

การศึกษาการไหลในชั้นวางเซลล์และชุดกระจายการไหลสำหรับเซลล์
เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

STUDY OF FLOW IN CELL STACK AND EXTERNAL MANIFOLD FOR A SOLID
OXIDE FUEL CELL

วรัรชชล วัฒนะ
WASSACHOL WATTANA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1241-4

การศึกษาการไหลในชั้นวางเซลล์และชุดกระจายการไหลสำหรับเซลล์
เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

STUDY OF FLOW IN CELL STACK AND EXTERNAL MANIFOLD FOR A SOLID
OXIDE FUEL CELL

วรัชชอล วัฒนนะ

WASSACHOL WATTANA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-151-241-4

STUDY OF FLOW IN CELL STACK AND EXTERNAL MANIFOLD FOR A SOLID
OXIDE FUEL CELL

WASSACHOL WATTANA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

ISBN 974-151-241-4

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการไหลในชั้นวางเซลล์และชุดกระจายการไหล สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง
นักศึกษา	นางสาววรรษชล วัฒนนะ
รหัสประจำตัว	43062008
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

บทคัดย่อ

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งแบบแผ่นที่มีชุดกระจายการไหลแบบติดตั้งด้านนอกนั้น เซลล์เชื้อเพลิงและอากาศต้องกระจายไปยังช่องการไหลขนาดเล็กของเซลล์ รวมทั้งกระจายไปตามความสูงของชั้นวางเซลล์อย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์อย่างสม่ำเสมอส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น ในการศึกษานี้ได้ออกแบบชั้นวางเซลล์และชุดกระจายการไหลเพื่อศึกษาผลกระทบของมุมเอียงของชุดกระจายการไหลที่มีต่อการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์ โดยใช้ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลเป็นตัวแปรแสดงลักษณะการกระจายการไหล ซึ่งทำการวัดความดันสถิตที่ทางเข้าและทางออกของช่องนำการไหล 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ช่องริมซ้ายสุด ช่องตรงกลาง และช่องริมขวาสุดของแต่ละเซลล์ซึ่งประกอบด้วย 13 ช่องการไหล ภายในชั้นวางเซลล์ซึ่งประกอบด้วยเซลล์จำนวน 10 เซลล์ โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลที่ทางเข้าของชั้นวางเซลล์เท่ากับ 5, 5.5, 6, 6.5, และ 7 ลิตรต่อนาที เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลที่มีความเอียง 3.10 และ 5.65 องศา พบว่าชุดกระจายการไหลที่เอียง 3.10 องศาทำให้เกิดการกระจายการไหลที่ดีกว่า และเกิดความดันสูญเสียในช่องการไหลน้อยกว่า นอกจากนั้นยังได้ทำการจำลองการไหลภายในชั้นวางเซลล์ที่มีเงื่อนไขเหมือนกับการทดลอง เมื่อกำหนดให้ชุดกระจายการไหลมีมุมเอียง 1.13, 3.10, 5.65, และ 7.89 องศา โดยใช้โปรแกรมทาง CFD ที่ชื่อ STAR-CD[®] ช่วยในการศึกษาพฤติกรรมการไหลที่ไม่สามารถแสดงได้จากการทดลอง พบว่าลักษณะการไหลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองมีความสอดคล้องกันโดยเฉพาะในเซลล์ที่ 1 ดังนั้นใช้แบบจำลองนี้จึงมีศักยภาพที่น่าสนใจซึ่งน่าจะนำมาใช้เพื่อช่วยในการปรับปรุงและพัฒนาชั้นวางเซลล์ต่อไปได้

Thesis Title	Study of Flow in Cell Stack and External Manifold for a Solid Oxide Fuel Cell
Student	Miss Wassachol Wattana
Student ID.	43062008
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Jarruwat Chareonsuk

ABSTRACT

In the external manifold of planar Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) stack, the fuel and air have to be uniformly distributed into cell channels and throughout the stack. It has to be so since the uniform flow distribution will help improving the fuel cell performance. In this study, the stack and external manifold were designed such that the effect of inclined angle of gas distributor on flow distribution was investigated. The value of pressure drop across the channel is used for demonstrating flow distribution. To achieve this, static pressure at the inlet and outlet of cell channel is measured at 3 positions for each cell; the extreme left, the middle, and the extreme right channel. The stack consists of 10 cells with interconnector with 13 rectangular-cross-section channel. The static pressure is measured for 5 levels of the inlet gas flow rates; 5, 5.5, 6, 6.5, and 7 L/min. The inclined angles of gas distributor for this experiment are 3.10 and 5.65 degrees. The one with 3.10 degree provided better flow distribution and less pressure drop. In addition, the flow aerodynamics were simulated at similar conditions. The inclined angles of gas distributor for this experiment are 1.13, 3.10, 5.65 and 57.89 degrees. A CFD code that solves algebraic finite-volume equations is STAR-CD[®]. By showing so, we are able to hence some ideas of the flow behavior that could not be demonstrated by mean of experiment. The experimental and simulation results are qualitatively in good agreement, especially in cell number one that right at the bottom of stack. The model can potentially be benefit for further development of cell stack.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี โดยมี ผศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ได้ให้คำแนะนำ สั่งสอน และเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาตลอดเวลาในการทำวิจัย ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่สนับสนุนทุนวิจัยให้แก่โครงการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งเพื่อเป็นเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยในโครงการดังกล่าว และขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับความกรุณาของ ดร.สุมิตรา จรสโรจน์กุล หัวหน้าโครงการฯ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำเรื่องเซลล์เชื้อเพลิง ตลอดจนตรวจทานความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิง ขอขอบคุณนักวิจัยและผู้ช่วยนักวิจัยในโครงการทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือตลอดเวลาที่ได้ทำงานวิจัยในโครงการฯ

ขอขอบคุณทบวงมหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนพัฒนาอาจารย์วิทยาเขตสารสนเทศสำหรับใช้จ่ายในการเรียนระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณพี่ ๆ และน้อง ๆ เจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนห้องปฏิบัติการของ MTEC ทุกท่านที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำดี ๆ ในการสร้างชุดทดลองสำหรับใช้ในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณคุณนิวัติ นาคะโยธินสกุล คุณนิวัติ ภูเจริญ ที่ให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรม STAR-CD® คุณสุรพันธ์ ธงไชยะสำหรับความอนุเคราะห์ให้ใช้คอมพิวเตอร์เพื่อการวิจัย

สุดท้ายขอขอบพระคุณพ่อ แม่ ที่อบรม สั่งสอนและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดจนน้องชายที่คอยให้กำลังใจและดูแลในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

คุณค่าและประโยชน์ใด ๆ อันเกิดจากงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน และขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอวยพรสุข สวัสดิ์แต่ทุกท่านด้วยเทอญ

ววรรษชล วัฒนะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมวิจารณ์.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC).....	4
2.3 การออกแบบเซลล์และชั้นวางเซลล์ (Cell and Stack Designs).....	6
2.4 แบบจำลอง (Modeling) และ การวิเคราะห์ (Analysis)	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	31
3.1 บทนำ.....	31
3.2 การออกแบบชั้นวางเซลล์ (Cell Stack Design).....	31
3.2.1 อินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector).....	31
3.2.2 ชุดกระจายการไหล (External Manifold).....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการทดลอง ผลการจำลองและการวิเคราะห์.....	68
5.1 บทนำ.....	68
5.2 ผลการทดลอง.....	69
5.2.1 ผลการทดลองเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65°	69
5.2.2 ผลการทดลองเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10°	75
5.2.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° และ 3.10°	79
5.3 ผลการจำลองการไหล.....	83
5.4 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณระหว่างผลการทดลองและการจำลอง.....	95
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	100
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	100
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	102
6.3 งานวิจัยที่ควรทำต่อ.....	103
เอกสารอ้างอิง.....	104
ภาคผนวก ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	116

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของเซลล์ที่นำมาทดสอบกับชั้นวางเซลล์ที่ออกแบบ.....	31
3.2 ค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องกำหนดให้แก่ระบบสมการ.....	35
4.1 รายละเอียดของบริเวณการไหลที่ทำการศึกษาเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65°	63
4.2 รายละเอียดของบริเวณการไหลที่ทำการศึกษาเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10°	63
5.1 ค่า DF_c ของชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2)	82
5.2 ค่า DF_r ของชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2)	83
5.3 ค่า DF_r แสดงค่าการกระจายการไหลในมุมมองของแต่ละชั้นเซลล์.....	94
5.4 ค่า DF_c แสดงค่าการกระจายการไหลในมุมมองของทั้งชั้นวางเซลล์ที่ช่องการไหลเรียง จากซ้ายไปถึงตรงกลางของเซลล์.....	95

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	5
2.2 เซลล์รูปแบบต่าง ๆ.....	6
2.3 ลักษณะของเซลล์แบบแผ่น.....	7
2.4 รูปแบบการไหลแบบต่าง ๆ.....	8
2.5 แนวคิดการป้อนแก๊สแบบ External manifold.....	10
2.6 แนวคิดการป้อนแก๊สแบบ Internal manifold.....	10
2.7 แนวคิดการป้อนแก๊สแบบอื่น ๆ.....	11
2.8 เครื่องช่วยของ Hydraulic resistance ที่เกิดขึ้นภายในชั้นวางเซลล์ โดยที่ K_1 และ K_2 คือ manifold resistance ที่ทางเข้าและทางออก K_c คือ resistance of the corrugation ϕ_j คือแก๊สที่ไหลผ่านช่องการไหลของเซลล์ j และ P_{1j}, P_{2j} คือความดันที่ทางเข้าและทางออกของเซลล์ j	14
2.9 ชั้นวางเซลล์ที่ใช้พัฒนาแบบจำลอง.....	16
2.10 เครื่องช่วยการไหลของเซลล์เชื้อเพลิง.....	19
2.11 ชุดทดลองเพื่อวัดความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเครื่องช่วยการไหลจากรูปที่ 2.10.....	20
2.12 การเปรียบเทียบค่าความดันสูญเสียด้านคาโทดที่ได้จากการวัดและการจำลอง.....	21
2.13 การเปรียบเทียบการกระจายการไหลในช่องนำการไหลที่ได้จากการวัดและการจำลอง.....	22
2.14 รายละเอียดการไหลที่เกิดขึ้นในหนึ่งชั้นเซลล์.....	23
2.15 รายละเอียดการไหลที่เกิดขึ้นในชั้นวางเซลล์.....	23
2.16 Differential control volume ของ Header ที่พิจารณา.....	24
2.17 รายละเอียดการแบ่งเซลล์และเงื่อนไขที่ขอบของหนึ่งชั้นเซลล์ที่พิจารณา.....	24
2.18 Contour ของ Non-dimensional pressure drop และ Channel-flow uniformity.....	26
2.19 การกระจายการไหลในช่องการไหล.....	28
2.20 ตัวแปรของความดันและการไหลสำหรับแบบจำลองเชิงคณิตวิเคราะห์ (a) การไหลแบบสวนทาง (b) การไหลแบบขนาน.....	29
2.21 ความดันสูญเสียสำหรับการไหลผ่านช่องการไหลที่วัดได้จากการทดลอง.....	30
3.1 อินเตอร์คอนเนกเตอร์.....	32
3.2 แนวคิดการประกอบเซลล์.....	32
3.3 ซีล.....	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 การประกอบชิ้นเซลล์.....	33
3.5 แนวคิดในการออกแบบชุดป้อนแก๊สแก่ชิ้นเซลล์.....	34
3.6 ระบบการไหล 2 มิติที่พิจารณา.....	35
3.7 ค่าความดันสูญเสียตามความสูง(แสดงในรูป Cell number) ที่ความกว้างด้านบน และล่างของชุดกระจายการไหลต่าง ๆ.....	36
3.8 ค่าความดันสูญเสียตามความสูง(แสดงในรูป Cell number) ที่ความกว้างด้านบน และล่างของชุดกระจายการไหลต่าง ๆ.....	37
3.9 ชุดป้อนแก๊สที่ออกแบบตามแนวคิดในรูปที่ 3.5.....	37
3.10 โครงสร้างของชั้นวางเซลล์และการประกอบชั้นวางเซลล์ที่สมบูรณ์.....	38
3.11 การวัดความดันสถิตย์.....	43
3.12 แนวคิดการวัดค่าความดันสถิตย์.....	43
3.13 ส่วนประกอบของเซลล์ที่ดัดแปลงเพื่อการวัด.....	43
3.14 การดัดแปลงโรตารีมอเตอร์เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการค่าอัตราการไหล.....	45
3.15 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 1.....	46
3.16 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 2.....	46
3.17 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 3.....	47
3.18 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 4.....	47
3.19 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 5.....	48
3.20 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 6.....	48
3.21 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 7.....	49
3.22 การประกอบชุดทดลองตามข้อ 8 เป็นชั้นวางเซลล์ที่สมบูรณ์พร้อมสำหรับการทำการ ทดลอง.....	49
3.23 แผนผังอุปกรณ์ต่างในการทดลอง.....	50
4.1 เอลิเมนต์ของของไหล.....	53
4.2 การไหลเข้าและออกจากเอลิเมนต์ของของไหล.....	55
4.3 องค์ประกอบของความเค้นบนพื้นผิวทั้งหกด้านของเอลิเมนต์ของไหล.....	56
4.4 บริเวณของการไหลที่ต้องการศึกษา.....	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสมการ Discretised เมื่อการไหลไปในทิศทางบวก.....	64
4.6 ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสมการ Discretised เมื่อการไหลไปในทิศทางลบ.....	64
4.7 แผนผังของ SIMPLE algorithm.....	67
5.1 ตำแหน่งของช่องการไหลที่วัดความดันที่ทางเข้าและทางออก.....	69
5.2 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลของเซลล์ที่ 1.....	70
5.3 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตรงกลางของชั้นวางเซลล์ ที่อัตราการป้อนแก๊ส 5 ลิตรต่อนาที.....	71
5.4 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลของเซลล์ที่ 4.....	72
5.5 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลริมซ้ายและขวาของทั้งชั้นวางเซลล์ ที่อัตราการไหล 5.5 ลิตรต่อนาที.....	72
5.6 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลริมซ้ายและขวาของทั้งชั้นวางเซลล์ ที่อัตราการไหล 6, 6.5 ลิตรต่อนาที.....	73
5.7 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตรงกลางของทั้งชั้นวางเซลล์ ที่อัตราการไหล 5.5, 6, 6.5 ลิตรต่อนาที.....	74
5.8 ความดันสูญเสียที่เกิดในเซลล์ที่ 2, 3, 7, 8 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ.....	75
5.9 ความดันสูญเสียเมื่อแก๊สไหลเข้าเซลล์ที่ 1 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ.....	76
5.10 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องริมขวาและตรงกลางของทั้งชั้นวางเซลล์ ที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที.....	77
5.11 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องริมซ้ายของทั้งชั้นวางเซลล์ที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที.....	77
5.12 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 4 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ.....	78
5.13 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 2, 3, 7 และ 8 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ.....	78
5.14 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตรงกลางของเซลล์ที่ 1 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2).....	79
5.15 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตรงกลางของเซลล์ที่ 4 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2).....	79
5.16 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลริมซ้ายและขวาของเซลล์ที่ 1 ที่อัตราการไหล ต่าง ๆ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2).....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลริมซ้ายและขวาของเซลล์ที่ 4 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2).....	81
5.18 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตรงกลางของเซลล์ที่ 2, 3, 7 และ 8 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2).....	81
5.19 การจำลองความดันที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตรงกลางของชั้นวางเซลล์ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° อัตราการป้อนแก๊ส 5.5 ลิตรต่อนาที.....	84
5.20 ความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 5.5 ลิตรต่อนาที.....	85
5.21 ความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลริมซ้ายเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 5.5 ลิตรต่อนาที.....	86
5.22 ลักษณะการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 5.5 ลิตรต่อนาที.....	87
5.23 ทิศทางการไหลของแก๊สบริเวณใกล้ทางเข้าเซลล์ที่ 1.....	87
5.24 ความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 5.5 ลิตรต่อนาที.....	88
5.25 ความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง (a) 5.65° (b) 3.10° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลริมซ้ายเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 7 ลิตรต่อนาที.....	89
5.26 ลักษณะการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 5.5 ลิตรต่อนาที.....	90
5.27 เวกเตอร์ความเร็วของแก๊สในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 1.13° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 7 ลิตรต่อนาที.....	91
5.28 ความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 1.13° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 7 ลิตรต่อนาที.....	92
5.29 ความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 7.89° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 7 ลิตรต่อนาที.....	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.30	เวกเตอร์ความเร็วของแก๊สในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 7.89° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 7 ลิตรต่อนาที.....93
5.31	เวกเตอร์แสดงทิศทางการไหลของแก๊สภายในชุดกระจายการไหลซึ่งตรงกับตำแหน่งช่องการไหลตรงกลางทั้ง 4 ขนาดของมุมเอียง.....93
5.32	ค่า Distribution Factor ต่ำสุดและสูงสุดในมุมมองของ (a) ชั้นวางเซลล์ และ (b) เซลล์เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD1), 3.10° (GD2), 1.13° (GD3) และ 7.89° (GD4).....96
5.33	ค่าความดันสถิตที่ทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ที่อัตราการไหล 5.5 ลิตรต่อนาทีที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง.....97
5.34	ค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลตรงกลางเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ที่อัตราการไหล 5.5 ลิตรต่อนาทีที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง.....98
5.35	ค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลตรงกลางของเซลล์ที่ 1 เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ที่อัตราการไหลต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง.....98
5.36	ลักษณะการไหลที่เกิด recirculation บริเวณทางเข้าของช่องการไหล.....99

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ชื่อ/ความหมาย
a	constant in discretisation equation
a	sound speed
A	cross-section area
A_s	cross-section area
A_w	wall area of channel
$C_{1\varepsilon}$	constant in equation ε , = 1.44
$C_{2\varepsilon}$	constant in equation ε , = 1.92
$C_{3\varepsilon}$	constant in equation ε
C_f	frictional coefficient
C_μ	constant in the turbulent viscosity equation
D	constant in discretisation equation
D	diameter
D_H	hydraulic diameter
DF	distribution factor
f	friction factor
g_i	gravitational component vector
G_b	generation of turbulent kinetic energy due to buoyancy
G_k	generation of turbulent kinetic energy due to mean velocity gradient
H_{ref}	height at reference point
H_{in}	height at the inlet of channel
H_{out}	height at the outlet of channel
I_c	current
k	turbulent kinetic energy
K_1	resistance factor relating the effect of rough pipe flow and splitting of a flow to a pressure drop
K_2	resistance factor relating the effect of rough pipe flow and combining of a flow to a pressure drop

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ชื่อ/ความหมาย
K_3	resistance factor relating laminar flow to pressure drop
K_c	constant
K_i	globally linearized flow coefficient
l_t	length scale
L	channel length
max	maximum
min	minimum
\dot{m}_i	mass flow rate in branch I
\hat{m}	non-dimensional mass flow rate
M_t	turbulent Much number
\dot{M}	mass flow rate
n	number of cells in a stack
N_c	number of channels in a layer
p	pressure
p^*	initial pressure guess value
P	perimeter
P	pressure
P_e	electric power
Pr_t	turbulent Prandtl number
Q	volume flow rate
r	radius
R	radius
Re	Reynolds number
S	source term
t	time
u	velocity in x direction
\bar{u}	average flow velocity in a channel
u'	fluctuating parts velocity in x direction

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ชื่อ/ความหมาย
u^*	friction velocity
u	velocity vector
v	velocity in y direction
v'	fluctuating parts velocity in y direction
v^*	initial velocity guess value
V_t	turbulent velocity
w	velocity in z direction
w'	fluctuating parts velocity in z direction
x	direction
y	direction
Y_M	overall dissipation rate
z	direction
Greek alphabet	
β	thermal expansion coefficient
\mathcal{E}	turbulent kinetic energy dissipation rate
λ	stoichiometry
λ	second viscosity coefficient
Γ	non-dimensional group
μ	dynamic viscosity
μ_t	turbulent viscosity
Ω	non-dimensional parameter
ϕ	flow property
ρ	mass density
σ_{ii}	normal stress in i direction
σ_k	turbulent Prandtl number for k
σ_ε	turbulent Prandtl number for $\varepsilon, = 1.3$

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ชื่อ/ความหมาย
σ_t	turbulent Prandtl number
τ	shear stress
ξ	pressure loss coefficient
ดัชนีล่าง (subscripts)	
1	relating to the inlet manifold channel
2	relating to outlet manifold channel
b	buoyancy
c	channel
e, n, w, s	interface control volume between face $P \& E$, $P \& N$, $P \& W$ and $P \& S$
E, N, W, S	neighbor node around central control volume, East, North, West and South
h	header
i	branch number
j	node or loop number
l	layer
s	stack
t	turbulent
ดัชนีบน (superscripts)	
'	fluctuating property
*	guess value
-	time averaging generation

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันวิกฤตการณ์เกี่ยวกับพลังงานมีมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นภาวะน้ำมันแพงหรือแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนจึงได้รับความสนใจมากขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของพลังงานทดแทน เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตไฟฟ้าได้จากกระบวนการทางเคมี-ไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงซึ่งเป็นไฮโดรเจนหรือสารประกอบของไฮโดรเจน และมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้ายังสูงกว่าวิธีอื่น ๆ ที่มีในปัจจุบัน รวมทั้งในกระบวนการผลิตไฟฟ้าไม่ก่อให้เกิดมลภาวะให้แก่สิ่งแวดล้อม

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดแตกต่างกันไปตามวัสดุที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ของเซลล์ เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งเป็นชนิดที่ทำงานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งนิยมนำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นกำลัง สามารถผลิตไฟฟ้าร่วมกับระบบกังหันแก๊สได้ โดยทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของระบบรวมสูงมากขึ้น จะเห็นได้ว่าหากสามารถผลิตเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งตลอดจนสร้างระบบการผลิตไฟฟ้าได้เองภายในประเทศแล้ว จะก่อประโยชน์แก่ประเทศไทยเป็นอย่างมาก กล่าวคือสามารถลดการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน และสามารถใช้เชื้อเพลิงที่ผลิตได้ภายในประเทศจากผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งเป็นการเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรอีกทางหนึ่งด้วย นอกจากนี้ยังสามารถลดปัญหาต่าง ๆ เกี่ยวกับการสร้างเขื่อนเพื่อผลิตไฟฟ้า เนื่องจากระบบของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นสามารถติดตั้งในที่ชุมชนได้เพราะไม่มีเสียงดังรบกวน ไม่ก่อมลพิษแก่สิ่งแวดล้อม

สำหรับงานวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งนั้นมีหลายส่วนประกอบกัน เช่น การพัฒนาวัสดุที่ใช้เป็นเซลล์ การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ หรือการออกแบบชั้นวางเซลล์ (กลุ่มของเซลล์ที่ต่อกันเพื่อเพิ่มกำลังในการผลิตไฟฟ้า) เพื่อให้ระบบของเซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งเป็นเซรามิกซึ่งทำงานที่อุณหภูมิสูงทำให้เซลล์ที่มีรูปร่างแบนบาง ง่ายต่อการแตกร้าวในระหว่างการอุ่นระบบจากอุณหภูมิต่ำไปยังอุณหภูมิการทำงาน การทำงาน และการลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิการทำงานไปยังอุณหภูมิต่ำนั้น หากเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่แผ่นเซลล์เกินกว่าที่เซลล์รับได้อาจทำให้เซลล์แตกได้ ดังนั้นการกระจายการไหลที่สม่ำเสมอทั่วทั้งชั้นวางเซลล์เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบชั้นวางเซลล์ [1,2,3]

ในการออกแบบชั้นวางเซลล์เพื่อให้เกิดการไหลอย่างสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งชั้นวางเซลล์นั้น ต้องผ่านการพัฒนา ตรวจสอบ และปรับปรุงหลายครั้ง รวมทั้งต้องพิจารณาร่วมกับเงื่อนไขการออกแบบอื่น ๆ เพื่อให้ได้รูปแบบของชั้นวางเซลล์ที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และเนื่องจากเทคโนโลยีเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงในประเทศไทยนั้นเพิ่งมีการพัฒนา ในระยะเวลาไม่นาน โดยเฉพาะที่เกี่ยวกับวิศวกรรมเครื่องกลนั้นมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องน้อยมาก ดังนั้นในเบื้องต้นนี้ควรทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นในชั้นวางเซลล์ก่อนที่จะทำการพัฒนา และปรับปรุงชั้นวางเซลล์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายการไหลที่เกิดขึ้นภายในชั้นวางเซลล์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา โดยศึกษาการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อมุมเอียงของชุดกระจายการไหลมีขนาดแตกต่างกันดังนี้

1. เพื่อศึกษาการกระจายการไหลที่เข้าไปสู่ชั้นวางเซลล์โดยมีมุมเอียงของชุดกระจายการไหลที่ 5.65° และ 3.10°
2. เพื่อใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ช่วยในการศึกษาพฤติกรรมการไหลในชุดกระจายการไหลซึ่งส่งผลต่อการกระจายการไหลที่เข้าไปยังช่องการไหลโดยชุดกระจายการไหลที่มีมุมเอียง 5.65° 3.10° 1.13° และ 7.89°
3. เพื่อเปรียบเทียบการกระจายการไหลที่วัดได้จากการทดลองและการจำลอง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. การไหลในระบบเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow)
2. กำหนดให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหลในระบบมีค่าคงที่ เช่น ความหนาแน่น ความหนืด เป็นต้น
3. กำหนดให้การไหลภายในช่องนำการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow)

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างชุดทดลอง
2. ทำการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการกระจายการไหลที่มุมเอียงของชุดกระจายการไหลเท่ากับ 3.40 และ 5.65 องศา
3. ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง
4. จำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม STAR-CD® และจำลองการไหลที่เงื่อนไขต่อไปนี้
 - 4.1 เงื่อนไขเดียวกับการทดลองในข้อ 2

4.2 จำลองการไหลมุมเอียงของชุดกระจายการไหลเท่ากับ 1.13 และ 7.89 องศา

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง
2. สืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทำการศึกษา
3. ออกแบบส่วนประกอบของชั้นวางเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง
4. ออกแบบและสร้างชุดการทดลอง
5. ทำการทดลอง
6. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม STAR-CD[®]
7. พัฒนาแบบจำลองการไหลจากการทดลองโดยใช้โปรแกรม STAR-CD[®]
8. ทำการจำลองการไหล
9. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองและผลการจำลองการไหล

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของแบบจำลองการไหลจากผลการทดลองวัดการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์ เพื่อปรับปรุงและพัฒนาแบบจำลองการไหลสำหรับใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบชั้นวางเซลล์ให้เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

วรรณกรรมวิจารณ์

2.1 บทนำ

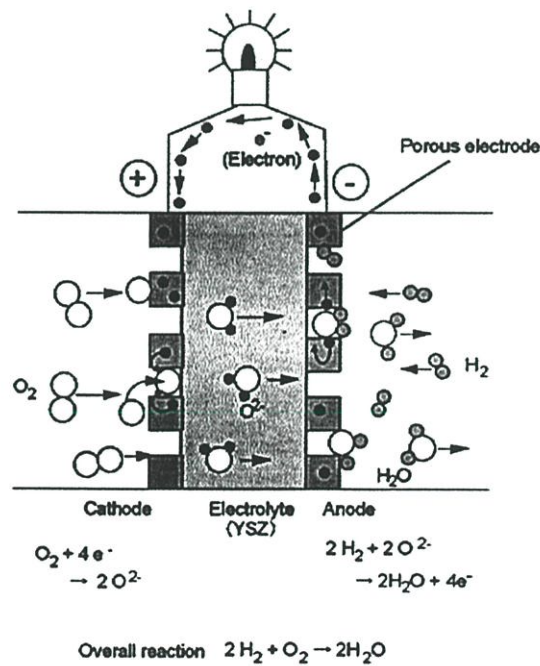
การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต้องอาศัยหลายส่วนประกอบกันขึ้นเป็นระบบที่สมบูรณ์จึงจะสามารถนำไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้จริง การออกแบบในแต่ละส่วนจึงต้องมีความรู้และความเข้าใจในการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงโดยรวม เพื่อที่จะสามารถนำแต่ละส่วนมาประกอบกันโดยที่ทำให้การทำงานของระบบโดยรวมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นก่อนที่จะกล่าวถึงการออกแบบชิ้นวางเซลล์จึงต้องกล่าวถึงการทำงานในภาพรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งก่อน จากนั้นจึงกล่าวถึงงานวิจัยซึ่งเป็นที่มาและเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์เล่มนี้

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)

เซลล์เชื้อเพลิงคือหน่วยที่แปลงพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงและออกซิเดนต์ (Oxidant) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงจากระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยไม่เกิดการเผาไหม้แต่อย่างใด รวมทั้งสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตรงเท่าที่ขั้วป้อนเชื้อเพลิงและออกซิเดนต์ให้แก่ระบบ เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดด้วยกัน แตกต่างตามชนิดของวัสดุอิเล็กโตรไลต์ที่เลือกใช้ รวมถึงอุณหภูมิการทำงาน เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600-1000°C โดยที่ส่วนประกอบทั้งหมดของเซลล์เป็นของแข็ง ทำให้ลดปัญหาเกี่ยวกับการกัดกร่อนเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ที่มีส่วนประกอบเป็นของเหลว นอกจากนั้นการที่มีอุณหภูมิการทำงานสูงทำให้เกิดข้อดีหลายประการด้วยกัน ได้แก่ สามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายขึ้นเนื่องจากสามารถป้อนเชื้อเพลิงที่เป็น สารประกอบไฮโดรคาร์บอน หรือแอลกอฮอล์ เข้าไปทำปฏิกิริยาในเซลล์ได้โดยตรง (Internal reforming) หรืออาจทำให้ไฮโดรเจนแตกตัวก่อนป้อนเข้าไปทำปฏิกิริยา (External reforming) นอกจากนั้นยังไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพงเช่นแพลตินัม ข้อดีอีกประการที่สำคัญคือความร้อนและน้ำที่ได้จากการทำปฏิกิริยาซึ่งอยู่ในสถานะของไอน้ำสามารถนำไปป้อนกังหันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีก ทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงมากขึ้น

โดยปกติแล้วองค์ประกอบพื้นฐานของ SOFC ประกอบด้วย อิเล็กโตรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งถูกประกบด้วยขั้วอิเล็กโตรด (Electrode) สองขั้ว ได้แก่แอโนด (Anode) และ คาโทด (Cathode) โดยขั้วอิเล็กโตรดทั้งสองนั้นต้องเป็นวัสดุที่มีความพรุนตัว แต่อิเล็กโตรไลต์ต้องเป็นวัสดุที่แก๊สไม่สามารถแพร่ผ่านได้ โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่นิยมใช้เป็นอิเล็กโตรไลต์ คาโทด และแอโนด ได้แก่ Yttria-stabilised zirconia (YSZ), Lanthanum strontium manganite (LSM), nickel/zirconia cermet

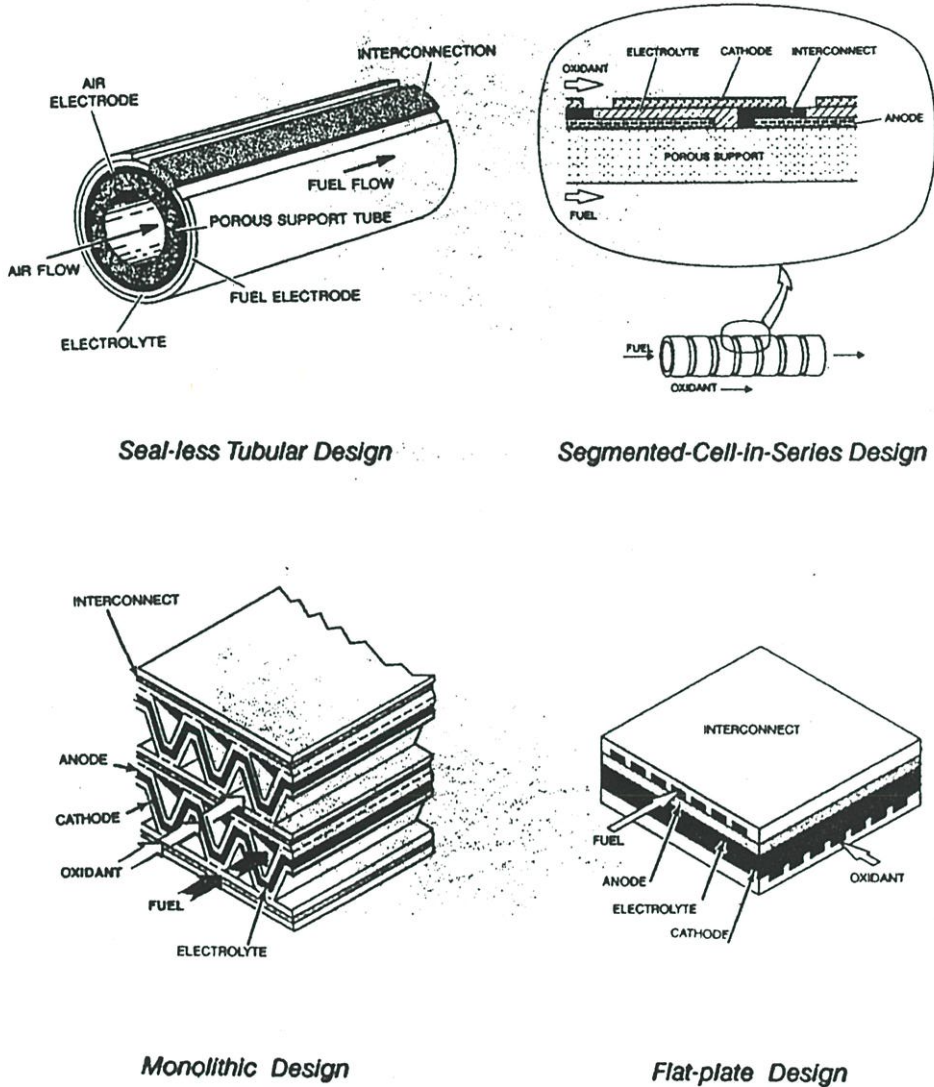
(Ni/YSZ) ตามลำดับ จากรูปที่ 2.1 เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยการป้อนเชื้อเพลิงซึ่งโดยปกติคือไฮโดรเจนเข้าไปสัมผัสกับบริเวณที่เป็นอานอดซึ่งไฮโดรเจนจะแพร่ผ่านรูพรุนของอานอดไปยังบริเวณที่อานอดสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์เกิดเป็นสภาวะ Three phase boundaries, (TPB: แก๊ส, อิเล็กโทรด, และอิเล็กโทรไลต์) ที่อุณหภูมิการทำงานไฮโดรเจนจะรวมตัวกับออกซิเจนที่ออกซึ่งวิ่งผ่านชั้นอิเล็กโทรไลต์มาจากขั้วคาโทดได้น้ำ ความร้อนและอิเล็กตรอน แต่อิเล็กโทรไลต์นั้นมีความสมบัติไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงวิ่งไปยังขั้วคาโทดโดยผ่านทางวงจรภายนอก (External circuit) สำหรับด้านคาโทดที่ได้รับออกซิเจน (Oxidant) ซึ่งได้แก่ออกซิเจนจากอากาศจะแพร่ผ่านรูพรุนของขั้วคาโทดไปยังบริเวณที่คาโทดสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์เกิดสภาวะ Three phase boundaries ที่อุณหภูมิการทำงาน ออกซิเจนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนได้ออกซิเจนที่ออกซึ่งจะวิ่งผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วอานอด โดยกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมี-ไฟฟ้าในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องตราบเท่าที่มีออกซิเจนและเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน) สำหรับไฟฟ้าที่นำไปใช้งานได้แก่อิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านวงจรภายนอกซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นสิ่งที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้แก่เชื้อเพลิงและออกซิเจน โดยที่ส่วนประกอบอื่น ๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงยังคงอยู่



รูปที่ 2.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [4]

องค์ประกอบหลักของเซลล์นอกจากอิเล็กโทรไลต์ อานอด คาโทด แล้วยังมีอินเตอร์คอนเนคเตอร์ (Interconnector) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าเชื่อมระหว่างขั้วอานอดและคาโทดของเซลล์ที่อยู่ติดกัน เนื่องจากทุกส่วนประกอบของเซลล์เป็นของแข็ง ดังนั้นเซลล์ของ SOFC จึงมีโครงสร้างที่มีรูปแบบได้

หลากหลายกว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบอื่น ๆ ในปัจจุบันมีรูปแบบที่นิยมกัน 4 รูปแบบด้วยกันได้แก่ Sealless tubular design, Segmented-cell-in-series design, Monolithic design, และ Flat-plate หรือ Planar design แสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.2 [5]



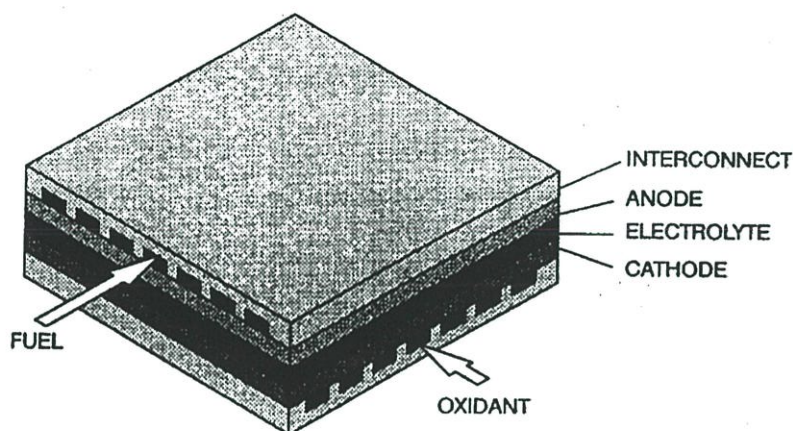
รูปที่ 2.2 เซลล์รูปแบบต่าง ๆ [5]

2.3 การออกแบบเซลล์และชั้นวางเซลล์ (Cell and Stack Designs)

ภายใต้เงื่อนไขการทำงานเซลล์เพียงเซลล์เดียวสามารถสร้างศักย์ไฟฟ้าได้ประมาณ 1 โวลต์ ดังนั้นเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจึงต้องต่อเซลล์จำนวนหลายเซลล์เข้าด้วยกัน โดยใช้อินเตอร์คอนเนคเตอร์ (Interconnector) ทำหน้าที่เชื่อมแต่ละเซลล์ขึ้นเป็นชั้นวางเซลล์ โดยปกติแล้วอินเตอร์คอนเนคเตอร์มักจะมีรูปร่างที่ซับซ้อน เพราะนอกจากต้องทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าเชื่อมระหว่างคาโทดและ

และอาโนดของเซลล์ที่อยู่ติดกันแล้วยังทำหน้าที่เป็นช่องนำการไหลเชื้อเพลิงและอากาศเข้ามาทำปฏิกิริยา และต้องมีรูปร่างที่เหมาะสมในการป้องกันไม่ให้เชื้อเพลิงจากด้านอาโนดและอากาศในด้านคาโทดรั่วถึงกันได้ อย่างไรก็ตามส่วนที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นารออกแบบเฉพาะเซลล์ที่มีรูปร่างแบบแผ่นเท่านั้น [6, 7]

องค์ประกอบของเซลล์แบบแผ่นแสดงในรูปที่ 2.3 สำหรับเซลล์แบบแผ่นนั้นก็ต้องออกแบบโดยพิจารณาถึงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและไฟฟ้า-เคมีเหมือนกับเซลล์รูปร่างอื่น ๆ และในการออกแบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพนั้นต้องพิจารณาตามความต้องการในประเด็นต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของเซลล์แบบแผ่น [8]

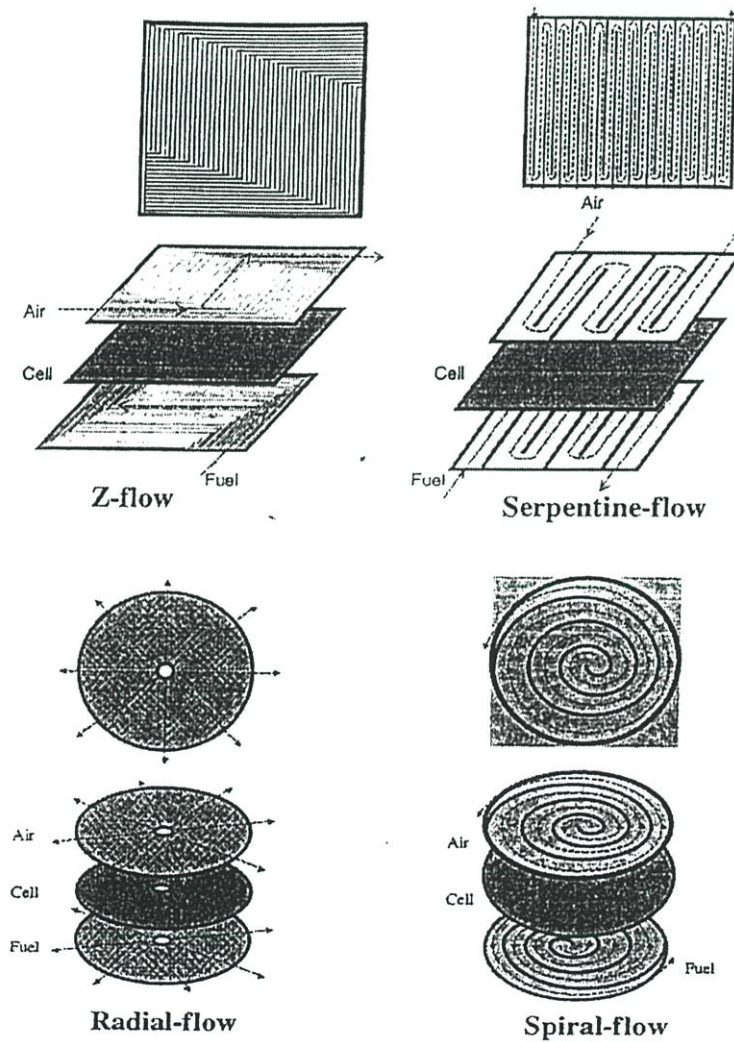
(ก) ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า: ลดการสูญเสียอันเนื่องมาจากความต้านทานทางไฟฟ้า โดยองค์ประกอบของเซลล์ที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านนั้นควรให้มีระยะทางในการไหลของกระแสไฟฟ้าสั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (โดยเฉพาะส่วนที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าต่ำ) ต้องให้มีพื้นที่ที่สัมผัสกันระหว่างแต่ละส่วนเพียงพอและเกิดความต้านทานในระหว่างหน้าสัมผัสน้อย ส่วนที่ทำหน้าที่สะสมกระแสไฟฟ้า (Current collector) ต้องออกแบบให้เกิดการกระจายของกระแสไฟฟ้าและการไหลของแก๊สที่สม่ำเสมอ

(ข) ประสิทธิภาพทางเคมี-ไฟฟ้า: สำหรับความหมายของความต้องการในส่วนนี้คือต้องออกแบบให้เกิด full open circuit voltage และเกิด polarization loss ที่น้อยที่สุด โดยต้องหลีกเลี่ยงการรั่วของแก๊สและการรั่วของเชื้อเพลิงและอากาศมาบรรจบกัน และเกิดการลัดวงจรทางไฟฟ้า เชื้อเพลิงและออกซิเจนต้องกระจายอย่างสม่ำเสมอ ไม่ใช่เฉพาะแต่พื้นที่ในแต่ละเซลล์เท่านั้นแต่ต้องตลอดทั้งชั้นวางเซลล์

(ค) การจัดการทางความร้อน: หมายถึงต้องออกแบบให้เกิดการกระจายของอุณหภูมิในระหว่างการทำงานอย่างสม่ำเสมอ และต้องพัฒนาเซลล์ให้สามารถทนต่อการเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิทั่วทั้งชั้นวางเซลล์ได้สูงสุด หรือออกแบบให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิทั่วทั้งชั้นวางเซลล์น้อยที่สุด

(ง) ความสมบูรณ์ทางกลและโครงสร้าง: หมายถึงต้องออกแบบชั้นวางเซลล์ของ SOFC แบบแผ่นนี้มีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการประกอบโครงสร้างได้ และต้องทำให้เกิดความเค้นทางกลและทางความร้อนน้อยที่สุดเพื่อป้องกันการแตกหรือการแยกออกจากกันขององค์ประกอบเซลล์

อย่างไรก็ตามลักษณะที่สำคัญในการออกแบบ SOFC แบบแผ่นนั้นเกี่ยวข้องกับรูปแบบการไหลและการแยกไหลของแก๊สที่สามารถจัดเรียงได้หลายรูปแบบ:



