแบบอื่นๆ อีกมากมาย แหล่งเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นพลังงานหลัก ได้แก่ ถ่านหิน ปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากฟอสซิลที่สะสมทับถมกันตามธรรมชาติหลายล้านปี ถ้ามีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลอย่างไม่ระมัดระวังในไม่ช้าแหล่งพลังงานนี้อาจหมดไป นอกจากนี้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ทำให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมาตรฐานคุณภาพชีวิตของมนุษย์รวมถึงสิ่งมีชีวิตบนโลก โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับการยอมรับและเป็นที่น่าสนใจในการพัฒนาเพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทน ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นภายในแล้ว จะให้พลังงานไฟฟ้าออกมาอย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นทางเลือกของแหล่งพลังงานใหม่ที่ยังมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในยุโรป อเมริกา และญี่ปุ่น พลังงานที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงเกิดจากการเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ มีเทน เมทานอล โดยขบวนการทางเคมีไฟฟ้าไปเป็นพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้แล้วการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงยังให้ผลดีในแง่ที่ไม่เกิดการเผาไหม้ทำให้ปราศจากมลภาวะ จากข้อดีที่กล่าวถึงนี้ทำให้นักวิจัยพยายามที่จะพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]

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

เซลล์เชื้อเพลิงที่จะใช้นั้นต้องผ่านการออกแบบ การตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพจากการทดลอง เพื่อที่จะได้ประสิทธิภาพและกระแสไฟฟ้าตามที่ต้องการ แต่เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นมีราคาสูงและจะเป็นการสิ้นเปลืองอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคการคำนวณทาง

พลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งเป็นเทคนิคที่นำมาช่วยในการจำลองลักษณะการไหล เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการสิ้นเปลืองดังกล่าว โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อต้องการศึกษาถึงความเป็นไปได้สำหรับการใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง รวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นได้ และผลจากการจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการปฏิบัติงานจริงได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการจำลองการไหลภายในเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อโดยใช้เทคนิค CFD

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยวิธีการจำลองทาง CFD กับข้อมูลจากการทดลอง

1.2.3 เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ออกแบบการจำลอง

1.3.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ

1.3.3 จำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม FLUENT 6.2.16

1.3.4 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษา คือ ไฮโดรเจนขึ้น (ไฮโดรเจน 97 เปอร์เซ็นต์ และ น้ำ 3 เปอร์เซ็นต์)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยจะทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.4.1 ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

1.4.2 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม FLUENT 6.2.16 และออกแบบการจำลอง

1.4.3 ทำการจำลองการไหลเพื่อศึกษาลักษณะการไหล การกระจายตัวของอุณหภูมิและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ

1.4.4 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์และแสดงผล

1.4.5 สรุปผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1.4.6 จัดทำรูปเล่มโครงงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงพลศาสตร์การไหลของของไหลภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ

1.5.2 เป็นองค์ความรู้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในวิจัยและพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ผลงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

หัวข้อ 2.1 บทนำ

หัวข้อ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อ 2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้ดี ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นได้มีค่าสูงนั้นต้องอาศัยปัจจัยต่างๆ เช่น คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างเซลล์เชื้อเพลิง (อิเล็กโทรด และอิเล็กโทรไลต์) ช่องทางการไหลชั้นวางเซลล์ รวมถึงอัตราการไหล ความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศ เป็นต้น ดังนั้นการออกแบบในแต่ละส่วนจึงต้องมีความรู้และความเข้าใจในการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงโดยรวม เพื่อที่จะสามารถนำแต่ละส่วนมาประกอบกันโดยที่การทำงานของระบบโดยรวมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงการทำงานโดยภาพรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง จากนั้นจึงจะกล่าวถึงงานวิจัยซึ่งเป็นที่มาและมีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นถึงพฤติกรรมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและอากาศภายในเซลล์เชื้อเพลิงและช่องทางการไหล ซึ่งเป็นหัวใจหลักของการทำงานภายในเซลล์เชื้อเพลิง

2.1.1 ประวัติและความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิง

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะคล้ายกับการทำงานของแบตเตอรี่มาก ต่างกันเพียงแต่เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถเก็บพลังงานไว้ได้เหมือนแบตเตอรี่ ชาร์จไม่ได้ แต่เซลล์เชื้อเพลิงจะให้พลังงานไฟฟ้าออกมาเรื่อยๆ เมื่อมีการให้เชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์ในเซลล์อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้แล้วการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง ยังให้ผลดีในแง่ที่ไม่เกิดการเผาไหม้ทำให้ปราศจากมลภาวะรวมถึงไม่มีเสียงดังรบกวนเกิดขึ้น จากข้อดีที่กล่าวถึงนี้ทำให้นักวิจัยพยายามที่จะพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน โดยเริ่มแรกจะเป็นพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้กับยานอวกาศ องค์การนาซาต้องจ่ายเงินถึงสิบล้านดอลลาร์เพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าในการส่งยานอพอลโลไปยังดวงจันทร์เมื่อปี ค.ศ.1960 เซลล์เชื้อเพลิงนี้จะใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงและทำ

หน้าที่เป็นตัวรีดิวส์ (Reducing agent) และใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidising agent) ซึ่งนอกจากจะได้พลังงานไฟฟ้าจากปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง และยังมีน้ำเกิดขึ้นเป็นผลพลอยได้ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงจนสามารถใช้เป็นน้ำดื่มในยานอวกาศได้ [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]

2.1.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง

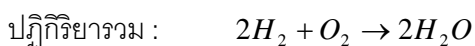
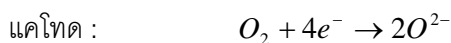
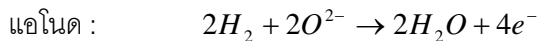
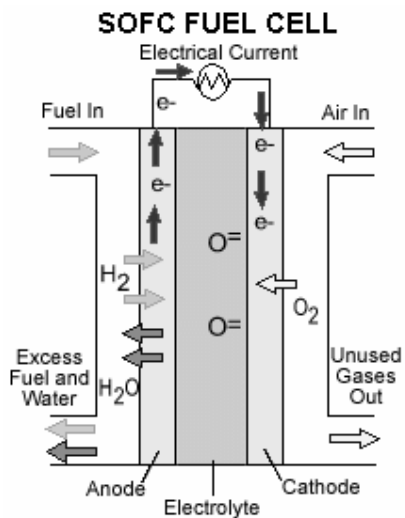
การแบ่งชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถแบ่งได้โดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่เซลล์ทำงาน รวมถึงชนิดและธรรมชาติของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ทำให้มีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้ในงานที่แตกต่างกันหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทก็มีการใช้สารเคมีที่ต่างกัน ดังสรุปในตาราง 1

ตาราง 1 คุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงแบบต่างๆ

ประเภทของ เซลล์เชื้อเพลิง	อิเล็กโทรไลต์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เชื้อเพลิง
เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน (PEMFC)	เมมเบรนพอลิเมอร์ที่ สามารถนำไฮดรอกไซด์ได้	50-80	ไฮโดรเจน
เซลล์เชื้อเพลิงแบบที่ใช้ เมทานอลเป็นเชื้อเพลิง โดยตรง (DMFC)	พอลิเมอร์	50-100	เมทานอลเหลว
เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (AFC)	(KOH)	50-250	ไฮโดรเจน
เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรด ฟอสฟอริก (PAFC)	กรดฟอสฟอริก	160-220	ไฮโดรเจน
เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือ คาร์บอเนตหลอมเหลว (MCFC)	เกลือคาร์บอเนตที่ หลอมเหลว เช่น ไนเตรต ซัลเฟต และคาร์บอเนต	630-650	ไฮโดรเจน โพรเพน และ ก๊าซธรรมชาติ
เซลล์เชื้อเพลิงแบบ ออกไซด์แข็ง (SOFC)	เซอรโคเนียมออกไซด์ที่ เติมยิเทียม	600-1000	ไฮโดรเจน โพรเพน และ ก๊าซธรรมชาติ

2.1.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)

เซลล์เชื้อเพลิงคือหน่วยที่แปลงพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงและออกซิแดนท์ (Oxidant) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงจากกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยไม่เกิดการเผาไหม้แต่อย่างใด รวมทั้งสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องเท่าที่ยังป้อนเชื้อเพลิงและออกซิแดนท์ให้แก่ระบบ เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดด้วยกัน แตกต่างกันตามชนิดของวัสดุอิเล็กโทรไลต์ที่เลือกใช้ รวมถึงอุณหภูมิการทำงาน เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ทำงานที่อุณหภูมิสูง ประมาณ 600 ถึง 1000 องศาเซลเซียส โดยที่ส่วนประกอบทั้งหมดของเซลล์เป็นของแข็ง ทำให้ลดปัญหาเกี่ยวกับการกัดกร่อนเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ที่มีส่วนประกอบเป็นของเหลว นอกจากนี้การที่มีอุณหภูมิการทำงานสูงทำให้เกิดข้อดีหลายประการด้วยกัน ได้แก่ สามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายขึ้นเนื่องจากสามารถป้อนเชื้อเพลิงที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน หรือ แอลกอฮอล์ เข้าไปทำปฏิกิริยาในเซลล์ได้โดยตรง (Internal reforming) หรืออาจทำให้ไฮโดรเจน แตกตัวก่อนป้อนเข้าไปทำปฏิกิริยา (External reforming) นอกจากนี้ยังไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง เช่น แพลตินั่ม ข้อดีอีกประการที่สำคัญคือความร้อนและน้ำที่ได้จากการทำปฏิกิริยาซึ่งอยู่ในสถานะของไอน้ำสามารถนำไปปั่นกังหันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีก ทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงมากขึ้น [วรรณชล, 2547]



ภาพประกอบ 1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [https://en.wikipedia.org/wiki/Solid-oxide_fuel_cell]

ภาพประกอบ 1 เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยการป้อนเชื้อเพลิงซึ่งโดยปกติคือไฮโดรเจนเข้าไปสัมผัสกับบริเวณที่เป็นแอโนดซึ่งไฮโดรเจนจะแพร่ผ่านรูพรุนของแอโนดไปยังบริเวณที่แอโนดสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์เกิดเป็นสภาวะ 3 สถานะ (Three phase boundaries, TPB : ก๊าซอิเล็กโทรด และอิเล็กโทรไลต์) ที่อุณหภูมิการทำงานไฮโดรเจนจะรวมตัวกับออกซิเจนไอออนซึ่งวิ่งผ่านชั้นอิเล็กโทรไลต์มาจากขั้วแคโทดได้ น้ำ ความร้อนและอิเล็กตรอน แต่อิเล็กโทรไลต์นั้นมีคุณสมบัติไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงวิ่งไปยังขั้วแคโทดโดยผ่านทางวงจรภายนอก (External circuit) สำหรับด้านแคโทดที่ได้รับออกซิเจนซึ่งได้แก่ออกซิเจนจากอากาศจะแพร่ผ่านรูพรุนของขั้วแคโทดไปยังบริเวณที่แคโทดสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์เกิดสภาวะ 3 สถานะ ที่อุณหภูมิการทำงานออกซิเจนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนได้ออกซิเจนไอออน ซึ่งจะวิ่งผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแอโนดโดยกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องตราบเท่าที่มีออกซิเจนและเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน) สำหรับไฟฟ้าที่นำไปใช้งานได้อิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านวงจรภายนอกซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นสิ่งที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า ได้แก่ เชื้อเพลิงและออกซิเจน โดยที่ส่วนประกอบอื่นๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงยังคงอยู่

2.1.4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

2.1.4.1 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

ในขณะนี้สารที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ที่ดีที่สุดคือในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง คือ เซอร์โคเนีย (zirconia, ZrO_2) ที่เติมด้วยยิตเทียม (Yttrium) ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ในทางการค้าเชิงพาณิชย์จะใช้ 8 เปอร์เซนต์ยิตเทียมเสตบิไลส์เซอร์โคเนีย (8% yttria – stabilized zirconia, YSZ) เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเซลล์สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส ปัญหาหลักของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง คือ อุณหภูมิที่เซลล์ทำงานสูงเกินไป ถ้าสามารถหาวัสดุทดแทนที่ทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ จะลดต้นทุนของอิเล็กโทรดและวัสดุที่เป็นตัวเชื่อมต่อของเซลล์เข้าด้วยกัน ทำให้มีการวิจัยเพื่อมุ่งเน้นหาแนวทางที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง ทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งอาจทำได้โดยการใช้อิเล็กโทรไลต์ของแข็ง หรือ ทำให้ความหนาของอิเล็กโทรไลต์บางลง เป็นต้น [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]

2.1.4.2 แคโทด (Cathode)

โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง คือ แลนทานัมแมงกานาไนท์ (doped La-manganite, $LaMnO_3$) ซึ่งมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำแบบตัวพี (p-type) ปัจจุบันนิยมใช้แลนทานัมสตรอนเทียมแมงกานาไนท์ (Lanthanum strontium manganite, LSM) มาก

ที่สุด แต่การเติมสทรอนเทียมมีทั้งข้อดีและข้อเสียคือ ทำให้การนำไฟฟ้าดี ขณะเดียวกันสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแคโทดก็มากขึ้นด้วย มีผลทำให้การแพร่ผ่านของก๊าซน้อยลง จึงทำให้มีการศึกษาวิจัยเพื่อหาวัสดุอื่นทดแทนสำหรับทำเป็นแคโทด [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]

2.1.4.3 แอโนด (Anode)

โลหะที่ใช้ทำเป็นขั้วแอโนด ได้แก่ นิกเกิล โคบอล รูทีเนียม และแพลทตินัม โดยโลหะรูทีเนียมจะทำหน้าที่เป็นแอโนดได้ดี เพราะมีความเสถียร แต่มีราคาแพงและเป็นพิษ จึงนิยมใช้นิกเกิล ซึ่งมีราคาถูกทำหน้าที่เป็นแอโนดได้ดีพอสมควรและอยู่ในเกณฑ์เป็นที่ยอมรับได้ นอกจากนี้เพื่อคงไว้ซึ่งคุณลักษณะของความพรุนจึงใช้แอโนดในรูปเซอรัมเมท (cermet) ของโลหะกับสเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย (stabilized zirconia) ซึ่งจากการวิจัยพบว่านิกเกิลเซอร์โคเนียเซอรัมเมท (nickel/zirconia cermet, Ni/YSZ) เป็นวัสดุที่ใช้ทำแอโนดได้ดีที่สุดในขณะนี้ [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]

2.1.4.3 วัสดุเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ (Interconnect)

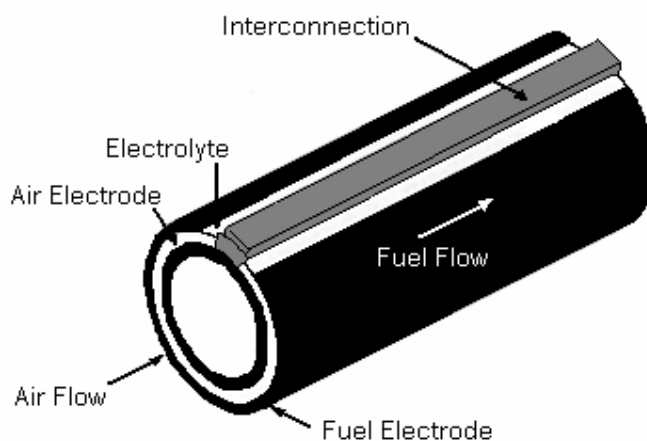
วัสดุที่ใช้เป็นตัวเชื่อมต่อภายในเซลล์เชื้อเพลิงต้องมีสมบัติต่อไปนี้ คือ เป็นสารที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ไม่ผุกร่อนง่าย สัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ ตัวอย่างของสารที่มีสมบัติดังกล่าว ได้แก่ เซรามิกส์ โลหะอัลลอยด์ที่ทนอุณหภูมิสูง และเซอรัมเมท เป็นต้น นอกจากนี้การเลือกใช้ตัวเชื่อมต่อที่เหมาะสมยังขึ้นอยู่กับลักษณะของการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงด้วย ปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาโลหะอัลลอยด์ของโครเมียมอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้โลหะอัลลอยด์ที่มีการขยายตัวได้พอเหมาะกับยิตเทียเซอร์โคเนีย (yttria-zirconia) ที่ทุกช่วงอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามยังคงต้องมีการวิจัยต่อไปอีก เพื่อให้ได้อัลลอยด์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้เป็นตัวเชื่อมต่อภายในของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]

2.1.5 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

2.1.5.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ (Seal-less Tubular Design)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ออกแบบเป็นรูปทรงกระบอก หลอดที่เป็นตัวพองทำด้วยแคลเซียม สเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย (Ca-stabilized zirconia) หรือแบบล่าสุดที่มีการออกแบบไว้ทำจากแลนทานัมสทรอนเทียมแมงกานีส ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดในตัว มียิตเทียสเตบิลไลซ์เซอร์โคเนียและนิกเกิลเซอร์โคเนียเซอรัมเมทเป็นอิเล็กโทรไลต์และแอโนดตามลำดับ รูปทรงกระบอกของเซลล์เดี่ยวหนึ่งเซลล์แสดงในภาพประกอบ 2 ขณะนี้เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่ได้มีการ

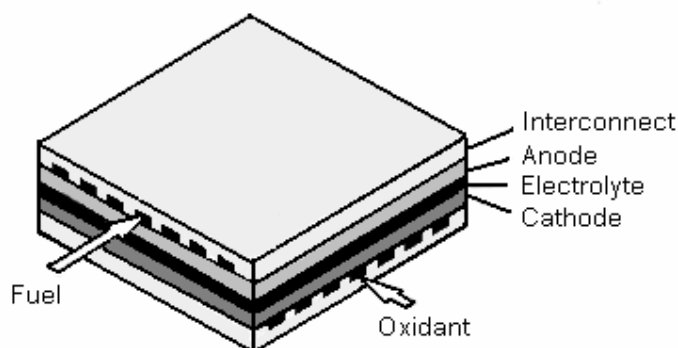
พัฒนาไปได้มากที่สื่อนั้นจะให้พลังงาน 25 กิโลวัตต์ จากการสร้างเซลล์โดยนำเซลล์เดี่ยวทรงกระบอกหลายๆ เซลล์มาต่อเข้าด้วยกันโดยใช้แผ่นนิกเกิลเป็นตัวเชื่อม ข้อดีของเซลล์รูปทรงกระบอก คือ ไม่ต้องใช้ตัวประสานระหว่างแคโทดและแอโนด แต่มีข้อเสียคือให้พลังต่อพื้นที่ต่ำเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ และมีราคาสูงมากเกินกว่าที่จะทำเพื่อประกอบทางเชิงพาณิชย์ [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]



ภาพประกอบ 2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ [Suwanwarangkul, R., 2005]

2.1.5.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทแผ่น (Planar or Flat Plate Design)

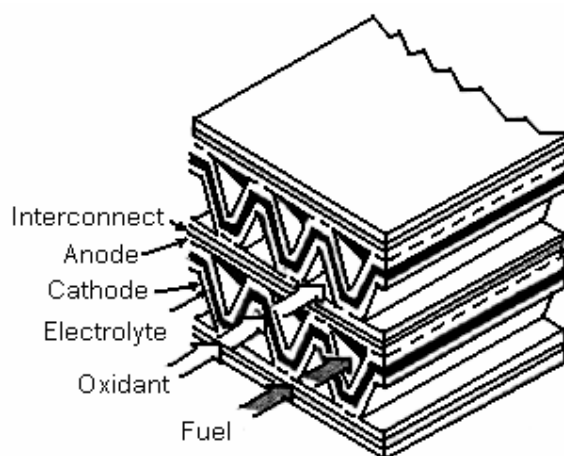
เป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ออกแบบให้มีลักษณะเป็นแผ่น ดังแสดงในภาพประกอบ 3 โดยที่อิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์จะทำให้เป็นชั้นบางๆ แผ่นที่ใช้เชื่อมระหว่างอิเล็กโทรดกับอิเล็กโทรไลต์ทำจากวัสดุที่เป็นเซรามิกส์หรือโลหะอัลลอยด์ที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง และมีช่องให้ก๊าซผ่านเข้าไปได้ แต่ละเซลล์จะเชื่อมต่อกันด้วยตัวประสานที่ทนต่อความร้อนสูง เซลล์ที่ออกแบบด้วยวิธีนี้มีแนวโน้มว่าจะเป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ราคาถูกที่สุด [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]



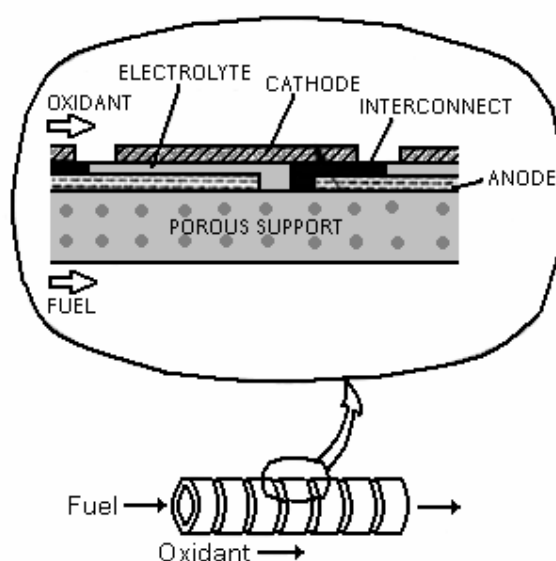
ภาพประกอบ 3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทแผ่น [Suwanwarangkul, R., 2005]

2.1.5.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทโมโนลิทิก (Monolithic Design)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ออกแบบลักษณะนี้ดังแสดงในภาพประกอบ 4 กำลังอยู่ในระหว่างการพัฒนาภายใต้หน่วยงาน Allied Signal Aerospace โดยมีข้อพิจารณาอยู่ 3 ประการ คือ การให้เชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์ผ่านเข้าไปในเซลล์ในทิศทางเดียวกัน หรือให้ผ่านสวนทางกันหรืออาจให้ผ่านในทิศทางที่ตัดกัน เซลล์ในลักษณะนี้มีแนวโน้มให้พลังงานต่อพื้นที่สูง จึงเป็นที่น่าสนใจและดึงดูดใจที่จะพัฒนาขึ้นมาใช้สำหรับการเดินทางไปอวกาศ และประยุกต์ใช้ในการคมนาคมประเภทต่างๆ [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]



ภาพประกอบ 4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทโมโนลิทิก [Suwanwarangkul, R., 2005]



ภาพประกอบ 5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทเชกเมนต์เซลล์อินซีรีส์ [Suwanwarangkul, R., 2005]

2.1.5.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทเชกเมนต์เซลล์อินซีรีส์ (Segmented-Cell-In-Series Design)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทนี้ ประกอบด้วยเซลล์ที่มีลักษณะเป็นข้อ ที่ติดกับวงจรไฟฟ้าและช่องทางการไหลของก๊าซที่เรียงต่อกันเป็นชุด ดังแสดงในภาพประกอบ 5 ในการทำงานกระแสไฟฟ้าจะไหลตามแคโทดตั้งแต่เซลล์แรก แล้วไหลผ่านทางแนวขวางของอิเล็กโทรไลต์ไปยังแอโนด [Suwanwarangkul, R., 2005]

2.1.6 ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิง [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]

2.1.6.1 เป็นแหล่งพลังงานที่ปลอดภัย ลดการใช้น้ำมัน ลดการนำเข้าน้ำมัน จึงเป็นการอนุรักษ์แหล่งพลังงานจากธรรมชาติ

2.1.6.2 มีประสิทธิภาพสูงมาก สามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงระหว่าง 50 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ (ขึ้นอยู่กับชนิดและการออกแบบของเซลล์เชื้อเพลิง) ในขณะที่โรงงานผลิตไฟฟ้าใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เพียง 40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับในรถยนต์น้ำมันก๊าซไฮโดรเจนเมื่อเกิดการเผาไหม้ให้พลังงานเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนเพียง 25 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น

2.1.6.3 สามารถเลือกเชื้อเพลิงได้ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซโปรเพน ก๊าซบิวเทน เมทานอล หรือน้ำมันดีเซล เป็นต้น

2.1.6.4 เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากเซลล์เชื้อเพลิง คือน้ำบริสุทธิ์ อาจปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาบ้างขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงที่ใช้ แต่เมื่อเทียบกับการเผาไหม้ตามปกติ จะเห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงไม่ผลิตก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ออกสู่บรรยากาศ และในขณะที่เซลล์กำลังทำงานจะไม่มีเสียงดังรบกวน เนื่องจากไม่มีวัสดุหรือส่วนใดของเซลล์มีการเคลื่อนที่จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและทางเสียง

2.1.7 ข้อจำกัดของเซลล์เชื้อเพลิง [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]

2.1.7.1 ไม่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในเซลล์แต่จะให้พลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องถ้าในเซลล์ยังมีเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์

2.1.7.2 วัสดุที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดราคาแพง และมีอายุการใช้งานสั้น

2.1.7.3 การขนส่งและการจัดเก็บก๊าซไฮโดรเจนซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิง ต้องใช้ความระมัดระวังและต้องใช้เทคนิคพิเศษจากผู้ชำนาญมีเช่นนั้นอาจเกิดอันตรายได้ จึงเป็นเหตุผล

หนึ่งที่ทำให้มีการใช้ไฮโดรคาร์บอน หรือแอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงแทนก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ ที่เมื่อใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงจะไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเลย เพราะจะเกิดน้ำบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น

2.1.7.4 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะเกิดที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง เป็นต้น

2.1.8 ทิศทางของการวิจัยพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในอนาคต

วิวัฒนาการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งมีแนวโน้มสูงที่จะใช้ในสถานีผลิตไฟฟ้าในศตวรรษหน้า ปัจจุบันแสดงให้เห็นว่าการวิจัยพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งนี้มีความเป็นไปได้สูงมาก อย่างไรก็ตามในแง่ของการนำไปใช้งานเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ยังมีรายละเอียดอีกมาก และในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงที่พัฒนาขึ้นมายังมีข้อบกพร่องบางประการดังได้กล่าวไปแล้ว จึงต้องมีการศึกษาวิจัยต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวข้องกับสิ่งต่อไปนี้

- 1) ปรับปรุงวัสดุที่ใช้เป็นตัวเชื่อมต่อกับตัวประสานในเซลล์เชื้อเพลิง
- 2) ปรับปรุงในด้านราคาให้ต่ำลง
- 3) ปรับปรุงให้สามารถใช้งานได้นานและมีความทนทานสูง

ปัญหาหลักของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง คือ เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงมีการผลิตพลังงานไฟฟ้าในขณะที่มีอุณหภูมิสูง จะมีผลทำให้เกิดอิเล็กโทรดและบริเวณรอยต่อระหว่างอิเล็กโทรดกับอิเล็กโทรไลต์ที่เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นมีอัตราการเสื่อมสภาพเร็วขึ้น ขณะเดียวกันวัสดุที่ใช้และวิธีการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงยังมีข้อจำกัดอยู่มากทำให้เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งยังคงมีราคาแพง แต่ถ้าสามารถทำให้เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำลงจาก 1000 องศาเซลเซียส เป็น 500 ถึง 550 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ (Thermal efficiency) สูงขึ้น รวมทั้งลดอัตราการเสื่อมสภาพของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์ สามารถเลือกใช้วัสดุอื่นๆ ได้อีกหลากหลายชนิดเพื่อมาสร้างเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งจะทำให้ราคาถูกลงมาก แต่อุณหภูมิมีผลต่อการเคลื่อนที่เข้าไปในอิเล็กโทรไลต์ YSZ ของออกซิเจนไอออนซึ่งต้องถูกกระตุ้นด้วยพลังงานสูงมาก เกิดการสูญเสียศักย์ไฟฟ้า (Voltage loss) บางส่วนไปแต่ข้อจำกัดนี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความต้านทานต่ำที่อุณหภูมิปานกลาง อาจพัฒนาปรับปรุงอิเล็กโทรไลต์เดิมที่ใช้กันอยู่แล้วให้ดีขึ้นหรือวิจัยหาสารชนิดใหม่ นอกจากนี้การเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์เป็นการแก้ไขอีกทางหนึ่ง [https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc]

2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยและการพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งนั้นมีหลายส่วนประกอบกัน โดยสามารถแบ่งงานวิจัยหลักๆ ได้เป็น 3 ส่วนดังนี้

2.2.1 งานพัฒนาวัสดุที่ใช้สร้างเซลล์เชื้อเพลิง เช่น อิเล็กโทรด และ อิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น

เนื่องจากการทำงานเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1000 องศาเซลเซียส) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าก๊าซออกซิเจนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ได้ดีที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นวัสดุที่ใช้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ต้องแข็งแรงทนทานและเสถียรต่อสภาพแวดล้อมภายในเซลล์ เช่น ทนต่อความดันของก๊าซออกซิเจน (มากกว่า 20 กิโลปาสกาล) ที่เข้าไปในเซลล์ที่แคโทด ทนอุณหภูมิสูงได้ดี มีการขยายตัวน้อย มีความดันไอลำเพื่อเลี่ยงการสูญเสียวัสดุ ต้องสามารถใช้งานได้นานและควรมีราคาถูกลง ทำให้ปัจจุบันมีการวิจัยอย่างมากที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวัสดุที่เหมาะสมที่ใช้สำหรับสร้างเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง ยกตัวอย่างเช่น

มัลลอน และ เคนดอลล์ [Mallon, C. and Kendall, K., 2005 : 154-160] ทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและเชื้อเพลิง ที่ส่งผลต่อเซลล์ที่พัฒนาขึ้นมา โดยทำการเตรียมแอโนดซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ นิกเกิลออกไซด์ (44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) 8YSZ (12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) อะซิโตน (41.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และ KD2 surfactant (2.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) แคโทดประกอบด้วย $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ (44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) 8YSZ (12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) อะซิโตน (42 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และ KD2 surfactant (1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย แลนทานัม (58 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) อะซิโตน (40.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และ KD2 (1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) โดยนำมาประกอบกันเป็นตัวเซลล์ยาว 5 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ซึ่งแอโนด แคโทด และอิเล็กโทรไลต์มีความหนา 50 30 และ 200 ไมโครเมตรตามลำดับ โดยทำการทดลองที่เงื่อนไขต่างกัน 2 แบบ คือ แบบที่ 1 ให้ความร้อนกับอากาศที่ 20 เซลเซียสจนถึง 850 องศาเซลเซียส โดยให้อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาทีเปรียบเทียบกับ มีเทนที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 5 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า ไฮโดรเจนให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ดีกว่า เนื่องจากคาร์บอนจากมีเทนไปสะสมตัวในแอโนด ทำให้ปิดกั้นการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เซลล์หยุดการทำงานภายใน 8 ถึง 15 นาทีเท่านั้น แบบที่ 2 ให้ความร้อนกับเชื้อเพลิงที่ 20 เซลเซียสจนถึง 850 องศาเซลเซียส โดยให้อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาทีเปรียบเทียบกับ มีเทนที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 5 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า มีเทนให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่

ดีกว่าไฮโดรเจน เพราะว่าคาร์บอนไม่ได้ไปปิดกั้นกระแสไฟฟ้า อีกทั้งเซลล์ยังสามารถทำงานได้นานกว่า 30 ชั่วโมงอีกด้วย

ซูซูกิ อาวานะ จาซินสกี เปโตรอฟสกี และ แอนเดอร์สัน [Suzuki, T., Awano, M., Jasinski, P., Petrovsky, V. and Anderson, H.U., 2006 : 2071-2074] ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพและค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (power density) ที่ผลิตได้จากเซลล์ที่ได้สร้างขึ้นมา โดยทำการเตรียมสารประกอบ (La, Sr) MnO_3 (LSM) – Y doped ZrO_2 (YSZ) จาก YSZ ที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (YSZ มีขนาดอนุภาคเริ่มต้นประมาณ 100 นาโนเมตร) YSZ และ LSM polymer ก่อนที่จะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ผลจากการทดลองพบว่าสารประกอบ LSM-YSZ ที่สร้างมานั้นมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเท่ากับ 0.14 และ 0.3 โอห์ม ตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนั้นทำให้เซลล์ที่สร้างมาสามารถนำไปใช้เป็นแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งได้ โดยประสิทธิภาพของเซลล์ที่ใช้สารประกอบ LSM-YSZ เป็นแคโทด และ Ni-YSZ เป็นแอโนด พบว่าให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.26 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง

หวัง ลู ฮวง เซน ฮู และ ซู [Wang, J., Lu, Z., Huang, X., Chen, K., Ai, N., Hu, J. and Su, W., 2007 : 957-959] ทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ และอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการเตรียมฟิล์ม YSZ โดยวิธีการ spin smoothing โดยเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วย $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSM) ที่หุ้มด้วย $\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.9}$ (SDC) เป็นแคโทด NiO-YSZ เป็นแอโนด และฟิล์ม YSZ ที่เตรียมมาเป็นอิเล็กโทรไลต์ซึ่งหนา 8 ไมโครเมตร ผลจากการทดลองพบว่า กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 1.04 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 676 965 และ 1420 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 700 750 และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยกำหนดให้อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที แต่หากกำหนดให้อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1648 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

2.2.2 งานพัฒนาทางด้านเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เซลล์ เช่น ไฮโดรเจน มีเทน โพรเพน เมทานอล เอทานอล และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น

ปัญหาที่พบจากการใช้เชื้อเพลิงที่เป็นไฮโดรเจนนั้น พบว่า มีราคาค่อนข้างสูง และยากต่อการจัดเก็บและการเคลื่อนย้ายขนส่ง ดังนั้นจากปัญหาที่เกิดขึ้นทำให้นักวิจัยหลายๆ ท่านต้องการที่แก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งผลจากการที่อุณหภูมิของการทำงานของเซลล์สูง ทำให้สามารถเลือกใช้เชื้อเพลิง

ได้หลากหลายขึ้น โดยปัจจุบันสามารถป้อนเชื้อเพลิงที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์ หรือก๊าซธรรมชาติ เข้าไปทำปฏิกิริยาในเซลล์ได้โดยตรง หรืออาจทำให้ไฮโดรเจนแตกตัวก่อนป้อนเข้าไปทำปฏิกิริยา ซึ่งปัจจุบันมีงานวิจัยอย่างมากที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาหาเชื้อเพลิงแทนไฮโดรเจนเพื่อหาประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์ ยกตัวอย่างเช่น

ซอนด์เดอร์ และ เคนดอลล์ [Saunders, G.J. and Kendall, K., 2002 : 258-263] ทำการศึกษาถึงปฏิกิริยาของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตรโดยทำการศึกษาสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอัลเคน (Alkanes) กรดอินทรีย์ (Organic acids) และแอลกอฮอล์ ได้แก่ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล ไตรเมทิลเพนเทน กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก เพื่อเป็นการหาประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์ ผลที่ได้พบว่า เมทานอลและกรดฟอร์มิกสามารถนำมาใช้ได้โดยตรงกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อและยังได้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ดีกว่าสารตัวอื่นๆ ส่วนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นๆ จะไปทำลายแอโนด เนื่องจากคาร์บอนในสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะเข้าไปสะสมตัวในเซลล์ ทำให้แอโนดบวมตัวขึ้นจึงส่งผลให้เกิดการปิดกั้นช่องทาง การไหลของเชื้อเพลิง

สุวรรณวรานกุล ครีวเซ็ท เอ็นท์เซฟ จรัสโรจน์กุล พรทิษฐ์เกอร์ ฟาวเลอร์ ดีกิลาส ชีวะธนาคุป และ มโหดม [Suwanwaranggul, R., Croiset, E., Entchev, E., Charojrochkul, S., Pritzker, M.D., Fowler, M.W., Douglas, P.L., Chewathanakup, S. and Mahaudom, H., 2006 : 308-322] ทำการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทแผ่นแบบ 2 มิติ โดยใช้โปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICSTM ในการคำนวณ ซึ่งทดลองโดยการประยุกต์ใช้ก๊าซสังเคราะห์แทนเชื้อเพลิงทั่วไปซึ่งประกอบไปด้วยก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และก๊าซไนโตรเจน เพื่อศึกษาถึงปรากฏการณ์การส่งผ่านทางโมเมนต์ มวล ที่สัมพันธ์กับปฏิกิริยาทางเคมีและไฟฟ้าเคมี และแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเป็นการทำนายปริมาณคาร์บอนที่เป็นผลมาจากการทดลองและศึกษาถึงผลกระทบจากปริมาณคาร์บอนที่เกิดขึ้น โดยเปรียบเทียบกันระหว่างการทดลองที่อุณหภูมิ 800 กับ 900 องศาเซลเซียส ผลจากการพัฒนาแบบจำลองพบว่ามีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองจริงจากการทดลองที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จากการจำลองมีค่าเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งภาพที่ได้จากการถ่ายโครงสร้างของเซลล์พบว่าผิวของแอโนดหลังจากกระบวนการการทดลองเสร็จสมบูรณ์ แสดงให้เห็นถึงการสะสมตัวของคาร์บอนจำนวนมากบนผิวแอโนด และพบปริมาณนิเกิลที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ระหว่างเซลล์ของแอโนดที่การทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างกับการทดลองที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีการสะสมตัวของคาร์บอนและมีปริมาณของนิเกิลเพียงเล็กน้อย จากผลการทดลองและการจำลองมีเหตุผลหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพ

ของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลงโดยการใช้ก๊าซสังเคราะห์ คือ คาร์บอน โดยผลจากปฏิกิริยาคาร์บอนจะไปทำลายผิวของแอโนด ดังนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ยอมรับได้ คือ แบบจำลองที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามถ้าหากเติมน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในก๊าซสังเคราะห์ ถึงแม้ว่าจะเป็น การเปลี่ยนแปลงและสูญเสียกำลังทางไฟฟ้าไปบ้าง แต่น้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะช่วยลดอันตรายจากปริมาณคาร์บอนระหว่างทำการทดลองได้

2.2.3 งานพัฒนาทางการออกแบบชุดการไหล รูปร่าง และการทำงานของเซลล์
เช่น ช่องทางการไหล ชั้นวางเซลล์ รวมถึงอัตราการไหล ความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศ เป็นต้น

เซลล์เชื้อเพลิงที่จะนำไปใช้ประโยชน์เกิดจากการนำเซลล์เชื้อเพลิงเซลล์เดี่ยว (Single cell) หลายๆ เซลล์มาวางต่อกันเป็นชุดๆ โดยมีตัวเชื่อมระหว่างเซลล์ แต่ละชุดของเซลล์ที่ต่อกันแล้ว เรียกว่า Fuel Cell Stack ซึ่งอาจมีการนำเอา Fuel Cell Stack แต่ละอันมาเรียงต่อกันในลักษณะแบบต่างๆ ได้อีกหลากหลายขึ้นอยู่กับการออกแบบ เรียกว่า Fuel Cell Stack Designs สำหรับการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงเซลล์เดียวนั้น ต้องคำนึงถึงรูปร่างและขนาดของช่องทางการไหลภายในเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้เชื้อเพลิงจากด้านแอโนดและอากาศในด้านแคโทดรั่วถึงกันได้ ส่งผลให้ลักษณะรูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการประยุกต์ ใช้งานและการออกแบบ จึงทำให้มีนักวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาและพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีขึ้น ยกตัวอย่างเช่น

รามากฤษณะ หยาง และ ซอน [Ramakrishna, P.A., Yang, S. and Sohn, C.H., 2005 : 378-384] ทำการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทแผ่นแบบเซลล์เดี่ยว ซึ่งแบบจำลองเป็นแบบ 3 มิติ ใช้โปรแกรม CFD-ACE package ในการคำนวณ เพื่อเป็นการปรับปรุงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง โดยแบ่งรูปแบบของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 2 แบบ สำหรับแบบแรกเป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบธรรมดา และแบบที่ 2 เป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบที่ใส่แผ่นกันเพื่อเป็นการแบ่งช่องทางการไหลออกเป็น 2 ส่วน ทั้งในส่วนของแอโนดและแคโทด โดยแผ่นกันที่ใส่เข้าไปจะยาวไปถึงกึ่งกลางของช่องทางการไหล ซึ่งผลที่ได้พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบที่มีแผ่นกัน มีค่าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบธรรมดาเนื่องจากการกระจายตัวของสารตั้งต้นตลอดระยะทางในเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีกว่า โดยมีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power density) เท่ากับ 1.18 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรและมีประสิทธิภาพ 60 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบธรรมดาค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.88 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรและมีประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อนำค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามา

เปรียบเทียบกัน เซลล์เชื้อเพลิงแบบที่มีแผ่นกันมีค่าสูงกว่าถึง 35 เปอร์เซ็นต์ และเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลทางขาเข้ามีค่าน้อยประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบที่มีแผ่นกันมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบธรรมดาเพียงเล็กน้อย แต่จะมีประสิทธิภาพแตกต่างกันสูงถึง 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหลเชิงมวลทางขาเข้า

ล็อกเก็ตท์ ซิมมอนส์ และ เคนดอลล์ [Lockett, M., Simmons, M.J.H. and Kendall, K., 2004 : 243-246] ทำการสร้างและจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่มีขนาดเล็ก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 2 มิลลิเมตร และยาว 55 มิลลิเมตร ซึ่งช่วงที่ทำปฏิกิริยายาว 25 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรไลต์ทำมาจาก 8YSZ แอนโดทำมาจากนิกเกิลเซอร์เม็ทและแคโทดทำมาจากแพลนทินัมสทอนเทียมแมงกานีส โดยนำมาวมกันทั้งหมด 20 เซลล์เป็น stack ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม FLUENT 6.0 ในการคำนวณ เพื่อเป็นการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิ โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อถูกทำให้ร้อนขึ้นจากอุณหภูมิห้องจนถึง 850 องศาเซลเซียส ภายใน 1 นาที และกำหนดให้อัตราการไหลเชิงมวลของไฮโดรเจนมีค่าเฉลี่ยที่ 20 มิลลิกรัมต่อนาทีในแต่ละเซลล์ พบว่า หลังจากทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางขาเข้าของอากาศเพื่อให้ได้อุณหภูมิของเซลล์อยู่ที่ประมาณ 850 องศาเซลเซียส โดยที่การไหลของอากาศเป็นการไหลสวนทางกับเชื้อเพลิง ซึ่งผลที่ดีที่สุดของอุณหภูมิของอากาศอยู่ที่ 400 องศาเซลเซียส และทำให้ได้กำลังทางไฟฟ้า 0.5 วัตต์

อย่างไรก็ตามการกระจายตัวของอุณหภูมิในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทั้งทางด้านแอโนดและแคโทดนั้น ต้องออกแบบให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิในระหว่างการทำงานอย่างสม่ำเสมอหรือออกแบบให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิทั่วทั้งเซลล์น้อยที่สุด เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดความเค้นเนื่องจากความร้อนที่เกินกว่าวัสดุจะยอมรับได้ นอกจากนั้นในการออกแบบยังต้องออกแบบให้เกิดการกระจายของกระแสไฟฟ้า และการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในระหว่างการทำงานอย่างสม่ำเสมออีกด้วย โดยต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอีกหลายประการ ได้แก่ รูปร่างและขนาดของช่องทางการไหล รูปแบบการไหลของก๊าซ (เช่น co-flow, cross-flow, counter-flow) อุณหภูมิที่ทางเข้าของก๊าซ อัตราการไหล เป็นต้น ทำให้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของ การไหลและอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง ยกตัวอย่างเช่น