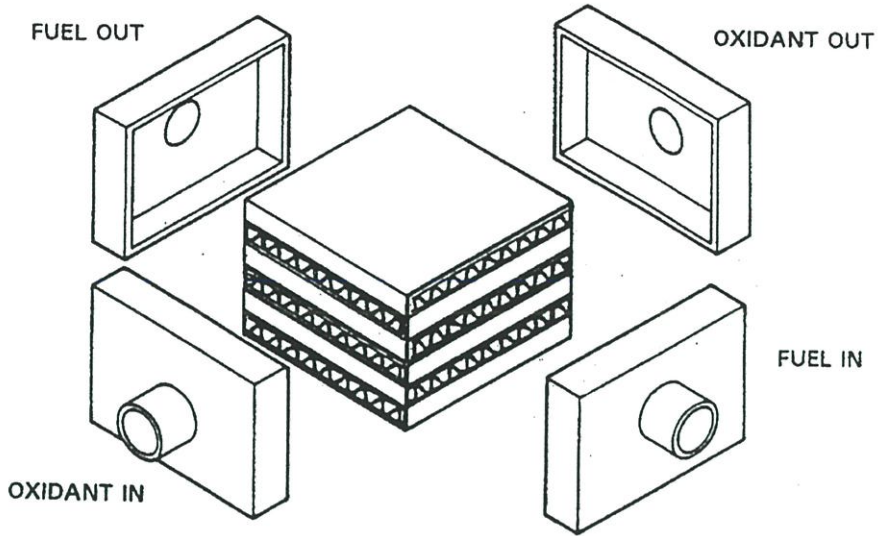
รูปที่ 2.4 รูปแบบการไหลแบบต่าง ๆ [7]

(ก) ลักษณะการไหลของแก๊ส การไหลของเชื้อเพลิงและออกซิแดนที่สามารจัดเรียงได้ ดังนี้ การไหลแบบสวนทาง (cross-flow) การไหลทิศทางเดียวกัน (co-flow) การไหลแบบขวาง (counter-flow) การเลือกลักษณะการไหลมีผลกระทบต่อการกระจายของอุณหภูมิและกระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ[6] มีรูปแบบการไหลหลายแบบสำหรับแต่ละลักษณะการไหลเช่น การไหลแบบขนาน (Z-flow), serpentine, radial, และ spiral ดังแสดงในรูป 2.4 สนามการไหล (ช่องการไหล) ทำหน้าที่เพิ่มความสม่ำเสมอของการกระจายของแก๊สและทำให้เกิดความร้อน (เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีของเชื้อเพลิงและออกซิแดนที่) และการเคลื่อนที่ของมวลในแต่ละเซลล์ นอกจากนี้ยังต้องออกแบบเพื่อให้เกิดความดันสูญเสียที่เพียงพอตลอดทั้งเซลล์เพื่อสร้างให้เกิดการไหลระหว่างเซลล์อย่างสม่ำเสมอภายในชั้นวางเซลล์ ดังนั้นในการกำหนดสนามการไหลของทั้งเชื้อเพลิงและออกซิแดนที่นั้นมีความสำคัญในการออกแบบ SOFC แบบแผ่น สำหรับการออกแบบเฉพาะรูปร่างและการจัดเรียงของสนามการไหลสามารถแปรเปลี่ยนเพื่อปรับปรุงและหรือเพื่อให้ได้แบบของชั้นวางเซลล์ที่เหมาะสม โดยปกติแล้วสนามการไหลจะออกแบบเป็นส่วนหนึ่งของอินเตอร์คอนเนกเตอร์

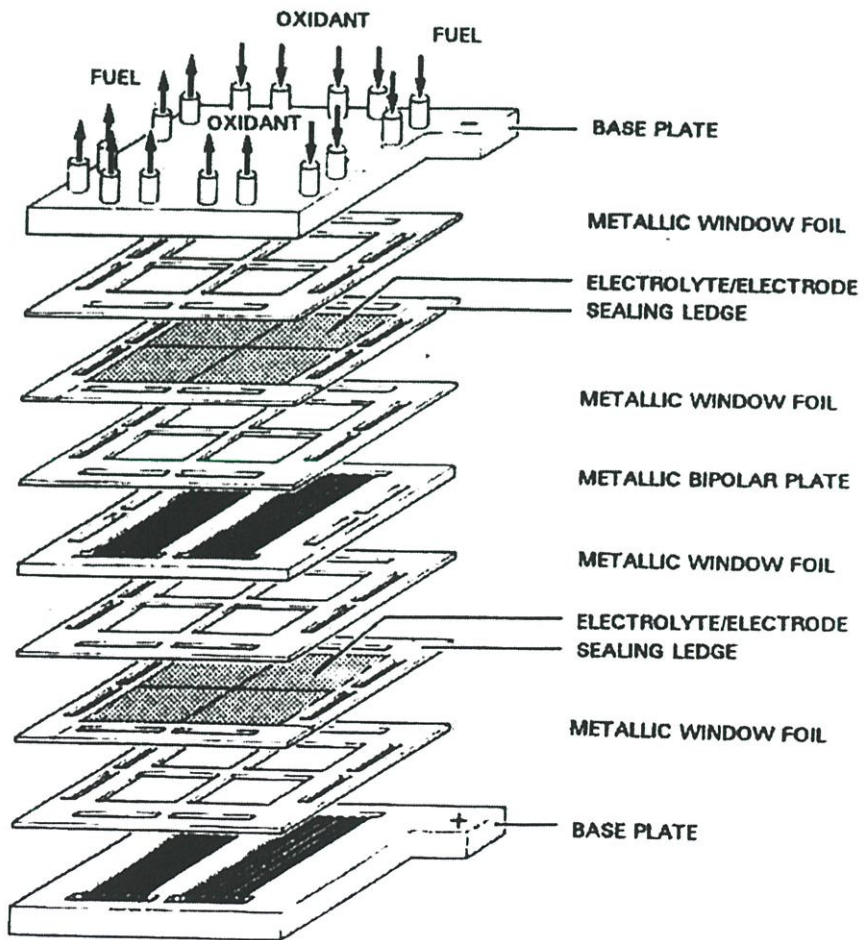
(ข) ท่อทางของแก๊ส (Gas manifolding) การออกแบบชั้นวางเซลล์ใด ๆ ก็ตามต้องรวมเอาท่อทางการไหลของแก๊สซึ่งเป็นเส้นทางของแก๊สจากแหล่งจ่ายไปยังแต่ละเซลล์และนำเอาแก๊สที่ทำปฏิกิริยาและไม่ทำปฏิกิริยาออกไป ท่อทางของแก๊สสามารถแบ่งออกเป็น external และ internal manifold ดังแสดงในรูป 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ Internal manifold นั้นเป็นส่วนหนึ่งของเซลล์และอินเตอร์คอนเนกเตอร์ และเงื่อนไขในการออกแบบ gas manifold นั้นต้องให้เกิดความดันสูญเสีย น้อย (เมื่อเทียบกับความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหล) เพื่อให้เกิดการกระจายการไหลที่สม่ำเสมอภายในชั้นวางเซลล์ ในรูปที่ 2.7 แสดงแนวคิดการป้อนแก๊สแบบอื่น ๆ

เงื่อนไขในการออกแบบชั้นวางเซลล์ที่สำคัญอีกประการได้แก่ การขึ้นรูป การออกแบบใด ๆ ก็ตามต้องสามารถขึ้นรูปและประกอบแต่ละส่วนได้อย่างเหมาะสมกับรูปร่างของชั้นวางเซลล์และวัสดุที่เป็นเซลล์

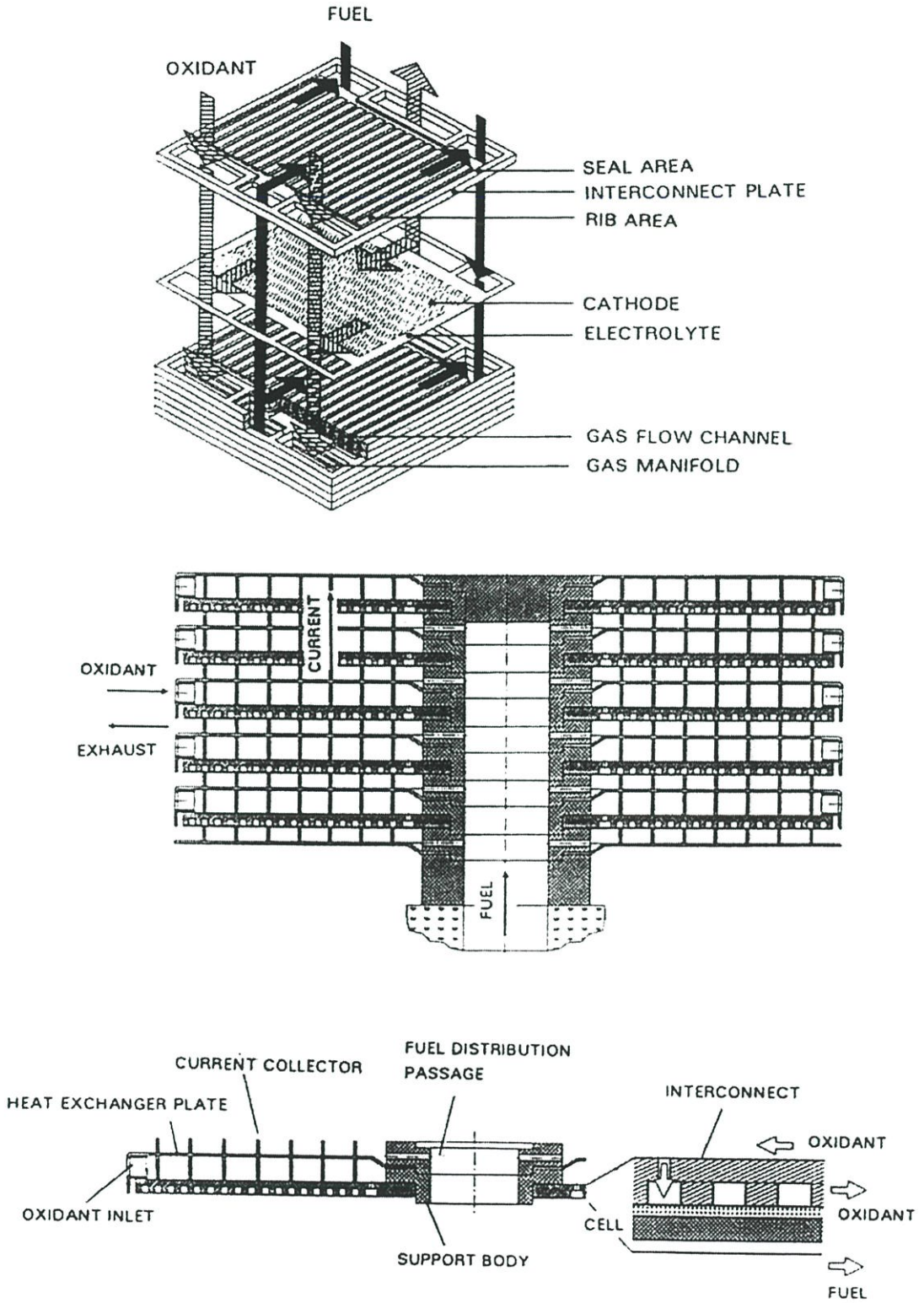
ข้อดีของเซลล์แบบแผ่นได้แก่ ให้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power density) ที่สูงกว่าแบบท่อเพราะความบางของเซลล์ช่วยลดการเกิดความต้านทานทางไฟฟ้า นอกจากนั้นยังมีความยืดหยุ่นเกี่ยวกับการออกแบบรูปร่างของเซลล์และ Gas manifold มากกว่าเซลล์แบบอื่น ๆ รวมทั้งง่ายต่อการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือต้องการวัสดุกันรั่วที่ทนอุณหภูมิสูงได้ นอกจากนั้นวัสดุกันรั่วยังทำให้เกิดข้อจำกัดเกี่ยวกับความสูงของชั้นวางเซลล์เพราะยังมีความสูงมากจะเพิ่มโอกาสให้เซลล์แตกหรือเสียหายเนื่องจากเกิดแรงกดเนื่องจากน้ำหนักมากขึ้น



รูปที่ 2.5 แนวคิดการป้อนแก๊สแบบ External manifold [6]



รูปที่ 2.6 แนวคิดการป้อนแก๊สแบบ Internal manifold [9]



รูปที่ 2.7 แนวคิดการป้อนแก๊สแบบอื่น ๆ [10, 11]

2.4 แบบจำลอง (Model) และการวิเคราะห์ (Analysis)[7]

ในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและเคมี-ไฟฟ้าที่ดีนั้น ต้องออกแบบให้ได้ศักยภาพไฟฟ้าที่สูงและเกิด Ohmic และ Polarization losses ที่ต่ำ สำหรับการออกแบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพทางกลและทางโครงสร้างที่ดีนั้นต้องให้เกิดความเค้นเนื่องจากความร้อนน้อยที่สุดในระหว่างการขึ้นรูปองค์ประกอบของเซลล์และในระหว่างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความเค้นเกินกว่าที่วัสดุจะยอมรับได้

การจำลองและการวิเคราะห์เป็นวิธีที่นิยมใช้ช่วยในการออกแบบ SOFC และ Optimization parameter เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพทางด้านไฟฟ้า ไฟฟ้า-เคมี ทางกล และทางโครงสร้างที่ต้องการ

ในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรในการทำงานตลอดจนความสัมพันธ์ของกระบวนการต่าง ๆ นั้น สามารถทำได้โดยการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยที่การวิเคราะห์ผลที่ได้สามารถให้ข้อมูลว่ากระบวนการต่าง ๆ และตัวแปรมีความสัมพันธ์ระหว่างกันอย่างไร และสามารถช่วยอธิบายพฤติกรรมของเซลล์ด้วยราคาที่ดี นอกจากนี้การจำลองและวิเคราะห์ยังให้ผลเป็นรูปภาพ เช่น Stress potential (หรือ Voltage), Current density และอุณหภูมิที่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง และเวลาสำหรับเซลล์รูปร่างแบบต่างๆ และที่เงื่อนไขการทำงานต่างๆ ข้อมูลที่ได้จากการจำลองและการวิเคราะห์จะทำให้ได้ Optimum cell design และ Optimum operating parameters

มีการศึกษาแบบจำลองและการวิเคราะห์ในหลายระดับด้วยกันได้แก่ Molecular type model, Electrode model Cell model, Stack model และ System model [12] โดยส่วนใหญ่แล้วในการศึกษามักจะเกี่ยวข้องกับประเด็นดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ความเค้น

SOFC เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นของเซรามิกต่างชนิดกัน และเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงดังนั้นในแต่ละชั้นของเซลล์ต้องมีค่าการขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งความแตกต่างเพียงเล็กน้อยสามารถสร้างความเค้นเนื่องจากความร้อนที่มีขนาดใหญ่ และสามารถทำให้องค์ประกอบของเซลล์ซึ่งเป็นเซรามิกแตกได้ ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นจากการออกแบบ การขึ้นรูป และตัวแปรต่าง ๆ ในการทำงาน ที่กระทบต่อการแตกร้าวในส่วนประกอบของ SOFC

2. การวิเคราะห์ทางไฟฟ้า

หนึ่งในวัตถุประสงค์ในการออกแบบชั้นวางเซลล์คือการทำให้เกิดประสิทธิภาพทางไฟฟ้า-เคมีสูงสุด ดังนั้นการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าจึงใช้เพื่อประมาณค่าความต้านทานภายในของเซลล์และทำนายประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

3. แบบจำลองการกระจายของกระแสและอุณหภูมิ

สำหรับชั้นวางเซลล์แล้วต้องพิจารณาการกระจายของกระแส และอุณหภูมิร่วมกัน เพราะในทางปฏิบัติแล้วคุณสมบัติทางเคมี วัสดุ การเดินทางของแก๊สที่เกี่ยวข้องกับการสร้างกระแสไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นด้วย มีองค์ประกอบหลายประการที่มีผลต่อลักษณะทางความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิง องค์ประกอบบางส่วนได้แก่ รูปร่างและขนาดของช่องนำการไหล รูปแบบการไหลของแก๊ส (เช่น co-flow, cross-flow, counter-flow) อุณหภูมิที่ทางเข้าของแก๊ส อัตราการไหล เป็นต้น

อย่างไรก็ตามความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาเคมี-ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองสัมผัสกับก๊าซ ทำให้การพัฒนาโมเดลเพื่อศึกษาการกระจายของอุณหภูมิจึงมีความยุ่งยาก ซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นจึงมีงานวิจัยหลายงานด้วยกันที่พัฒนาโมเดลขึ้นมาเพื่อช่วยในการออกแบบโดยที่ไม่พิจารณาถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น [13,14,15,16,17]

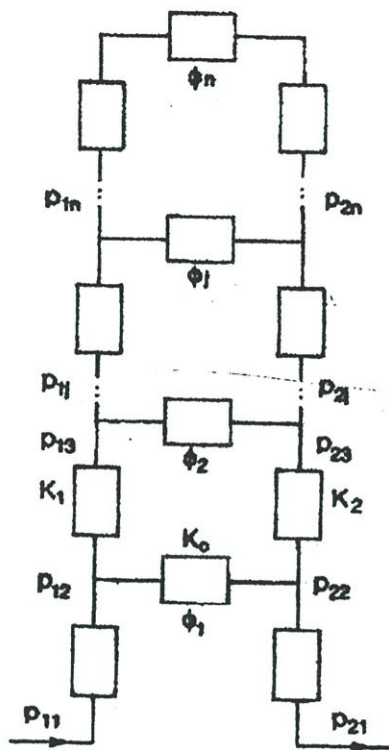
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการกระจายการไหลในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมี-ไฟฟ้าทั้งทางด้านคาโทดและอโนด เป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง [1] ดังนั้นในการออกแบบองค์ประกอบของเซลล์ตลอดจนชั้นวางเซลล์นั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะการกระจายการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้นด้วย ทำให้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการกระจายการไหลของเซลล์เชื้อเพลิง

ในปี ค.ศ. 1996-1997 Boersma และ Sammes [13,18] ได้พัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตวิเคราะห์ (Analytical model) และ Computational model เพื่อให้เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบ "Separator plate" (หรืออินเตอร์คอนเนกเตอร์) สำหรับชั้นวางเซลล์แบบที่ป้อนแก๊สด้วยระบบ Internal manifold ให้เกิดการกระจายการไหลอย่างสม่ำเสมอ (Uniform flow distribution) เกิดขึ้นภายในชั้นวางเซลล์ โดยที่แบบจำลองพัฒนาจากการแสดงความสัมพันธ์ของ Hydraulic resistances ที่เกิดขึ้นในชั้นวางเซลล์ซึ่งแสดงในรูปของเครือข่ายของ Hydraulic resistance ในช่องการไหลของ Separator plates และ manifold ทั้งที่ต่อขนานและอนุกรมกันตลอดทั้งชั้นวางเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 2.8

โดยกำหนดให้การไหลในช่องการไหลเหล่านี้เป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) จากนั้นจึงสร้างระบบสมการซึ่งแสดงความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในชั้นวางเซลล์ และกำหนดให้ Hydraulic resistances สำหรับระบบสมการทั้งหมดนั้นมีค่าคงที่ โดยกำหนดตัวแปรขึ้นมาสองตัวแปรเพื่อแสดงการกระจายของแก๊สในชั้นวางเซลล์ ได้แก่ r ซึ่งแสดงอัตราส่วนระหว่างการไหลที่แตกต่างกันของเซลล์บนสุดกับการไหลเฉลี่ยต่อการไหลที่แตกต่างกันของเซลล์บนสุดกับล่างสุด

ยกตัวอย่างเช่น $r=0.25$ หมายถึง 25 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนเซลล์ของทั้งชั้นวางเซลล์จะได้รับแก๊สต่ำกว่าค่าเฉลี่ย ส่วนเซลล์ที่เหลือนั้นได้รับแก๊สมากกว่าค่าเฉลี่ย



รูปที่ 2.8 เครือข่ายของ Hydraulic resistance ที่เกิดขึ้นภายในชั้นวางเซลล์ โดยที่ K_1 และ K_2 คือ manifold resistance ที่ทางเข้าและทางออก K_c คือ resistance of the corrugation ϕ_j คือแก๊สที่ไหลผ่านช่องการไหลของเซลล์ j และ P_{1j}, P_{2j} คือความดันที่ทางเข้าและทางออกของเซลล์ j [13]

สำหรับอีกตัวแปรหนึ่งนั้นได้แก่ $\frac{\phi_n}{\phi}$ โดยที่ตัวแปรนี้เป็นค่าที่ออกแบบไว้ เมื่อ ϕ_n คือแก๊สที่ไหลผ่านเซลล์บนสุด และ ϕ คือการไหลเฉลี่ย จากระบบสมการที่ได้พัฒนามาได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\phi_n}{\phi} = 1 - \left[\frac{K_1 + K_2}{K_c} \frac{\phi}{12} n(n^2 - 1) \right] \tag{2.1}$$

เมื่อ n คือจำนวนเซลล์ทั้งหมดภายในชั้นวางเซลล์ ซึ่งหากค่า $\frac{\phi_n}{\phi}$ ที่คำนวณได้จากทอมทางด้านขวาของสมการที่ 2.1 มากกว่าค่าที่ออกแบบไว้แสดงว่าต้องลดจำนวนเซลล์ลงหรือแก้ไขรูปร่างหรือขนาดของ Separator plate

สำหรับในงานวิจัยที่เป็นแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical model) แบบ 2 มิตินั้นพัฒนาโดยใช้แนวคิดจากแบบจำลองเชิงคณิตวิเคราะห์ โดยพบว่าค่าของ $\frac{\phi_n}{\phi}$ ที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขต่ำกว่าที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตวิเคราะห์อยู่ 15 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากแบบจำลองเชิงคณิตวิเคราะห์ใช้ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติของแก๊สในการคำนวณ ในขณะที่ computer model ใช้คุณสมบัติของแก๊สจากค่าที่ต่างกันที่ทางเข้าและทางออกของแก๊ส ผลจากการจำลองกรณีศึกษาพบว่าในการออกแบบชั้นวางเซลล์ของ internally-manifolded SOFC นั้นการกระจายแก๊สด้านคาโทดควรได้รับความสนใจมากกว่าด้านแอโนด เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สด้านคาโทดสูงกว่าด้านแอโนดมาก

จะเห็นได้ว่า resistance coefficient ที่ใช้ในการคำนวณการกระจายแก๊สในชั้นวางเซลล์นั้นได้มาจาก Handbook ซึ่งไม่ใช่ค่าที่แท้จริงจากเซลล์หรือชั้นวางเซลล์ จึงทำให้การทำนายคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง

ต่อมาในปี ค.ศ. 1999 Achenbach และ Reus [19] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของ Mass flow distribution ที่มีต่อระบบของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง โดยนำเอา Subroutine ของ Flow model รวมเข้ากับโปรแกรมหลัก [20,21] ซึ่งเป็นแนวคิดของการนำเอาการหาคำตอบในเชิงคณิตวิเคราะห์นำมาใช้ร่วมกับการหาคำตอบในเชิงวิเคราะห์

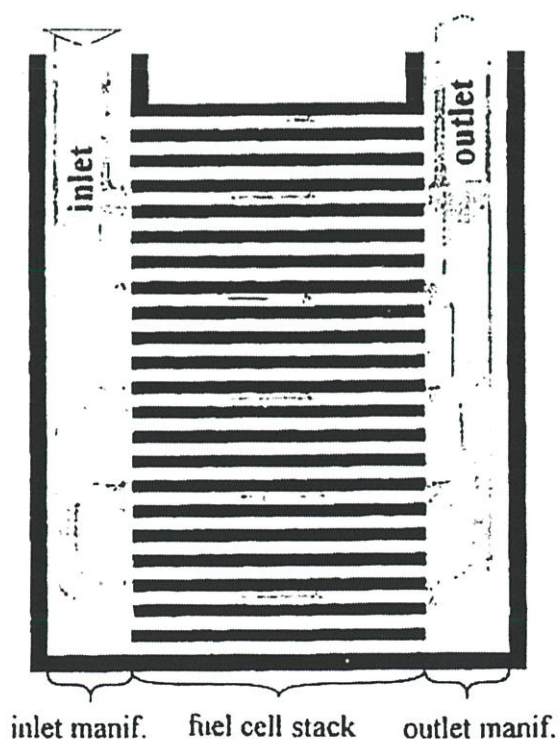
สำหรับชั้นวางเซลล์ที่ใช้พัฒนาแบบจำลองการไหลแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งชั้นวางเซลล์ประกอบด้วย Manifold สำหรับแก๊สไหลเข้าและไหลออก และกลุ่มของช่องการไหลของแต่ละเซลล์ซึ่งต่อขนานกันเป็นชั้นวางเซลล์

จากรูปนั้นได้ทำการแบ่ง Manifold ออกเป็นเอลิเมนต์ โดยแต่ละเอลิเมนต์ประกอบด้วยหนึ่งช่องการไหล จากนั้นสร้างระบบสมการเพื่อคำนวณหาความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละเอลิเมนต์ โดยสมมติให้การเปลี่ยนแปลงของมวล โมล และอุณหภูมิตลอดทั้งช่องการไหลเป็นแบบเชิงเส้น ผลการแก้ปัญหาจากระบบสมการที่พัฒนาได้นั้นจะได้รับการกระจายของความดันและความเร็วใน Manifold รวมทั้งความเร็วในช่องการไหล โดยพบว่าแม้ผลการจำลองจะแสดงว่าการกระจายการไหลที่ไม่สม่ำเสมอกระทบต่อศักยภาพไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์ค่อนข้างน้อย แต่อย่างไรก็ตามในทางวัสดุแล้วมีการเพิ่มขึ้นหรือเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่ชัดเจนเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงของ temperature gradient และ current density gradient ที่เกิดขึ้นทั่วทั้งบริเวณที่เป็นเซลล์ โดยที่พวกเขาได้สรุปว่าการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศให้แก่ช่องการไหลของชั้นวางเซลล์เชื้อเพลิงให้เกิด

ความสม่ำเสมอเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีข้อจำกัดเกี่ยวกับพื้นที่ใช้งาน นอกจากนี้ความดันสูญเสียของทั้งระบบควรน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองแบบสองมิติ โดยที่กำหนดให้แต่ละเซลล์มีการไหลเพียงช่องเดียว ซึ่งในทางปฏิบัติจริงแล้วมีช่องนำการไหลมากกว่าหนึ่งช่อง

ในปีเดียวกัน Argyropoulos และคณะ [14] ได้นำเสนอแบบจำลองของความดันสูญเสียสำหรับ Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) แบบ Internal manifold โดยพวกเขาได้กล่าวว่าในกรณีที่ชั้นวางเซลล์มีขนาดใหญ่ระดับกิโลวัตต์ต้องพิจารณาถึงการจัดการความร้อนและการกระจายการไหล โดยเฉพาะการกระจายการไหลเพราะถ้าทั้งเชื้อเพลิงและอากาศกระจายไม่เท่ากันจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง แบบจำลองได้ทำนายความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งด้านคาโทดและอานอดของ Single large scale DMFC บนเงื่อนไขการทำงานของระบบ เช่น อัตราการไหลที่ทางเข้า อุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้าและความดันที่ใช้งาน แบบจำลองทำการคำนวณ Local mass balance Local Reynolds numbers และสามารถทำนาย Local และ Overall pressure drop ซึ่งข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์สำหรับผู้ออกแบบระบบของ DMFC ในแง่ของการประเมินค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแต่ละส่วนของเซลล์ รวมทั้งช่วยหลีกเลี่ยงปัญหา เช่น การเกิดน้ำท่วมด้านคาโทด หรือปัญหาด้านอานอดจากการไม่สามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปได้ เป็นต้น



รูปที่ 2.9 ชั้นวางเซลล์ที่ใช้พัฒนาแบบจำลอง [19]

ต่อมาในปี ค.ศ. 2000 พวกเขาก็นำเสนองานวิจัยอีก [22] โดยได้นำแบบจำลองที่ได้พัฒนาไป แล้วนั้นมาประยุกต์ใช้งานโดยแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกนำแบบจำลองที่อธิบายในตอนต้น [14] มาศึกษาผลกระทบของขนาดของช่องการไหลที่มีต่อความดันสูญเสียด้านอาโนด ส่วนที่สองนำแบบจำลองซึ่งพัฒนาเพื่อทำนายการกระจายการไหลของชั้นวางเซลล์ DMFC [23] มาใช้เปรียบเทียบลักษณะการกระจายการไหลของ Internal manifold ที่ได้จากการไหลแบบขนาน (parallel flow) และการไหลแบบสวนทาง (reverse flow)

ในงานวิจัยได้กล่าวว่า ปัจจัยหลักที่กระทบต่อการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้น และ Hydraulic resistance ที่เกิดขึ้นกับการไหลของสารตั้งต้นตลอดทั้งระบบ และเพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงมีความจำเป็นที่ต้องหลีกเลี่ยงหรือลดการกระจายการไหลที่ไม่ดีให้น้อยที่สุด สำหรับขอบเขตที่พวกเขาทำการศึกษาคือ เพื่อสร้างระบบของกระบวนการทางทฤษฎีสำหรับให้ออกแบบชั้นวางเซลล์เชื้อเพลิงแบบ DMFC และเพื่อให้เกิดความถูกต้องในการจำลองสถานการณ์ของการไหลจริงภายใต้สภาวะการทำงานของ DMFC จึงต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับความดันและอุณหภูมิที่ถูกต้อง ซึ่งข้อมูลดังกล่าวขึ้นอยู่กับรูปแบบของ Flow bed และ Manifold ที่เลือกใช้ ดังนั้น Mathematical model ที่นำเสนอจึงสนใจในรายละเอียดเกี่ยวกับรูปร่างของ Flow bed และ Manifold อย่างไรก็ตามเขาได้กล่าวไว้ว่าการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้นทำได้ยาก เนื่องจากโดยปกติแล้วชั้นวางเซลล์มีขนาดเล็กและความลึกของ Flow bed ก็ตื้นมาก (ประมาณ 2 มิลลิเมตร) ทำให้ยากแก่การแทรกเครื่องมือวัดการไหลให้ใกล้กับช่องทางเข้าและทางออกของเซลล์ และเครื่องมือวัดสำหรับแบบจำลองนี้ก็ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากเงื่อนไขการทำงานจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่สามารถแสดงกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง ด้วยเหตุนี้แบบจำลองที่นำเสนอจึงถูกออกแบบมาเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการทำนายการทำงานจริงในวัตถุประสงค์ที่จะให้ได้รูปร่างของชั้นวางเซลล์ที่เหมาะสม และใช้ได้กับระบบทั่วไปของชั้นวางเซลล์แบบ Internal manifold

จากการศึกษานี้สรุปได้ว่าสำหรับ Flow bed ที่มีขนาดความกว้างและยาวของช่องการไหลต่ำ ความดันสูญเสียจะมีค่ามากและจะลดลงเมื่อขนาดของช่องการไหลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลจากการจำลองยังแสดงให้เห็นว่าช่องการไหลซึ่งมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดระหว่าง 2-2.5 มิลลิเมตรให้ประสิทธิภาพที่เหมาะสม สังเกตจากผลการจำลองพบว่าเมื่อเพิ่มขนาดของช่องการไหลให้มากกว่า 2.5 มิลลิเมตรนั้นไม่มีผลต่อการลดลงของความดันสูญเสีย สำหรับการออกแบบการไหลของ Manifold แบบขนานนั้นจะให้การกระจายการไหลที่สม่ำเสมอมากกว่าการไหลแบบสวนทางโดยเฉพาะในกรณีที่มีชั้นวางเซลล์มีขนาดใหญ่

ต่อมาในปี ค.ศ. 2002 Ma และคณะ [15] ได้พัฒนาแบบจำลองระบบการไหลที่ซับซ้อนภายในช่องการไหลของเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 2.10 รวมทั้งได้ทำการทดลองวัดความดันสูญเสียของระบบดังแสดงในรูปที่ 2.11

จากรูปที่ 2.10 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นใน Branch i และการไหลผ่าน Loop j ประกอบด้วย Friction loss และ Local loss ดังสมการ

$$\Delta P_i = \Delta P_{inlet} + \Delta P_{outlet} + \Delta P_{bend} + \tau \frac{A_w}{A_s} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$\tau \frac{A_w}{A_s} = C_f \frac{\rho}{2} \bar{u}_i^{-2} \frac{A_w}{A_s} = C_f \frac{\bar{u}_i}{2} \frac{A_w}{A_s^2} \dot{m}_i \quad (2.3)$$

โดยที่ \dot{m}_i คือ อัตราการไหลเชิงมวลใน branch i
 A_w คือ พื้นที่ผนังของช่องการไหล
 A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องการไหล
 \bar{u}_i คือ ความเร็วการไหลเฉลี่ยในช่องการไหล
 C_f คือ Friction coefficient

ซึ่ง C_f ขึ้นอยู่กับค่า Reynolds number กับรูปร่างและขนาดของพื้นที่หน้าตัดของ Branch สำหรับความดันสูญเสียที่เกิดจาก Local loss หาได้จาก

$$\Delta P_{inlet} = \xi_{inlet} \frac{\rho}{2} \bar{u}_i^{-2} = \xi_{inlet} \frac{\bar{u}_i}{2A_s} \dot{m}_i \quad (2.4)$$

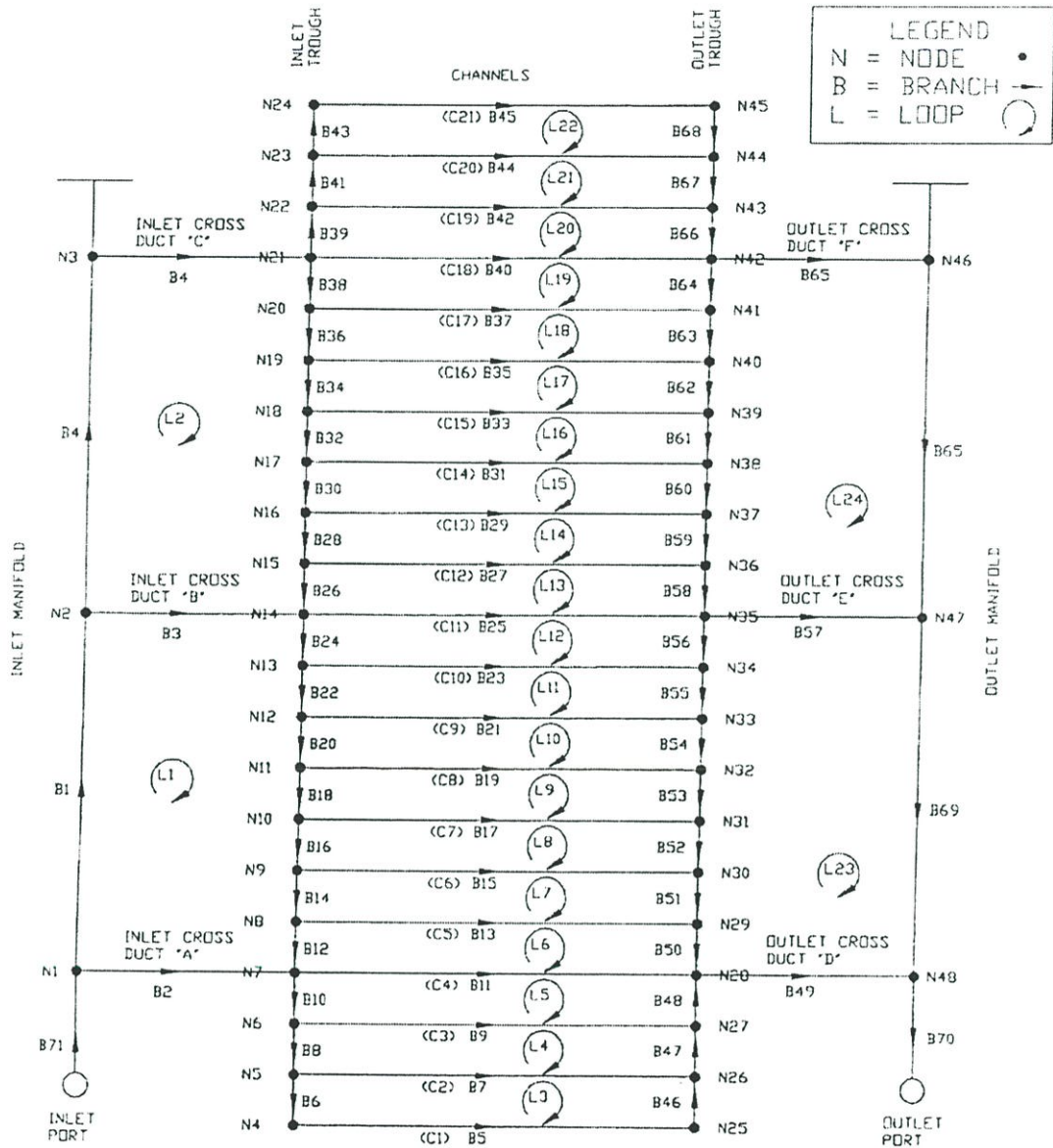
$$\Delta P_{outlet} = \xi_{outlet} \frac{\rho}{2} \bar{u}_i^{-2} = \xi_{outlet} \frac{\bar{u}_i}{2A_s} \dot{m}_i \quad (2.5)$$

$$\Delta P_{bend} = \xi_{bend} \frac{\rho}{2} \bar{u}_i^{-2} = \xi_{bend} \frac{\bar{u}_i}{2A_s} \dot{m}_i \quad (2.6)$$

เมื่อ ξ เป็น Loss coefficient ของจุดต่อของการไหลแบบต่าง ๆ ซึ่งหาได้จาก Idelchik's handbook [24] ในที่สุดได้ระบบสมการดังนี้

$$\Delta P_i = K_i \dot{m}_i \quad (2.7)$$

ที่มี K_i เป็น Flow coefficient

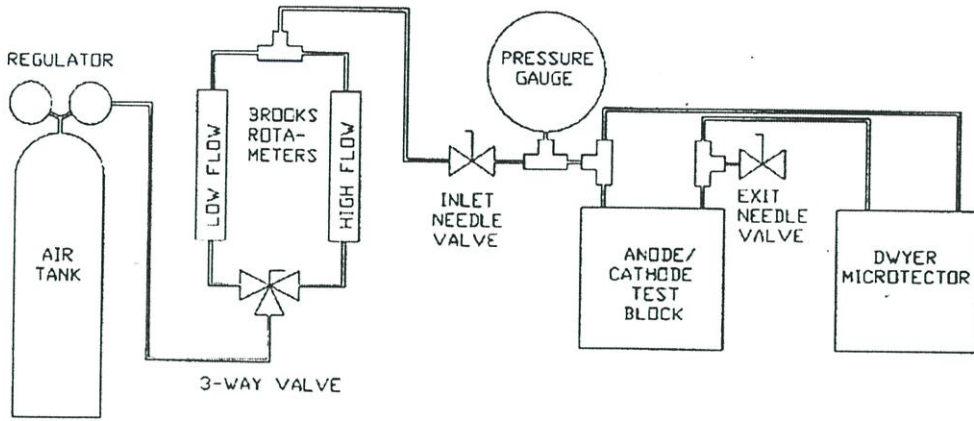


SCHMATIC OF CATHODE USED IN GEORGIA TECH CODE -

รูปที่ 2.10 เครือข่ายการไหลของเซลล์เชื้อเพลิง [15]

อย่างไรก็ตามการพัฒนาโปรแกรมจากรายละเอียดด้านบนนั้นมีข้อจำกัดในการแก้ไขดัดแปลง เครือข่ายการไหลในระหว่างการออกแบบ เนื่องจากหากมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่าย

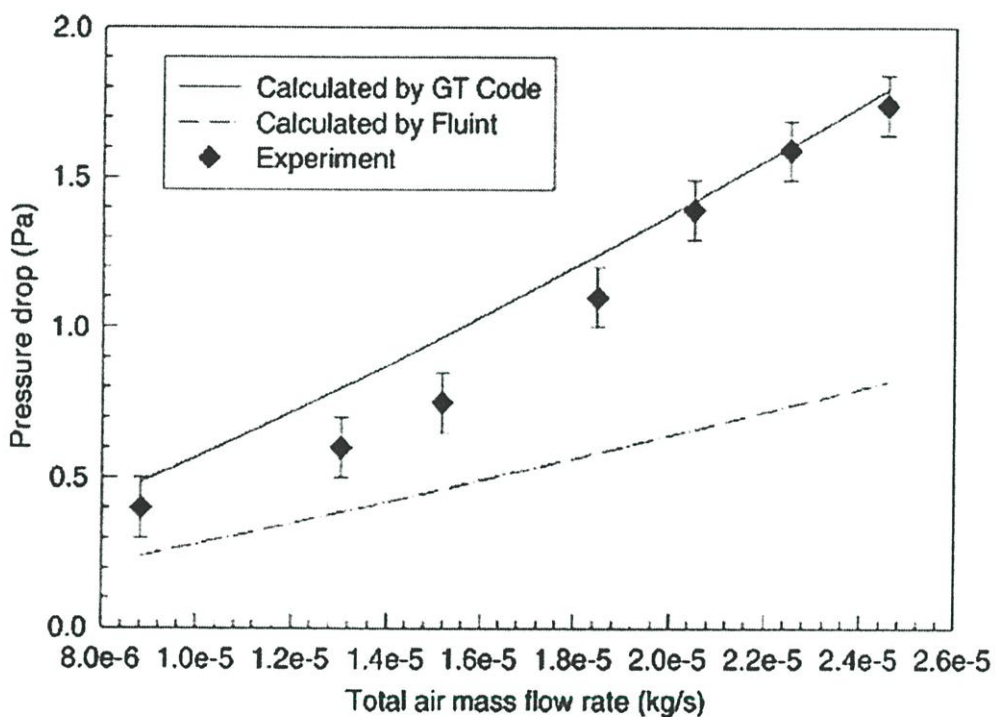
การไหลจะต้องเริ่มพัฒนาระบบสมการใหม่ตั้งแต่ต้น ดังนั้น Savic และ Walters [25] จึงได้สร้าง Program network topology analysis โดยใช้ Depth-first-search และ Breadth-first-search algorithms ซึ่งโมเดลนี้สามารถประยุกต์ใช้กับเครือข่ายการไหลในรูปแบบต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.11 ชุดทดลองเพื่อวัดความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเครือข่ายการไหลจากรูปที่ 2.10 [15]

สำหรับผลการจำลองที่ได้จากระบบสมการที่พัฒนาจากเครือข่ายการไหลดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 นั้นนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากรูปที่ 2.11 และผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม SINDA/FLUINT [26] สำหรับการทดลองนั้นวัดความดันสูญเสียรวมของ 21 ช่องการไหลของเครือข่ายการไหลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (Loss coefficient) ที่เลือกมาใช้กับแบบจำลอง พบว่าในบริเวณ Fully developed laminar flow นั้นการสูญเสียเนื่องจากการเสียดทาน ตลอดเส้นทางการไหลจะแปรผันตรงกับการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหล อย่างไรก็ตาม Transition loss ที่บริเวณจุดตัด (Junction) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การสูญเสียทำให้ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อไหลผ่านจุดตัดเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลยกกำลังสอง ทำให้ความดันสูญเสียรวมที่ไหลผ่านเครือข่ายการไหลเปลี่ยนตามอัตราการไหลในรูปของ Quadratic form ส่วนการทำนายความดันสูญเสียรวม โดยใช้โปรแกรม SINDA/FLUINT มีค่าต่ำกว่าและมีลักษณะเป็นเชิงเส้นมากกว่าการทำนายโดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมา (GT Code) และจากการทดลอง เนื่องจากโปรแกรมกำหนดให้ Transition loss มีค่าคงที่สำหรับทุกจุดตัด โดยค่าความดันสูญเสียรวมที่ได้จากการคำนวณคลาดเคลื่อนไปจากการทดลองประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12

อย่างไรก็ตามได้มีการทดลองเพื่อวัดการกระจายความเร็วของการไหลที่เกิดขึ้นในช่องนำการไหล โดยใช้ Laser Doppler Velocimetry (LDV) เป็นเครื่องมือวัดซึ่งผลที่ได้พบว่ามีความคลาดเคลื่อนมากจากปัจจัยหลายประการด้วยกัน แต่ที่สำคัญที่สุดคือตำแหน่งการวางลำแสงที่เหมาะสม ส่วนปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ การแกว่งของอัตราการไหล การรบกวนทางไฟฟ้า การสะท้อนกลับเนื่องจากกระทบกับผนังช่องการไหล ในรูปที่ 2.13 แสดงการกระจายการไหลภายในช่องนำการไหล 21 ช่องเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการทดลองซึ่งวัดโดยเครื่อง LDV กับผลที่ได้จากการคำนวณโดย GT Code โปรแกรม SINDA/FLUINT และจากการดัดแปลง GT Code โดยใช้ Automatic loop generation

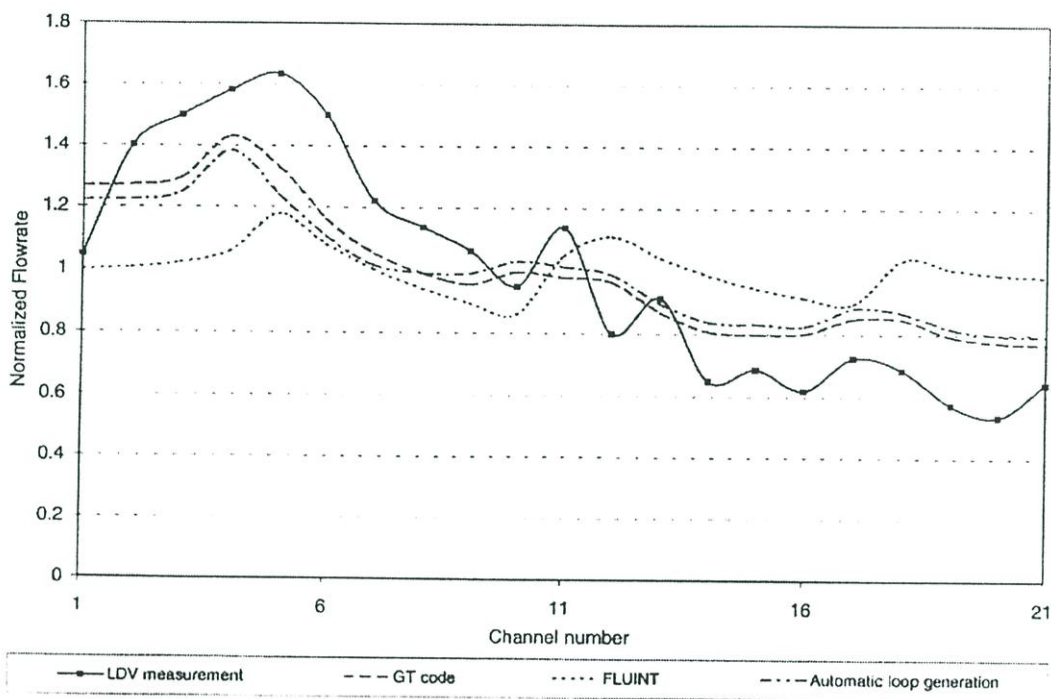


รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบค่าความดันสูญเสียด้านคาโทดที่ได้จากการวัดและการจำลอง [15]

นอกจากนั้นพวกเขายังได้สรุปไว้ว่าในการออกแบบเครือข่ายการไหลเพื่อให้เกิดการกระจายที่สม่ำเสมอขึ้นต้องทำให้เกิดความดันสูญเสีย ใน plenum ให้น้อยที่สุดโดยที่ไม่ทำให้ความดันสูญเสีย ในช่องการไหลเพิ่มขึ้น

Kee และคณะ [16] ได้พัฒนา Computer model เพื่ออธิบายลักษณะการไหลในระบบเครือข่ายของช่องการไหลขนาดเล็กของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่น โดยที่แบบจำลองทำนายความดันสูญเสียและ flow uniformity ภายในแต่ละช่องการไหล จากการจัดรูปตัวแปรให้อยู่ในรูปของกลุ่ม

แปรไร้น่วย เพื่อช่วยผู้ออกแบบในการตัดสินใจเลือกขนาดของช่องการไหล เนื่องจากช่องนำการไหลขนาดเล็กที่สร้างขึ้นในอินเตอคอนเนคเตอร์นั้นต้องทำหน้าที่เป็นช่องทางให้เชื้อเพลิงและอากาศไหล ซึ่งผู้ออกแบบต้องตัดสินใจว่าควรออกแบบเครือข่ายของช่องนำการไหลอย่างไรด้วยอัตราการไหลที่เหมาะสมและทำให้เกิดการไหลอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยา



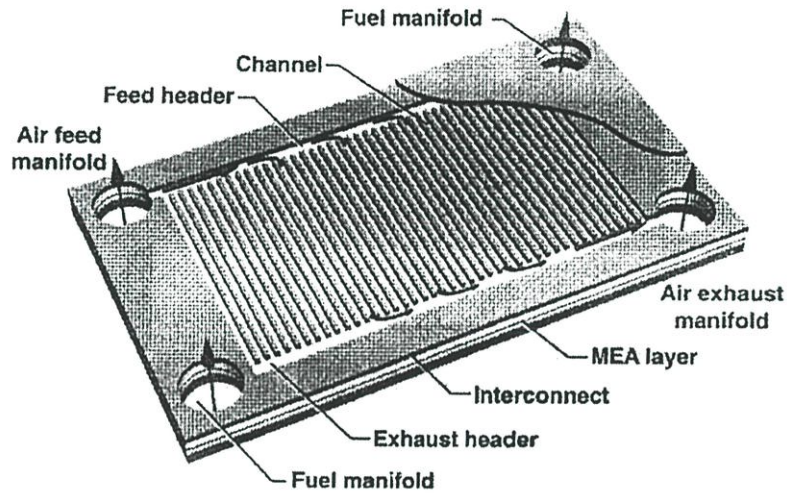
รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบการกระจายการไหลในช่องนำการไหลที่ได้จากการวัดและการจำลอง [15]

Computational model นั้นพัฒนาจากการแก้สมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมภายในเครือข่ายของช่องนำการไหล สร้างเป็นแบบจำลองที่แสดงผลในเทอมของกลุ่มตัวแปรไร้น่วยสองกลุ่มในรูปของกราฟฟิกสำหรับช่วยในการกำหนดรูปร่างและขนาดของช่องนำการไหล

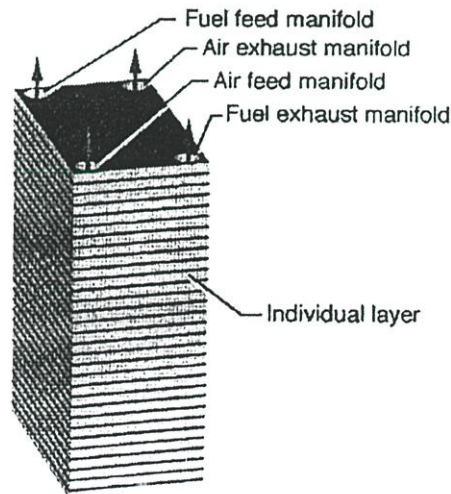
สมมติฐานที่กำหนดให้การพัฒนาแบบจำลองนี้ได้แก่ กำหนดให้การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหลซึ่งอยู่ในสถานะแก๊สคงที่ (เช่น ความหนาแน่น ความหนืด) อัตราการไหลของของไหลค่อนข้างต่ำและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังพิจารณาให้การไหลในช่องนำการไหลไม่สามารถผ่านไปยังชั้นของอิเล็กโตรไลต์ได้ ซึ่งเป็นสมมติฐานที่ไม่สอดคล้องกับการทำงานจริงของเซลล์เชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามในแบบจำลองที่นำเสนอนี้จำกัดเฉพาะใช้เพื่อกำหนดขนาดของช่องนำการไหลของอากาศ เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศสูง

กว่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิงมาก ดังนั้นจึงออกแบบโดยพิจารณาเฉพาะการไหลของอากาศ เพื่อให้เกิดการไหลแบบสม่ำเสมอ

สำหรับระบบการไหลที่พิจารณาประกอบด้วยช่องที่จ่ายแก๊สให้แก่ชั้นวางเซลล์และนำแก๊สออกจากชั้นวางเซลล์ (Feed and exhaust manifold) จากนั้นแก๊สจะไหลเข้าแต่ละชั้นเซลล์ผ่านทาง Header กระจายเข้าสู่ช่องนำการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15

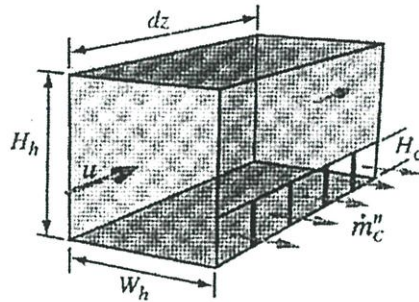


รูปที่ 2.14 รายละเอียดการไหลที่เกิดขึ้นในหนึ่งชั้นเซลล์ [16]

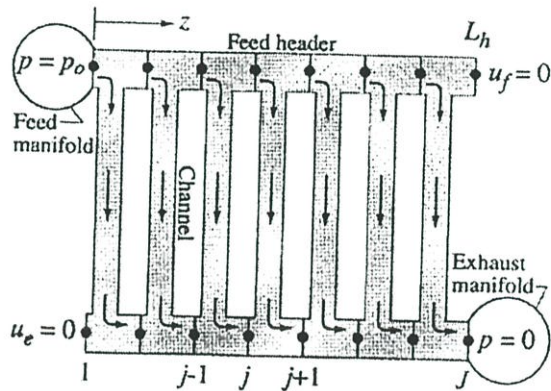


รูปที่ 2.15 รายละเอียดการไหลที่เกิดขึ้นในชั้นวางเซลล์ [16]

สำหรับปริมาตรควบคุมของ Header ที่พิจารณาแสดงในรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17 แสดงโครงร่างของ Header และช่องนำการไหลของหนึ่งชั้นเซลล์



รูปที่ 2.16 Differential control volume ของ Header ที่พิจารณา [16]



รูปที่ 2.17 รายละเอียดการแบ่งเซลล์และเงื่อนไขที่ขอบของหนึ่งชั้นเซลล์ที่พิจารณา [16]

อย่างไรก็ตามเนื่องจากวัตถุประสงค์ของแบบจำลองนั้นเพื่อพัฒนาให้ผลการจำลองนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั่วไป จึงพัฒนาระบบสมการใหม่ให้อยู่ในเทอมของตัวแปรไร้มิติสำหรับทำนายการไหลในแต่ละชั้นเซลล์ได้ดังนี้

$$\Gamma_l = \left(\frac{P_h}{2D_h} \mu \text{Ref} \right) \frac{L_h}{M_l} \quad (2.8)$$

$$\Omega_l = \frac{K_c \dot{M}_l}{\rho A_h^2} \quad (2.9)$$

โดยที่ Γ_l คือ non-dimensional group

Ω_l	คือ non-dimensional group
P_h	คือ perimeter of the header channel
D_h	คือ diameter of the header channel
L_h	คือ length of the header channel
K_c	คือ attributed to viscous effects in the channel
\dot{M}_l	คือ layer mass flow rate
A_h	คือ cross-section area of the header channel

เมื่อพิจารณาการไหลในระดับชั้นวางเซลล์ในทำนองเดียวกันกับการไหลในระดับชั้นเซลล์ กล่าวคือพิจารณาการไหลใน Manifold ซึ่งแยกไหลเข้าแต่ละชั้นเซลล์เหมือนกับการไหลใน Header แยกไหลเข้าแต่ละช่องนำการไหล จึงได้กลุ่มของตัวแปรไร้หน่วยสำหรับทำนายการไหลในระดับชั้นวางเซลล์ดังนี้

$$\Gamma_s = \left(\frac{P_m}{2D_m} \mu \text{Ref} \right) \frac{L_m}{\dot{M}_s} \quad (2.10)$$

$$\Omega_s = \frac{K_l \dot{M}_s}{\rho A_m^2} \quad (2.11)$$

โดยที่ตัวแปรในสมการที่ 2.10 และ 2.11 มีความหมายในทำนองเดียวกันกับสมการที่ 2.8 และ 2.9 ซึ่งแทนที่ดัชนีล่าง h ซึ่งหมายถึง header ด้วย m ซึ่งหมายถึง manifold แทนที่ดัชนีล่าง c ซึ่งหมายถึง channel ด้วย l ซึ่งหมายถึง layer และแทนที่ดัชนีล่าง l เป็น s ซึ่งหมายถึง stack

อย่างไรก็ตามในแต่ละชั้นเซลล์ประกอบด้วยช่องนำการไหลหลายช่องด้วยกันจึงต้องเพิ่มตัวแปรที่แสดงจำนวนช่องนำการไหลด้วยได้แก่ $N_c = \frac{L_h}{S}$ เมื่อ L_h คือความยาวของ header และ S คือระยะห่างระหว่างช่องนำการไหลที่ติดกัน

จากนั้นนำเอากลุ่มตัวแปรไร้หน่วยที่ได้จากการแก้ระบบสมการข้างต้นได้แก่ $N_c \Omega_l$ และ Γ_l มาสร้าง Contour ของความดันสูญเสียไร้หน่วย (Non-dimensional pressure drop),

$$\Delta \hat{p} \equiv \frac{\rho A_h^2}{\dot{M}_l^2} \Delta p \quad \text{และ Channel-flow uniformity, } \frac{\Delta \hat{m}_c}{\hat{m}_c}$$

โดยที่

$$\frac{\Delta \hat{m}_c}{\hat{m}_c} = \frac{\max(\hat{m}_c) - \min(\hat{m}_c)}{\max(\hat{m}_c)} \quad (2.12)$$

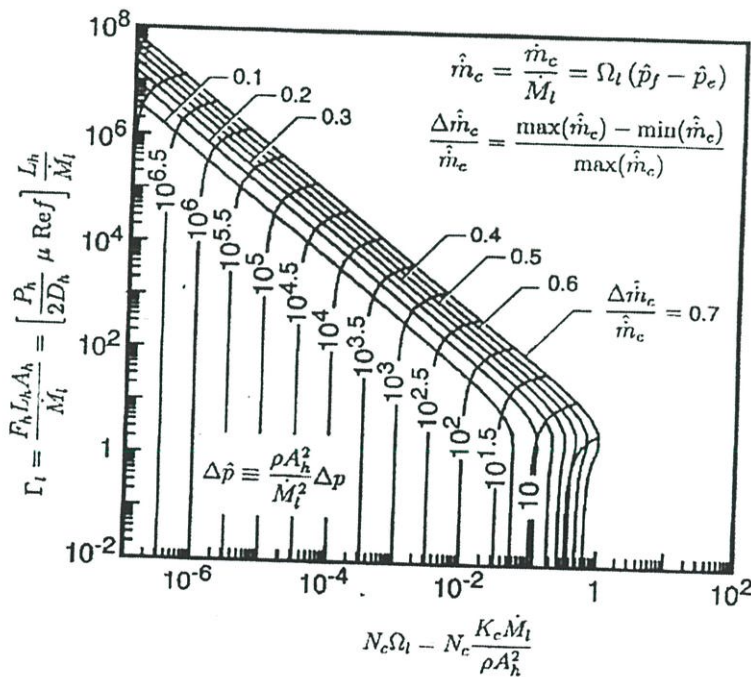
เมื่อ \hat{m}_c คือ non-dimensional mass flow rate in channel สำหรับช่วงที่ต้องการ (Flow uniform)

คือ $\frac{\Delta \hat{m}_c}{\hat{m}_c} < 0.1$ ดังแสดงในรูปที่ 2.18

โดยที่บริเวณนี้ถูกล้อมรอบด้วยขอบเขตดังนี้ $N_c \Omega_l < 5 \times 10^{-2}$ และ $2.5 \Gamma_l N_c \Omega_l < 1$ ซึ่งภายในขอบเขตนี้ความดันสูญเสียไร้นหน่วยมีค่าเท่ากับ

$$\Delta \hat{p} \equiv \frac{\rho A_h^2}{M_l^2} \Delta p = \frac{1}{N_c \Omega_l} \tag{2.13}$$

สำหรับบริเวณที่อยู่นอกขอบเขตนี้บางช่องนำการไหลก็ไม่มีการไหล หรือมีการไหลสวนทาง และการกระจายการไหลของแต่ละช่องนำการไหลซึ่งเป็นฟังก์ชันของ Ω_l และ N_c แสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 Contour ของ Non-dimensional pressure drop และ Channel-flow uniformity [16]

จากรูปที่ 2.19 แสดงการกระจายการไหลในแต่ละช่องการไหลที่เปลี่ยนไปตามค่าของ Ω_l และ Γ_l โดยที่ทางเข้าอยู่ทางด้านซ้ายและทางออกอยู่ทางด้านขวา จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลง

ของการกระจายการไหลในช่องการไหลเห็นได้ชัดในบริเวณต่าง ๆ ที่อยู่นอกบริเวณที่กำหนด บริเวณการไหลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

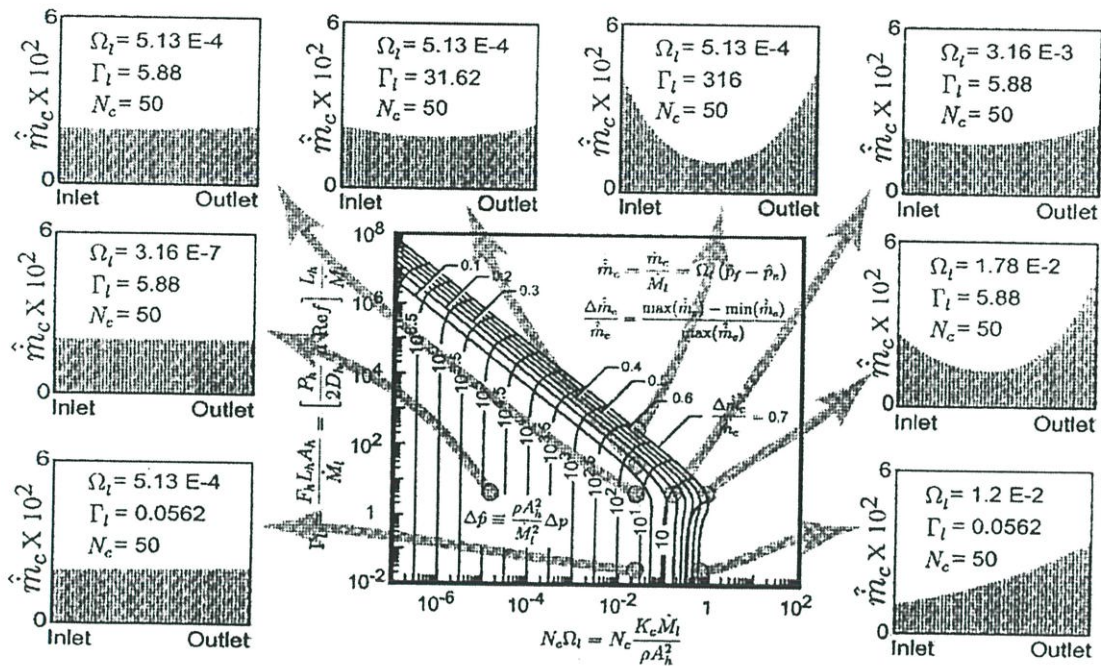
Koh และคณะ [17] ได้นำเสนองานวิจัยออกมาในปี ค.ศ. 2003 โดยงานวิจัยของพวกเขา มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความดันซึ่งแสดงการกระจายการไหลในแต่ละชั้นของการไหลสองรูปแบบสำหรับชั้นวางเซลล์ สำหรับการไหลสองรูปแบบภายในชั้นวางเซลล์ที่พวกเขาทำการศึกษาค้นคว้าแสดงในรูปที่ 2.20 เป็นรูปแบบการไหลแบบสวนทาง (U-shape) ซึ่งแก๊สที่ไหลเข้าชั้นวางเซลล์ มีทิศทางตรงข้ามกับแก๊สที่ไหลออกจากชั้นวางเซลล์ และแบบขนาน (Z-shape) ซึ่งแก๊สที่ไหลเข้าชั้นวางเซลล์มีทิศทางเดียวกันกับแก๊สที่ไหลออกจากชั้นวางเซลล์

ในการทำงานจริงของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นอัตราการไหลเชิงมวลจะมีการเปลี่ยนแปลงจากที่ทางเข้าช่องนำการไหลไปจนถึงทางออกเนื่องจากการ consumption หรือ generation จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเชิงมวลจะมีผลกระทบต่อ การไหลในช่องนำการไหลมากในกรณีของแก๊สมีค่า utilization มากเท่านั้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของมวลไม่ได้นำมาพิจารณาร่วมกับแบบจำลองที่พวกเขานำเสนอ แต่เขาก็ก็กล่าวที่สามารถดัดแปลงเพิ่มเข้าไปในแบบจำลองได้ไม่ยาก

แบบจำลองพัฒนาจากสมการ Hagen-Poiseuille และ Darcy's law ซึ่งค่า permeability เป็นตัวแปรหนึ่งที่พิจารณาเป็น flow resistance ของการไหลในช่องนำการไหลโดยที่ค่า permeability ได้จากการทดลอง สำหรับความดันภายใน internal manifold พัฒนาจากสมการเบอร์นูลลีซึ่งแสดง friction loss จากผนังและรูปร่างของ manifold

นอกจากการพัฒนาแบบจำลองเพื่อแสดงค่าความดันที่เกิดขึ้นภายใน manifold ที่ทางเข้าและทางออกของชั้นวางเซลล์ยังได้ทำการทดลองเพื่อวัดค่าความดันที่เกิดขึ้นจริงกับชั้นวางเซลล์ซึ่งประกอบด้วย 10 เซลล์แบบ molten carbonate ขนาด 55x110 ตารางเซนติเมตร สำหรับการไหลของแก๊สในเซลล์แบบ co-flow กล่าวคือเชื้อเพลิงและอากาศไหลในทิศทางเดียวกัน และรูปแบบการไหลของชั้นวางเซลล์เป็นแบบไหลสวนทาง ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งแสดงความดันตกคร่อมชั้นวางเซลล์ที่อัตราการไหลขนาดต่าง ๆ

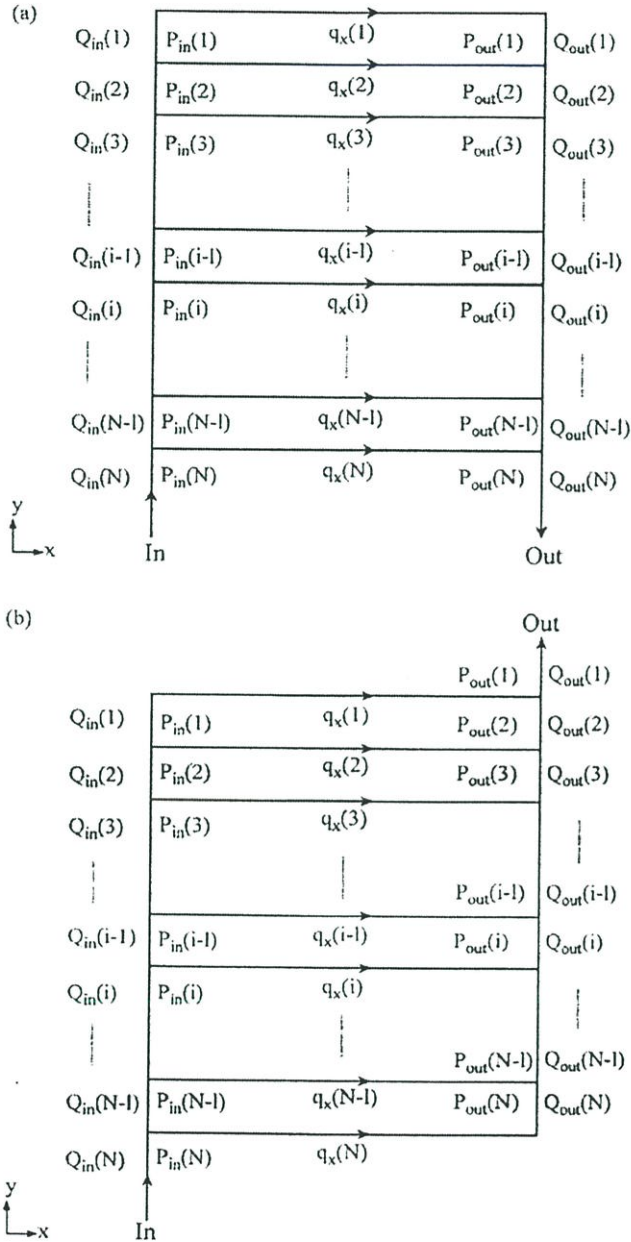
จากผลการทดลองเขาสรุปว่าการเปลี่ยนแปลงความดันใน manifold ไม่มีผลกระทบต่อ การกระจายการไหลสำหรับชั้นวางเซลล์ขนาดเล็ก เนื่องจากความดันตกคร่อมที่วัดได้ของทั้งชั้นวางเซลล์ แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราการไหล แสดงว่าความดันตกคร่อมเกิดขึ้นนั้นเนื่องมาจาก flow resistance ที่เกิดขึ้นในช่องนำการไหลซึ่งมีการไหลแบบราบเรียบ



รูปที่ 2.19 การกระจายการไหลในช่องการไหล [16]

อย่างไรก็ตามเมื่อชั้นวางเซลล์ประกอบด้วยเซลล์จำนวนมากกว่านี้การเปลี่ยนแปลงความดันใน manifold จะมีความสำคัญต่อการกำหนดขนาดและรูปร่างของ manifold ในขณะที่ชั้นวางเซลล์ขนาดเล็กนั้นง่ายแก่การประกอบและการทดสอบแต่สำหรับการประกอบและทดสอบกับชั้นวางเซลล์ขนาดใหญ่ นั้นทั้งยุ่งยากและมีราคาแพง ดังนั้นจึงใช้แบบจำลองศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันใน manifold ของชั้นวางเซลล์ขนาดใหญ่ ซึ่งกรณีที่ศึกษาเป็นชั้นวางเซลล์ซึ่งประกอบด้วย 100 เซลล์ที่ขนาดเดียวกับการทดลอง โดยกำหนดให้ความดันสูญเสียใน manifold ประกอบด้วยความดันสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเชิงมวลและความเสียดทานที่ผนังและความต้านทานการไหลเนื่องจากรูปร่างของ manifold โดยที่ความดันสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลคือพลังงานที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความแตกต่างของความเร็วของแก๊สที่ก่อนและหลัง junction ของ manifold, ความดันสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานที่ผนังหาได้จากสมการของ wall friction coefficient ของการไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน ส่วนความดันสูญเสียเนื่องจากรูปร่างของ manifold หาได้จาก geometrical coefficient ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ได้กับข้อต่อหรือวาล์วแบบต่าง ๆ ซึ่งอาจไม่มีค่าที่กำหนดให้กับรูปร่างของ manifold ที่ออกแบบ

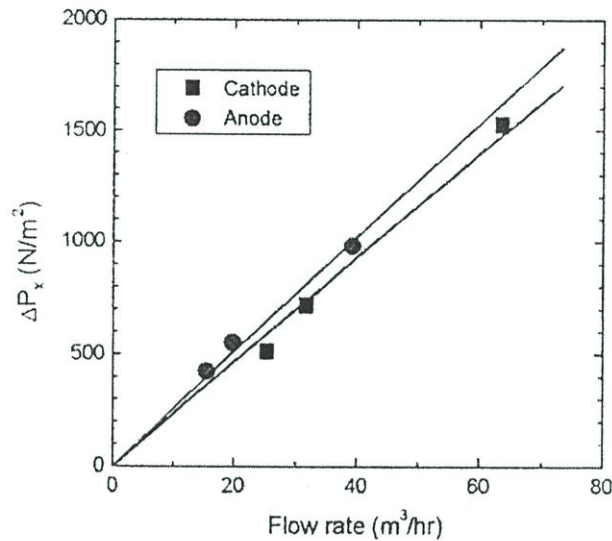
ไว้ แต่ในการนำเสนอนี้ก็ประมาณค่าจากข้อต่อหรือวาล์วแบบต่าง ๆ ที่ได้จาก piping design handbook



รูปที่ 2.20 ตัวแปรของความดันและการไหลสำหรับแบบจำลองเชิงคณิตวิเคราะห์ (a) การไหลแบบสวนทาง (b) การไหลแบบขนาน [17]

จากงานวิจัยที่ได้นำเสนอไปนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในชั้นวางเซลล์เป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบชั้นวางเซลล์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับขนาดและรูปร่างของช่องนำ

การไหลในอินเตอคอนเนคเตอร์ หรือการออกแบบเครือข่ายการไหลภายในชั้นวางเซลล์ สำหรับงานวิจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวไปแล้วนั้นเป็นระบบการไหลแบบ Internal manifold นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าในงานวิจัยที่มีการทดลองนั้นเป็นการวัดที่เกิดขึ้นใน Manifold หรือการวัดการไหลที่เกิดขึ้นในช่องการไหลเพียงช่องเดียวเท่านั้น



รูปที่ 2.21 ความดันสูญเสียสำหรับการไหลผ่านช่องการไหลที่วัดได้จากการทดลอง [17]

สำหรับงานวิจัยที่จะนำเสนอต่อไปนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของรูปร่างของชุดกระจายการไหล (External manifold) ที่มีต่อลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในชั้นวางเซลล์ โดยทำการสร้างชุดทดลองเพื่อวัดการกระจายการไหลที่เกิดขึ้นในชั้นวางเซลล์ซึ่งประกอบด้วยเซลล์จำนวน 10 เซลล์แต่ละชั้นเซลล์ประกอบด้วย 13 ช่องนำการไหล นอกจากการทดลองแล้วยังได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นภายในชั้นวางเซลล์โดยใช้โปรแกรมทาง CFD เพื่อสร้างแบบจำลองการไหลสำหรับใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบชั้นวางเซลล์ให้เกิดประสิทธิภาพในการทำงานที่เหมาะสมต่อไป

บทที่ 3

การทดลองวัดการกระจายการไหลในชั้นวางเซลล์

3.1 บทนำ

ในการออกแบบชั้นวางเซลล์นั้นจะไม่พิจารณาถึงการออกแบบเอาโนด อิเล็กโทรไลต์ และคาโทด เนื่องจากเป็นส่วนที่ต้องใช้กระบวนการขึ้นรูปที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามรูปร่างของเซลล์ที่ได้จะเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบส่วนประกอบอื่น ๆ ของชั้นวางเซลล์โดยสามารถนำไปใช้กับเอาโนด อิเล็กโทรไลต์และคาโทด ที่มีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเซลล์ที่นำมาทดสอบกับชั้นวางเซลล์ที่ออกแบบ

ส่วนประกอบเซลล์	วัสดุ	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ความหนา (ไมโครเมตร)
คาโทด	LSM	16	≈150
อิเล็กโทรไลต์	8YSZ	25	≈200
เอาโนด	Ni/YSZ	16	≈150

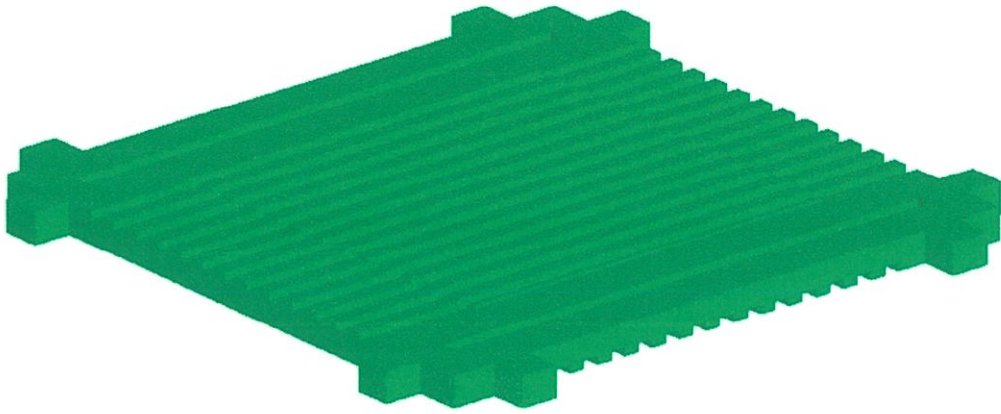
3.2 การออกแบบชั้นวางเซลล์ (Cell Stack Design)

ส่วนประกอบของชั้นวางเซลล์นั้นนอกจากเซลล์ซึ่งประกอบด้วยคาโทด อิเล็กโทรไลต์ และเอาโนดแล้วยังมีส่วนอื่นดังต่อไปนี้ เป็นส่วนที่ได้ออกแบบมาเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น

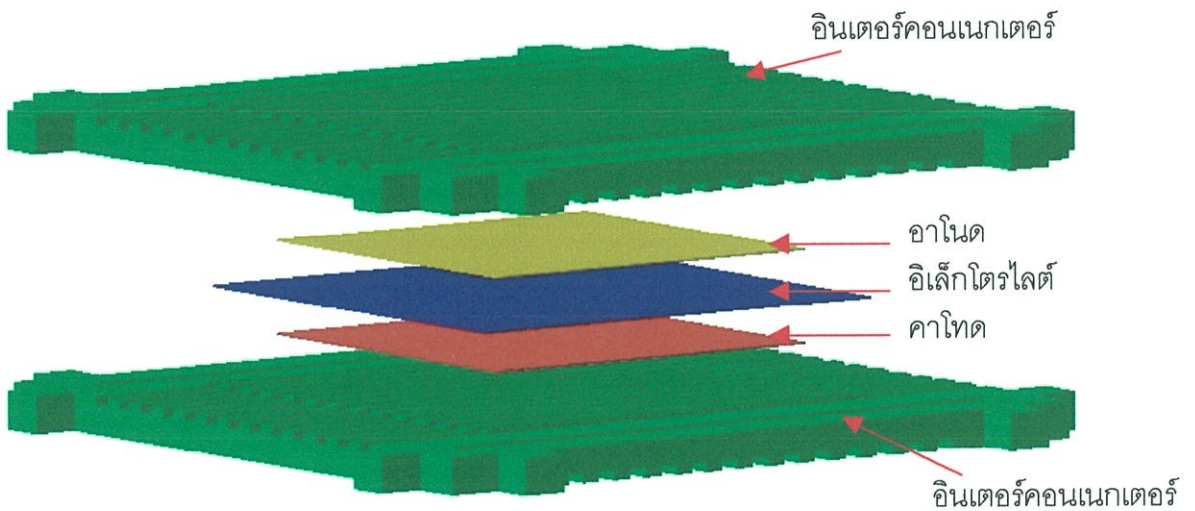
3.2.1 อินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector)

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 ว่าอินเตอร์คอนเนกเตอร์มีหน้าที่สองประการด้วยกันสำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ นำแก๊สเข้าไปสัมผัสกับขั้วอิเล็กโทรดและเป็นขั้วไฟฟ้าเชื่อมระหว่างเอาโนดและคาโทดของเซลล์ที่อยู่ติดกัน

ดังนั้นอินเตอร์คอนเนกเตอร์ต้องไม่หนาจนเกินไป เพราะจะเป็นการเพิ่มความต้านทานทางไฟฟ้าให้แก่ระบบ และในหนึ่งชั้นต้องมีช่องให้เชื้อเพลิงและอากาศไหลโดยไม่สัมผัสกัน อย่างไรก็ตามสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ได้กำหนดให้รูปร่างของอินเตอร์คอนเนกเตอร์ไม่ซับซ้อนเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้นเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาต่อไป รูปที่ 3.1 แสดงอินเตอร์คอนเนกเตอร์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้ศึกษางานวิจัยนี้ ซึ่งนอกจากพิจารณาออกแบบตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้วนั้น ยังต้องพิจารณาถึงวิธีการขึ้นรูปตลอดจนราคาต้นทุนการผลิตด้วย

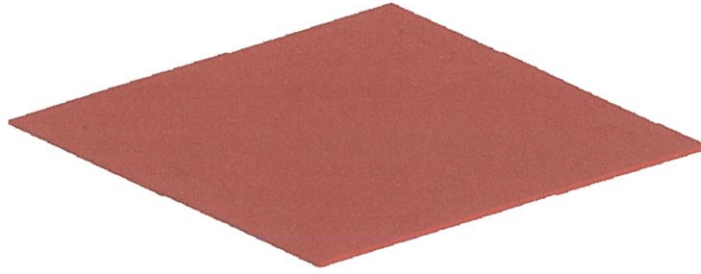


รูปที่ 3.1 อินเตอร์คอนเนคเตอร์

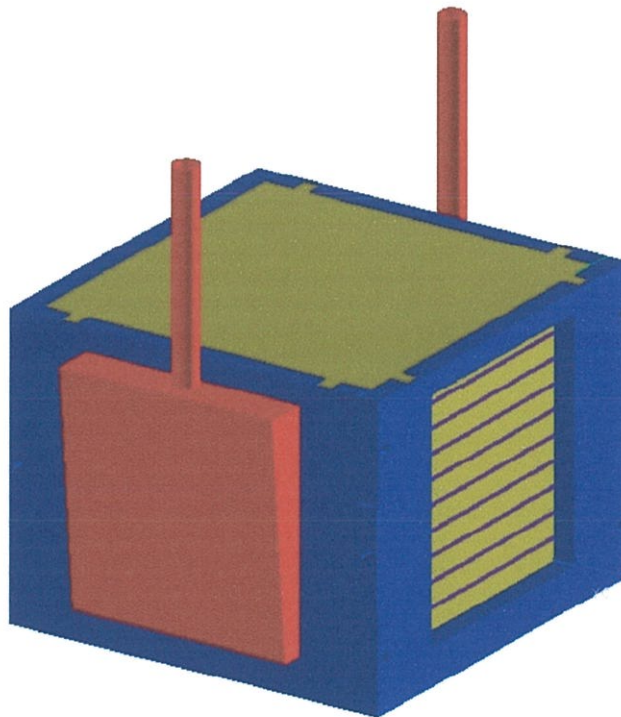


รูปที่ 3.2 แนวคิดการประกอบเซลล์

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าเกิดช่องว่างบริเวณขอบเซลล์ที่เชื้อเพลิงและอากาศสามารถไหลมาผสมกันได้ ดังนั้นจึงต้องมีวัสดุอีกชนิดหนึ่งทำหน้าที่กันไม่ให้เกิดทั้งสองชนิดไหลมาผสมกันได้ นอกจากนั้นยังต้องทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อินเตอร์คอนเนคเตอร์ที่อยู่ใกล้กันแตะกัน เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรทางไฟฟ้าได้ โดยเราเรียกวัดูดชนิดนี้ว่าวัสดุกันรั่วหรือซีล (Seal) ซีลต้องเป็นวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า สามารถทำหน้าที่ได้ที่อุณหภูมิการทำงานของ SOFC และต้องมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ใกล้เคียงกับส่วนประกอบของเซลล์ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ไม่กล่าวถึงการพัฒนาวัสดุกันรั่ว แต่กล่าวถึงการออกแบบรูปร่างของซีลเพื่อให้สามารถนำมาใช้ได้กับส่วนประกอบอื่นที่ได้ออกแบบ โดยที่ซีลที่ได้ออกแบบแสดงในรูปที่ 3.3 และแสดงการประกอบเป็นชั้นเซลล์ที่สมบูรณ์ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ซีล

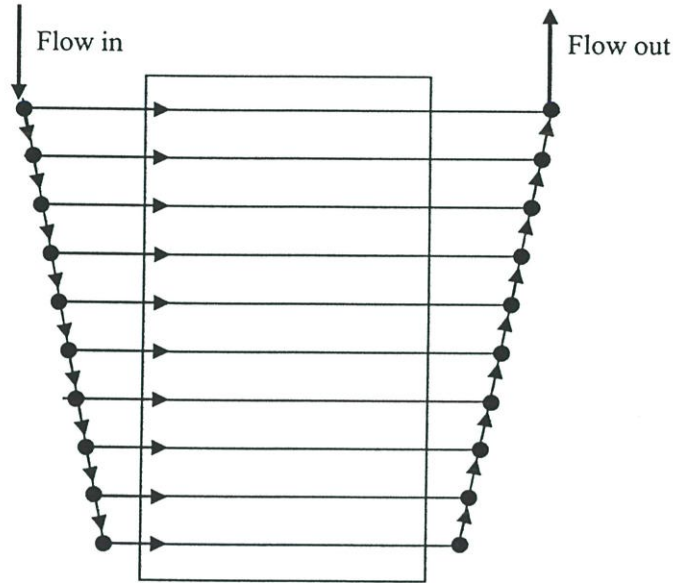


รูปที่ 3.4 การประกอบชั้นเซลล์

3.2.2 ชุดกระจายการไหล (External Manifold)

ในเบื้องต้นนี้ได้ออกแบบชั้นวางเซลล์โดยใช้ระบบป้อนแก๊สแบบ External manifold ซึ่งสามารถขึ้นรูปได้ง่ายกว่า Internal manifold จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่ามีช่องการไหลจำนวนหลายช่องและเมื่อนำแต่ละเซลล์มาซ้อนกันเป็นชั้นสร้างเป็นชั้นวางเซลล์ ดังนั้นต้องจ่ายแก๊สให้แก่ช่องการไหลในอัตราการไหลที่ใกล้เคียงกันทุกช่องและทุกชั้น สำหรับชุดการป้อนแก๊สที่ออกแบบนี้ได้รับแนวคิดจากระบบปรับอากาศ ซึ่งมีแหล่งจ่ายอากาศที่ต้องส่งอากาศไปตามท่อไปยังห้องต่างๆที่เพิ่มระยะห่างจากแหล่งจ่ายมากขึ้นตามลำดับ อย่างไรก็ตามอัตราการป้อนอากาศของแต่ละห้องก็ต้องออก

ออกแบบให้ใกล้เคียงกัน ซึ่งในระบบปรับอากาศนั้นทำได้โดยการลดขนาดท่อลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับชั้นของเซลล์จะได้แนวคิดดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แนวคิดในการออกแบบชุดป้อนแก๊สแก่ชั้นเซลล์

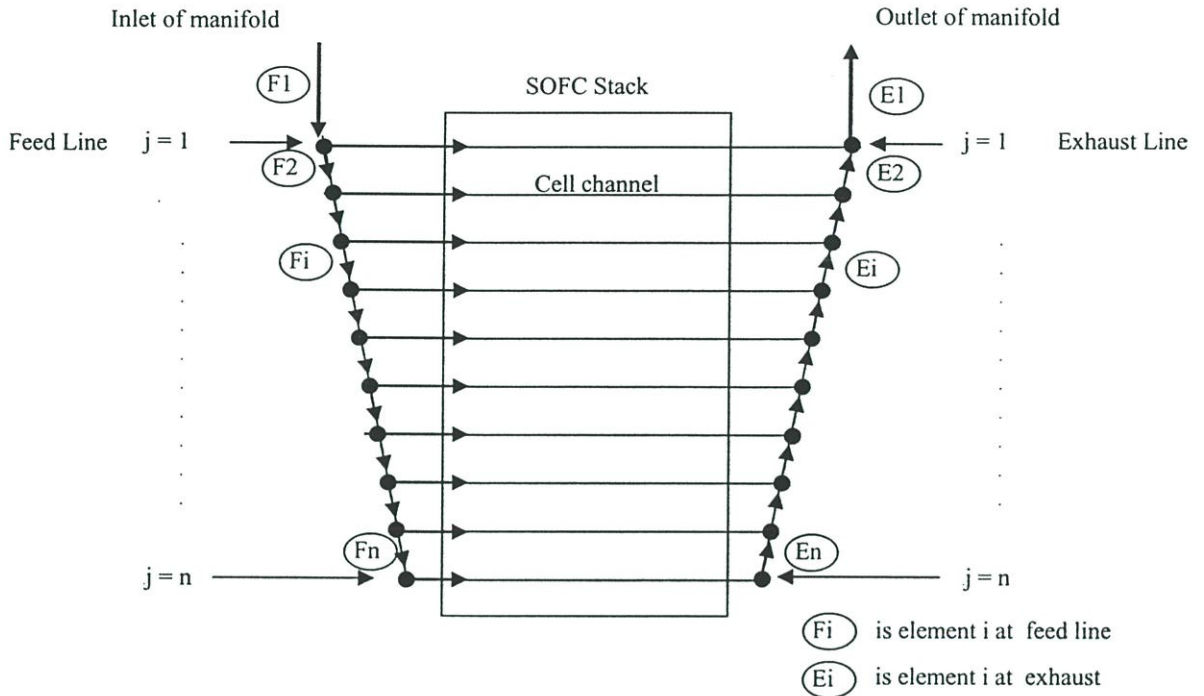
เพื่อทำความเข้าใจปรากฏการณ์การไหลอย่างง่ายที่จะเกิดขึ้นภายในชั้นวางเซลล์ จึงได้พัฒนาระบบสมการอย่างง่ายขึ้นมาเพื่อศึกษาเป็นแนวทางก่อนทำการทดลอง โดยพิจารณาการไหลในชั้นวางเซลล์เป็น 2 มิติดังแสดงในรูปที่ 3.6 กำหนดให้เกิดความดันตกคร่อมในแต่ละช่องการไหลเท่ากัน และของไหลไหลออกจากระบบที่ความดันบรรยากาศ ในแต่ละจุดต่อของระบบนั้นของไหลที่ไหลเข้าเท่ากับของไหลที่ไหลออก จากเงื่อนไขทั้งหมดสามารถสร้างระบบสมการของอัตราการไหลที่จุดต่อในระบบได้ดังนี้

$$Q_{F,i} = ((n+1) - i) \cdot Q_{CELL} \quad (3.1)$$

$$Q_{E,i} = Q_{F,i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3.2)$$

และคำนวณหาความดันสูญเสียตามความสูงของชั้นวางเซลล์จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta P_{HE,i} = \frac{128 \mu H_c Q_{E,i}}{\pi D_{ME,i}^4} \quad (3.3)$$