วรรณชล [วรรณชล, 2547] ทำการออกแบบชั้นวางเซลล์และชุดการไหลเพื่อศึกษาผลกระทบของมุมเอียงของชุดการไหลที่มีผลต่อการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์ โดยใช้ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลเป็นตัวแปรที่แสดงการกระจายการไหล โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลที่ทางเข้าของชั้นวางเซลล์เท่ากับ 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 และ 7.0 ลิตรต่อนาที เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลที่มีความเอียง 3.10 และ 5.65 องศา พบว่าชุดกระจายการไหลที่เอียง 3.10 องศา ทำให้เกิดการกระจายการไหลที่ดีกว่า และเกิดความดันสูญเสียในช่องการไหลน้อยกว่า นอกจากนั้นยังได้ทำการ

จำลองการไหลภายในชั้นวางเซลล์ที่มีเงื่อนไขเหมือนกันกับการทดลอง เมื่อกำหนดให้ชุดกระจายการไหล มีมุมเฉียง 1.13, 3.10, 5.65 และ 7.89 องศา โดยใช้โปรแกรมทาง CFD ที่ชื่อ STAR-CD ช่วยในการศึกษาพฤติกรรมการไหลที่ไม่สามารถแสดงได้จากการทดลอง พบว่าลักษณะการไหลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองมีความสอดคล้องกันโดยเฉพาะในเซลล์แรกของชั้นวางเซลล์

โอทิสเซียร์ ลาร์เรน ฟาน เฮร์เล่ และ เฟฟแร็ท [Autissier, N., Larrain, D., Van Herle, J. and Favrat, D., 2004 : 313-319] ทำการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทแผ่น เพื่อเป็นการทำนายความหนาแน่น การไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้น โดยทำการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งแบบเซลล์เดี่ยว มีขนาดความหนาของเซลล์ 300 ไมโครเมตร กว้าง 80 มิลลิเมตร และยาว 80 มิลลิเมตร และจำลองการไหลโดยใช้เทคนิคการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล โดยใช้โปรแกรม FLUENT ในการคำนวณซึ่งจำลองขนาดเหมือนกันกับเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้สร้างมา โดยกำหนดให้การไหลภายในเซลล์เป็นแบบราบเรียบทั้งการไหลของอากาศและการไหลของไฮโดรเจน สำหรับอัตราการไหลของไฮโดรเจนมีค่า 200 และ 360 มิลลิลิตรต่อนาที ส่วนอัตราการไหลของอากาศมีค่ามากกว่าไฮโดรเจน 2.5 เท่า สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองได้ควบคุมไว้ที่ 750 องศาเซลเซียส ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองจริงและจากการคำนวณตามแบบจำลองได้นำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน โดยได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 0.7 โวลต์

อากิอาร์ แอดจิมาน และ แบรินดอน [Aguilar, P., Adjiman, C.S. and Brandon, N.P., 2004 : 120-136] ทำการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทแผ่น โดยการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบและพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง ประกอบด้วยการสมดุลมวลและพลังงาน ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมี องค์ประกอบของเชื้อเพลิงและอากาศ อุณหภูมิ ความต่างศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่น และตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อทำการศึกษถึงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางขาเข้าของอากาศและเชื้อเพลิงฟูเอลยูทิลไลเซชัน (Fuel Utilization) ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (Average current density) และรูปแบบของการไหล ซึ่งรูปแบบของการไหลเป็นลักษณะแบบทิศทางเดียวกันและสวนทางกัน ซึ่งจากการคำนวณพบว่าเมื่อกำหนดให้การไหลเป็นแบบทิศทางเดียวกัน โดยใช้เชื้อเพลิงเป็นมีเทนที่มีค่า 75 เปอร์เซ็นต์ฟูเอลยูทิลไลเซชัน ซึ่งอุณหภูมิทางขาเข้าของอากาศและเชื้อเพลิงอยู่ที่ 1023 องศาเคลวิน และค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่า 0.5 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่า 0.66 โวลต์ สำหรับค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่า 0.33 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่า 47 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกรณีที่กำหนดให้รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน โดยกำหนดค่าที่ใช้ในการคำนวณ

เหมือนกันกับการไหลแบบทิศทางเดียวกัน พบว่าอุณหภูมิมีค่าสูงมาก รวมไปถึงการกระจายตัวของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจากค่าที่คำนวณได้สำหรับการไหลแบบสวนทางกันจึงไม่เหมาะสมในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงจริง

คัมพานารี และ ไอโอรา [Campanari, S. and Iora, P., 2004 : 113-126] ทำการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อโดยวิธีการวิเคราะห์ในปริมาตรควบคุม ซึ่งประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หยาบละเอียดทางด้านปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ความร้อน และการเคลื่อนที่ของของไหลในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่มีการกำหนดรูปทรง คุณสมบัติของวัสดุ และค่าต่างๆ ของของไหล โดยแบบจำลองที่ประยุกต์มานี้นำไปเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ความดันบรรยากาศ เพื่อเป็นการทำนายความแม่นยำของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง โดยกำหนดสมมติฐานให้ค่าตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number, Nu) แตกต่างกันตั้งแต่ 4 ถึง 15 ในทุกช่องทางกรไหลในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง โดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหล ซึ่งใช้โปรแกรม FLUENT ในการคำนวณ พบว่าที่ค่า Nu เท่ากับ 7 มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนทางกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่า 0.19 และ 0.22 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และที่ค่า Nu ตั้งแต่ 10 ขึ้นไปพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนยิ่งสูงขึ้นด้วย

เจียง ฟาง คาน และ ดักกอล [Jiang, W., Fang, R., Khan, J.A. and Dougal, R.A., 2006 : 316-326] ทำการปรับปรุงแบบจำลองเพื่อศึกษาลักษณะของตัวแปรและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ใน 1 มิติของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ โดยทำการจำลองในระบบ virtual test bed (VTB) simulation ซึ่งแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองทางปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและความร้อน สำหรับค่าตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษา ได้แก่ สัดส่วนความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหลเชิงมวล เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และความยาวของท่อ ผลจากการจำลองกรณีที่เปลี่ยนแปลงสัดส่วนความดัน โดยเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 15 พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 7.38 เปอร์เซ็นต์และ 24.17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สำหรับกรณีที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางขาเข้าของอากาศและเชื้อเพลิง โดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และประสิทธิภาพจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับกรณีที่เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวล โดยเพิ่มขึ้นจาก 10 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และประสิทธิภาพมีค่าลดลง ส่วนที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและค่อยๆ ลดลง ส่วนประสิทธิภาพจะลดลงเช่นเดียวกับอากาศ สำหรับกรณีที่เปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ โดยกำหนดขนาดไว้ที่ 15.88, 18 และ 22 มิลลิเมตร พบว่าการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการทำงานเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีที่เปลี่ยนแปลงความยาวของท่อ โดยกำหนดขนาดไว้ที่ 50, 100 และ 150

เซนติเมตร พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้มีค่าเท่ากัน ดังนั้นความยาวไม่มีผลกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้สำหรับการใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง รวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นได้ เพื่อสร้างแบบจำลองการไหลสำหรับใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่เหมาะสมในการทำงานต่อไป

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

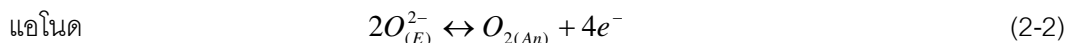
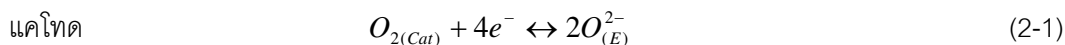
2.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

2.3.1.1 บทนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง แบบจำลองนี้นำมาใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมต่างๆ ของเซลล์ เช่น กำลังทางไฟฟ้าที่ได้ ประสิทธิภาพ และอุณหภูมิทางขาออกของก๊าซภายใต้เงื่อนไขสภาวะการทำงาน รวมไปถึงการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่สำคัญที่มีผลต่อกระบวนการและการทำงานของเซลล์ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการออกแบบเซลล์เพื่อสร้างประโยชน์ให้ได้มากที่สุด และลดความสิ้นเปลืองเนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นมีราคาสูง [Suwanwarangkul, R., 2005]

2.3.1.2 ความต่างศักย์ผันกลับ (Reversible Fuel Cell Voltage, E°)

ความต่างศักย์ผันกลับ หมายถึง ศักย์ที่บอกว่าเซลล์มีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดทางทฤษฎี สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งมีอิเล็กโทรไลต์ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำออกซิเจนไอออน ปฏิกริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงทั้งปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันของออกซิเจนที่แคโทดและแอโนดตามลำดับ เป็นไปตามสมการดังนี้ [Suwanwarangkul, R., 2005]



โดยที่ (Cat) , (E) และ (An) หมายถึง แคโทด อิเล็กโทรไลต์ และแอโนดตามลำดับ

ความต่างศักย์ผันกลับสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งโดยพิจารณาจากความเข้มข้นของออกซิเจนอธิบายได้โดยสมการ Nernst equation มีรูปสมการเป็น

$$E_{cell}^{\circ} = E_{Cat}^{\circ} - E_{An}^{\circ} = (RT / 4F) \ln(p_{O_2, Cat} / p_{O_2, An}) \quad (2-3)$$

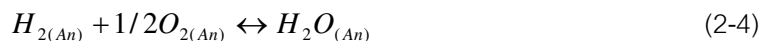
โดยที่ R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูลต่อเคลวินต่อโมล)

T คือ อุณหภูมิที่เซลล์ทำงาน (เคลวิน)

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96487 คูลอมบ์ต่อโมล)

$p_{O_2, An}$ และ $p_{O_2, Cat}$ คือ ความดันย่อยของออกซิเจนบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่แอโนดและแคโทดตามลำดับ

สำหรับ $p_{O_2, Cat}$ ใช้อากาศเข้าทำปฏิกิริยาที่แคโทดซึ่งอากาศประกอบด้วยออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์ และไนโตรเจน 79 เปอร์เซ็นต์ และ $p_{O_2, An}$ ขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงที่ใช้ โดยกำหนดให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล ซึ่งปฏิกิริยาที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงที่ด้านแอโนด มีรูปสมการเป็น



ดังนั้น $p_{O_2, An}$ สำหรับปฏิกิริยานี้เขียนในรูปความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$(p_{O_2, An})_{H_2} = \left(\frac{P_{H_2O}}{K_{eq, H_2} P_{H_2}} \right)^2 \quad (2-5)$$

โดยที่ p_{H_2} และ p_{H_2O} คือ ความดันแฟงของไฮโดรเจนและน้ำบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่แอโนดตามลำดับ

K_{eq, H_2} คือ ค่าคงที่สมดุลสำหรับปฏิกิริยา (2-5) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิมีรูปสมการเป็น

$$K_{eq, H_2} = \exp(-\Delta G_{H_2} / RT) \quad (2-6)$$

โดยที่ ΔG_{H_2} คือ พลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปของไฮโดรเจนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

แทนสมการ (2-5) และ (2-6) ในสมการ (2-3) ได้สมการ

$$E_{H_2}^\circ = -\frac{1}{2F} \left[\Delta G_{H_2} + RT \ln \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} P_{O_2, Cat}^{0.5}} \right) \right] \quad (2-7)$$

โดยที่ $E_{H_2}^\circ$ คือ ค่าความต่างศักย์ผันกลับโดยใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง

2.3.1.3 ความต่างศักย์ที่ได้จริงจากเซลล์เชื้อเพลิง (Actual Fuel Cell Voltage, V_{cell})

ในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงความต่างศักย์ที่ได้จริงจากเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าน้อยกว่าความต่างศักย์ผันกลับเนื่องมาจากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีการสูญเสียพลังงานซึ่งเกิดจากความต้านทานของ อิเล็กโทรไลต์และความต่างศักย์เกินตัว (Overvoltage หรือ overpotential, η) ที่บริเวณผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรดกับอิเล็กโทรไลต์ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลง ดังนั้นความต่างศักย์ที่ได้จริงจากเซลล์เชื้อเพลิง มีค่าดังนี้

$$V_{cell} = E_{cell}^\circ - \eta \quad (2-8)$$

ความต่างศักย์เกินตัวมี 3 ประเภท ประกอบด้วย

1. แอกติเวชันโอเวอร์โพเทนเชียล (Activation overpotential, η_{Act}) เป็นค่าที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยที่ค่า η_{Act} ขึ้นอยู่กับค่า exchange current density (j_0 , แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ซึ่งค่า exchange current density เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ และคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งค่า η_{Act} ในสมการบัตเตอร์-โวลเมอร์ (Butter-volmer equation) มีค่าแตกต่างกัน 2 กรณี คือ

กรณีที่ η_{Act} มีค่าน้อย (น้อยกว่า 15 มิลลิโวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง)

$$j = j_0 \frac{nF\eta_{act}}{RT} \quad (2-9a)$$

กรณีที่ η_{Act} มีค่ามาก (มากกว่า 50 ถึง 100 มิลลิโวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง)

$$\eta_{act} = \frac{RT}{anF} \ln \frac{j}{j_0} \quad (2-9b)$$

โดยที่ j คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

j_0 คือ exchange current density

n คือ จำนวนของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Transfer coefficient) โดยมีค่า 0 ถึง 1

2. โอห์มมิกโอเวอร์โพเทนเชียล (Ohmic overpotential, η_{Ohm}) เป็นค่าที่เกิดจากค่าความต้านทานจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนที่ผ่านชั้นเซลล์ ซึ่งขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าและเป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's law)

$$\eta_{Ohm} = \frac{jL}{\sigma} \quad (2-10)$$

โดยที่ L คือ ระยะทางที่อิเล็กตรอนหรือไอออนเคลื่อนที่

σ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนหรือไอออน

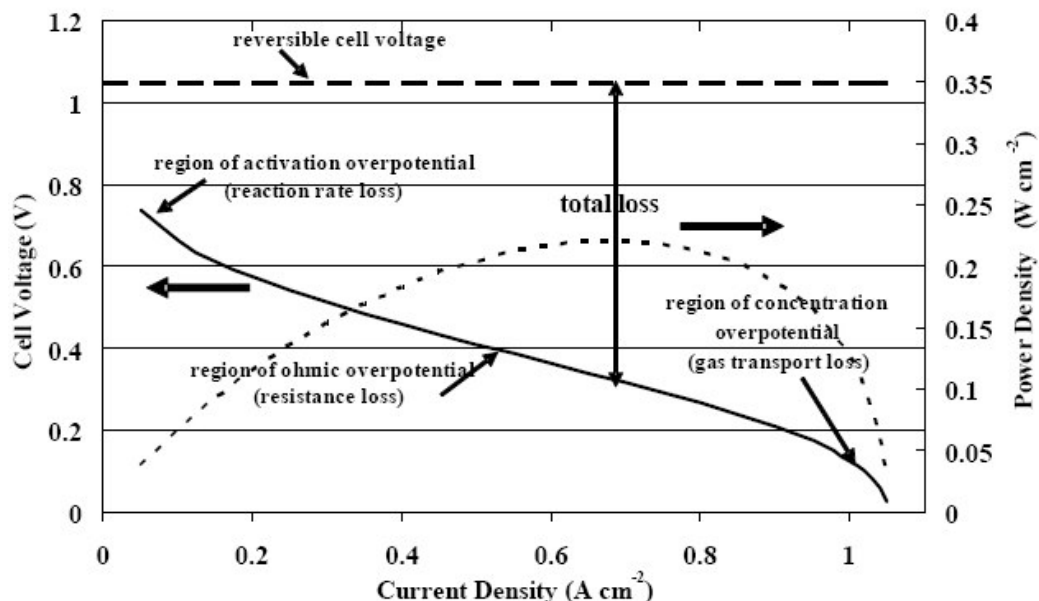
3. คอนเซนเทรชันโอเวอร์โพเทนเชียล (Concentration overpotential, η_{Conc}) เป็นค่าที่เกิดจากการถ่ายโอนมวล เนื่องมาจากค่าความต้านทานในการแพร่ของก๊าซบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{j_L}{j_L - j} \quad (2-11)$$

โดยที่ j_L คือ limiting current density

ดังนั้น ความต่างศักย์ที่ได้จริงที่เกิดจากค่าความต่างศักย์เกินตัวทั้ง 3 ประเภท มีค่าดังนี้

$$V_{cell} = E_{Cell}^\circ - \eta_{Act} - \eta_{Ohm} - \eta_{Conc} \quad (2-12)$$



ภาพประกอบ 6 กราฟความสามารถของเซลล์ (Performance curve) แสดงค่าที่เกิดจากค่าความต่างศักย์เกินตัวทั้ง 3 ประเภท [Suwanwarangkul, R., 2005]

ภาพประกอบ 6 แสดงให้เห็นว่าค่าความต่างศักย์ที่ได้จริงจากเซลล์มีค่าลดลงเนื่องจากค่าความต่างศักย์เกินตัวทั้ง 3 ประเภท โดยช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำ ค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเซลล์มีค่าลดลงเนื่องจากค่าแอคติเวชันโอเวอร์โพเทนเชียลมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นในช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าปานกลางเกิดจากค่าโอห์มมิก และคอนเซนเทรชันโอเวอร์โพเทนเชียล อย่างไรก็ตามค่าที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ค่าของโอห์มมิกโอเวอร์โพเทนเชียลมีค่าสูงกว่าค่าคอนเซนเทรชันโอเวอร์โพเทนเชียล สุดท้ายในช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าสูง ค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเซลล์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากค่าคอนเซนเทรชันโอเวอร์โพเทนเชียลที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก และในภาพประกอบ 6 แสดงถึงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power density, PD) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$PD = j \times V_{cell} \quad (2-13)$$

ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power

density) หลังจากนั้นค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าลดลงเพราะว่าค่าความต่างศักย์ของเซลล์มีค่าไม่เพียงพอ

2.3.1.4 พูเอลยูทิลไลซ์เซชันแฟกเตอร์ และแอร์ยูทิลไลซ์เซชันแฟกเตอร์ (Fuel Utilization Factor and Air Utilization Factor)

พูเอลยูทิลไลซ์เซชันแฟกเตอร์ แอร์ยูทิลไลซ์เซชันแฟกเตอร์ และประสิทธิภาพของเซลล์เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการหาความสามารถของเซลล์เชื้อเพลิง โดยที่ปริมาณของเชื้อเพลิงและออกซิเจนที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้จากพูเอลยูทิลไลซ์เซชันแฟกเตอร์ และแอร์ยูทิลไลซ์เซชันแฟกเตอร์ตามลำดับ ซึ่งทั้งคู่ส่งผลต่อความสามารถและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

2.3.1.4.1 พูเอลยูทิลไลซ์เซชันแฟกเตอร์ (U_f)

พูเอลยูทิลไลซ์เซชันแฟกเตอร์ หมายถึง อัตราส่วนของเชื้อเพลิงทั้งหมดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง พูเอลยูทิลไลซ์เซชันแฟกเตอร์มีรูปสมการดังนี้

$$U_f = \frac{\text{Moles of } H_2 \text{ Consumed}}{\text{Moles of } H_2 \text{ Supplied}} \times 100\% \quad (2-14)$$

จำนวนโมลของไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ดังนั้นจำนวนโมลของไฮโดรเจนที่ใช้ (n_{H_2}) ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี สามารถคำนวณได้จาก

$$n_{H_2} = \frac{j_{H_2} A_{cell}}{2F} \quad (2-15)$$

โดยที่ j_{H_2} คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้ของไฮโดรเจนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

A_{cell} คือ พื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิง

พูเอลยูทิลไลซ์เซชันแฟกเตอร์ควรจะมีค่าสูง โดยที่ค่าพูเอลยูทิลไลซ์เซชันแฟกเตอร์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในทางพาณิชย์มีค่าประมาณ 75 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์

2.3.1.4.2 แอร์ยู่ทิลไฮซีเซชันแฟกเตอร์ (U_a)

แอร์ยู่ทิลไฮซีเซชันแฟกเตอร์ หมายถึง อัตราส่วนของออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง โดยที่แอร์ยู่ทิลไฮซีเซชันแฟกเตอร์มีรูปสมการดังนี้

$$U_a = \frac{\text{Moles of } O_2 \text{ Consumed}}{\text{Moles of } O_2 \text{ Supplied with Air}} \times 100\% \quad (2-16)$$

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งแอร์ยู่ทิลไฮซีเซชันแฟกเตอร์ควรจะมีค่าต่ำ โดยที่ค่าแอร์ยู่ทิลไฮซีเซชันแฟกเตอร์ในทางพาณิชย์มีค่าประมาณ 15 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ สมการที่ใช้ในการหาค่าแอร์ยู่ทิลไฮซีเซชันแฟกเตอร์อีกสมการหนึ่งเรียกว่า แอร์สตอยชิโอเมตริกเรโซ (Air stoichiometric ratio, λ_a) ซึ่งเป็นส่วนกลับของแอร์ยู่ทิลไฮซีเซชันแฟกเตอร์

$$\lambda_a = \frac{\text{Moles of } O_2 \text{ Supplied with Air}}{\text{Moles of } O_2 \text{ Consumed}} \quad \text{หรือ} \quad \lambda_a = 1/U_a \quad (2-17)$$

จากการสมดุลโมลสำหรับปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง ใช้ไฮโดรเจน 1 โมล และออกซิเจน 0.5 โมล เป็นสารตั้งต้น ดังนั้นตามกฎของฟาราเดย์จำนวนโมลของออกซิเจนที่ใช้ (n_{O_2}) ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง มีรูปสมการเป็น

$$n_{O_2} = \frac{j_{O_2} A_{cell}}{4F} \quad (2-18)$$

โดยที่ j_{O_2} คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้ของออกซิเจนที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทด

2.3.1.5 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Efficiency)

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงใช้ในการหาค่าพลังงานในเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนไปเป็นกำลังไฟฟ้า โดยทั่วไปสามารถแสดงในรูปของประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ (Thermal efficiency, $\eta_{thermal}$) ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ หมายถึง ปริมาณของพลังงานความร้อนที่ได้ที่แปรเปลี่ยนไปเป็นพลังงานเคมี เมื่อเชื้อเพลิงและออกซิเจนทำปฏิกิริยากัน

$$\eta_{thermal} = \frac{P}{\Delta H_f} \times 100\% \quad (2-19)$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้าที่ได้

ΔH_f คือ เอนทาลปีที่เปลี่ยนไปของเชื้อเพลิง

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ΔH_f คำนวณได้

จาก

$$\Delta H_f = F_{H_2} LHV_{H_2} \quad (2-20)$$

โดยที่ F_{H_2} คือ อัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจน (โมลต่อวินาที)

LHV_{H_2} คือ lower heating values ของไฮโดรเจน (จูลต่อโมล)

2.3.2 สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ใช้ในการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่อง (Differential equation of continuity) สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของโมเมนตัม (Differential equation of momentum) สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของพลังงาน (Differential equation of energy) และสมการการถ่ายโอนประจุ (Charge transport) สมการเหล่านี้ได้อธิบายความเป็นจริงที่มีความหมายทางกายภาพซึ่งได้จากหลักการ การอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) การอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum) การอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) และการอนุรักษ์ประจุ (Conservation of charge) สำหรับการหาความสัมพันธ์ของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ได้ตั้งข้อสมมติฐานเกี่ยวกับของไหลดังนี้ [ชาญณรงค์, 2548]

- 1) ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow)
- 2) พิจารณาของไหลเป็นชนิดนิวโทเนียน (Newtonian fluid)
- 3) การไหลอยู่ในสภาวะคงตัว
- 4) การไหลของของไหลเป็นแบบราบเรียบ (laminar)

2.3.2.1 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่อง (Differential equation of continuity)

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่อง ได้ใช้หลักการการอนุรักษ์มวลซึ่งกล่าวว่ามวลในปริมาตรควบคุมคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลงในปริมาตรควบคุม เขียนให้ในรูปความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-21)$$

สมการ (2-21) เรียกว่า สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่อง สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ในสภาวะคงตัว

2.3.2.2 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของโมเมนตัม (Differential equation of momentum)

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของโมเมนตัม ได้มาจากการใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) ที่กล่าวว่า ผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุม

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + b_i \quad (2-22)$$

สมการ (2-22) เรียกว่า สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของโมเมนตัม หรือสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation) สำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้ในสภาวะคงตัว

2.3.2.3 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของพลังงาน (Differential equation of energy)

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของพลังงาน พิจารณาจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกล่าวว่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นภายในปริมาตรควบคุม มีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ปริมาตรควบคุมกับพลังงานที่สิ่งแวดล้อมกระทำบนผิวปริมาตรควบคุม เขียนในรูปความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial u_i T}{\partial x_i} = \alpha_T \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} \quad (2-23)$$

เมื่อ $\alpha_T = k/\rho c_p$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อน (Diffusivity coefficient)

สมการ (2-23) เรียกว่า สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของพลังงาน สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ในสภาวะคงตัว

2.3.2.4 สมการการถ่ายโอนประจุ (Charge transport)

สมการการถ่ายโอนประจุเป็นส่วนสำคัญในการหาค่าโอห์มมิกโอเวอร์โพเทนเชียลในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง รูปแบบทั่วไปของสมการการถ่ายโอนประจุในสภาวะคงตัว มีรูปสมการเป็น

$$\nabla \cdot \vec{i} = \nabla \cdot (-\sigma_m \nabla \phi) = 0 \quad (2-24)$$

โดยที่ σ_m คือ ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนหรือไอออนของเซลล์

ϕ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์

บทที่ 3

การกำหนดปัญหาและการตรวจสอบผลการคำนวณ

ในบทนี้เป็นการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้สำหรับงานวิจัย และพร้อมทั้งทำการตรวจสอบผลการคำนวณกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อ ดังนี้

หัวข้อ 3.1 วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

หัวข้อ 3.2 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

หัวข้อ 3.3 การกำหนดสมการและขอบเขตเงื่อนไขที่มีผลต่อการคำนวณ

หัวข้อ 3.4 การตรวจสอบผลการคำนวณกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา

หัวข้อ 3.5 สรุปผลท้ายบท

3.1 วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน ไม่ว่าจะเป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นเอง หรือโปรแกรมเชิงพาณิชย์โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่

3.1.1 ขั้นตอนการประมวลผล

ขั้นตอนการประมวลผล (Pre-processing) หมายถึง ขั้นตอนเตรียมการโดยระบุรายละเอียดของการกำหนดปัญหาและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

3.1.1.1 การกำหนดลักษณะของปัญหา

3.1.1.2 การกำหนดขนาด จำนวนและรูปแบบการจัดวางกริด (Grid) คือ การสร้างและการจัดวางกริดบนแบบจำลองการไหล (Computational domain) ให้มีความเหมาะสมซึ่งส่งผลถึงการประหยัดทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

3.1.1.3 การกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ให้เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณา

3.1.1.4 การกำหนดคุณสมบัติของของไหล

3.1.1.5 การกำหนดค่าขอบเขตเงื่อนไขและค่าเริ่มต้นให้กับปัญหาที่พิจารณา

3.1.2 ขั้นตอนการประมวลผล

ขั้นตอนการประมวลผล (Solving) หมายถึง ขั้นตอนการประยุกต์วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการนำไปใช้แก้ปัญหา โดยการคำนวณในงานวิจัยนี้ทั้งหมดใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยมีส่วนดังนี้

3.1.2.1 ทำการ discretize ทั่วทั้งสมการ โดยการประมาณเทอมต่างๆ คือ เทอมการพา (Convection term) เทอมการแพร่ (Diffusion term) และเทอมแหล่งกำเนิด (Source term) ด้วยแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical scheme) ที่เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต

3.1.2.2 ทำการแก้สมการพีชคณิตที่ได้จากการ discretize ทั่วทั้งสมการ ผลลัพธ์ที่ได้ เรียกว่า ผลเฉลยโดยประมาณ

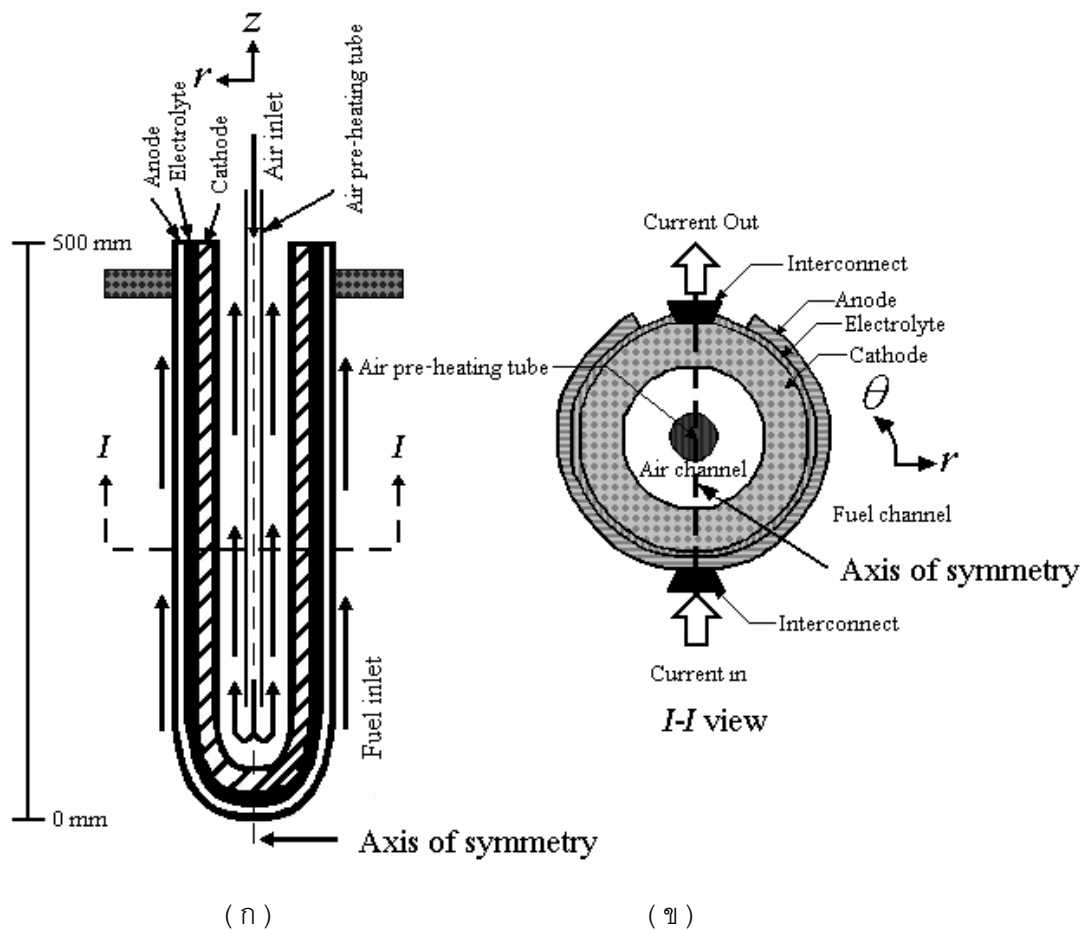
3.1.3 ขั้นตอนการแสดงผล

ขั้นตอนการแสดงผล (Post-processing) หมายถึง กระบวนการแสดงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการประมวลผลโดยปกติ ประกอบด้วย ความเร็วเฉลี่ยในทิศทางแกนต่างๆ ความดัน และอุณหภูมิ ซึ่งอยู่ในรูปของตัวเลข เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมการไหลและสภาวะการไหล จำเป็นต้องสร้างผลลัพธ์เหล่านี้ให้อยู่ในรูปของกราฟฟิก

3.2 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

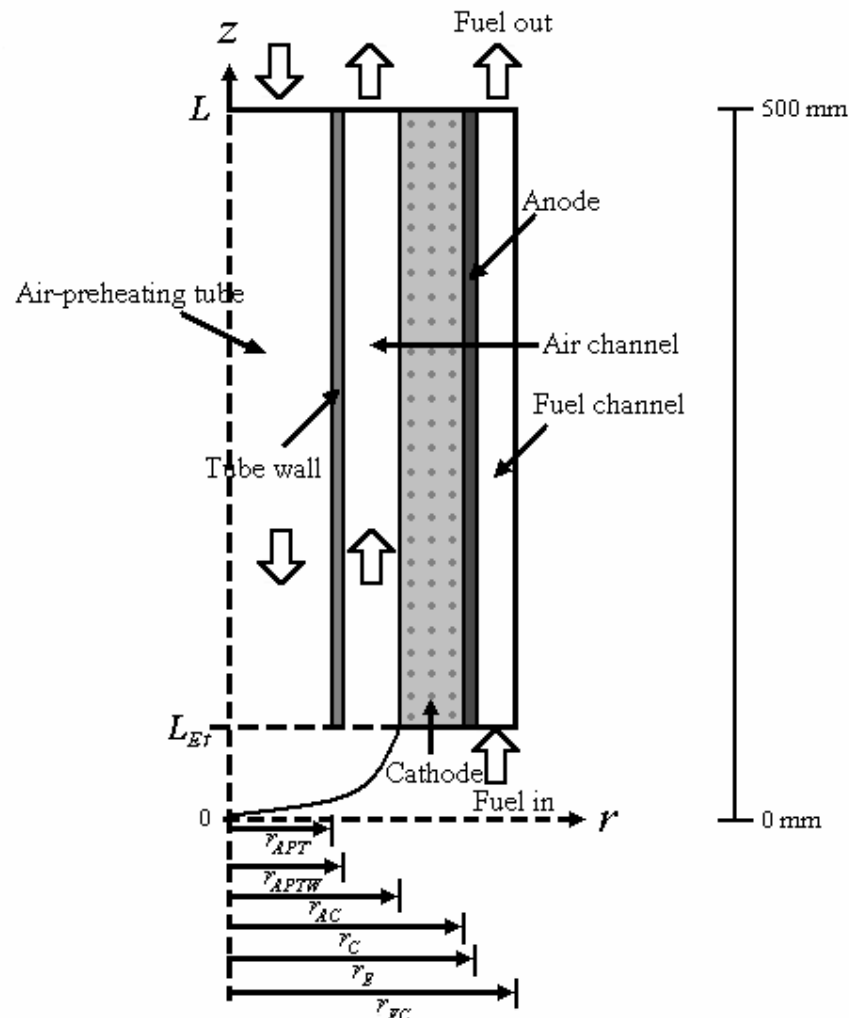
งานวิจัยนี้ทำการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง โดยนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของฮาจิฮาระ มิชิบาตะ คิมูระ จัสซคาร์ ทอมลินส์ และ เวโย [Hagiwara, A., Michibata, H., Kimura, A., Jaszcar, M.P., Tomlins, G.W. and Veyo, S.E, 1999] ซึ่งก่อนหน้านี้ สุวรรณวรังกุล [Suwanwarangkul, R., 2005] ได้ทำแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองของฮาจิฮาระ มิชิบาตะ คิมูระ จัสซคาร์ ทอมลินส์ และ เวโย [Hagiwara, A., Michibata, H., Kimura, A., Jaszcar, M.P., Tomlins, G.W. and Veyo, S.E, 1999] โดยแบบจำลองที่ใช้นั้นใช้โปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS™ ในการคำนวณ ซึ่งเป็นการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element method) แต่สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม FLUENT และเป็นการคำนวณโดยใช้พื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยซัพพอร์ทตั้งทูป (Supporting tube) แคโทด อิเล็กโทรไลต์ และแอโนด ประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิงประเภทท่อที่มีปลายปิดหนึ่งด้าน ดังแสดงในภาพประกอบ 7 โดยที่กำหนดให้ไม่มีความแตกต่างระหว่างซัพพอร์ทตั้งทูปและแคโทด ดังนั้นแบบจำลองนี้สมการการถ่ายโอนพลังงานและการถ่ายโอนมวลผ่านซัพพอร์ทตั้งทูปจึงเหมือนกับแคโทด

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



ภาพประกอบ 7 รูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ (ก) ทิศทางการไหลของก๊าซ
(ข) พื้นที่ภาคตัดขวางของเซลล์

เนื่องจากแบบจำลองนี้ การไหลภายในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแบบสมมาตร ทำให้สามารถคำนวณในระบบสองมิติได้ โดยกำหนดให้แกนกลางของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าขอบเขตเงื่อนไขเป็นสมมาตร ดังนั้นจึงคำนวณเพียงด้านเดียวของแกนสมมาตร ดังแสดงในภาพประกอบ 8 ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณในระบบสองมิติโดยคิดเฉพาะในระนาบ $r-z$ เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และความเข้มข้นของก๊าซ



ภาพประกอบ 8 รูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อตามแบบจำลอง

3.3 การกำหนดสมการและขอบเขตเงื่อนไขที่มีผลต่อการคำนวณ

3.3.1 สมการควบคุมสำหรับการคำนวณ

สมการควบคุมสำหรับการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลของเซลล์เชื้อเพลิง ใช้สมการการอนุรักษ์ทั่วไป ซึ่งประกอบด้วย

3.3.1.1 การอนุรักษ์มวล (Mass conservation)

$$\begin{aligned} & \text{rate of mass change} + \text{net rate of mass change} = 0 \\ & \text{per unit volume} \quad \text{per unit volume by convection} \\ & \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho) + \nabla \cdot (\varepsilon \rho \mathbf{U}) = 0 \end{aligned} \quad (3-1)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

$\mathbf{U}$ คือ เวกเตอร์ความเร็วของของไหล

ε คือ ขนาดของรูพรุน ยกตัวอย่างเช่น $\varepsilon = 0.3$ สำหรับอิเล็กทรอนิกส์ $\varepsilon = 1$ สำหรับช่องทางการไหล และ $\varepsilon = 0$ สำหรับอิเล็กทรอนิกส์ โดยที่ขนาดของรูพรุนจะมีค่าเท่ากันในทุกสมการควบคุม

3.3.1.2 การอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation)

$$\begin{aligned} & \text{rate of momentum change} + \text{net rate of momentum change} \\ & \text{per unit volume} \quad \text{per unit volume by convection} \\ & = \text{net rate of momentum change} + \text{net rate of momentum change} \\ & \text{per unit volume by pressure} \quad \text{per unit volume by viscous friction} \\ & + \text{net rate of momentum change} \\ & \text{per unit volume by pore structure} \\ & \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\varepsilon \rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\varepsilon \nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon \zeta) + \frac{\varepsilon^2 \mu \mathbf{U}}{\kappa} \end{aligned} \quad (3-2)$$

โดยที่ ζ คือ เทนเซอร์ความเค้นเฉือนของของไหล

μ คือ ความหนืดของของไหล

κ คือ permeability (m^2)

สำหรับเทอมสุดท้ายทางขวามือของสมการ เรียกว่า กฎของดาร์ซี (Darcy's law)

3.3.1.3 การอนุรักษ์มวลของสารแต่ละชนิด (Species conservation)

$$\begin{aligned}
 & \text{rate of a species mass change} + \text{net rate of a species mass change} \\
 & \text{per unit volume} \qquad \qquad \qquad \text{per unit volume by convection} \\
 = & \text{net rate of a species mass change} + \text{net rate of a species mass change} \\
 & \text{per unit volume by diffusion} \qquad \qquad \text{per unit volume by electrical reaction} \\
 \\
 & \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho X_i) + \nabla \cdot (\varepsilon \rho \mathbf{U} X_i) = \nabla \cdot \mathbf{J}_i + S_i \quad (3-3)
 \end{aligned}$$

และ

$$S_i = M_i \frac{j}{n_i F} \quad (3-4)$$

โดยที่ X_i คือ สัดส่วนโดยมวลของสาร

J_i คือ ฟลักซ์การแพร่ของสาร

n_i คือ เลขวาเลนซ์อิเล็กตรอนของสาร i

M_i คือ มวลโมเลกุลของสาร i

3.3.1.4 การอนุรักษ์ประจุ (Charge conservation)

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

โดยที่ $\mathbf{i}_{elec}$ คือ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในอิเล็กโทรด

$\mathbf{i}_{ion}$ คือ ไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นอิเล็กโทรไลต์

3.3.2 สมมติฐานสำหรับการจำลอง

ลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพ

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยการป้อนเชื้อเพลิง ในงานวิจัยนี้ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งไฮโดรเจนจะไหลไปตามช่องทางการไหลของเชื้อเพลิงเข้าไปสัมผัสกับบริเวณที่เป็นแอโนดซึ่งไฮโดรเจนจะแพร่ผ่านรูพรุนของแอโนดไปยังบริเวณที่แอโนดสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ และ

รวมตัวกับออกซิเจนไอออนซึ่งวิ่งผ่านชั้นอิเล็กโทรไลต์มาจากขั้วแคโทดได้ น้ำ ความร้อนและอิเล็กตรอน แต่อิเล็กโทรไลต์นั้นมีคุณสมบัติไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงวิ่งไปยังขั้วแคโทดโดยผ่านทางวงจรภายนอก สำหรับด้านแคโทดที่ได้รับออกซิเจนที่ ซึ่งได้แก่ออกซิเจนจากอากาศ โดยอากาศจะไหลตามแอร์ฟรีตีตึงทูปและไหลย้อนเข้าสู่ช่องทางการไหลของอากาศ และออกซิเจนจากอากาศจะแพร่ผ่านรูพรุนของขั้วแคโทดไปยังบริเวณที่แคโทดสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ ที่อุณหภูมิการทำงาน ออกซิเจนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนได้ออกซิเจนไอออน ซึ่งจะวิ่งผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแอโนด โดยไฟฟ้าที่ผลิตได้เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสของอิเล็กโทรดกับอิเล็กโทรไลต์ และความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจะเกิดการถ่ายโอนความร้อนขึ้นภายในช่องทางการไหล และโครงสร้างของเซลล์

ดังนั้น จึงได้ตั้งสมมติฐาน ดังนี้

- 1) การไหลอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady-state)
- 2) การไหลเป็นแบบนอนไอโซเทอร์มอล (Non-isothermal)
- 3) การไหลของก๊าซในช่องทางการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar)
- 4) เชื้อเพลิงที่ใช้ คือ ไฮโดรเจนขึ้น
- 5) ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารตามแกน θ

3.3.3 ค่าขอบเขตเงื่อนไขในการคำนวณ

ตาราง 2 ตารางค่าขอบเขตเงื่อนไข [Suwanwarangkul, R., 2005]

สภาวะขอบเขต	ค่าขอบเขตเงื่อนไข
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)
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)
ทางออกของเชื้อเพลิง ($z = L, r_E < r < r_{FC}$)	$p_f = p_{f,out}; \partial u_f / \partial z = 0, \partial v_f / \partial z = 0; \partial c_i / \partial z = 0;$ $\partial T_f / \partial z = 0$

ตาราง 2 ตารางค่าขอบเขตเงื่อนไข [Suwanwarangkul, R., 2005] (ต่อ)

สภาวะขอบเขต	ค่าขอบเขตเงื่อนไข
ทางออกของอากาศ ($z = L, r_{APTW} < r < r_{AC}$)	$p_a = p_{a,out}; \partial u_a / \partial z = 0, \partial v_a / \partial z = 0; \partial c_{O_2} / \partial z = 0;$ $\partial T_a / \partial z = 0$
แกนสมมาตร ($0 < z < L, r = 0$) และ ($L_{Et} < z < L, r = r_{FC}$)	($0 < z < L, r = 0$): $\partial p_a / \partial r = 0; \partial u_a / \partial r = 0, \partial v_a / \partial r = 0; \partial c_{O_2} / \partial r = 0;$ $\partial T_a / \partial r = 0$ ($L_{Et} < z < L, r = r_{FC}$) $\partial p_f / \partial r = 0; \partial u_f / \partial r = 0, \partial v_f / \partial r = 0; \partial c_i / \partial r = 0;$ $\partial T_f / \partial r = 0$
ปลายปิดของท่อ	$\nabla p_a(r, z) = 0; u_a = 0, v_a = 0; \nabla c_{O_2}(r, z) = 0;$ $T_a = T_{f,in}$
ผนังของแอร์พรีฮีตติงทูบ ($L_{Et} < z < L, r = r_{APT}$) 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 ($L_{Et} < z < L, r = r_{AC}$)	$\partial p_a / \partial r = 0; u_a = 0, v_a = 0$
ผิวสัมผัสระหว่างแอโนดกับช่องทาง	
การไหลของเชื้อเพลิง ($L_{Et} < z < L, r = r_E$)	$\partial p_f / \partial z = 0; u_f = 0, v_f = 0$