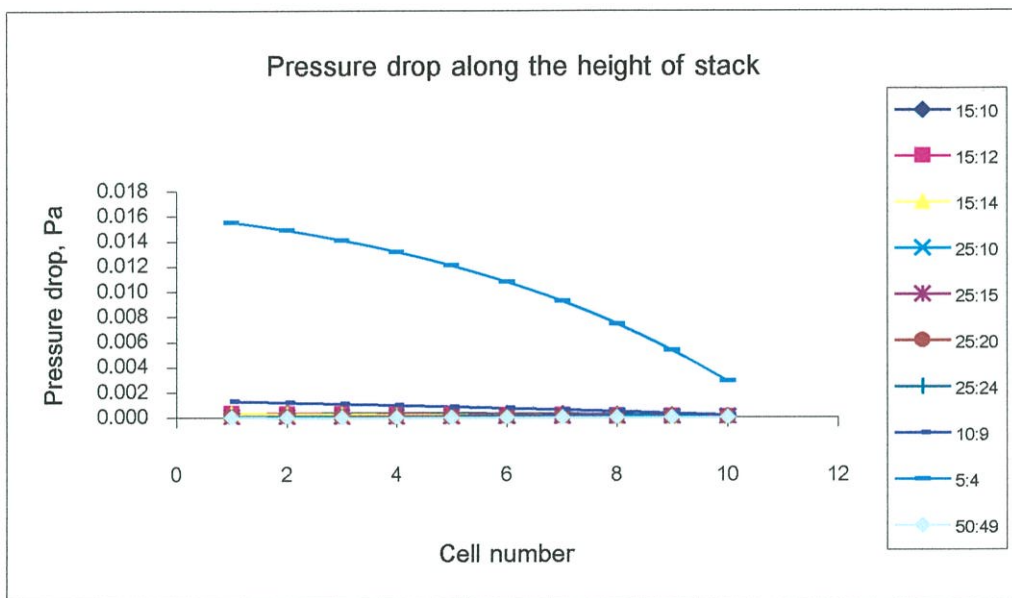
รูปที่ 3.6 ระบบการไหล 2 มิติที่พิจารณา

เมื่อกำหนดค่าของตัวแปรต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 สามารถคำนวณหาอัตราการไหลที่ทางเข้าและทางออกของแต่ละจุดต่อ และความดันสูญเสียตามความสูงของชั้นเซลล์ (แสดงโดยลำดับของชั้นเซลล์) ที่ค่าความกว้างด้านบนและด้านล่างของชุดกระจายการไหลต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 3.2 ค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องกำหนดให้แก่ระบบสมการ

ค่าที่ต้องกำหนดให้แก่ระบบสมการ
1. ความสูงของชุดกระจายการไหล
2. ความกว้างของทางเข้าแก๊สของชุดกระจายการไหล
3. ระยะห่างระหว่างชั้นเซลล์ที่อยู่ติดกัน
4. จำนวนช่องการไหลในหนึ่งชั้นเซลล์
5. ความยาวของช่องการไหล
6. ความกว้างของช่องการไหล
7. ความสูงของช่องการไหล
8. อัตราการไหลของแก๊สในหนึ่งช่องการไหล

ปรากฏว่าได้ผลการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อชุดกระจายการไหลมีความกว้างมาก ๆ นั้นส่งผลให้เกิดความดันสูญเสียเล็กน้อย ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ดีในการออกแบบชั้นวางเซลล์ อย่างไรก็ตามการที่ชุดกระจายการไหลมีปริมาตรมาก ๆ นั้นส่งผลให้การจัดการความร้อนของระบบยุ่งยากมากขึ้น รวมทั้งสูญเสียเวลามากขึ้นในการอนุรักษ์ระบบให้ถึงอุณหภูมิการทำงาน ซึ่งหมายถึงสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน สำหรับกรณีที่ชุดกระจายการไหลมีความกว้างน้อย ๆ (5:4) นั้นเป็นเงื่อนไขที่ดี เมื่อพิจารณาในประเด็นของการสูญเสียพลังงานน้อย ใช้พื้นที่น้อย แต่อย่างไรก็ตามพบว่าทำให้เกิดความดันสูญเสียสูงมากซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ไม่ดีในการออกแบบ ดังนั้นในการเลือกขนาดของชุดกระจายการไหลนั้นต้องไม่กว้างมากเกินไปและไม่แคบมากเกินไป

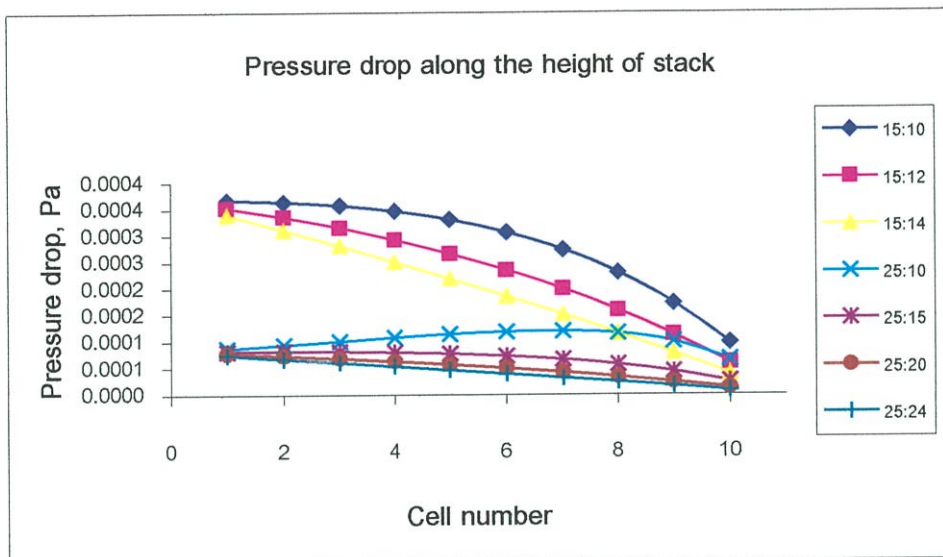


รูปที่ 3.7 ค่าความดันสูญเสียตามความสูง(แสดงในรูป Cell number) ที่ความกว้างด้านบน:ด้านล่างของชุดกระจายการไหลต่าง ๆ กัน

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้นั้นไม่ได้มีวัตถุประสงค์ในการหาขนาดของชุดกระจายการไหลที่เหมาะสม เพียงต้องการศึกษาลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง (หรือขนาดของความกว้างด้านล่างและบนของชุดกระจายการไหล) ดังนั้นจึงได้เลือกช่วงของความกว้างของชุดกระจายการไหลที่จะนำไปทำการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม

ในกลุ่มแรกจะเห็นได้ว่าเกิดความดันสูญเสียต่ำกว่ากลุ่มที่สอง ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงเงื่อนไขในการออกแบบแล้วกลุ่มแรกน่าสนใจมากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยมาก ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าจะส่งผลยุ่งยากกับการทดลองซึ่งจะทำการ

วัดค่าต่าง ๆ ได้ยาก เนื่องจากค่าที่น้อยก็มีความต้องการความละเอียดของเครื่องมือวัดสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงเลือกทำการทดลองในกลุ่มที่สองแทน



รูปที่ 3.8 ค่าความดันสูญเสียตามความสูง(แสดงในรูป Cell number) ที่ความกว้างด้านบน:ล่างของชุดกระจายการไหลต่าง ๆ กัน

เนื่องจากชั้นเซลล์มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นในการสร้างชุดป้อนแก๊สตามแนวคิดดังกล่าวนี้ทำได้ยาก ดังนั้นจึงต้องดัดแปลงเพื่อให้สามารถขึ้นรูปชุดป้อนแก๊สได้ ซึ่งชุดป้อนแก๊สที่ดัดแปลงแสดงดังรูปที่ 3.9 ดังนั้นต้องมีโครงสร้างที่ยึดชั้นเซลล์และชุดป้อนแก๊สเข้าด้วยกัน ซึ่งได้ออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.10 รวมทั้งการประกอบชั้นวางเซลล์แบบสมบูรณ์



รูปที่ 3.9 ชุดป้อนแก๊สที่ออกแบบตามแนวคิดในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.10 โครงสร้างของชั้นวางเซลล์และการประกอบชั้นวางเซลล์ที่สมบูรณ์

3.3 การออกแบบชุดทดลอง

ชุดป้อนแก๊สที่ได้ออกแบบนั้นทำหน้าที่กระจายแก๊สให้แก่ช่องการไหลภายในชั้นวางเซลล์ ดังนั้นจึงกำหนดให้เรียกชุดป้อนแก๊สเป็น “ชุดกระจายการไหล” เพื่อแสดงถึงหน้าที่ที่มีต่อระบบ จากรูปที่ 3.9 นั้นจะเห็นได้ว่าชุดกระจายการไหลมีความเอียงเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดค่อยลดลงไปตามทิศทางการไหลของแก๊ส อย่างไรก็ตามไม่สามารถบอกได้ว่าควรเอียงเท่าไรจึงทำให้เกิดการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์ได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของมุมเอียงของชุดกระจายการไหลที่มีต่อการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์

ในการออกแบบการทดลองต้องมีการดัดแปลงส่วนประกอบของเซลล์ในบางส่วนเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลอง รวมทั้งต้องออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าที่แสดงการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์

3.3.1 ตัวแปรที่ใช้แสดงการกระจายการไหล

เนื่องจากสิ่งที่ต้องการศึกษาคือการกระจายการไหลในชั้นวางเซลล์ทั้งในระดับหนึ่งหน่วยเซลล์และระดับชั้นวางเซลล์ ดังนั้นตัวแปรที่สามารถบอกการกระจายการไหลได้คืออัตราการไหล กล่าวคือในระดับหนึ่งหน่วยเซลล์นั้นสามารถศึกษาลักษณะการกระจายการไหลโดยการเปรียบเทียบอัตราการไหลในแต่ละช่องการไหล ในทำนองเดียวกันสำหรับการศึกษาการกระจายการไหลในชั้นวางเซลล์สามารถทำได้โดยเปรียบเทียบอัตราการไหลในแต่ละเซลล์

ดังนั้นในลำดับแรกจึงต้องคำนวณหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่ต้องการใช้สำหรับชั้นวางเซลล์ขนาด 10 เซลล์ดังนี้

1. อัตราการไหลของไฮโดรเจน[27] คำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

ปริมาณของไฮโดรเจนที่ต้องการใช้:

$$H_2 = 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \text{ kg / s} \quad (3.4)$$

โดย P_e คือกำลังไฟฟ้าที่ต้องการผลิตได้จากชั้นวางเซลล์และ V_c คือความต่างศักย์ไฟฟ้าของหนึ่งเซลล์จากข้อมูลของเซลล์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์นั้นสามารถผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 200 mA / cm^2 ต่อหนึ่งเซลล์ โดยพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของหนึ่งเซลล์เท่ากับ 16 cm^2 (ขนาดของเซลล์ที่ต้องการผลิต) ดังนั้นหนึ่งเซลล์จะให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ

$$\begin{aligned} I_c &= (200 \text{ mA / cm}^2) \times 16 \text{ cm}^2 \\ &= 3.2 \text{ A} \end{aligned}$$

สำหรับชั้นวางเซลล์ขนาด 10 เซลล์นั้นผลิตกำลังไฟฟ้าได้

$$\begin{aligned} P_e &= I_c \times V_c \times n \quad ; \quad n = \text{จำนวนเซลล์ในชั้นวางเซลล์} \\ &= 3.2 \text{ A} \times 0.65 \text{ V} \times 10 \\ &= 20.8 \text{ W} \end{aligned}$$

ดังนั้นสามารถหาอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่ต้องการได้

$$\begin{aligned} H_2 &= 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{20.8}{0.65} \text{ kg / s} \\ &= 33.6 \times 10^{-8} \text{ kg / s} \end{aligned}$$

หรือ

$$Q_{H_2} = 0.24 \text{ LPM}$$

2. อัตราการไหลของอากาศ [27] ในทำนองเดียวกันกับการหาอัตราการไหลของไฮโดรเจน โดยใช้สมการดังนี้

$$O_2 = 8.29 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \text{ kg / s} \quad (3.5)$$

หรือ

$$\text{Air}(usage) = 3.57 \times 10^{-7} \cdot \lambda \cdot \frac{P_e}{V_c} \text{ kg / s} \quad (3.6)$$

เมื่อ λ คือค่า stoichiometry โดยปกติกำหนดให้เท่ากับ 2 [27] ดังนั้นสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการได้คือ

$$\begin{aligned} Air(usage) &= 3.57 \times 10^{-7} \cdot 2 \cdot \frac{20.8}{0.65} \text{ kg / s} \\ &= 228.48 \times 10^{-7} \text{ kg / s} \end{aligned}$$

หรือ

$$Q_{Air} = 1.165 \text{ L / min}$$

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าการวัดอัตราการไหลในช่องการไหลซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัดขนาด 2 ตารางมิลลิเมตรนั้นทำได้ยาก หรือหากสามารถทำได้ก็เกิดการรบกวนการไหลของระบบ ทำให้ค่าที่วัดได้นั้นคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง ดังนั้นจึงต้องหาตัวแปรอื่นที่สามารถแสดงการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์ได้อย่างเหมาะสมและสามารถวัดได้โดยไม่กระทบต่อการไหลของระบบ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 นั้นจะเห็นได้ว่าการพัฒนาโมเดลนั้นจะกำหนดให้การไหลในช่องการไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ สำหรับในการทดลองนี้ซึ่งทราบอัตราการไหลแก๊สที่ต้องป้อนให้แก่ชั้นวางเซลล์ขนาด 10 เซลล์แล้วนั้นเมื่อกำหนดให้การไหลกระจายไปยังแต่ละช่องการไหล และแต่ละเซลล์ในชั้นวางเซลล์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ จะได้ว่าอัตราการไหลที่ป้อนให้แต่ละเซลล์เท่ากับ

$$\begin{aligned} Q_{cell} &= \frac{Q_m}{10} \\ Q_{cell,air} &= \frac{1.165}{10} \text{ L / min} \\ &= 0.165 \text{ L / min} \end{aligned}$$

และสมมติให้อัตราการไหลเฉลี่ยต่าง ๆ กันทุกช่องการไหล

$$\begin{aligned} Q_{channel} &= \frac{Q_{cell}}{13} \\ Q_{channel} &= \frac{0.165}{13} \text{ L / min} \\ &= 0.0127 \text{ L / min} \\ &= 2.115 \times 10^{-7} \text{ m}^3 / \text{s} \end{aligned}$$

จาก

$$Q = AV$$

ดังนั้น

$$V_{channel} = \frac{2.115 \times 10^{-7} m^3 / s}{2 \times 10^{-6} m^2}$$

$$V_{channel} = 0.10575 m / s$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าเรโนลด์ที่นับเบอร์ของการไหลในช่องการไหลได้ดังนี้

$$Re_d = \frac{\rho V D_H}{\mu} \quad (3.7)$$

เมื่อค่าความหนาแน่นของอากาศคือ $\rho = 1.2 kg / m^3$ และค่าความหนืดของอากาศคือ

$\mu = 1.8 \times 10^{-5} m^2 / s$ [28] และเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของช่องการไหลเท่ากับ 1.33 มม.

ดังนั้น

$$Re_d = \frac{1.2 \times 0.10575 \times 1.33 \times 10^{-3}}{1.8 \times 10^{-5}}$$

$$Re_d = 9.3765$$

ดังนั้นการไหลในช่องการไหลจึงอยู่ในช่วงของการไหลแบบราบเรียบ ทั้งนี้หากพิจารณาการไหลในช่องการไหลเหมือนกับการไหลภายในท่อ โดยที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรคือ

$$Q = \int_A \vec{V} \cdot d\vec{A} = \int_0^R u 2\pi r dr = \int_0^R \frac{1}{4\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) (r^2 - R^2) 2\pi r dr$$

$$Q = -\frac{\pi R^4}{8\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (3.8)$$

สำหรับการไหลที่เป็น fully developed flow นั้น pressure gradient จะคงที่ ดังนั้น

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{(p_2 - p_1)}{L} = -\frac{\Delta P}{L} \quad (3.9)$$

แทนสมการที่ (3.9) ลงในสมการที่ (3.8) จะได้

$$Q = -\frac{\pi R^4}{8\mu} \left[\frac{-\Delta p}{L} \right] = \frac{\pi \Delta p R^4}{8\mu L}$$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อแนวราบ จึงสามารถเขียนสมการการไหลได้ใหม่ดังนี้[28]

$$\Delta p = \frac{8\mu L Q}{\pi R^4} \quad (3.10)$$

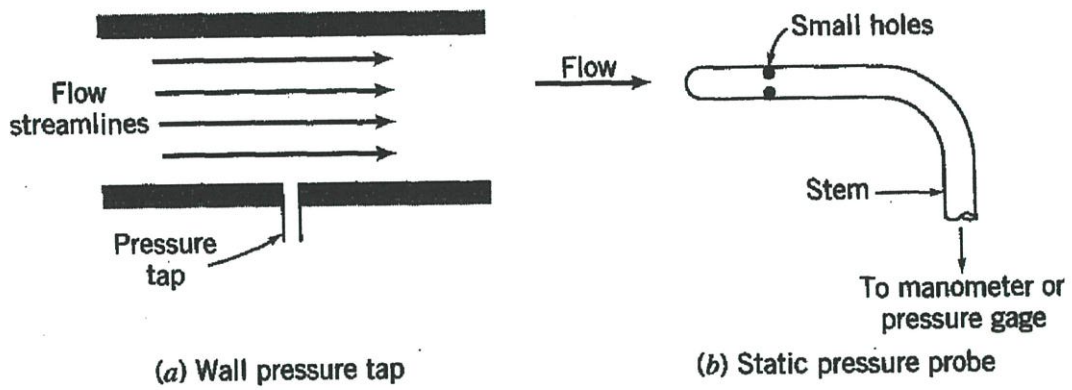
เมื่อค่า L หรือความยาวของช่องการไหลและ R คือรัศมีของหน้าตัดของช่องการไหลซึ่งมีค่าคงที่ตลอดการทดลอง และเนื่องจากทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องดังนั้นคุณสมบัติของแก๊สจึงคงที่ตลอดการทดลอง สามารถเขียนสมการที่ (3.8) ได้ใหม่ดังนี้

$$\Delta p = KQ \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.9) จะเห็นได้ว่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อแก๊สไหลผ่านช่องการไหลนั้นแปรผันตรงกับอัตราการไหลของแก๊ส ดังนั้นจึงสามารถวัดความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลแทนการวัดอัตราการไหลได้ เพราะการวัดค่าความดันสูญเสียนั้นสามารถวัดได้โดยไม่กระทบต่อการไหลของระบบ

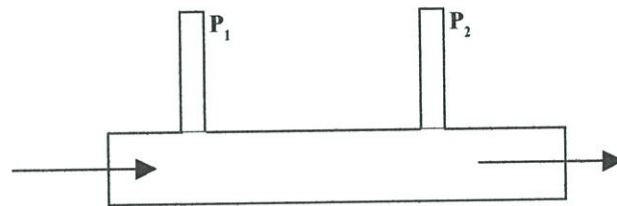
3.3.2 แนวคิดในการวัดค่าตัวแปรและการดัดแปลงองค์ประกอบของเซลล์

เทอมความดันในสมการ Bernoulli นั้นเป็นความดันทางเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งโดยปกติจะเรียกว่าความดันสถิตย์ (Static Pressure) สำหรับการไหลของอนุภาคของไหลนั้นจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันที่ตั้งฉากกับเส้น streamline ที่เป็นเส้นตรง ทำให้สามารถวัดความดันสถิตย์ของการไหลได้โดยใช้ a wall pressure "tap" ที่อยู่ในบริเวณที่ flow streamline เป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 3.11 (a) wall pressure tap ต้องเป็นรูขนาดเล็กเจาะในผนังโดยแกนของรูตั้งฉากกับพื้นผิวที่เรียบ การวัดความดันสถิตย์ให้ได้ค่าที่ถูกต้องนั้นทำได้โดยต่อ tap ไปยังเครื่องมือวัดความดันที่เหมาะสม ในลำการไหลที่ไกลจากผนังหรือบริเวณที่ streamline เป็นเส้นโค้งนั้นต้องเพิ่มความระมัดระวังในการวัดค่าความดันสถิตย์ ซึ่งค่าที่ถูกต้องวัดได้โดยการใช้ static probe ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (b) โดยต้องวางหัวและก้านของ probe ในตำแหน่งที่ถูกต้องเพื่อหลีกเลี่ยงผลที่คลาดเคลื่อน [29]

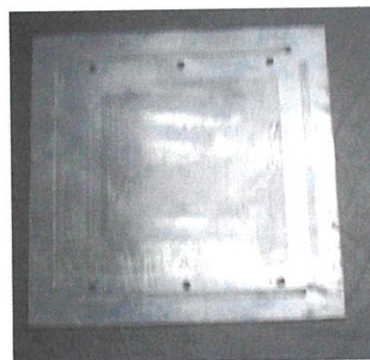
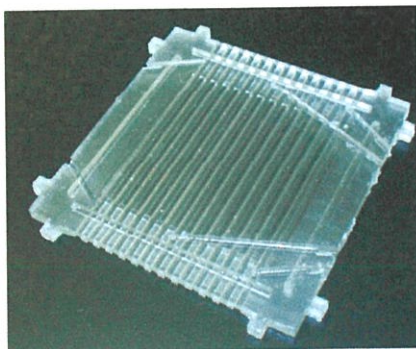


รูปที่ 3.11 การวัดความดันสถิตย

จากแนวคิดในการวัดค่าความดันสถิตย (Static Pressure) เห็นได้ว่าหากดัดแปลงส่วนประกอบของเซลล์ให้เหมาะสมก็สามารถวัดค่าความดันสถิตยที่ทางเข้าและทางออกของช่องการไหล เพื่อนำมาคำนวณหาความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลได้โดยไม่รบกวนการไหลของระบบได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และ 3.13



รูปที่ 3.12 แนวคิดการวัดค่าความดันสถิตย



รูปที่ 3.13 ส่วนประกอบของเซลล์ที่ดัดแปลงเพื่อการวัด

3.4 เครื่องมือวัดและเทคนิคการวัด

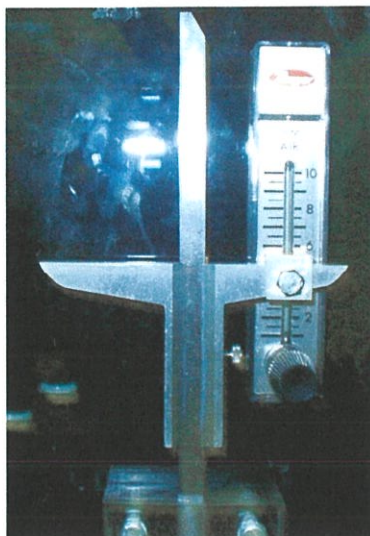
เครื่องมือวัดที่สำคัญในการทดลองได้แก่ มานอมิเตอร์สำหรับวัดความดัน และโรตاميเตอร์สำหรับปรับอัตราการไหลที่ป้อนให้แก่ชั้นวางเซลล์

3.4.1 การวัดความดัน จากการคำนวณความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อแก๊สไหลผ่านช่องการไหลโดยสมมติให้เกิดการกระจายการไหลอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชั้นวางเซลล์ พบว่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงเลือกใช้ไมโคร-มานอมิเตอร์ สำหรับใช้ในการทดลองนี้ซึ่งมีความละเอียดมากกว่ามานอมิเตอร์แบบธรรมดา อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดลองพบว่า เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลเพื่อศึกษาค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นพบว่า ความดันสูญเสียที่อ่านค่าได้แตกต่างกันน้อยมาก และไม่สามารถสรุปได้ว่าค่าที่อ่านได้แตกต่างกันนั้นเกิดจากอัตราการไหลที่เปลี่ยนไปหรือเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง ดังนั้นจึงทำการปรับอัตราการไหลที่ป้อนให้แก่ชั้นวางเซลล์ให้มากกว่าค่าที่ใช้งานจริงเพื่อทำให้เกิดความดันสูญเสียที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามอัตราการไหลที่ปรับสูงขึ้นนั้นก็ควรมีความมากจนเกินไป เนื่องจากเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการซื้อแก๊สมาทำการทดลอง และอาจทำให้การไหลในช่องการไหลไม่อยู่ในช่วงของการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งทำให้วิธีการวัดจากแนวคิดที่เสนอไปข้างต้นคลาดเคลื่อนไปได้

3.4.2 การปรับอัตราการไหล เนื่องจากการไหลที่เกิดขึ้นในช่องนำการไหลมีค่าต่ำทำให้เกิดความดันสูญเสียต่ำไปด้วย ดังนั้นในการทดลองหากปรับอัตราการไหลคลาดเคลื่อนไปเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลให้ความดันสูญเสียที่อ่านค่าได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าเมื่อลองทำการทดลองโดยป้อนแก๊สที่อัตราการไหลค่าหนึ่งให้แก่ชั้นวางเซลล์ จากนั้นจึงอ่านค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น แล้วปิดแก๊สจากนั้นป้อนแก๊สให้แก่ชั้นวางเซลล์ใหม่ที่อัตราการไหลเท่าเดิม พบว่าความดันสูญเสียที่อ่านได้นั้นมีค่าไม่เท่าเดิม ดังนั้นในการทำการทดลองแต่ละครั้งมีความจำเป็นต้องสามารถอ่านค่าอัตราการไหลที่ได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตามโรตاميเตอร์ที่ให้ความแม่นยำสูงนั้นราคาแพงมาก จึงได้ดัดแปลงใช้โรตاميเตอร์ที่ราคาไม่สูงมากนักให้สามารถกำหนดตำแหน่งการป้อนอัตราการไหลแต่ละครั้งได้แม่นยำ

โดยในการทดลองนั้นให้เปิดวาล์วของโรตاميเตอร์แบบเปิดเต็มที่ และปรับอัตราการไหลของแก๊สโดยใช้วาล์วแบบเข็ม (Needle valve) เนื่องจากสามารถปรับอัตราการไหลได้ละเอียดกว่าวาล์วแบบธรรมดา โดยอ่านค่าที่ปรับได้จากโรตاميเตอร์ อย่างไรก็ตามการอ่านค่าด้วยสายตานั้นถ้าวางระดับสายตาไม่ตรงกับตำแหน่งเดิมก็อาจทำให้ค่าที่อ่านได้คลาดเคลื่อน จึงได้สร้างชุดกำหนดตำแหน่งการอ่านประกอบเข้ากับโรตاميเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เพื่อให้วางระดับสายตาในตำแหน่งเดิมทุกครั้งก่อนอ่านค่าอัตราการไหลและใช้หลักการเดียวกันนี้กับการอ่านค่าความดันที่ไม่โครมานอมิเตอร์ โดยที่มานอมิเตอร์นั้นมีเลนส์ขยายติดอยู่หน้าระดับของของไหลในท่อของ

มานอมิเตอร์ สำหรับวิธีการกำหนดระดับสายตานั้นได้แก่ นำเอาเส้นผมที่มีขนาดเล็กติดในแนวระนาบไว้ที่หน้าและหลังเลนส์ ขณะอ่านค่าความดันให้ปรับระดับสายตาอยู่ในตำแหน่งที่มองเห็นผมด้านหน้า ด้านหลัง และระดับของของไหลอยู่ในระนาบเดียวกัน



รูปที่ 3.14 การดัดแปลงโรตานิเตอร์เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการอ่านค่าอัตราการไหล

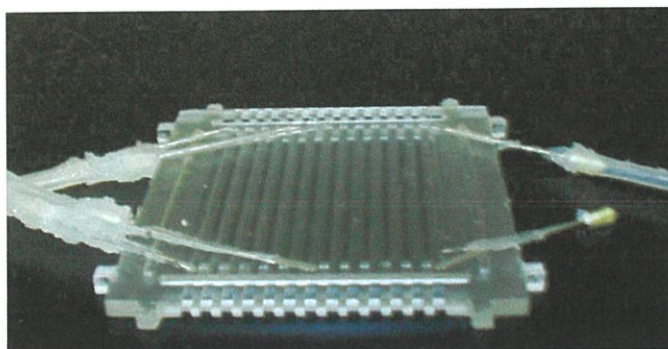
จากเทคนิคที่ได้กล่าวไปแล้วนั้นการทดลองต้องระมัดระวังในเรื่องความแม่นยำทั้งการวัดและการอ่านค่า เพราะความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยนั้นส่งผลกระทบต่อค่าที่วัดได้นั้นคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งนอกจากการวัดและการอ่านค่าแล้วสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการทดลองเกี่ยวกับระบบการไหลได้แก่ การรั่วของของไหล กล่าวคือต้องป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วขึ้นในระบบ โดยเฉพาะเมื่อของไหลเป็นแก๊สนั้นทำให้การป้องกันการรั่วนั้นทำได้ยากยิ่งขึ้น นอกจากนั้นแล้วการที่ชั้นวางเซลล์ที่ใช้ทำการทดลองนั้นประกอบด้วยหลายชิ้นส่วนด้วยกันทำให้ความยากในการป้องกันการรั่วเพิ่มมากขึ้น

สำหรับในการสร้างชุดทดลองนี้การป้องกันการรั่วเมื่อป้อนแก๊สให้แก่ชั้นวางเซลล์นั้นเป็นขั้นตอนที่ยากที่สุด ได้มีการพยายามลองผิดลองถูกนานพอสมควรจึงหาวิธีทำให้เกิดการรั่วที่เกิดขึ้นอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นในการประกอบชั้นวางเซลล์เพื่อวัดการกระจายการไหลในแต่ละครั้งนั้นต้องวัดอัตราการรั่วที่เกิดขึ้นว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้หรือไม่ และต้องจัดการให้การรั่วนั้นอยู่ในค่าที่ยอมรับจึงสามารถทำการทดลองได้ สำหรับวิธีป้องกันการรั่วนั้นจะกล่าวถึงในการประกอบชุดทดลอง

3.5 การประกอบชุดทดลอง

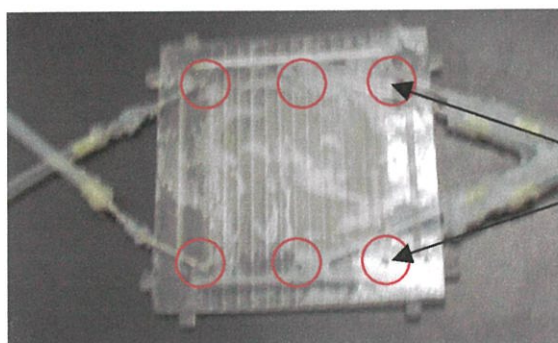
วางเซลล์ที่ใช้วัดความดันสูญเสียได้ตามลำดับเซลล์ที่ต้องการวัด ซึ่งจะเริ่มวัดที่เซลล์ลำดับที่ 1-3 ก่อน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. วางท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 มม. ที่จะใช้วัดความดันลงบนร่องของอินเตอร์คอนเนกเตอร์แล้วยึดท่อให้ติดกับอินเตอร์คอนเนกเตอร์โดยใช้กาวซิลิโคน จากนั้นเสียบท่อซิลิโคนใส่เข้ากับท่อและใช้กาวซิลิโคนทาตรงรอยต่อ แล้วหึงให้กาวแห้งดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 1

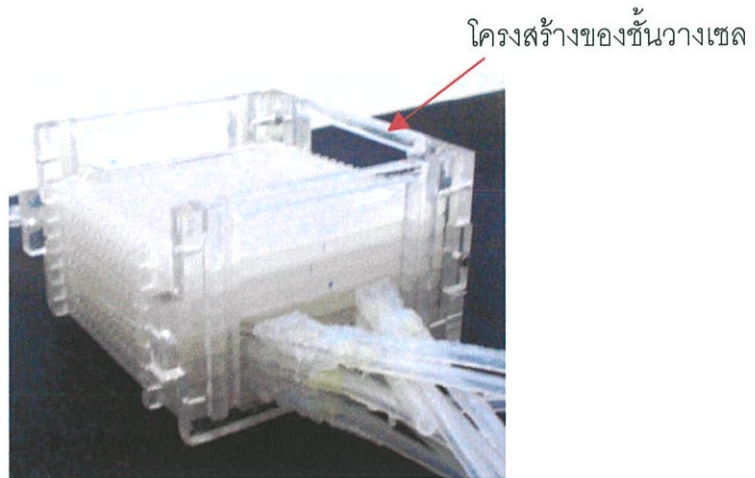
2. ทากาวซิลิโคนให้ทั่วพื้นที่ของอินเตอร์คอนเนกเตอร์แล้ววางซีลลงบนอินเตอร์คอนเนกเตอร์ที่ทากาวไว้ โดยให้รูของซีลตรงกับตำแหน่งของปลายร่องแต่ละร่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูที่ใช้วัดความดันสถิตยที่
ตำแหน่งช่องริมซ้าย ตรง
กลาง และริมขวาที่ทาง
เข้าและทางออก

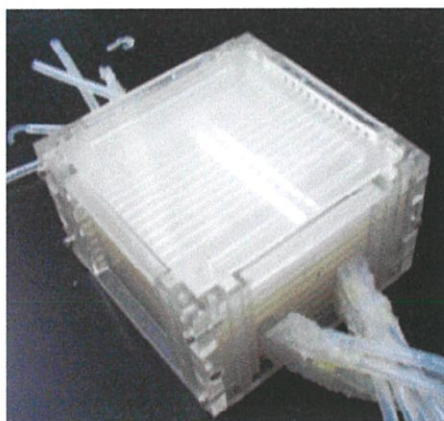
รูปที่ 3.16 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 2

3. วางเซลล์ตามลำดับที่ต้องการโดยต้องทากาวซิลิโคนระหว่างหน้าสัมผัสของแต่ละชั้นที่ประกอบขึ้นเป็นชั้นวางเซลล์ ซึ่งมีความขรุขระไม่เท่ากันเพื่อทำหน้าที่กันรั่ว วิธีประกอบคือนำซิลิโคนที่ใช้วัดความดันสูญเสียซึ่งเจาะรูตรงตำแหน่งที่ต้องการวัดวางบนอินเตอร์คอนเนกเตอร์ที่มีช่องการไหลที่ต้องการวัดความดันสูญเสีย แล้ววางอินเตอร์คอนเนกเตอร์ที่ใช้วัดความดันสูญเสียด้านที่มีร่องที่เสียบท่อไว้ลงบนซิลิโคน โดยให้ปลายร่องแต่ละร่องตรงกับรูของซิลิโคน ทำในลักษณะนี้จนครบ 3 เซลล์ที่ใช้วัดความดันสูญเสีย และชั้นเซลล์อื่น ๆ โดยให้ซิลิโคนระหว่างอินเตอร์คอนเนกเตอร์จนครบ 10 เซลล์ แล้วประกบด้วยโครงสร้างของชั้นวางเซลล์ทั้งสี่ด้านแล้วทากาวซิลิโคนที่หน้าสัมผัสทุกด้านเข้าชั้นวางเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.17



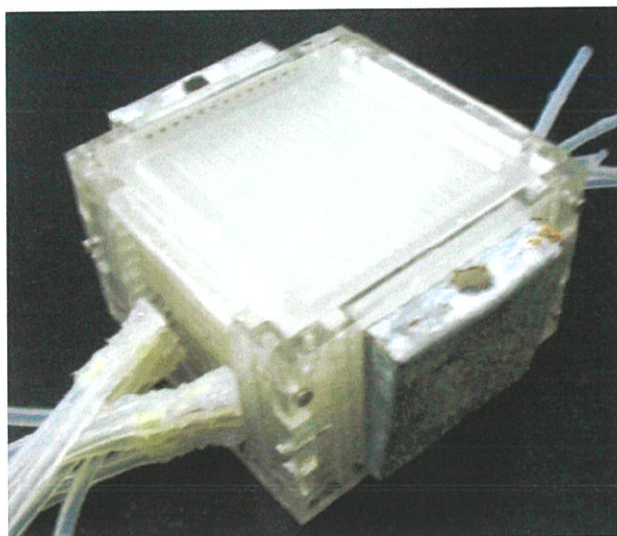
รูปที่ 3.17 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 3

4. ชั้นน็อตเข้ากับโครงสร้างชั้นวางเซลล์ให้แน่นดังแสดงในรูปที่ 3.18



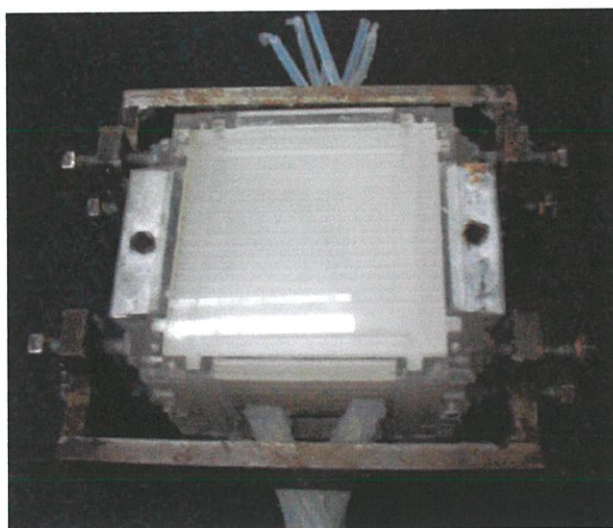
รูปที่ 3.18 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 4

5. ประกอบชุดกระจายการไหลเข้ากับโครงสร้างของชั้นวางเซลล์ทั้งสองด้านที่ต้องการนำแก๊สเข้าและออก หากการซีลโค่นบริเวณรอยต่อ ทิ้งไว้รอให้กาวแห้งประมาณ 3 ถึง 4 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.19



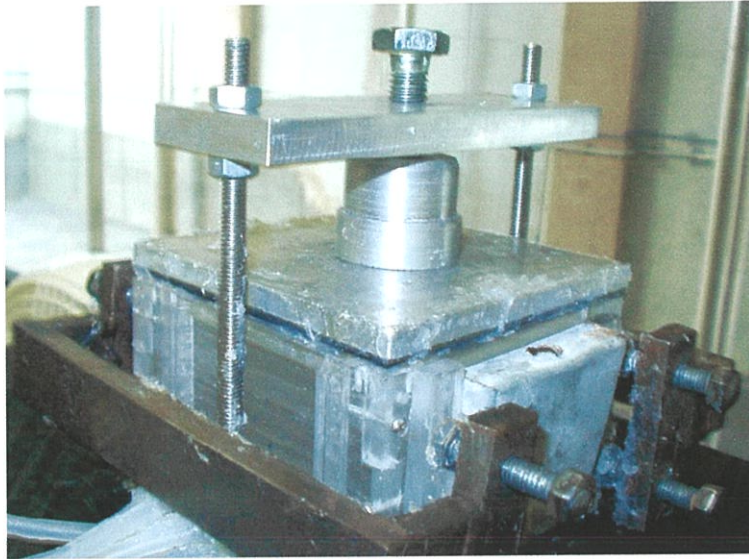
รูปที่ 3.19 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 5

6. ใช้ปากกาจับชิ้นงานบีบโครงสร้างของชั้นวางเซลล์ที่ยึดติดกับชุดกระจายการไหลทั้งสองด้านให้แน่นดังแสดงในรูปที่ 3.20 จากนั้นทิ้งไว้ประมาณหนึ่งถึงสองชั่วโมงเพื่อให้กาวแห้ง



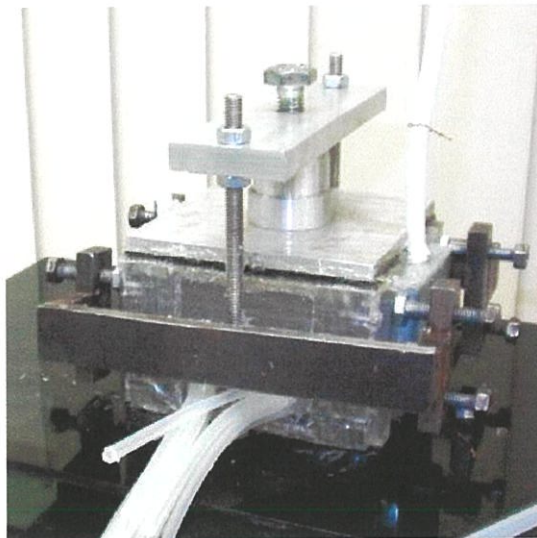
รูปที่ 3.20 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 6

7. นำชั้นวางเซลล์ที่ประกอบได้วางบนแท่นวาง และอัดชั้นวางเซลล์ในแนวตั้งด้วยชุดอัดอีกครั้ง เพื่อให้ไม่ให้เกิดการรั่วบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 7

8. เสียบท่อเข้ากับทางเข้าและทางออกของชั้นวางเซลล์ แล้วทากาวซิลิโคนตรงรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 3.22 จากนั้นทิ้งให้กาวแห้งโดยใช้เวลาประมาณ 7-8 ชั่วโมง



รูปที่ 3.22 การประกอบชุดทดลองตามข้อ 8 เป็นชั้นวางเซลล์ที่สมบูรณ์พร้อมสำหรับการทำการทดลอง

9. ตรวจสอบบริเวณรอยต่อของแต่ละชั้นส่วนของชั้นวางเซลล์อีกครั้งและทากาวบริเวณที่เป็นรอยต่อซ้ำอีกครั้งโดยเฉพาะบริเวณ ท่อที่ใช้วัดความดัน และทิ้งให้กาวแห้งโดยใช้เวลาประมาณ 7-8 ชั่วโมง

3.6 วิธีการทดลอง

ภายหลังจากประกอบชุดทดลองตามหัวข้อ 3.5 เรียบร้อยแล้ว นำชุดทดลองที่ได้ต่อเข้ากับอุปกรณ์ดังแผนผังที่แสดงในรูปที่ 3.23

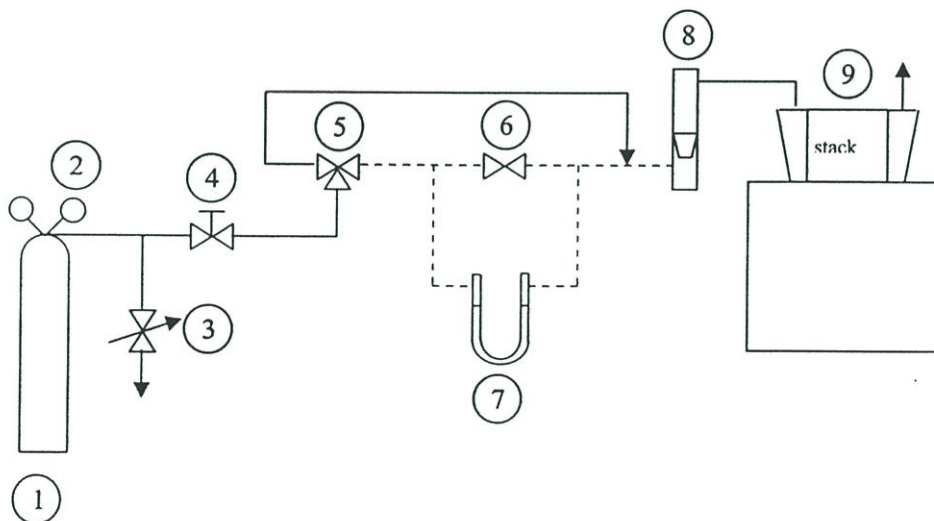
3.6.1 วิธีการตรวจสอบการรั่ว ก่อนทำการทดลองเก็บข้อมูลต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่าการรั่วอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. การตรวจสอบการรั่วให้อยู่ในปริมาณที่ยอมรับได้

1.1 เปิดวาล์วที่หัวถังไนโตรเจนและปรับความดันที่ Regulator ไปยังค่าที่ต่ำที่สุด

1.2 หมุนวาล์วหมายเลข 5 ที่ให้แก๊สไหลผ่านโรตاميเตอร์แล้วเข้าชั้นวางเซลล์ (เส้นทึบในแผนผัง)

1.3 ปรับอัตราการไหลที่เข้าชั้นวางเซลล์ที่วาล์วหมายเลข 4 โดยสังเกตให้อัตราการไหลที่โรตاميเตอร์ประมาณ 7 ลิตรต่อนาที



- | | | |
|---------------------------|----------------|--------------|
| ① N ₂ cylinder | ④ Needle valve | ⑦ Manometer |
| ② Pressure regulator | ⑤ 3-Way valve | ⑧ Rotameter |
| ③ Ball valve | ⑥ Ball valve | ⑨ Cell stack |

รูปที่ 3.23 แผนผังอุปกรณ์ต่างในการทดลอง

1.4 ตรวจสอบดูว่ามีแก๊สไหลที่ทางออกของชั้นวางเซลล์แล้วปิดทางออกของชั้นวางเซลล์

1.5 สังเกตดูว่าลูกกลอยของโรตاميเตอร์ลดลงมาที่ตำแหน่งศูนย์หรือไม่

1.5.1 ถ้าลูกกลอยของโรตاميเตอร์ยังลอยอยู่แสดงว่ามีการรั่วที่ชั้นวางเซลล์ ดังนั้นให้ใช้ snoop ตรวจสอบรอยรั่วแล้วหากวางตรงบริเวณที่พบว่ารั่ว แล้วรอให้แกว่งและทำซ้ำในข้อ 1.4 และ 1.5 อีกครั้ง

1.5.2 ถ้าลูกกลอยลดลงมาที่ตำแหน่งศูนย์ซึ่งแสดงว่าไม่มีการไหลนั้นแสดงว่าปริมาณการรั่วยอมรับได้ ให้ทำในข้อสองต่อไป

2. การวัดอัตราการรั่ว

2.1 เปิดวาล์วหมายเลข 4

2.2 หมุนวาล์วหมายเลข 5 ไปในตำแหน่งที่ให้แก๊สไหลผ่านท่อทางที่ใช้วัดอัตราการรั่ว (เส้นประในแผนผัง)

2.3 เปิดวาล์วหมายเลข 3 เพื่อจำลองสภาวะจริงซึ่งมีการไหลผ่านชั้นวางเซลล์

2.4 ปรับวาล์วหมายเลข 4 โดยให้อัตราการไหลซึ่งแสดงที่โรตاميเตอร์เท่ากับ 7 ลิตรต่อ นาที (ค่าสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง)

2.5 ปิดโรตاميเตอร์เพื่อป้องกันการไหลไว้ในท่อทางที่ใช้วัดอัตราการรั่ว

2.6 วัดระดับน้ำมันในมานอมิเตอร์ในสภาวะไม่มีการไหล

2.7 เปิดวาล์วหมายเลข 6 แล้วจับเวลาที่น้ำมันในมานอมิเตอร์ขึ้นไปยังระดับที่ตั้งไว้ ซึ่งจากระดับความสูงที่กำหนดไว้และขนาดท่อที่ใส่น้ำมันของมานอมิเตอร์ทำให้ทราบปริมาตร เมื่อหารด้วยเวลาที่จับได้จะทราบอัตราการรั่วเป็นปริมาตรต่อหน่วยเวลา และเก็บไว้เป็นปริมาณการรั่วของท่อทาง

2.8 ปิดทางออกของชั้นวางเซลล์ แล้วเปิดวาล์วหมายเลข 6 จับเวลาที่น้ำมันในมานอมิเตอร์ขึ้นไปยังระดับที่ตั้งไว้และคำนวณอัตราการรั่วซึ่งเป็นปริมาณการรั่วของระบบที่วัด

2.9 นำผลที่ได้ในข้อ 2.7 ลบด้วย 2.6 จะได้เป็นปริมาณการรั่วภายในชั้นวางเซลล์ Q_{leak}

2.10 เปิดวาล์วหมายเลข 3 แล้วหมุนวาล์วหมายเลข 5 ไปที่ตำแหน่งที่แก๊สไหลผ่านโรตاميเตอร์เข้าชั้นวางเซลล์ โดยไม่ผ่านท่อทางที่ใช้วัดอัตราการรั่ว แล้วอ่านอัตราการไหลเพื่อเก็บเป็นค่าอัตราการไหลที่ทางเข้าของชั้นวางเซลล์ Q_{in}

2.11 คำนวณหาเปอร์เซ็นต์อัตราการรั่วจาก

$$\% \text{leak rate} = \left[1 - \left(\frac{Q_{in} - Q_{leak}}{Q_{in}} \right) \right] \times 100\% \quad (3.12)$$

2.12 ทำการทดลองข้อสองซ้ำอีกสองครั้งแล้วเก็บข้อมูลทั้งหมดไว้

3.6.2 การวัดค่าความดันสูญเสียในช่องการไหล

1. เปิดหัวถังแก๊สและปรับ Pressure regulator ไปที่ค่าที่ต่ำที่สุด
2. ปิดวาล์วหมายเลข 3 และหมุนวาล์วหมายเลข 5 ให้การไหลไปตามเส้นทึบ นั่นคือไหลผ่านโรตاميเตอร์แล้วเข้าชั้นวางเซลล์
3. ปรับชุดกำหนดตำแหน่งอัตราการไหลไปยังค่า 5 ลิตรต่อนาที
4. ค่อย ๆ ปรับวาล์วหมายเลข 4 โดยสังเกตให้ลูกกลอยของโรตاميเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งที่กำหนดไว้ ทิ้งไว้ประมาณห้านาทีเพื่อให้ลูกกลอยนิ่ง
5. อ่านระดับความสูงของน้ำมันในมานอมิเตอร์แล้วเก็บค่าเป็น H_{ref}
6. นำท่อซิลิโคนที่ต่อจากเซลล์ลำดับที่หนึ่ง ตำแหน่งแรก (P_1) ทางด้านทางเข้าของแก๊ส มาเสียบเข้ากับมานอมิเตอร์ ซึ่งปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยสู่บรรยากาศ
7. ปิดท่อซิลิโคนตำแหน่งอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการวัด
8. ทิ้งไว้ประมาณยี่สิบวินาที แล้วอ่านระดับความสูงของน้ำมันที่เพิ่มขึ้น แล้วเก็บค่าเป็น H_{in}
9. ถอดท่อซิลิโคนอันเดิมออกแล้วปิดท่อไว้ นำท่อซิลิโคนของ P_1 ทางด้านทางออกของแก๊ส มาเสียบเข้ากับมานอมิเตอร์แทนแล้วทิ้งไว้ประมาณยี่สิบวินาที
10. อ่านระดับความสูงของน้ำมันในมานอมิเตอร์ที่เพิ่มขึ้น แล้วเก็บค่าเป็น H_{out}
11. คำนวณหาความดันสูญเสียภายในช่องการไหล จากการเอาค่าความแตกต่างระหว่าง H_{in} และ H_{out} คูณกับค่าความหนาแน่นของน้ำมันในมานอมิเตอร์ แล้วเก็บค่าเป็นความดันสูญเสียของช่องการไหล ตำแหน่งที่หนึ่งของเซลล์ลำดับที่หนึ่ง (ΔP_{11})
12. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 6 ถึงข้อ 11 จนได้ค่าความดันสูญเสียที่ทุกตำแหน่ง
13. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 3 ถึงข้อ 12 จนได้ค่าความดันสูญเสียที่ทุกตำแหน่งที่ค่าอัตราการไหลทั้ง 5 ค่า ได้แก่ 5, 5.5, 6, 6.5, และ 7 ลิตรต่อนาที
14. ทำการทดลองซ้ำใหม่ทั้งหมดตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 13 เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

บทที่ 4

การจำลองการไหล

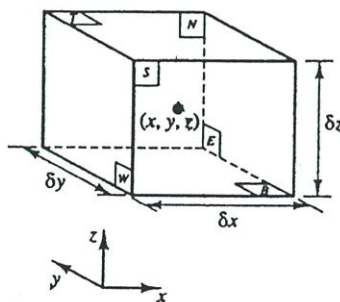
4.1 บทนำ

ถึงแม้ว่าสามารถทำการทดลองเพื่อวัดการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์ได้ก็ตาม แต่ในการทำการทดลองนั้นต้องใช้ต้นทุนในการสร้างชุดทดลองสูงพอสมควร นอกจากนั้นยังสูญเสียเวลาในการทดลองค่อนข้างมาก รวมทั้งไม่สามารถนำข้อมูลเก่ามาปรับปรุงได้ต้องทำการทดลองใหม่เมื่อมีการปรับปรุงรูปร่างและขนาดที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองจึงเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้แก้ปัญหาดังกล่าว Computational Fluid Dynamic, CFD เป็นกระบวนการวิธีที่พัฒนาจากแนวคิดเกี่ยวกับวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ปัญหาในทางวิศวกรรมที่ได้รับความนิยม ในปัจจุบันได้มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทาง CFD หลายโปรแกรมให้เลือกใช้เพื่อความสะดวกในการทำงานมากขึ้น อย่างไรก็ตามต้องอาศัยความเข้าใจพื้นฐานของทฤษฎีที่ใช้มาพัฒนาโปรแกรมเหล่านี้ จึงจะสามารถใช้งานโปรแกรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดจนสามารถวิเคราะห์ผลได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นในบทที่ 4 จึงกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการไหล ตลอดจนรายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับแบบจำลองการไหล รวมทั้งเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนดให้กับแบบจำลอง

4.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.2.1 สมการพื้นฐานของการไหล [30]

กำหนดให้เอลิเมนต์ของของไหลมีขนาด δx , δy , δz ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ในรูปที่ 4.1 แต่ละผิวหน้าของเอลิเมนต์กำหนดชื่อดังนี้ N, S, E, W, T และ B ซึ่งหมายถึงผิวหน้าที่อยู่ด้านทิศเหนือทิศใต้ ทิศตะวันออก ทิศตะวันตก ด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 เอลิเมนต์ของของไหล [30]

โดยที่จุดศูนย์กลางของเอลิเมนต์อยู่ที่ตำแหน่ง (x, y, z) คุณสมบัติต่าง ๆ ของเอลิเมนต์เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลาดังนี้ $\rho(x, y, z, t), P(x, y, z, t), T(x, y, z, t)$ และ $u(x, y, z, t)$ ซึ่งแสดงถึงความหนาแน่น ความดัน อุณหภูมิและเวกเตอร์ของความเร็วของเอลิเมนต์ตามลำดับ เนื่องจากเอลิเมนต์ที่พิจารณานี้มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นคุณสมบัติที่ผิวหน้าของเอลิเมนต์จึงสามารถแสดงในรูปของสองเทอมแรกของ Taylor series ก็มีความถูกต้องเพียงพอ ยกตัวอย่างเช่น ความดันที่ผิวหน้า E และ W ซึ่งอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของเอลิเมนต์เท่ากับ $\frac{1}{2} \delta x$ ทั้งคู่ ซึ่งแสดงค่าของความดันที่ผิวหน้าทั้งสองได้ดังนี้

$$p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \quad \text{และ} \quad p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x$$

4.2.1.1 สมการอนุรักษ์มวล

ในลำดับแรกของการสร้างอนุพันธ์ของสมการอนุรักษ์มวลนั้นต้องทำการสมดุลมวลของเอลิเมนต์ของของไหลก่อนดังนี้

$$\text{อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในเอลิเมนต์ของไหล} = \text{อัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้ามาในเอลิเมนต์ของไหล} \quad (4.1)$$

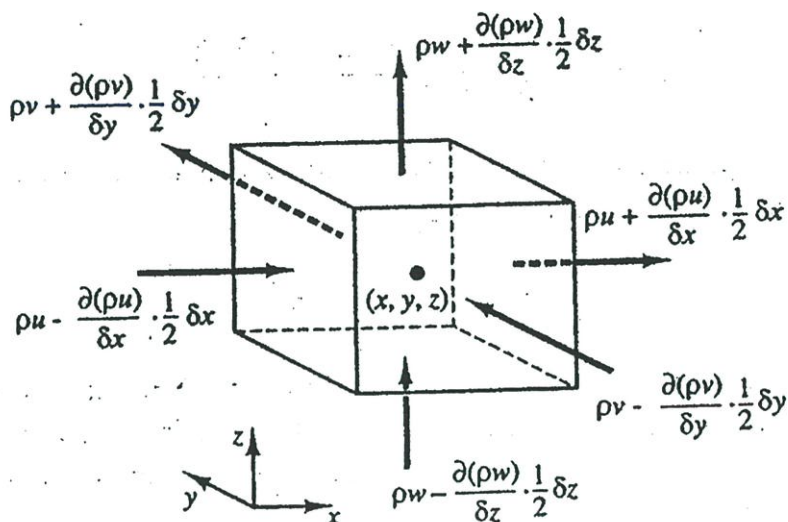
โดยที่อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในเอลิเมนต์คือ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (4.2)$$

สำหรับอัตราการไหลของมวลผ่านผิวหน้าของเอลิเมนต์แสดงในรูปของผลคูณของความหนาแน่น พื้นที่และองค์ประกอบของความเร็ว (Velocity component) ที่ตั้งฉากกับผิวนั้น จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลสุทธิของมวลที่ไหลเข้าเอลิเมนต์โดยผ่านพื้นผิวคือ

$$\begin{aligned} & \left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\ & - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \end{aligned} \quad (4.3)$$

การไหลที่มีทิศทางการไหลเข้าสู่เอลิเมนต์ทำให้มวลของเอลิเมนต์เพิ่มขึ้นแสดงในเครื่องหมายบวก ส่วนการไหลที่มีทิศทางการไหลออกจากเอลิเมนต์แสดงในเครื่องหมายลบ



รูปที่ 4.2 การไหลเข้าและออกจากเอลิเมนต์ของของไหล [30]

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 4.1 จะได้ว่าสมการที่ 4.2 เท่ากับสมการที่ 4.3 และเมื่อจัดเรียงสมการใหม่พร้อมกับหารทั้งสองข้างของสมการด้วย $\delta x \delta y \delta z$ จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4.4)$$

สมการที่ 4.4 เป็นสมการอนุรักษ์มวลสามมิติแบบไม่คงตัว (unsteady, three-dimensional mass conservation) หรือ continuity equation สำหรับการไหลแบบอัดตัวได้ (compressible fluid) เทอมแรกของสมการด้านซ้ายมือคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น (มวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร) ต่อเวลา ส่วนเทอมที่เหลือของสมการด้านซ้ายมือนั้นแสดงการไหลออกสุทธิของมวลผ่านผิวหน้าซึ่งเป็นขอบเขตของเอลิเมนต์ซึ่งรวมเรียกว่า คอนเวกทีฟเทอม (convective term)

สำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (incompressible fluid) นั้นความหนาแน่นคงที่ สมการที่ 4.4 จึงเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.5)$$

4.2.1.2 สมการโมเมนตัม

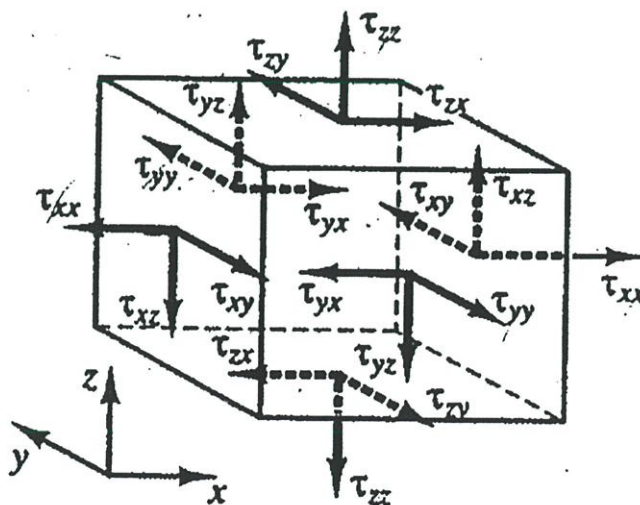
จากกฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมของอนุภาคของไหลเท่ากับผลบวกของแรงที่กระทำต่ออนุภาคนั้น ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในทิศทาง x, y, z ของอนุภาคของไหลแสดงโดย

$$\rho \frac{Du}{Dt}, \rho \frac{Dv}{Dt} \text{ และ } \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (4.6)$$

เราสามารถแบ่งแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหลออกได้เป็นสองประเภทด้วยกันกล่าวคือ

- แรงที่กระทำต่อพื้นผิวได้แก่ แรงเนื่องจากความดัน (pressure force) และแรงเนื่องจาก ความหนืด (viscous force)
- แรงที่กระทำต่อ body ได้แก่ แรงโน้มถ่วง แรงสู่ศูนย์กลาง (centrifugal force), Coriolis force, electromagnetic force

โดยปกติแล้วแรงที่กระทำต่อพื้นผิวจะแยกเป็นเทอมหนึ่งของสมการโมเมนตัม ส่วนแรงที่กระทำต่อ body นั้นเป็นอีกเทอมที่แสดงในรูปของ source term สำหรับความเค้นของเอลิเมนต์ของไหลถูกกำหนดในเทอมของความดันและความเค้นเฉือนแสดงในรูปที่ 4.3 ความดันซึ่งได้แก่ความเค้นฉาก (normal stress) ถูกแสดงโดย p ความเค้นเฉือนถูกแสดงโดย τ โดยปกติแล้วแสดงในรูปของ τ_{ij} โดยที่ j แสดงว่าองค์ประกอบของความเค้นกระทำในทิศทาง j ต่อพื้นผิวที่ตั้งฉากกับทิศทาง i



รูปที่ 4.3 องค์ประกอบของความเค้นบนพื้นผิวทั้งหกด้านของเอลิเมนต์ของไหล [30]

แรงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่กระทำต่อของไหลเนื่องจากความเค้นที่พื้นผิวทั้งหมดเท่ากับผลรวมของแรงสุทธิที่กระทำในทิศทาง x, y, z รวมกัน ซึ่งเท่ากับ

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (4.7)$$

ดังนั้นสมการโมเมนตัมในส่วนของ x, y, z หาได้จากการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม x ของอนุภาคของไหลเท่ากับแรงทั้งหมดในทิศทาง x ที่กระทำต่อเอลิเมนต์เนื่องจากความเค้นที่ผิวรวมกับอัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัม x เนื่องจาก source โดยแสดงดังต่อไปนี้

$$\text{x-component:} \quad \rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (4.8a)$$

$$\text{y-component:} \quad \rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (4.8b)$$

$$\text{z-component:} \quad \rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (4.8c)$$

4.2.1.3 สมการ Navier-Stokes สำหรับ Newtonian fluid

สำหรับ Newtonian fluid แล้วความเค้นเฉือนเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนรูป (rate of deformation) และในกฎของนิวตันที่เกี่ยวข้องกับความหนืดของการไหลแบบอัดตัวได้นั้นเกี่ยวข้องกับค่าคงที่สองตัว ได้แก่ ความหนืดจลน์, μ (dynamic viscosity) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของความเค้นกับการเปลี่ยนรูปแบบเชิงเส้น และ ความหนืดตัวที่สอง, λ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของความเค้นกับการเปลี่ยนรูปเชิงปริมาตร ประกอบด้วยเก้าองค์ประกอบของความเค้นเฉือนและหกตัวแปรอิสระ ได้แก่

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \text{div } \mathbf{u}, \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \text{div } \mathbf{u}, \quad \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \text{div } \mathbf{u}, \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (4.9)$$

นำค่าความเค้นเฉือนจากสมการ (4.9) แทนในสมการ (4.8a-c) จะได้สมการที่เรียกว่า Navier-Stokes equations:

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} = & -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (4.10a)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dv}{Dt} = & -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_{My} \end{aligned} \quad (4.10b)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dw}{Dt} = & -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} \right] + S_{Mz} \end{aligned} \quad (4.10c)$$

4.2.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

มีแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนหลายแบบที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหล สำหรับในงานวิจัยนี้นั้นแม้ว่าการไหลภายในช่องการไหลจะเป็นแบบราบเรียบก็ตามแต่การไหลภายในชุดกระจายการไหลนั้นเป็นทั้งแบบราบเรียบและปั่นป่วน ดังนั้นเพื่อให้ครอบคลุมถึงปัญหาที่สนใจทั้งหมดจึงเลือกใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k - \varepsilon$ model ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.2.1 สมการ Transport สำหรับ k และ ε [31, 32, 33]

การพิสูจน์สมการ Transport สำหรับ Turbulent kinetic energy, k นั้นมีหลายวิธี แต่วิธีที่ง่ายที่สุดคือ ประยุกต์การทำ time averaging กับ k ซึ่งเป็นผลรวมของการคูณกันระหว่างโมเมนต์มณฑณะใด ๆ (Instantaneous momentum) กับองค์ประกอบของความเร็วบนแกนที่พิจารณาอยู่จากนั้นกำจัดส่วนที่เป็น Mean turbulent kinetic energy (K) ออกไป จะทำให้เหลือ Fluctuating turbulent kinetic energy (k') แล้วอาศัยหลักการที่ว่าเทอมที่เกิดขึ้นใหม่

(Production terms) กับเทอมที่หายไป (Dissipation terms) จะต้องเท่ากัน และประการสำคัญคือ มีสมมติฐานที่การไหลเป็นแบบ Fully turbulent และละทิ้งผลกระทบของ Molecular viscosity

การประยุกต์การทำ Time averaging กับ k และ ε นั้นจะเกิดเทอมซึ่งไม่สามารถหาค่าได้หลายเทอม ซึ่งเทอมเหล่านี้จำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองขึ้นมาเพื่อให้เป็น Closure problem ผลลัพธ์การประยุกต์การทำ Time averaging กับ k และ ε เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4.12)$$

เมื่อ $k \equiv$ The turbulent kinetic energy

$\mu \equiv$ The dynamic viscosity ของของไหล

$\mu_t \equiv$ The turbulent viscosity หรือ The eddy-viscosity

$\sigma_k \equiv$ The turbulent Prandtl number สำหรับ k ซึ่งเท่ากับ 1.0

$G_k \equiv$ The generation ของ turbulent kinetic energy เนื่องจาก Mean velocity gradients

$G_b \equiv$ The generation ของ turbulent kinetic energy เนื่องจาก Buoyancy

$Y_M \equiv$ Overall dissipation rate (รวมไปถึง Compressible flow)

$S_k \equiv$ Source term ในสมการ k (ซึ่งจะมีหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะปัญหา)

$\varepsilon \equiv$ The turbulent kinetic energy dissipation rate

$\sigma_\varepsilon \equiv$ The turbulent Prandtl number สำหรับ ε ซึ่งเท่ากับ 1.3

$C_{1\varepsilon} \equiv$ ค่าคงที่ในสมการ ε ซึ่งเท่ากับ 1.44

$C_{2\varepsilon} \equiv$ ค่าคงที่ในสมการ ε ซึ่งเท่ากับ 1.92

$C_{3\varepsilon} \equiv$ ค่าคงที่ในสมการ ε

$S_\varepsilon \equiv$ Source term ในสมการ ε (ซึ่งจะมีหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะปัญหา)

4.2.2.2 รายละเอียดของเทอมต่าง ๆ ในสมการ Transport สำหรับ k และ ε

Launder และ Spalding ได้พัฒนาแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ ซึ่งได้อาศัย Turbulent velocity (V_t) กับ Length scale (l_t) ที่ Prandtl และ Kolmogorov ได้เสนอไว้

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) = \frac{1}{2}\overline{u'_i u'_i} \quad (4.13)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu l_t V_t$$

$$V_t = \sqrt{k} = \sqrt{\frac{\overline{u'_i u'_i}}{2}} \quad (4.14)$$

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (4.15)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \left(\frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \right) \left(k^{1/2} \right) \quad (4.16)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \quad (4.17)$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (4.18)$$

เมื่อใช้สมมติฐานของบอสสิเนสก์ (Boussinesq hypothesis) ดังสมการต่อไปนี้

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (4.19)$$

ดังนั้น

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (4.20)$$

ในกรณีที่ไม่มีการละทิ้ง Body force ต้องมีการสร้างแบบจำลองเทอม G_b ดังนี้

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4.21)$$

สำหรับแก๊สอุดมคติ (Ideal gas)

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (4.22)$$

แทนสมการ (4.22) ในสมการ (4.21) จะได้

$$G_b = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \left(g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right)$$

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (4.23)$$

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2 \quad (4.24)$$

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$$

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{\gamma RT}} \quad (4.25)$$

แทนสมการ (4.25) ในสมการ (4.24) จะได้

$$Y_M = 2\rho\varepsilon \frac{k}{\gamma RT} \quad (4.26)$$

$$C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right| \quad (4.27)$$

$$C_{3\varepsilon} = \begin{cases} 1 & \text{ถ้า buoyant shear layer หนานกับ } g_i \\ 0 & \text{ถ้า buoyant shear layer ตั้งฉากกับ } g_i \end{cases} \quad (4.28)$$

เมื่อ

$C_\mu \equiv$ ค่าคงที่ในสมการ (4.17) ซึ่งเท่ากับ 0.09

$S \equiv$ The modulus ของ the mean strain rate tensor

$g_i \equiv$ The gravitational component vector

$Pr_t \equiv$ The turbulent Prandtl number สำหรับพลังงาน (ซึ่งจะใช้ในสมการอนุรักษ์พลังงาน) และ $Pr_t = 0.85$

$\beta \equiv$ The thermal expansion coefficient

$M_t \equiv$ The turbulent Much number

$a \equiv$ ความเร็วเสียง

ความรู้พื้นฐานที่ได้กล่าวไปแล้วนั้นมีความจำเป็นที่ต้องเข้าใจ เพื่อใช้สำหรับพัฒนาแบบจำลองการไหลที่เกิดขึ้นในชั้นวางเซลล์ นอกจากนั้นแล้วยังช่วยในการวิเคราะห์ผลการจำลองด้วย

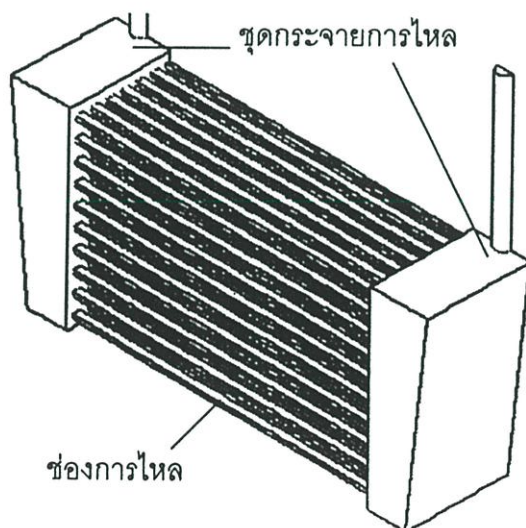
4.3 แบบจำลองการไหลภายในชั้นวางเซลล์

ในการพัฒนาแบบจำลองการไหลเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้นภายในชั้นวางเซลล์ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรมทาง CFD ที่ชื่อว่า STAR-CD[®] [34] ในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการไหลเพียงอย่างเดียว ดังนั้นโปรแกรมจึงแก้สมการเพียงสองสมการได้แก่ สมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม ถึงแม้ว่าได้ตรวจสอบแล้วว่าการไหลภายในช่องการไหลเป็นแบบราบเรียบก็ตาม แต่การไหลที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลอาจเป็นได้ทั้งแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนและในการพัฒนาแบบจำลองนี้ต้องการศึกษาการไหลของทั้งสองบริเวณ ดังนั้นเพื่อให้สามารถแก้ปัญหาได้ครอบคลุมจึงกำหนดให้การไหลที่พิจารณาเป็นแบบปั่นป่วน

ดังนั้นในการพัฒนาแบบจำลองการไหลที่เกิดขึ้นภายในชั้นวางเซลล์ของงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบจำลองการไหลแบบ standard $k - \epsilon$

4.3.1 ขอบเขตของปัญหา

บริเวณของการไหลที่พิจารณาเพื่อศึกษาผลกระทบของมุมเอียงของชุดกระจายการไหลที่มีต่อการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์นั้นได้แก่ บริเวณที่มีการไหลเกิดขึ้นซึ่งแบ่งได้เป็นสองบริเวณได้แก่ การไหลภายในชุดกระจายการไหล(ทางเข้าและทางออก) และการไหลในช่องการไหลภายในชั้นวางเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 บริเวณของการไหลที่ต้องการศึกษา

จากนั้นแบ่งปริมาตรควบคุมที่ต้องการศึกษาในรูปที่ 4.4 ออกเป็นปริมาตรเล็ก ๆ ซึ่งเรียกว่าเอลิเมนต์ของไหล สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับขอบเขตของปัญหาได้แสดงในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 รายละเอียดของบริเวณการไหลที่ทำการศึกษาคือเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง
5.65°

ชุดกระจายการไหล หมายเลข 1	ขนาด (มิลลิเมตร)	จำนวนเอลิเมนต์	จำนวนทั้งหมด ในชั้นวางเซลล์	จำนวนเอลิเมนต์ ทั้งหมด
ช่องการไหล	1x2x80	240	130	312000
ชุดกระจายการไหล	มุมเอียง 5.65°	144000	2	288000

ตาราง 4.2 รายละเอียดของบริเวณการไหลที่ทำการศึกษาคือเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง
3.10°

ชุดกระจายการไหล หมายเลข 2	ขนาด (มิลลิเมตร)	จำนวนเอลิเมนต์	จำนวนทั้งหมด ในชั้นวางเซลล์	จำนวนเอลิเมนต์ ทั้งหมด
ช่องการไหล	1x2x80	240	130	312000
ชุดกระจายการไหล	มุมเอียง 7.89°	216000	2	432000

สำหรับบริเวณการไหลที่ทำการศึกษาคือเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 1.13° และ 7.89° นั้น
เหมือนกับชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ซึ่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.2

4.3.2 การ Discretisation

ในการหาผลลัพธ์ของการไหลนั้น สมการอนุกรมมวลและโมเมนตัมในรูปของสมการดิฟเฟอ
เรนเชียลจะถูก Discretised ด้วยวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method) ได้แก่การอินทิ
เกรตสมการทั้งสองตลอดทั้งปริมาตรควบคุม (Control volume) เพื่อให้ได้สมการ Discretised
ของแต่ละเอลิเมนต์ภายในบริเวณที่ศึกษา [34] อย่างไรก็ตามวิธีการที่ให้ได้มาซึ่งสมการ
Discretised นั้นมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น the The central differencing scheme, The upwind
differencing scheme, หรือ Quadratic upwind differencing scheme เป็นต้น สำหรับใน
งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธี Upwind differencing , UD [30]

กำหนดให้ ϕ คือคุณสมบัติใด ๆ ของการไหล ซึ่งวิธี UD สามารถหาค่าต่าง ๆ ของการไหลได้
โดยพิจารณาทิศทางการไหลร่วมด้วย ในรูปที่ 4.5 แสดงค่าที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อการไหลมีทิศทาง
ไปทางบวกและในรูปที่ 4.6 แสดงการไหลในทิศทางลบ

เมื่อการไหลไปในทิศทางบวกจะได้ $u_w > 0, u_e > 0 (F_w > 0, F_e > 0)$ ซึ่งวิธี UD จะกำหนดให้

$$\phi_w = \phi_w \text{ และ } \phi_e = \phi_p \quad (4.29)$$

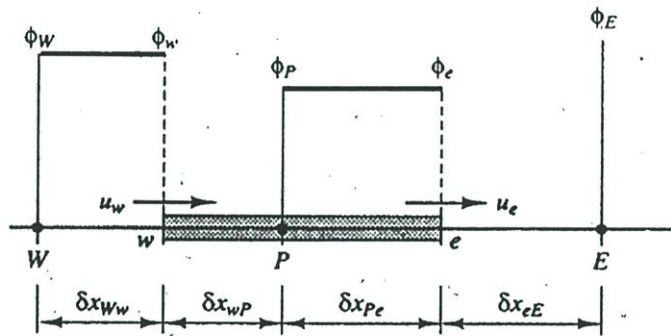
และจะได้สมการ Discretised ดังนี้

$$F_e \phi_P - F_w \phi_W = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W)$$

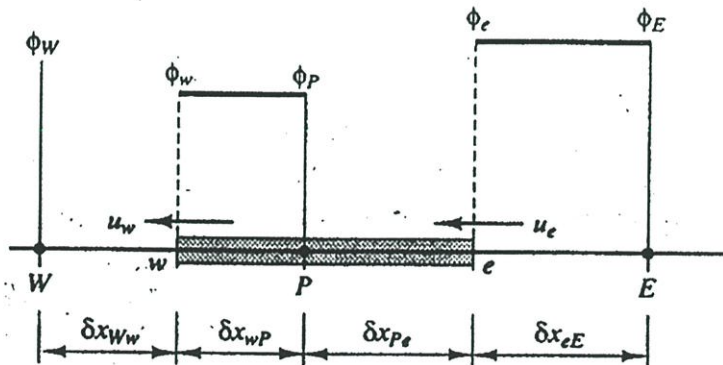
หรือจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$[(D_w + F_w) + D_e + (F_e - F_w)] \phi_P = (D_w + F_w) \phi_W + D_e \phi_E \quad (4.30)$$

เมื่อ $F = \rho u$ และ $D = \frac{\Gamma}{\delta x}$ โดยที่ Γ คือ Diffusion coefficient



รูปที่ 4.5 ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสมการ Discretised เมื่อการไหลไปในทิศทางบวก [30]



รูปที่ 4.6 ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสมการ Discretised เมื่อการไหลไปในทิศทางลบ [30]

และเมื่อการไหลไปในทิศทางตรงข้ามจะได้ $u_w < 0, u_e < 0 (F_w < 0, F_e < 0)$ ซึ่งวิธี UD จะกำหนดให้

$$\phi_w = \phi_p \text{ และ } \phi_e = \phi_E \quad (4.31)$$

หรือ

$$[D_w + (D_e - F_e) + (F_e - F_w)]\phi_p = D_w\phi_w + (D_e - F_e)\phi_E \quad (4.32)$$

สมการ (4.30) และ (4.32) สามารถเขียนในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$a_p\phi_p = a_w\phi_w + a_E\phi_E \quad (4.33)$$

เมื่อสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางคือ

$$a_p = a_w + a_E + (F_e - F_w)$$

และสัมประสิทธิ์ที่บริเวณใกล้เคียงคือ

	a_w	a_E
$F_w > 0, F_e > 0$	$D_w + F_w$	D_e
$F_w < 0, F_e < 0$	D_w	$D_e - F_e$

4.3.3 เงื่อนไขขอบเขต [34]

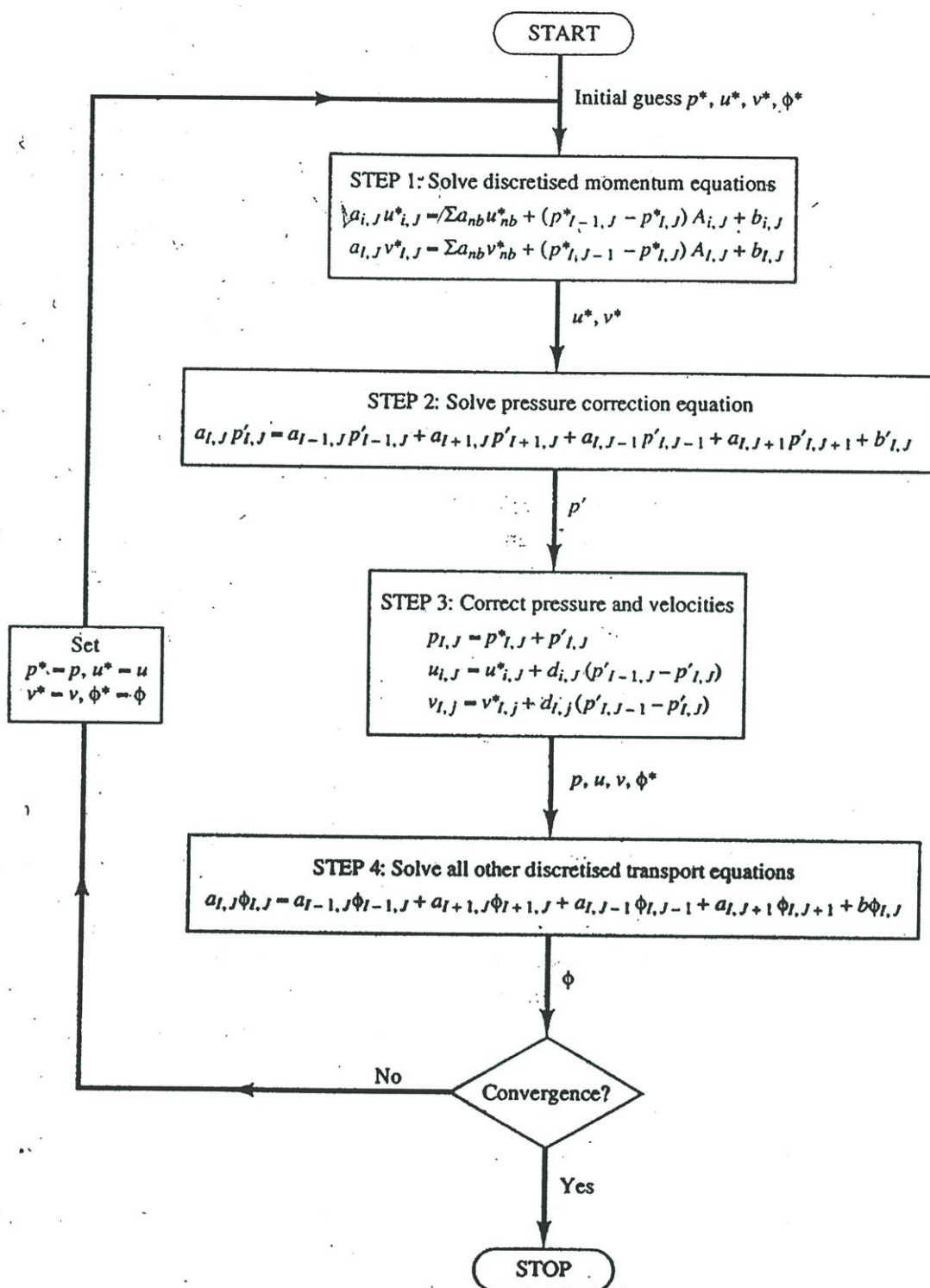
สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองศึกษาการไหลภายในชั้นวางเซลล์ของ
วิทยานิพนธ์นี้มีรายละเอียดดังนี้

- เงื่อนไขที่ทางเข้า กำหนดให้ Mass flux คงที่
- เงื่อนไขที่ทางออก กำหนดให้เป็น Zero gradient
- ขอบเขตที่เป็นแกนสมมาตร เนื่องจากระบบการไหลที่พิจารณานั้นสมมาตรในแนวแกน y (แสดงในรูปที่ 4.4) ดังนั้นจึงศึกษาการไหลเพียงครึ่งเดียวตามแนวแกนสมมาตร เพื่อลดขนาดของปัญหาและลดเวลาในการหาคำตอบของปัญหา โดยเงื่อนไขที่กำหนดสำหรับขอบเขตที่เป็นแกนสมมาตร คือ Velocity gradient ในทิศทางตั้งฉากกับแกนสมมาตรเท่ากับศูนย์
- เงื่อนไขของผนัง กำหนดให้ผนังทุกด้านราบเรียบ

4.3.4 กระบวนการหาคำตอบโดยวิธี SIMPLE Algorithm

SIMPLE algorithm เป็นวิธีการที่นำมาช่วยในการแก้ระบบสมการที่มีการเชื่อมกันระหว่างความดันและความเร็วในสมการอนุรักษ์โมเมนตัม โดยสร้างความสัมพันธ์กันของทั้งสองและจัดลำดับในการแก้ระบบสมการ [34] โดยมีขั้นตอนเริ่มจากการสมมติค่า p^* , u^* และ v^* แล้วแทนค่าในสมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการความต่อเนื่อง จากนั้นนำคำตอบที่ได้มาใช้ในการปรับค่าสมมติค่าใหม่ เพื่อป้อนให้กับขั้นตอนการแทนค่าในสมการทั้งสอง ทำเช่นนี้จนกว่าคำตอบจะลู่เข้า

สำหรับรายละเอียดขั้นตอนของกระบวนการหาคำตอบโดยวิธี SIMPLE algorithm แสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แผนผังของ SIMPLE algorithm [30]

บทที่ 5

ผลการทดลอง ผลการจำลองและการวิเคราะห์

5.1 บทนำ

ในบทนี้แสดงผลของการทดลองและการจำลองที่ได้กล่าวในบทที่ 3 และ 4 สำหรับผลการทดลองนั้นแสดงการกระจายการไหลในชั้นวางเซลล์ในรูปของค่าความดันสูญเสีย (Pressure drop) ที่วัดได้ในช่องการไหล 3 ตำแหน่ง (ริมซ้าย ตรงกลางและริมขวา) โดยที่รายละเอียดเกี่ยวกับการใช้ความดันสูญเสียเป็นตัวแปรแสดงการกระจายการไหลแสดงไว้ในบทที่ 3

ผลการทดลองแสดงความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหล 3 ช่องการไหลของแต่ละเซลล์ทั้งหมด 9 เซลล์ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเฉียง 5.65° และ 3.10° สำหรับผลการจำลองแสดงพฤติกรรมการไหลภายในชั้นวางเซลล์เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเฉียง 5.65° 3.10° 1.13° และ 7.89° โดยแสดงในรูปของสนามความดันและความเร็วที่จำลองได้

ในการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองนั้นมีการเปรียบเทียบใน 2 ลักษณะ ได้แก่ การเปรียบเทียบเชิงพฤติกรรม ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบปรากฏการณ์ที่สังเกตได้จากการทดลองนั้นได้ปรากฏลักษณะเดียวกันนั้นในผลการจำลองหรือไม่ อย่างไร และการเปรียบเทียบเชิงปริมาณ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าความดันที่วัดได้จากการทดลองว่าเท่ากับค่าที่ได้จากการจำลองหรือไม่ อย่างไร โดยมีวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องซึ่งกันและกันของวิธีการทั้งสอง เพื่อปรับปรุงวิธีการศึกษาการไหลทั้งสองวิธีให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

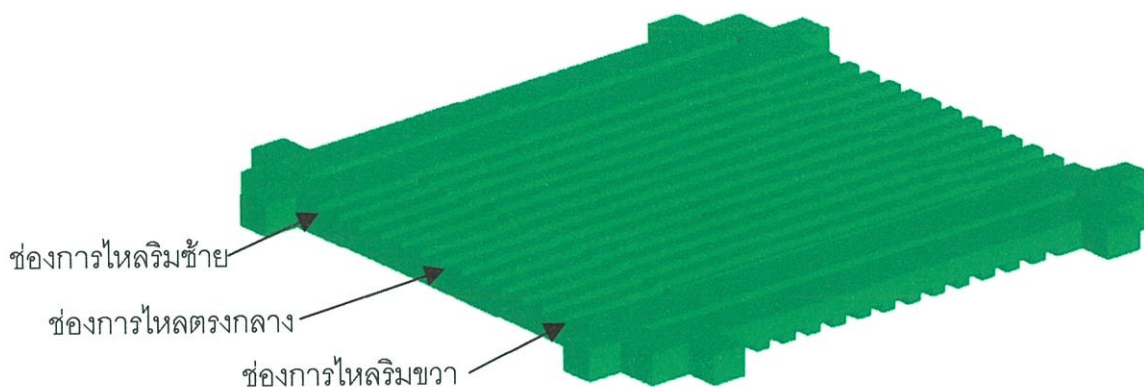
ในการวิเคราะห์ว่าการกระจายการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเฉียงขนาดต่าง ๆ ใดดีกว่ากันอย่างไรนั้น ใช้ค่า Distribution Factor (DF) ช่วยวิเคราะห์ โดย Robert J. Kee และคณะ [15] แสดงไว้ในบทความของเขาว่าการกระจายการไหลที่สม่ำเสมอสมควรคำนวณค่า $DF < 0.1$ โดยที่ DF คำนวณได้จากสมการ 5.1

$$\text{Distribution Factor, } DF_s = \frac{\max(\Delta P) - \min(\Delta P)}{\max(\Delta P)} \quad (5.1)$$

5.2 ผลการทดลอง

จากที่ได้กล่าวรายละเอียดในการออกแบบการทดลอง วิธีการทำการทดลอง โดยค่าที่วัดในการทดลองคือ ความดันสถิตย์เทียบกับความดันบรรยากาศที่ทางเข้าและทางออกของช่องการไหล 3

ตำแหน่งด้วยกัน ได้แก่ช่องการไหลด้านซ้ายสุด ช่องการไหลตรงกลาง และช่องการไหลขวาสุดของเซลล์ที่วัด แม้ว่าในชั้นวางเซลล์จะประกอบด้วยเซลล์ทั้งหมด 10 เซลล์ก็ตาม แต่ในการทดลองสามารถวัดความดันได้เพียง 9 เซลล์เท่านั้น เนื่องจากเทคนิคการวัดทำให้ไม่สามารถวัดเซลล์ที่ 10 ได้



รูปที่ 5.1 ตำแหน่งของช่องการไหลที่วัดความดันที่ทางเข้าและทางออก

ในการทำการทดลองที่อัตราการไหลที่ใช้งานจริงนั้นไม่สามารถอ่านค่าความดันที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองที่อัตราการไหลที่สูงกว่าค่าที่ใช้งานจริง จากการทดลองพบว่าที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อวินาทีนั้นเริ่มมองเห็นความแตกต่างของความดันชัดเจน อย่างไรก็ตามไม่เหมาะสมที่จะทำการทดลองที่อัตราการไหลสูงมาก ๆ แม้ว่าจะทำให้เห็นความดันที่เกิดขึ้นชัดเจนก็ตาม เนื่องจากการสิ้นเปลืองแก๊ส

สำหรับการทดลองนี้ได้ทำการวัดความดันที่เกิดขึ้นในชั้นวางเซลล์เมื่อป้อนแก๊สให้แก่ชั้นวางเซลล์ 5 ค่าด้วยกัน ได้แก่ 5, 5.5, 6, 6.5 และ 7 ลิตรต่อวินาที จากนั้นคำนวณหาความดันสูญเสียจากความแตกต่างระหว่างความดันสถิตที่ทางเข้าและออก

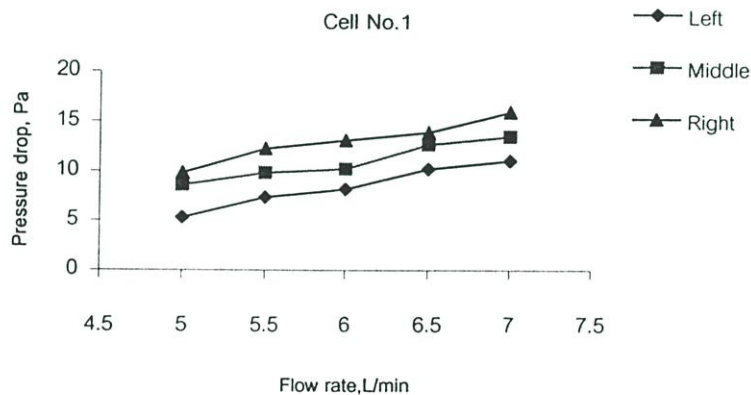
5.2.1 ผลการทดลองเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65°