3.4 การตรวจสอบผลการคำนวณกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา

ในหัวข้อนี้ได้ทำการตรวจสอบผลการคำนวณที่ได้กับผลการทดลองฮาากิวาระ มิชิบาตะ คิมูระ จิซาคาร์ ทอมลินส์ และ เวโย [Hagiwara, A., Michibata, H., Kimura, A., Jaszcar, M.P., Tomlins, G.W. and Veyo, S.E., 1999] ซึ่งทำการศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ โดยที่ขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์ และ

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองได้ใช้ค่าข้อมูลเช่นเดียวกับการทดลองเป็นฐานในการพิจารณา ดังแสดงในตาราง 3 และ 4 ตามลำดับ

ตาราง 3 ขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่ทดลองโดย ฮากิวาระ มิชิบาตะ คิมูระ จัสซคาร์ ทอมลินส์ และ เวโย [Hagiwara, A., Michibata, H., Kimura, A., Jaszcar, M.P., Tomlins, G.W. and Veyo, S.E, 1999]

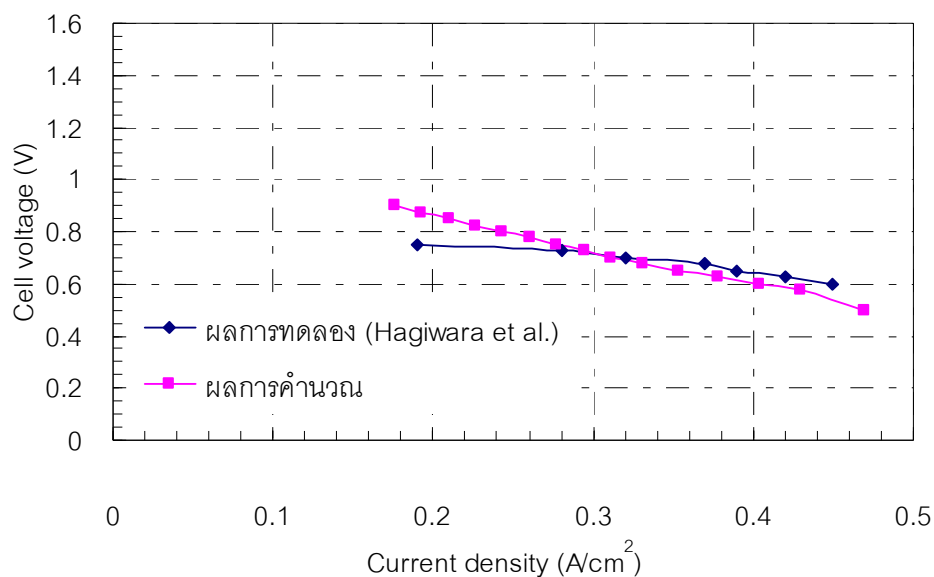
องค์ประกอบของเซลล์	ขนาด (มิลลิเมตร):
	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก / หนา / ยาว
แออร์ฟรียูทิติงทูบ	9/0.50/495
ซีฟพอร์ทิติงทูบ	13.8/1.50/500
แคโทด	15.8/1.00/500
อิเล็กโทรไลต์	15.9/0.05/500
แอโนด	16.2/0.15/500
ช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง	29.2/-/500

ตาราง 4 สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่ทดลองโดย ฮากิวาระ มิชิบาตะ คิมูระ จัสซคาร์ ทอมลินส์ และ เวโย [Hagiwara, A., Michibata, H., Kimura, A., Jaszcar, M.P., Tomlins, G.W. and Veyo, S.E, 1999]

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่กำหนด
ความดันขาเข้า (เอทีเอ็ม)	1.0
สัดส่วนโดยโมล (เปอร์เซนต์)	
เชื้อเพลิง	98.6 H ₂ /1.4 H ₂ O
อากาศ	21 O ₂ /79 N ₂
อุณหภูมิขาเข้า (เคลวิน)	
เชื้อเพลิง	1143
อากาศ	873

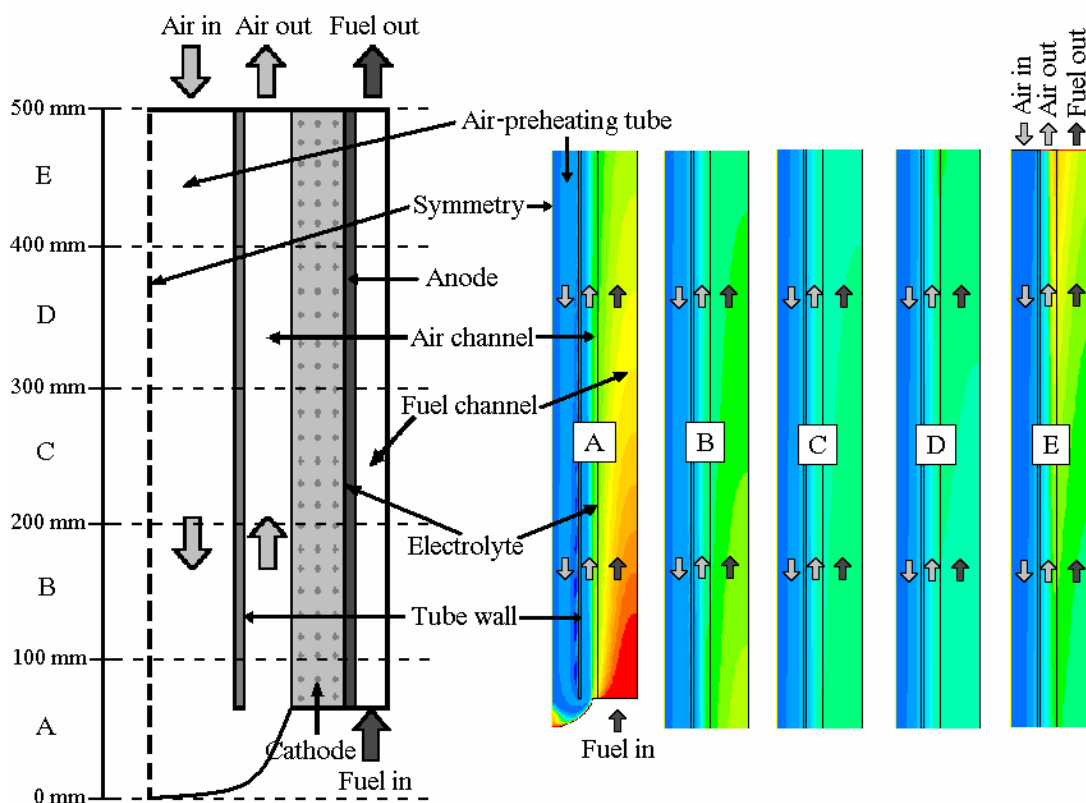
ตาราง 4 สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่ทดลองโดยฮากิ วาระ มิชิบาตะ คิมูระ จัสซคาร์ ทอมลินส์ และ เวโย [Hagiwara, A., Michibata, H., Kimura, A., Jaszcar, M.P., Tomlins, G.W. and Veyo, S.E, 1999] (ต่อ)

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่กำหนด
อัตราการไหลเชิงมวล (กิโลกรัมต่อวินาที)	
เชื้อเพลิง	0.0002
อากาศ	0.02
เงื่อนไขการทำงานของเซลล์	
ความต่างศักย์ของเซลล์ (โวลต์)	0.6 ถึง 0.8
ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	0.1 ถึง 0.5



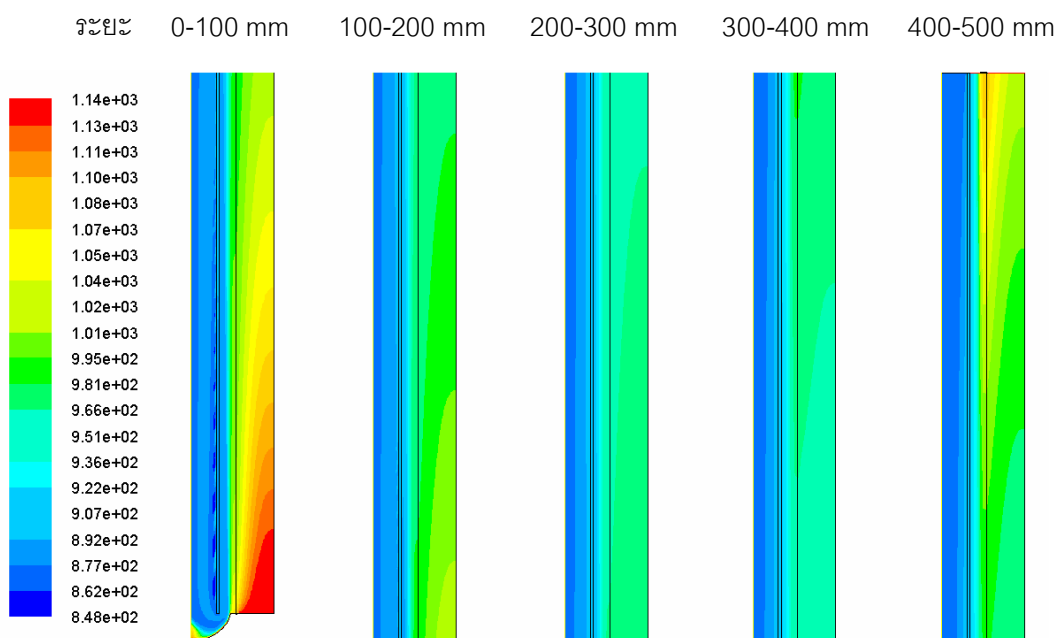
ภาพประกอบ 9 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ ฮากิวาระ มิชิบาตะ คิมูระ จัสซคาร์ ทอมลินส์ และ เวโย [Hagiwara, A., Michibata, H., Kimura, A., Jaszcar, M.P., Tomlins, G.W. and Veyo, S.E, 1999] กับผลของการคำนวณเชิงตัวเลขของงานวิจัยนี้

จากผลของการคำนวณเชิงตัวเลข ดังแสดงในภาพประกอบ 9 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงค่าระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองของฮาจิวาระ มิชิบาตะ คิมูระ จัสซาร์ ทอมลินส์ และ เวโย [Hagiwara, A., Michibata, H., Kimura, A., Jaszcar, M.P., Tomlins, G.W. and Veyo, S.E, 1999] พบว่า ในช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่า 0.18 ถึง 0.26 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีความแตกต่างจากผลการทดลองสูงกว่าช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่า 0.26 ถึง 0.47 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องมาจากมีการจำกัดในสมการการแก้ปัญหาการคำนวณทางคณิตศาสตร์และความแตกต่างระหว่างการทดลองจริงกับแบบจำลองที่ใช้ในการจำลอง โดยที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในช่วง 0.26 ถึง 0.47 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรนี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามค่าความแตกต่างของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 7.27 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้



ภาพประกอบ 10 ภาพแสดงรายละเอียดของตัวอย่างผลการคำนวณ โดยที่ A คือ ระยะ 0-100 มิลลิเมตร, B คือ ระยะ 100-200 มิลลิเมตร, C คือ ระยะ 200-300 มิลลิเมตร, D คือ ระยะ 300-400 มิลลิเมตร และ E คือ ระยะ 400-500 มิลลิเมตร

ตัวอย่างผลการคำนวณที่ 0.7 โวลต์ ที่สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์ตามตาราง 3 และ 4 โดยแสดงผลของอุณหภูมิ ความเร็วภายในช่องทางการไหลของอากาศและเชื้อเพลิง รวมถึงสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนและน้ำภายในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง ซึ่งผลของอุณหภูมิดังแสดงในภาพประกอบ 11 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1143 เคลวิน ที่ทางเข้าของเชื้อเพลิง โดยอุณหภูมิของอากาศในแอร์พรีฮีตติ้งทูบมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเข้าสู่ช่องทางการไหลของอากาศเนื่องจากอุณหภูมิที่ปลายปิดของท่อมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ทางเข้าของอากาศ และอุณหภูมิของอากาศในช่องทางการไหลของอากาศพบว่ามีเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

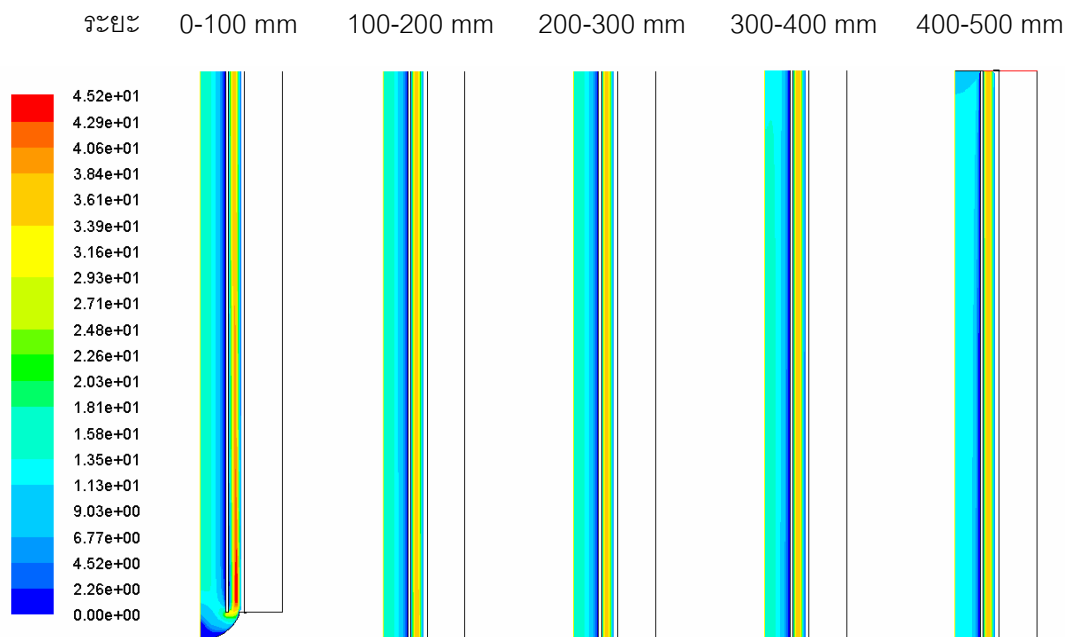


ภาพประกอบ 11 อุณหภูมิภายในเซลล์ (เคลวิน)

สำหรับอุณหภูมิของเชื้อเพลิงในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง พบว่า อุณหภูมิของเชื้อเพลิงในช่วง 0 ถึง 300 มิลลิเมตร มีค่าลดลงเรื่อยๆ หลังจากนั้นอุณหภูมิของเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากพลังงานความร้อนที่ได้รับจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง

สำหรับความเร็วภายในช่องทางการไหลของอากาศและเชื้อเพลิง โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงดังแสดงในภาพประกอบ 12 และ 13 ตามลำดับ โดยที่ความเร็วของอากาศในแอร์พรีฮีตติ้งทูบมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยที่ตรงทางเข้าของอากาศ แล้วความเร็วของอากาศจะมีความสม่ำเสมอตลอดระยะของท่อจนถึงปลายปิดของท่อ หลังจากนั้นอากาศไหลเข้าสู่ช่องทางการไหลของอากาศซึ่งช่องทาง

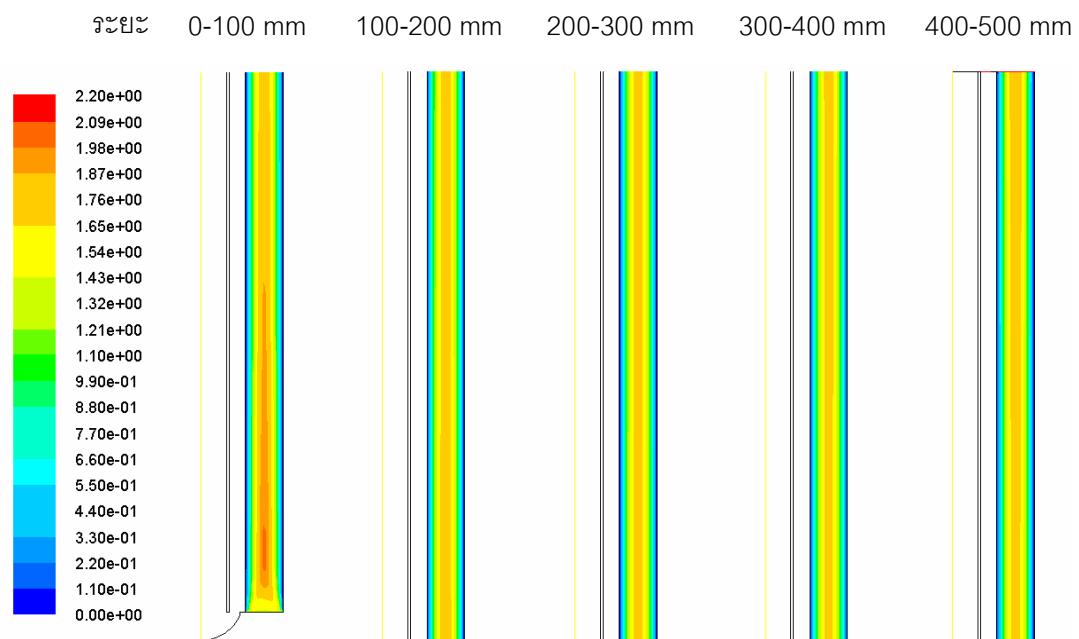
การไหลของอากาศนั้น มีขนาดเล็กกว่าแอร์ฟรีตีตึงทูปส่งผลให้ความเร็วของอากาศมีค่าสูงขึ้น และหลังจากนั้นความเร็วของอากาศในช่องทางการไหลของอากาศจะมีความสม่ำเสมอตลอดระยะของท่อ จนถึงทางออกของท่อ



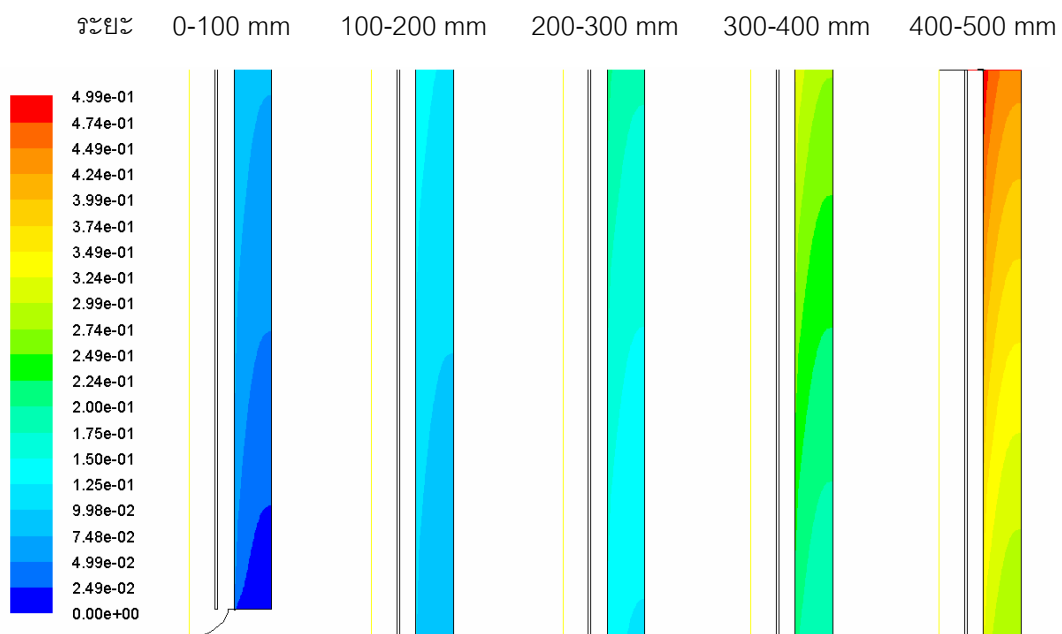
ภาพประกอบ 12 ความเร็วในช่องทางการไหลของอากาศ (เมตรต่อวินาที)

ซึ่งผลที่ได้จากความสม่ำเสมอของทั้งอุณหภูมิและความเร็วส่งผลที่ดีต่อการนำมาใช้งานจริง เนื่องจากการลดความเสี่ยงต่อการเกิดความเค้นเนื่องจากความร้อนที่เกินกว่าวัสดุจะยอมรับได้ และยังทำให้เซลล์เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างสม่ำเสมออีกด้วย

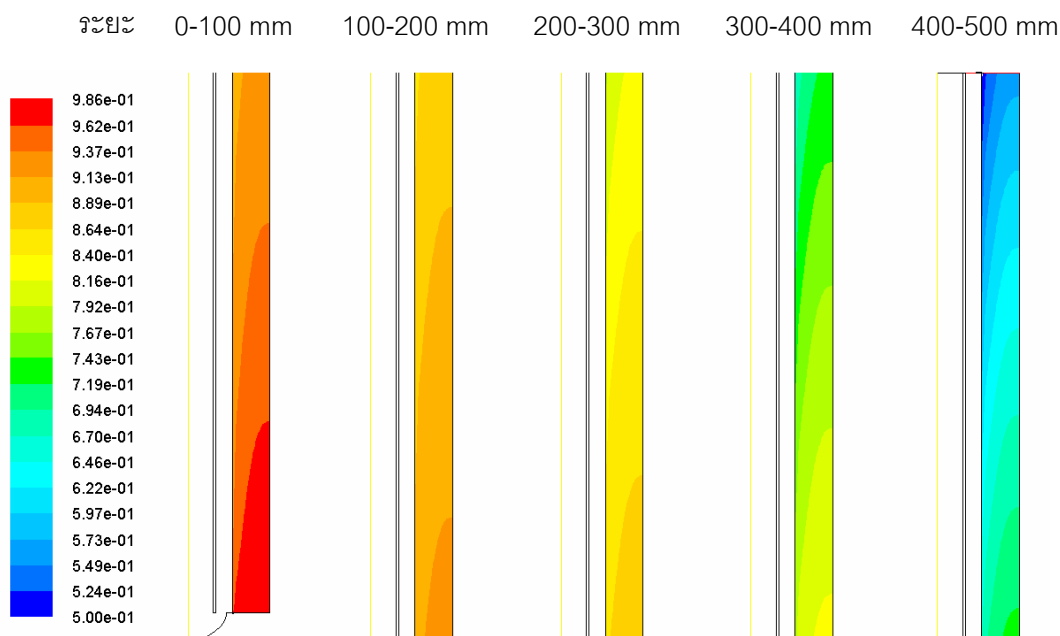
สำหรับความเร็วของเชื้อเพลิงภายในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง พบว่า มีค่าลดลงตลอดความยาวของเซลล์ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปริมาณของไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เปลี่ยนรูปไปเป็นน้ำภายในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง ถึงแม้ว่าอัตราเชิงโมลของปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้จะมีค่าเท่ากับอัตราเชิงโมลของปริมาณการเกิดของน้ำ แต่สำหรับอัตราเชิงมวลของปริมาณการเกิดของน้ำมีค่ามากกว่าอัตราเชิงมวลของปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้ถึง 9 เท่า จากเหตุผลดังกล่าว ความเร็วของเชื้อเพลิงมีค่าลดลงเพราะว่ามวลที่เพิ่มขึ้นของน้ำ ซึ่งสัดส่วนโดยมวลของน้ำและไฮโดรเจนในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิงได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 14 และ 15 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 13 ความเร็วในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง (เมตรต่อวินาที)



ภาพประกอบ 14 สัดส่วนโดยมวลของน้ำในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง



ภาพประกอบ 15 สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง

3.5 สรุปผลท้ายบท

จากการศึกษาในหัวข้อต่างๆ ที่ผ่านมานั้นสามารถนำมาสรุปได้ดังนี้

การตรวจสอบผลการคำนวณจากแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ ซึ่งใช้โปรแกรม FLUENT ในการคำนวณ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองของฮาากิวาระ มิชิบาตะ คิมูระ จัสซคาร์ ทอมลินส์ และ เวโย [Hagiwara, A., Michibata, H., Kimura, A., Jaszcar, M.P., Tomlins, G.W. and Veyo, S.E, 1999] พบว่า ในช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่า 0.18 ถึง 0.26 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีความแตกต่างจากผลการทดลองสูงกว่าช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่า 0.26 ถึง 0.47 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องมาจากมีการจำกัดในสมการการแก้ปัญหาการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในช่วง 0.26 ถึง 0.47 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรนี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามค่าความแตกต่างของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 7.27 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ในช่วง 0.6 ถึง 0.8 โวลต์ และที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในช่วง 0.1 ถึง 0.5 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ทำให้แบบจำลองในงานวิจัยนี้รวมถึงโปรแกรมที่ใช้พื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม สามารถ

นำมาเป็นเครื่องมือในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลและนำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมต่างๆ
ภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งในเบื้องต้นก่อนการออกแบบได้

บทที่ 4

การศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

สำหรับในบทนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหล เชิงมวล ความยาว และเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เชื้อเพลิง ที่มีผลต่อพฤติกรรมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง โดยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ ดังนี้

หัวข้อ 4.1 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

หัวข้อ 4.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

หัวข้อ 4.3 สรุปผลท้ายบท

การศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ทำการคำนวณแบบจำลองการไหล 3 มิติ ซึ่งขนาดของแบบจำลองการไหลได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 16 และตาราง 5 ตามลำดับ สำหรับแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลขในการประมาณเทอมการพาและการแพร่ได้ใช้แบบแผนวิธีคิวิก (QUICK) กระบวนการหาคำตอบใช้วิธีซิมเพล็กซ์ (SIMPLEX)

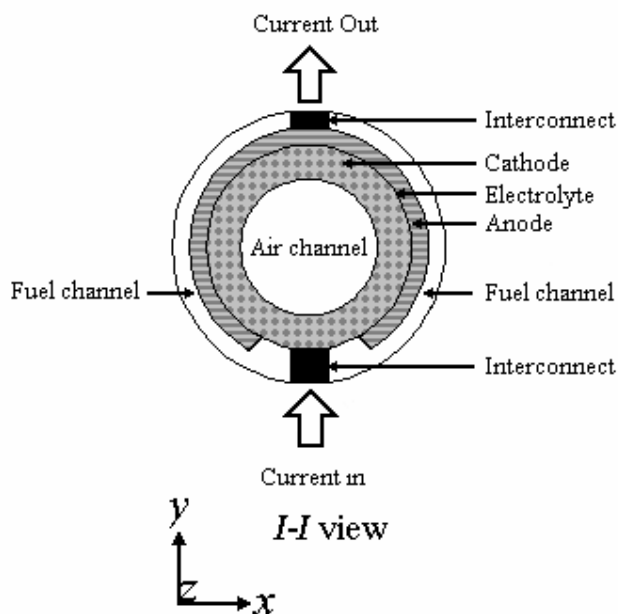
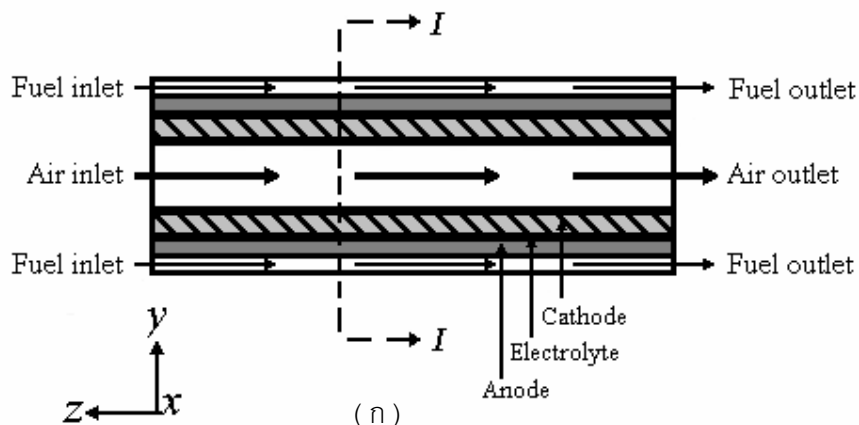
4.1 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของเซลล์

งานวิจัยนี้ทำการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง โดยกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยช่องทางการไหลของอากาศ แคโทด อิเล็กโทรไลต์ แอโนด และช่องทางการไหลของเชื้อเพลิงประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิงประเภทท่อในลักษณะปลายเปิดทั้งสองด้าน ดังแสดงในภาพประกอบ 16 ทั้งนี้กำหนดให้แคโทดและแอโนดมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 6 และ 7 มิลลิเมตรตามลำดับ สำหรับอิเล็กโทรไลต์มีความหนา 40 ไมครอน ซึ่งอยู่ระหว่างชั้นของแคโทดและแอโนด โดยเซลล์เชื้อเพลิงมีความยาว 130.0 มิลลิเมตร โดยขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ใช้ในการจำลองได้สรุปไว้ในตาราง 5

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง กำหนดให้ผนังด้านนอกของอินเตอร์คอนเนกของทั้งแคโทดและแอโนดไม่มีกระแสไฟฟ้ารั่วออกมา โดยอากาศและเชื้อเพลิงที่ใช้เข้ามาทางช่องทางการไหลของอากาศและช่องทางการไหลของเชื้อเพลิงตามลำดับ หลังจากนั้นออกซิเจนจากอากาศ

จะแพร่ผ่านรูพรุนของแคโทดไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแคโทดกับอิเล็กโทรไลต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนเกิดเป็นออกซิเจนไอออน (O^{2-}) โดยที่ออกซิเจนไอออนจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแคโทดกับอิเล็กโทรไลต์ไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแอโนดกับอิเล็กโทรไลต์โดยผ่านอิเล็กโทรไลต์ ในกรณีที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ไฮโดรเจนจะแพร่ผ่านรูพรุนของแอโนดไปทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับออกซิเจนไอออนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแอโนดกับอิเล็กโทรไลต์เกิดน้ำเป็นผลิตภัณฑ์



ภาพประกอบ 16 รูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ (ก) ทิศทางการไหลของก๊าซ
(ข) พื้นที่ภาคตัดขวางของเซลล์

ตาราง 5 ขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ

องค์ประกอบของเซลล์	ขนาด (มิลลิเมตร):
	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก / หนา / ยาว
ช่องทางการไหลของอากาศ	4-/130
แคโทด	6/2/130
อิเล็กโทรไลต์	6/0.04/130
แอโนด	7/1/130
ช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง	8/1/130

4.1.2 สมมติฐานสำหรับการจำลอง

สมมติฐานที่ใช้ในการแก้ปัญหาสำหรับแบบจำลองในงานวิจัยนี้ เป็นดังนี้

- 1) การไหลอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady-state)
- 2) การไหลเป็นแบบนอนไอโซเทอร์มอล (Non-isothermal)
- 3) การไหลของก๊าซในช่องทางการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar)
- 4) เชื้อเพลิงที่ใช้ คือ ไฮโดรเจนชั้น (ไฮโดรเจน 97 เปอร์เซ็นต์ และ น้ำ 3 เปอร์เซ็นต์)

4.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณ

จำนวนของกริดที่ใช้ในการจำลองการไหลภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง เท่ากับ 67760 กริด การคำนวณจะสำเร็จเมื่อความคลาดเคลื่อนมีค่าอย่างมากที่สุดไม่เกิน 10^{-6} ในส่วนของเวลาการคำนวณใช้เวลาประมาณ 35 ถึง 40 นาที โดยที่ความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์เท่ากับ Pentium IV 1.67 GHz และ 1 GB of RAM

4.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

การศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมกริดการไหล รวมถึงประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง โดยที่รูปร่างและขนาดพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 16 และตาราง 5 ตามลำดับ สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการศึกษาในบทนี้ ประกอบด้วย

- 1) อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ
- 2) อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ
- 3) ความยาวของเซลล์
- 4) เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์

โดยได้สรุปค่าพารามิเตอร์และเงื่อนไขการทำงานของเซลล์ไว้ในตาราง 6

ตาราง 6 สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่กำหนด
ความดันขาเข้า (เอทีเอ็ม)	1.0
สัดส่วนโดยโมล (เปอร์เซนต์)	
เชื้อเพลิง	97 H ₂ /3 H ₂ O
อากาศ	21 O ₂ /79 N ₂
จำนวนโมล	
ไฮโดรเจน : อากาศ	1 : 9
อุณหภูมิขาเข้า (เคลวิน)	
เชื้อเพลิง	873 ถึง 1173
อากาศ	873 ถึง 1173
อัตราการไหลเชิงมวล (กิโลกรัมต่อวินาที)	
เชื้อเพลิง	1.601×10^{-7} ถึง 3.202×10^{-7}
อากาศ	1.683×10^{-5} ถึง 3.366×10^{-5}
ความยาวของเซลล์ (มิลลิเมตร)	80.0 ถึง 200.0
เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ (มิลลิเมตร)	4.0 ถึง 16.0
เงื่อนไขการทำงานของเซลล์	
ความต่างศักย์ของเซลล์ (โวลต์)	0.5 ถึง 1.0

จากตาราง 6 สามารถสรุปกรณีที่ทำการศึกษาในบทนี้ได้ทั้งหมดรวมเป็น 5 กรณี โดยได้อธิบายกรณีที่ทำการศึกษาในแต่ละกรณีไว้ในตาราง 7

ตาราง 7 ตารางสรุปกรณีที่ทำการศึกษา

กรณีที่ศึกษา	ค่าที่กำหนด
กรณีที่ 1	อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาทีและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 1.683×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาทีที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873, 973, 1073 และ 1173 เคลวิน
กรณีที่ 2	อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาทีและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 2.525×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาทีที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873, 973, 1073 และ 1173 เคลวิน
กรณีที่ 3	อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาทีและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 3.366×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาทีที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873, 973, 1073 และ 1173 เคลวิน
กรณีที่ 4	อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 3.366×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที และอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ที่ความยาวของเซลล์ 80.0, 100.0, 130.0, 150.0, 180.0 และ 200.0 มิลลิเมตร
กรณีที่ 5	อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 3.366×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที และอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ 4.0, 6.0, 8.0, 12.0 และ 16.0 มิลลิเมตร

สำหรับผลที่ได้จากการคำนวณในการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ ความยาวของเซลล์ และเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ที่ทำการศึกษาในบทนี้ ได้แสดงค่าไว้ในตาราง 8

ตาราง 8 สรุปผลการคำนวณสำหรับทุกกรณีศึกษา

กรณีศึกษา / พารามิเตอร์ (หน่วย)	ความ หนาแน่นของ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ ต่อตาราง เซนติเมตร)	ความ หนาแน่นของ กำลังไฟฟ้า (วัตต์ต่อ ตาราง เซนติเมตร)	ประสิทธิภาพ ทางอุณหภูมิ ศาสตร์ (เปอร์เซ็นต์)	
			กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	
กรณีที่ 1				
อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและ อากาศ (เคลวิน)				
873	0.60	0.32	7.84	49.16
973	0.57	0.30	7.31	45.71
1073	0.53	0.27	6.72	41.91
1173	0.49	0.25	6.09	37.89
กรณีที่ 2				
อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและ อากาศ (เคลวิน)				
873	0.74	0.38	9.33	39.00
973	0.70	0.36	8.74	36.43
1073	0.65	0.33	8.05	33.48
1173	0.59	0.30	7.27	30.15
กรณีที่ 3				
อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและ อากาศ (เคลวิน)				
873	0.83	0.42	10.21	32.00
973	0.78	0.39	9.62	30.07
1073	0.73	0.36	8.92	27.82
1173	0.66	0.33	8.14	25.32

ตาราง 9 สรุปผลการคำนวณ (ต่อ)

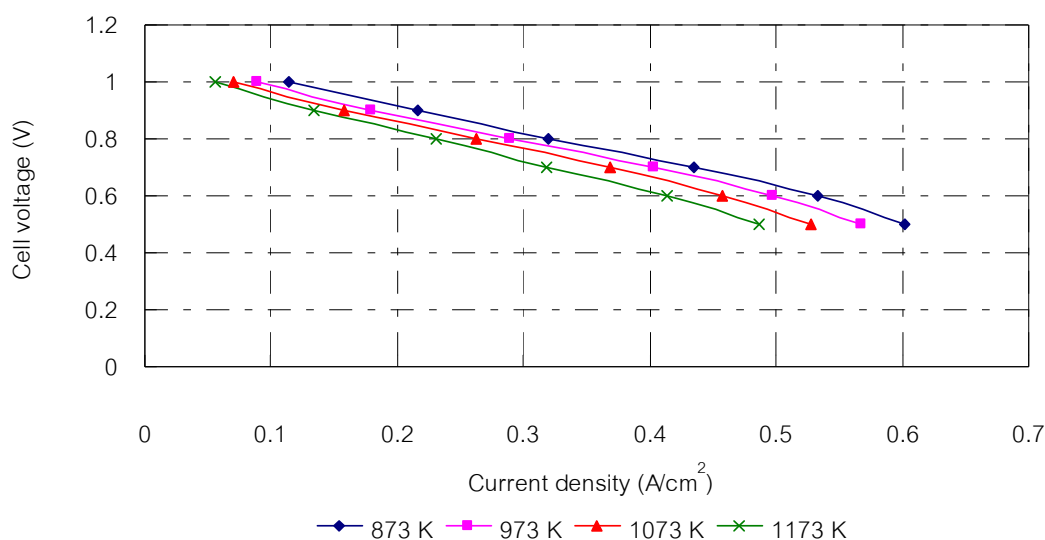
กรณีศึกษา / พารามิเตอร์ (หน่วย)	ความ หนาแน่นของ	ความ หนาแน่นของ	ประสิทธิภาพ	
	กระแสไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า	ทางอุณหภูมิ
	(แอมแปร์	(วัตต์ต่อ	(วัตต์)	ศาสตร์
	ต่อตาราง	ตาราง		(เปอร์เซ็นต์)
	เซนติเมตร)	เซนติเมตร)		
กรณีศึกษาที่ 4				
ความยาวของเซลล์ (มิลลิเมตร)				
80.0	0.95	0.48	7.20	22.56
100.0	0.90	0.45	8.50	26.65
130.0	0.83	0.42	10.21	32.00
150.0	0.79	0.40	11.30	35.44
180.0	0.73	0.38	12.74	39.93
200.0	0.69	0.36	13.60	42.64
กรณีศึกษาที่ 5				
เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ (มิลลิเมตร)				
4.0	1.18	0.59	7.24	22.72
6.0	0.99	0.50	8.44	26.47
8.0	0.83	0.42	10.21	32.00
12.0	0.63	0.33	12.05	37.78
16.0	0.47	0.27	13.08	41.00

4.2.1 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศของเชื้อเพลิงและอากาศ (กรณีศึกษาที่ 1 – 3)

กรณีศึกษาที่ 1 ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีค่า 1.601×10^{-7} และ 1.683×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาทีตามลำดับ

ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศของเชื้อเพลิงและอากาศ โดยเพิ่มขึ้นจาก 873 ถึง 1173 เคลวิน และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าคงที่ ผลการคำนวณดังแสดงในภาพประกอบ

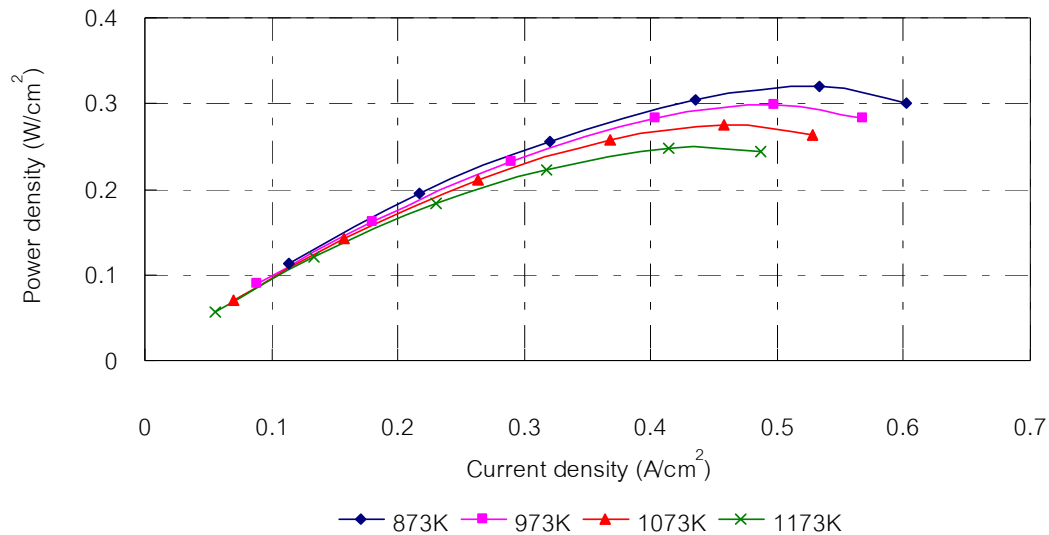
17 พบว่า เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งทุกอุณหภูมิที่ทำการศึกษาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเท่ากัน โดยที่เมื่อค่าอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่า 873 เคลวิน ให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.60 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และจากภาพประกอบ 18 พบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จนถึงจุดๆ หนึ่งจะมีค่าลดลง โดยที่ทุกๆ อุณหภูมิที่ทำการศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเหมือนกัน ซึ่งที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่า 873 เคลวิน ให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.32 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.53 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.6 โวลต์



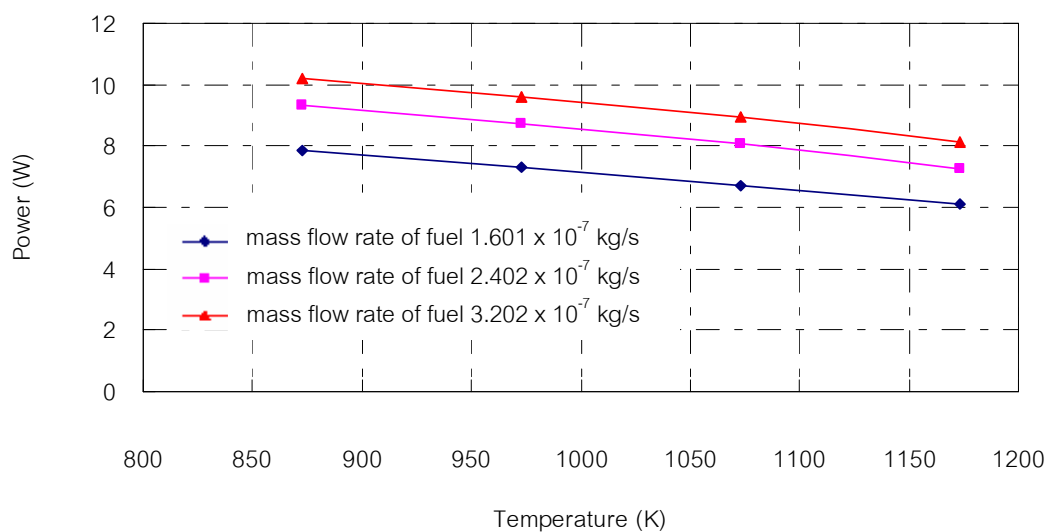
ภาพประกอบ 17 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ

สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง ซึ่งเป็นลักษณะเช่นนี้เหมือนกันในกรณีที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่า

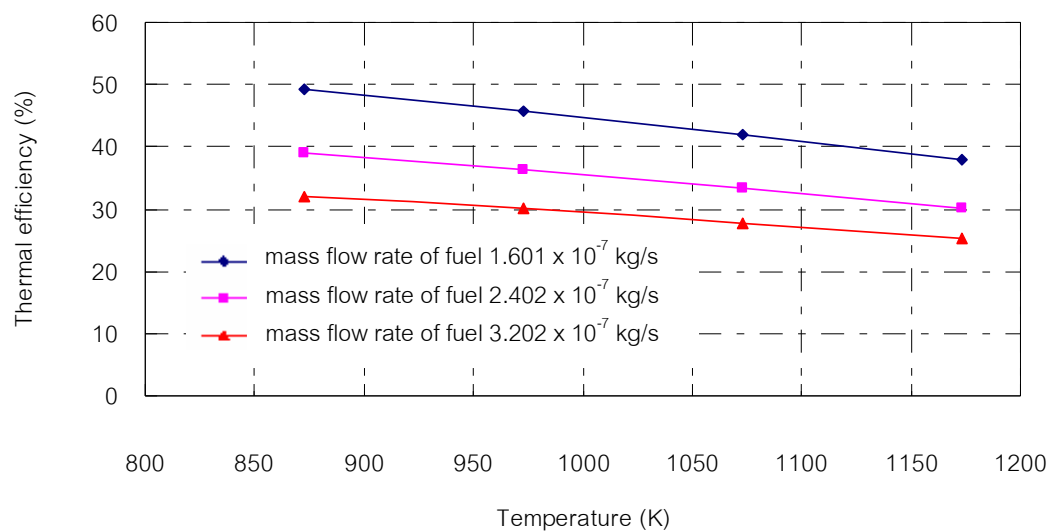
เพิ่มขึ้น โดยที่ในกรณีศึกษาที่ 1 ที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่า 873 เคลวิน มีค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 7.84 วัตต์ และมีประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์สูงสุดเท่ากับ 49.16 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพประกอบ 19 และ 20 ตามลำดับ



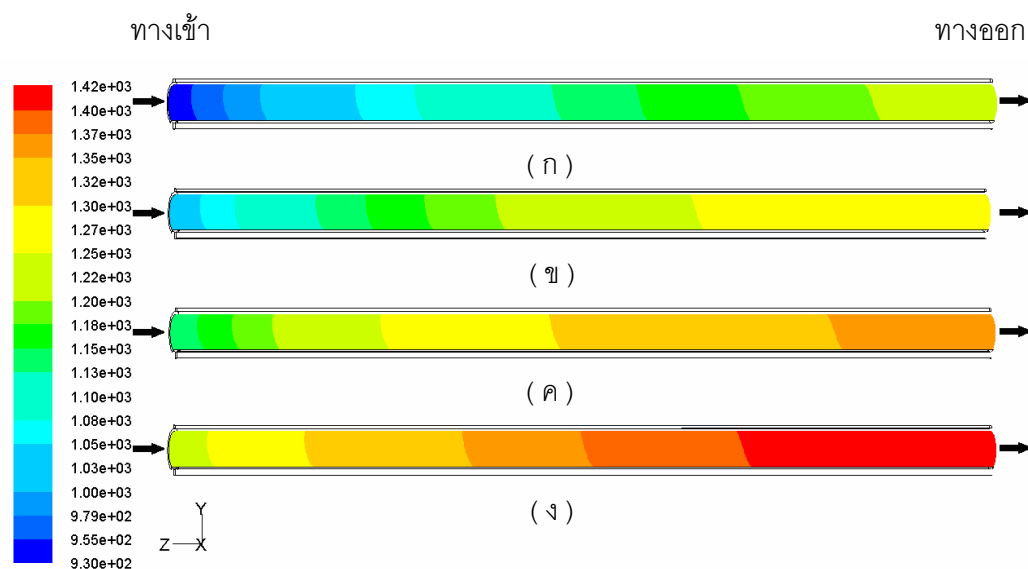
ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ



ภาพประกอบ 19 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าในกรณีศึกษาที่ 1 ถึง 3 ที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ

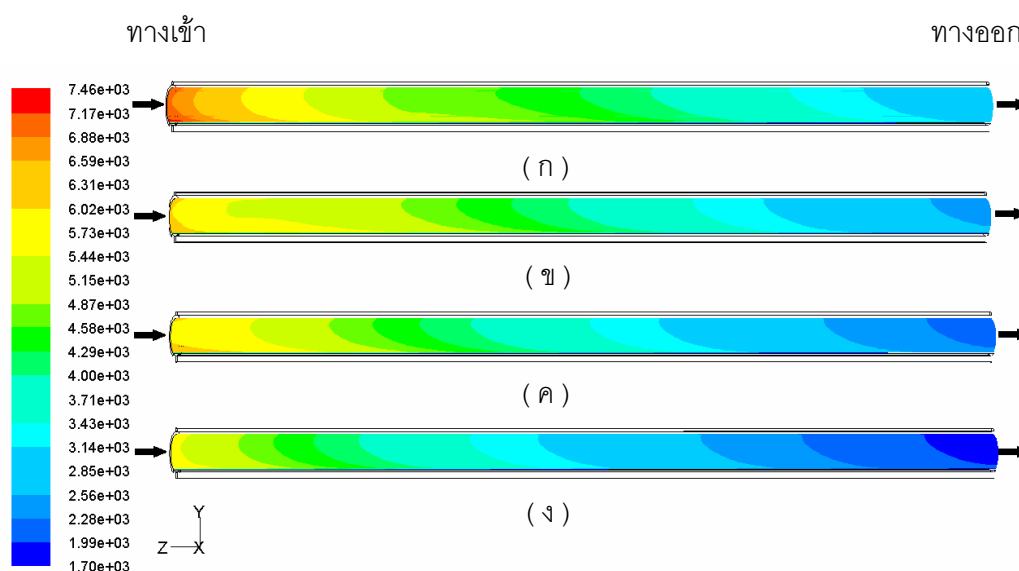


ภาพประกอบ 20 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ในกรณีศึกษาที่ 1 ถึง 3 ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ

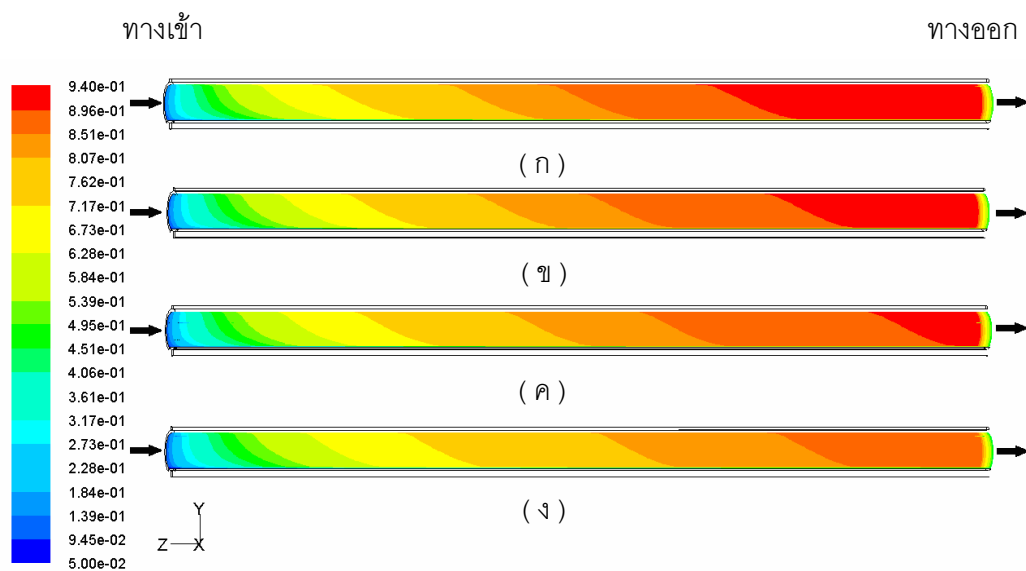


ภาพประกอบ 21 ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน

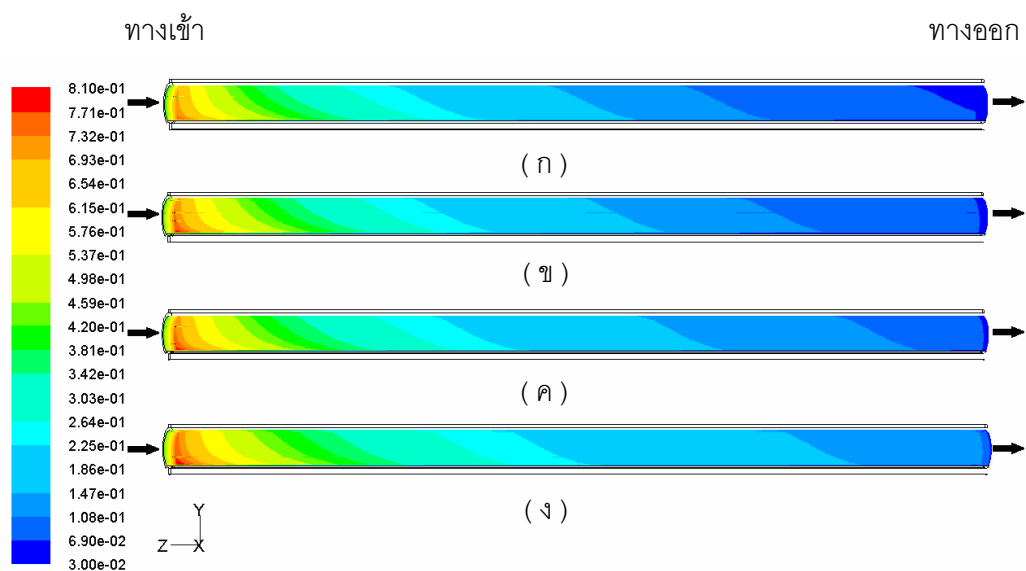
ตัวอย่างผลการคำนวณที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.7 โวลต์ โดยแสดงผลของอุณหภูมิ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า สัดส่วนโดยมวลของน้ำ และสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ซึ่งผลของอุณหภูมิดังแสดงในภาพประกอบ 21 แสดงค่าอุณหภูมิภายในเซลล์ที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตลอดระยะของเซลล์ เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ได้รับจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ แต่สำหรับค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้านั้น พบว่า ทางขาเข้าของเซลล์ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่ามากกว่า หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 22 สำหรับสัดส่วนโดยมวลของน้ำและสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน พบว่า สัดส่วนโดยมวลของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนมีค่าลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์ที่เปลี่ยนรูปไปเป็นน้ำ ดังแสดงในภาพประกอบ 23 และ 24 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 22 ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อัตรา
การไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของ
เชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง)
1173 เคลวิน

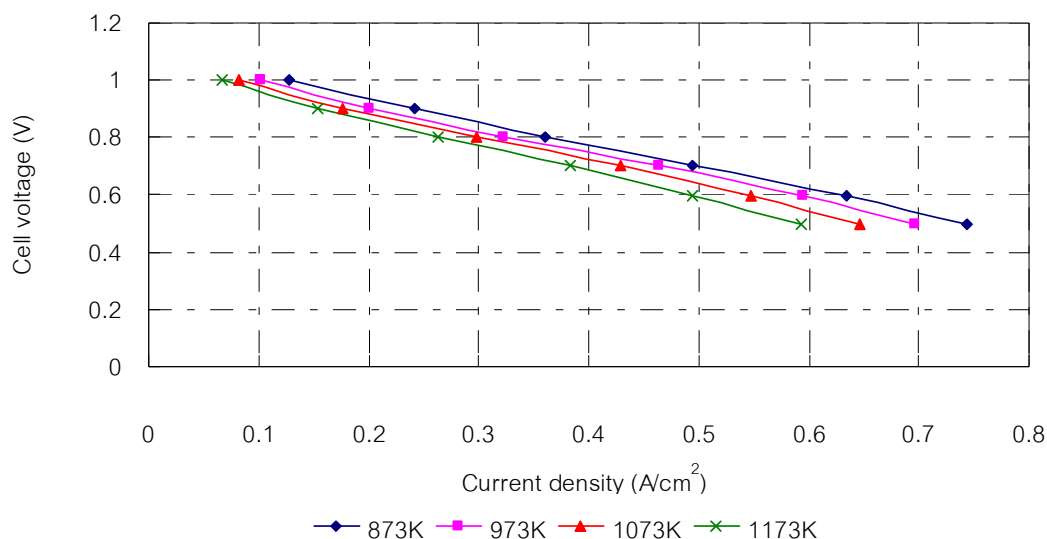


ภาพประกอบ 23 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน

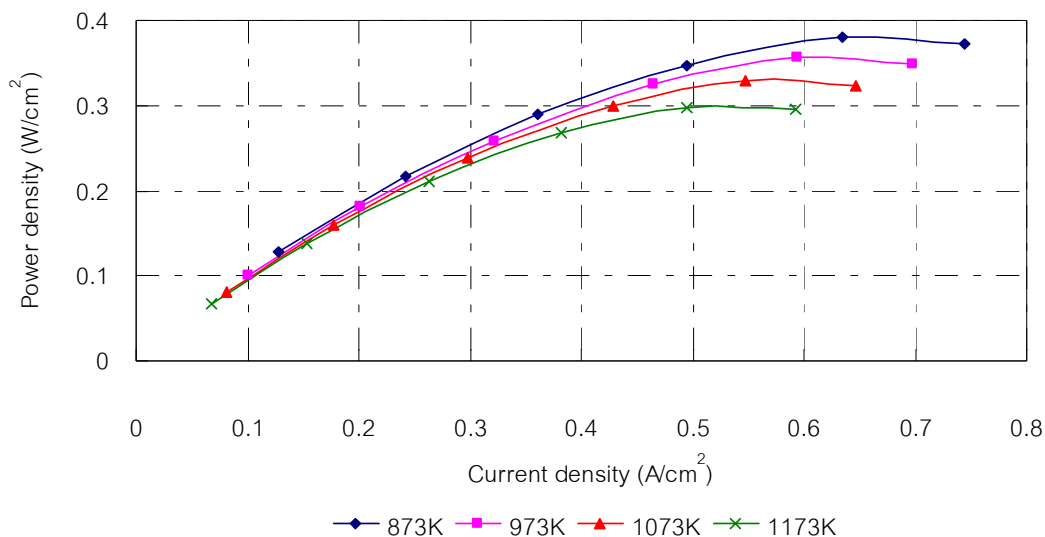


ภาพประกอบ 24 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน

สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 และ 3 โดยมีค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.402×10^{-7} และ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาทีตามลำดับ พบว่า ผลการคำนวณที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีศึกษาที่ 1 โดยเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเท่ากัน อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศลดลง จะให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 25 และ 31 ตามลำดับ สำหรับค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงจุดๆ หนึ่งจะมีค่าลดลง เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ในกรณีศึกษาที่ 2 ดังแสดงในภาพประกอบ 26 ส่วนกรณีศึกษาที่ 3 ดังแสดงในภาพประกอบ 32 ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์นั้น เมื่อค่าอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง ดังแสดงในภาพประกอบ 19 และ 20 ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ได้แสดงไว้ต่อจากนี้



ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ



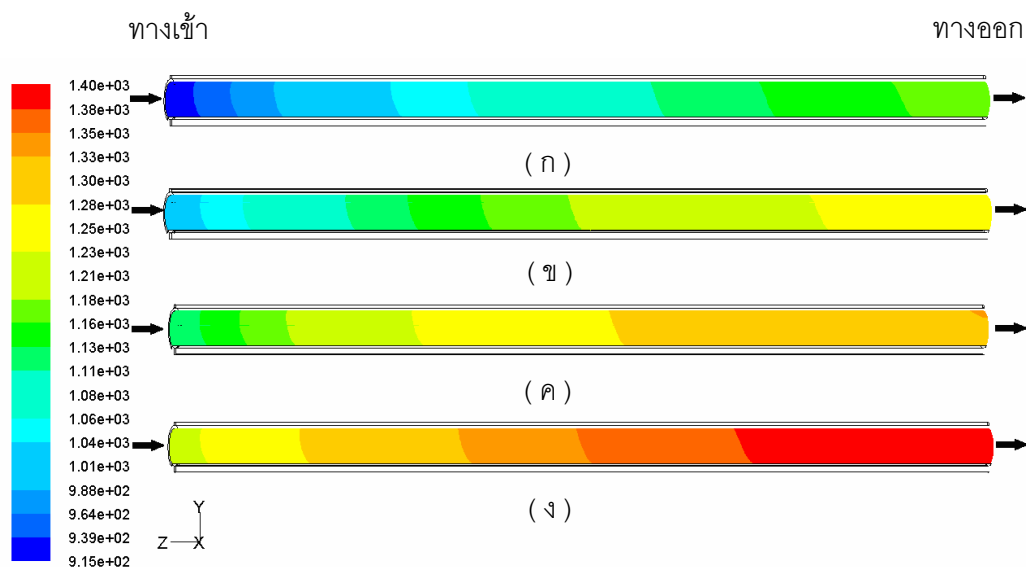
ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิเข้าของ เชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ

กรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอัตราการไหลเชิงมวลของ อากาศมีค่า 2.402×10^{-7} และ 2.525×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาทีตามลำดับ

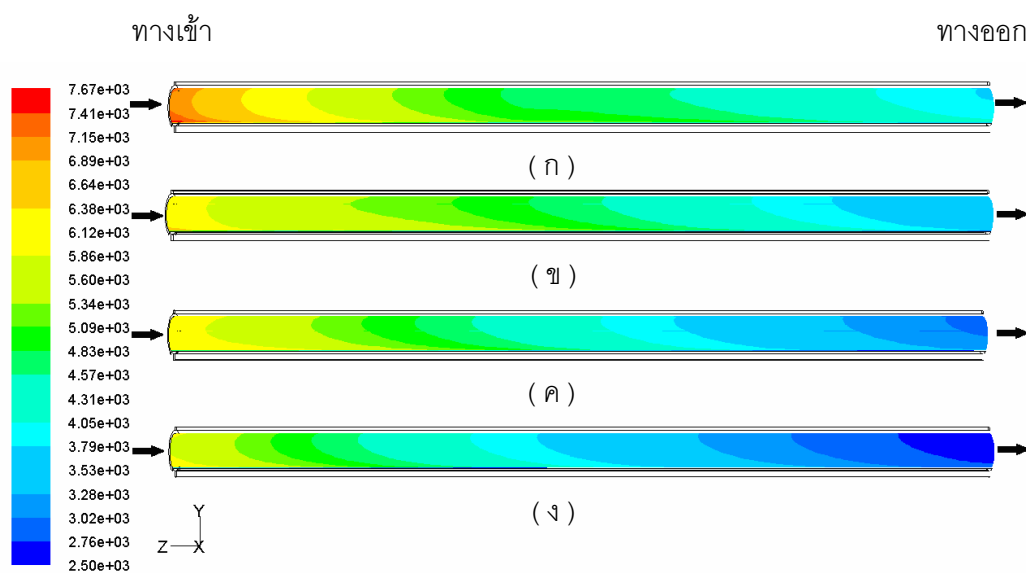
ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ พบว่า ที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.74 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.38 วัตต์ต่อตาราง เซนติเมตร ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 0.63 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและความต่าง ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.6 โวลต์ ดังแสดงในภาพประกอบ 25 และ 26 ตามลำดับ โดยมี กำลังไฟฟ้าที่ได้เท่ากับ 9.33 วัตต์ และมีประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์เท่ากับ 39.00 เปอร์เซ็นต์ ดัง แสดงในภาพประกอบ 19 และ 20 ตามลำดับ

ตัวอย่างผลการคำนวณที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.7 โวลต์ โดย แสดงผลของอุณหภูมิ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า สัดส่วนโดยมวลของน้ำ และสัดส่วนโดยมวล ของไฮโดรเจนในกรณีศึกษาที่ 2 และ 3 โดยแสดงผลของอุณหภูมิ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า สัดส่วนโดยมวลของน้ำและสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ กรณีศึกษาที่ 1 โดยที่ในกรณีศึกษาที่ 2 และ 3 นี้ ผลของอุณหภูมิดังแสดงในภาพประกอบ 27 และ 31 ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ได้รับ

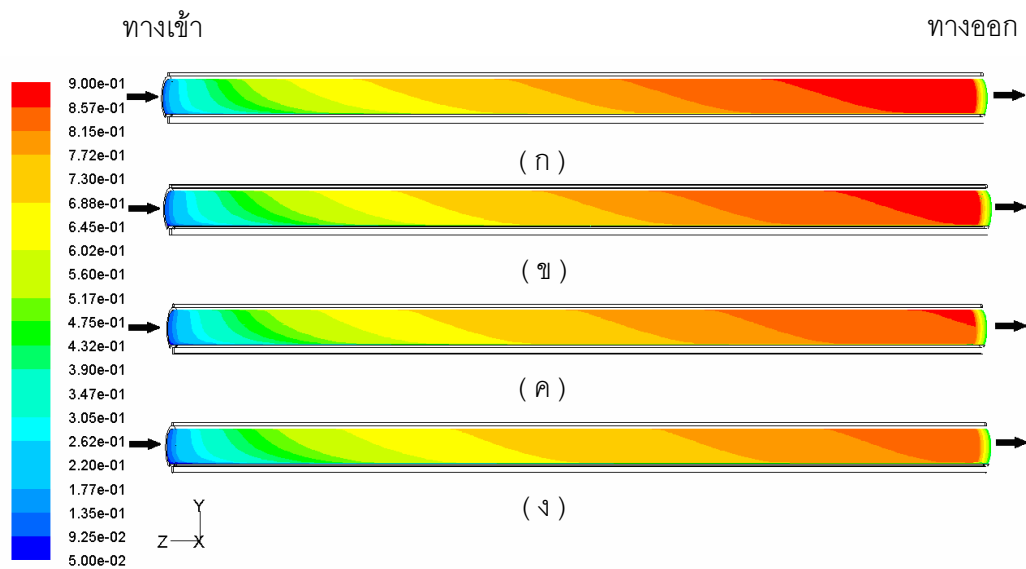
จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ สำหรับภาพประกอบ 28 และ 32 แสดงผลของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในแต่ละอุณหภูมิที่ทำการศึกษา โดยพบว่าค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลงเรื่อยๆ และมีลักษณะเช่นนี้ในทุกอุณหภูมิที่ทำการศึกษาของทั้งสองกรณีศึกษา สำหรับสัดส่วนโดยมวลของน้ำและสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน พบว่า สัดส่วนโดยมวลของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนมีค่าลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์ที่เปลี่ยนรูปไปเป็นน้ำ ดังแสดงในภาพประกอบ 29 และ 30 ตามลำดับ สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ส่วนกรณีศึกษาที่ 3 สัดส่วนโดยมวลของน้ำและสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 33 และ 34 ตามลำดับ



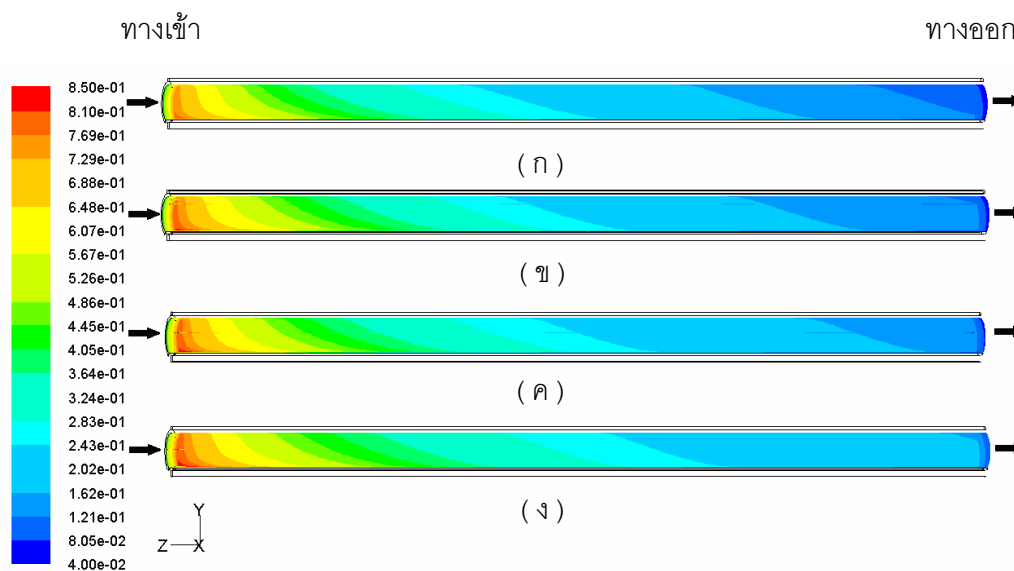
ภาพประกอบ 27 ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน



ภาพประกอบ 28 ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน



ภาพประกอบ 29 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน

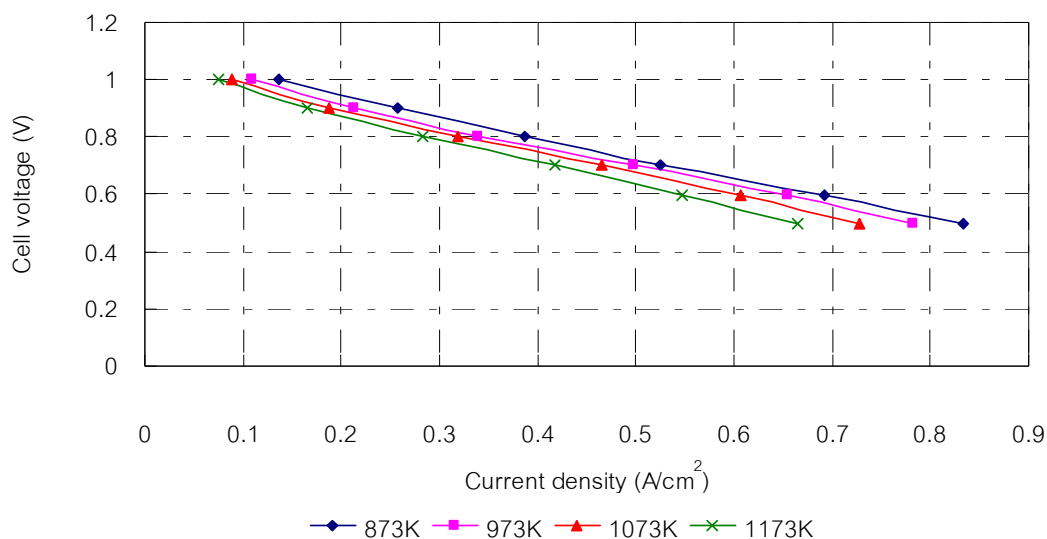


ภาพประกอบ 30 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง เท่ากับ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน

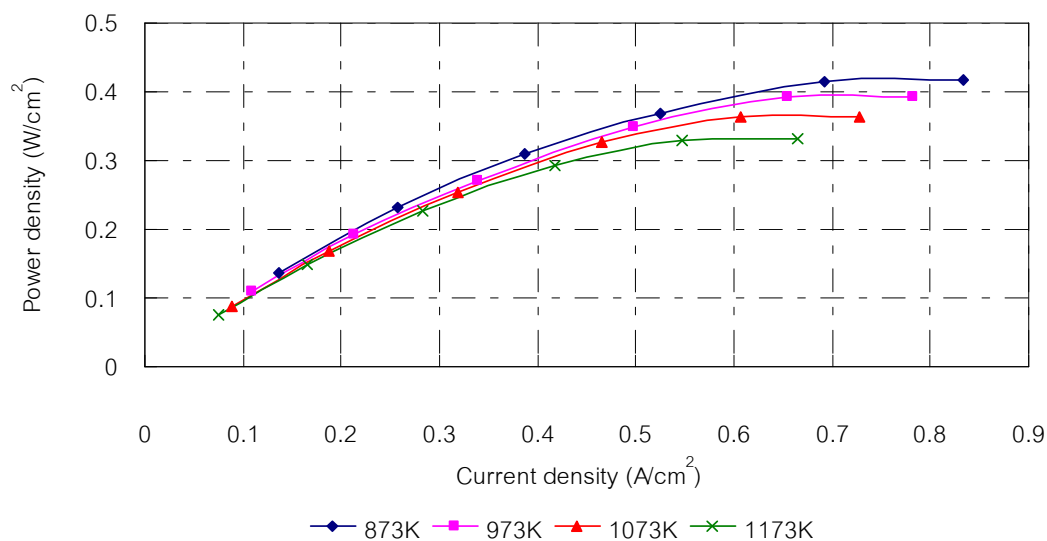
กรณีศึกษาที่ 3 ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีค่า 3.202×10^{-7} และ 3.366×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาทีตามลำดับ

ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ พบว่า ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.83 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.42 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 0.83 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.5 โวลต์ ดังแสดงในภาพประกอบ 31 และ 32 ตามลำดับ โดยมีกำลังไฟฟ้าที่ได้เท่ากับ 10.21 วัตต์ และมีประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์เท่ากับ 32.00 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพประกอบ 19 และ 20 ตามลำดับ

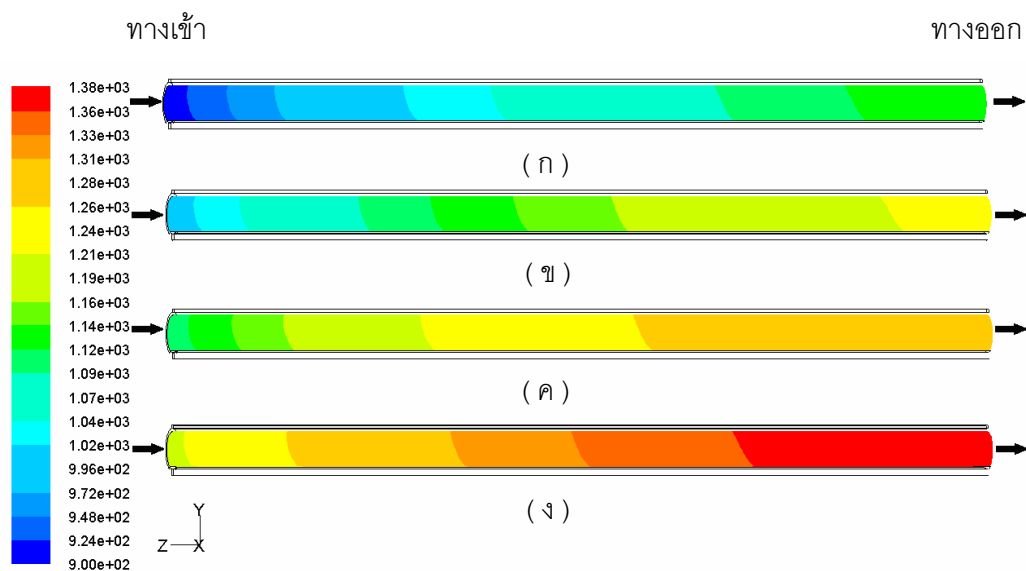
สำหรับตัวอย่างผลการคำนวณที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.7 โวลต์ ในกรณีศึกษาที่ 3 นี้ โดยแสดงผลของอุณหภูมิ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า สัดส่วนโดยมวลของน้ำ และสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้แล้ว



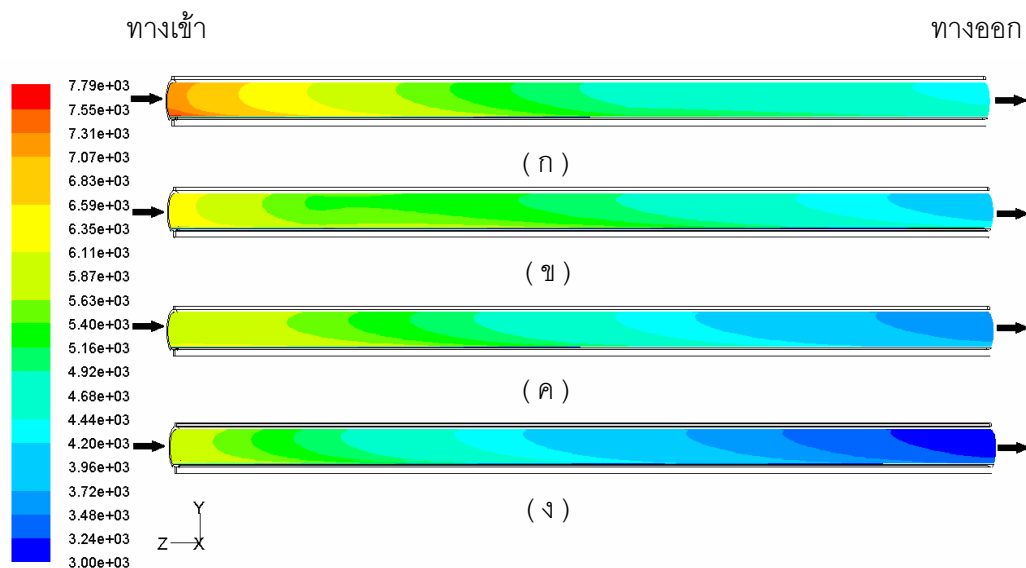
ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อัตราการใช้มวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ



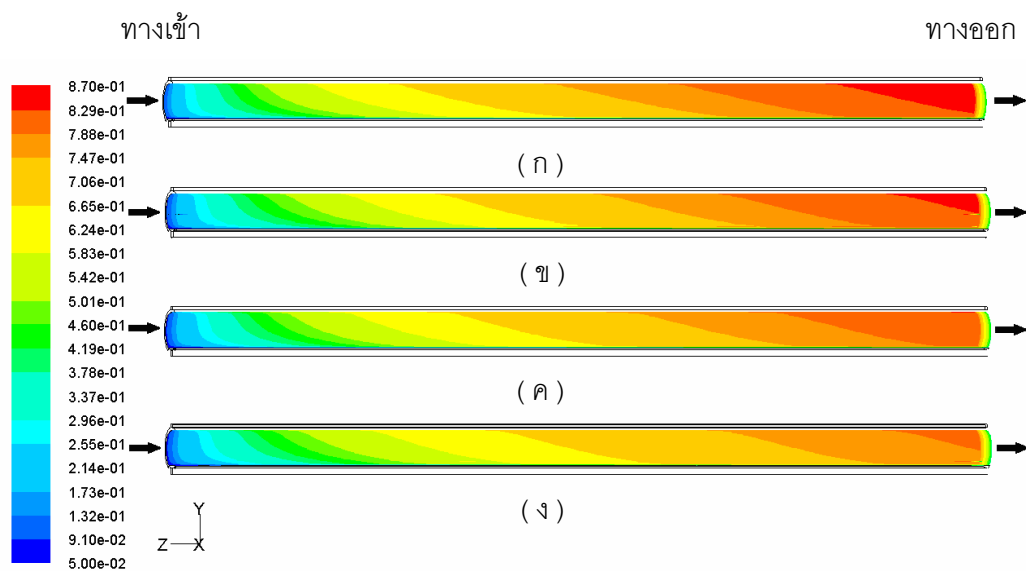
ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อัตราการใช้มวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ



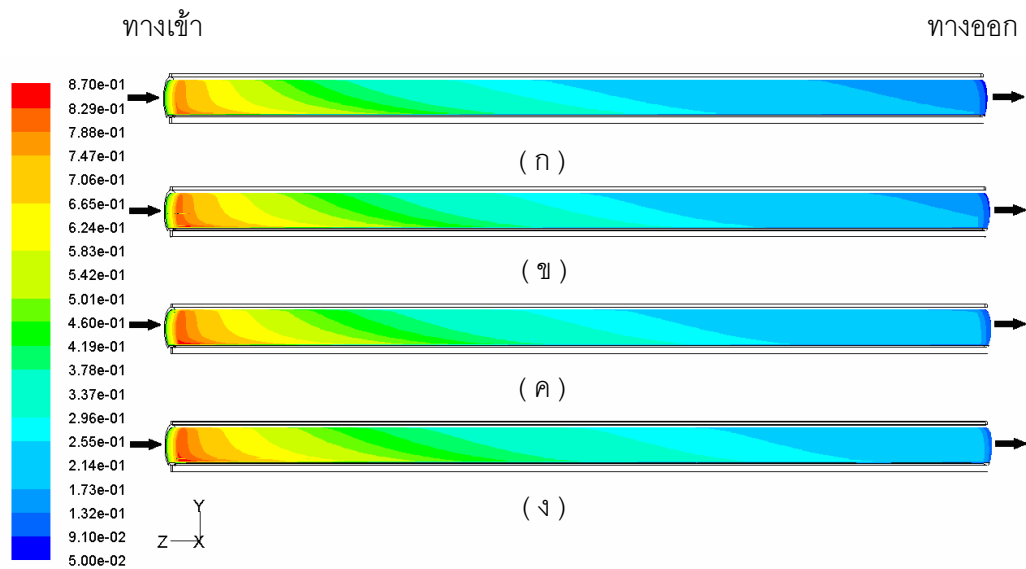
ภาพประกอบ 33 ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน



ภาพประกอบ 34 ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน



ภาพประกอบ 35 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน



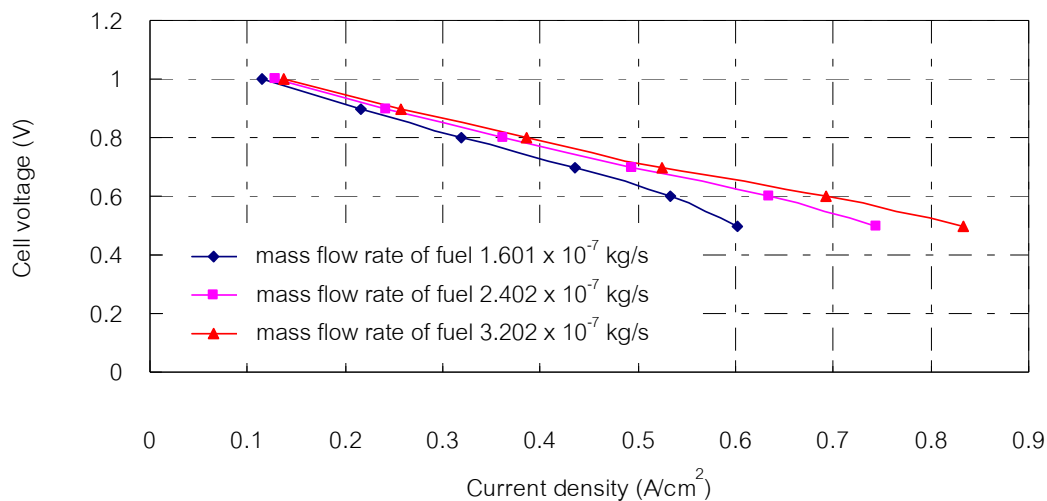
ภาพประกอบ 36 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ (ก) 873 เคลวิน (ข) 973 เคลวิน (ค) 1073 เคลวิน และ (ง) 1173 เคลวิน

4.2.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ (กรณีศึกษาที่ 1 – 3)

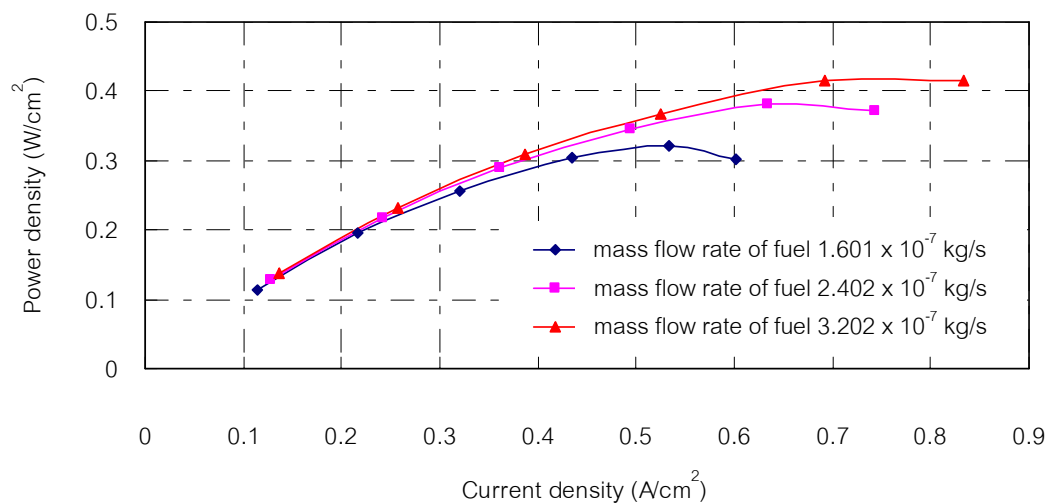
จากการกำหนดกรณีที่ทำการศึกษาในกรณีที่ 1, 2 และ 3 ได้ทำการศึกษาที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศที่แตกต่างกันทั้ง 3 กรณี ดังนั้นสามารถนำผลการคำนวณที่ได้มาอธิบายผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศได้

สำหรับผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ โดยที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจาก 1.601×10^{-7} ถึง 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้นจาก 1.683×10^{-5} ถึง 3.366×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งที่ค่าอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่า 873 เคลวิน ผลจากการคำนวณพบว่า เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า และค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง ดังแสดงในภาพประกอบ 37 ถึง 40 ตามลำดับ ซึ่งจากภาพประกอบ 37 พบว่า เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าสูงนั้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าลดลง ซึ่งที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.83 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในภาพประกอบ 38 พบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จนถึงจุดๆ หนึ่งจะลดลง ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} และ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที แต่ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยมีค่าเท่ากับ 0.42 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.83 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กับความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.5 โวลต์

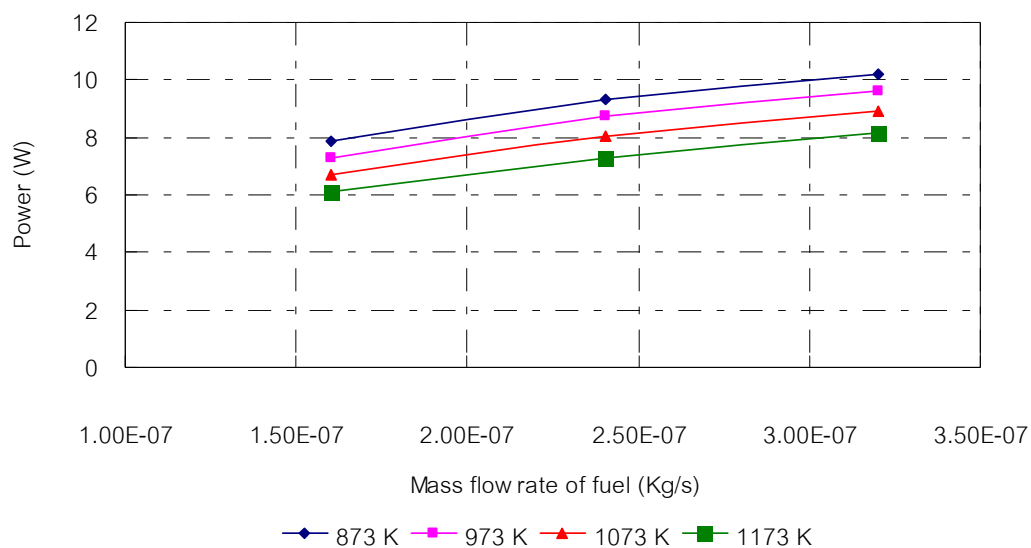
สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ พบว่า เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง ซึ่งในกรณีที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวินนี้ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 10.21 วัตต์ แต่ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์เท่ากับ 49.16 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันในทุกกรณีที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 39 และ 40 ตามลำดับ



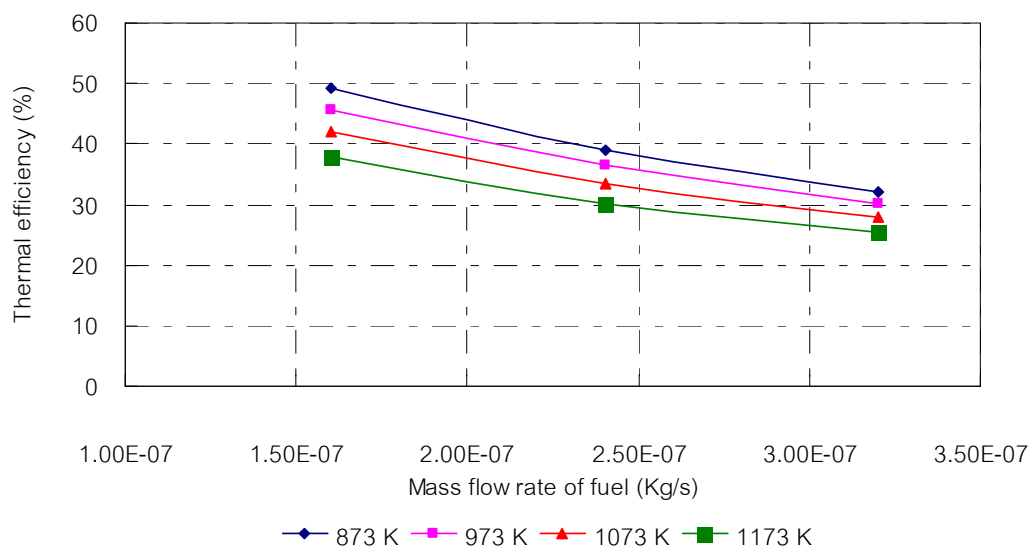
ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ



ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ

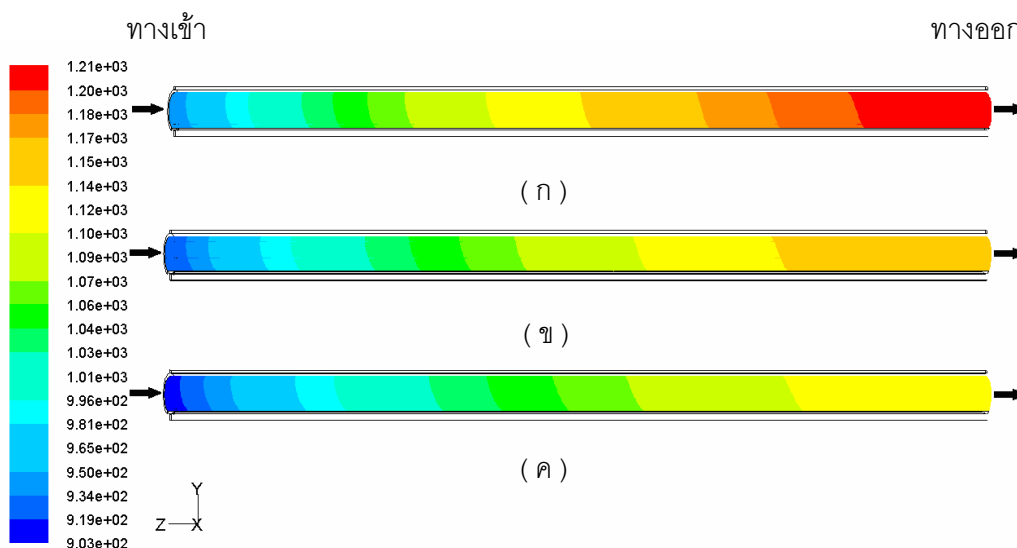


ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง และอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ

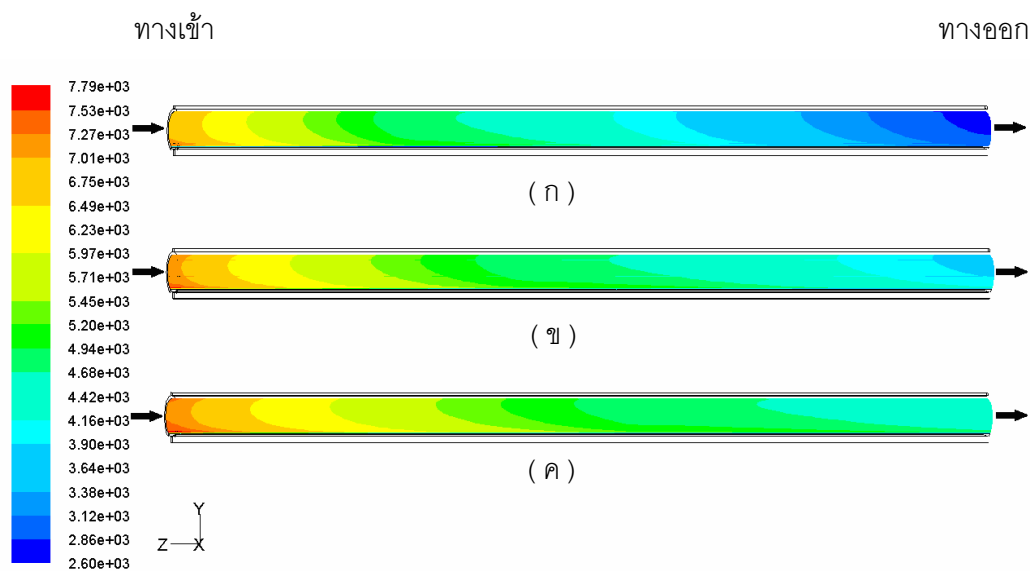


ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง และอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศต่างๆ

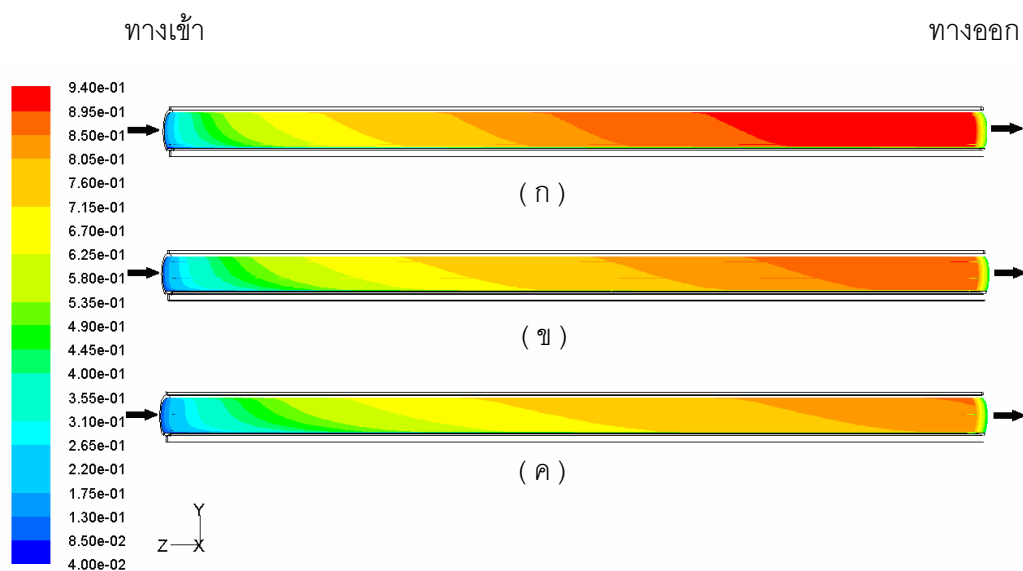
ตัวอย่างผลการคำนวณที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.7 โวลต์ ในกรณีที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น โดยแสดงผลของอุณหภูมิ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า สัดส่วนโดยมวลของน้ำ และสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน พบว่า อุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยที่ค่าของอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงที่น้อยที่สุด ให้ค่าของอุณหภูมิที่สูงที่สุด ดังแสดงในภาพประกอบ 41 เนื่องจากอัตราการไหลที่ช้ากว่านั้น ทำให้เกิดการสะสมตัวของพลังงานความร้อนที่ได้รับจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ที่มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณของไฮโดรเจนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาภายในเซลล์มากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 42 สำหรับสัดส่วนโดยมวลของน้ำและสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนนั้น พบว่า สัดส่วนโดยมวลของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนมีค่าลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์ที่เปลี่ยนรูปไปเป็นน้ำ ดังแสดงในภาพประกอบ 43 และ 44 ตามลำดับ



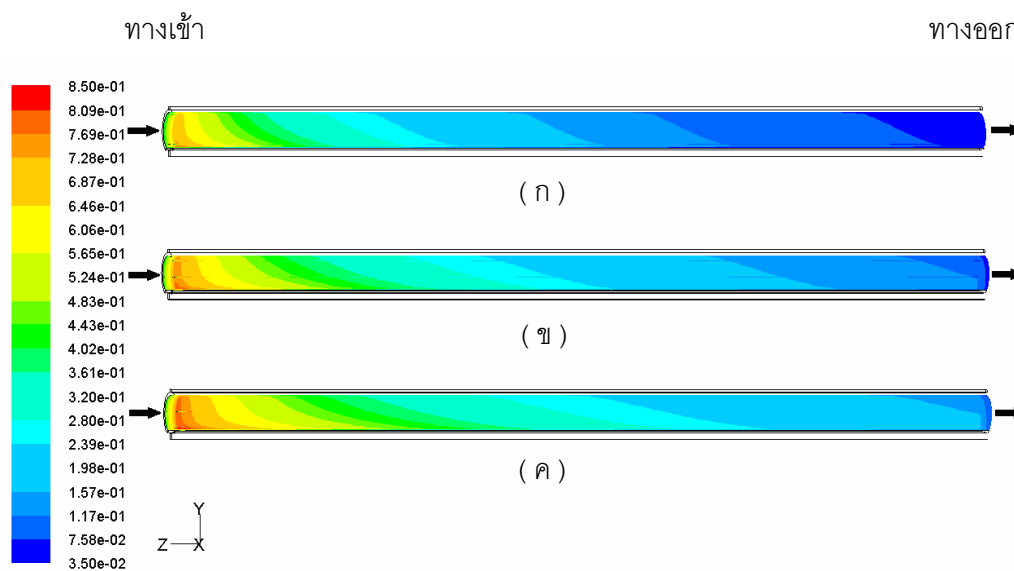
ภาพประกอบ 41 ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ เท่ากับ 873 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที



ภาพประกอบ 42 ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที



ภาพประกอบ 43 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที



ภาพประกอบ 44 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที

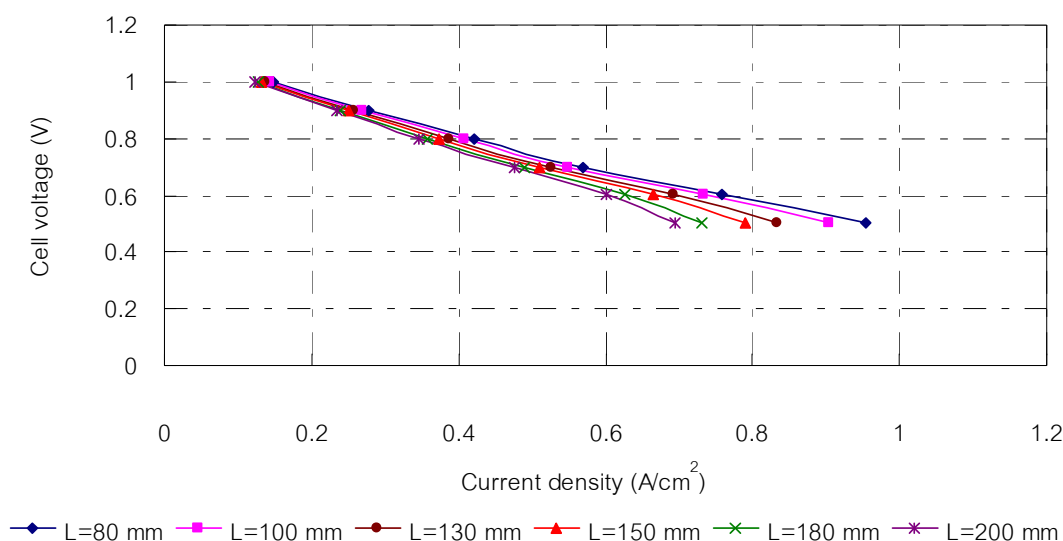
สำหรับกรณีที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจาก 1.601×10^{-7} ถึง 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้นจาก 1.683×10^{-5} ถึง 3.366×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 973, 1073 และ 1173 เคลวิน พบว่า ผลที่ได้จากการคำนวณ ได้แก่ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ รวมถึงผลของอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิง สัดส่วนโดยมวลของน้ำ และสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน ดังได้แสดงก่อนหน้านี้ โดยที่รายละเอียดต่างๆ ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 973, 1073 และ 1173 เคลวิน ได้อธิบายไว้ในภาคผนวกด้านหลัง

4.2.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวของเซลล์ (กรณีศึกษาที่ 4)

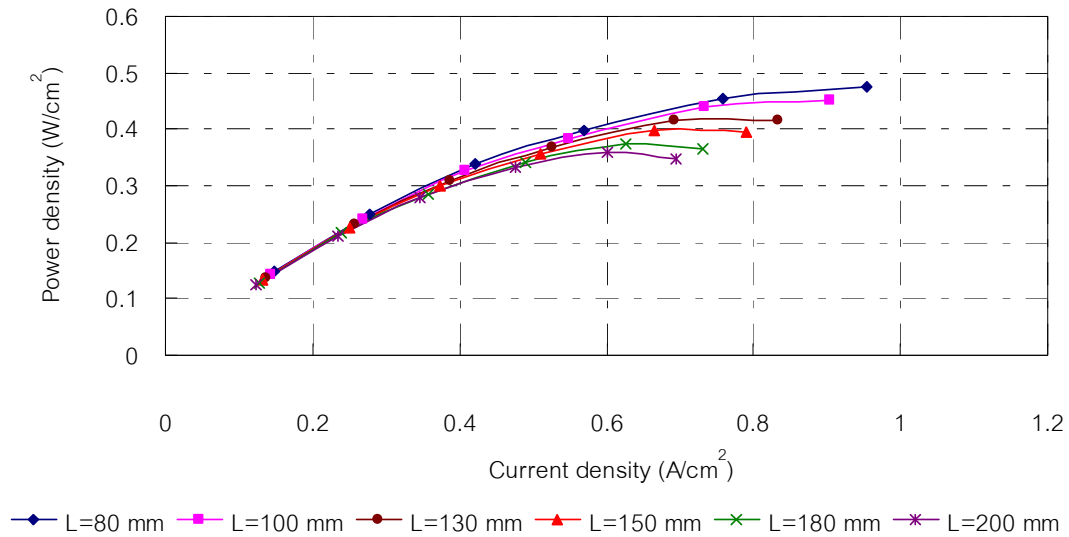
ผลจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของเซลล์ โดยที่ความยาวของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 80.0 ถึง 200.0 มิลลิเมตร โดยเลือกใช้ค่าอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน และอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่า 3.202×10^{-7} และ 3.366×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ ดังกรณีที่ 4 ที่ทำการศึกษา ผลจากการคำนวณพบว่า เมื่อค่าความยาวของเซลล์เพิ่มขึ้น

ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง จากภาพประกอบ 45 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่ความยาวของเซลล์ต่างๆ พบว่า ให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่ความยาวของเซลล์เท่ากับ 80.0 มิลลิเมตร ให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.95 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า พบว่า ให้ผลเช่นเดียวกันกับค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า คือ ให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันในทุกๆ ความยาวของเซลล์ และที่เซลล์มีความยาวเท่ากับ 80.0 มิลลิเมตรให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.48 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.95 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กับความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.5 โวลต์ ดังแสดงในภาพประกอบ 46

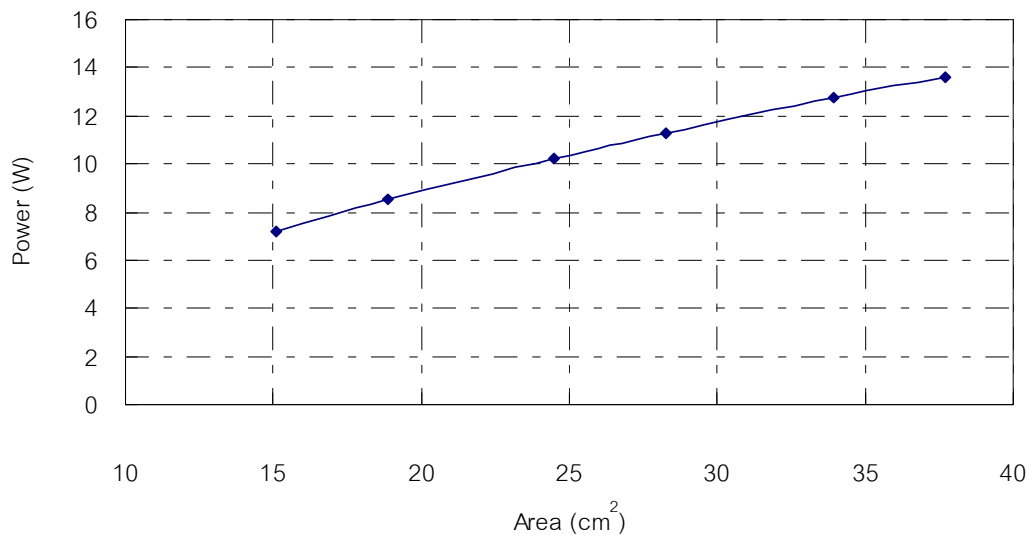
แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ ดังแสดงในภาพประกอบ 47 และ 48 ตามลำดับ พบว่า เมื่อเซลล์มีความยาวเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์เพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ความยาวของเซลล์เท่ากับ 200.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยามากที่สุด ให้ค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์เท่ากับ 13.60 วัตต์ และ 42.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



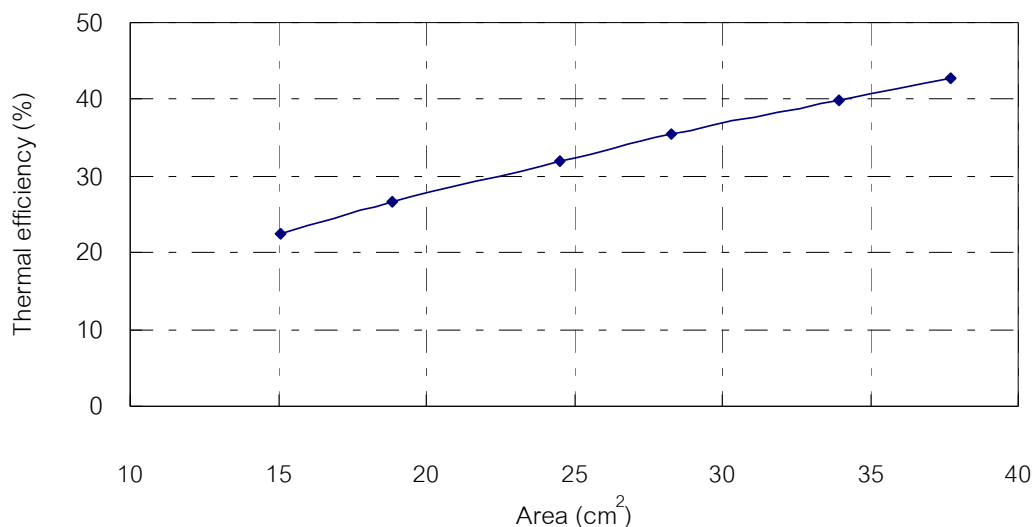
ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่ความยาวของเซลล์ต่างๆ



ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ความยาวของเซลล์ต่างๆ

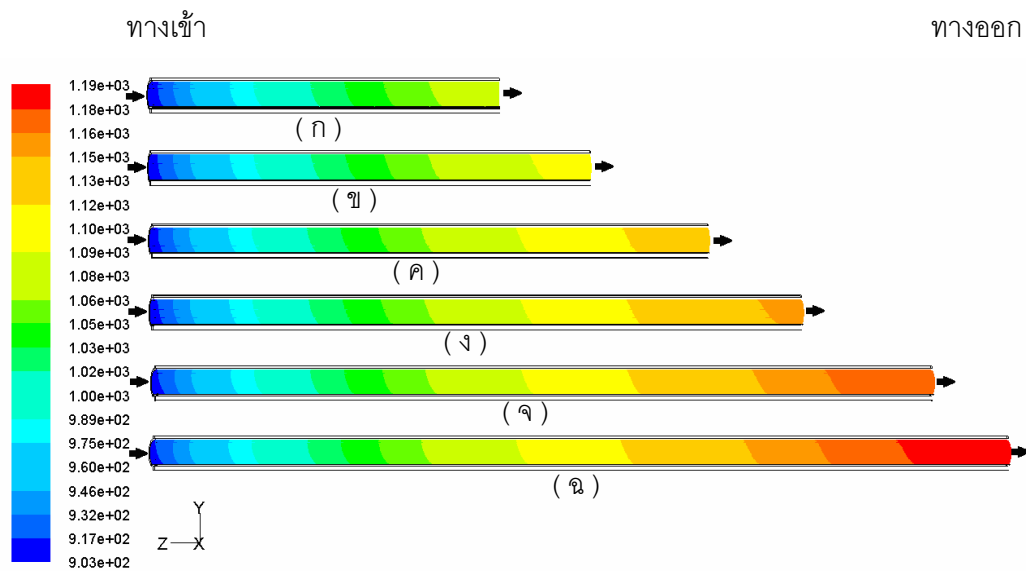


ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้ากับพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ที่ความยาวของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 80.0 ถึง 200.0 มิลลิเมตร

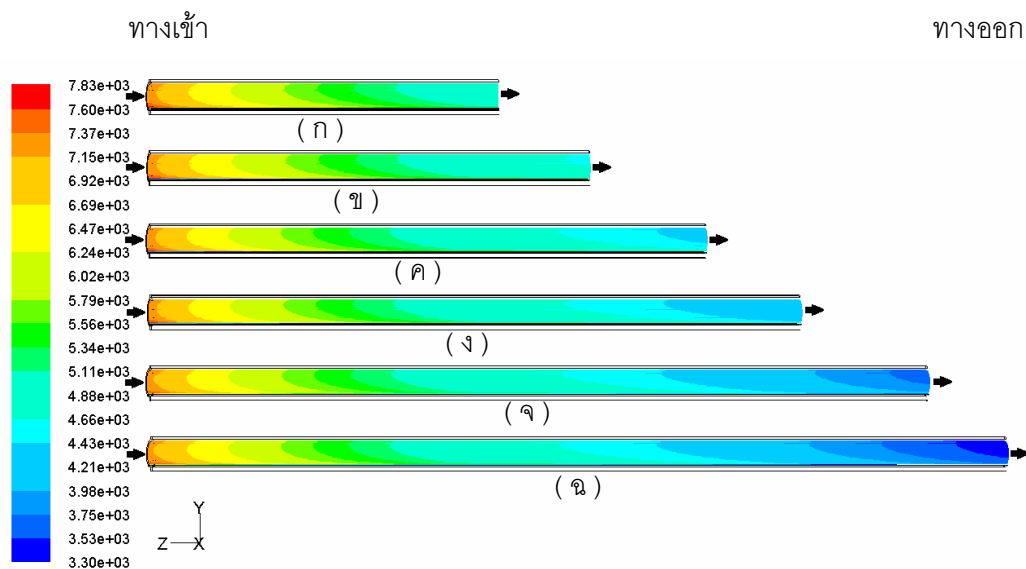


ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์กับพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ที่ความยาวของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 80.0 ถึง 200.0 มิลลิเมตร

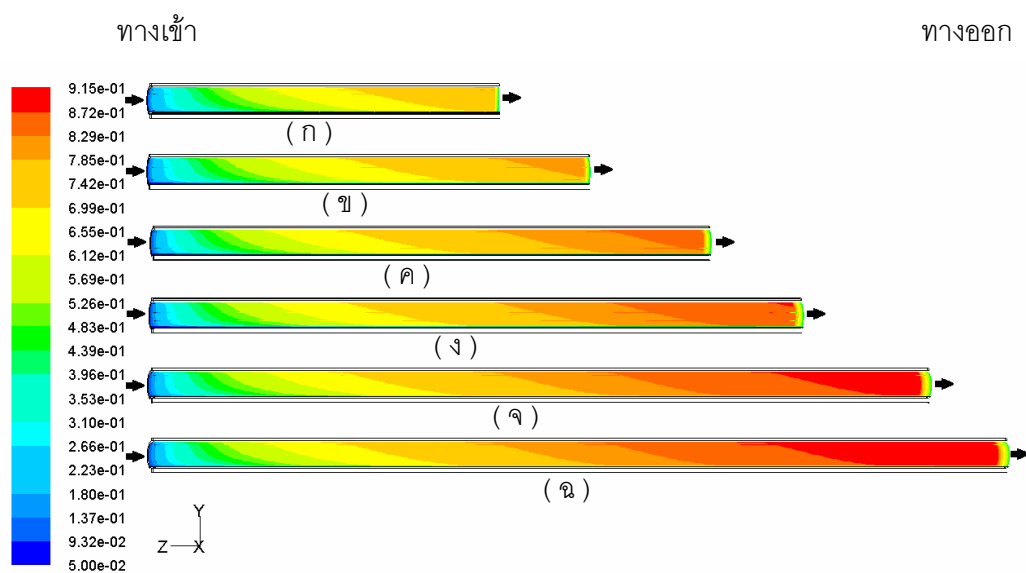
ตัวอย่างผลการคำนวณที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.7 โวลต์ เมื่อความยาวของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 80.0 ถึง 200.0 มิลลิเมตร พบว่า ที่ความยาวของเซลล์เท่าๆ กัน ผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า สัดส่วนโดยมวลของน้ำและสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน จะให้ผลที่มีลักษณะเหมือนกัน ซึ่งผลของอุณหภูมิดังแสดงในภาพประกอบ 49 แสดงผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงทางออกของเซลล์ เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ได้รับจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ สำหรับภาพประกอบ 50 แสดงผลของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในแต่ละความยาวของเซลล์ที่ทำการศึกษา พบว่าค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยลดลงเป็นสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน สำหรับสัดส่วนโดยมวลของน้ำและสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน พบว่า สัดส่วนโดยมวลของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนมีค่าลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์ที่เปลี่ยนรูปไปเป็นน้ำ ดังแสดงในภาพประกอบ 51 และ 52 ตามลำดับ



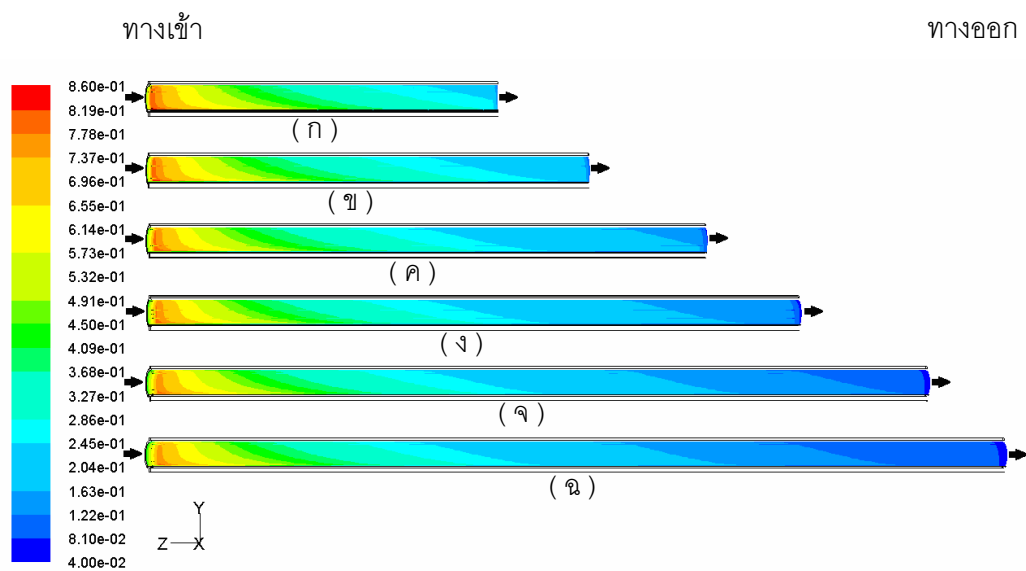
ภาพประกอบ 49 ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่ความยาวของเซลล์ (ก) 80.0 มิลลิเมตร (ข) 100.0 มิลลิเมตร (ค) 130.0 มิลลิเมตร (ง) 150.0 มิลลิเมตร (จ) 180.0 มิลลิเมตร และ (ฉ) 200.0 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 50 ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่ความยาวของเซลล์ (ก) 80.0 มิลลิเมตร (ข) 100.0 มิลลิเมตร (ค) 130.0 มิลลิเมตร (ง) 150.0 มิลลิเมตร (จ) 180.0 มิลลิเมตร และ (ฉ) 200.0 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 51 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่ความยาวของเซลล์ (ก) 80.0 มิลลิเมตร (ข) 100.0 มิลลิเมตร (ค) 130.0 มิลลิเมตร (ง) 150.0 มิลลิเมตร (จ) 180.0 มิลลิเมตร และ (ฉ) 200.0 มิลลิเมตร

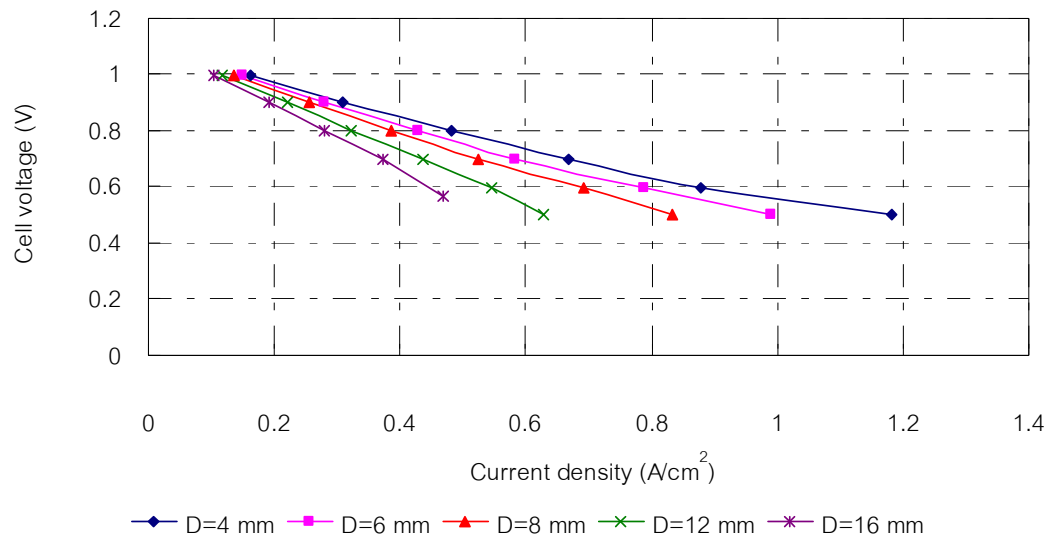


ภาพประกอบ 52 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่ความยาวของเซลล์ (ก) 80.0 มิลลิเมตร (ข) 100.0 มิลลิเมตร (ค) 130.0 มิลลิเมตร (ง) 150.0 มิลลิเมตร (จ) 180.0 มิลลิเมตร และ (ฉ) 200.0 มิลลิเมตร

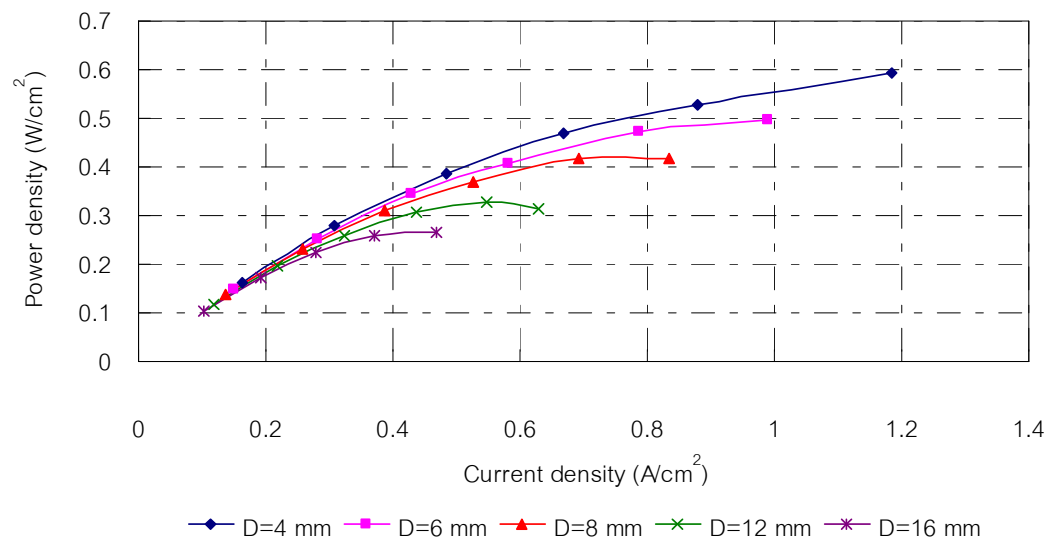
4.2.4 ผลจากการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ (กรณีศึกษาที่ 5)

ผลจากการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 4.0 ถึง 16.0 มิลลิเมตร ดังกรณีที่ 5 ที่ทำการศึกษา โดยเลือกใช้ค่าอุณหภูมิขาของเชื้อเพลิงและอากาศ และอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศเช่นเดียวกันกับกรณีศึกษาที่ 4 ผลจากการคำนวณ พบว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ที่เพิ่มขึ้นนั้น ทำให้เพิ่มระยะในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน ส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนที่มากขึ้นด้วย ซึ่งจากภาพประกอบ 53 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ต่างๆ โดยที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าสูงนั้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าลดลง ซึ่งที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเท่ากัน เซลล์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เท่ากับ 4.0 มิลลิเมตร ให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.18 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าดังแสดงในภาพประกอบ 54 พบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ได้เพิ่มขึ้นด้วย ยกเว้นในกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เท่ากับ 16.0 มิลลิเมตร ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น จนถึงจุดๆ หนึ่งแล้วจะมีค่าลดลง โดยที่เซลล์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4.0 มิลลิเมตร ให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.59 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.18 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กับความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.5 โวลต์

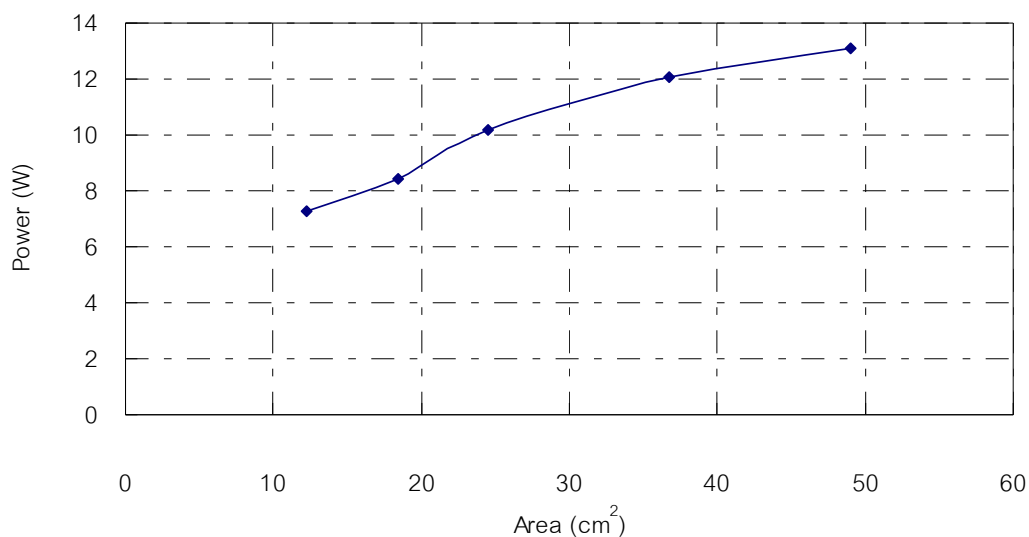
แต่สำหรับค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์นั้น เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากพื้นที่ในการทำปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เท่ากับ 16.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยามากที่สุด ให้ค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้เท่ากับ 13.08 วัตต์ และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์เท่ากับ 41.00 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพประกอบ 55 และ 56 ตามลำดับ



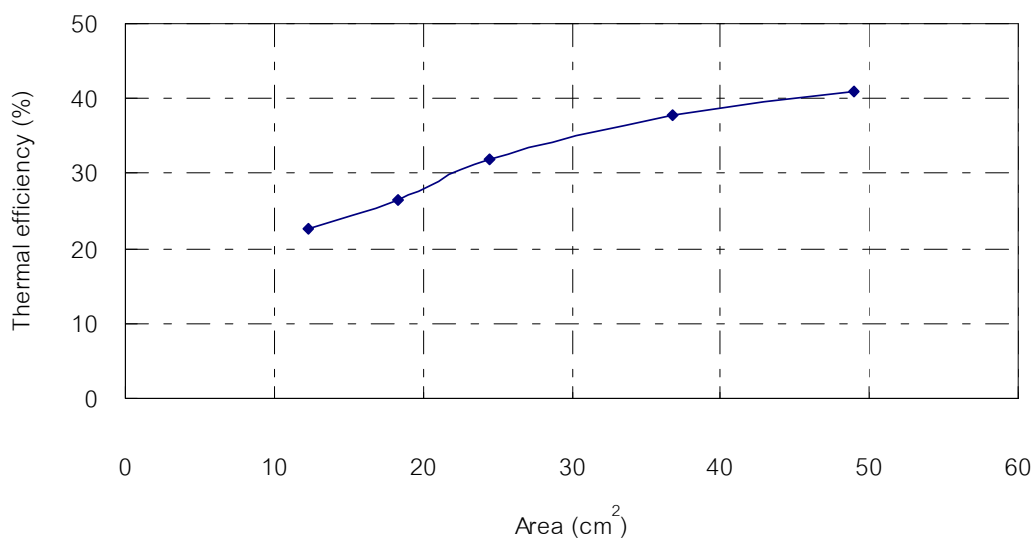
ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ต่างๆ



ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ต่างๆ

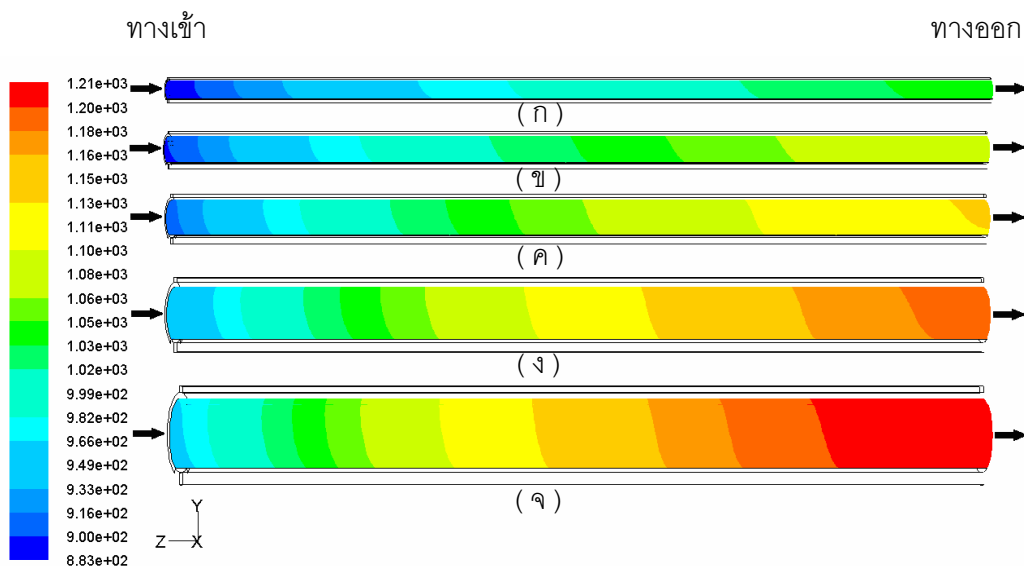


ภาพประกอบ 55 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้ากับพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ เพิ่มขึ้นจาก 4.0 ถึง 16.0 มิลลิเมตร

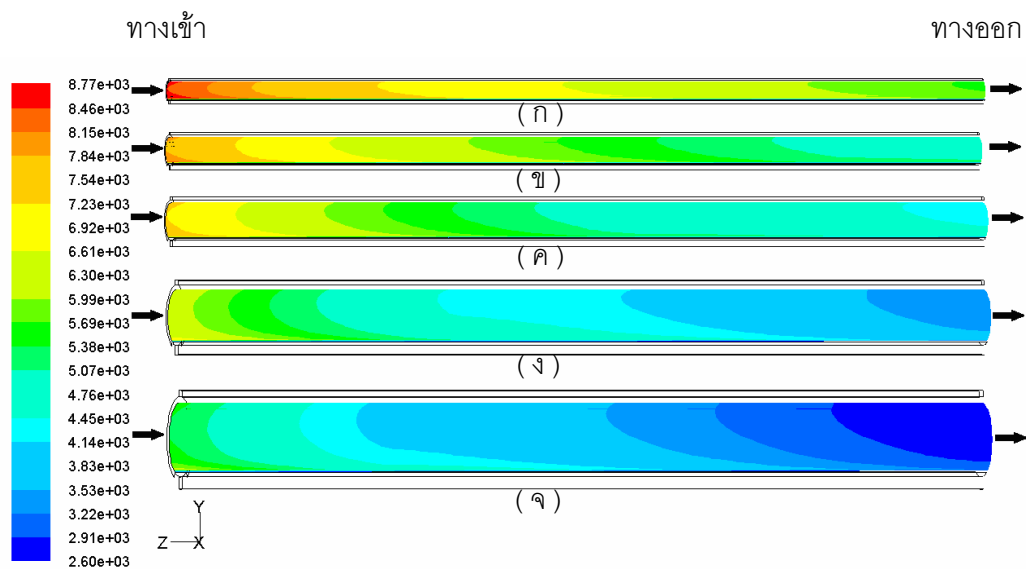


ภาพประกอบ 56 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์กับพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 4.0 ถึง 16.0 มิลลิเมตร

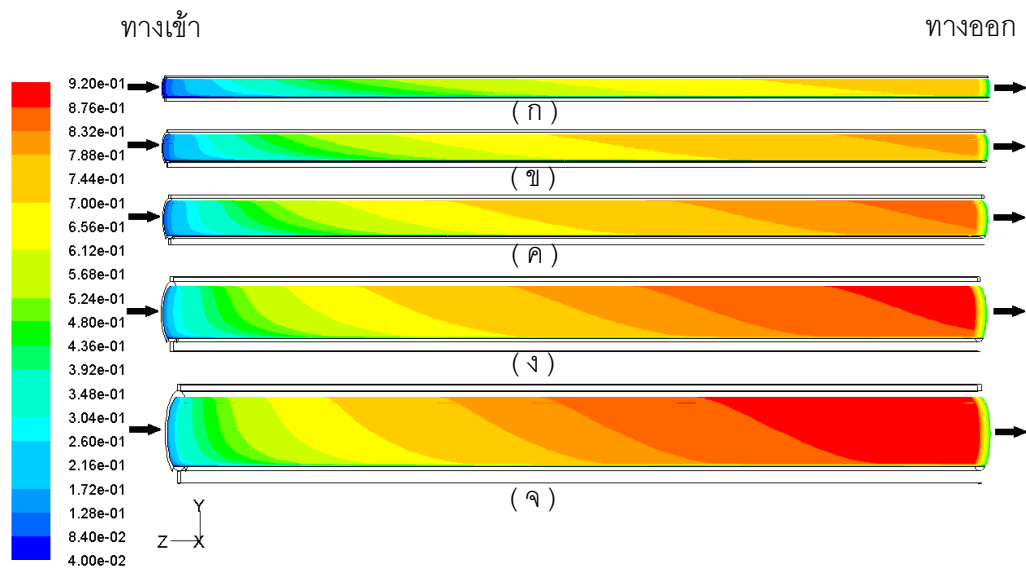
ตัวอย่างผลการคำนวณที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.7 โวลต์ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 4.0 ถึง 16.0 มิลลิเมตร โดยแสดงผลของอุณหภูมิ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า สัดส่วนโดยมวลของน้ำ และสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ซึ่งผลของอุณหภูมิดังแสดงในภาพประกอบ 57 พบว่า เมื่อเซลล์มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าของอุณหภูมิภายในเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ค่าของอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงในกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ได้รับจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ สำหรับผลของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้างแสดงในภาพประกอบ 58 พบว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มระยะในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน ส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนที่มากขึ้นด้วย สำหรับสัดส่วนโดยมวลของน้ำและสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน พบว่า สัดส่วนโดยมวลของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนมีค่าลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์ที่เปลี่ยนรูปไปเป็นน้ำ ดังแสดงในภาพประกอบ 59 และ 60 ตามลำดับ



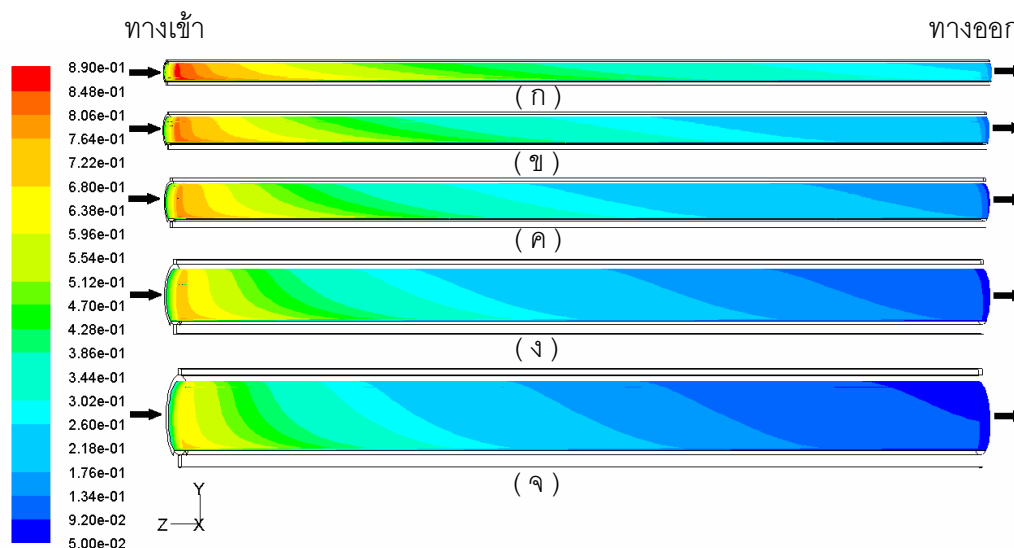
ภาพประกอบ 57 ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ (ก) 4.0 มิลลิเมตร (ข) 6.0 มิลลิเมตร (ค) 8.0 มิลลิเมตร (ง) 12.0 มิลลิเมตร และ (จ) 16.0 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 58 ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ (ก) 4.0 มิลลิเมตร (ข) 6.0 มิลลิเมตร (ค) 8.0 มิลลิเมตร (ง) 12.0 มิลลิเมตร และ (จ) 16.0 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 59 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ (ก) 4.0 มิลลิเมตร (ข) 6.0 มิลลิเมตร (ค) 8.0 มิลลิเมตร (ง) 12.0 มิลลิเมตร และ (จ) 16.0 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 60 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ (ก) 4.0 มิลลิเมตร (ข) 6.0 มิลลิเมตร (ค) 8.0 มิลลิเมตร (ง) 12.0 มิลลิเมตร และ (จ) 16.0 มิลลิเมตร

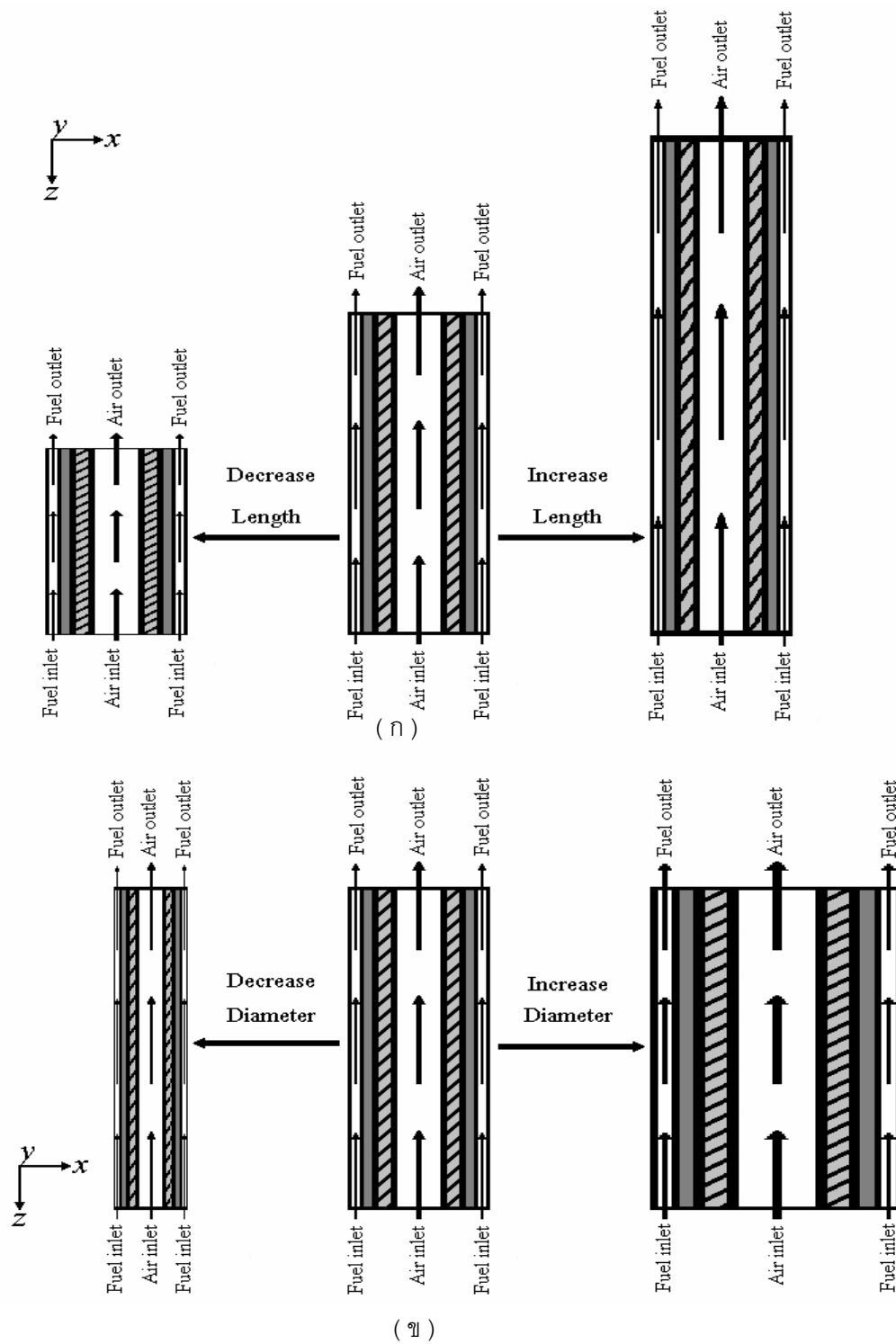
จากการศึกษาในกรณีศึกษาที่ 4 และ 5 เป็นการศึกษาในลักษณะทางการออกแบบรูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงที่แตกต่างกันสองกรณี คือ กรณีศึกษาที่ 4 เป็นการศึกษาถึงผลของความยาวของเซลล์เชื้อเพลิง แต่กรณีศึกษาที่ 5 เป็นการศึกษาถึงผลของเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เชื้อเพลิง ดังแสดงในภาพประกอบ 61 ที่แสดงถึงรูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงที่แตกต่างกันทั้งสองกรณี อย่างไรก็ตามกรณีศึกษาทั้งสองกรณีนี้สามารถนำผลการคำนวณที่ได้มาเปรียบเทียบกันได้ โดยคำนึงถึงพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งในที่นี้ได้แสดงผลการคำนวณของค่ากำลังไฟฟ้าและค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ ดังแสดงในตาราง 9

สำหรับผลที่ได้จากการคำนวณเมื่อคำนึงถึงพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์ ดังแสดงในภาพประกอบ 62 และ 63 พบว่า ในช่วงแรกที่เซลล์มีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์เท่ากับ 15.08 ถึง 24.50 ตารางเซนติเมตร ซึ่งผลจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์โดยการเพิ่มค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ให้ผลของกำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ที่มากกว่าการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์โดยการเพิ่มความยาวของเซลล์ เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ในช่วงแรกนี้มีค่าน้อยทำให้ระยะในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนน้อยลงส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนที่น้อยลงด้วย และเมื่อถึงจุดที่พื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์เท่ากับ 24.50 ตารางเซนติเมตร มีค่าของกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์เท่ากันเนื่องจากเซลล์มีรูปร่างลักษณะที่เหมือนกันโดยเป็นเซลล์

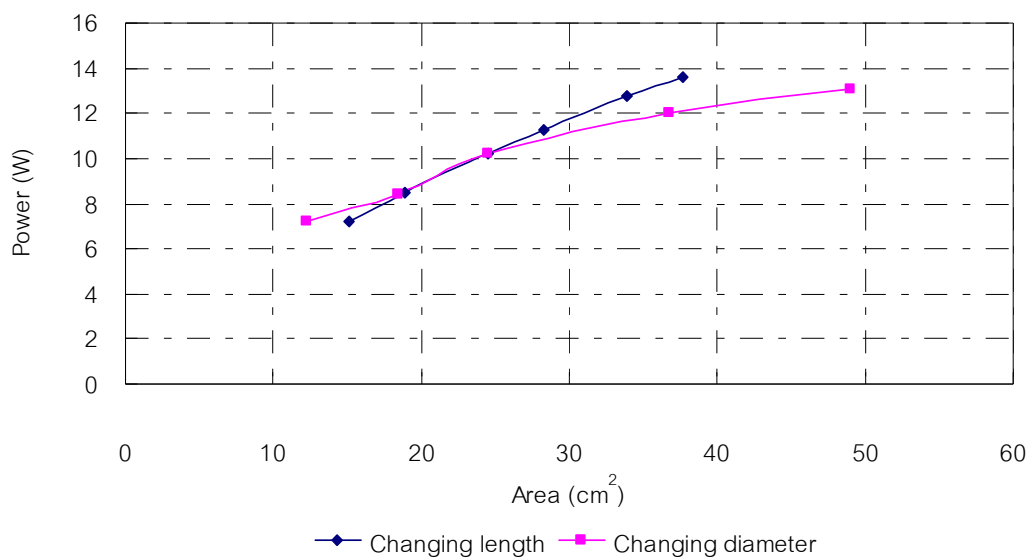
พื้นฐานในการออกแบบ หลังจากนั้นผลจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์โดยการเพิ่มความยาวของเซลล์ให้ผลของกำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ที่มากกว่า การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์โดยการเพิ่มความหนาแน่นของศูนย์กลางของเซลล์ เนื่องจากค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ที่มากขึ้น ทำให้เพิ่มระยะในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน ส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนที่มากขึ้นด้วย แต่การเพิ่มความยาวของเซลล์นั้นระยะในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนมีค่าเท่าเดิม

ตาราง 9 สรุปผลการคำนวณกรณีที่คำนึงถึงพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิง

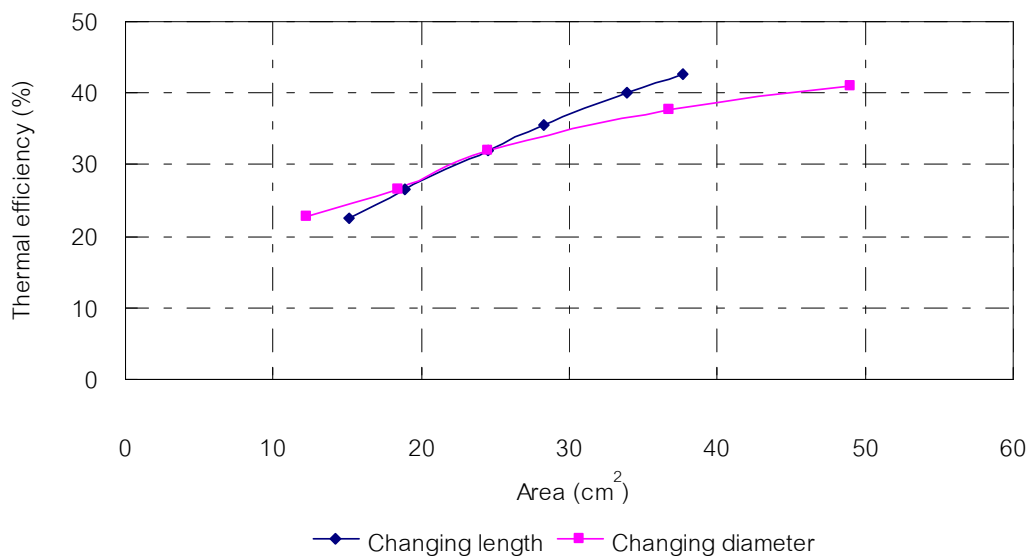
กรณีที่ศึกษา / พารามิเตอร์ (หน่วย)	พื้นที่ในการทำ		ประสิทธิภาพ
	ปฏิกิริยาของ	กำลังไฟฟ้า	ทางอุณหพล
	เซลล์ (ตาราง เซนติเมตร)	(วัตต์)	ศาสตร์ (เปอร์เซนต์)
กรณีที่ 4			
ความยาวของเซลล์ (มิลลิเมตร)			
80.0	15.08	7.20	22.56
100.0	18.85	8.50	26.65
130.0	24.50	10.21	32.00
150.0	28.27	11.30	35.44
180.0	33.93	12.74	39.93
200.0	37.70	13.60	42.64
กรณีที่ 5			
เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ (มิลลิเมตร)			
4.0	12.25	7.24	22.72
6.0	18.38	8.44	26.47
8.0	24.50	10.21	32.00
12.0	36.76	12.05	37.78
16.0	49.01	13.08	41.00



ภาพประกอบ 61 รูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำการศึกษา (ก) เซลล์เชื้อเพลิงที่ทำกรลดและเพิ่มความยาวของเซลล์ (ข) เซลล์เชื้อเพลิงที่ทำกรลดและเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์



ภาพประกอบ 62 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้ากับพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ที่ความยาวเพิ่มขึ้นจาก 80.0 ถึง 200.0 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 4.0 ถึง 16.0 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 63 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์กับพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ที่ความยาวเพิ่มขึ้นจาก 80.0 ถึง 200.0 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 4.0 ถึง 16.0 มิลลิเมตร

4.3 สรุปผลท้ายบท

ผลการคำนวณที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง พบว่า

1) ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ

จากการศึกษาในกรณีที่ 1, 2 และ 3 ที่ทำการศึกษา โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศซึ่งเพิ่มขึ้นจาก 873 ถึง 1173 เคลวิน พบว่า เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า, ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้าที่ได้ และมีประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง

2) ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ

จากการศึกษาในกรณีที่ 1, 2 และ 3 ที่ทำการศึกษา โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ ซึ่งมีค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจาก 1.601×10^{-7} ถึง 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้นจาก 1.683×10^{-5} ถึง 3.366×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที พบว่า เมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า, ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นทำให้มีไฮโดรเจนที่เข้าไปทำปฏิกิริยามากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของไฮโดรเจนที่เหลือจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์มีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าสัดส่วนในการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นการเลือกอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศสำหรับการทดลองนั้น ต้องคำนึงถึงกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ตามที่ต้องการ เพราะอาจจะเป็นการสิ้นเปลืองปริมาณของไฮโดรเจนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์เชื้อเพลิง

3) ผลจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของเซลล์

จากการศึกษาในกรณีที่ 4 ที่ทำการศึกษา โดยเปลี่ยนแปลงความยาวของเซลล์ซึ่งเพิ่มขึ้นจาก 80.0 ถึง 200.0 มิลลิเมตร พบว่า เมื่อค่าความยาวของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากเซลล์ที่มีความยาวน้อยกว่า มีปริมาณของไฮโดรเจนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาต่อพื้นที่ในการทำปฏิกิริยามากกว่า และเมื่อเซลล์มีความยาวมากขึ้นและพื้นที่ในการทำปฏิกิริยามากขึ้น แต่ปริมาณของไฮโดรเจนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาเท่าเดิม จึงทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาต่อพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาจึงมีค่าน้อยลง ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตาม

ตามค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น

4) ผลจากการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์

จากการศึกษาในกรณีนี้ที่ 5 ที่ทำการศึกษา โดยเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ซึ่งเพิ่มขึ้นจาก 4.0 ถึง 16.0 มิลลิเมตร พบว่า เมื่อค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มระยะในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน ส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนที่มากขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น

5) ผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์ เมื่อพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์เท่ากัน

จากการศึกษาในกรณีนี้ที่ 4 และ 5 ที่ทำการศึกษา เป็นการศึกษาการออกแบบรูปร่างของเซลล์เชื้อเพลิงในกรณีที่พื้นที่ในการทำปฏิกิริยาที่เท่ากัน พบว่า เมื่อพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ ให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์น้อยกว่ากรณีที่เพิ่มพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาโดยการเพิ่มความยาวของเซลล์ เนื่องจากค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มระยะในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน ส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนที่มากขึ้นด้วย แต่ในกรณีที่เพิ่มพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาโดยการเพิ่มความยาวของเซลล์นั้น ระยะในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนมีค่าเท่าเดิม ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่ามากกว่า สำหรับกรณีที่ลดพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาโดยการลดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์นั้น ระยะในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนลดลงด้วย จากเหตุผลดังกล่าวการลดพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาโดยการลดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ ให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มากกว่าการลดพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาโดยการลดความยาวของเซลล์ แต่ในความเป็นจริงแล้วเซลล์ที่มีความยาวมากเกินไป และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ที่น้อยเกินไป มีความเสี่ยงต่อการเกิดการแตกหักของเซลล์ ซึ่งจะเป็นอันตรายอย่างมาก อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงข้อจำกัดในการขึ้นรูปของเซลล์เชื้อเพลิงอีกด้วย

ตาราง 10 สรุปผลการคำนวณสำหรับทุกกรณีศึกษา

	ความหนาแน่น ของ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อ ตาราง เซนติเมตร)	ความหนาแน่น ของ กำลังไฟฟ้า (วัตต์ต่อ ตาราง เซนติเมตร)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	ประสิทธิภาพ ทางอุณหภูมิ ศาสตร์ (เปอร์เซนต์)
พารามิเตอร์ที่ศึกษา (มีค่าเพิ่มขึ้น)				
อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิง และอากาศ	ลดลง	ลดลง	ลดลง	ลดลง
อัตราการไหลเชิงมวลของ เชื้อเพลิงและอากาศ	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ลดลง
ความยาวของเซลล์	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยในปริญญานิพนธ์นี้ มุ่งเน้นศึกษาถึงความเป็นไปได้สำหรับการใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง รวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลเชิงมวล ความยาวของเซลล์เชื้อเพลิง และเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เชื้อเพลิง แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งเป็นเทคนิคที่นำมาช่วยในการจำลองลักษณะการไหล ดังนั้นก่อนการออกแบบหรือศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ จำเป็นต้องตรวจสอบผลการคำนวณกับผลการทดลองจริง โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของฮาจิฮาระ มิชิบาตะ คิมูระ จัสซคาร์ ทอมลินส์ และ เวโย [Hagiwara, A., Michibata, H., Kimura, A., Jaszcgar, M.P., Tomlins, G.W. and Veyo, S.E, 1999] พบว่า ค่าความแตกต่างของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 7.27 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์ที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ในช่วง 0.6 ถึง 0.8 โวลต์ และที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในช่วง 0.1 ถึง 0.5 แอมแปร์ ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งในทางวิศวกรรมนี้ถือว่าเป็นที่ยอมรับได้

สำหรับผลการคำนวณที่ได้จากการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ เพื่อทำการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อ ภายใต้สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์ที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ในช่วง 0.5 ถึง 1.0 โวลต์ พบว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่มีความยาวเท่ากับ 200.0 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เท่ากับ 8.0 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 873 เคลวิน และอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 3.202×10^{-7} และ 3.366×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ ให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้เท่ากับ 13.60 วัตต์ และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์เท่ากับ 42.64 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสมกับการนำมาสร้างเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อจริง

5.2 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

ผลจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้เทคนิคการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล รวมถึงโปรแกรมที่ใช้พื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม สามารถนำมาเป็นเครื่องมือในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลและนำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งใน

เบื้องต้นก่อนการออกแบบได้ ซึ่งเป็นการประหยัดเวลาและหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงจากการทดลองจริง สำหรับผลการคำนวณจากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาและการออกแบบเซลล์ เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งให้มีความเหมาะสม โดยเฉพาะผลของอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิง ควรให้เกิดกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงที่สม่ำเสมอตลอดระยะของเซลล์เชื้อเพลิง อีกทั้งผลจากการคำนวณนี้ยังสามารถนำไปเป็นแนวทางในงานวิจัยในระดับต่อไปได้

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- ชาญณรงค์ วันทา. (2548). *การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์*, ปรินซ์นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- วรรณชล วัฒนะ. (2547). *การศึกษาการไหลในชั้นวางเซลล์และชุดกระจายการไหลสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง*, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. ถ่ายเอกสาร.
- Aguiar, P., Adjiman, C.S. and Brandon, N.P. (2004). *Anode-supported intermediate temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I: model-based steady-state performance*. Journal of Power Sources. (138). pp. 120-136.
- Autissier, N., Larrain, D., Van Herle, J. and Favrat, D. (2004). *CFD simulation tool for solid oxide fuel cells*. Journal of Power Sources. (131). pp. 313-319.
- Campanari, S. and Iora, P. (2004). *Definition and sensitivity analysis of a finite volume SOFC model for a tubular cell geometry*. Journal of Power Sources. (132). pp. 113-126.
- 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.
- https://pindex.ku.ac.th/file_research/MATE143.doc สืบค้นเมื่อวันที่ 18 มกราคม 2550.
- https://en.wikipedia.org/wiki/Solid-oxide_fuel_cell สืบค้นเมื่อวันที่ 18 มกราคม 2550.
- Jiang, W., Fang, R., Khan, J.A. and Dougal, R.A. (2006). *Parameter setting and analysis of a dynamic tubular SOFC model*. Journal of Power Sources. (162). pp. 316-326.
- Lockett, M., Simmons, M.J.H. and Kendall, K. (2004). *CFD to predict temperature profile for scale up of micro-tubular SOFC stacks*. Journal of Power Sources. (131). pp. 243-246.
- Mallon, C. and Kendall, K. (2005). *Sensitivity of nickel cermet anodes to reduction conditions*. Journal of Power Sources. (145). pp. 154-160.
- Ramakrishna, P.A., Yang, S. and Sohn, C.H. (2005). *Innovative design to improve the power density of a solid oxide fuel cell*. Journal of Power Sources. (158). pp. 378-384.

- Rapeepong Suwanwarangkul. (2005). *Model development and validation of solid oxide fuel cells using H_2 - H_2O -CO- CO_2 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.
- .Saunders, G.J. and Kendall, K. (2002). *Reactions of hydrocarbons in small tubular SOFCs*. Journal of Power Sources. (106). pp. 258-263.
- Suwanwaranggul, R., Croiset, E., Entchev, E., Charojrochkul, S., Pritzker, M.D., Fowler, M.W., Douglas, P.L., Chewathanakup, S. and Mahaudom, H.. (2006). *Experimental and modeling study of solid oxide fuel cell operating with syngas fuel*. Journal of Power Sources. (161). pp. 308-322.
- Suzuki, T., Awano, M., Jasinski, P., Petrovsky, V. and Anderson, H.U.. (2006). *Composite (La, Sr) MnO_3 -YSZ cathode for SOFC*. Solid State Ionics. (177). pp. 2071-2074
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., (1995). *An introduction to computational fluid dynamics*.
- Wang, J., Lu, Z., Huang, X., Chen, K., Ai, N., Hu, J. and Su, W.. (2007). *YSZ films fabricated by a spin smoothing technique and its application in solid oxide fuel cell*. Journal of Power Sources. (163). pp. 957-959.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
ภาคผนวก ข	ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ
ภาคผนวก ค	บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่
ภาคผนวก ง	คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

ภาคผนวก ก
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน

1.1 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่อง (Differential equation of continuity)

การประติบัติสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่อง ได้ใช้หลักการการอนุรักษ์มวล ซึ่งกล่าวว่า มวลในปริมาตรควบคุมคงที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงในปริมาตรควบคุมเขียนในรูปความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (1)$$

หรือ

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = 0 \quad (2)$$

ใช้ทฤษฎีของ Reynolds Transport Theorem ซึ่งเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ สำหรับแปลงการวิเคราะห์ทั้งระบบ (System analysis) มาเป็นการวิเคราะห์ในปริมาตรควบคุม (Control volume analysis) สำหรับทฤษฎีของ Reynolds Transport Theorem มีรูปสมการเป็น

$$\frac{d}{dt} \int_V \Phi(\bar{x}, t) dV = \int_V \frac{\partial \Phi}{\partial t} dV + \int_S \Phi(\bar{u}\bar{n}) dA \quad (3)$$

สำหรับทฤษฎีของ Divergence Theorem (Gauss Theorem) มีรูปสมการเป็น

$$\int_V \frac{\partial u_i}{\partial x_i} dV = \int_S u_i n_i dA \quad (4)$$

พิจารณารวมสมการ (3) และสมการ (4) ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \int_V \Phi(\bar{x}, t) dV = \int_V \frac{\partial \Phi}{\partial t} dV + \int_V \frac{\partial \Phi u_i}{\partial x_i} dV \quad (5)$$

โดยที่ Φ คือ ปริมาณสเกลาร์

$\bar{n}$ คือ unit vector

ดังนั้นสมการ (2) สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\int_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} \right) dV = 0 \quad (6)$$

ผลจากสมการ (6) ทำให้ได้สมการดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

สมการ (7) เรียกว่าสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่อง สำหรับของไหลแบบอัดตัวได้สภาวะไม่คงตัว สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ จากสมการ (7) ลดรูปสมการเป็น

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

สมการ (8) เรียกว่า สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่อง สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ในสภาวะคงตัวและสภาวะไม่คงตัว

1.2 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของโมเมนตัม (Differential equation of momentum)

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของโมเมนตัม ได้มาจากการใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) ที่กล่าวว่า ผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุม

$$\frac{d\bar{m}\bar{u}}{dt} = \sum \bar{F} \quad (9)$$

จากทฤษฎีกลศาสตร์ของสารต่อเนื่อง (Continuum mechanics) ซึ่งนำหลักการเรื่องความเค้นมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแต่ละส่วนของเนื้อสาร หรือระบบที่สนใจ โดยได้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงที่กระทำเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง (Body forces) เช่น แรงที่เกิดจากแรง

โน้มถ่วงของโลก แรงเนื่องสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนแรงชนิดที่สอง คือ แรงกระทำที่ผิว (Surface force) เช่น แรงเนื่องจากการกระจายตัวของความดัน แรงเนื่องจากการกระจายตัวเนื่องจากความเค้นเป็นต้น

$$\sum \bar{F} = \int_S t_i dS + \int_V \rho b_i dV \quad (10)$$

พิจารณาสมการ (9), (10) และใช้ความสัมพันธ์ในสมการ (5) เมื่อ $\Phi = u_i$ ได้สมการดังนี้

$$\int_S t_i dS + \int_V \rho b_i dV = \int_V \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} dV + \int_V \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} dV \quad (11)$$

เมื่อ t_i คือ เวกเตอร์ความเค้น (Stress vector) ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับเทนเซอร์ความเค้น (Stress tensor ; σ_{ij}) ดังนี้

$$t_i = \sigma_{ij} n_j \quad (12)$$

$$\int_S t_i dS = \int_S \sigma_{ij} n_j dS \quad (13)$$

ใช้ทฤษฎีของ Divergence Theorem กับสมการ (13) ได้สมการใหม่เป็น

$$\int_S t_i dS = \int_V \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} dV \quad (14)$$

แทนสมการ (14) ในสมการ (11) ได้สมการใหม่ดังนี้

$$\int_V \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \right) dV = \int_V \left(\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} \right) dV \quad (15)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (16)$$

ทำการกระจายเทอมด้านซ้ายของสมการ (16)

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + u_i \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (17)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + u_i \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (18)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่อง $\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} \right) = 0$ ดังนั้นสมการ (18) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (19)$$

จากสมการ (19) เรียกว่า สมการทั่วไปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของโมเมนตัม หรือ สมการอนุรักษ์โมเมนตัม พิจารณาเทอม $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}$ ในสมการ (19) ใช้สมการ Constitutive equation ในกฎของความหนืดของนิวตัน (Newton's viscosity law) ที่บ่งบอกความสัมพันธ์ของความเค้นและอัตราการผิดรูปในของไหลชนิดนิวโทเนียน สำหรับของไหลที่มีคุณสมบัติไอโซทรอปิก (Isotropic) ได้ความสัมพันธ์ของ สมการดังนี้

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (20)$$

โดยที่ค่า δ_{ij} คือ ฟังก์ชันไครเนกเกอร์เดลต้า (Kronecker delta function) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & ; i = j \\ 0 & ; i \neq j \end{cases}$$

ค่า λ คือ ค่าความหนืดตามสมมติฐานของสโตกส์ (Stokes's hypothesis) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\lambda = -\frac{2}{3}$$

แทนสมการ (20) ในสมการ (19) ได้สมการดังนี้

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho b_i \quad (21)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่อง ของไหลอัดตัวไม่ได้ในสภาวะคงตัว $\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} = 0 \right)$ และเมื่อค่า μ มีค่าคงที่ ลดรูปสมการเป็น

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + b_i \quad (22)$$

สมการ (22) เรียกว่า สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของโมเมนตัม หรือสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation) สำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้ในสภาวะคงตัว

1.3 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของพลังงาน (Differential equation of energy)

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของพลังงาน พิจารณาจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกล่าวว่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นภายในปริมาตรควบคุม มีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ปริมาตรควบคุมกับพลังงานที่สิ่งแวดล้อมกระทำบนผิวปริมาตรควบคุม เขียนในรูปความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\dot{E}_t = \dot{W} + \dot{Q} \quad (23)$$

โดยงานที่กระทำบนปริมาตรควบคุม แบ่งออกเป็น งานที่เกิดจากแรงที่ผิวและงานที่เกิดจากแรงวัตถุ ส่วนพลังงานที่เปลี่ยนแปลงในของไหลประกอบด้วย พลังงานภายใน (Internal energy; e) และพลังงานจลน์ (Kinetic energy; $\frac{u_i u_i}{2}$) ดังนั้นพลังงานรวมคือ $e + \frac{1}{2} u_i u_i$ ประยุกต์สมการ (5) โดยให้ $\Phi = e + \frac{1}{2} u_i u_i$ ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \int_V \rho \left(e + \frac{1}{2} u_i u_i \right) dV}_{\text{พลังงานรวมในระบบ}} = \underbrace{\int_S t_i u_i dS}_{\text{ผลรวมของงานที่เกิดจากแรงที่ผิว}} + \underbrace{\int_V \rho b_i u_i dV}_{\text{ผลรวมของงานที่เกิดจากวัตถุ}} - \underbrace{\int_V \frac{\partial q_i}{\partial x_i} dV}_{\text{ผลรวมของพลังงานความร้อน}} \quad (24)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \left(e + \frac{1}{2} u_i u_i \right) dV = \int_V \frac{\partial \sigma_{ij} u_i}{\partial x_j} dV + \int_V \rho b_i u_i dV - \int_V \frac{\partial q_i}{\partial x_i} dV \quad (25)$$

$$\int_V \left[\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) u_j \right] dV = \int_V \left(\frac{\partial \sigma_{ij} u_i}{\partial x_j} + \rho b_i u_i - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \right) dV \quad (26)$$

จากสมการ (26) ทำให้ได้สมการใหม่เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) u_j \right] = \frac{\partial (\sigma_{ij} u_i)}{\partial x_j} + \rho b_i u_i - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (27)$$

ทำการขยายเทอมด้านซ้ายของสมการ (27) ได้สมการ

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) u_j \right] &= \rho \frac{\partial e}{\partial t} + e \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho}{2} \frac{\partial u_i u_i}{\partial t} + \frac{u_i u_i}{2} \frac{\partial \rho}{\partial t} \\ &+ \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + e \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} + \frac{\rho u_j}{2} \frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} + \frac{u_i u_i}{2} \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (28)$$

จัดรูปสมการ (28) ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) u_j \right] &= \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\rho}{2} \frac{\partial u_i u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} \\ &+ \frac{\rho u_j}{2} \frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} + e \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} \right] + \frac{u_i u_i}{2} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (29)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง ทำให้สมการ (29) ลดรูปสมการเป็น

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\rho}{2} \frac{\partial u_i u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + \frac{\rho u_j}{2} \frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) u_j \right] \quad (30)$$

หรือ

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho e + \frac{\rho u_i u_i}{2} \right) u_j \right] = \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + \rho u_j u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (31)$$

แทนสมการ (31) ลงในสมการ (27) ได้สมการใหม่เป็น

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + \rho u_j u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial (\sigma_{ij} u_i)}{\partial x_j} + \rho b_i u_i - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (32)$$

หรือ

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} + \rho u_j u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = u_i \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho b_i u_i - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (33)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + u_i \left(\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} = u_i \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \right) + \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (34)$$

เทอมในวงเล็บด้านซ้ายของสมการ (34) ตรงกับความสัมพัทธ์ของสมการ (19) ดังนั้นสมการ (34) สามารถลดรูปสมการลงเป็น

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial e}{\partial x_i} = \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (35)$$

เขียนเทอมด้านซ้ายของสมการ (35) ให้อยู่ในรูปค่าอนุพันธ์ย่อยสมบูรณ์ (Substantial derivative)

$$\rho \frac{de}{dt} = \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial e}{\partial x_i} \quad (36)$$

จากความสัมพัทธ์ของพลังงานภายในและเอนทาลปี (Enthalpy; h) คือ $e = h - \frac{p}{\rho}$ และประยุกต์สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่องเพื่อลดรูปสมการ (36) ได้สมการใหม่เป็น

$$\rho \frac{de}{dt} = \rho \frac{dh}{dt} - \frac{dp}{dt} \quad (37)$$

โดยเอนทาลปี มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และความดันดังนี้

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_T dp \quad (38)$$

จากสมการความจุความร้อนที่ความดันคงที่ (Specific heat at constant pressure; c_p) ในรูปความสัมพันธ์ $c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$ และความสัมพันธ์ของ $\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_T = \frac{1}{\rho} + \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ แทนสมการเหล่านี้ในสมการ (2-58) ได้สมการ

$$dh = c_p dT + \left[\frac{1}{\rho} + \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \right] dp \quad (39)$$

แทนสมการ (39) ในสมการ (37) ได้สมการ

$$\rho \frac{de}{dt} = \rho \left[c_p \frac{dT}{dt} + \frac{dp}{dt} \left(\frac{1}{\rho} + \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \right) \right] - \frac{dp}{dt} \quad (40)$$

$$= \rho c_p \frac{dT}{dt} + \frac{dp}{dt} + \left(\frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{dp}{dt} \right) - \frac{dp}{dt} \quad (41)$$

ดังนั้น ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของสมการเป็น

$$\rho \frac{de}{dt} = \rho c_p \frac{dT}{dt} + \left(\frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{dp}{dt} \right) \quad (42)$$

จากสมการ (20) และจากกฎการนำความร้อนของฟูริเยร์ คือ $q_i = -k \frac{\partial T}{\partial x_i}$ ดังนั้นสมการ (35) เขียนอยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\rho c_p \frac{dT}{dt} + \left(\frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{dp}{dt} \right) &= \left[-p \delta_{ij} + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \\
&= -p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \lambda \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (43)
\end{aligned}$$

ขยายเทอมด้านซ้ายของสมการ (43) และจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \beta T \frac{dp}{dt} - p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \Phi + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (44)$$

เมื่อ

$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermo expansion coefficient)

$\Phi = \lambda \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ คือ ฟังก์ชันการคายตัวเนื่องจากความหนืด (Viscous dissipation function)

สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้และค่า k คงที่ ทำให้ค่า $\beta = 0$ ดังนั้นสมการ (44) ลดรูปสมการเป็น

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = k c_p \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} + \Phi \quad (45)$$

สำหรับของไหลที่มีความเร็วระดับปานกลาง ทำให้สามารถละทิ้งเทอม Φ ในสมการ (45) และในสภาวะคงตัว $\left(\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \right)$ ทำให้ได้สมการในรูป

$$\frac{\partial u_i T}{\partial x_i} = \alpha_T \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} \quad (46)$$

เมื่อ $\alpha_T = k / \rho c_p$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อน (Diffusivity coefficient)

สมการ (46) เรียกว่า สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของพลังงาน สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ในสภาวะคงตัว

1.4 สมการการถ่ายโอนประจุ (Charge transport)

สมการการถ่ายโอนประจุเป็นส่วนสำคัญในการหาค่าโอห์มมิกโอเวอร์โพเทนเชียลในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง รูปแบบทั่วไปของสมการการถ่ายโอนประจุในสภาวะคงตัว มีรูปแบบการเป็น

$$\nabla \cdot \vec{i} = \nabla \cdot (-\sigma_m \nabla \phi) = 0 \quad (47)$$

โดยที่ σ_m คือ ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนหรือไอออนของเซลล์

ϕ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์

ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับแคโทด และเชื้อเพลิงกับไฮโดรเจน กำหนดให้ค่าความต่างศักย์ครึ่งเซลล์ (Half-cell voltage) ที่แคโทด (ϕ_{Cat}) และแอโนด (ϕ_{An}) มีค่าเท่ากับศูนย์และ $-V_{cell}$ ตามลำดับ ดังนั้น $\phi_{Cat} - \phi_{An}$ จึงมีค่าเท่ากับ V_{cell} ซึ่งเท่ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เซลล์ทำงาน ดังนั้นฟลักซ์ของประจุเกิดจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแคโทดกับอิเล็กโตรไลต์ และอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแอโนดกับอิเล็กโตรไลต์

2. ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง

การคำนวณเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method) เป็นระเบียบวิธีที่เกิดจากการประยุกต์วิธีการของระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) และระเบียบวิธีไฟต์เอเลเมนต์ (Finite element method) โดยแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันตรงวิธีประมาณตัวแปรและกระบวนการดีสครีไทซ์ (Discretize) ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่ใช้ในการคำนวณสำหรับงานวิจัยนี้

2.1 สมการส่งถ่ายสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน

สมการส่งถ่าย (Transport equation) เป็นการจัดรูปสมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อนให้เขียนอยู่ในรูปตัวแปรเดียวกัน ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)}_{\text{Unsteady term}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \bar{u} \phi)}_{\text{Convection term}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)}_{\text{Diffusion term}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Source term}} \quad (48a)$$

หรือเขียนในรูปเทนเซอร์

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (48b)$$

โดยที่ Γ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)

ϕ คือ ตัวแปรสเกลาร์ เช่นเวกเตอร์ความเร็ว และอุณหภูมิ

S_ϕ คือ เทอมแหล่งกำเนิด (Source term) ของตัวแปรที่สนใจ

ตาราง 11 รูปแบบการส่งถ่ายสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน [ชาญณรงค์, 2548]

Transport equation	ϕ	Γ	S_ϕ
Continuity	1	0	0
Momentum	$\bar{u}$	μ	$-\nabla p + \rho \bar{b}$
Energy	T	k/c_p	$\Phi + \beta T(dp/dt)$

ในตาราง 11 แสดงรูปแบบการส่งถ่ายของสมการควบคุมการไหล และการถ่ายเทความร้อนสำหรับการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม นั่น เริ่มต้นด้วยการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในสมการ (48) ตลอดทั้งปริมาตรควบคุมแล้วทำการดิสครีไทซ์ลงบนจุดต่อต่างๆ บนปริมาตรควบคุมซึ่งจะได้แสดงวิธีการคำนวณต่อไป

2.2 การดิสครีไทซ์สมการ

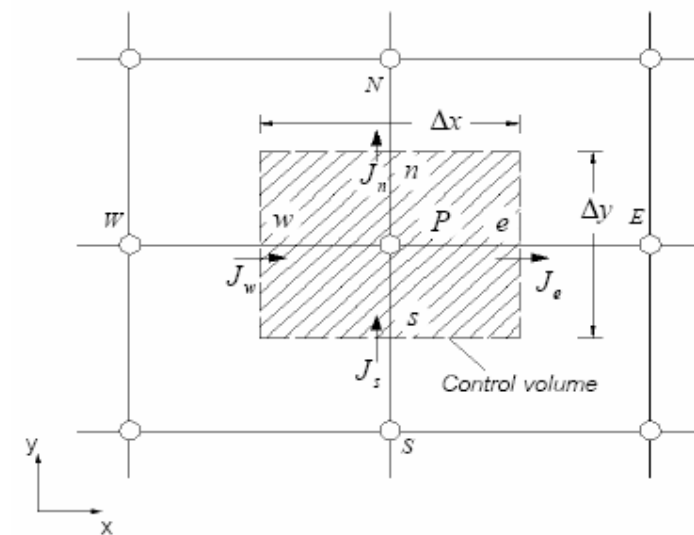
ในการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม นั่น เริ่มต้นด้วยการดิสครีไทซ์สมการโดยการอินทิเกรตตลอดทั้งปริมาตรควบคุม ซึ่งในที่นี้ได้แสดงการดิสครีไทซ์ ปัญหาการพาและการแพร่ (Convection and diffusion) ในสถานะไม่คงตัวใน 2 มิติ และได้ขยายไปสู่ 3 มิติต่อไป พิจารณาจากสมการ (48) เขียนในรูปสมการ 2 มิติ ได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = S \quad (49)$$

เมื่อ J_x และ J_y คือ ค่าฟลักซ์การพาพร้อมกับฟลักซ์การแพร่ (Convection plus diffusion) โดยกำหนดเป็น

$$J_x = \rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (50)$$

$$J_y = \rho v \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (51)$$



ภาพประกอบ 64 ปริมาตรควบคุมสำหรับปัญหาสองมิติ [ชาญณรงค์, 2548]

เมื่อ u, v คือ ความเร็วในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ทำการอินทิเกรตสมการ (50) บน ปริมาตรควบคุมที่แสดงในภาพประกอบ 64 ได้สมการดังนี้

$$\frac{(\rho_p \phi_p - \rho_p^0 \phi_p^0) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + J_e - J_w + J_n - J_s = (S_C + S_p \phi_p) \Delta x \Delta y \quad (52)$$

ซึ่งค่า “0” แทนค่าเริ่มต้นของช่วงเวลา (Time step) ส่วนค่า J_e, J_w, J_n, J_s จะถูกอินทิเกรตบนผิวของปริมาตรควบคุม เช่น $J_e = \int J_x dy$ สำหรับบนผิวเซลล์ e และที่ผิวอื่นมี

ความสัมพันธ์เดียวกันผลการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่องบนปริมาตรควบคุม ได้ผลดังนี้

$$\frac{(\rho_P - \rho_P^0)\Delta x \Delta y}{\Delta t} + F_e - F_w + F_n - F_s = 0 \quad (53)$$

เมื่อ F_e, F_w, F_n, F_s คือ อัตราการไหลของมวลที่ผ่านผิวของปริมาตรควบคุม ในรูปสมการ

$$F_e = (\rho u)_e \Delta y \quad (54a)$$

$$F_w = (\rho u)_w \Delta y \quad (54b)$$

$$F_n = (\rho u)_n \Delta x \quad (54c)$$

$$F_s = (\rho u)_s \Delta x \quad (54d)$$

คูณสมการ (53) ด้วยสมการ ϕ_P ได้สมการ

$$\frac{\phi_P (\rho_P - \rho_P^0)\Delta x \Delta y}{\Delta t} + F_e \phi_P - F_w \phi_P + F_n \phi_P - F_s \phi_P = 0 \quad (55)$$

นำสมการ (52) ลบด้วยสมการ (55) ได้สมการ

$$\begin{aligned} (\phi_P - \phi_P^0) \frac{\rho_P^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t} + (J_e - F_e \phi_P) - (J_w - F_w \phi_P) + (J_n - F_n \phi_P) \\ - (J_s - F_s \phi_P) = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (56)$$

สมมติว่าปริมาตรควบคุมในหนึ่งมิติมีค่าสม่ำเสมอตลอด ทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$J^* - P \phi_i = A(\phi_i - \phi_{i+1}) \quad (57)$$

$$J^* - P \phi_{i+1} = B(\phi_i - \phi_{i+1}) \quad (58)$$

เมื่อ

$$A(P) = A(|P|) + [[-P, 0]] \quad (59)$$

$$B(P) = A(|P|) + [[P, 0]] \quad (60)$$

พิจารณาสมการ (56) โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการ (57) ถึง (60) ได้รูปทั่วไปของสมการพีชคณิตของสมการการพาและการแพร่ ดังนี้

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (61)$$

เมื่อ

$$a_E = D_e A(P_e) + [[-F_e, 0]] \quad (62a)$$

$$a_W = D_w A(P_w) + [[F_w, 0]] \quad (62b)$$

$$a_N = D_n A(P_n) + [[-F_n, 0]] \quad (62c)$$

$$a_S = D_s A(P_s) + [[F_s, 0]] \quad (62d)$$

$$a_p^0 = \frac{\rho_p^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (62e)$$

$$b = S_c \Delta x \Delta y + a_p^0 \phi_p^0 \quad (62f)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_p^0 - S_p \Delta x \Delta y \quad (62g)$$

และ

$$D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{(\delta x)_e} \quad (63a)$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y}{(\delta x)_w} \quad (63b)$$

$$D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x}{(\delta y)_n} \quad (63c)$$

$$D_s = \frac{\Gamma_s \Delta x}{(\delta y)_s} \quad (63d)$$

ส่วนค่า F_e, F_w, F_n, F_s กำหนดไว้ในสมการ (54) และค่าตัวเลขเพกเลต (Peclet number) เขียนอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$P_e = \frac{F_e}{D_e}, \quad P_w = \frac{F_w}{D_w}, \quad P_n = \frac{F_n}{D_n}, \quad P_s = \frac{F_s}{D_s} \quad (64)$$

จากหลักการเดียวกันสามารถขยายไปสู่การดิสครีไทซ์ใน 3 มิติ เมื่อ T = Top, B = Bottom ในทิศทางแกน z

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_T \phi_T + a_B \phi_B + b \quad (65)$$

เมื่อ

$$a_E = D_e A(P_e) + [[-F_e, 0]] \quad (66a)$$

$$a_W = D_w A(P_w) + [[F_w, 0]] \quad (66b)$$

$$a_N = D_n A(P_n) + [[-F_n, 0]] \quad (66c)$$

$$a_S = D_s A(P_s) + [[F_s, 0]] \quad (66d)$$

$$a_T = D_t A(P_t) + [[-F_t, 0]] \quad (66e)$$

$$a_B = D_b A(P_b) + [[F_b, 0]] \quad (66f)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho_P^0 \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad (66g)$$

$$b = S_C \Delta x \Delta y \Delta z + a_P^0 \phi_P^0 \quad (66h)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_T + a_B + a_P^0 - S_P \Delta x \Delta y \Delta z \quad (66k)$$

และ

$$F_e = (\rho u)_e \Delta y \Delta z, \quad D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y \Delta z}{(\delta x)_e} \quad (67a)$$

$$F_w = (\rho u)_w \Delta y \Delta z, \quad D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y \Delta z}{(\delta x)_w} \quad (67b)$$

$$F_n = (\rho v)_n \Delta z \Delta x, \quad D_n = \frac{\Gamma_n \Delta z \Delta x}{(\delta y)_n} \quad (67c)$$

$$F_s = (\rho v)_s \Delta z \Delta x, \quad D_s = \frac{\Gamma_s \Delta z \Delta x}{(\delta y)_s} \quad (67d)$$

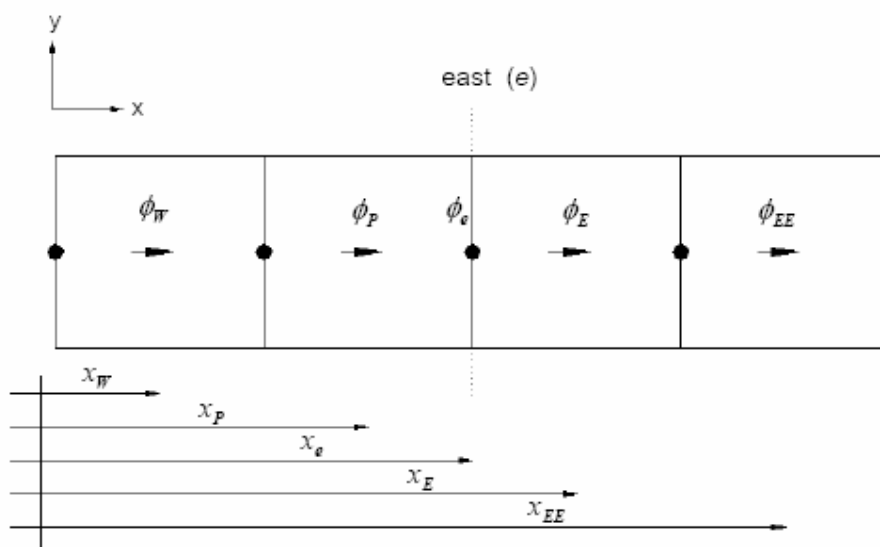
$$F_t = (\rho w)_t \Delta x \Delta y, \quad D_t = \frac{\Gamma_t \Delta x \Delta y}{(\delta z)_t} \quad (67e)$$

$$F_b = (\rho w)_b \Delta x \Delta y, \quad D_b = \frac{\Gamma_b \Delta x \Delta y}{(\delta z)_b} \quad (67f)$$

2.3 แบบแผนการคำนวณสำหรับระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง

แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical scheme) ใช้สำหรับการคำนวณค่า ϕ บนผิวปริมาตรควบคุม เพื่อความสะดวก ได้จัดการแบ่งผลคูณของค่า Convective (ϕ) และค่า Transport velocity (u_i) ตัวอย่างเช่น ฟลักซ์ที่ผ่านผิว east ของ ϕ_p ดังแสดงในภาพประกอบ 8 กำหนดเป็น

$$[\phi u_i] \approx [\phi]_{conv} [u_i]_{tran} \quad \text{นั่นคือ} \quad [\phi u]^{east} \approx [\phi]_{conv}^{east} [u]_{tran}^{east} \quad (68)$$



ภาพประกอบ 65 ฟลักซ์การพาและฟลักซ์การแพร่บนผิวของปริมาตรควบคุม [ชาญณรงค์, 2548]

เมื่อตัวยก east อ้างถึงค่าที่ผิว east สำหรับค่า ϕ_e ขึ้นอยู่กับแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลขที่เลือกใช้ซึ่งมีหลายวิธี ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบแผนวิธีควิก (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics ; QUICK) และได้แสดงรายละเอียดดังนี้

1. แบบแผนวิธีควิก

แบบแผนวิธีควิกเป็นแบบแผนวิธีที่ใช้โหนด 3 ตำแหน่งในการประมาณค่าของแต่ละเซลล์ (ใช้ 2 โหนดที่ต้นกระแสและ 1 โหนดที่ท้ายกระแส) โดยทั่วไปสามารถเขียนความสัมพันธ์ของการสำหรับผิว east ได้ดังนี้

$$[\phi]_{conv}^{east} = \phi_e = \begin{cases} q_1\phi_E - q_2\phi_W + (1 - q_1 + q_2) & \text{if } [u]_{tran}^{east} > 0 \\ q_3\phi_P - q_4\phi_{EE} + (1 - q_3 + q_4) & \text{if } [u]_{tran}^{east} < 0 \end{cases} \quad (69)$$

เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ q_i กำหนดเป็น

$$q_1 = \frac{(2 - \lambda_{e,W})\lambda_{e,P}^2}{1 + \lambda_{e,P}^2 - \lambda_{e,W}} \quad (70a)$$

$$q_2 = \frac{(1 - \lambda_{e,P})(1 - \lambda_{e,W})^2}{1 + \lambda_{e,P}^2 - \lambda_{e,W}} \quad (70b)$$

$$q_3 = \frac{(1 - \lambda_{e,W})(1 - \lambda_{e,P})^2}{1 + \lambda_{e,E}^2 - \lambda_{e,P}} \quad (70c)$$

$$q_4 = \frac{\lambda_{e,P}\lambda_{e,E}^2}{1 + \lambda_{e,E}^2 - \lambda_{e,P}} \quad (70d)$$

ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้สามารถใช้ได้ทั้งกริดสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ (Uniform and non-uniform grid) ในกรณีพิจารณากริดสม่ำเสมอ โดยใช้หลักการของอนุกรมเทย์เลอร์ ขยายค่า ϕ_e ซึ่งกำหนดได้เป็นดังนี้ เมื่อ $[u]_{tran}^{east} > 0$

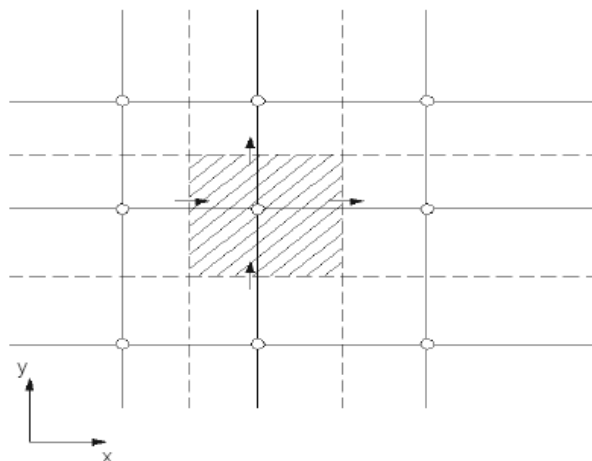
$$\phi_e = \frac{\phi_e + \phi_E}{2} - \frac{1}{8}(\phi_E - 2\phi_P + \phi_W) - \underbrace{\frac{3(\Delta x)^3}{48} \left(\frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \right)_P}_{T.E.} + h.o.t. \quad (71)$$

ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการ (69) เมื่อ $q_1 = 3/8$ และ $q_2 = -1/8$ แบบแผนวิธีควมมีค่าอันดับความถูกต้องเป็นอันดับสาม

2.4 การแก้ปัญหาสนามการไหล

การตีสคริปต์สมการโดยการกำหนดให้เก็บค่าตัวแปรทุกตัวไว้ที่โหนดปกติ นั้น อาจทำให้เกิดการไม่ควบคู่ (Decouple) ของความเร็วและความดันหรือที่เรียกว่า Checkerboard problem การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการเก็บค่าสเกลาร์ เช่น ความดัน อุณหภูมิ เป็นต้น ไว้ที่โหนดปกติ

และคำนวณความเร็วที่ผิวของปริมาตรควบคุม ดังแสดงในภาพประกอบ 66 ซึ่งเป็นลักษณะการจัดวางตัวแปรแบบ Staggered grid ใน 2 มิติ โดยทำการคำนวณค่าความเร็ว (u, v) ที่ผิวของปริมาตรควบคุมและคำนวณตัวแปรอื่นๆ บนโหนดปกติ



ภาพประกอบ 66 การจัดวางตัวแปรแบบ Staggered grid $\rightarrow = u, \uparrow = v, o =$ ตัวแปรอื่นๆ
[ชาญณรงค์, 2548]

ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของโมเมนตัม และสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่องนั้นต้องมีผลเฉลยที่สอดคล้องกัน ทำให้ในระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ได้พัฒนาระบบการคำนวณเพื่อให้สมการทั้งสองมีค่าเฉลยที่สอดคล้องกัน ในงานวิจัยนี้แสดงรายละเอียดเฉพาะกระบวนการหาคำตอบของวิธีซิมเปิลซี (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation Consistent; SIMPLEC)

วิธีซิมเปิลซีเริ่มจากการสมมติค่าความดันและความเร็ว แล้วคำนวณหาค่าความเร็วจากค่าความเร็วและค่าความดันที่สมมติ เพื่อนำค่าความเร็วที่คำนวณได้ไปหาค่าความดันอีกครั้ง โดยใช้วิธีค่าความดันแก้ไข (Pressure-correction method) เพื่อช่วยคำนวณความดันให้ถูกต้องซึ่งค่าความดันแก้ไข (Pressure-correction) ที่ได้นี้ ถูกนำกลับไปหาค่าความเร็ว และทำซ้ำตามขั้นตอนดังกล่าวจนกระทั่งผลเฉลยเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งทำให้ค่าความเร็วและค่าความดันมีความสัมพันธ์ไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและการอนุรักษ์มวล

1. กระบวนการหาคำตอบของวิธีซิมเปิลซี

จากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของโมเมนตัมทำการดิสครีไทซ์ได้สมการเป็น

$$\text{ในแกน } x \quad a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (p_P - p_E) A_e \quad (72)$$

$$\text{ในแกน } y \quad a_n v_n = \sum a_{nb} v_{nb} + b + (p_P - p_N) A_n \quad (73)$$

$$\text{ในแกน } z \quad a_t w_t = \sum a_{nb} w_{nb} + b + (p_P - p_T) A_t \quad (74)$$

กำหนดให้ค่า

$$p = p^* + p' \quad (75)$$

$$u = u^* + u' \quad (76)$$

$$v = v^* + v' \quad (77)$$

$$w = w^* + w' \quad (78)$$

เมื่อ

p, u, v, w คือ ความดันและความเร็วที่ถูกต้อง

p^*, u^*, v^*, w^* คือ ความดันที่กำหนดขึ้น (Guessed pressure) และความเร็วที่คำนวณ

จาก p^*

p', u', v', w' คือ ค่าความดันแก้ไข (Pressure correction) และค่าแก้ไขความเร็ว

(Velocity correction)

โดยที่ค่าความเร็ว u^*, v^*, w^* สามารถคำนวณได้จากสมการโมเมนตัมที่มีลักษณะเช่นเดียวกับสมการ (72) ถึง (74) ซึ่งได้สมการดิสครีไทซ์สำหรับความเร็วเป็น

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e \quad (79)$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (p_P^* - p_N^*) A_n \quad (80)$$

$$a_t w_t^* = \sum a_{nb} w_{nb}^* + b + (p_P^* - p_T^*) A_t \quad (81)$$

นำสมการ (75) ถึง (78) แทนในสมการ (72) ถึง (74) แล้วลบออกจากสมการ (79) ถึง (81) ตามลำดับได้สมการใหม่เป็น

$$a_e u_e' = \sum a_{nb} u_{nb}' + (p_P' - p_E') A_e \quad (82)$$

$$a_n v'_n = \sum a_{nb} v'_{nb} + (p'_P - p'_N) A_n \quad (83)$$

$$a_t w'_t = \sum a_{nb} w'_{nb} + (p'_P - p'_T) A_t \quad (84)$$

ในกระบวนการหาคำตอบของวิธีซิมเปิลซี ได้สมการค่าแก้ไขความเร็วดังนี้

$$u'_e = d_e (p'_P - p'_E) \quad \text{เมื่อ} \quad d_e = \frac{A_e}{a_e - \sum a_{nb}} \quad (85)$$

สมการ (85) เรียกว่า สมการค่าแก้ไขความเร็ว ดังนั้นค่า u'_e จึงมีความสัมพันธ์เป็น

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_P - p'_E) \quad (86)$$

และพิจารณาในลักษณะเดียวกันได้สมการเป็น

$$v_n = v_n^* + d_e (p'_P - p'_N) \quad (87)$$

$$w_t = w_t^* + d_e (p'_P - p'_T) \quad (88)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่อง $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$ ทำการอินทิเกรต

ตลอดปริมาตรควบคุมได้สมการใหม่เป็น

$$\begin{aligned} \frac{(\rho_P - \rho_P^0) \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + [(\rho u)_e - (\rho u)_w] \Delta y \Delta z + [(\rho v)_n - (\rho v)_s] \Delta z \Delta x \\ + [(\rho w)_t - (\rho w)_b] \Delta x \Delta y = 0 \end{aligned} \quad (89)$$

แทนค่าความเร็วจากสมการ (86) ถึง (88) ได้สมการดิครีไทซ์สำหรับค่า p' ดังนี้

$$a_P p'_P = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + a_T p'_T + a_B p'_B + b \quad (90)$$

เมื่อ

$$a_E = \rho_e d_e \Delta y \Delta z \quad (99a)$$

$$a_W = \rho_w d_w \Delta y \Delta z \quad (91b)$$

$$a_N = \rho_n d_n \Delta z \Delta x \quad (91c)$$

$$a_S = \rho_s d_s \Delta z \Delta x \quad (91d)$$

$$a_T = \rho_t d_t \Delta x \Delta y \quad (91e)$$

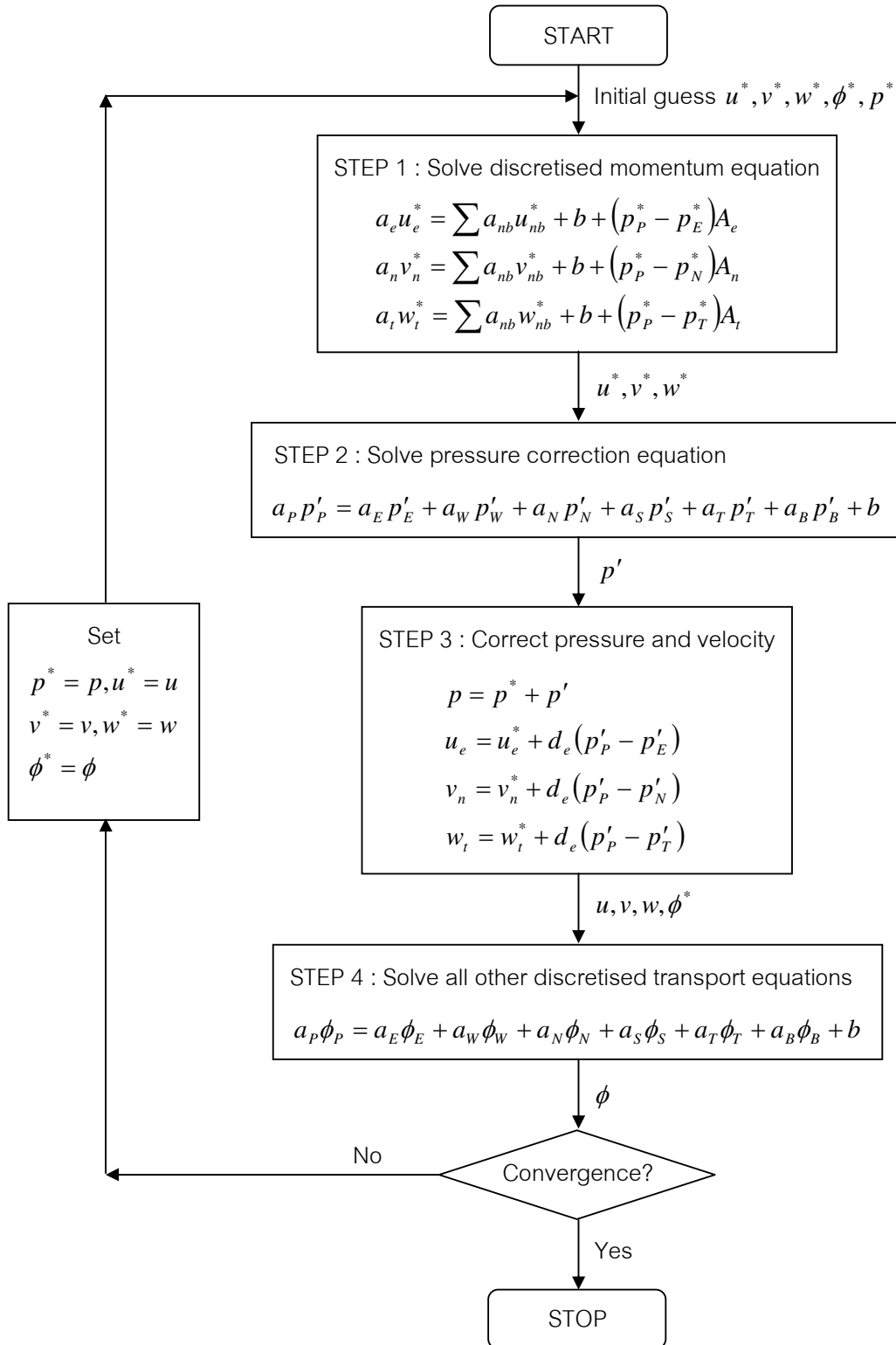
$$a_B = \rho_b d_b \Delta x \Delta y \quad (91 f)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_T + a_B \quad (91g)$$

$$b = \frac{(\rho_P^0 - \rho_P) \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y \Delta z + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta z \Delta x + [(\rho w^*)_b - (\rho w^*)_t] \Delta x \Delta y = 0 \quad (91h)$$

ดังนั้นขั้นตอนของกระบวนการซิมเปิลซีสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สมมติค่าของ $u^*, v^*, w^*, \phi^*, p^*$
2. คำนวณค่า u^*, v^*, w^* จากสมการ (79) ถึง (81)
3. นำค่า u^*, v^*, w^* ที่คำนวณได้มาแทนค่าในสมการ (90)
4. คำนวณหาค่า p' จากสมการ (90) จากนั้นนำมาแทนค่าในสมการ (75) จากนั้นจึงนำค่า p ที่ได้มากำหนดให้เป็นค่า p^* ค่าใหม่
5. คำนวณค่า u, v, w จากสมการ (86) ถึง (88) โดยใช้ค่า p' จากขั้นตอนที่ 4 จากนั้นจึงกำหนดให้ค่า u, v, w ที่ได้เป็น u^*, v^*, w^* ค่าใหม่
6. นำค่า u, v, w ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 5 มาหาค่าตัวแปร ϕ เช่น ค่าอุณหภูมิ เป็นต้น จากนั้นจึงกำหนดค่า ϕ ที่ได้เป็นค่า ϕ^* ค่าใหม่
7. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 จนกระทั่ง $u^*, v^*, w^*, \phi^*, p^*$ มีค่าลู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องโดยตรวจสอบจากการเข้าใกล้ศูนย์ของเทอม b ในสมการ (90) ซึ่งแสดงว่าค่า $u^*, v^*, w^*, \phi^*, p^*$ ที่คำนวณได้มีค่าสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของความต่อเนื่อง



ภาพประกอบ 67 กระบวนการหาคำตอบของวิธีซิมเพล็กซ์ [Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., 1995]

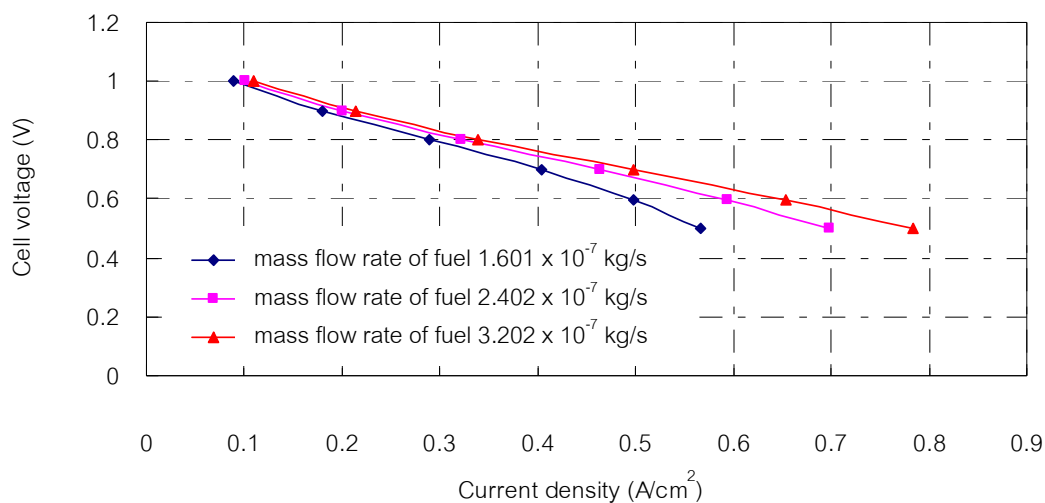
ภาคผนวก ข

ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ

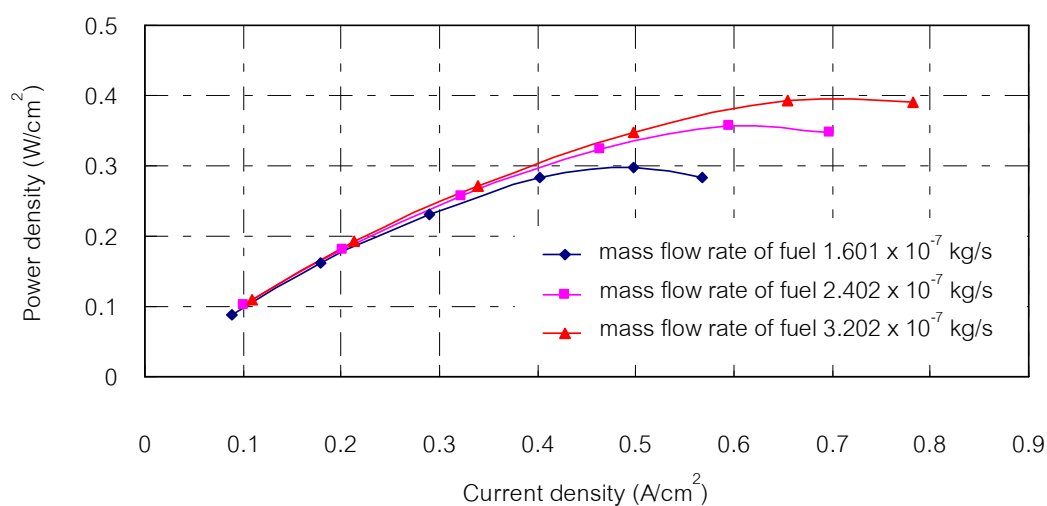
ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ (กรณีศึกษา 1 – 3)

ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ โดยที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจาก 1.601×10^{-7} ถึง 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้นจาก 1.683×10^{-5} ถึง 3.366×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งที่ค่าอุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่า 973 เคลวิน ผลจากการคำนวณพบว่า เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า และค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง ซึ่งจากภาพประกอบ 68 พบว่า เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าสูงนั้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าลดลง ซึ่งเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเท่ากัน อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.78 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในภาพประกอบ 69 พบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จนถึงจุดๆ หนึ่งจะลดลง โดยที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.39 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.65 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กับความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.6 โวลต์

สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ พบว่า เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง ซึ่งในกรณีที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 973 เคลวินนี้ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่ากำลังไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.62 วัตต์ แต่ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ โดยมีค่าเท่ากับ 45.71 เปอร์เซนต์ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันในทุกกรณีที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 39 และ 40 ตามลำดับ

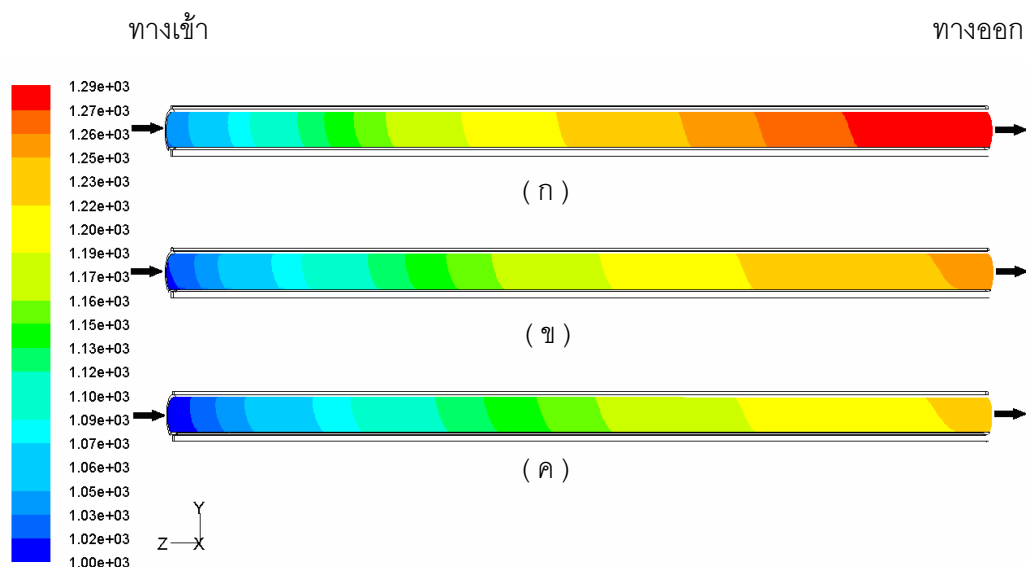


ภาพประกอบ 68 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 973 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ

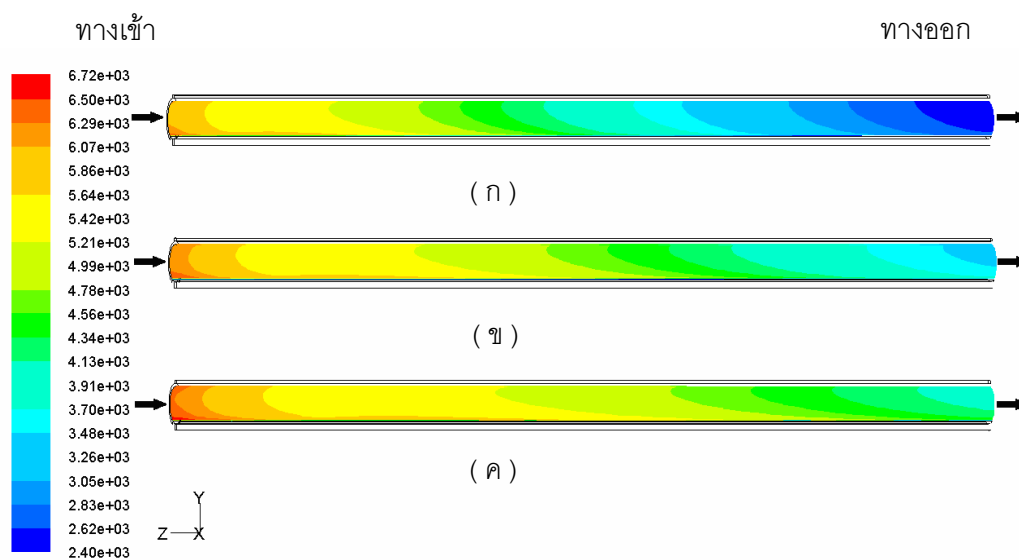


ภาพประกอบ 69 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 973 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ

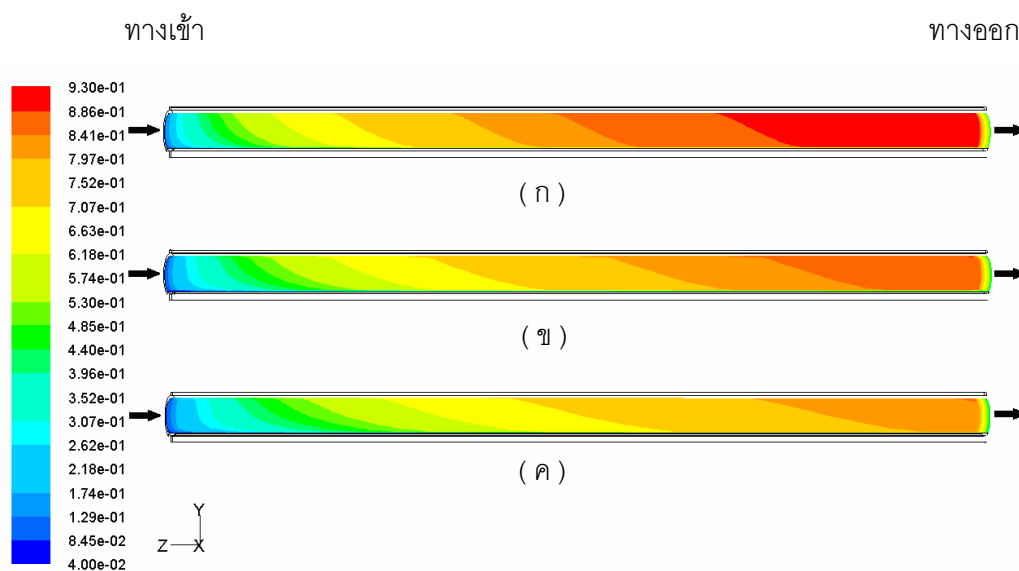
ตัวอย่างผลการคำนวณที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.7 โวลต์ ในกรณีที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น โดยแสดงผลของอุณหภูมิ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า สัดส่วนโดยมวลของน้ำ และสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน พบว่า อุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยที่ค่าของอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงที่น้อยที่สุด ให้ค่าของอุณหภูมิที่สูงที่สุด ดังแสดงในภาพประกอบ 70 เนื่องจากอัตราการไหลที่ช้ากว่านั้น ทำให้เกิดการสะสมตัวของพลังงานความร้อนที่ได้รับจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ที่มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณของไฮโดรเจนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาภายในเซลล์มากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 71 สำหรับสัดส่วนโดยมวลของน้ำและสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนนั้น พบว่า สัดส่วนโดยมวลของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนมีค่าลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์ที่เปลี่ยนรูปไปเป็นน้ำ ดังแสดงในภาพประกอบ 72 และ 73 ตามลำดับ



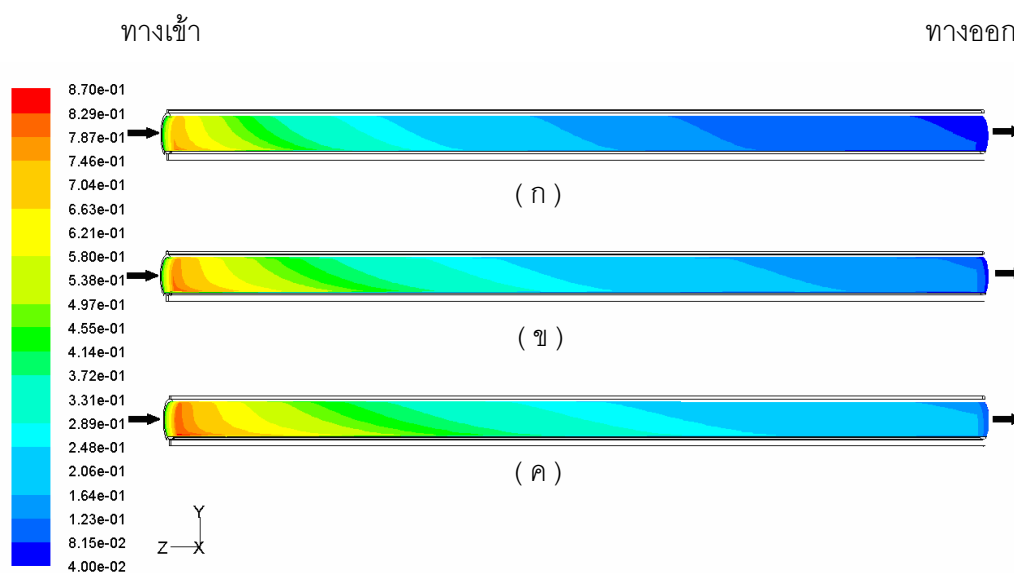
ภาพประกอบ 70 ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 973 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที



ภาพประกอบ 71 ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อุณหภูมิ
 ขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 973 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง
 (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที



ภาพประกอบ 72 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ
 เท่ากับ 973 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที
 (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที

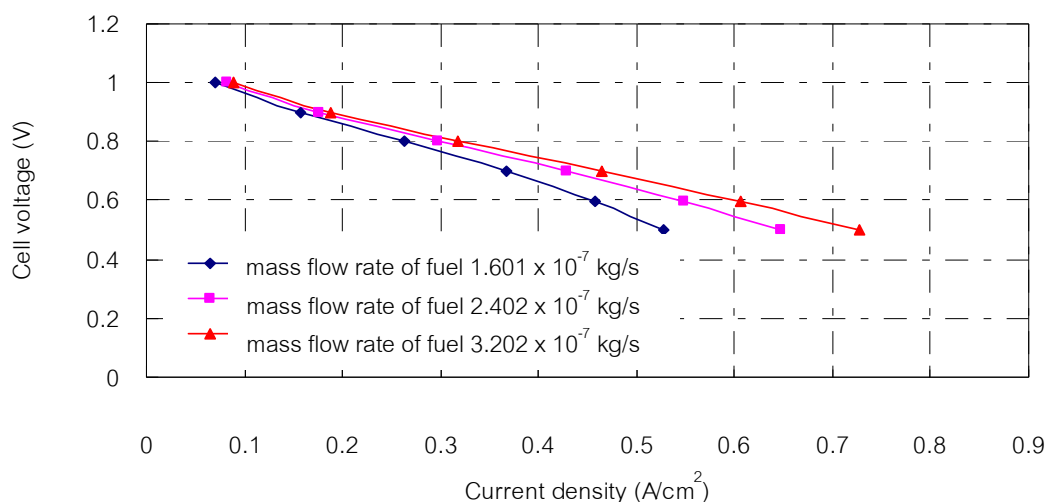


ภาพประกอบ 73 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 973 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที

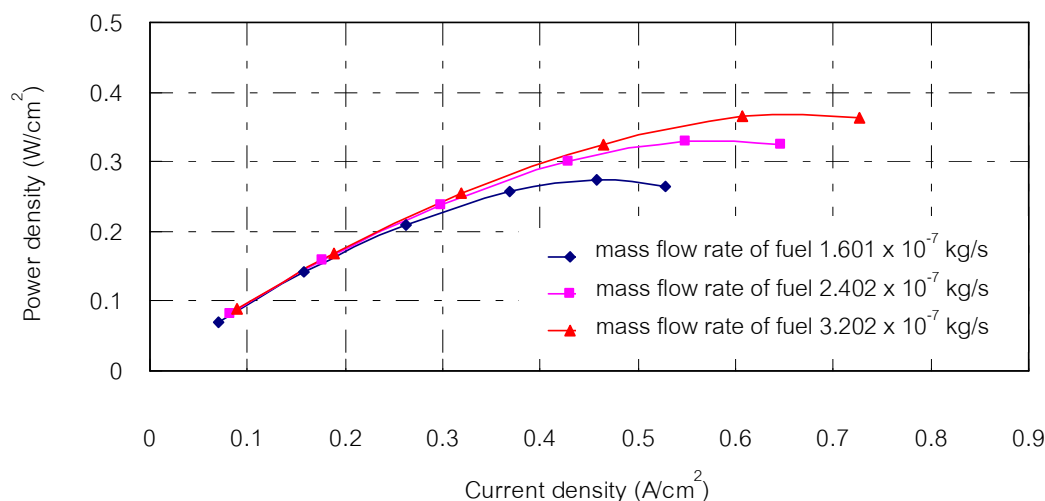
ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ โดยที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจาก 1.601×10^{-7} ถึง 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้นจาก 1.683×10^{-5} ถึง 3.366×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งที่ค่าอุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่า 1073 เคลวิน ผลจากการคำนวณพบว่า เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า และค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง ซึ่งจากภาพประกอบ 74 พบว่า เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าสูงนั้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าลดลง ซึ่งเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเท่ากัน อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.73 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในภาพประกอบ 75 พบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จนถึงจุดๆ หนึ่งจะลดลง โดยที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่าความ

หนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.36 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.61 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กับความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.6 โวลต์

สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ พบว่า เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง ซึ่งในกรณีที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1073 เคลวินนี้ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 8.92 วัตต์ แต่ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์เท่ากับ 41.91 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันในทุกกรณีที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 39 และ 40 ตามลำดับ

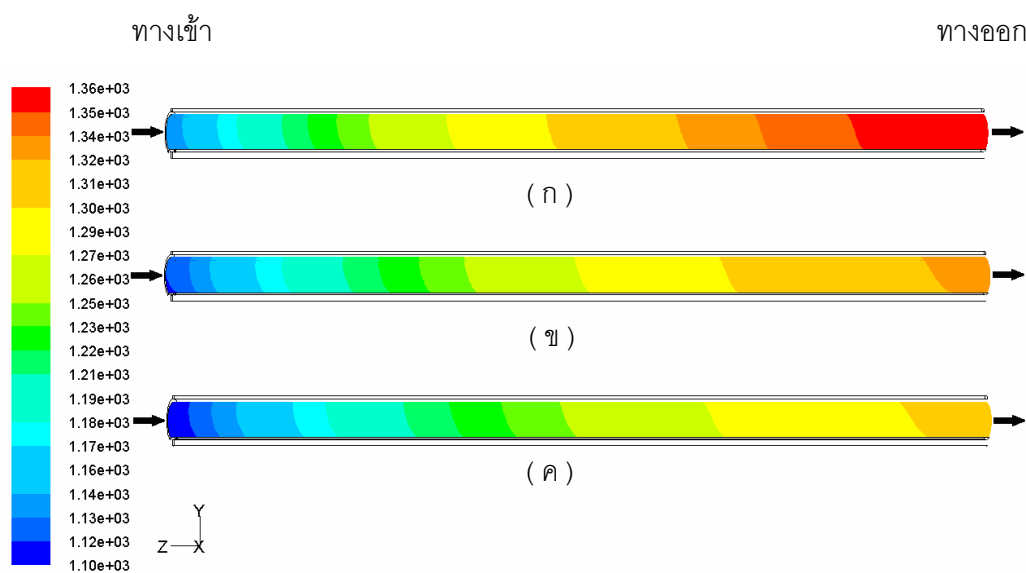


ภาพประกอบ 74 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1073 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ

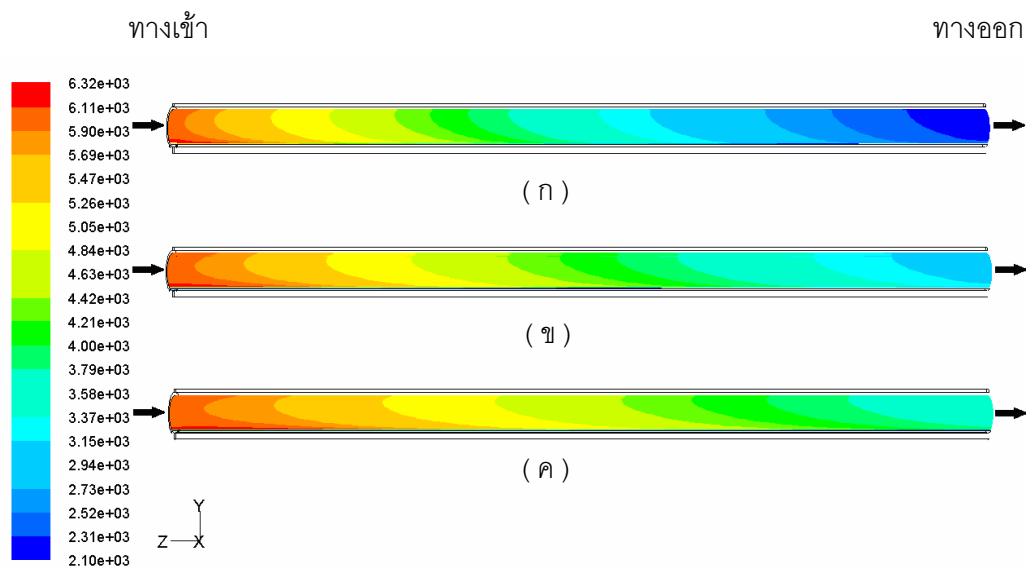


ภาพประกอบ 75 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1073 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ

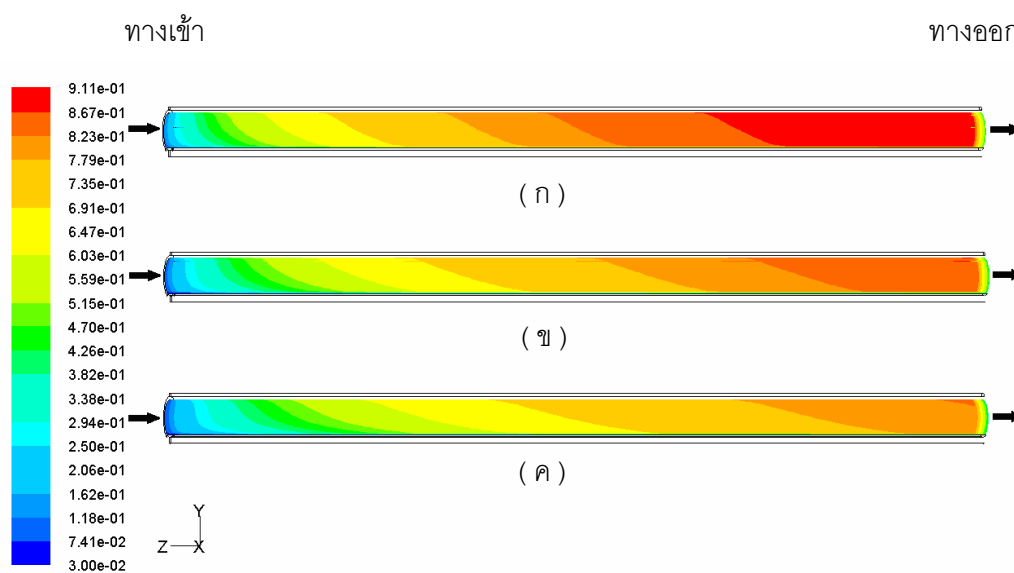
ตัวอย่างผลการคำนวณที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.7 โวลต์ ในกรณีที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น โดยแสดงผลของอุณหภูมิ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า สัดส่วนโดยมวลของน้ำ และสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน พบว่า อุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยที่ค่าของอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงที่น้อยที่สุด ให้ค่าของอุณหภูมิที่สูงที่สุด ดังแสดงในภาพประกอบ 76 เนื่องจากอัตราการไหลที่ช้ากว่านั้น ทำให้เกิดการสะสมตัวของพลังงานความร้อนที่ได้รับจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ที่มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณของไฮโดรเจนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาภายในเซลล์มากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 77 สำหรับสัดส่วนโดยมวลของน้ำและสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนนั้น พบว่า สัดส่วนโดยมวลของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนมีค่าลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์ที่เปลี่ยนรูปไปเป็นน้ำ ดังแสดงในภาพประกอบ 78 และ 79 ตามลำดับ



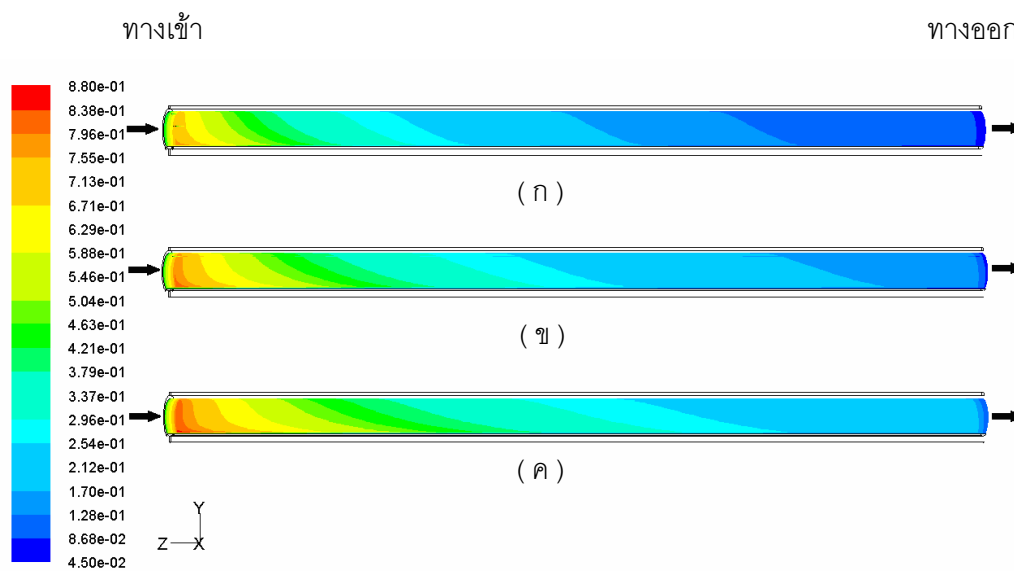
ภาพประกอบ 76 ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิง และอากาศเท่ากับ 1073 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที



ภาพประกอบ 77 ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1073 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที



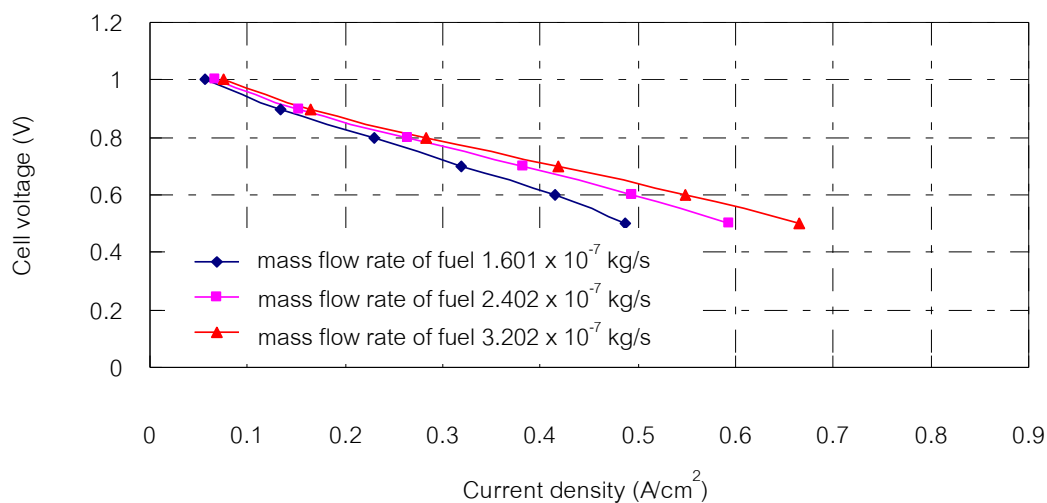
ภาพประกอบ 78 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ เท่ากับ 1073 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที



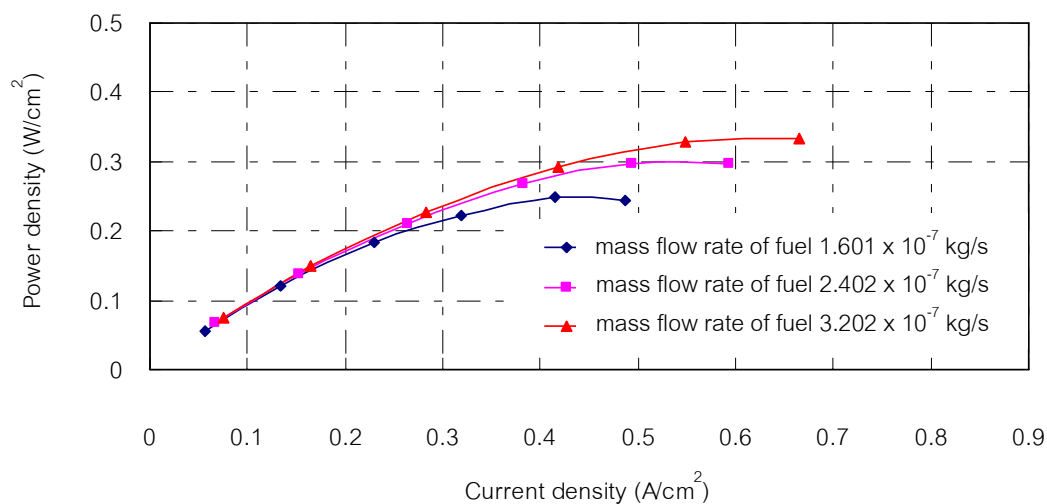
ภาพประกอบ 79 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ เท่ากับ 1073 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที

ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศ โดยที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจาก 1.601×10^{-7} ถึง 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้นจาก 1.683×10^{-5} ถึง 3.366×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งที่ค่าอุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่า 1173 เคลวิน ผลจากการคำนวณพบว่า เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า และค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง ซึ่งจากภาพประกอบ 80 พบว่า เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าสูงนั้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าลดลง ซึ่งเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเท่ากัน อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.66 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในภาพประกอบ 81 พบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จนถึงจุดๆ หนึ่งจะลดลง ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} และ 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที แต่ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อีกทั้งยังให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.33 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.66 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กับความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.5 โวลต์

สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ พบว่า เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์มีค่าลดลง ซึ่งในกรณีที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1173 เคลวินนี้ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 8.14 วัตต์ แต่ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที ให้ค่าประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์เท่ากับ 37.89 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันในทุกกรณีที่อุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 39 และ 40 ตามลำดับ

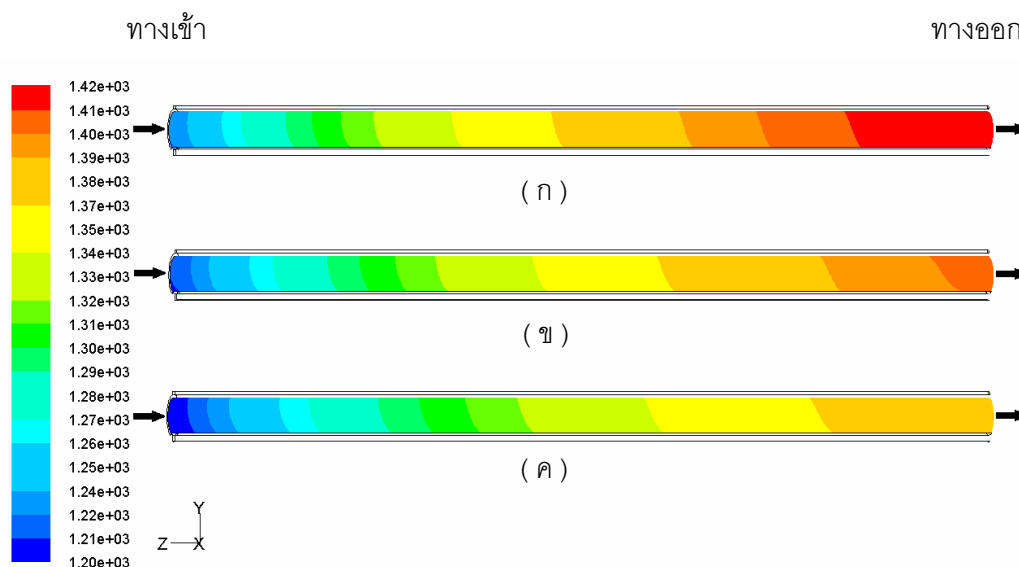


ภาพประกอบ 80 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1173 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ

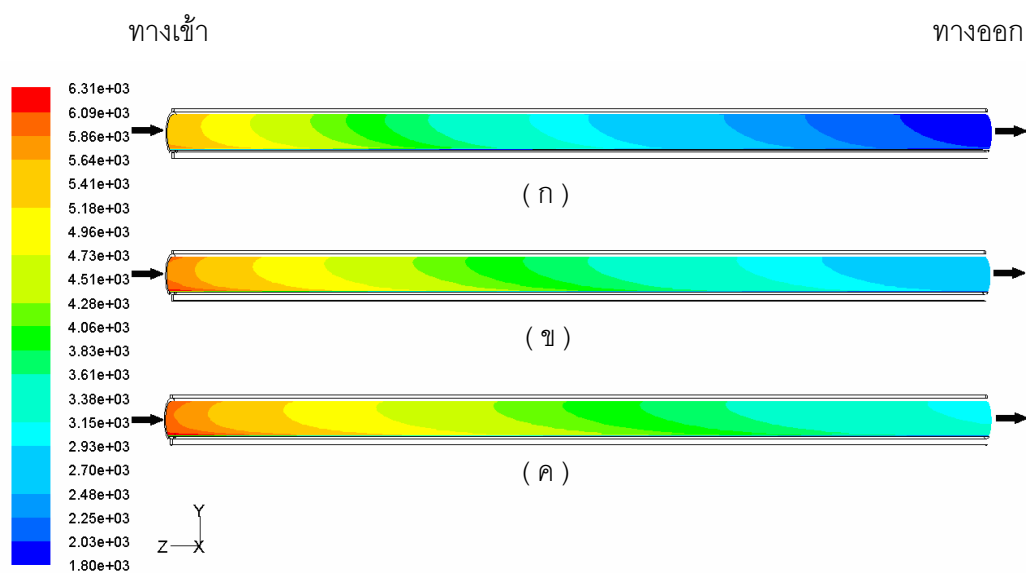


ภาพประกอบ 81 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1173 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงต่างๆ

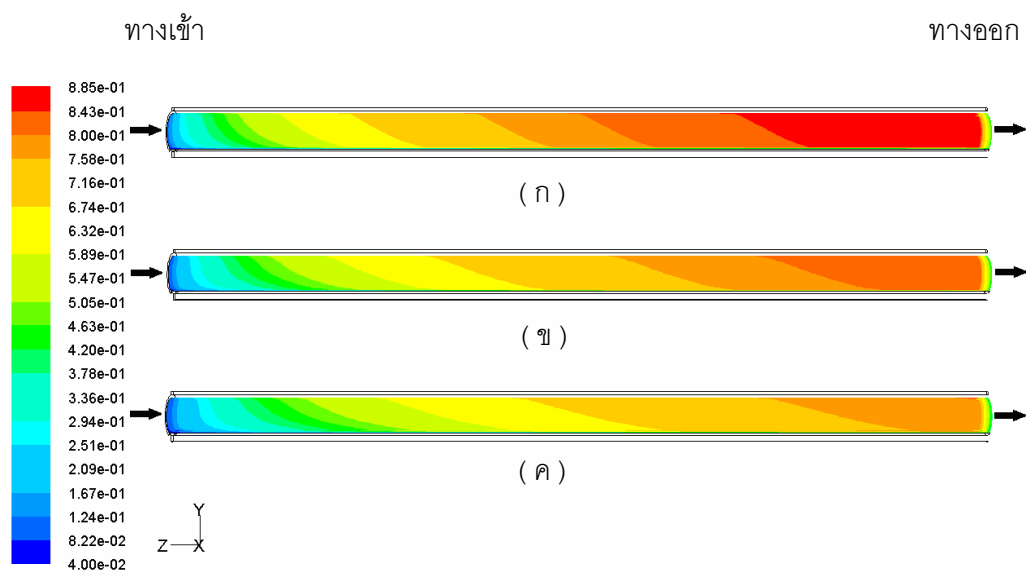
ตัวอย่างผลการคำนวณที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.7 โวลต์ ในกรณีที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น โดยแสดงผลของอุณหภูมิ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า สัดส่วนโดยมวลของน้ำ และสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน พบว่า อุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยที่ค่าของอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงที่น้อยที่สุด ให้ค่าของอุณหภูมิที่สูงที่สุด ดังแสดงในภาพประกอบ 82 เนื่องจากอัตราการไหลที่ช้ากว่านั้น ทำให้เกิดการสะสมตัวของพลังงานความร้อนที่ได้รับจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ที่มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณของไฮโดรเจนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาภายในเซลล์มากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 83 สำหรับสัดส่วนโดยมวลของน้ำและสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนนั้น พบว่า สัดส่วนโดยมวลของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนมีค่าลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์ที่เปลี่ยนรูปไปเป็นน้ำ ดังแสดงในภาพประกอบ 84 และ 85 ตามลำดับ



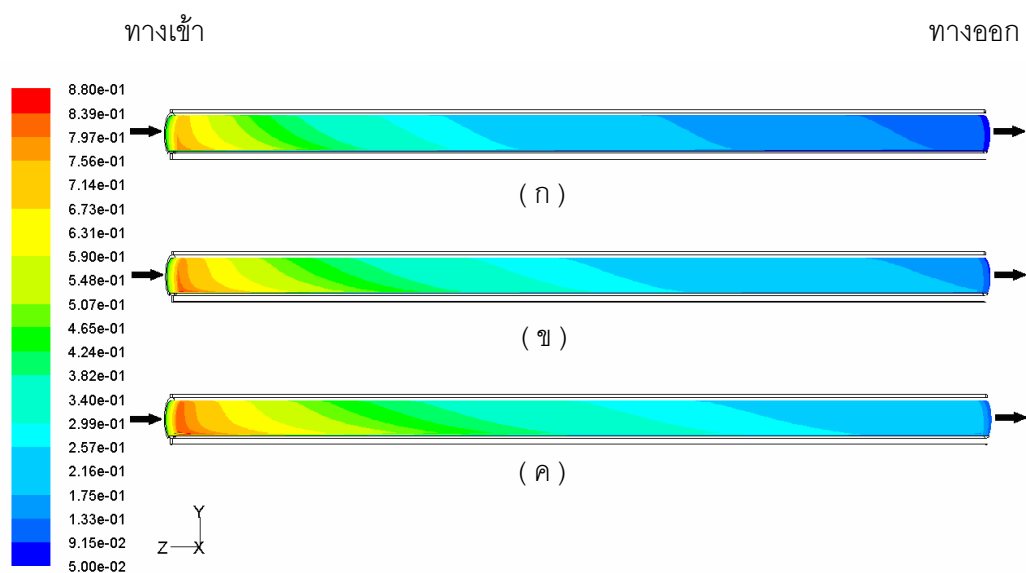
ภาพประกอบ 82 ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์ (เคลวิน) ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1173 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที



ภาพประกอบ 83 ภาพแสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อุณหภูมิ
 ขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1173 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง
 (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที



ภาพประกอบ 84 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของน้ำ ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ
 เท่ากับ 1173 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที
 (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที



ภาพประกอบ 85 ภาพแสดงค่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศเท่ากับ 1173 เคลวิน ที่อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (ก) 1.601×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที (ข) 2.402×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที และ (ค) 3.202×10^{-7} กิโลกรัมต่อวินาที

ภาคผนวก ค
บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

การศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

ในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

กรกฎ รัตนกรกาญจน์¹ วรรณวิไล ไกรเพ็ชร เอวานส์¹ และ อโนทัย 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

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

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

จำลองลักษณะการไหล เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการสั่นเปลี่ยงดังกล่าว โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อต้องการศึกษาถึงความเป็นไปได้สำหรับการใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

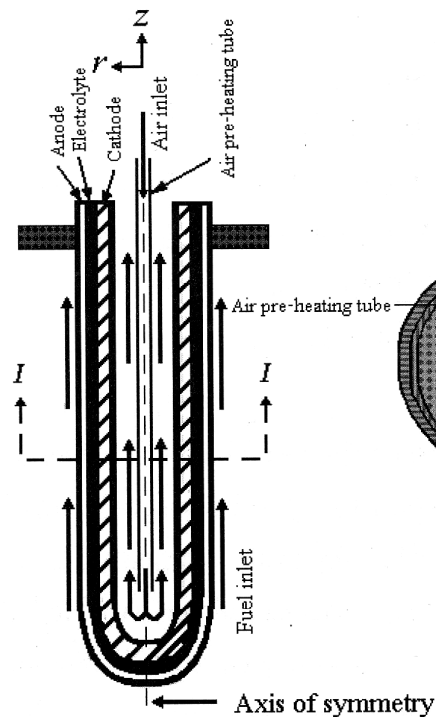
รายการสัญลักษณ์

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)

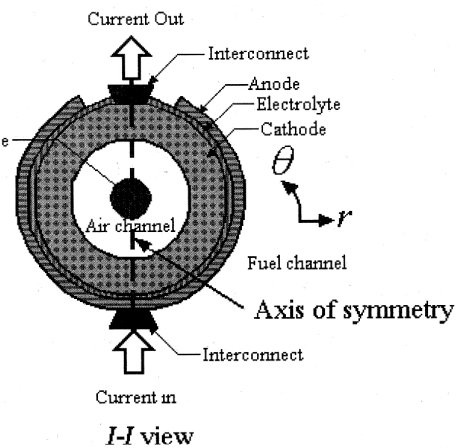
2. วิธีการจำลอง

งานวิจัยนี้ทำการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง โดยนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Hagiwara et al [1] ซึ่งก่อนหน้านี้ Suwanwarangkul [2] ได้ทำแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Hagiwara et al [1] โดยแบบจำลองที่ใช้นั้นใช้โปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICSTM ในการคำนวณ ซึ่งเป็นการคำนวณโดยใช้วิธี Finite Element แต่สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม FLUENT และเป็นการคำนวณโดยใช้วิธี Finite Volume โดยกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วย ซัพพอร์ตตั้งทูป (Supporting tube) แคโทด อิเล็กโทรไลต์ และแอโนด ประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิงประเภทท่อที่มีปลายปิดหนึ่งด้าน ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่กำหนดให้ไม่มีความแตกต่างระหว่างซัพพอร์ตตั้งทูปและแคโทด ดังนั้นแบบจำลองนี้สมการการถ่ายโอนพลังงานและการถ่ายโอนมวลผ่านซัพพอร์ตตั้งทูปจึงเหมือนกับแคโทด

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



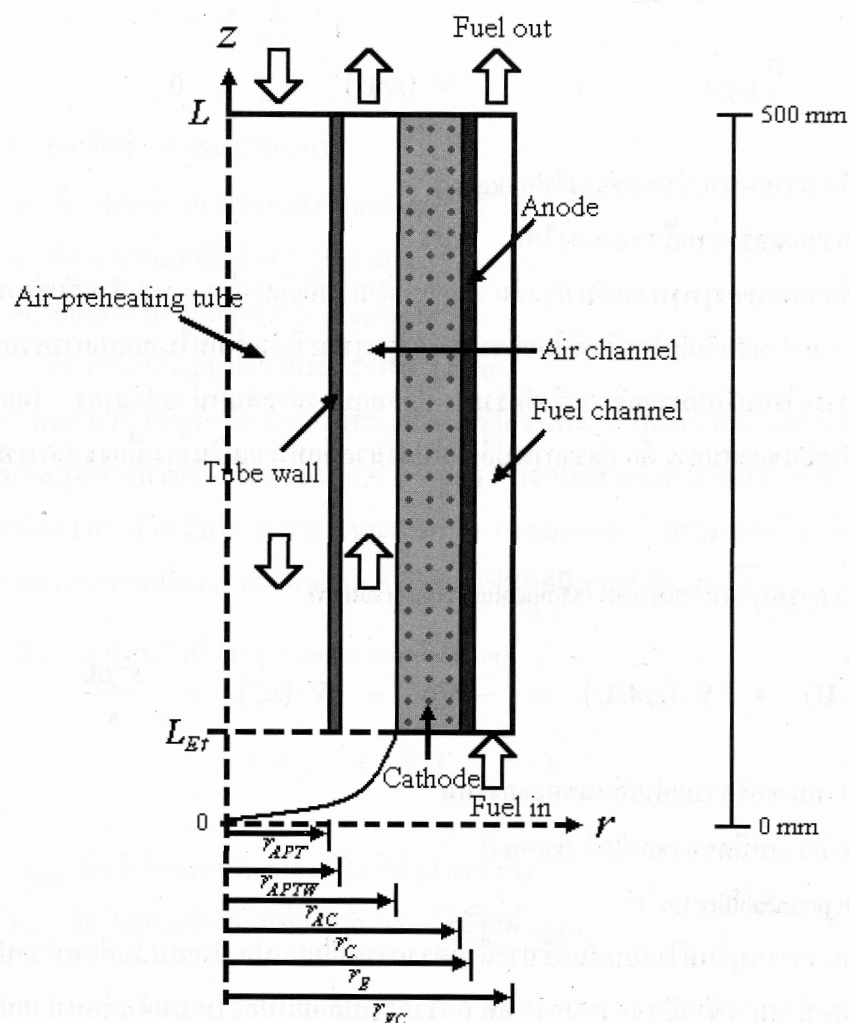
(ก)



(ข)

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)

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

โดยที่ ζ 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)

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

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 ($L_{Et} < z < L, r = r_{FC}$)	($0 < z < L, r = 0$): $\partial p_a / \partial r = 0$; $\partial u_a / \partial r = 0$, $\partial v_a / \partial r = 0$; $\partial c_{O_2} / \partial r = 0$; $\partial T_a / \partial r = 0$ ($L_{Et} < z < L, r = r_{FC}$) $\partial p_f / \partial r = 0$; $\partial u_f / \partial r = 0$, $\partial v_f / \partial r = 0$; $\partial c_i / \partial r = 0$; $\partial T_f / \partial r = 0$
ผนังของแอร์ฟรีสที่ตีงูบ ($L_{Et} < z < L, r = r_{APT}$) 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
ผิวสัมผัสระหว่างแอโนดกับช่องทาง การไหลของเชื้อเพลิง ($L_{Et} < z < L, r = r_E$)	$\partial p_f / \partial z = 0; u_f = 0, v_f = 0$

ตารางที่ 2 ขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่ทดลองโดย Hagiwara et al. [1]

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

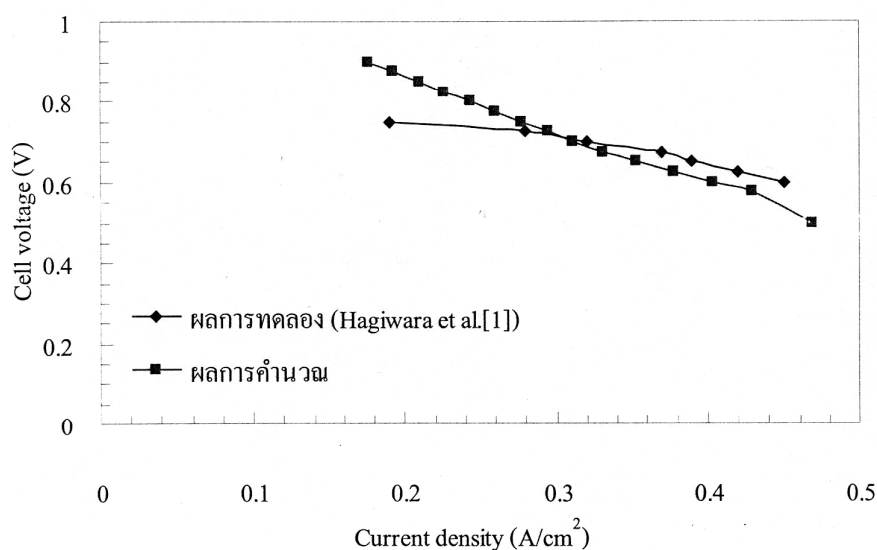
ตารางที่ 3 สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งประเภทท่อที่ทดลองโดย Hagiwara et al. [1]

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 สภาพะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

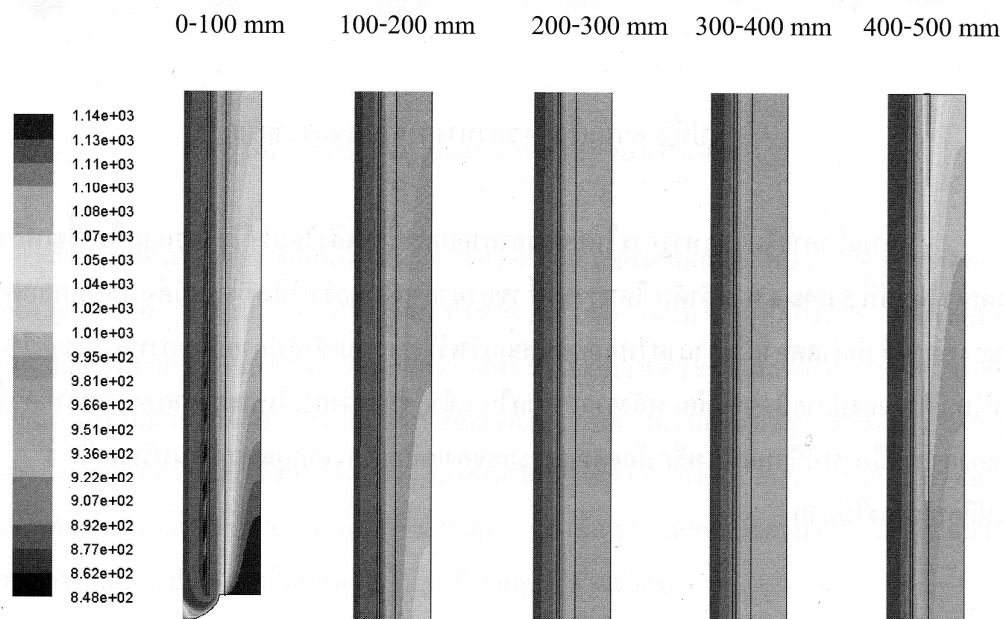
จากผลของการคำนวณเชิงตัวเลข ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงค่าระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ Hagiwara et al. [1] พบว่า ในช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่า 0.18 ถึง 0.26 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองสูงกว่าช่วงที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่า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



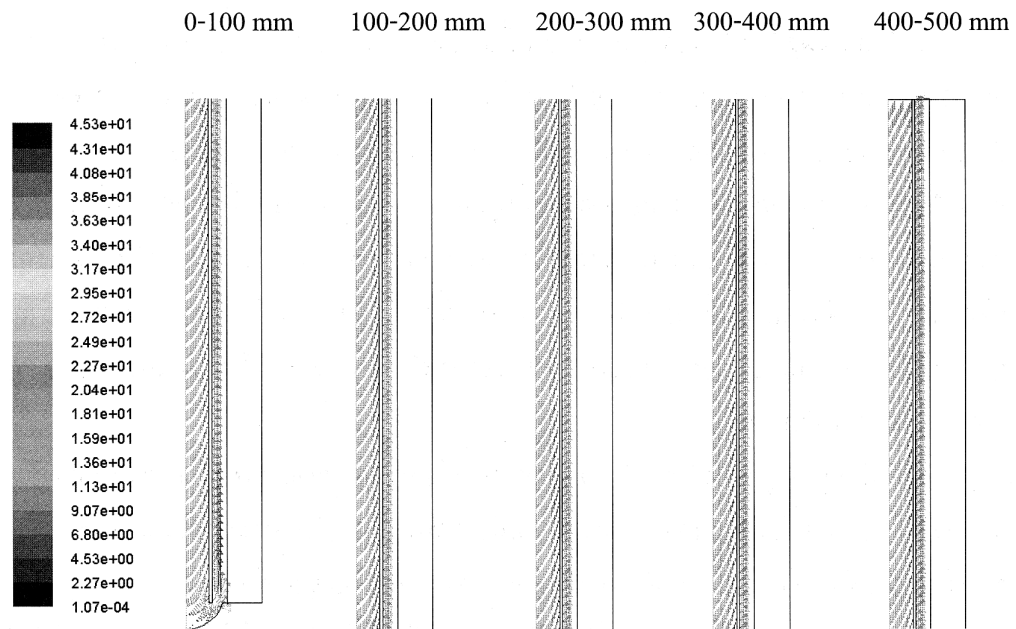
รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ Hagiwara et al. [1] กับผลของการคำนวณเชิงตัวเลขของงานวิจัยนี้

ตัวอย่างผลการคำนวณที่ 0.7 โวลต์ ที่สภาวะเงื่อนไขการทำงานของเซลล์ตามตารางที่ 2 และ 3 โดยแสดงผลของอุณหภูมิ ความเร็วภายในช่องทางการไหลของอากาศและเชื้อเพลิง รวมถึงสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนและน้ำภายในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง ซึ่งผลของอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1143 เคลวิน ที่ทางเข้าของเชื้อเพลิง โดยอุณหภูมิของอากาศในแอร์พริชิตติ้งทูปมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเข้าสู่ช่องทางการไหลของอากาศเนื่องจากอุณหภูมิที่ปลายปิดของท่อมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ทางเข้าของอากาศ และอุณหภูมิของอากาศในช่องทางการไหลของอากาศพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับอุณหภูมิของเชื้อเพลิงในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง พบว่า อุณหภูมิของเชื้อเพลิง ในช่วง 0 ถึง 300 มิลลิเมตร มีค่าลดลงเรื่อยๆ หลังจากนั้นอุณหภูมิของเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากพลังงานความร้อนที่ได้รับจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง

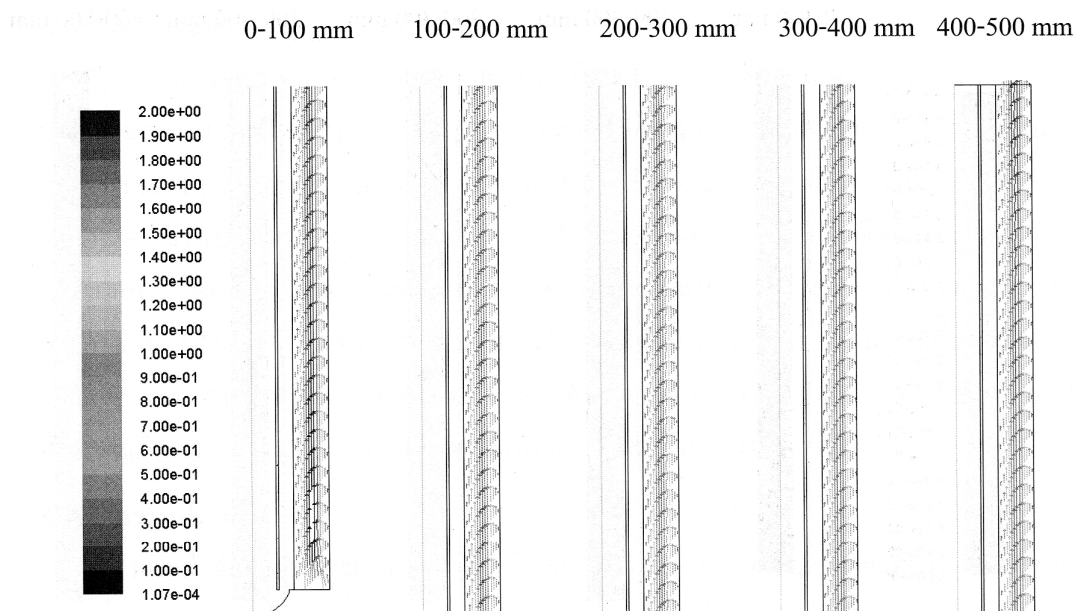


รูปที่ 4 อุณหภูมิ



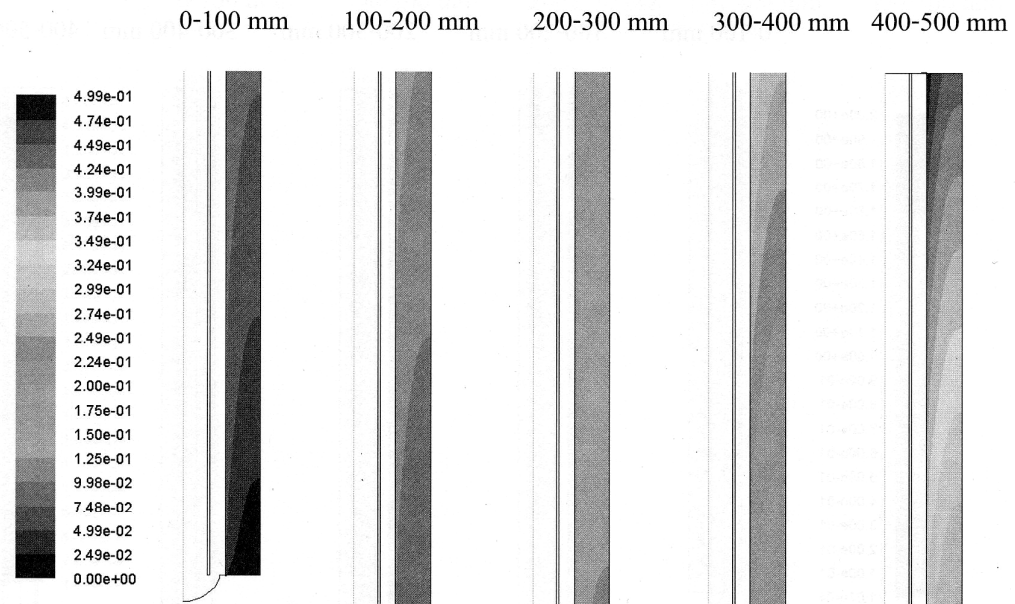
รูปที่ 5 ความเร็วในช่องทางการไหลของอากาศ

ความเร็วภายในช่องทางการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงโดยใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ โดยความเร็วของอากาศในแอร์ฟริชต์ดังทูปมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะของท่อ แล้วมีค่าลดลงเมื่ออากาศไหลออกจากแอร์ฟริชต์ดังทูปเข้าสู่ปลายปิดของท่อ เพราะว่าขนาดที่ใหญ่กว่าของปลายปิดของท่อ หลังจากอากาศไหลเข้าสู่ช่องทางการไหลของอากาศ พบว่า ความเร็วของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตลอดระยะของเซลล์เนื่องจากอุณหภูมิในบริเวณนี้เปลี่ยนแปลงไม่มาก

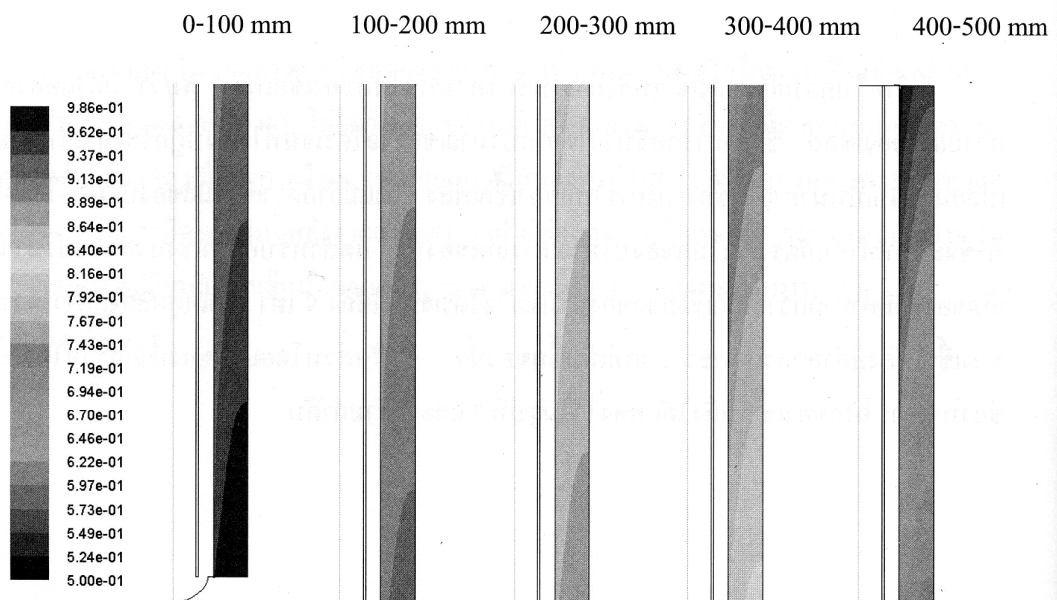


รูปที่ 6 ความเร็วในช่องทางการไหลของเชื้อเพลิง

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



รูปที่ 7 สัดส่วนโดยมวลของน้ำในช่องทางการไหลของเขื่อนเพลิง



รูปที่ 8 สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในช่องทางการไหลของเขื่อนเพลิง

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 องค์กรฯ และศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้การสนับสนุนโปรแกรมในการจำลองการไหล นอกจากนี้ขอขอบคุณ ดร.รพีพงศ์ สุวรรณวรกุล 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 H_2 - H_2O - CO - CO_2 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) MnO_3 -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] ชาญณรงค์ วันทา, "การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์," *ปริญญานิพนธ์ (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 2548.
- [16] วรรัชช วัฒนะ, "การศึกษาการไหลในชั้นวางเซลล์และชุดกระจายการไหลสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง," *วิทยานิพนธ์(วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*, 2547.

ภาคผนวก ง
คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

A_{cell}	พื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิง (ตารางเซนติเมตร)
E_{cell}°	ความต่างศักย์ผันกลับของเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์)
F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96487 คูลอมป์ต่อโมล)
F_{H_2}	อัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจน (โมลต่อวินาที)
ΔG_{H_2}	พลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปของไฮโดรเจนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
ΔH_f	เอนทาลปีที่เปลี่ยนไปของเชื้อเพลิง
$\Delta H_{electrochem}$	เอนทาลปีที่เปลี่ยนไปที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี
i_{elec}	อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในอิเล็กโทรด (แอมแปร์)
i_{ion}	ไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นอิเล็กโทรไลต์ (แอมแปร์)
J_i	ฟลักซ์การแพร่ของสาร (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
j	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
j_0	exchange current density (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
j_{H_2}	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้ของไฮโดรเจนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนด (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
j_L	limiting current density (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
j_{O_2}	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้ของออกซิเจนที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทด (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
K_{eq,H_2}	ค่าคงที่สมดุลสำหรับปฏิกิริยา
κ	permeability (หนึ่งต่อตารางเมตร)
LHV_{H_2}	lower heating values ของไฮโดรเจน (จูลต่อโมล)
l	ระยะทางที่อิเล็กตรอนหรือไอออนเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)
M_i	มวลโมเลกุลของสาร i (กิโลกรัมต่อโมล)
n	จำนวนของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี
n_i	เลขวาเลนซ์อิเล็กตรอนของสาร i
n_{H_2}	จำนวนโมลของไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
n_{O_2}	จำนวนโมลของออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี
$\vec{n}$	unit vector
P	กำลังไฟฟ้าที่ได้ (วัตต์)
PD	ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)
$p_{O_2,An} , p_{O_2,Cat}$	ความดันแฟงของออกซิเจนบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่แอโนดและแคโทดตามลำดับ
p_{H_2} , p_{H_2O}	ความดันแฟงของไฮโดรเจนและน้ำบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่แอโนดตามลำดับ
R	ค่าคงที่ของก๊าส (8.314 จูลต่อเคลวินต่อโมล)
S_ϕ	เทอมแหล่งกำเนิดของตัวแปรที่สนใจ
T	อุณหภูมิที่เซลล์ทำงาน (เคลวิน)
$\mathbf{U}$	เวกเตอร์ความเร็วของของไหล
U_f	ฟลูเอลยูทิลไลซ์เซชันแฟกเตอร์
U_a	แอเรียยูทิลไลซ์เซชันแฟกเตอร์
u	ความเร็วในทิศทาง x
V_{cell}	ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)
v	ความเร็วในทิศทาง y
w	ความเร็วในทิศทาง z
X_i	สัดส่วนโดยมวลของสาร
x	ระยะในแนวแกน x
y	ระยะในแนวแกน y
z	ระยะในแนวแกน z
ρ	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
σ	ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนหรือไอออน
ε	ขนาดของรูพรุน
μ	ความหนืดของของไหล (กิโลกรัม เมตรต่อวินาที)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
η_{Act}	แอคติเวชันโอเวอร์โพเทนเชียล
η_{Conc}	คอนเซนเทรชันโอเวอร์โพเทนเชียล
η_{Ohm}	โอห์มมิกโอเวอร์โพเทนเชียล
$\eta_{thermal}$	ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์
ζ	เทนเซอร์ความเค้นเฉือนของของไหล
ϕ	ความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์
β	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน
Φ	ฟังก์ชันการคายตัวเนื่องจากความหนืด
λ_a	แอริสตอยซีโอเมทริกเรโซ
Γ	สัมประสิทธิ์การแพร่
α	ค่าสัมประสิทธิ์ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน
α_T	สัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อน

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายกรกฎ รัตนกรกาญจน์
วันเดือนปีเกิด	18 มกราคม พ.ศ. 2525
สถานที่เกิด	สุรินทร์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	374 ถ.เทศบาล 1 ต. ในเมือง อ. เมือง จ. สุรินทร์ 32000

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2539	มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสุรวิทยาคาร
พ.ศ. 2542	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสิรินธร
พ.ศ. 2547	อุดมศึกษา (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2551	บัณฑิตศึกษา (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