การแสดงผลการทดลองแยกพิจารณาเป็นการกระจายของความดัน (หรือการกระจายการไหล) ในระดับเซลล์และระดับชั้นวางเซลล์ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการศึกษาลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นทั้งภายในแต่ละเซลล์และทั่วทั้งชั้นวางเซลล์

สำหรับผลการทดลองได้จากการวัดความดันสถิตยเทียบกับความดันบรรยากาศที่ทางเข้าและทางออกของช่องนำการไหลด้านริมซ้ายสุด ตรงกลางและริมขวาสุดดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยแสดงผลในรูปของความแตกต่างของความดันสถิตยของทางเข้าและทางออกของช่องนำการไหลหรือความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลในแต่ละเซลล์ที่อัตราการไหลต่าง ๆ จากผลการทดลองพบลักษณะการไหลที่น่าสนใจดังต่อไปนี้

1. ผลการวัดความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 1 จากรูปที่ 5.2 ซึ่งแสดงค่าความดันสูญเสียในช่องการไหลริมซ้าย (Left) ช่องการไหลตรงกลาง (Middle) และช่องการไหลริมขวา (Right) เมื่อป้อนแก๊สให้แก่ชั้นวางเซลล์ด้วยอัตราการไหล 5, 5.5, 6, 6.5, 7 ลิตรต่อนาที พบว่า

1.1 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 1 แปรผันตามอัตราการไหลเป็นเชิงเส้นในช่องการไหลทั้งสาม แสดงว่าการไหลของแก๊สในช่องการไหลทั้งสามเป็นแบบราบเรียบ



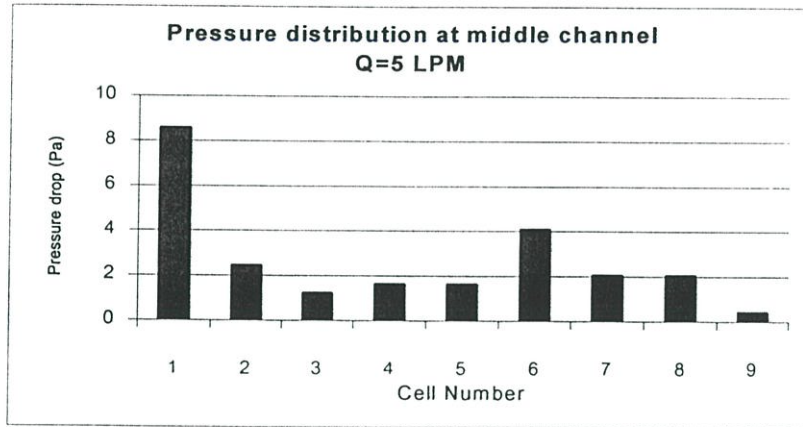
รูปที่ 5.2 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลของเซลล์ที่ 1

1.2 จากกราฟสังเกตได้ว่าแก๊สไหลเข้าช่องการไหลด้านริมขวามากที่สุด รองลงมาได้แก่ช่องการไหลตรงกลางและริมซ้าย ตามลำดับ สังเกตจากค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงว่าลักษณะการไหลในเซลล์ที่ 1 ไม่สมมาตรกัน

2. ผลการวัดความดันสูญเสียเมื่อพิจารณาในมุมมองของชั้นวางเซลล์ จากรูปที่ 5.3 แสดงความดันสูญเสียภายในช่องการไหลตรงกลาง เมื่อป้อนแก๊สด้วยอัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที พบว่า

2.1 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 1 มีค่ามากที่สุด

2.2 ในขณะที่การไหลในเซลล์อื่น ๆ เกิดความดันสูญเสียที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าแก๊สไหลเข้าเซลล์ที่ 1 มากที่สุดและไหลเข้าเซลล์อื่น ๆ ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5.3 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตรงกลางของชั้นวางเซลล์ที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อ นาที

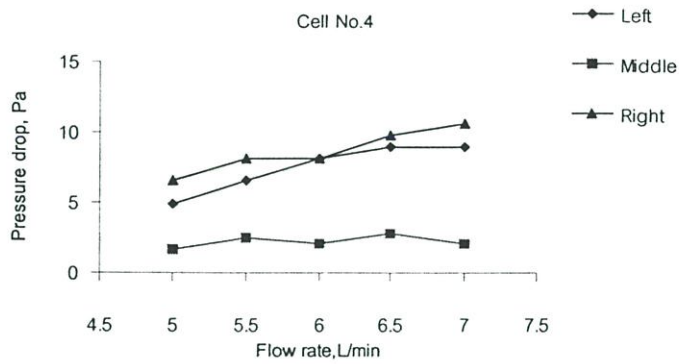
3. ผลการวัดความดันสูญเสียที่เกิดในเซลล์ที่ 4 ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.4, 5.5, 5.6 และ 5.7 แสดงปรากฏการณ์ดังนี้

3.1 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลด้านซ้ายและขวามีค่าใกล้เคียงกันและสูงกว่าที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตรงกลาง แสดงว่าในเซลล์ที่ 4 นั้นแก๊สไหลเข้าช่องริมซ้ายและขวาในปริมาณที่ใกล้เคียงกันโดยที่แก๊สไหลเข้าช่องตรงกลางในปริมาณที่น้อยกว่า

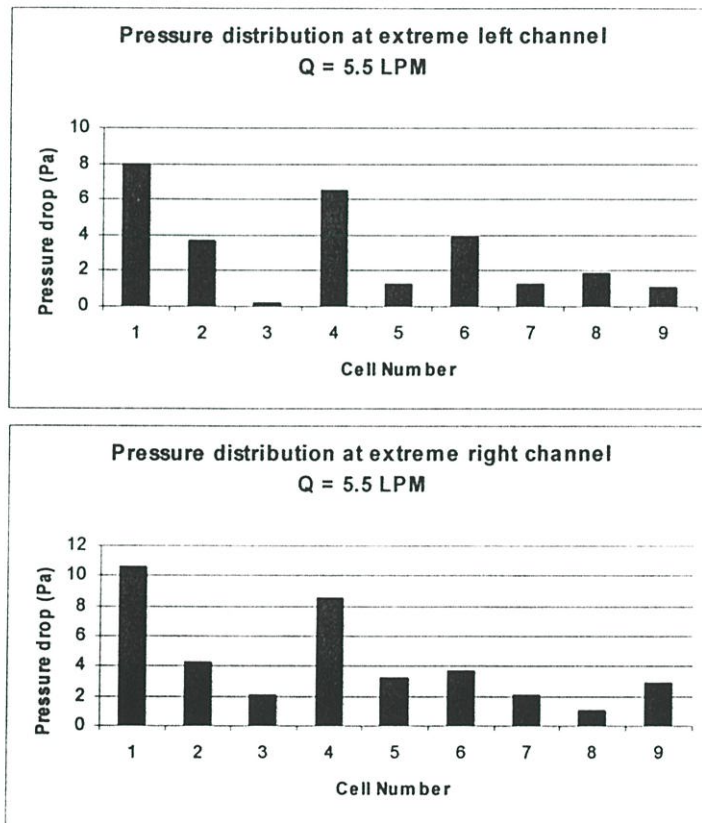
3.2 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อแก๊สไหลเข้าช่องริมซ้ายและขวานั้นแปรผันตามอัตราการไหลเป็นแบบเชิงเส้นแสดงว่าการไหลเป็นแบบราบเรียบ

3.3 เมื่อพิจารณาในมุมมองของชั้นวางเซลล์ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 4 ในช่องริมซ้ายและขวานั้นมีค่าสูงใกล้เคียงกับที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 1 โดยที่ปรากฏการณ์นี้ปรากฏที่อัตราการไหลอื่น ๆ ด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.6

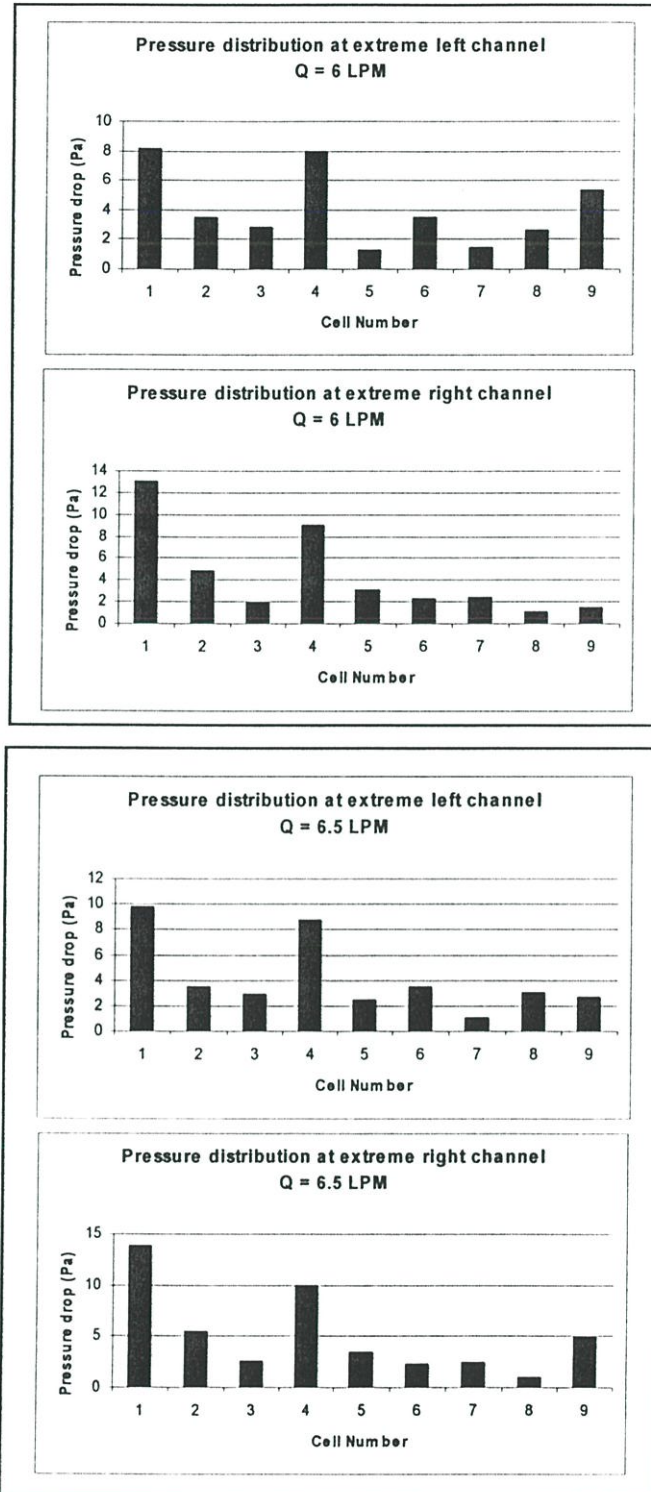
3.4 ในช่องการไหลตรงกลางไม่ปรากฏว่าแก๊สไหลเข้าในเซลล์ที่ 4 ในปริมาณที่ใกล้เคียงกับเซลล์ที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งลักษณะการไหลเหมือนกับที่เกิดขึ้นที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาทีซึ่งได้อธิบายไปก่อนหน้านี้



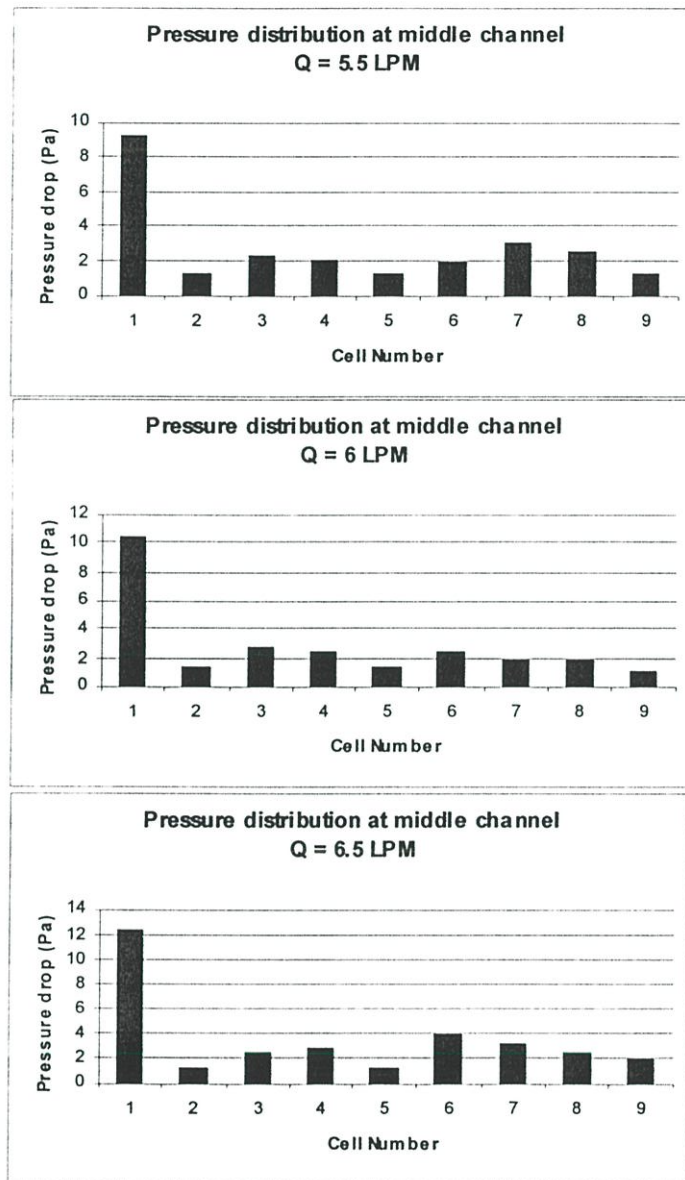
รูปที่ 5.4 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลของเซลล์ที่ 4



รูปที่ 5.5 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลริมซ้ายและขวาของทั้งชั้นวางเซลล์ที่อัตราการไหล 5.5 ลิตรต่อนาที

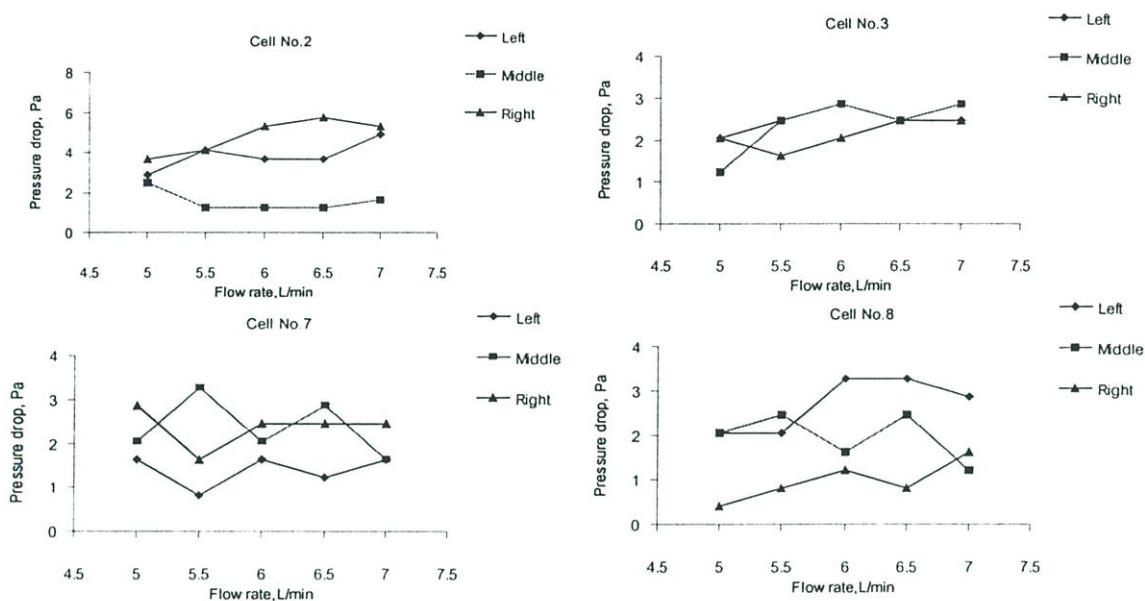


รูปที่ 5.6 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลริมซ้ายและขวาของทั้งชั้นวางเซลล์ที่อัตราการไหล 6, 6.5 ลิตรต่อวินาที



รูปที่ 5.7 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตรงกลางของทั้งชั้นวางเซลล์ที่อัตราการไหล 5.5, 6, 6.5 ลิตรต่อวินาที

4. การไหลในเซลล์อื่น ๆ แสดงในรูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าในเซลล์อื่น ๆ นั้นลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นนั้นไม่แน่นอนหรือมีแนวโน้มไม่ชัดเจน



รูปที่ 5.8 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 2, 3, 7, 8 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ

5.2.2 ผลการทดลองเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10

การแสดงผลการทดลองแยกพิจารณาเป็นการกระจายของความดัน (หรือการกระจายการไหล) ในระดับเซลล์และระดับชั้นวางเซลล์ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการศึกษาลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นทั้งภายในแต่ละเซลล์และทั่วทั้งชั้นวางเซลล์

1. ในเซลล์ที่ 1 พบว่า

1.1 การไหลที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 1 ไม่สมมาตร สังเกตจากแก๊สไหลเข้าช่องการไหลริมขวาและตรงกลางในปริมาณที่ใกล้เคียงกันและมากกว่าในช่องริมซ้ายแสดงโดยค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นสูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 5.9

1.2 ความดันสูญเสียในช่องการไหลของเซลล์ที่ 1 แปรผันตามอัตราการไหลเป็นเชิงเส้นแสดงว่าการไหลภายในช่องการไหลทั้งสามเป็นแบบราบเรียบ

2. เมื่อพิจารณาในมุมมองของชั้นวางเซลล์ พบว่า

2.1 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 1 มีค่ามากที่สุดสำหรับการไหลในช่องริมขวาและตรงกลางดังแสดงในรูปที่ 5.10

2.2 สำหรับการไหลในช่องริมซ้ายกลับพบว่าเกิดความดันสูญเสียในเซลล์ที่ 2 มากที่สุดและรองลงมาเป็นเซลล์ที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่าลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นนี้ต่างจาก

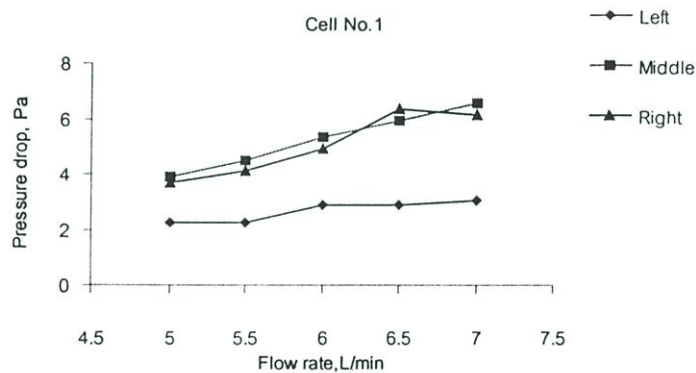
ลักษณะที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ซึ่งอาจจะได้รับผลกระทบจากมุมเอียงที่เปลี่ยนไปหรือการขึ้นรูปชุดกระจายการไหลที่ไม่สมมาตร

3. ในเซลล์ที่ 4 จากรูปที่ 5.11 พบว่า

3.1 ไม่ปรากฏลักษณะการไหลดังเช่นที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (ที่สังเกตพบว่าแก๊สไหลเข้าช่องการไหลริมซ้ายและขวามากกว่าช่องการไหลตรงกลางอย่างเห็นได้ชัด)

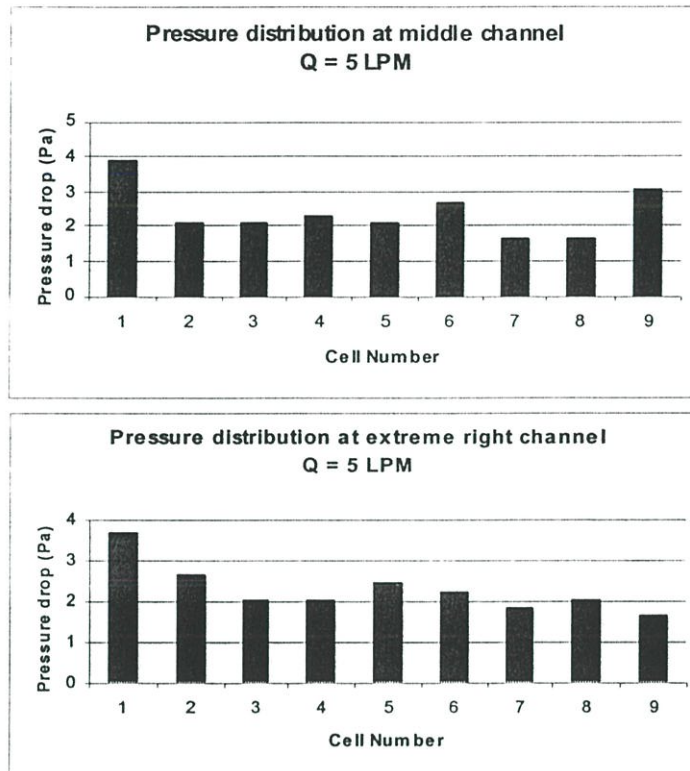
3.2 ปริมาณแก๊สที่ไหลเข้าแต่ละช่องการไหลนั้นใกล้เคียงกันสังเกตจากค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกัน

3.3 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลทั้งสามแปรผันตรงกับอัตราการไหลซึ่งแสดงว่าการไหลที่เซลล์ที่ 4 เป็นแบบราบเรียบ

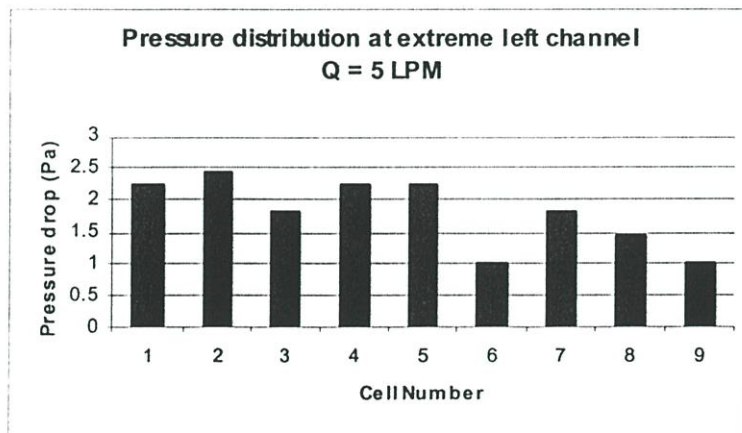


รูปที่ 5.9 ความดันสูญเสียเมื่อแก๊สไหลเข้าเซลล์ที่ 1 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ

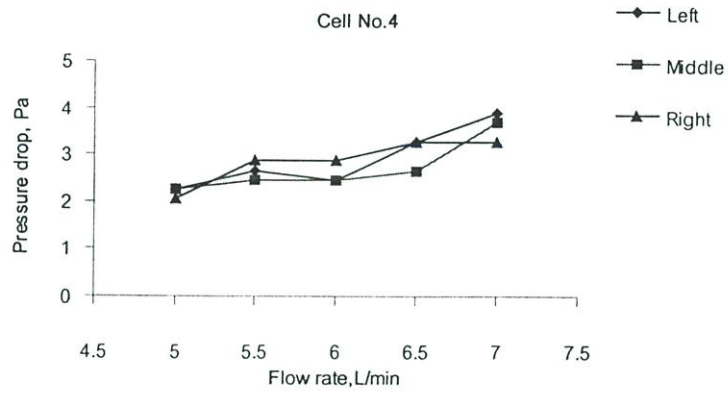
4. การไหลในเซลล์อื่น ๆ เมื่อพิจารณาในรูปที่ 5.10 และ 5.11 จะเห็นได้ว่าระดับความแตกต่างระหว่างความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละเซลล์ในชั้นวางเซลล์นั้นน้อยกว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° และในรูปที่ 5.13 แสดงความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์อื่น ๆ ที่อัตราการไหลต่าง ๆ พบว่าปรากฏการณ์ที่ความดันสูญเสียแปรผันตรงกับอัตราการไหลแบบเชิงเส้นแสดงให้เห็นค่อนข้างชัดเจนเกือบทุกเซลล์



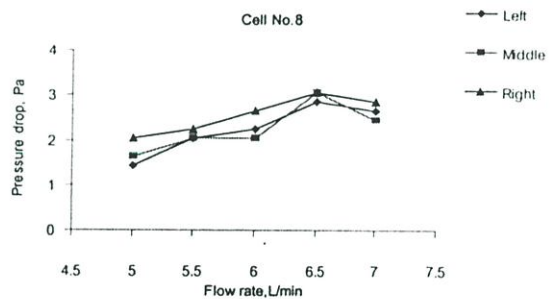
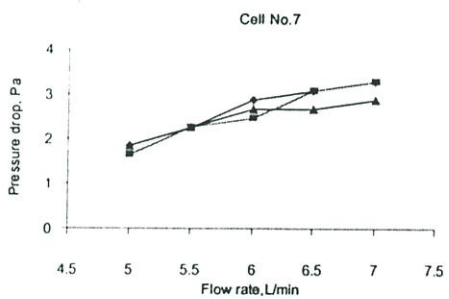
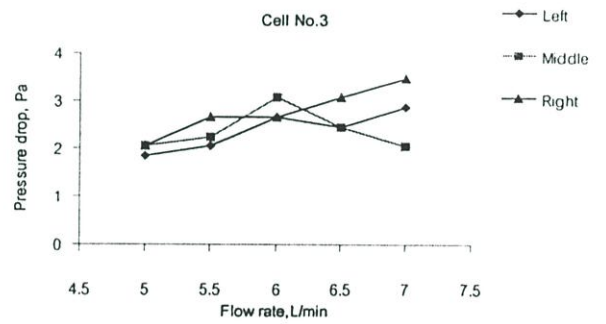
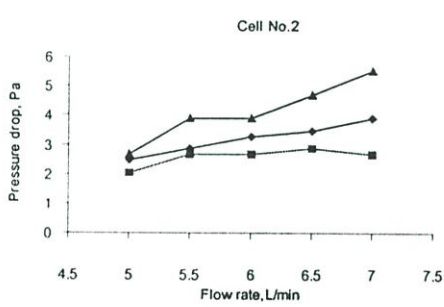
รูปที่ 5.10 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องริมขวาและตรงกลางของทั้งชั้นวางเซลล์ที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 5.11 ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องริมซ้ายของทั้งชั้นวางเซลล์ที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที



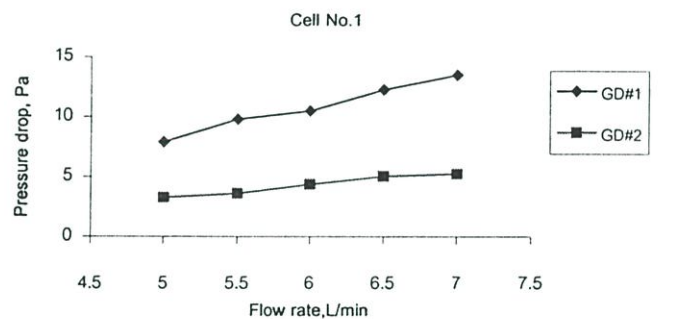
รูปที่ 5.12 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 4 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ



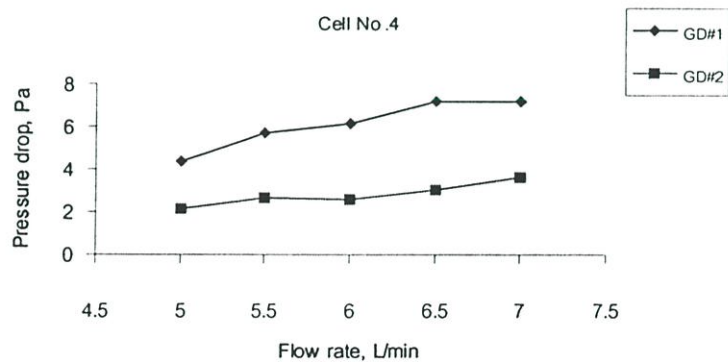
รูปที่ 5.13 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 2, 3, 7 และ 8 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ

5.2.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° และ 3.10° นำผลการทดลองในการวัดความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลของทั้งชั้นวางเซลล์เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียงทั้งสองมุมมาเปรียบเทียบเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของมุมเอียงที่มีต่อการกระจายการไหลที่เกิดขึ้นภายในชั้นวางเซลล์พบว่า

1. ในเซลล์ที่ 1 และ 4 นั้นเกิดความดันสูญเสียแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปลี่ยนชุดกระจายการไหลดังแสดงในรูปที่ 5.14 และ 5.15 โดยที่เกิดความดันสูญเสียในเซลล์ที่ 1 และ 4 มากกว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65°



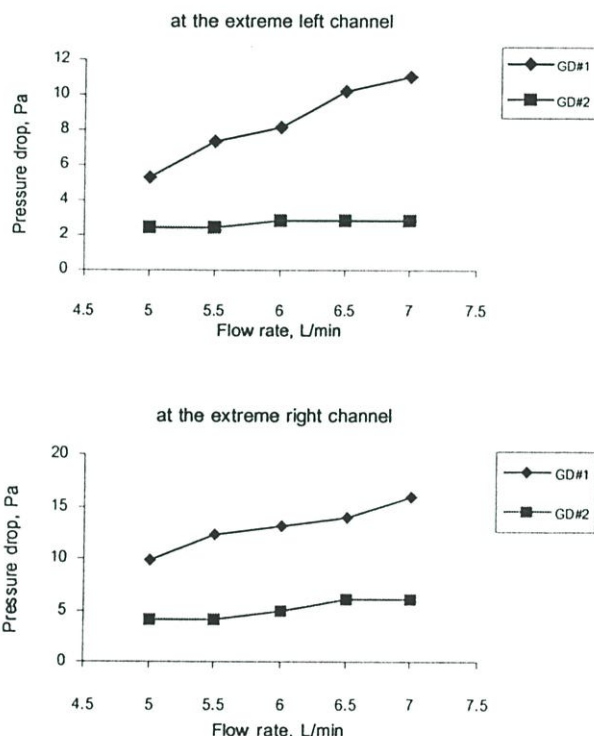
รูปที่ 5.14 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตรงกลางของเซลล์ที่ 1 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2)



รูปที่ 5.15 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตรงกลางของเซลล์ที่ 4 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2)

2. ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลริมซ้ายและขวาแสดงในรูปที่ 5.16 และ 5.17 จะเห็นได้ว่าเกิดลักษณะการไหลในทำนองเดียวกันได้แก่ ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° สูงกว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10°

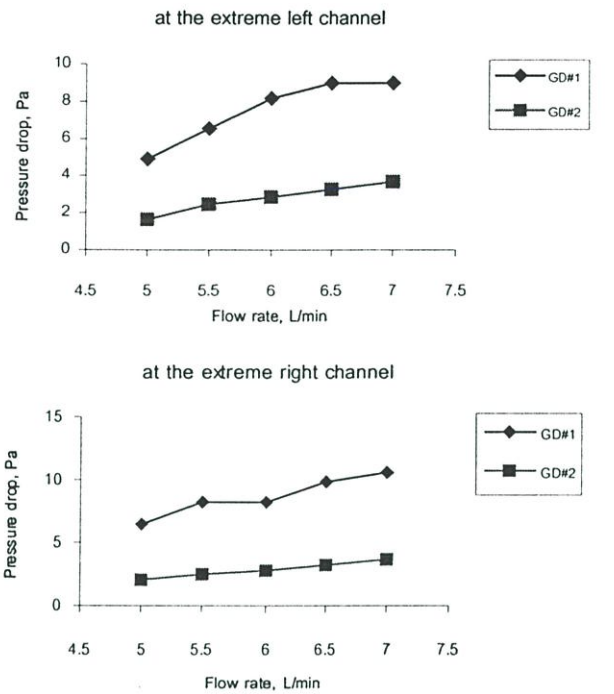
3. สำหรับความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์อื่น ๆ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° และ 3.10° แสดงในรูปที่ 5.18 ซึ่งจะเห็นว่าเกิดความดันสูญเสียที่อัตราการไหลต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน



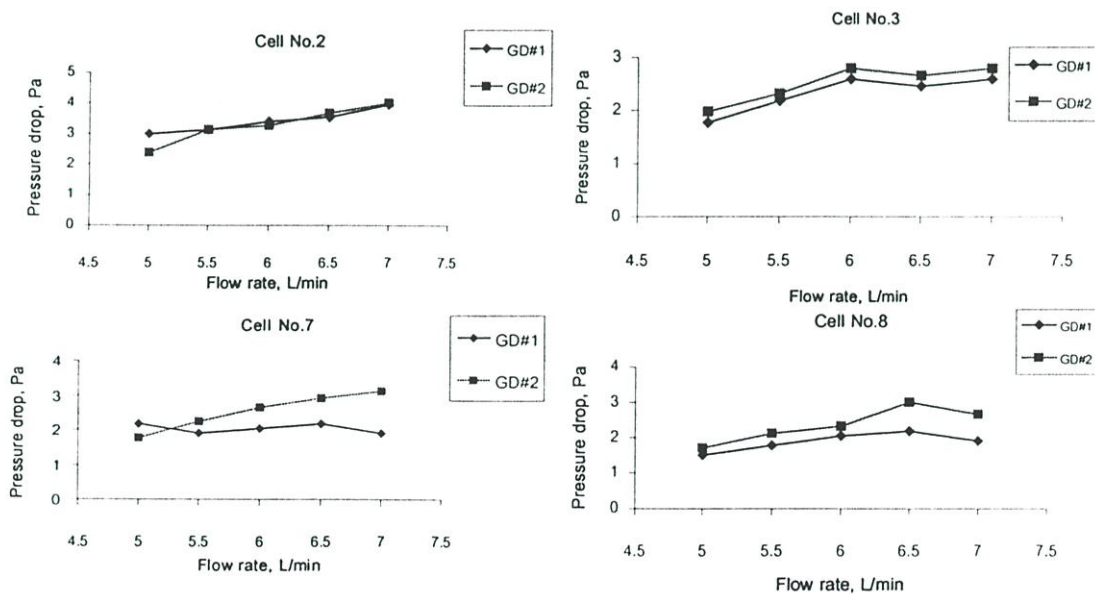
รูปที่ 5.16 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลริมซ้ายและขวาของเซลล์ที่ 1 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2)

จากที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 5.1 ถึงค่า DF นั้นสามารถนำผลการทดลองมาคำนวณหาค่า DF_c ของแต่ละชั้นเซลล์ซึ่งแสดงในตารางที่ 5.1 และ DF_s ของทั้งชั้นวางเซลล์แสดงในตารางที่ 5.2

สำหรับค่า DF_c ที่แสดงในตารางที่ 5.1 คำนวณจากค่าความดันสูญเสียที่วัดได้จากช่องการไหลริมซ้าย ตรงกลาง และริมขวา ส่วนในตารางที่ 5.2 คำนวณจากค่าความดันสูญเสียที่วัดได้จากแต่ละตำแหน่ง (ริมซ้าย ตรงกลาง และริมขวา) ของทั้ง 9 เซลล์



รูปที่ 5.17 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลริมซ้ายและขวาของเซลล์ที่ 4 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2)



รูปที่ 5.18 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตรงกลางของเซลล์ที่ 2, 3, 7 และ 8 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2)

ตารางที่ 5.1 ค่า DF_c ของชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2)

Cell No.	GD#1	GD#2
1	0.361146	0.496621
2	0.656117	0.342178
3	0.232381	0.337698
4	0.743205	0.167143
5	0.433333	0.106349
6	0.486465	0.587857
7	0.483333	0.053571
8	0.682619	0.098333
9	0.375714	0.543656

จากตารางที่ 5.1 แสดงค่าการกระจายการไหลในแต่ละเซลล์, DF_c เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2) พบว่าสำหรับชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65°

1. ค่า DF_c ที่มากที่สุดคือ 0.743205 ในเซลล์ที่ 4
2. ค่า DF_c ที่ต่ำที่สุดคือ 0.232381 ในเซลล์ที่ 3

แสดงว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° การกระจายการไหลที่ดีที่สุดเกิดขึ้นในเซลล์ที่ 3 เนื่องจากเกิดความแตกต่างระหว่างความดันสูญเสียสูงสุดและต่ำสุดน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่าความดันสูญเสียสูงสุด และในเซลล์ที่ 4 เกิดการกระจายการไหลที่ไม่ดีที่สุดเนื่องจากมีค่า DF_c มากที่สุด

เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° พบว่า

1. การกระจายการไหลในเซลล์ที่ 7 ดีที่สุดเนื่องจากค่า DF_c มีค่าน้อยที่สุดซึ่งเท่ากับ 0.053571
2. ในเซลล์ที่ 6 ซึ่งเกิดค่า DF_c สูงที่สุดซึ่งเท่ากับ 0.587857

ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ทำให้เกิดกระจายการไหลภายในเซลล์ที่ดีกว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° เนื่องจากค่า DF_c ที่น้อยที่สุดและมากที่สุดของชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° มีค่าน้อยกว่าของชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65°

ตารางที่ 5.2 ค่า DF_s ของชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD#1) และ 3.10° (GD#2)

Channel Position	GD#1	GD#2
Extreme left	0.855402	0.593254
Middle	0.90394	0.634888
Extreme right	0.927306	0.546667

เมื่อพิจารณาในมุมมองของชั้นวางเซลล์จากตารางที่ 5.2 ซึ่งแสดงค่ากระจายการไหลในชั้นวางเซลล์ (DF_s) พบว่า

1. สำหรับช่องการไหลทั้งสามตำแหน่งที่ทำการวัดการกระจายการไหลนั้นค่า DF_s ของชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° สูงกว่าของชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° แสดงว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° เกิดความแตกต่างระหว่างความดันสูญเสียสูงสุดและต่ำสุด เมื่อเทียบกับค่าความดันสูญเสียสูงสุดมากกว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10°

จากตารางที่ 5.1 และ 5.2 สรุปได้ว่าชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ทำให้แก๊สที่ไหลเข้าในชั้นวางเซลล์มีการกระจายที่สม่ำเสมอมากกว่าชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65°

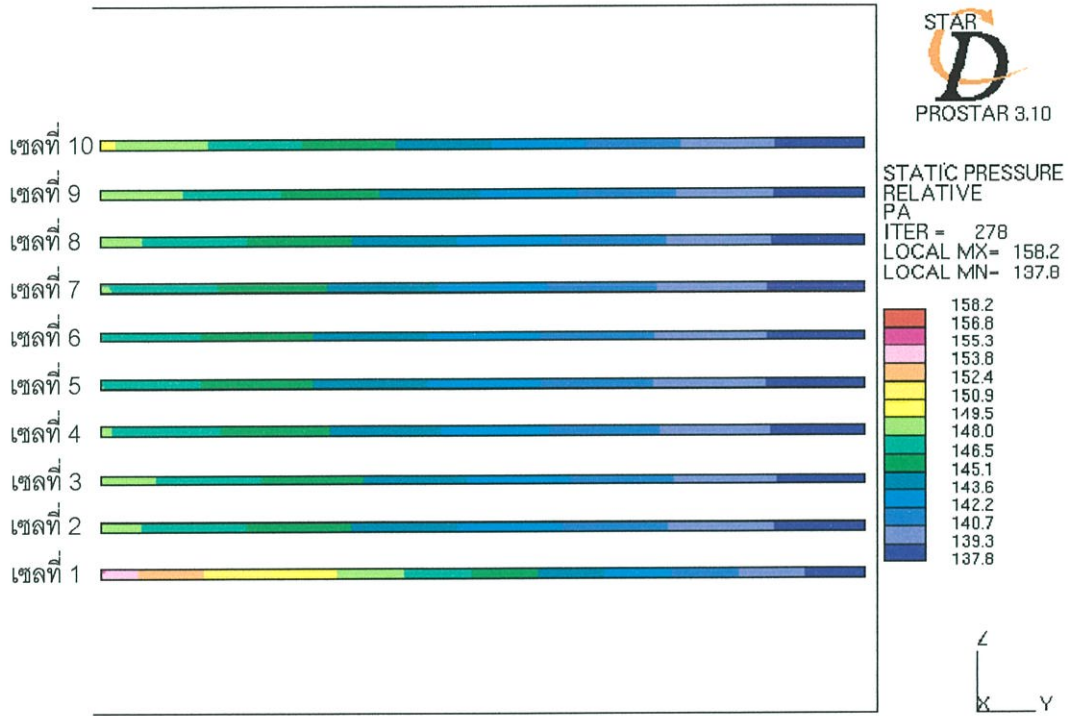
5.3 ผลการจำลองการไหล

ถึงแม้ว่าผลจากการทดลองสามารถวัดการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์ได้ แต่พฤติกรรมของการไหลบางประการไม่สามารถสังเกตได้จากการทดลอง เช่นการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้นภายในชุดนำการไหล เป็นต้น แบบจำลองจึงเป็นวิธีที่ช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นภายในชุดกระจายการไหลและชั้นวางเซลล์ให้ดียิ่งขึ้น

แบบจำลองสามารถแสดงค่าความดัน ขนาดของความเร็วของแก๊สตลอดจนเวกเตอร์แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของแก๊สภายในชั้นวางเซลล์ สำหรับสนามของความดันสถิตที่นำมาแสดงนั้นเพื่อเปรียบเทียบในเชิงพฤติกรรมกับผลการทดลอง ส่วนเวกเตอร์ของความเร็วนั้นใช้แสดงลักษณะการไหลของแก๊สภายในชุดกระจายการไหล

สำหรับผลของการจำลองที่นำเสนอนี้เพื่อแสดงข้อสังเกตที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลอง ลักษณะการไหลที่สอดคล้องกับผลการทดลอง และพฤติกรรมการไหลที่ไม่สามารถสังเกตได้จากการทดลอง

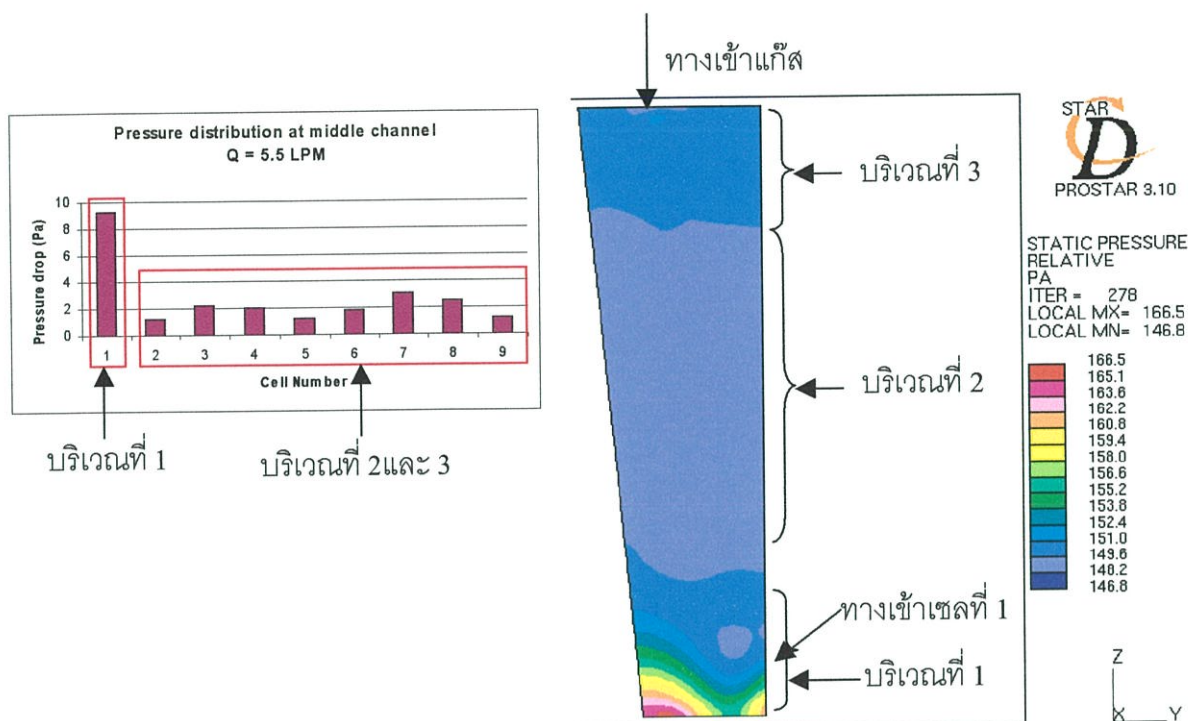
แบบจำลองของสนามความดันสามารถแสดงค่าความดันที่เกิดขึ้นในรูปของแถบสีซึ่งแสดงค่าตามระดับของสี ในรูปที่ 5.19 แสดงความดันที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตรงกลางเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ที่อัตราการไหล 5.5 ลิตรต่อวินาที ซึ่งสังเกตความสอดคล้องในเชิงพฤติกรรมระหว่างผลการทดลองและการจำลอง ได้แก่จากรูปจะเห็นได้ว่าระดับสีที่แสดงในเซลล์ที่ 1 มีค่าสูงที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งความดันสูญเสียในเซลล์ที่ 1 มีค่าสูงที่สุด



รูปที่ 5.19 การจำลองความดันที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตรงกลางของชั้นวางเซลล์ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° อัตราการป้อนแก๊ส 5.5 ลิตรต่อวินาที

ในรูปที่ 5.20 แสดงความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหล ณ ตำแหน่งที่ตรงกับทางเข้าช่องนำการไหลตรงกลาง จากแถบสีแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่มุมด้านล่างของชุดกระจายการไหลมีค่าความดันสูงที่สุดและค่อย ๆ ลดลงไปตามความสูงของชั้นวางเซลล์และเพิ่มขึ้นที่บริเวณใกล้กับทางเข้าแก๊ส จะเห็นได้ว่าบริเวณทางเข้าเซลล์ที่ 1 เกิดความดันสูงกว่าบริเวณทางเข้าของเซลล์อื่น จากรูปซึ่งนำผลการทดลองมาแสดงด้วย จะเห็นได้ว่าผลการจำลองสอดคล้องในเชิงพฤติกรรมกับผลการทดลองกล่าวคือ ตำแหน่งของทางเข้าเซลล์ที่ 1 อยู่ในบริเวณที่ 1 ซึ่งมีระดับความดันสูงที่สุด สอดคล้องกับผลการทดลองที่ วัดความดันสูญเสียสูงสุดได้ในเซลล์ที่ 1 และในบริเวณที่ 2 และ 3 แสดงระดับความดันที่ใกล้เคียงกัน

มากสังเกตได้จากแถบสี ซึ่งสอดคล้องในเชิงพฤติกรรมกับผลการทดลองที่ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นตั้งแต่เซลล์ที่ 2 ขึ้นไปแตกต่างกันน้อยมาก และน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 1 มาก

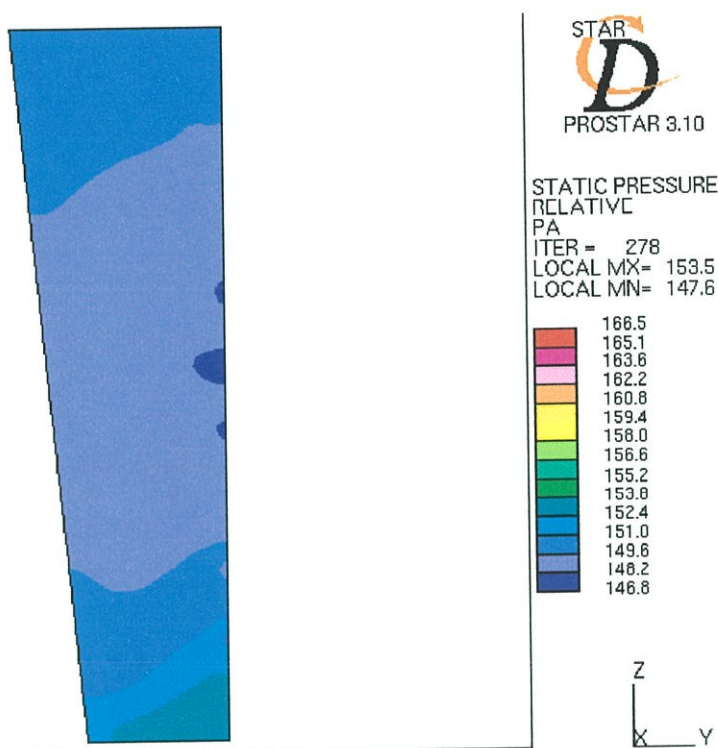


รูปที่ 5.20 ความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 5.5 ลิตรต่อนาที

สำหรับความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลซึ่งตรงกับตำแหน่งของช่องการไหลริมซ้ายแสดงในรูปที่ 5.21 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแถบสีที่แสดงค่าความดันสูงที่สุดยังคงอยู่ใกล้กับบริเวณที่ใกล้เคียงกับทางเข้าเซลล์ที่ 1

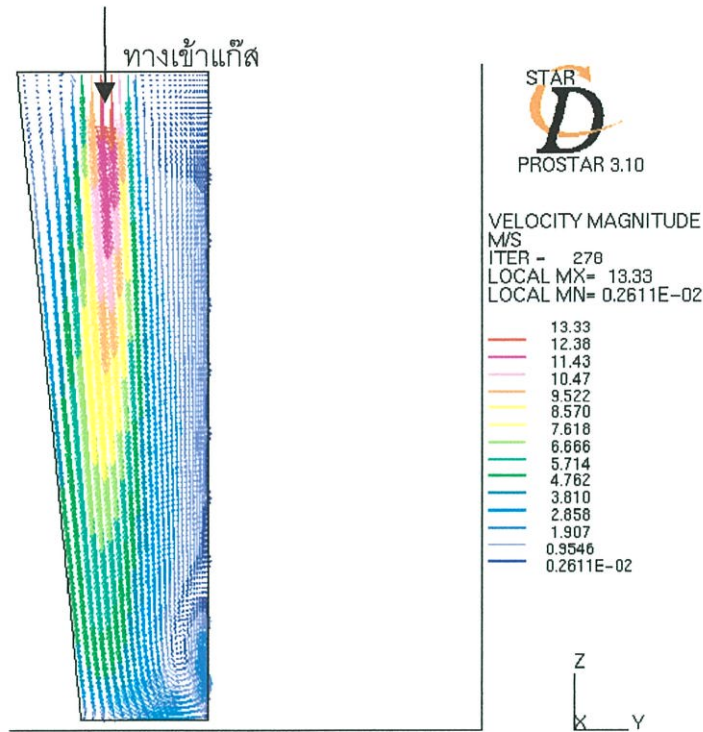
ในรูปที่ 5.22 แสดงสนามการไหลของแก๊สภายในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° เมื่ออัตราการไหลเท่ากับ 5.5 ลิตรต่อนาที ที่บริเวณหน้าตัดในระนาบเดียวกับทางเข้าของช่องการไหลตรงกลาง แบบจำลองนอกจากแสดงทิศทางการไหลจากเวกเตอร์แล้วยังแสดงขนาดด้วยสีของเวกเตอร์ความเร็วที่เกิด

จะเห็นได้ว่าบริเวณตรงกลางของชุดกระจายการไหลซึ่งตรงกับท่อทางเข้าของแก๊สนั้น แก๊สมีทิศทางการไหลพุ่งลงมาด้านล่างของชุดกระจายการไหลมากกว่าไหลเข้าไปในช่องการไหลของชั้นวางเซลล์ เนื่องจากโมเมนตัมของแก๊ส อย่างไรก็ตามเมื่อแก๊สกระทบกับผนังของชุดกระจายการไหลทำให้

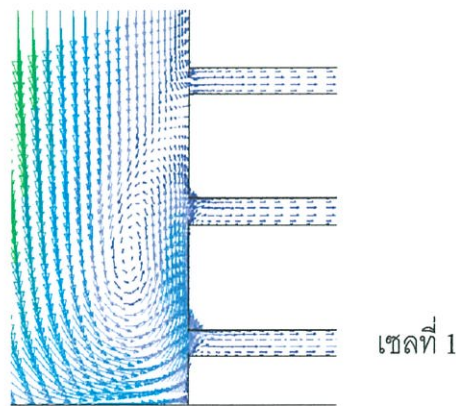


รูปที่ 5.21 ความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลริมซ้ายเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 5.5 ลิตรต่อวินาที

การไหลเกิดสภาวะ stagnation ขึ้นและเปลี่ยนทิศทางเป็นไหลย้อนกลับ โดยที่ทิศทางของแก๊สที่พุ่งขึ้นนี้ใกล้เคียงกับบริเวณที่เป็นทางเข้าของเซลล์ที่ 1 สังเกตได้จากรูปที่ 5.23 ทำให้แก๊สไหลเข้าเซลล์ที่ 1 ด้วยแรงเนื่องจากความเร็วร่วมกับแรงเนื่องจากความแตกต่างของความดันที่ทางเข้าและทางออกของช่องการไหลของเซลล์ที่ 1 ส่งผลให้แก๊สไหลเข้าเซลล์ที่ 1 มากกว่าเซลล์อื่น ๆ ส่วนแก๊สที่เหลือไหลสวนทางขึ้นไปด้านบนโดยที่ทิศทางการไหลนั้นตั้งฉากกับช่องการไหลในชั้นเซลล์ ซึ่งแก๊สที่จะไหลเข้าสู่เซลล์ที่อยู่สูงขึ้นไปนั้นมีแรงเนื่องจากความเร็วน้อยกว่าแรงเนื่องจากความแตกต่างของความดันที่ตกคร่อมระหว่างทางเข้าและทางออกของช่องการไหล ส่งผลให้แก๊สไหลเข้าเซลล์ดังกล่าวน้อยกว่าเซลล์ที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้กล่าวไปแล้ว และจากรูปที่ 5.23 พบว่าเกิด recirculation ขึ้นที่บริเวณด้านล่างของชุดกระจายการไหลซึ่งเป็นพฤติกรรมที่ไม่สามารถสังเกตได้จากการทดลอง



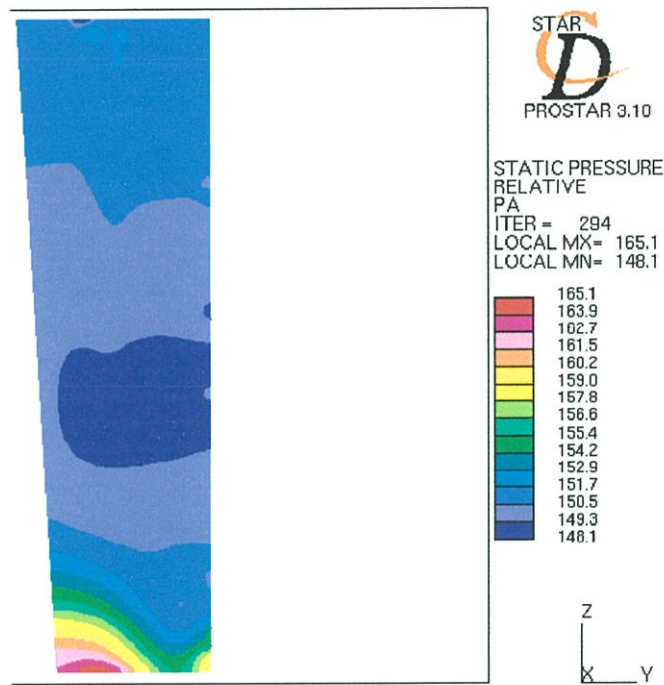
รูปที่ 5.22 ลักษณะการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 5.5 ลิตรต่อวินาที



รูปที่ 5.23 ทิศทางการไหลของแก๊สบริเวณใกล้ทางเข้าเซลล์ที่ 1

ผลการจำลองการไหลเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° แสดงในรูปที่ 5.24 ถึง 5.27 ในรูปที่ 5.24 แสดงสนามความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ที่ตำแหน่งหน้าตัดเดียวกับระนาบของช่องการไหลตรงกลาง จะเห็นได้ว่าความดันสูงสุดเกิดขึ้นที่ด้านล่างของชุดกระจายการไหล

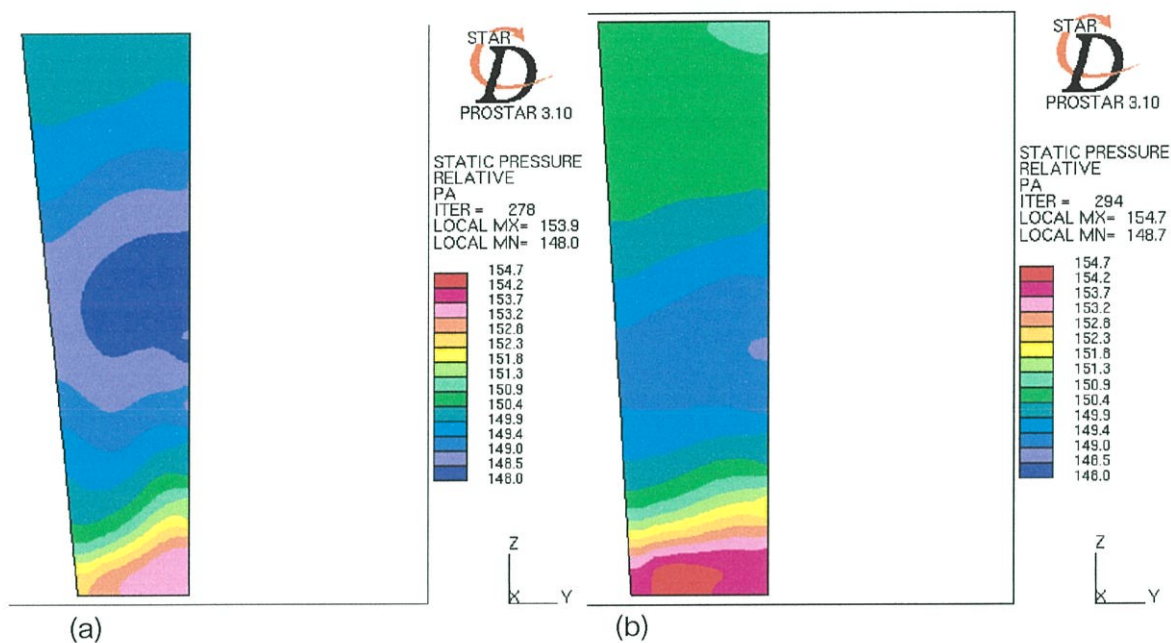
เช่นเดียวกับเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (รูปที่ 5.20) อย่างไรก็ตามลักษณะของสนามความดันนั้นแตกต่างกัน สังเกตได้ว่าสำหรับชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° นั้นเกิดบริเวณที่ความดันแตกต่างกันมากกว่าในบริเวณที่ตรงกับตำแหน่งของเซลล์ที่สูงกว่าเซลล์ที่ 1 และเมื่อสังเกตค่าความดันสถิตยที่ได้จากการจำลองจะเห็นได้ว่าค่าความแตกต่างระหว่างความดันสูงสุดและต่ำสุดเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° นั้นมีค่ามากกว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ค่าความดันสูญเสียที่วัดได้จากการใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° มากกว่าที่วัดได้จากการใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° นอกจากนั้นตำแหน่งที่เกิดความดันสูงสุด (บริเวณที่เป็นสีแดง) ก็เลื่อนเข้ามาใกล้กับทางเข้าของเซลล์ที่ 1 มากขึ้น ซึ่งสนามความดันที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ส่งผลให้เกิดการกระจายการไหลที่แตกต่างกันเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65°



รูปที่ 5.24 ความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 5.5 ลิตรต่ออนาที

ในรูปที่ 5.25 นำผลการจำลองของสนามความดันเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° และ 3.10° มาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่าสนามความดันที่เกิดขึ้นนั้นมีความแตกต่างกัน กล่าวคือสำหรับชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° (รูปที่ 5.25 (b)) นั้นบริเวณที่เกิดความดันสูงสุดอยู่บริเวณตรงกลาง

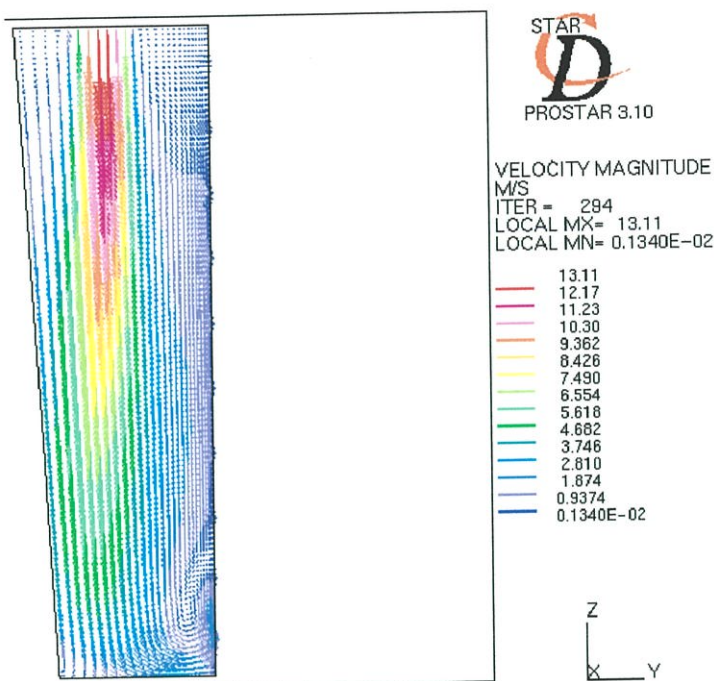
ของพื้นด้านล่างของชุดกระจายการไหลทำให้สนามการไหลแบ่งระดับความดันเป็นลักษณะของเส้นตรงในระนาบเดียวกับช่องการไหลของแต่ละเซลล์มากกว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (รูปที่ 5.25 (a)) ส่งผลให้ลักษณะการกระจายการไหลเข้าสู่แต่ละช่องการไหลต่างกัน



รูปที่ 5.25 ความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง (a) 5.65° (b) 3.10° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลริมซ้ายเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 7 ลิตรต่อนาที

ในรูปที่ 5.26 แสดงสนามการไหลในชุดกระจายการไหลในระนาบเดียวกับช่องการไหลตรงกลางซึ่งสังเกตได้ว่าไม่เกิดความแตกต่างของสนามการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ชุดกระจายมุมเอียง 5.65° และ 3.10° ที่เด่นชัด และพบว่าเกิด recirculation เกิดขึ้นที่บริเวณด้านล่างของชุดกระจายการไหลบริเวณหน้าตัดที่ตรงกับทางเข้าของแก๊สเช่นเดียวกันกับเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65°

สำหรับผลการจำลองที่ได้นำเสนอไปนั้นเป็นการจำลองที่ขนาดชุดกระจายการไหลเดียวกันกับการทดลอง ซึ่งได้ทำการทดลองเพียงสองค่าของมุมเอียงของชุดกระจายการไหลเนื่องจากมีความยุ่งยากในการประกอบชุดการทดลอง ตลอดจนใช้เวลาค่อนข้างนานในการทำการทดลองแต่ละครั้ง ดังนั้นเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของมุมเอียงของชุดกระจายการไหลเพิ่มเติมจึงทำการจำลองการไหลเพิ่มจากส่วนที่ได้ทำการทดลอง โดยกำหนดให้ขนาดของชุดกระจายการไหลที่ทำการจำลองเพิ่มนั้นเป็นชุดกระจายการไหลมุมเอียง 1.13° และ 7.89° ตามลำดับ



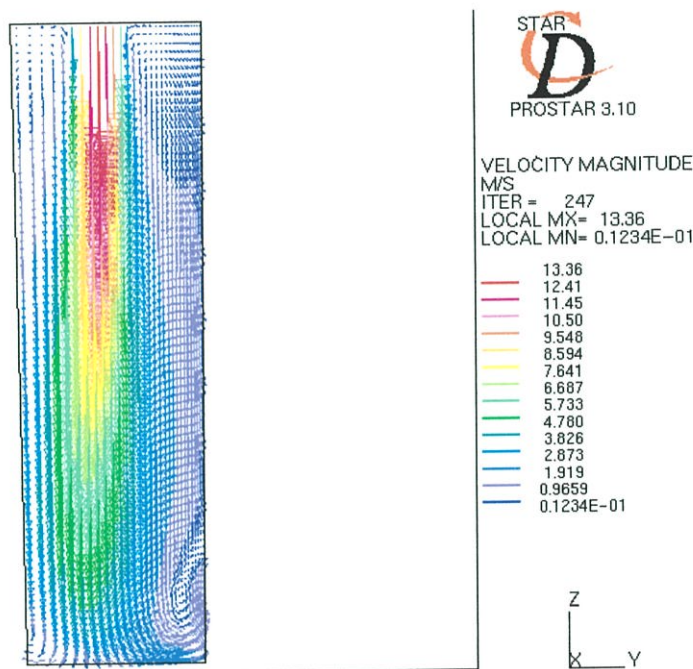
รูปที่ 5.26 ลักษณะการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 5.5 ลิตรต่อวินาที

แสดงผลการจำลองการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 1.13° ในรูปที่ 5.27 และ 5.28 และสำหรับชุดกระจายการไหลมุมเอียง 7.89° แสดงในรูปที่ 5.29 และ 5.30

จากรูป 5.27 ถึง 5.30 พบว่าปรากฏการณ์การไหลที่ได้จากชุดกระจายการไหลมุมเอียง 1.13° และ 7.89° มีความคล้ายคลึงกับที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° และ 3.10° อย่างไรก็ตามสังเกตเห็นปรากฏการณ์บางอย่างชัดเจนขึ้นเมื่อนำผลการจำลองเวกเตอร์ของความเร็วของทั้ง 4 ขนาดมุมเอียงมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.31

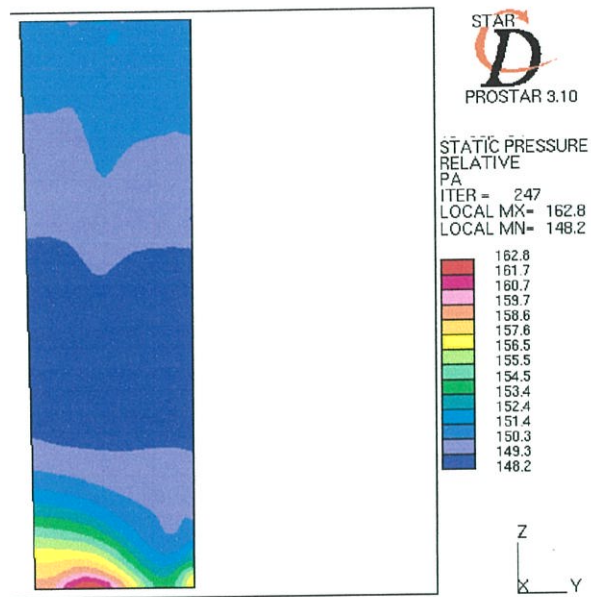
จากรูปที่ 5.31 จะเห็นได้ว่าแก๊สที่พุ่งลงมาระทบบริเวณด้านล่างของชุดกระจายการไหลแล้วเปลี่ยนทิศทางไหลย้อนกลับสู่ด้านบนนั้นสังเกตได้ว่าที่ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 7.89° นั้นแก๊สที่ไหลย้อนกลับนั้นไหลไปทางบริเวณด้านที่ใกล้กับทางเข้าของช่องการไหลเป็นส่วนใหญ่ แต่ที่ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 1.13° แก๊สไหลย้อนกลับได้สองทิศทาง (ด้านที่ติดกับผนังและด้านที่ติดกับช่องการไหล) อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้โดนบังคับโดยมุมเอียงของชุดกระจายการไหลและส่งผลให้ลักษณะการกระจายการไหลในแต่ละชั้นเซลล์แตกต่างกัน เมื่อแก๊สที่ไหลย้อนกลับถูกแบ่งไปสองทิศทางส่งผลให้ความแข็งแรงของความเร็วของแก๊สในทิศทางพุ่งขึ้นนั้นลดลง ซึ่งโอกาสที่แรงเนื่องจากความ

แตกต่างของความดันระหว่างทางเข้าและทางออกของช่องการไหลสามารถเอาชนะแรงเนื่องจากความเร็ว (ในทิศทางพุ่งขึ้น) มีมากขึ้น ส่งผลให้แก๊สไหลเข้าในแต่ละชั้นเซลล์มีความใกล้เคียงกันมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองพบว่าเมื่อมุมเอียงมีขนาดลดลงทำให้เกิดการกระจายการไหลที่ดีกว่า สำหรับการจำลองนั้นจะกล่าวในรายละเอียดต่อไปว่าเมื่อมุมเอียงมีขนาดลดลงทำให้การกระจายการไหลดีขึ้น

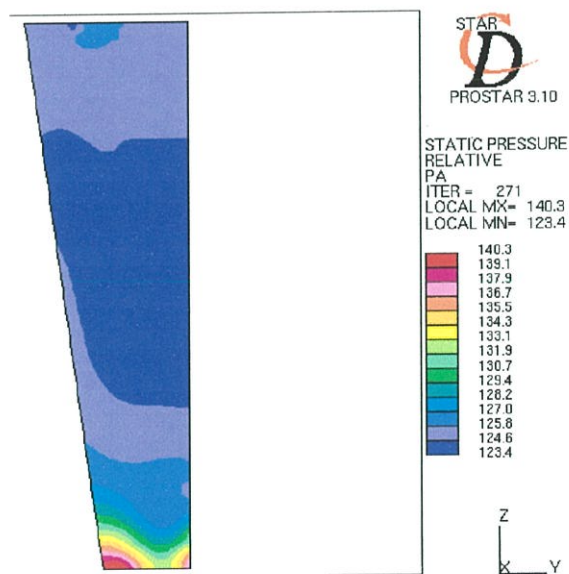


รูปที่ 5.27 เวกเตอร์ความเร็วของแก๊สในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 1.13° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 7 ลิตรต่ออนาที

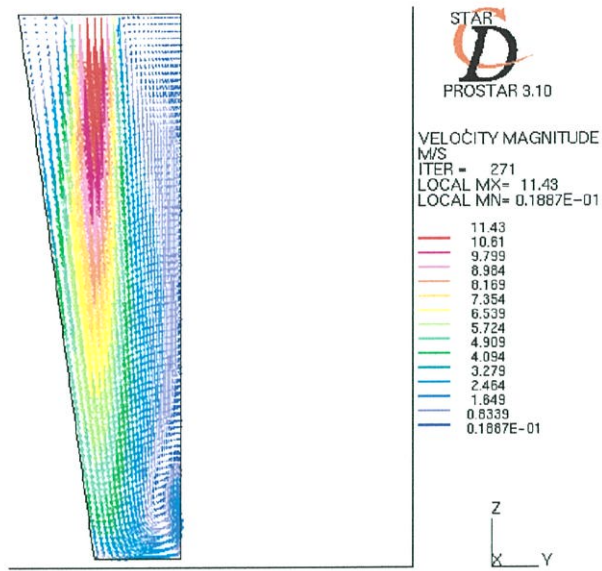
ดังนั้นกล่าวได้ว่าสามารถให้แบบจำลองทำนายลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลและชั้นวางเซลล์ได้ แม้ว่าไม่สามารถสังเกตลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่องการไหลได้เนื่องจากมีขนาดเล็กกว่าชุดกระจายการไหลมาก หากต้องการแสดงลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในช่องการไหลอย่างละเอียดนั้นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีศักยภาพสูงมากกว่าที่ใช้ในการวิจัยนี้



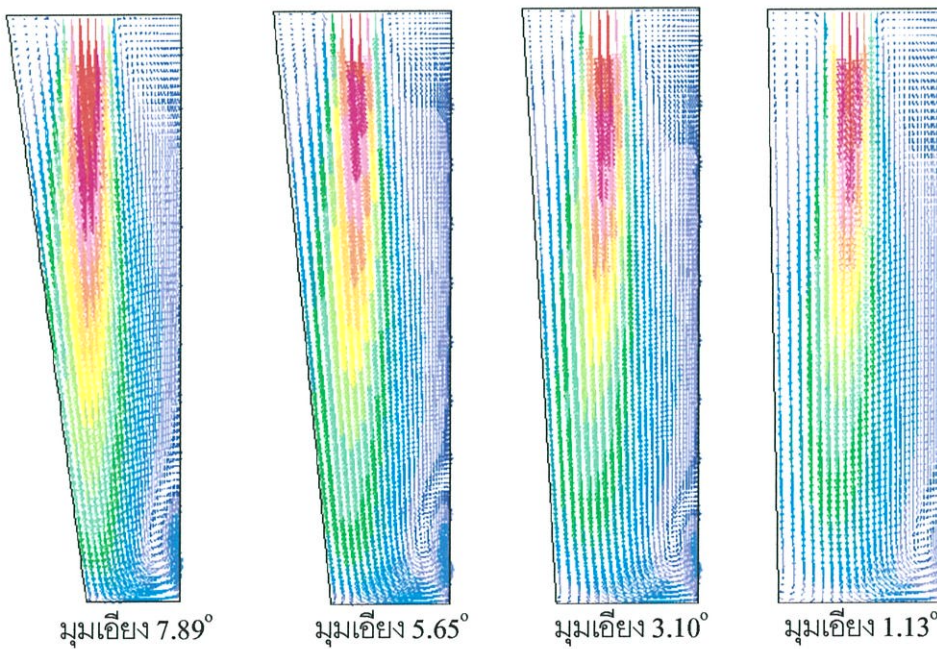
รูปที่ 5.28 ความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 1.13° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทาง
เข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 7 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 5.29 ความดันที่เกิดขึ้นในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 7.89° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทาง
เข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 7 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 5.30 เวกเตอร์ความเร็วของแก๊สในชุดกระจายการไหลมุมเอียง 7.89° ด้านทางเข้าซึ่งตรงกับตำแหน่งทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่ออัตราการป้อนแก๊ส 7 ลิตรต่อวินาที



รูปที่ 5.31 เวกเตอร์แสดงทิศทางการไหลของแก๊สภายในชุดกระจายการไหลซึ่งตรงกับตำแหน่งช่องการไหลตรงกลางทั้ง 4 ขนาดของมุมเอียง

แม้ว่าไม่สามารถแสดงลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลอย่างละเอียดได้ แต่ก็สามารถนำข้อมูลซึ่งคำนวณโดยแบบจำลองมาแสดงในรูปของกราฟและนำมาวิเคราะห์ผลได้เช่นกัน ซึ่งพบว่าเมื่อเอาค่าขนาดของความเร็วของแก๊สที่เกิดขึ้นที่ช่องการไหลด้านทางเข้ามาคำนวณหาค่า Distribution Factor, DF นั้นปรากฏว่ามีค่าที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งค่าที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 5.3 และ 5.4

ตารางที่ 5.3 DF_x แสดงค่าการกระจายการไหลในมุมมองของแต่ละชั้นเซลล์

Cell Number	มุมเอียง 5.65°	มุมเอียง 3.10°	มุมเอียง 1.13°	มุมเอียง 7.89°
1	0.268565	0.205178	0.193175	0.290679
2	0.216823	0.217052	0.190252	0.19697
3	0.107957	0.093422	0.076788	0.10622
4	0.051685	0.047037	0.046243	0.048924
5	0.0348	0.055989	0.064048	0.029195
6	0.035208	0.069653	0.062538	0.035147
7	0.050242	0.062251	0.048129	0.041829
8	0.047742	0.047293	0.03246	0.036592
9	0.057378	0.035008	0.025639	0.03842
10	0.036722	0.046125	0.037887	0.035687

จากค่าที่แสดงในตารางสามารถนำค่าสูงสุดและต่ำสุดของ DF เมื่อใช้แต่ละชุดกระจายการไหลมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 5.32 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชุดกระจายการไหลมุมเอียง 1.13° นั้นทำให้เกิดการกระจายการไหลได้ดีที่สุด สังเกตจากค่า DF ต่ำที่สุด จะเห็นได้ว่าสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ซึ่งมีมุมเอียงน้อยกว่านั้นทำให้เกิดการกระจายการไหลได้ดีกว่า และเมื่อทำการจำลองเพิ่มก็พบว่าเมื่อลดขนาดมุมเอียงลงทำให้ค่า DF น้อยลงหรือแสดงว่าทำให้เกิดการกระจายการไหลที่ดีขึ้นเช่นเดียวกันกับผลการทดลอง

ตารางที่ 5.4 DF_c แสดงค่าการกระจายการไหลในมุมมองของทั้งชั้นเซลล์ที่ช่องการไหลเรียงจากซ้ายไป
ถึงตรงกลางของเซลล์

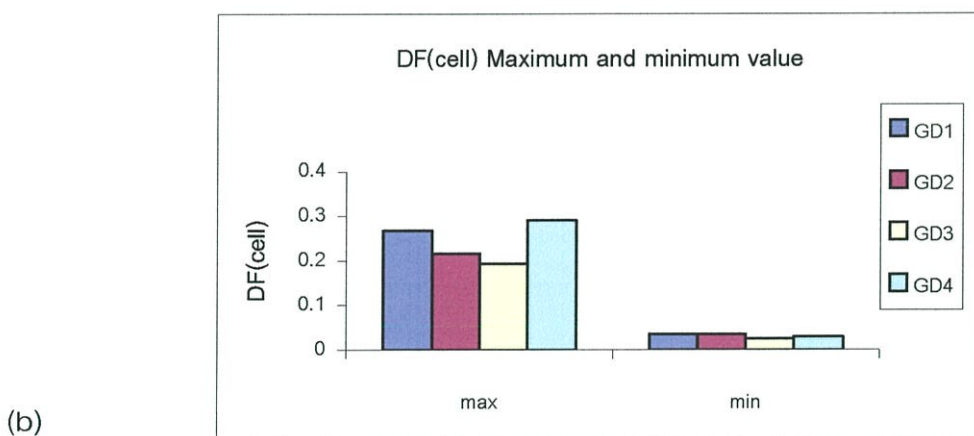
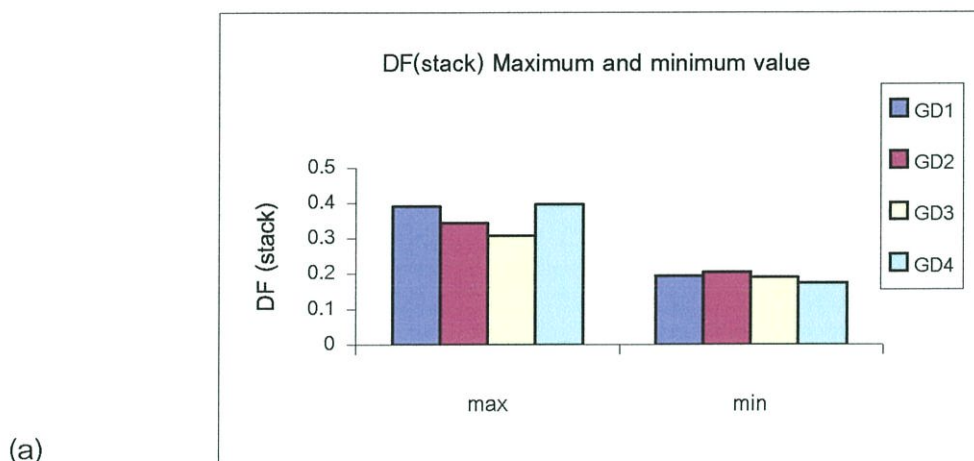
Channel Number	มุมเอียง 5.65°	มุมเอียง 3.10°	มุมเอียง 1.13°	มุมเอียง 7.89°
1 (ริมซ้าย)	0.308036	0.321307	0.294631	0.300665
2	0.23357	0.281868	0.262296	0.21003
3	0.195252	0.220396	0.211827	0.175596
4	0.228985	0.206616	0.190838	0.218421
5	0.304775	0.247075	0.205159	0.288885
6	0.363052	0.313011	0.276995	0.36729
7 (ตรงกลาง)	0.39119	0.344765	0.309015	0.396948

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อขนาดของมุมเอียงน้อยลงจะทำให้เกิดการกระจายการไหลในชั้นวาง
เซลล์ที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่ารูปร่างของชุดกระจายการไหลที่ออกแบบในเบื้องต้นนี้ยังไม่ทำให้เกิด
เกิดการกระจายการไหลที่สม่ำเสมอได้เนื่องจากยังมีค่า DF ที่มีค่าสูงกว่า 0.1 ดังนั้นยังคงต้องมีการ
ปรับปรุงรูปร่างชุดกระจายการไหลเพื่อให้เกิดการกระจายการไหลที่สม่ำเสมอต่อไป

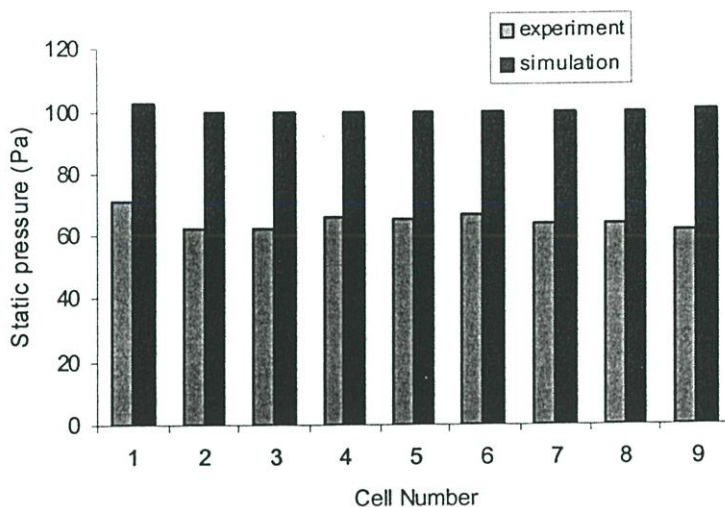
5.4 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณระหว่างผลการทดลองและการจำลอง

ในรูปที่ 5.33 แสดงค่าความดันสถิตที่ทางเข้าของช่องนำการไหลตรงกลางของชุดกระจายการ
ไหลมุมเอียง 5.65° ที่อัตราการป้อนแก๊สเท่ากับ 5.5 ลิตรต่อนาที ที่วัดได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับ
ที่ได้จากการจำลองการไหล จะเห็นได้ว่าผลของทั้งสองวิธีนั้นสอดคล้องในลักษณะการกระจาย
ความดันในแต่ละเซลล์ แต่มีความคลาดเคลื่อนกันในค่าความดันที่ได้ ทั้งนี้อาจเนื่องจากความผิดพลาด
ในการกำหนดค่าความดันที่ทางออกของชั้นวางเซลล์ของแบบจำลอง ทำให้ความดันที่ได้จาก
แบบจำลองทั้งหมดมีค่าคลาดเคลื่อนไป ในรูปที่ 5.34 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความดันสูญเสียที่
ได้จากการทดลองและที่ได้จากแบบจำลองที่เงื่อนไขเดียวกันกับผลในรูปที่ 5.33 จะเห็นได้ว่าความดัน
สูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 1 นั้นสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ในเซลล์ที่ 2 ถึงเซลล์ที่ 9 นั้นเห็นความ
คลาดเคลื่อนอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นพบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองและ
การทดลองมีลักษณะเดียวกัน กล่าวคือเกิดความดันสูญเสียในเซลล์ที่ 1 มากที่สุดและแตกต่างจากเซลล์
อื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด และความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์อื่น ๆ ก็มีค่าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม
สำหรับค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์อื่น ๆ ที่ได้จากการทดลองและการจำลองแตกต่างกันมาก

นั้น อาจเนื่องจากในแบบจำลองไม่สามารถแสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลได้สมบูรณ์ เหมือนที่เกิดกับการไหลจริง กล่าวคือไม่สามารถจำลองการไหลในช่องการไหลได้ละเอียดพออัน เนื่องจากสาเหตุที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ทำให้ค่าที่ได้จากการจำลองคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ได้จากการทดลอง

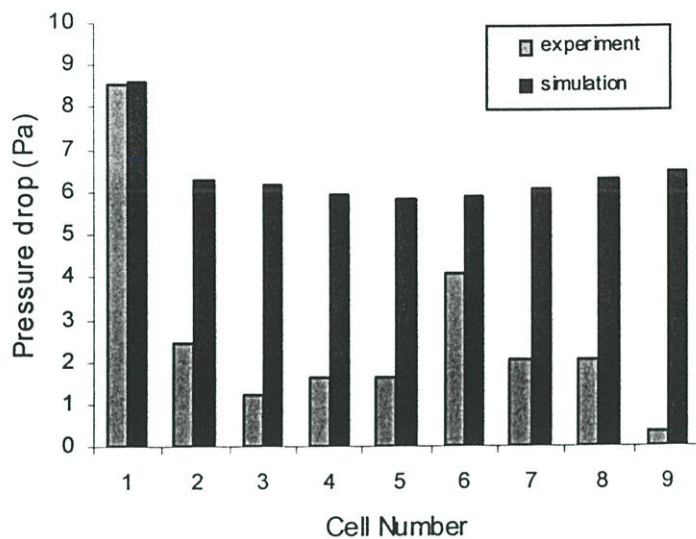


รูปที่ 5.32 ค่า Distribution Factor ต่ำสุดและสูงสุดในมุมมองของ (a) ชั้นวางเซลล์ และ (b) เซลล์ เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° (GD1), 3.10° (GD2), 1.13° (GD3) และ 7.89° (GD4)

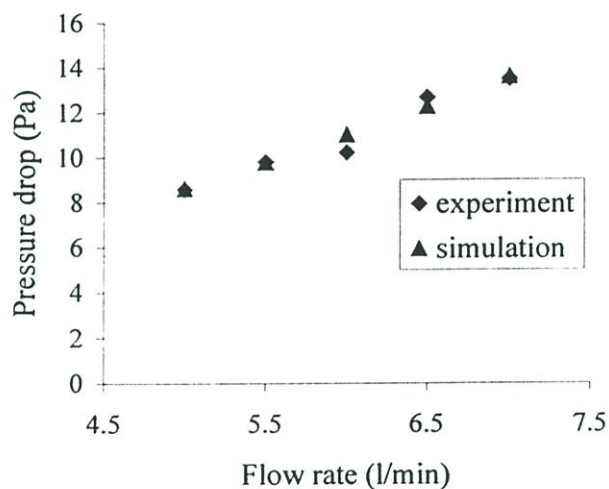


รูปที่ 5.33 ค่าความดันสถิตที่ทางเข้าของช่องการไหลตรงกลางเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ที่อัตราการไหล 5.5 ลิตรต่อวินาทีที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง

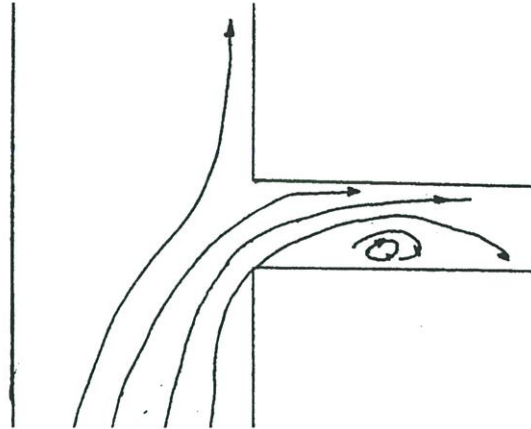
ในรูปที่ 5.35 แสดงความดันสูญเสียที่เกิดในช่องการไหลตรงกลางของเซลล์ที่ 1 เปรียบกันระหว่างค่าที่วัดได้จากการทดลองและแบบจำลองที่อัตราการไหลต่าง จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากทั้งสองวิธีนั้นสอดคล้องเป็นอย่างดี ทั้งนี้เมื่อพิจารณาผลการทดลองร่วมกับผลการจำลองที่แสดงสนามการไหลจะเห็นได้ว่าเซลล์ที่ 1 อยู่ในบริเวณที่แก๊สไหลเข้าได้เต็มที่และทิศทางของแก๊สที่ไหลเข้าก็อยู่ในทิศทางเดียวกับแนวแกนของช่องการไหล แต่สำหรับเซลล์อื่น ๆ ที่อยู่สูงขึ้นไปนั้นเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแก๊สไหลเข้าในปริมาณที่น้อยกว่าเซลล์ที่ 1 มาก และเมื่อพิจารณาสนามการไหลที่ได้จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าเมื่อแก๊สไหลเข้าชั้นวางเซลล์ที่ทางเข้าแล้วพุ่งลงมากกระทบกับผนังด้านล่างของชุดกระจายการไหล จากนั้นแก๊สก็ไหลย้อนกลับในทิศทางสวนกับแก๊สที่ไหลเข้า แก๊สที่ไหลสวนทางขึ้นไปนี้บางส่วนไหลเข้าช่องการไหล อย่างไรก็ตามเนื่องจากแก๊สส่วนใหญ่ถูกบังคับให้ไหลในทิศทางที่พุ่งขึ้น ดังนั้นแก๊สที่ไหลเข้าช่องการไหลจึงมีโอกาสมิที่มีทิศทางขนานกับแนวแกนของช่องการไหลน้อย ทำให้อาจเกิด recirculation บริเวณทางเข้าของช่องการไหลส่งผลให้ความดันลดลงและอาจทำให้การจำลองค่าความดันสถิตยคลาดเคลื่อนไปดังแสดงในรูปที่ 5.36 ซึ่งส่งผลให้การอ่านค่าความดันสถิตยในเซลล์ที่ 2 ขึ้นไปคลาดเคลื่อนไปทั้งในเชิงพฤติกรรมและปริมาณ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการศึกษาการไหลทั้งสองวิธีสามารถตรวจสอบความถูกต้องซึ่งกันและกันได้ เพราะแสดงเหตุและผลของปรากฏการณ์สอดคล้องกัน



รูปที่ 5.34 ค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลตรงกลางเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ที่อัตราการไหล 5.5 ลิตรต่อนาทีที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง



รูปที่ 5.35 ค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลตรงกลางของเซลล์ที่ 1 เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ที่อัตราการไหลต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง



รูปที่ 5.36 ลักษณะการไหลที่เกิด recirculation บริเวณทางเข้าของช่องการไหล

สรุปได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมานั้นมีความถูกต้องในระดับที่สามารถแสดงลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นได้สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลล์ที่ 1 อย่างไรก็ตามแบบจำลองยังไม่ละเอียดเพียงพอที่จะแสดงพฤติกรรมการไหลที่เกิดในช่องการไหลได้ทำให้ผลการจำลองยังมีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลองอยู่ ซึ่งต้องมีการพัฒนาปรับปรุงเพื่อเพิ่มความถูกต้องให้มากขึ้นต่อไป อย่างไรก็ตามลักษณะการไหลที่ได้จากการทดลองและการจำลองที่สอดคล้องกันนั้นยืนยันได้ว่าหากพัฒนาปรับปรุงให้การทดลองวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้ละเอียดและแม่นยำมากขึ้น ตลอดจนปรับปรุงการจำลองให้มีความละเอียดมากขึ้น ย่อมส่งผลให้แบบจำลองการไหลนี้มีความถูกต้องมากขึ้นเพียงพอในการนำไปใช้ช่วยในการออกแบบชิ้นวางเซลล์และชุดกระจายการไหลเพื่อให้เกิดการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพที่ดีได้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

6.1.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1.1 สำหรับชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65°

1. แก๊สไหลเข้าเซลล์ที่ 1 มากที่สุด สังเกตจากความดันสูญเสียที่วัดได้มีค่าสูงที่สุด

2. แก๊สไหลเข้าเซลล์อื่น ๆ ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันยกเว้นเซลล์ที่ 4 ในช่องการไหลริมซ้ายและขวามีปริมาณแก๊สไหลเข้าใกล้เคียงกับเซลล์ที่ 1 สังเกตจากค่าความดันสูญเสียที่วัดได้

3. การไหลในเซลล์ที่ 1 เป็นแบบราบเรียบเพราะความดันสูญเสียและอัตราการไหลแสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น

4. การไหลที่เกิดขึ้นในชั้นวางเซลล์ไม่สมมาตรตามรูปร่างของชุดกระจายการไหล

6.1.1.2 สำหรับชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10°

1. แก๊สไหลเข้าเซลล์ที่ 1 มากที่สุดในช่องการไหลริมขวาและตรงกลาง สังเกตจากความดันสูญเสียที่วัดได้มีค่าสูงที่สุด

2. การไหลในเซลล์ที่ 1 เป็นแบบราบเรียบเพราะความดันสูญเสียและอัตราการไหลแสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น

3. ในช่องการไหลริมซ้ายแก๊สไหลเข้าเซลล์ที่ 2 มากที่สุด สังเกตจากความดันสูญเสียที่วัดได้มีค่าสูงที่สุด รองลงมาได้แก่เซลล์ที่ 1

4. การไหลในแต่ละชั้นเซลล์เป็นแบบราบเรียบ สังเกตได้จากในแต่ละชั้นเซลล์ความดันสูญเสียและอัตราการไหลแสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น

6.1.1.3 เปรียบเทียบผลการทดลองสำหรับชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° และ

1. เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ทำให้แก๊สไหลเข้าเซลล์ที่ 1 ในปริมาณมากกว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ประมาณ 3 เท่า สังเกตได้จากเกิดความดันสูญเสียในเซลล์ที่ 1 เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° สูงกว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ประมาณ 3 เท่าที่อัตราการไหล 7 ลิตรต่อวินาที

2. เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ทำให้แก๊สไหลเข้าเซลล์ที่ 4 ในปริมาณมากกว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ประมาณ 2 เท่า สังเกตได้จากเกิดความดันสูญเสียในเซลล์ที่ 4 เมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° สูงกว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ประมาณ 2 เท่าที่อัตราการไหล 7 ลิตรต่อนาที

3. แก๊สที่ไหลเข้าเซลล์อื่นเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° และ 3.10° ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน สังเกตจากความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์อื่น ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน

4. ในระดับแต่ละชั้นเซลล์ ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ทำให้เกิดการกระจายการไหลที่ดีกว่า เนื่องจากค่านวนค่า Distribution Factor ได้ต่ำกว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ถึง 21 เปอร์เซ็นต์

5. ในระดับชั้นวางเซลล์ ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 3.10° ทำให้เกิดการกระจายการไหลที่ดีกว่า เนื่องจากค่านวนค่า Distribution Factor ได้ต่ำกว่าเมื่อใช้ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 5.65° ถึง 31.5 เปอร์เซ็นต์

6.1.2 สรุปผลการจำลอง

1. ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์ที่ 1 มีค่าสูงสุด
2. ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเกิด recirculation บริเวณด้านล่างของชุดกระจายการไหล
3. เมื่อมุมเอียงของชุดกระจายการไหลลดลงทำให้เกิดการกระจายการไหลดีขึ้น สังเกตจากค่า Distribution Factor ที่ลดลงเมื่อขนาดมุมเอียงลดลง
4. ชุดกระจายการไหลมุมเอียง 1.13° ทำให้เกิดการกระจายการไหลที่ดีที่สุด โดยค่านวนค่า Distribution Factor ได้ต่ำกว่าชุดกระจายการไหลมุมเอียง 7.89° 5.65° และ 3.10° เป็น 22.15, 21.0, และ 10.4 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

6.1.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลอง

6.1.3.1 การเปรียบเทียบในเชิงพฤติกรรมที่สอดคล้องกัน

1. เกิดความดันสูญเสียสูงสุดในเซลล์ที่ 1
2. ความดันสูญเสียที่เกิดในเซลล์อื่น ๆ ต่ำกว่าเซลล์ที่ 1 อย่างเห็นได้ชัด
3. ความดันสูญเสียที่เกิดในเซลล์อื่น ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน
4. เวกเตอร์แสดงทิศทางการไหลของแก๊สในชุดกระจายการไหลแสดงพฤติกรรมที่สนับสนุนว่าแก๊สไหลเข้าเซลล์ที่ 1 มากกว่าเซลล์อื่น ๆ

5. เมื่อมุมเอียงของชุดกระจายการไหลลดลงทำให้เกิดการกระจายการไหลที่ดีขึ้น โดยที่ค่า Distribution Factor ที่คำนวณได้จากผลการทดลองและผลการจำลองแสดงแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน

6.1.3.2 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณ

1. ค่าความดันสูญเสียในเซลล์ที่ 1 ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลองมาก โดยมีความคลาดเคลื่อนเพียง 0.05 เปอร์เซ็นต์

2. ค่าความดันสูญเสียในเซลล์อื่น ยังมีความคลาดเคลื่อนกันมาก โดยค่าที่ได้จากการจำลองสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนกันประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์

6.1.4 ศักยภาพของแบบจำลอง

จากการที่ผลการทดลองมีความสอดคล้องกันกับผลการจำลอง โดยเฉพาะพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังนั้นแบบจำลองการไหลในชั้นวางเซลล์นี้มีศักยภาพเพียงพอที่จะพัฒนาเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบชั้นวางเซลล์ต่อไป

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การขึ้นรูปชุดกระจายการไหลมีผลต่อการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์
2. ตำแหน่งและขนาดของ recirculation อาจมีผลกระทบต่อลักษณะการไหลในช่องการไหล
3. อาจเกิด recirculation ที่บริเวณทางเข้าของช่องการไหลที่อยู่สูงขึ้นไปจากเซลล์ที่ 1 ซึ่งส่งผลให้การวัดค่าความดันสถิตยภายในช่องการไหลคลาดเคลื่อนไป
4. ควรทำการทดลองวัดการกระจายการไหลโดยใช้ชุดกระจายการไหลหมายเลข 3 เพื่อยืนยันผลการจำลอง
5. ควรทำการทดลองวัดการกระจายการไหลโดยขึ้นรูปชุดกระจายการไหลด้วยวิธีการที่ให้ความแม่นยำมากขึ้น
6. ควรทำการทดลองวัดการกระจายการไหลโดยทำให้เกิดความดันของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถวัดค่าความดันได้ถูกต้องมากขึ้น
7. ควรทำการทดลองโดยเปลี่ยนตำแหน่งการวัดความดันสถิตย โดยเพิ่มระยะห่างจากทางเข้าของช่องการไหลเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก recirculation ที่ทางเข้าช่องการไหล

6.3 งานวิจัยที่ควรทำต่อ

1. ปรับปรุงรูปร่างชุดกระจายไหลให้เกิดการกระจายการไหลที่ดีขึ้นโดยใช้แบบจำลองช่วยในการออกแบบ

2. ปรับปรุงแบบจำลองโดยลดความแตกต่างระหว่างขนาดเอลิเมนต์ของชุดกระจายการไหลและช่องการไหลเพื่อให้การส่งถ่ายข้อมูลมีความถูกต้องยิ่งขึ้น

3. จำลองการไหลโดยพิจารณาอุณหภูมิและปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Appleby A.J. and Foulkes F.R. *Fuel Cell Handbook*. FL : Krieger. 1992.
- [2] Ma Z., Jeter S.M. and Abdel-Khalik S.I. "Modeling of Transport Processes within a Molten Carbonate Fuel Cell Stack." *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. New York. 2001.
- [3] Keegan K., Khaleel M., Chick L., Recknagle K., Simvlor S. and Deibler J. "Analysis of a Planar Solid Oxide Fuel Cell Based Automotive Auxiliary Power Unit.", *Fuel Cell Power for Transportation*. 2002.
- [4] <http://www.ehce.kyoto-u.ac.jp/laboratory/design/design.htm>
- [5] Balwal S.P.S., Bannister M.J. and Hannink R.H.J., Editors. *Science and Technology of Zirconia V*. Technomic PA : Publishing Company. 1993, pp. 652.
- [6] Singhal Subhash C., Kendall Kelvin. *High Temperature Solid Oxide Fuel Cell: Fundamentals, Design and Applications*. UK : Elsevier Ltd. 2003.
- [7] Minh N.Q., Takahashi Takehiko. *Science and Technology of Ceramic Fuel Cells*. The Netherlands: Elsevier Science B.V. 1995.
- [8] Minh N.Q. *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol.76 1993. pp. 563.
- [9] Ivers-Tiffée E., Wersing W. and Reichelt B. *1990 Fuel Cell Seminar Abstracts*. DC : Courtesy Associates. November 25-28, 1990. pp. 137.
- [10] Singhal S.C., Iwahara H., Editors. *Electrochemical Society*. NJ, Pennington. 1993. pp. 724.
- [11] Singhal S.C., Iwahara H., Editors. *Electrochemical Society*. NJ, Pennington. 1993. pp. 822.
- [12] Yamamoto O., Dokiya M. and Tagawa H., Editors. *Science House*. Tokyo, Japan. 1989. pp. 212.
- [13] Boersma R.J., Sammes N.M. "Distribution of gas flow in internally manifolded solid oxide fuel-cell stacks." *Journal of Power Sources*, vol. 66, 1997. pp. 41-45.
- [14] Argyropoulos P., Scott K. and Taama W.M. "Pressure drop modeling for liquid feed direct methanol fuel cells Part 1. Model development." *Chemical Engineering Journal*, vol. 73, 1999. pp. 217-227.

- [15] Ma Z., Jeter S.M. and Abdel-Khalik S.I. "Flow network analysis application in fuel cells." *Journal of Power Sources*, vol. 108, 2002. pp. 106-112.
- [16] Kee J. Robert, Korada Pavan, Walters Kevin and Pavol Mark. "A generalized model of the flow distribution in channel networks of planar fuel cells." *Journal of Power Sources*, vol. 109, 2002. pp. 148-159.
- [17] Koh Joon-Ho, Seo Hai-Kyung, Lee Choong Gon, Yoo Young-Sung, Lim Hee Chun. *Journal of Power Source*, vol. 115, 2003. pp. 54-65.
- [18] Boersma R.J., Sammes N.M. "Computational analysis of the gas-flow distribution in solid oxide fuel cell stacks." *Journal of Power Sources*, vol. 63, 1996. pp. 215-219.
- [19] Achenbach E., Reus U. "The effect of mass flow distribution on the characteristics of a solid oxide fuel cell system." *Electrochemical Society Proceeding*, vol. 99-19, 1999.
- [20] Rechenauer Ch., Achenbach E. Report Forschungszentrum Julich, Nr. 2572, April 1993.
- [21] Achenbach E. *Journal of Power Sources*, vol. 49, 1994. pp. 333.
- [22] Argyropoulos P., Scott K. and Taama W.M. "Hydrodynamic modeling of direct methanol liquid feed fuel cell stacks." *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 30, 2000. pp. 899-913.
- [23] Argyropoulos P., Scott K. and Taama W.M. Submitted to *Journal of Fluid Engineering*.
- [24] Idelchik I. E. *Handbook of Hydraulic Resistance*. 2nd edition. New York : Hemisphere Publishing Corporation. 1986.
- [25] Savic D. A., Walters G.A. "Integration of a model for hydraulic analysis of water distribution networks with an evolution program for pressure regulation." *Civil Engineering*, vol. 11, 1996. pp. 87-97.
- [26] Cullimore and Ring Technologies Inc. *SINDA/FLUINT User's Manual*. Colorado, 1996.
- [27] Larminie J., Dick A. *Fuel Cell systems explained*. Chichester : John Wiley & Sons Ltd. 2000.

- [28] Frank M. White. **Fluid Mechanics**. Singapore : McGraw-Hill Inc. 1994.
- [29] Fox W. Robert, McDonald T. Alan. **Introduction to Fluid Mechanic**. USA : John Wiley &Son, Inc. 1985.
- [30] Versteeg H.K., Malalasekera W. **An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method**. London : Longman Group Ltd. 1995.
- [31] Creare Incorporated. **FLUENT MANUAL**. New Hampshire : Creare Incorporated. 1987.
- [32] AEA Technology Engineering Software Limited Waterloo. **CFX-TASCflow Theory Documentation Version 2.11**. Canada, 2001.
- [33] Schlichting H. **Boundary layer Theory**. 7th eds. USA : McGraw-Hill. 1979.
- [34] Computational Dynamics Ltd. **STAR-CD Version 3.15 Methodology**. 2001.

ภาคผนวก
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

15th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-15)

May 9th - 13th, 2004 Shangri - La Hotel, Bangkok, Thailand

ISTP
15



May 11, 2004

A-2-3 Forced Convection

- 50 A Three-dimensional Numerical Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of a Backward-facing Step Flow in a Duct –Effect of an Inlet Velocity Condition-
K. Inaoka, M. Nishimura, M. Senda and H. Iwai
Japan
- 51 Drag Reduction of an Enclosed Rotating Disk with Fine Spiral Grooves
Keizo Watanabe, Budiarso, Satoshi Ogata and Keigo Uemura
Indonesia and Japan
- 52 On The Behavior of Pressure Fluctuation in a Sudden Expansion Flow with Heated Gas Injection
Harinaldi and R. Trisno
Indonesia
- 53 An Experiment on Transition to Turbulence in Acceleration Pipe Flow
K. Nishihara, C. Knisely, H. Hagino and T. Nishitani
Japan and USA

A-2-4 Forced Convection

- 54 Heat Transfer of Falling Flow along a Vertical Grooved Plate
T. Adachi and D. Miyazaki
Japan
- 55 An Experimental Study on Swirling Flow with Heat Transfer in the Horizontal Circular Annuli
Tae-Hyun Chang
Korea
- 56 Flow-resistance and Thermal-resistance Minimizations of Dendritic Heat Convection on a Disk
W. Wechsato, S. Lorente and A. Bejan
Thailand, USA and France
- 57 Experimental and Modelling Studies on Flow Behavior in a Fuel Cell Stack
Wassachol Wattana, Nivat Nakayothinsakul, Sumittra Charojochkul, and Jarruwat Chareonsuk
Thailand
- 58 Characterization of the Flow Field in Passenger Cars
T.S. Tan, P. A. Aswatha Narayana and K.N. Seethearamu
Malaysia

EXPERIMENTAL AND MODELLING STUDIES ON FLOW BEHAVIOR IN A FUEL CELL STACK

Wassachol Wattana¹, Nivat Nakayothinsakul², Sumittra Charojrochkul², and Jaruwat Chareonsuk¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

² National Metal and Material Technology Center, 114 Paholyothin Rd., Klong 1, Klongluang, Pathumthani 12120, Thailand

ABSTRACT

In solid oxide fuel cell (SOFC), the cell stack geometry and gas flow distribution affects the temperature distribution in the stack during heat-up, operation and cool-down processes. The large temperature gradient can cause damage to cell components due to thermal stress. In this study, experimental apparatus is constructed to study a gas flow behavior in a fuel cell stack where the static pressures at three locations of the cell inlet and corresponding outlets are measured. In addition to experimental study, these gas flow behaviors are demonstrated using a computer simulation. Good agreement is obtained between simulation and experimental results. This basic design together with numerical validation have provided another mean of gathering information for a better understanding towards flow within the stack and its relationships with other factors in the SOFC multi-channel stack.

INTRODUCTION

A fuel cell is an electrochemical device which can continuously convert chemical energy directly to electrical energy. The basic physical structure of fuel cells consists of an electrolyte in contact with an anode and cathode on either side of the electrolyte. A gaseous fuel (typically hydrogen) is fed to the anode and an oxidant (oxygen in air) is fed to the cathode. Depending on the electrolyte of each fuel cell types, different reaction will occur at the electrode and also the operating temperature. Since an individual fuel cell produces approximately one Volt at full load, fuel cells are stacked in series to produce usable voltages or power. The benefits of fuel cell technology which are attractive are the high energy conversion efficiency and very low environmental emissions compare with conventional heat engine.

For solid oxide fuel cells (SOFC), the fuel catalytically reacts resulting in steam and electrons at the anode. The electrons go through an external circuit to provide direct electric current while the steam is a product between hydrogen and oxygen ion migrated from cathode through the electrolyte. The schematic and reactions are shown in Fig.1. Steam is the only byproduct of the reactions if hydrogen is used as a fuel. Waste heat from the reactions can be utilised in other thermal processes.

Nowadays, the stationary application is of interest for use in small and medium scale plants for combined heat and power generation. SOFC systems have some strategic interest for these applications, especially because their operation at high temperature (around 600–1000°C)

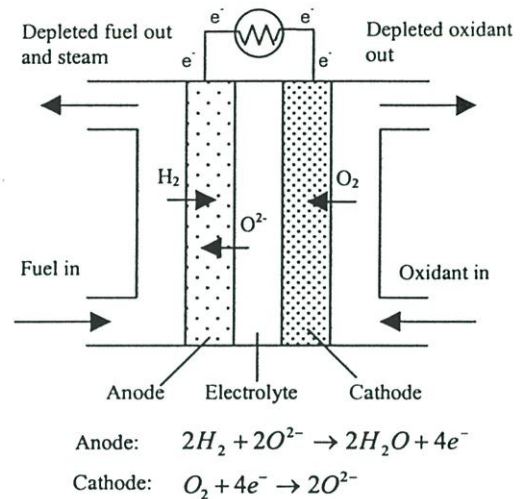


Fig.1 Basic physical structure and working concept of SOFC.

allows the use of a wide variety of fuels. Furthermore, the exhaust heat can be used as a heat source for a possibility of utilizing the remaining energy in a bottoming cycle for electric power generation. This leads to a further increase in the cell components of SOFC in solid state since various cell designs can be applied. There are essentially four different basic designs for SOFC system: the bipolar plate, monolithic, seal-less tubular, and segmented cell-in-series design. The schematic of a bipolar concept design is shown in Fig. 2.

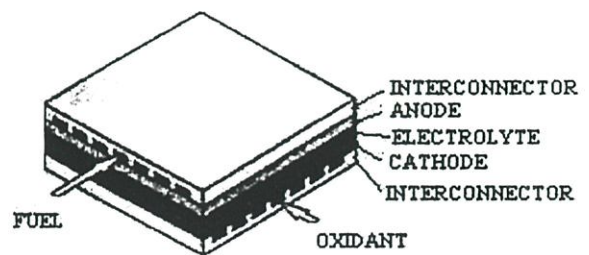


Fig. 2 Schematic diagram of bipolar plate concept design [1].

In a bipolar plate design, the interconnector must fulfill two functions: (1) forming the electrical contact between adjacent electrodes of connected cells and (2) supplying fuel gas and air into the anode and the cathode, respectively. Since the fuel is being consumed and heat is

released during operation of the SOFC, the flow design affects the current-potential distribution as well as the temperature distribution over the entire cell area [1]. The gas supply to the interconnector channel is made by two ways; (1) in an internal manifold, or (2) in an external manifold (see in Fig. 3).

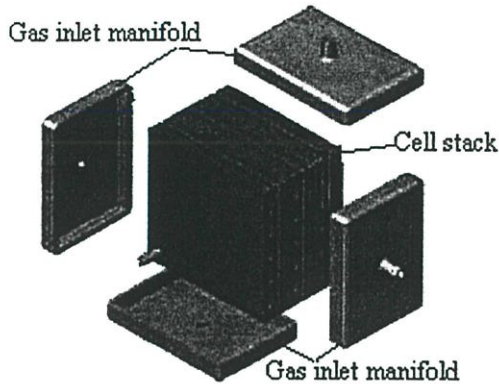


Fig. 3 External Manifold concept

The engineering problem in the design of fuel cell stack is the configuration of gas flow manifolds and the overall pattern of gas flow that must provide uniform flow distribution and stable operation. The geometrical structure and size of the gas manifolds are the important parameters to be considered. Typically, the flow pattern can be either a U-shape (reverse flow) where the outlet gas flows in the opposite direction to the inlet gas, or Z-shape (parallel flow) where the directions of the inlet and outlet gas flows are the same. Other types of flow pattern might be possible.

There are various types of research on fuel cells, especially in fuel cells modeling [2-9] which could be classified into three levels: modeling of the electrode and electrolyte, of a single cell, and of a cell stack or system [9]. For modeling work of the stack or system, the aims are at optimizations of design alternatives and determination of operating conditions. However, the modeling should be validated with experimental results. There have not been many large scale of fuel cell stack construction only for the purpose of an engineering test because of the cost.

This study presents the experimental apparatus used to measure flow distribution in the stack. The apparatus is designed based on the concept of minimizing both cost and complication. In addition, computational fluid dynamic (CFD) is also used to demonstrated the flow behaviour under the same condition. The validated simulation will provide an alternative mean of studying the flow aerodynamics therein under changing operating and geometrical conditions. The development of stack design will then be achieved using CFD, allowing the designer to have ideas of flow inside the stack prior to testing on the costly experimental apparatus.

2. EXPERIMENT

2.1 Experimental concept design

The aim of this experiment is to study a gas flow distribution in SOFC stack, because the uniform flow distribution will provide a high fuel cell performance [10]. The parameter used in demonstrating flow distribution characteristic is a pressure drop. The static pressures at the inlet and outlet of cell channel can be measured without disturbance on flow system. In addition, the gas flow channels are considered as small tubes. From the design condition, a flow channel should be as small as possible, and gas operating flow rate for each channel is quite small. Thus, the gas flow in channel is assumed to be laminar. The correlation between a flow rate and pressure drop of laminar flow in a duct is shown in equation (1) [11]. L and

$$\Delta P = \frac{8\mu L Q}{\pi R^4} \quad (1)$$

R is the geometry of the channel which is constant throughout the experiment operated at room temperature, thus the gas properties are constant. Equation (1) is rewritten as

$$\Delta P = KQ \quad (2)$$

where K is a constant value. The gas flow rate is proportional to a pressure drop as indicated in Equation (2). Therefore, the gas pressure drop in channels could be used to demonstrate flow distribution characteristics within the stack.

2.2 Experimental components design

The objective of this experiment is to study the flow behaviour and disregard, for the time being, the entire reactions to decrease complicated fabrication and assembly of the stack. The cell stack component is made of acrylic material except the gas distributor which is made from a zinc coated steel sheet. In addition, the sealing part and the cell plates are merged in one acrylic plate. Thus, each cell component consists of two acrylic plates. In this study, the experimental cell components are separated into two types according to their objective in the experiment. One is used to measure a static pressure at the inlet and outlet of the channel, the other is a normal component that introduce gas flow through channel to complete a flow system of the stack. There are three plates which are specially made for tapping the static pressure. Each cell contains three measured channels; the extreme left, the middle, and the extreme right channels. Figs. 4 and 5 show experimental cell components and experimental stack assembly with a gas distributor, respectively. Where A is the holes that connect to a micro-manometer, B is an interconnector and C is a seal plate.

2.3 Experimental procedure

Connect the complete stack to a gas cylinder, a micro-manometer, and a flow meter as in Fig. 6. The leak test of a cell stack is carefully carried out prior to each experiment.

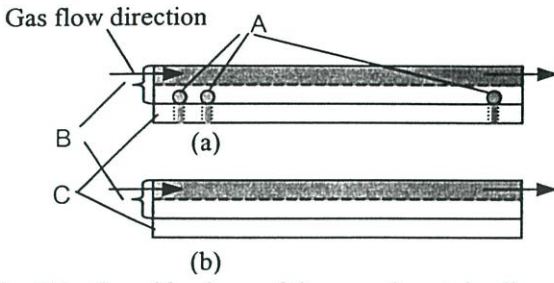


Fig. 4 Section side views of the experimental cell components (a) a cell with holes for static pressure measurement and (b) a normal cell component

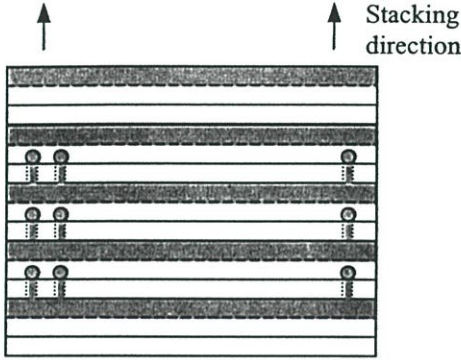


Fig. 5 Section side view of experimental stack assembly

3. MODELLING APPROACH

The model described here has been developed to study a gas flow behavior in a fuel cell stack with disregarding to the effect of reactions and gas transport in porous electrodes. This stack consists of 10 cells with 13 rectangular-cross-section channels in each cell, all in one flow direction. Gas is distributed into each channel by an external manifold or gas distributor. The flow domain is shown in Fig. 7. Consequently, to decrease time consumption in solving this problem, a computer simulation was carried out using an axis of symmetry of the flow domain.

A CFD code that solves algebraic finite-volume equations used in this study is STAR-CD [12]. For each of

generated mesh element in the fluid regions, STAR-CD solved the Navier-Stokes equations for conservation of mass

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j) = s_m \quad (3)$$

and momentum.

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \quad (4)$$

Fluid properties and boundary conditions of the flow domain used in the calculations, are listed in table 1.

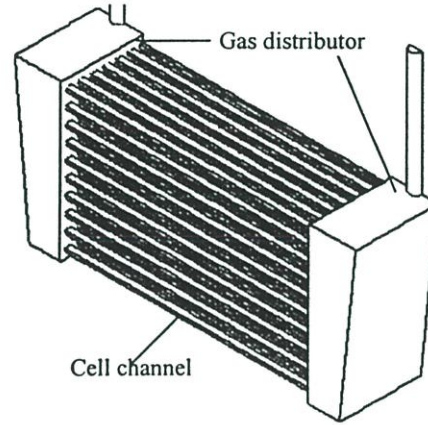


Fig. 7. Schematic of flow domain in a stack.

Table 1 Fluid properties and boundary conditions details.

State	Steady
Density	1.1453 kg/m ³
Viscosity	1.788x10 ⁻⁵ Ns/m ²
Inlet condition	Fixed mass
Outlet condition	Atmospheric P
Wall	Smooth

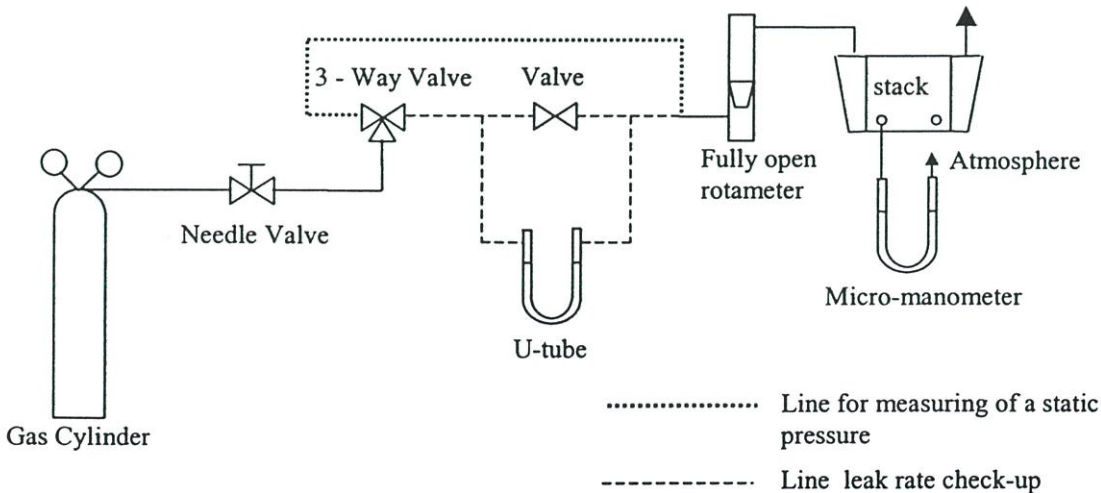


Fig. 6. Schematic diagram of the experimental setup.

4. EXPERIMENTAL AND MODELLING RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Experimental results

The pressure drops cross the middle cell channel at the far-end location (cell number 1) for two different manifold geometries are given in Fig. 8. The data suggest the linear relationship between pressure drop and the gas flow rate which is in laminar flow regime. The level of pressure drop is significantly different for each type of manifold geometry, indicating its effect on the amount of gas flowing through that channel. The gas distributor number one, GD#1 provides higher flow at cell number 1 as shown by higher pressure drops.

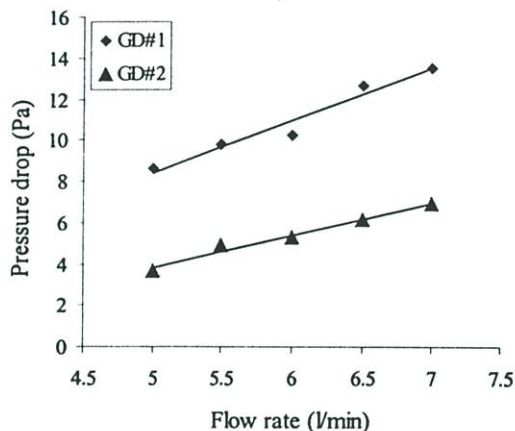


Fig. 8 Pressure drop across cell at the middle channel length was 60 mm.

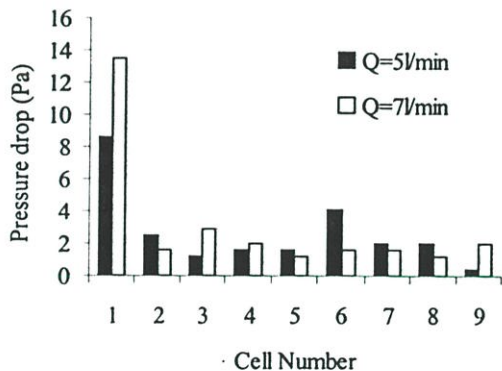


Fig. 9 Gas pressure drop distribution at the middle channel of cells in a stack which used GD#1.

Fig.9 illustrates the distributions of pressure drops across the numbers of cells within the stack from cell number 1 to cell number 9 which is next to the inlet. The relationship of the feeding flow and the pressure drop for cell number 1 is explained earlier. However, this relationship is not obvious from cell number 2 up to cell number 9. Change in flow aerodynamic in the manifold distributor as the mass flow rate increases causes an adverse effect to the amount of gas flow into the upper channels, i.e.; channel numbers 2, 5, 6, 7 and 8. The

opposite relationship is observed however, for channels numbers 3, 4 and 9.

4.2 Simulation results

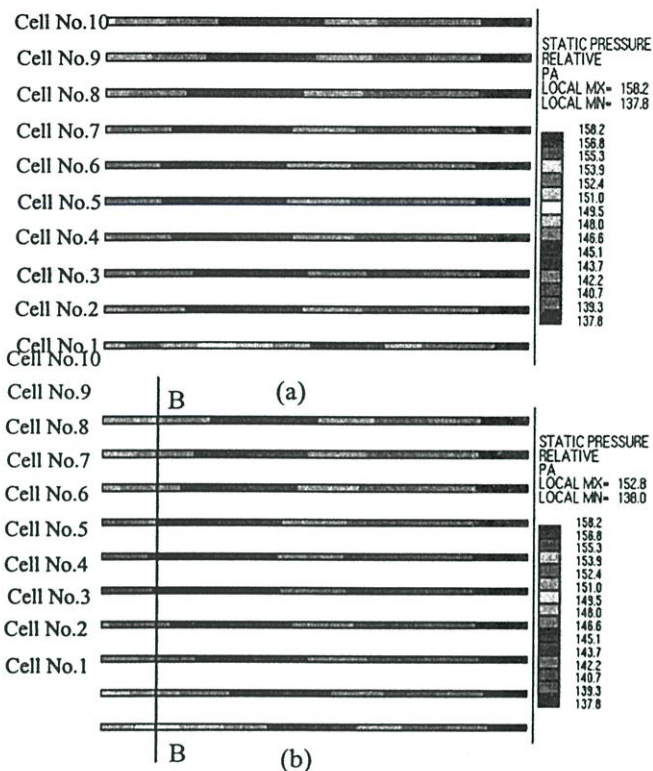
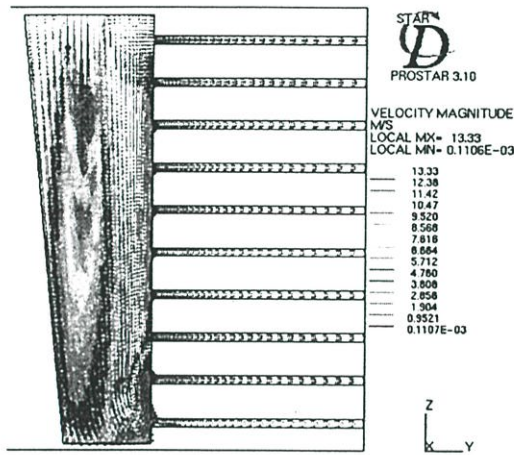


Fig.10 Pressure distribution of overall stack, which used GD#2 with inlet flow rate is 5 l/min at (a) the middle channel (b) at the extreme left channel.

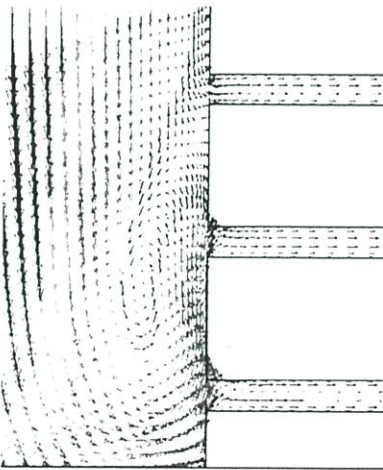
Due to difficulties in understanding the flow behavior in Fig.9, computer simulation for flow aerodynamics is introduced in order to investigate the aerodynamic of flow inside the manifold distributor that affect the flow in the channels, hence the pressure drop across them. STAR-CD® is used with k-ε turbulence model and the inlet condition is given in table 1. Fig.10 (a) shows the values of static pressure of the middle channels, where Fig.10 (b) shows the values at the extreme left channel close to the wall boundary. Each color bar represents the static pressure of each flow channel at each cell starting from cell number 1 right at the bottom and piling upward to cell number 9 at the top of each figure. It is clearly observed that the pressure does not evenly distribute (use line B-B as a reference line) and the gradient of the pressure along the channel is not constant (estimated by the length of color band width) especially next to the inlet, suggesting the developing flow therein. The pressure drop cross the channel of cell number 1 is highest. At a first glance, this observation is in good agreement with the experimental results in Fig.9, especially for cell channel number 1. The detailed investigation for this matter, however, will be discussed further in a later section.

The values of pressure drops are lowest at the middle location of the stack i.e.; at cell numbers 5, 6 and 7 of Fig.10. The distribution of velocity magnitude in the

manifold distributor at the inlet of these channels is coincidentally high, see Fig.11 (a). The direction of flow at this location is downward as a result of bulk flow inertia. As the inertia effect is high, the flow is likely moving away from the inlet rather than entering into it. The flow is, however, confined by the wall as it travels down to the location in front of the inlet of cell number 1, where the inertia force is converted to static pressure and the flow is controlled such that the velocity vectors in that zone point at the channel of cell number 1. The access flow passes channel number 1 in upward direction to the level of cell number 2 and creates the recirculation, see in Fig.12(b).



(a)



(b)

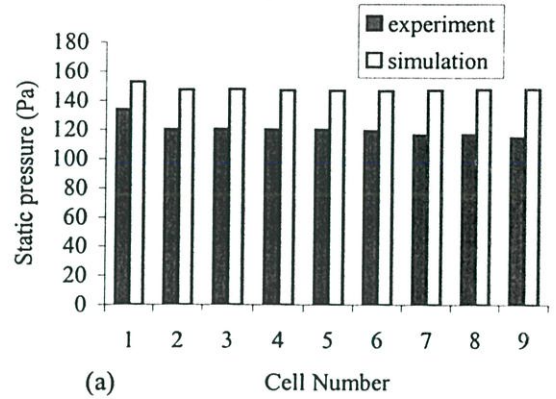
Fig. 11 Velocity distribution at (a) entire inlet gas distributor and (b) at the inlet of cell number 1-3 when used GD#2 to distribute gas.

The results from the experiment and simulation are compared in Fig.12. Fig.12 (a) shows the static pressure at the inlet of cell number 1. The experimental and simulation results are qualitatively in good agreement.

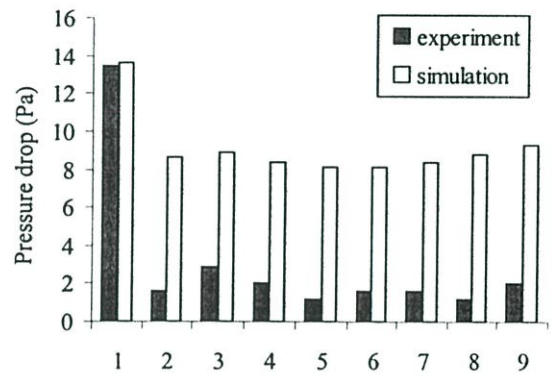
However, there is some disagreement quantitatively. This is due to a mismatch of pressure at the exit plane that rises up the pressure field all over the flow domain. The calculated pressure drops at various flow rates for cell see

Fig.13. However, there are errors occur in the upper cells, see Fig.12 (b).

To have an idea of flow structure where the static pressure is tapped out for measurement, the flow in that area is exclusively investigated. Fig.14. shows the 2-D



(a)



(b)

Fig. 12 Pressure drop and inlet pressure across middle channel along stack at Q=7 l/min when used with GD#1.

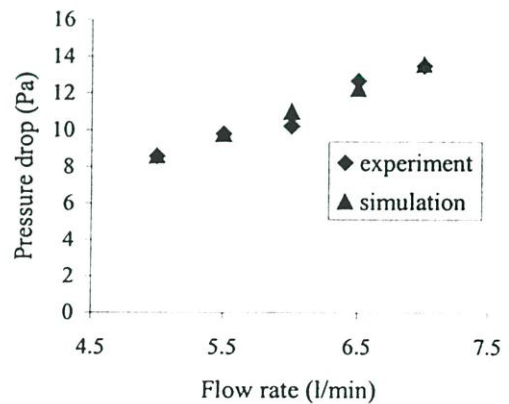


Fig. 13 Pressure drop across middle channel of cell number 1 when used with GD#1.

velocity profiles under the condition exclusively specified similarly to earlier 3-D simulation, but much finer grid arrangement. Velocity profile in channel of cell number 1 are symmetry in axial direction, see Fig. 14 (a). The profile, however, performs differently in channel of cell

number 5 where asymmetry of flow is observed; see Fig. 14 (b). In a 3-D simulation this phenomena cannot be detected due to a limitation of computer performance being unable to handle a large numbers of grid points. At this stage only conclusion drawn from this observation is that the flow velocities in front of the channel can cause deviation of flow pattern inside the channel thus affects to the pressure distribution therein. The refined version of flow velocity yields better validation against measured results. However, the detailed discussion for this matter will be given in later publication.

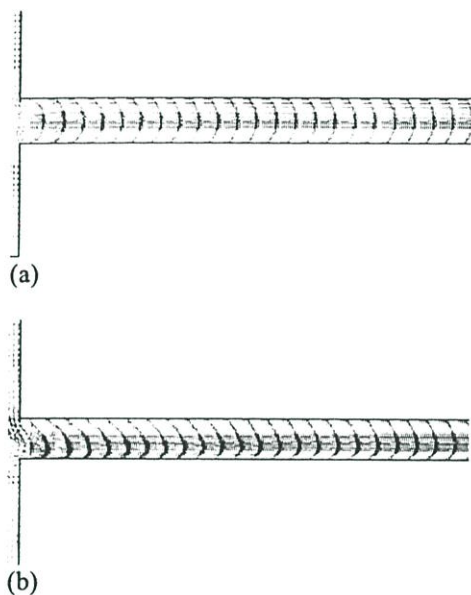


Fig.14 Exclusive velocity profile at the inlet cell number (a) 1 and (b) 5.

5. CONCLUSION

Modeling and experimental work is presented in this paper to investigate flow behaviors in fuel cell stack. The simulation results demonstrate that model is a useful tool for investigating flow behavior that could not be demonstrated by means of experiment. However, the model has to be validated in order to evaluate the degree of accuracy of the calculated results.

6. ACKNOWLEDGEMENT

The work summarized in this paper funded by National Metal and Material Technology Center (MTEC). Some instrument was supported by Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

7. NOMENCLATURE

K constant value
 L channel length
 p piezometric pressure
 Q flow rate
 R channel hydraulic radius
 \sqrt{g} determinant of metric tensor

ΔP pressure drop μ gas viscosity

ρ density

S_i momentum source components

S_m mass source

x_i Cartesian coordinate ($i = 1,2,3$)

t time

u_i absolute fluid velocity component in direction x_i

\tilde{u}_j $u_j - u_{cj}$, relative velocity between fluid and local (moving) coordinate frame that moves with velocity u_{cj}

τ_{ij} stress tensor components

8. REFERENCE

1. Fuel Cell Handbook, 5th ed. EG&G Services, Paeson Inc., US Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, West Virginia, 2000.
2. R.J. Boersma, N.M. Sammes, Computational analysis of the gas-flow distribution in solid oxide fuel cell stacks, *Journal of Power Sources* 63, 215-219, 1996.
3. R.J. Boersma, N.M. Sammes, Distribution of gas flow in internally manifolded in solid oxide fuel cell stacks, *Journal of Power Sources* 66, 41-45, 1997.
4. E. Achenbach, U. Reus, The effect of mass flow distribution on the characteristics of a solid oxide fuel cell system, *Electrochemical Society Proceeding* Vol.99-19, 1125-1134, 1999.
5. Haruhiko Hirata, Takao Nakagaki, Michio Hori, Pressure losses at dividing and combining junctions in a molten carbonate fuel cell stack, *Journal of Power Sources* 102, 118-123, 2001.
6. Z. Ma, S.M. Jeter, S.I. Abdel-Khalik, Flow network analysis application in fuel cells, *Journal of Power Sources* 108, 106-112, 2002.
7. Robert J. Kee, Pavan Korada, Kevin Walters, Mark Pavol, A generalized model of the flow distribution in channel networks of planar fuel cells, *Journal of Power Sources* 109, 148-159, 2002.
8. Joon-Ho Koh, Hai-Kyung Seo, Choong Gon Lee, Young-Sung Yoo, Hee Chun Lim, Pressure and flow distribution in internal gas manifolds of a fuel cell stack, *Journal of Power Sources* 115, 54-65, 2003.
9. Z. Ma, S.M. Jeter, S.I. Abdel-Khalik, Modeling the transport processes within multi-channel molten carbonate fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy* 28, 85-97, 2003.
10. A.J. Appleby, F.R. Foulkes, *Fuel Cell Handbook*, Kriger, FL, 1992.
11. Frank M. White, *Fluid Mechanics Sed.*, McGraw-Hill, NY, 2003.
12. STAR-CD Version 3.15 Methodology, Computational Dynamics Ltd., 2001.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาววรรษชล วัฒนนะ
วัน เดือน ปีเกิด	8 พฤศจิกายน 2519 ที่สุราษฎร์ธานี
ที่อยู่	110/9 ม. 3 ต. ทะเลทรัพย์ อ.ปะทิว จ.ชุมพร 86160
ประวัติการศึกษา	2542 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ประสบการณ์การทำงาน	
มี.ค.- พ.ค. 2541	นิสิตฝึกงาน ฝ่ายวิศวกรรม บริษัทกรุงเทพค้าสัตว์จำกัด อ.ศรีราชา จ. ชลบุรี
ก.ย. 2542 – เม.ย. 2543	ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกล บริษัทศิริไกรอุตสาหกรรมจำกัด
พ.ย. 2544 – ต.ค. 2547	ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย โครงการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของ แข็งเพื่อเป็นเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ แห่งชาติ
ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร