

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาผลกระทบของรูปร่างของชุดกระจายการไหลต่อการไหลเข้าภายใน
หอเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง

Study on Effect of Manifold Shape on Flow Behavior in Solid Oxide Fuel
Cell Stack



นายนิรันดร์ ปลื้มกระจ่าง
นายเอกลักษณ์ ฐปออ่อน
นายชนะชัย วนะรุจิ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**61776**
วัน,เดือน,ปี...**2.1.ก.ค. 2549**

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลกระทบของรูปร่างของชุดกระจายการไหลต่อการไหลเข้าภายใน
ห่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง

Study on Effect of Manifold Shape on Flow Behavior in Solid Oxide Fuel
Cell Stack



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาผลกระทบบของรูปร่างของชุดกระจายการไหลต่อการไหลเข้าภายในหอเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

Study on Effect of Manifold Shape on Flow Behavior in Solid Oxide Fuel Cell Stack

ผู้จัดทำ

1. นายชนะชัย วนะวุจิ
2. นายนิรันดร์ ปลื้มกระจ่าง
3. นายเอกลักษณ์ รูปอ่อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลกระทบของรูปร่างของชุดกระจายการไหลต่อการไหลเข้าภายในหอเซลล์เชื้อเพลิงแบบ
ออกไซด์ของแข็ง

นาย ชนะชัย วนะรุจิ 45015455
นาย นิรันดร์ ปลื้มกระจ่าง 45015419
นาย เอกลักษณ์ ฐป่ออน 45015448
ผศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิในการทำงานที่สูง แต่ใน
โครงการนี้จะทำการศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแผ่น (Plate Planar SOFC) ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้จำเป็นจะ
ต้องมีชุดกระจายการไหลเพื่อจะนำเชื้อเพลิงและอากาศเข้าสู่หอ-เซลล์เชื้อเพลิง ในการออกแบบชุด
กระจายการไหลจำเป็นจะต้องให้มีการกระจายการไหลภายในหอเซลล์ให้สม่ำเสมอเพื่อจะไม่ทำให้ตัว
เซลล์เกิดความแตกร้าวจากความแตกต่างของอุณหภูมิ

ในโครงการนี้ได้สร้างชุดทดลองขึ้นเพื่อศึกษาผลของการกระจายการไหลของชุดกระจายการ
ไหลในมุมเอียง 3 องศา โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สในการทดลองโดยทำการป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่
หอเซลล์เชื้อเพลิงและทำการวัดความดันสถิตจากमानอมิเตอร์แบบวัดละเอียดโดยใช้อัตราการไหล 2.5
ลิตรต่อนาที จากนั้นจะทำการ Simulation โดยใช้โปรแกรม STAR-CD ซึ่งเป็นโปรแกรมทาง Finite
Volume method มาวิเคราะห์การไหลในสภาวะเดียวกัน จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟจากผลการ
วิเคราะห์ผลของความดันสถิตในการทดลองและผลของการทำ Simulation มีความแตกต่างกันโดยค่า
ความดันสถิตของการทำ Simulation จะมีค่าสูงกว่าการทดลอง ในอีกส่วนหนึ่งจะนำชุดกระจายการไหลที่
ได้ทำการศึกษามาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม STAR-CD มาช่วยในการวิเคราะห์โดยทำการศึกษา 2 รูป
แบบคือแบบทรงโค้งมนกับแบบทรงเหลี่ยม โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงมุม 15,30,45,60 และ 75 องศา
ตามลำดับซึ่งจะใช้ในสภาวะการทำงานจริงของเซลล์เชื้อเพลิงและนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อแสดงผล
ระหว่างการกระจายตัวการไหลแบบทรงเหลี่ยมกับแบบทรงโค้งมน จากผลที่ได้จากกราฟแสดงให้เห็นว่า
ชุดกระจายการไหลแบบเหลี่ยมจะมีการกระจายการไหลที่ดีในมุมที่มากกว่า 45 องศา แต่รูปแบบโค้งมน
จะให้ผลของการกระจายการไหลที่ดีในมุมที่น้อยกว่า 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study on Effect of Manifold Shape on Flow Behavior in Solid Oxide Fuel Cell Stack

Mr. Chanachai Vanaruji	45015455
Mr. Nirund Plamkrajang	45015419
Mr. Akaluk Thup-on	45015448
Asst. Prof. Dr. Jarruwat Charoensok	Advisor

ABSTRACT

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) stack is a Fuel cell for high temperature operation. In the present study the project only focuses on Planar SOFC. This SOFC must have manifold for distribution of the air into SOFC stack. The manifold shape must have good design in order to evenly distribute flow and heat generated therein thus avoiding thermal gradient cracking.

In this project, experiment were carried out for a study on effect of manifold at the angle of 3 degrees. This experiment uses nitrogen as a working fluid in dummy cell stack and static pressures were measured from manometer at flow rate of 2.5 Litter per minute. After that Finite Volume method (by program STAR-CD) was used for simulation at inlet and the same boundary conditions. Static pressure from both experiment and simulation results were plotted against eachother. The calculated static pressure are generally higher than those observed from experiment.

STAR-CD were then used for analysis of flow behavior with varying manifold shape and angle, from 15,30,45,60 and 75 degrees. Results suggested that the filleted manifold yields better flow distribution than those without fillet. Moreover, the manifold with higher slope also provides better distribution than those with lower slope angles.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อประกอบการเรียนวิชาโปรเจก 1.2 ซึ่งนับว่าเป็นโอกาสอันดีที่ทำให้นักศึกษาได้นำความรู้ในภาคทฤษฎีมาทำการปฏิบัติการ เป็นการเพิ่มพูนความรู้และประสบการณ์ให้แก่นักศึกษา

ขอขอบคุณ ศศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและให้คำแนะนำในด้านต่างๆ ขอขอบคุณ คุณ นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล ที่แนะนำหนังสือและแหล่งข้อมูลเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประโยชน์มากต่อการทำโครงการนี้และสุดท้ายขอขอบคุณ คุณวรัชชล วัฒนนะและคุณ นิวัฒน์ ภูเจริญ ที่ให้คำปรึกษาและข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างมากต่อโครงการชิ้นนี้

ขอขอบคุณบุคคลสำคัญที่สุดคือบิดามารดาอันเป็นที่เคารพรักรักยิ่งโดยให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมาในทุกๆด้าน อันหาที่เปรียบมิได้ จึงขอระลึกถึงในพระคุณอันสุดประมาณและขอกราบขอพระคุณมา ณ ที่นี้

นาย ชนะชัย วนะรุจิ
นาย นิรันดร์ ปลื้มกระจ่าง
นาย เอกลักษณ์ ฐูปอ่อน
มีนาคม 2548



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)	4
2.3 การออกแบบเซลล์และชั้นวางเซลล์	6
2.4 แบบจำลอง (Model) และการวิเคราะห์	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 การจำลองการไหล	21
3.1 บทนำ	21
3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	21
3.2.1 สมการพื้นฐานของการไหล	21
3.2.1.1 สมการอนุรักษ์มวล	22
3.2.1.2 สมการโมเมนตัม	23
3.2.1.3 สมการ Navier-Stokes สำหรับ Newtonian fluid	25
3.3 การ Discretisation	26
3.3.1 เงื่อนไขขอบเขต	28
3.3.2 กระบวนการหาคำตอบโดยวิธี SIMPLE Algorithm	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 4 การทำการทดลองและการทำการ Simulation ในรูปทรงที่ทำการศึกษา	30
4.1 การทำการเปรียบเทียบการทดลองกับการ Simulation	30
4.1.1 การออกแบบชุดทดลอง	30
4.1.1.1 กำลังไฟฟ้าจากชุดทดลอง	30
4.1.1.2 อัตราการไหลของไฮโดรเจน	30
4.1.1.3 อัตราการไหลของอากาศ	31
4.1.1.4 คำนวณหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์	31
4.1.1.5 คำนวณหาค่าความเร็วของไฮโดรเจนที่ใช้ในการทดลอง	32
4.1.2 เครื่องมือวัดและเทคนิคการวัด	34
4.1.2.1 การวัดความดัน	34
4.1.2.2 การปรับอัตราการไหล	35
4.1.2.3 การประกอบชุดทดลอง	37
4.1.2.4 วิธีการทดลอง	41
4.1.2.4.1 วิธีการตรวจสอบการรั่ว	41
4.1.2.4.2 การวัดค่าความดันสูญเสียในช่องการไหล	43
4.1.3 การ Simulation เปรียบเทียบกับการทดลอง	45
4.1.3.1 ขั้นตอนการสร้างแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์	45
4.1.3.2 ขั้นตอนการแบ่ง Mesh ในโปรแกรมแบ่ง Mesh	46
4.1.3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล	48
4.2 การทำการ Simulation ในรูปทรงที่เปลี่ยนแปลงมุม	50
4.2.1 กำลังไฟฟ้าจากชุดทดลอง	50
4.2.2 อัตราการไหลของไฮโดรเจน	51
4.2.3 อัตราการไหลของอากาศ	51
4.2.4 คำนวณหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์	52
4.2.5 ขั้นตอนการสร้างแบบที่ใช้ในการศึกษาของชุดกระจายการไหล	
ในการทำ Simulation	53
4.2.5.1 รูปแบบทรงโค้ง	53
4.2.5.1.1 ทำการสร้างโมเดลรูปแบบทรงโค้งมน	
ในโปรแกรม Unigrahpic	53
4.2.5.1.2 ขั้นตอนของการแบ่ง Mesh ของชิ้นงาน	54
4.2.5.1.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล	55
4.2.5.2 รูปทรงแบบเหลี่ยม	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

4.2.5.2.1	ทำการสร้างโมเดลรูปแบบทรงแบบเหลี่ยม ในโปรแกรม Unigraphic	57
4.2.5.2.2	ขั้นตอนของการแบ่ง Mesh ของชิ้นงาน	58
4.2.5.2.3	ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล	59
บทที่ 5 ผลการทดลองและผลที่ได้จากการ Simulation		
5.1	ผลของการ Simulation ที่จะนำมาเปรียบเทียบกับทดลอง	61
5.2	ผลของการ Simulation ของชุดกระจายการไหลที่นำมาศึกษา	72
5.2.1	ผลของการ Simulation ของชุดกระจายการไหลแบบทรงโค้งมนที่นำมาศึกษา	72
5.2.2	ผลของการ Simulation ของชุดกระจายการไหลแบบทรงเหลี่ยมที่นำมาศึกษา	72
บรรณานุกรม		112



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2-1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	5
2-2 เซลล์รูปแบบต่าง ๆ	6
2-3 องค์ประกอบของเซลล์แบบแผ่น	7
2-4 รูปแบบการไหลแบบต่าง ๆ	8
2-5 แนวคิดการป้อนแก๊สแบบ External manifold	9
2-6 แนวคิดการป้อนแก๊สแบบ Internal manifold	10
2-7 แนวคิดการป้อนแก๊สแบบอื่น ๆ	11
2-8 เครื่องหมายของ Hydraulic resistance ที่เกิดขึ้นภายในชั้นวางเซลล์	14
2-9 ชั้นวางเซลล์ที่ใช้พัฒนาแบบจำลอง	16
2-10 เครื่องหมายการไหลของเซลล์เชื้อเพลิง	18
2-11 ชุดทดลองเพื่อวัดความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเครื่องหมายการไหลจากรูปที่ 2-10	19
2-12 การเปรียบเทียบค่าความดันสูญเสียด้านคาโทดที่ได้จากการวัดและการจำลอง	20
3-1 เอลิเมนต์ของของไหล	21
3-2 การไหลเข้าและออกจากเอลิเมนต์ของของไหล	23
3-3 องค์ประกอบของความเค้นบนพื้นผิวทั้งหมดด้านของเอลิเมนต์ของไหล	24
3-4 ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสมการ Discretised เมื่อการไหลไปในทิศทางบวก	27
3-5 ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสมการ Discretised เมื่อการไหลไปในทิศทางลบ	27
3-6 แผนผังของ SIMPLE algorithm	29
4-1 รูปของโรตاميเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	33
4-2 รูปของมานอมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	34
4-3 ภาพระดับสายตาที่ใช้วัด	35
4-4 การดัดแปลงโรตاميเตอร์เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการอ่านค่าอัตราการไหล	36
4-5 แสดงการประกอบเข็มฉีดยาเข้ากับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม	37
4-6 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 2	37
4-7 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 3	38
4-8 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 4	38
4-9 แสดงโครงสร้างของชุดกระจายการไหล	39
4-10 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 5	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4-11 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 5	40
4-12 การประกอบชุดทดลองตามข้อ 7	40
4-13 การประกอบชุดทดลองสำหรับการทำการทดลอง	41
4-14 การตรวจสอบการรั่วโดยการนำชุดทดลองทั้งชุดจุ่มในน้ำสะอาด	42
4-15 แผนผังอุปกรณ์ต่างในการทดลอง	42
4-16 แสดงชุดทดลองที่พร้อมทำการทดลอง	43
4-17 แสดงการปรับ Pressure regulator ไปที่ค่าที่ต่ำที่สุด	44
4-18 แสดงการอ่านอัตราการไหลจากโรตاميเตอร์	44
4-19 แสดงการอ่านระดับความสูงของน้ำมันในมานอมิเตอร์	44
4-20 แบบของปริมาตรของชุดทดลองที่นำไปวิเคราะห์	45
4-21 แบบที่ทำการแบ่งครึ่งเพื่อนำไปแบ่ง Mesh	45
4-22 ที่ทำการแบ่ง Mesh	46
4-23 แบบที่แบ่ง Mesh บริเวณท่อทางออกของไนโตรเจน	46
4-24 รูปขยายของ Mesh ที่บริเวณทางเข้าช่องทางการไหลของชั้นวางเซลล์ โดยจะมีความละเอียดบริเวณทางเข้าของช่องทางการไหล	47
4-25 รูปของการแบ่ง Mesh ที่ระนาบ 2 มิติ	47
4-26 รูปขยายของการแบ่ง Mesh บริเวณทางเข้าของชั้นวางเซลล์	48
4-27 รูปของการใส่ เส้นใยทางเข้าของแก๊สไนโตรเจน	48
4-28 รูปของการใส่ เส้นใยทางออกของแก๊สไนโตรเจน	49
4-29 รูปของการทำการกำหนดให้แบบสมมาตรกัน	49
4-30 แบบทรงโค้งมนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงมุม	50
4-31 แบบทรงเหลี่ยมที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงมุม	50
4-32 รูปของแบบที่วาดและทำการแบ่งเป็น 4 ส่วน	53
4-33 รูปของแบบ 1 ใน 4 ส่วนที่นำไปวิเคราะห์	53
4-34 รูปของการแบ่ง Mesh	54
4-35 ภาพขยายของ Mesh บริเวณทางท่อทางเข้า	54
4-36 ภาพขยายของ Mesh บริเวณทางเข้าของช่องทางการไหลของชั้นวางเซลล์	55
4-37 รูปของการใส่ เส้นใยทางเข้าของอากาศ	55
4-38 รูปของการใส่ เส้นใยทางออกของอากาศ	56
4-39 รูปของการทำการกำหนดให้แบบสมมาตรกัน	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4-40 รูปของแบบที่วาดและทำการแบ่งเป็น 4 ส่วน	57
4-41 รูปของแบบ 1 ใน 4 ส่วนที่นำไปวิเคราะห์	57
4-42 รูปของการแบ่ง Mesh	58
4-43 ภาพขยายของ Mesh บริเวณทางท่อทางเข้า	58
4-44 ภาพขยายของ Mesh บริเวณทางเข้าของช่องทางการไหลของชั้นวางเซลล์	59
4-45 รูปของการใส่ เงื่อนไขทางเข้าของอากาศ	59
4-46 รูปของการใส่ เงื่อนไขทางออกของอากาศ	60
4-47 รูปของการทำการกำหนดให้แบบสมมาตรกัน	60
5-1 ผลของความเร็วที่ได้จากการ Simulation ในรูปแบบทรง 3 มิติ	61
5-2 ผลของความเร็วที่ระนาบ 2 มิติ	61
5-3 ภาพของความเร็วที่ชุดกระจายการไหลที่ใช้ในการทดลอง	62
5-4 ภาพขยายบริเวณทางเข้าของชั้นวางเซลล์ที่ตำแหน่งชั้นล่างสุดและชั้นสูงขึ้นไป	62
5-5 ผลของความดันสถิตที่ได้จากการ Simulation ในรูปทรง 3 มิติ	63
5-6 ผลของความดันสถิตที่ได้จากการ Simulation ที่ระนาบ 2 มิติ	63
5-7 ผลของความดันสถิตที่ได้จากการ Simulation ในช่องทางการไหลของชั้นวางเซลล์ในรูปทรง 3 มิติ	64
5-8 ผลของความดันสถิตที่ได้จากการ Simulation ในช่องทางการไหลของชั้นวางเซลล์ในระนาบ 2 มิติ	64
5-9 ตำแหน่งต่างๆของการเก็บผลของความดันสถิตที่ทางเข้าของช่องทางการไหล	65
5-10 ตำแหน่งต่างๆของการเก็บผลของความดันสถิตที่ทางออกของช่องทางการไหล	65
5-11 รูปของจำนวนชั้นวางเซลล์ ที่ทำการวัดและเก็บค่าของ Static Pressure ของการทดลองและ Simulation	66
5-12 กราฟเปรียบเทียบ Static Pressure ระหว่างการทดลองกับการทำ Simulation ที่ตำแหน่งทางเข้าริมซ้ายของชั้นวางเซลล์(Stack)	67
5-13 กราฟเปรียบเทียบ Static Pressure ระหว่างการทดลองกับการทำ Simulation ที่ตำแหน่งทางออกริมซ้ายของชั้นวางเซลล์	68
5-14 กราฟเปรียบเทียบ Static Pressure ระหว่างการทดลองกับการทำ Simulation ที่ตำแหน่งทางเข้า กลางของชั้นวางเซลล์ในชั้นเซลล์ต่างๆ	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5-15 กราฟเปรียบเทียบ Static Pressure ระหว่างการทดลองกับการทำ Simulation ที่ตำแหน่งทางออกกลางของชั้นวางเซลล์ในชั้นเซลล์ต่างๆ	69
5-16 กราฟเปรียบเทียบ Static Pressure ระหว่างการทดลองกับการทำ Simulation ที่ตำแหน่งทางเข้าริมขวาของชั้นวางเซลล์(Stack)	70
5-17 กราฟเปรียบเทียบ Static Pressure ระหว่างการทดลองกับการทำ Simulation ที่ตำแหน่งทางออกทางขวาของชั้นวางเซลล์ในชั้นเซลล์ต่างๆ	70
5-18 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 15 องศา	72
5-19 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 15 องศา	73
5-20 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 15 องศา	73
5-21 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 15 องศา	74
5-22 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 15 องศา (ระนาบ Y-Z)	74
5-23 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 30 องศา	75
5-24 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 30 องศา	75
5-25 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 30 องศา	76
5-26 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 30 องศา	76
5-27 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 30 องศา (ระนาบ Y-Z)	76
5-28 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 45 องศา	78
5-29 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 45 องศา	79
5-30 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 45 องศา	79
5-31 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 45 องศา	80
5-32 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 45 องศา (ระนาบ Y-Z)	80
5-33 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 60 องศา	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5-34 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 60 องศา	82
5-35 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 60 องศา	82
5-36 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 60 องศา	83
5-37 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 60 องศา (ระนาบ Y-Z)	83
5-38 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 75 องศา	84
5-39 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 75 องศา	85
5-40 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 75 องศา	85
5-41 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 75 องศา	86
5-42 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 75 องศา (ระนาบ Y-Z)	86
5-43 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 15 องศา	87
5-44 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 15 องศา	88
5-45 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 15 องศา	88
5-46 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 15 องศา	89
5-47 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 15 องศา (ระนาบ Y-Z)	89
5-48 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 30 องศา	90
5-49 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 30 องศา	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

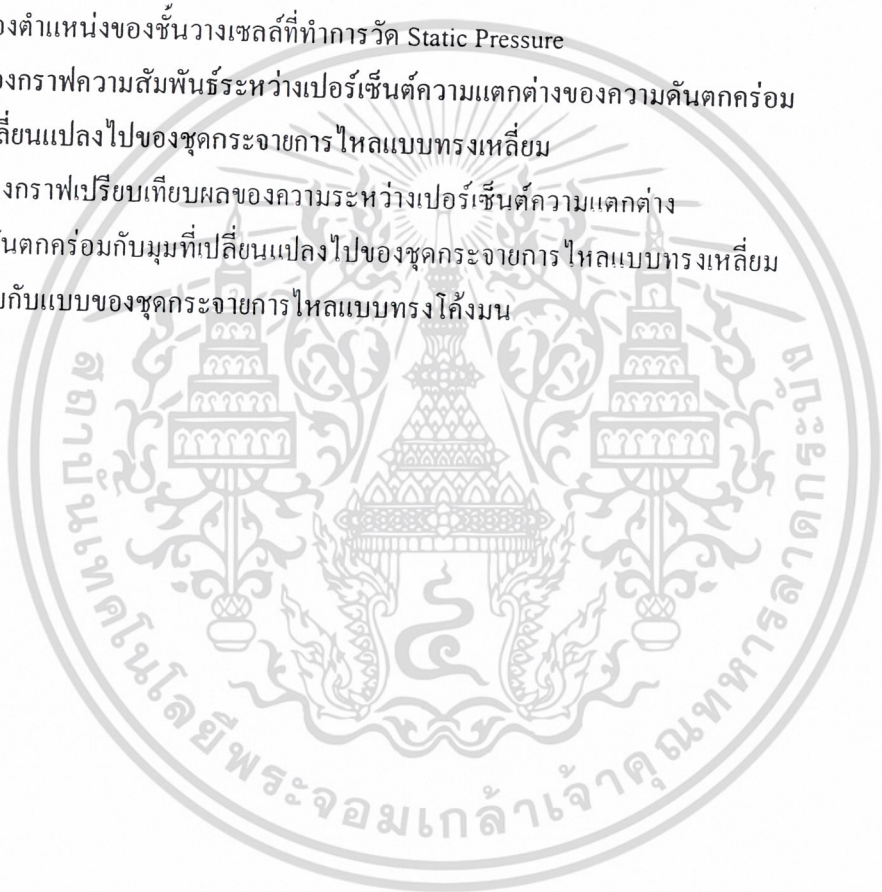
สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5-50 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 30 องศา	91
5-51 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 30 องศา	92
5-52 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 30 องศา (ระนาบ Y-Z)	92
5-53 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 45 องศา	93
5-54 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 45 องศา	93
5-55 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 45 องศา	94
5-56 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 45 องศา	95
5-57 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 45 องศา (ระนาบ Y-Z)	95
5-58 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 60 องศา	96
5-59 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 60 องศา	97
5-60 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 60 องศา	97
5-61 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 60 องศา	98
5-62 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 60 องศา (ระนาบ Y-Z)	99
5-63 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 75 องศา	99
5-64 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 75 องศา	100
5-65 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 75 องศา	100
5-66 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 75 องศา	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5-67 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยม ที่มุม 75 องศา (ระนาบ Y-Z)	101
5-68 รูปของตำแหน่งของชั้นวางเซลล์ที่ทำการวัด Static Pressure	102
5-69 รูปความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความดันตกคร่อม กับมุมที่เปลี่ยนไปของชุดกระจายการไหลแบบโค้งมน	105
5-70 รูปของตำแหน่งของชั้นวางเซลล์ที่ทำการวัด Static Pressure	106
5-71 รูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความดันตกคร่อม กับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยม	109
5-72 รูปของกราฟเปรียบเทียบผลของความระหว่างเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความดันตกคร่อมกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยม เปรียบเทียบกับแบบของชุดกระจายการไหลแบบทรงโค้งมน	110



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในด้านต่างๆ มีการพัฒนาอย่างมากทำให้มีการใช้พลังงานในปริมาณมากขึ้น ปัญหาที่ตามมาคือปัญหาการขาดแคลนพลังงาน เนื่องจากมีการใช้เชื้อเพลิงมากขึ้นมีผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่มีสำรองอยู่ในธรรมชาติลดลง ด้วยเหตุนี้จึงควรหาวิธีในการประหยัดพลังงาน โดยการใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด และอีกปัญหาหนึ่งคือปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ทำให้เกิดมลพิษขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการหาแนวทางแก้ไขดังกล่าวโดยการหาหน่วยผลิตพลังงานใหม่ที่มีประสิทธิภาพ และไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) [1] เป็นหน่วยผลิตพลังงานใหม่อีกชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจมากในปัจจุบัน หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงคือเมื่อมีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปอย่างสม่ำเสมอเซลล์เชื้อเพลิงจะเปลี่ยนพลังงานเคมี (Electrochemical process) [2] ของเชื้อเพลิงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยเซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง คราบที่มีการป้อนของเชื้อเพลิงและออกซิโดซ์ ทำให้ได้ไฟฟ้าและความร้อน โดยไม่มีกระบวนการเผาไหม้ ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นหน่วยผลิตพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง และเป็นหน่วยผลิตพลังงานที่สะอาด ไม่ทำลายสภาพแวดล้อม เนื่องจากสิ่งที่ถูกปล่อยออกจากเซลล์เชื้อเพลิงมีเพียงไอน้ำและความร้อนเท่านั้น ปัจจุบันได้มีการค้นคว้าและพัฒนาจนมีเซลล์เชื้อเพลิงหลายชนิดแตกต่างกันไปตามวัสดุที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งเป็นชนิดที่ทำงานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งนิยมนำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นกำลัง สามารถผลิตไฟฟ้าร่วมกับระบบกังหันแก๊สได้ โดยทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของระบบรวมสูงมากขึ้น จะเห็นได้ว่าหากสามารถผลิตเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ตลอดจนสร้างระบบการผลิตไฟฟ้าได้เองภายในประเทศแล้ว จะก่อประโยชน์แก่ประเทศไทยเป็นอย่างมาก กล่าวคือสามารถลดการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน และสามารถนำเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ภายในประเทศจากผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งเป็นการเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรอีกทางหนึ่งด้วย นอกจากนี้ยังสามารถลดปัญหาต่างๆ เกี่ยวกับการสร้างเขื่อนเพื่อผลิตไฟฟ้า เนื่องจากระบบของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นสามารถติดตั้งในที่ชุมชนได้เพราะไม่มีเสียงดังรบกวน ไม่ก่อมลพิษแก่สิ่งแวดล้อม

ในโครงการนี้ทำการศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel cell) เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบอื่นๆ องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งเป็นเซรามิกซึ่งทำงานที่อุณหภูมิสูงทำให้เซลล์ที่มีรูปร่างแผ่นแบน บาง ง่ายต่อการแตกร้าวในระหว่างการอุ่นระบบจากอุณหภูมิห้อง ไปยังอุณหภูมิการทำงาน และการลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิการทำงาน ไปยังอุณหภูมิห้องนั้น หากเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่แผ่นเซลล์เกินกว่าที่เซลล์รับได้ อาจทำให้เซลล์แตกได้ ดังนั้นการกระจายการไหลที่สม่ำเสมอทั่วทั้งชั้นวางเซลล์เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้อง

พิจารณาในการออกแบบชั้นวางเซลล์ ซึ่งปัญหาการกระจายการไหลภายในเซลล์เชื้อเพลิงนั้นอาจเกิดได้หลายปัจจัย แต่ในโครงการนี้ได้ทำการศึกษาในส่วนของคุณกระจายการไหลแบบภายนอก (External Manifold) โดยจะทำการศึกษาในส่วนรูปร่างของคุณกระจายการไหล ว่ามีผลกระทบต่อพฤติกรรมของการไหลเข้าภายในหอเซลล์เชื้อเพลิงอย่างไร ด้วยกระบวนการทาง Finite Volume Method โดยใช้โปรแกรม STAR-CD[3] มาเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลและทำการทดลองเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของโปรแกรม STAR-CD ด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการทำ Simulation
- 1.2.2 ประเมินความน่าเชื่อถือของโปรแกรม STAR-CD
- 1.2.3 ศึกษาถึงคุณกระจายการไหลที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลในหอเซลล์เชื้อเพลิง
- 1.2.4 หาขนาดและรูปร่างของคุณกระจายการไหลที่มีการกระจายตัวของการไหลที่ดี

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 การไหลในระบบเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow)
- 1.3.2 กำหนดให้คุณสมบัติต่างๆ ของของไหลในระบบมีค่าคงที่ เช่น ความหนาแน่น ความหนืด เป็นต้น
- 1.3.3 กำหนดให้การไหลภายในช่องนำการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow)
- 1.3.4 พิจารณาการไหลในระบบสามมิติแบบสมมาตร

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.4.1 ออกแบบและสร้างชุดทดลอง
- 1.4.2 ทำการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการกระจายการไหลที่มุมเอียงของคุณกระจายการไหลเท่ากับ 3 องศา
- 1.4.3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องโดยใช้แก๊สในโตรเจนเป็นของไหลในการทดลอง
- 1.4.4 จำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม STAR-CD และจำลองการไหลที่เงื่อนไขต่อไปนี้
 - 1.4.4.1 สภาวะเดียวกับการทดลอง
 - 1.4.4.2 สภาวะจริงในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง
- 1.5.2 สืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทำการศึกษา
- 1.5.3 ออกแบบส่วนประกอบของชั้นวางเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง
- 1.5.4 ออกแบบและสร้างชุดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.5.5. ทำการทดลอง
- 1.5.6. ศึกษาการใช้งาน โปรแกรม STAR-CD[®]
- 1.5.7. พัฒนาแบบจำลองการไหลจากการทดลองโดยใช้โปรแกรม STAR-CD[®]
- 1.5.8. ทำการจำลองการไหล
- 1.5.9. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองและผลการจำลองการไหล

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 สามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมของของไหลที่ไหลเข้าสู่ชุดกระจายการไหล
- 1.6.2 เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบของชุดกระจายการไหลต่อไปในอนาคต
- 1.6.3 เพื่อนำความรู้จากที่เรียนมาประยุกต์ใช้กับปัญหาให้เกิดประโยชน์
- 1.6.4 สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาทำการออกแบบและประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านวิศวกรรมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)

2.1 บทนำ

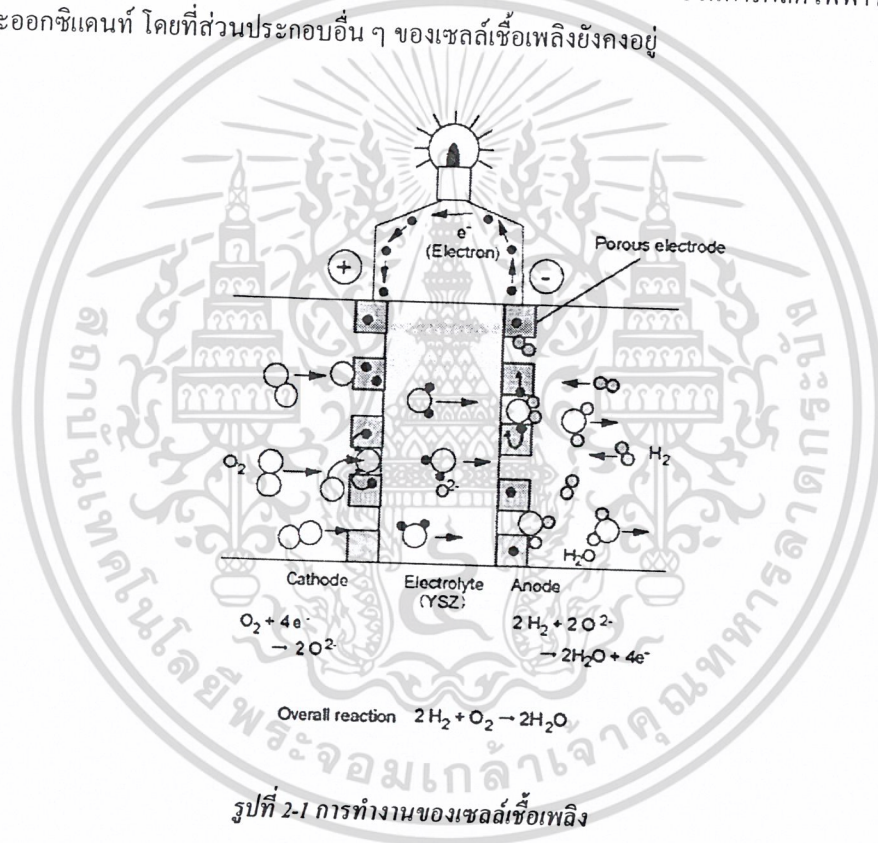
การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต้องอาศัยหลายส่วนประกอบกันขึ้นเป็นระบบที่สมบูรณ์จึงจะสามารถนำไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้จริง การออกแบบในแต่ละส่วนจึงต้องมีความรู้และความเข้าใจในการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงโดยรวม เพื่อที่จะสามารถนำแต่ละส่วนมาประกอบกันโดยที่ทำการการทำงานของระบบโดยรวมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นก่อนที่จะกล่าวถึงการออกแบบชั้นวางเซลล์จึงต้องกล่าวถึงการทำงานในภาพรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งก่อน จากนั้นจึงกล่าวถึงงานวิจัยซึ่งเป็นที่มาและเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์เล่มนี้

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)

เซลล์เชื้อเพลิงคือหน่วยที่แปลงพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงและออกซิเจน (Oxidant) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงจากระบบการทางเคมีไฟฟ้า โดยไม่เกิดการเผาไหม้แต่อย่างใด รวมทั้งสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องครบเท่าที่ยังป้อนเชื้อเพลิงและออกซิเจนให้แก่ระบบ เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดด้วยกัน แตกต่างตามชนิดของวัสดุอิเล็กโทรไลต์ที่เลือกใช้ รวมถึงอุณหภูมิการทำงาน เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600-1000°C โดยที่ส่วนประกอบทั้งหมดของเซลล์เป็นของแข็ง ทำให้ลดปัญหาเกี่ยวกับการกัดกร่อนเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ที่มีส่วนประกอบเป็นของเหลว นอกจากนี้การที่มีอุณหภูมิการทำงานสูงทำให้เกิดข้อดีหลายประการด้วยกัน ได้แก่ สามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายขึ้นเนื่องจากสามารถป้อนเชื้อเพลิงที่เป็น สารประกอบไฮโดรคาร์บอน หรือแอลกอฮอล์ เข้าไปทำปฏิกิริยาในเซลล์ได้โดยตรง (Internal reforming) หรืออาจทำให้ไฮโดรเจนแตกตัวก่อนป้อนเข้าไปทำปฏิกิริยา (External reforming) นอกจากนี้ยังไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพงเช่นแพลตินัม ข้อดีอีกประการที่สำคัญคือความร้อนและน้ำที่ได้จากการทำปฏิกิริยาซึ่งอยู่ในสถานะของไอน้ำสามารถนำไปป้อนกังหันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีก ทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงมากขึ้น

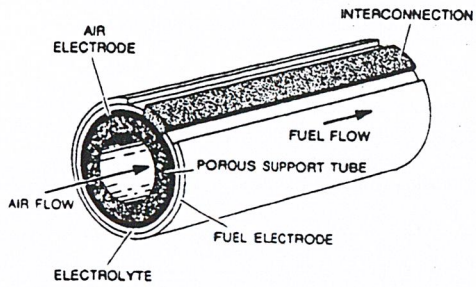
โดยปกติแล้วองค์ประกอบพื้นฐานของ SOFC ประกอบด้วย อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งถูกประกบด้วยขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) สองขั้ว ได้แก่แอโนด (Anode) และ คาโทด (Cathode) โดยขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองนั้นต้องเป็นวัสดุที่มีความพรุนตัว แต่อิเล็กโทรไลต์ต้องเป็นวัสดุที่แก๊สไม่สามารถแพร่ผ่านได้ โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่นิยมใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ คาโทด และแอโนด ได้แก่ Yttria-stabilised zirconia (YSZ), Lanthanum strontium manganite (LSM), nickel/zirconia cermet (Ni/YSZ) ตามลำดับ จากรูปที่ 2-1 เซลล์

เชื้อเพลิงสามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยการป้อนเชื้อเพลิงซึ่งโดยปกติคือไฮโดรเจนเข้าไปสัมผัสกับบริเวณที่เป็นแอโนดซึ่งไฮโดรเจนจะแพร่ผ่านรูพรุนของแอโนดไปยังบริเวณที่แอโนดสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์เกิดเป็นสถานะ Three phase boundaries, (TPB: แก๊ส, อิเล็กโทรด, และอิเล็กโทรไลต์) ที่อุณหภูมิการทำงานไฮโดรเจนจะรวมตัวกับออกซิเจนไอออนซึ่งวิ่งผ่านชั้นอิเล็กโทรไลต์มาจากขั้วคาโทดได้น้ำ ความร้อนและอิเล็กตรอน แต่อิเล็กโทรไลต์นั้นมีคุณสมบัติไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงวิ่งไปยังขั้วคาโทดโดยผ่านทางวงจรภายนอก (External circuit) สำหรับด้านคาโทดที่รับออกซิเจน (Oxidant) ซึ่งได้ออกซิเจนจากอากาศจะแพร่ผ่านรูพรุนของขั้วคาโทดไปยังบริเวณที่คาโทดสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์เกิดสถานะ Three phase boundaries ที่อุณหภูมิการทำงาน ออกซิเจนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนได้ออกซิเจนไอออนซึ่งจะวิ่งผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแอโนด โดยกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมี-ไฟฟ้าในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องตราบเท่าที่มีออกซิเจนและเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน) สำหรับไฟฟ้าที่นำไปใช้งานได้แก่อิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านวงจรภายนอกซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นสิ่งที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้แก่เชื้อเพลิงและออกซิเจน โดยที่ส่วนประกอบอื่น ๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงยังคงอยู่

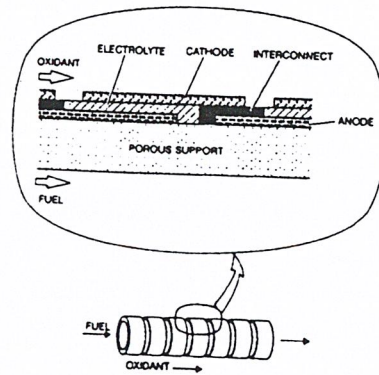


องค์ประกอบหลักของเซลล์นอกจากอิเล็กโทรไลต์ แอโนด คาโทด แล้วยังมีอินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าเชื่อมระหว่างขั้วแอโนดและคาโทดของเซลล์ที่อยู่ติดกัน เนื่องจากทุกส่วนประกอบของเซลล์เป็นของแข็ง ดังนั้นเซลล์ของ SOFC จึงมีโครงสร้างที่มีรูปแบบได้หลากหลายกว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบอื่น ๆ ในปัจจุบันมีรูปแบบที่นิยมกัน 4 รูปแบบด้วยกันได้แก่ Sealless tubular design, Segmented-cell-in-series design, Monolithic design, และ Flat-plate หรือ Planar design แสดงตัวอย่างในรูปที่ 2-2 [4]

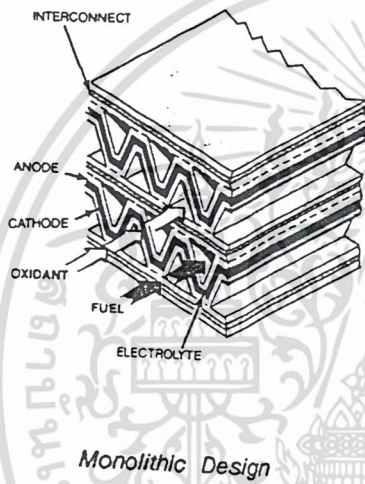
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



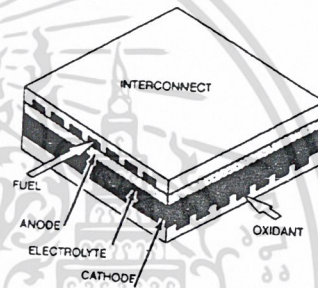
Seal-less Tubular Design



Segmented-Cell-in-Series Design



Monolithic Design



Flat-plate Design

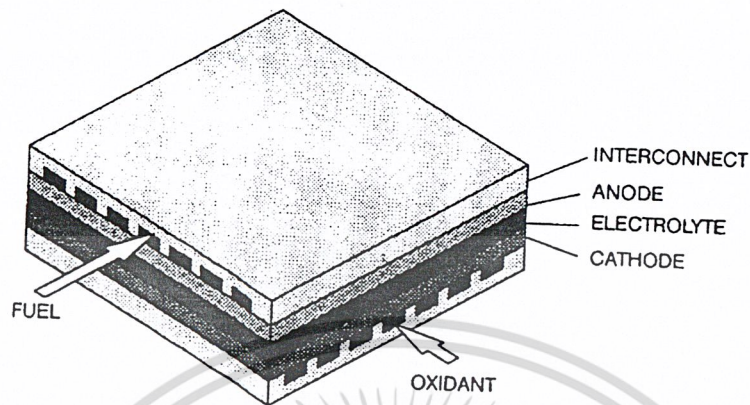
รูปที่ 2-2 เซลล์รูปแบบต่าง ๆ (4)

2.3 การออกแบบเซลล์และชั้นวางเซลล์ (Cell and Stack Designs)

ภายใต้เงื่อนไขการทำงานเซลล์เพียงเซลล์เดียวสามารถสร้างศักย์ไฟฟ้าได้ประมาณ 1 โวลต์ ดังนั้นเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจึงต้องต่อเซลล์จำนวนหลายเซลล์เข้าด้วยกัน โดยใช้อินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector) ทำหน้าที่เชื่อมแต่ละเซลล์ขึ้นเป็นชั้นวางเซลล์ โดยปกติแล้วอินเตอร์คอนเนกเตอร์มักจะมีรูปร่างที่ซับซ้อน เพราะนอกจากต้องทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าเชื่อมระหว่างคาโทดและอโนดของเซลล์ที่อยู่ติดกันแล้วยังทำหน้าที่เป็นช่องนำการไหลเชื้อเพลิงและอากาศเข้ามาทำปฏิกิริยา และต้องมีรูปร่างที่เหมาะสมในการป้องกันไม่ให้เกิดเปลืองจากด้านอโนดและอากาศในด้านคาโทดรั่วถึงกันได้ อย่างไรก็ตามส่วนที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นารออกแบบเฉพาะเซลล์ที่มีรูปร่างแบบแผ่นเท่านั้น [5, 6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของเซลล์แบบแผ่นแสดงในรูปที่ 2-3 สำหรับเซลล์แบบแผ่นนั้นก็ต้องออกแบบโดยพิจารณาถึงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและไฟฟ้า-เคมีเหมือนกับเซลล์รูปร่างอื่น ๆ และในการออกแบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพนั้นต้องพิจารณาตามความต้องการในประเด็นต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 2-3 องค์ประกอบของเซลล์แบบแผ่น [7]

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

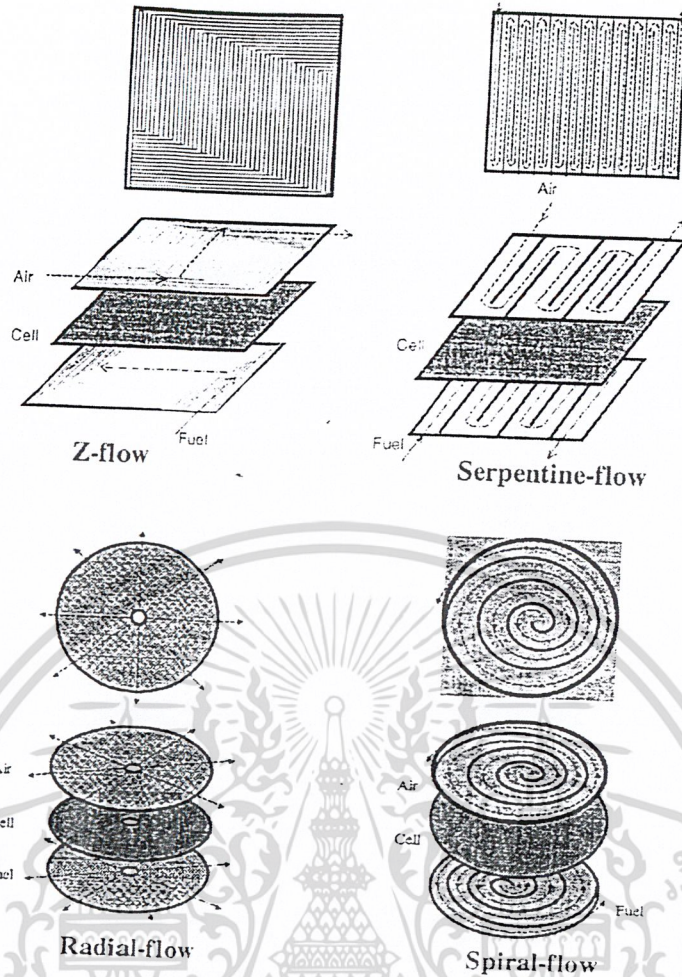
(ข) ประสิทธิภาพทางเคมี-ไฟฟ้า: สำหรับความหมายของความต้องการในส่วนนี้คือ ต้องออกแบบให้เกิด full open circuit voltage และเกิด polarization loss ที่น้อยที่สุด โดยต้องหลีกเลี่ยงการรั่วของแก๊สและการรั่วของเชื้อเพลิงและอากาศมาบรรจบกัน และเกิดการลัดวงจรทางไฟฟ้า เชื้อเพลิงและออกซิเจนต้องกระจายอย่างสม่ำเสมอ ไม่ใช่เฉพาะแต่พื้นที่ในแต่ละเซลล์เท่านั้นแต่ต้องตลอดทั้งชั้นวางเซ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

(ค) การจัดการทางความร้อน: หมายถึงต้องออกแบบให้เกิดการกระจายของอุณหภูมิในระหว่างการทำงานอย่างสม่ำเสมอ และต้องพัฒนาเซลล์ให้สามารถทนต่อการเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิทั่วทั้งชั้นวางเซลล์ได้สูงสุด หรือออกแบบให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิทั่วทั้งชั้นวางเซลล์น้อยที่สุด

(ง) ความสมบูรณ์ทางกลและโครงสร้าง: หมายถึงต้องออกแบบชั้นวางเซลล์ของ SOFC แบบแผ่นนี้มีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการประกอบโครงสร้างได้ และต้องทำให้เกิดความเค้นทางกลและทางความร้อนน้อยที่สุดเพื่อป้องกันการแตกหรือการแยกออกจากกันขององค์ประกอบเซลล์

อย่างไรก็ตามลักษณะที่สำคัญในการออกแบบ SOFC แบบแผ่นนั้นเกี่ยวข้องกับรูปแบบการไหลและการแยกไหลของแก๊สที่สามารถจัดเรียงได้หลายรูปแบบ:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-4 รูปแบบการไหลแบบต่าง ๆ [6]

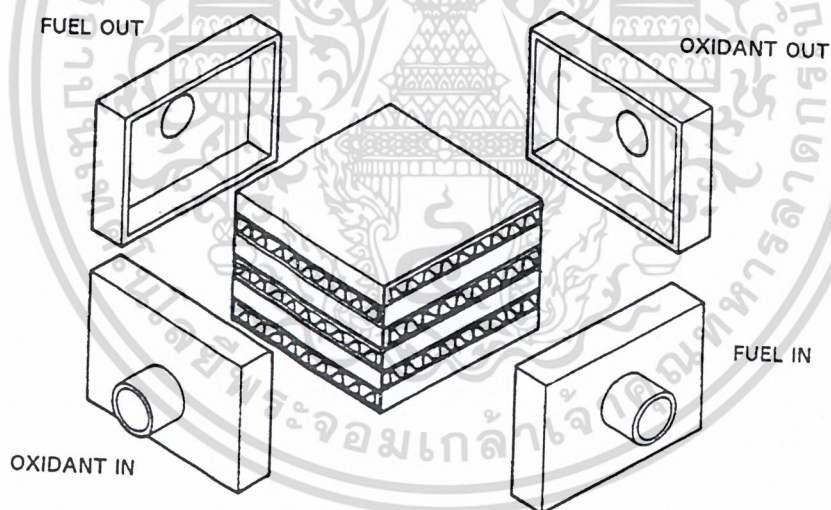
(ก) ลักษณะการไหลของแก๊ส การไหลของเชื้อเพลิงและออกซิเจนที่สามารถจัดเรียงได้ดังนี้ การไหลแบบสวนทาง (cross-flow) การไหลทิศทางเดียวกัน (co-flow) การไหลแบบขวาง (counter-flow) การเลือกลักษณะการไหลมีผลกระทบต่อการกระจายของอุณหภูมิและกระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ[6] มีรูปแบบการไหลหลายแบบสำหรับแต่ละลักษณะการไหลเช่น การไหลแบบขนาน (Z-flow), serpentine, radial, และ spiral ดังแสดงในรูป 2-4 สนามการไหล (ช่องการไหล) ทำหน้าที่เพิ่มความสม่ำเสมอของการกระจายของแก๊สและทำให้เกิดความร้อน (เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีของเชื้อเพลิงและออกซิเจน) และการเคลื่อนที่ของมวลในแต่ละเซลล์ นอกจากนั้นยังต้องออกแบบเพื่อให้เกิดความดันสูญเสียที่เพียงพอตลอดทั้งเซลล์เพื่อสร้างให้เกิดการไหลระหว่างเซลล์อย่างสม่ำเสมอภายในชั้นวางเซลล์ ดังนั้นในการกำหนดสนามการไหลของทั้งเชื้อเพลิงและออกซิเจนนั้นมีความสำคัญในการออกแบบ SOFC แบบแผ่นสำหรับการออกแบบเฉพาะรูปร่างและการจัดเรียงของสนามการไหลสามารถแปรเปลี่ยนเพื่อปรับปรุงและหรือเพื่อให้ได้แบบของชั้นวางเซลล์ที่เหมาะสม โดยปกติแล้วสนามการไหลจะออกแบบเป็นส่วนหนึ่งของอินเตอร์คอนเนคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ท่อทางของแก๊ส (Gas manifolding) การออกแบบชั้นวางเซลล์ใด ๆ ก็ตามต้องรวมเอาท่อทางไหลของแก๊สซึ่งเป็นเส้นทางของแก๊สจากแหล่งจ่ายไปยังแต่ละเซลล์และนำเอาแก๊สที่ทำปฏิกิริยาและไม่ทำปฏิกิริยาออกไป ท่อทางของแก๊สสามารถแบ่งออกเป็น external และ internal manifold ดังแสดงในรูป 2-5 และ 2-6 ตามลำดับ Internal manifold นั้นเป็นส่วนหนึ่งของเซลล์และอินเตอร์คอนเนกเตอร์ และเงื่อนไขในการออกแบบ gas manifold นั้นต้องให้เกิดความดันสูญเสียน้อย (เมื่อเทียบกับความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่องการไหล) เพื่อให้เกิดการกระจายการไหลที่สม่ำเสมอภายในชั้นวางเซลล์ ในรูปที่ 2-7 แสดงแนวคิดการป้อนแก๊สแบบอื่น ๆ

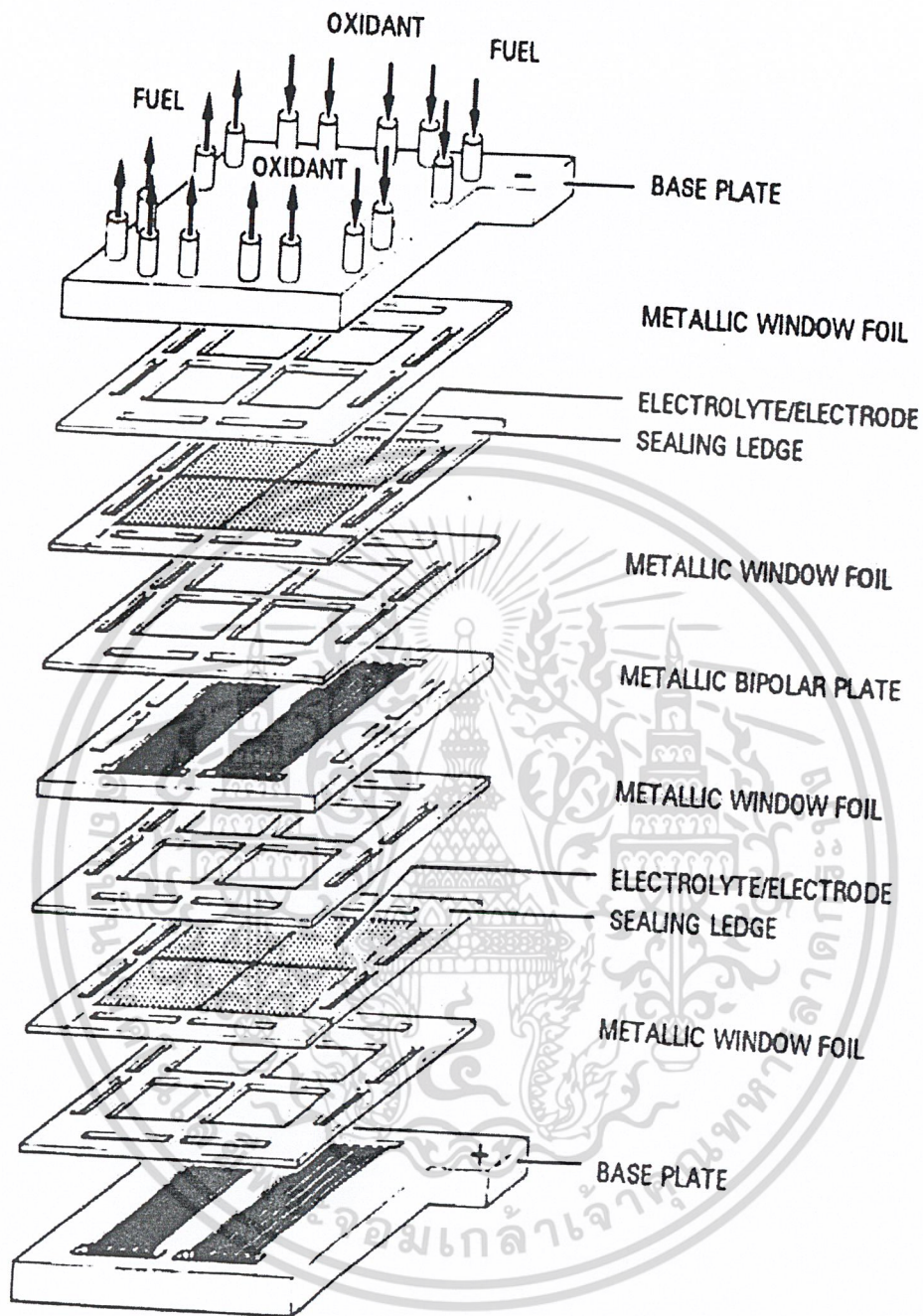
เงื่อนไขในการออกแบบชั้นวางเซลล์ที่สำคัญอีกประการได้แก่ การขึ้นรูป การออกแบบใด ๆ ก็ตามต้องสามารถขึ้นรูปและประกอบแต่ละส่วนได้อย่างเหมาะสมกับรูปร่างของชั้นวางเซลล์และวัสดุที่เป็นเซลล์

ข้อดีของเซลล์แบบแผ่นได้แก่ ให้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power density) ที่สูงกว่าแบบท่อ เพราะความบางของเซลล์ทำให้อุณหภูมิความต้านทานทางไฟฟ้า นอกจากนั้นยังมีความยืดหยุ่นเกี่ยวกับการออกแบบรูปร่างของเซลล์และ Gas manifold มากกว่าเซลล์แบบอื่น ๆ รวมทั้งง่ายต่อการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือต้องการวัสดุกันรั่วที่ทนอุณหภูมิสูงได้ นอกจากนั้นวัสดุกันรั่วยังทำให้เกิดข้อจำกัดเกี่ยวกับความสูงของชั้นวางเซลล์ เพราะยังมีความสูงมากจะเพิ่มโอกาสให้เซลล์แตกหรือเสียหายเนื่องจากเกิดแรงกดเนื่องจากน้ำหนักมากขึ้น



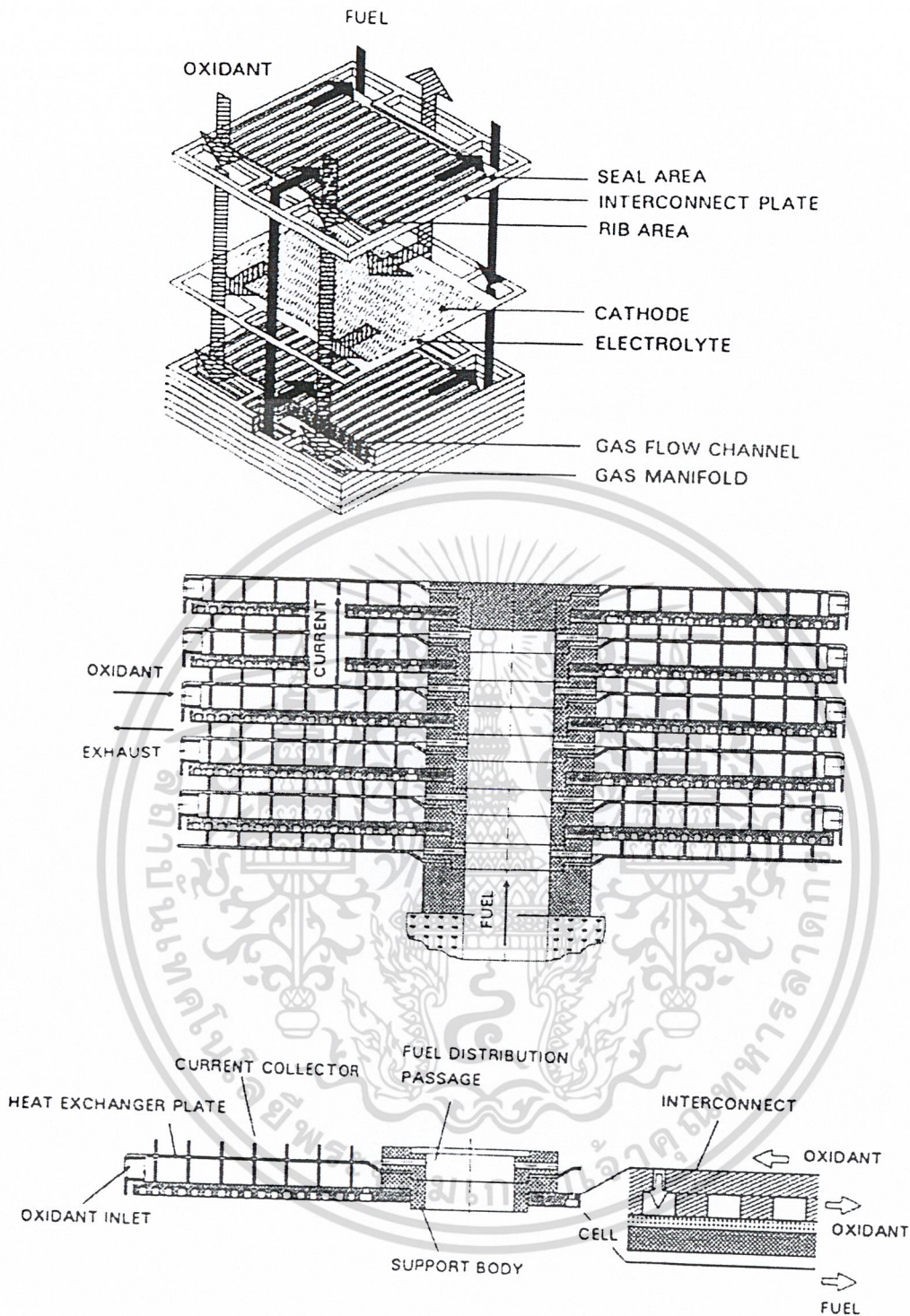
รูปที่ 2-5 แนวคิดการป้อนแก๊สแบบ External manifold [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-6 แนวคิดการป้อนแก๊สแบบ *Internal manifold* [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-7 แนวคิดการป้อนแก๊สแบบอื่น ๆ [9, 10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แบบจำลอง (Model) และการวิเคราะห์ (Analysis)[6]

ในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและเคมี-ไฟฟ้าที่ดีนั้น ต้องออกแบบให้ได้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงและเกิด Ohmic และ Polarization losses ที่ต่ำ สำหรับการออกแบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพทางกลและทาง โครงสร้างที่ดีนั้นต้องให้เกิดความเค้นเนื่องจากความร้อนน้อยที่สุดในระหว่างการขึ้นรูปองค์ประกอบของเซลล์และในระหว่างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความเค้นเกินกว่าที่วัสดุจะยอมรับได้

การจำลองและการวิเคราะห์เป็นวิธีที่นิยมใช้ช่วยในการออกแบบ SOFC และ Optimization parameter เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพทางด้านไฟฟ้า ไฟฟ้า-เคมี ทางกล และทางโครงสร้างที่ต้องการ

ในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรในการทำงานตลอดจนความสัมพันธ์ของกระบวนการต่างๆ นั้น สามารถทำได้โดยการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยที่การวิเคราะห์ผลที่ได้สามารถให้ข้อมูลว่ากระบวนการต่างๆ และตัวแปรมีความสัมพันธ์ระหว่างกันอย่างไร และสามารถช่วยอธิบายพฤติกรรมของเซลล์ด้วยราคาที่ย่อมเยา นอกจากนั้นการจำลองและวิเคราะห์ยังให้ผลเป็นรูปภาพ เช่น Stress potential (หรือ Voltage), Current density และอุณหภูมิที่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลาสำหรับเซลล์รูปร่างแบบต่างๆ และที่เงื่อนไขการทำงานต่างๆ ข้อมูลที่ได้จากการจำลองและการวิเคราะห์จะทำให้ได้ Optimum cell design และ Optimum operating parameters

มีการศึกษาแบบจำลองและการวิเคราะห์ในหลายระดับด้วยกัน ได้แก่ Molecular type model, Electrode model Cell model, Stack model และ System model [11] โดยส่วนใหญ่แล้วในการศึกษามักจะเกี่ยวข้องกับประเด็นดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ความเค้น

SOFC เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นของเซรามิกต่างชนิดกัน และเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงคั้งนั้นในแต่ละชั้นของเซลล์ต้องมีค่าการขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งความแตกต่างเพียงเล็กน้อยสามารถสร้างความเค้นเนื่องจากความร้อนที่มีขนาดใหญ่และสามารถทำให้องค์ประกอบของเซลล์ซึ่งเป็นเซรามิกแตกได้ ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นจากการออกแบบ การขึ้นรูป และตัวแปรต่างๆ ในการทำงาน ที่กระทบต่อการแตกร้าวในส่วนประกอบของ SOFC

2. การวิเคราะห์ทางไฟฟ้า

หนึ่งในวัตถุประสงค์ในการออกแบบชั้นวางเซลล์คือการทำให้เกิดประสิทธิภาพทางไฟฟ้า-เคมีสูงสุด ดังนั้นการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าจึงใช้เพื่อประมาณค่าความต้านทานภายในของเซลล์และทำนายประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

3. แบบจำลองการกระจายของกระแสและอุณหภูมิ

สำหรับชั้นวางเซลล์แล้วต้องพิจารณาการกระจายของกระแสและอุณหภูมิร่วมกัน เพราะในทางปฏิบัติแล้วคุณสมบัติทางเคมี วัสดุ การเดินทางของแก๊สที่เกี่ยวข้องกับการสร้างกระแสไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นด้วย มีองค์ประกอบหลายประการที่มีผลต่อลักษณะทางความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิง

องค์ประกอบบางส่วน ได้แก่ รูปร่างและขนาดของช่องนำการไหล รูปแบบการไหลของแก๊ส (เช่น co-flow, cross-flow, counter-flow) อุณหภูมิที่ทางเข้าของแก๊ส อัตราการไหล เป็นต้น

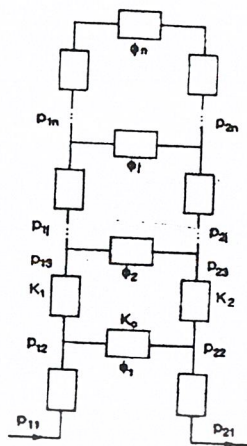
อย่างไรก็ตามความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาเคมี-ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองสัมผัสกับก๊าซ ทำให้การพัฒนาโมเดลเพื่อศึกษาการกระจายของอุณหภูมิจึงมีความยุ่งยาก ซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นจึงมีงานวิจัยหลายงานด้วยกันที่พัฒนาโมเดลขึ้นมาเพื่อช่วยในการออกแบบโดยที่ไม่พิจารณาถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น [12,13,14,15,16]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการกระจายการไหลในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมี-ไฟฟ้าทั้งทางด้านคาโทดและอโนด เป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง [1] ดังนั้นในการออกแบบขององค์ประกอบของเซลล์ตลอดจนชั้นวางเซลล์นั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะการกระจายการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้นด้วย ทำให้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการกระจายการไหลของเซลล์เชื้อเพลิง

ในปี ค.ศ. 1996-1997 Boersma และ Sammes [12,17] ได้พัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตวิเคราะห์ (Analytical model) และ Computational model เพื่อใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบ “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 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_{j1}, P_{j2} คือความดันที่ทางเข้าและทางออกของเซลล์ j [12]

สำหรับอีกตัวแปรหนึ่งนั้นได้แก่ $\frac{\phi_n}{\phi}$ โดยที่ตัวแปรนี้เป็นค่าที่ออกแบบไว้ เมื่อ ϕ 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 นั้นการกระจายแก๊สด้านคาโทดควรได้รับความสนใจมากกว่าด้านอโนด เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สด้านคาโทดสูงกว่าด้านอโนดมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่า resistance coefficient ที่ใช้ในการคำนวณการกระจายกระแสในชั้นวางเซลล์นั้นได้มาจาก Handbook ซึ่งไม่ใช่ค่าที่แท้จริงจากเซลล์หรือชั้นวางเซลล์ จึงทำให้การทำงานคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง

ต่อมาในปี ค.ศ. 1999 Achenbach และ Reus [18] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของ Mass flow distribution ที่มีต่อระบบของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง โดยนำเอา Subroutine ของ Flow model รวมเข้ากับโปรแกรมหลัก [19,20] ซึ่งเป็นแนวคิดของการนำเอาการหาค่าตอบในเชิงคณิตวิเคราะห์นำมาใช้ร่วมกับการหาค่าตอบในเชิงวิเคราะห์

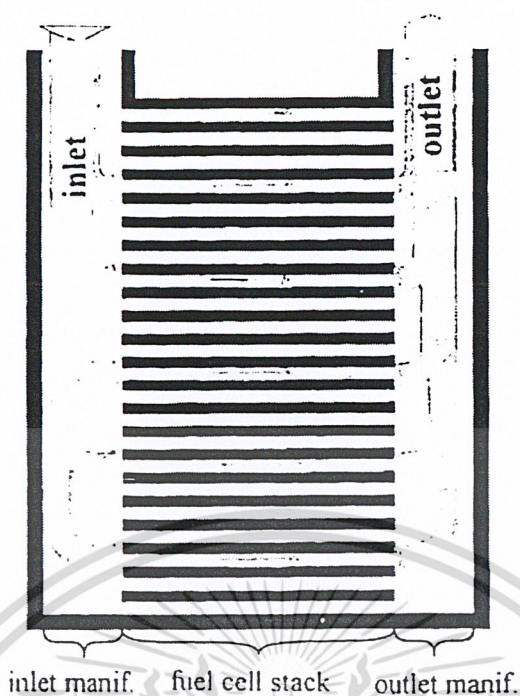
สำหรับชั้นวางเซลล์ที่ใช้พัฒนาแบบจำลองการไหลแสดงในรูปที่ 2-9 ซึ่งชั้นวางเซลล์ประกอบด้วย Manifold สำหรับแก๊สไหลเข้าและไหลออก และกลุ่มของช่องการไหลของแต่ละเซลล์ซึ่งต่อขนานกันเป็นชั้นวางเซลล์

จากรูปนั้นได้ทำการแบ่ง Manifold ออกเป็นเอลิเมนต์ โดยแต่ละเอลิเมนต์ประกอบด้วยหนึ่งช่องการไหล จากนั้นสร้างระบบสมการเพื่อคำนวณหาความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละเอลิเมนต์ โดยสมมติให้ การเปลี่ยนแปลงของมวล โมล และอุณหภูมิตลอดทั้งช่องการไหลเป็นแบบเชิงเส้น ผลการแก้ปัญหาจากระบบสมการที่พัฒนาได้นั้นจะ ได้การกระจายของความดันและความเร็วใน Manifold รวมทั้งความเร็วในช่องการไหล โดยพบว่าแม้ผลการจำลองจะแสดงว่าการกระจายการไหลที่ไม่สม่ำเสมอกระทบต่อศักย์ไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์ค่อนข้างน้อย แต่อย่างไรก็ตามในทางวัสดุแล้วมีการเพิ่มขึ้นหรือเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่ชัดเจนเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงของ temperature gradient และ current density gradient ที่เกิดขึ้นทั่วทั้งบริเวณที่เป็นเซลล์ โดยที่พวกเขาได้สรุปว่าการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศให้แก่ช่องการไหลของชั้นวางเซลล์เชื้อเพลิงให้เกิดความสม่ำเสมอเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีข้อจำกัดเกี่ยวกับพื้นที่ใช้งาน นอกจากนี้ความดันสูญเสียของทั้งระบบควรน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองแบบสองมิติ โดยที่กำหนดให้แต่ละเซลล์มีการไหลเพียงช่องเดียว ซึ่งในทางปฏิบัติจริงแล้วมีช่องนำการไหลมากกว่าหนึ่งช่อง

ในปีเดียวกัน Argyropoulos และคณะ [13] ได้นำเสนอแบบจำลองของความดันสูญเสีย สำหรับ Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) แบบ Internal manifold โดยพวกเขาได้กล่าวว่าในกรณีที่ชั้นวางเซลล์มีขนาดใหญ่ระดับกิโลวัตต์ต้องพิจารณาถึงการจัดการความร้อนและการกระจายการไหล โดยเฉพาะการกระจายการไหลเพราะถ้าทั้งเชื้อเพลิงและอากาศกระจายไม่เท่ากันจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลงแบบจำลองได้ทำนายความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งด้านคาโทดและอโนดของ 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 หรือปัญหาด้านอโนดจากการไม่สามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปได้ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-9 ชั้นวางเซลล์ที่ใช้พัฒนาแบบจำลอง [18]

ต่อมาในปี ค.ศ. 2000 พวกเขาก็นำเสนองานวิจัยอีก [21] โดยได้นำแบบจำลองที่ได้พัฒนาไปแล้วนั้น มาประยุกต์ใช้งานโดยแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกนำแบบจำลองที่อธิบายในคอนตัน [13] มาศึกษาผลกระทบของขนาดของช่องการไหลที่มีต่อความดันสูญเสียด้านอานอด ส่วนที่สองนำแบบจำลองซึ่งพัฒนาเพื่อทำนายการกระจายการไหลของชั้นวางเซลล์ DMFC [22] มาใช้เปรียบเทียบกับลักษณะการกระจายการไหลของ Internal manifold ที่ได้จากการไหลแบบขนาน (parallel flow) และการไหลแบบสวนทาง (reverse flow)

ในงานวิจัยได้กล่าวว่า ปัจจัยหลักที่กระทบต่อการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้น และ Hydraulic resistance ที่เกิดขึ้นกับการไหลของสารตั้งต้นตลอดทั้งระบบ และเพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงมีความจำเป็นที่ต้องหลีกเลี่ยงหรือลดการกระจายการไหลที่ไม่ดีให้น้อยที่สุด สำหรับขอบเขตที่พวกเขาทำการศึกษาคือ เพื่อสร้างระบบของกระบวนการทางทฤษฎีสำหรับใช้ออกแบบชั้นวางเซลล์เชื้อเพลิงแบบ 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 และเครื่องมือวัดสำหรับแบบจำลองนี้ก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีข้อจำกัดเนื่องจากเงื่อนไขการทำงานของชั้นวางเซลล์จริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่สามารถแสดงกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง ด้วยเหตุนี้แบบจำลองที่นำเสนอจึงถูกออกแบบมาเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการทำนายการทำงานของชั้นวางเซลล์จริงในวัตถุประสงค์ที่จะให้ได้รูปร่างของชั้นวางเซลล์ที่เหมาะสม และใช้ได้กับระบบทั่วไปของชั้นวางเซลล์แบบ Internal manifold

จากการศึกษาที่สรุปได้ว่าสำหรับ Flow bed ที่มีขนาดความกว้างและยาวของช่องการไหลต่ำ ความดันสูญเสียจะมีค่ามากและจะลดลงเมื่อขนาดของช่องการไหลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลจากการจำลองยังแสดงให้เห็นว่าช่องการไหลซึ่งมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดระหว่าง 2-2.5 มิลลิเมตรให้ประสิทธิภาพที่เหมาะสม สังเกตจากผลการจำลองพบว่าเมื่อเพิ่มขนาดของช่องการไหลให้มากกว่า 2.5 มิลลิเมตรนั้นไม่มีผลต่อการลดลงของความดันสูญเสีย สำหรับการออกแบบการไหลของ Manifold แบบขนานนั้นจะให้การกระจายการไหลที่สม่ำเสมอมากกว่าการไหลแบบสวนทาง โดยเฉพาะในกรณีที่มีชั้นวางเซลล์มีขนาดใหญ่

ต่อมาในปี ค.ศ. 2002 Ma และคณะ [14] ได้พัฒนาแบบจำลองระบบการไหลที่ซับซ้อนภายในช่องการไหลของเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 2-10 รวมทั้งได้ทำการทดลองวัดความดันสูญเสียของระบบดังแสดงในรูปที่ 2-11

จากรูปที่ 2-10 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นใน Branch i และการไหลผ่าน Loop j ประกอบด้วย Friction loss และ Local loss ดังสมการ

เมื่อ
$$\Delta P_i = \Delta P_{inlet} + \Delta P_{outlet} + \Delta P_{bend} + C_f \frac{A_w}{A_s} \quad (2-2)$$

โดยที่
$$C_f \frac{A_w}{A_s} = C_f \frac{\rho}{2} \frac{A_w}{A_s} \frac{\bar{u}_i}{A_s} m^2 \quad (2-3)$$

- โดยที่ m^2 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

$$\Delta P_{inlet} = \xi_{inlet} \frac{\rho}{2} \bar{u}_i^2 = \xi_{inlet} \frac{\bar{u}_i}{2A_s} m^2 \quad (2-4)$$

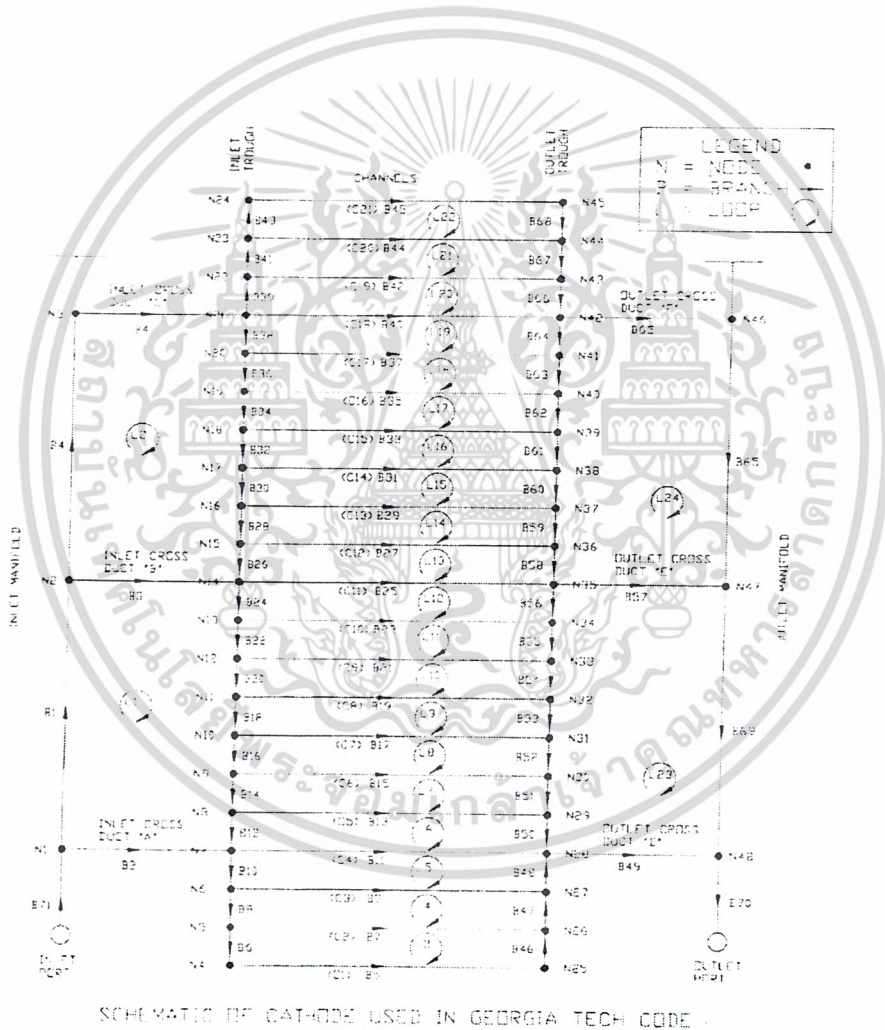
$$\Delta P_{outlet} = \xi_{outlet} \frac{\rho}{2} \bar{u}_i^{-2} = \xi_{outlet} \frac{\bar{u}_i}{2A_s} m\dot{x}_i \quad (2-5)$$

$$\Delta P_{bend} = \xi_{bend} \frac{\rho}{2} \bar{u}_i^{-2} = \xi_{bend} \frac{\bar{u}_i}{2A_s} m\dot{x}_i \quad (2-6)$$

เมื่อ ξ เป็น Loss coefficient ของจุดต่อของการไหลแบบต่าง ๆ ซึ่งหาได้จาก Idelchik's handbook [23] สุดท้ายจะได้ระบบสมการ

$$\Delta P_i = K_i m\dot{x}_i \quad (2-7)$$

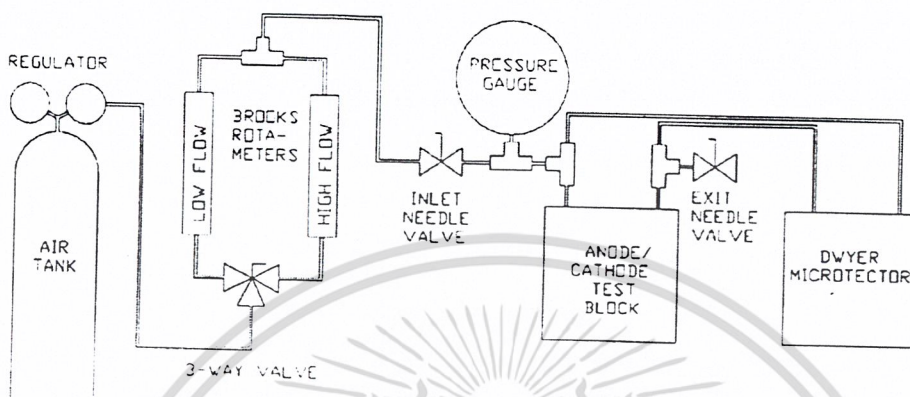
ที่มี K_i เป็น Flow coefficient



รูปที่ 2-10 เครือข่ายการไหลของเซลล์เชื้อเพลิง [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามการพัฒนาโปรแกรมจากรายละเอียดด้านบนนั้นมีข้อจำกัดในการแก้ไขตัดแปลงเครือข่ายการไหลในระหว่างการออกแบบ เนื่องจากหากมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเครือข่ายการไหลจะต้องเริ่มพัฒนาระบบสมการใหม่ตั้งแต่ต้น ดังนั้น Savic และ Walters [24] จึงได้สร้าง Program network topology analysis โดยใช้ Depth-first-search และ Breadth-first-search algorithms ซึ่งโมเดลนี้สามารถประยุกต์ใช้กับเครือข่ายการไหลในรูปแบบต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว

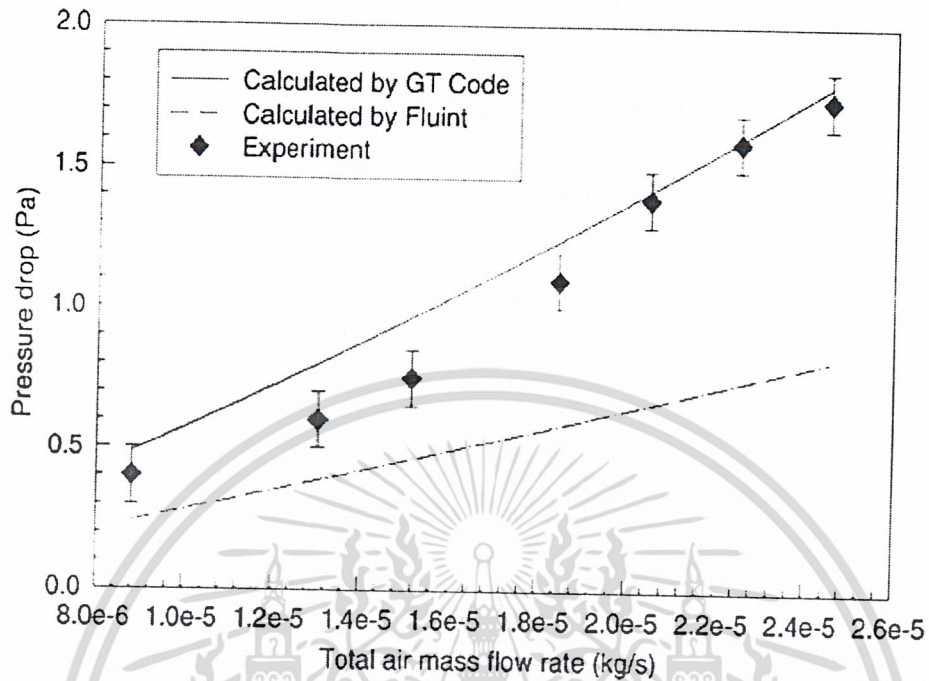


รูปที่ 2-11 ชุดทดลองเพื่อวัดความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในเครือข่ายการไหลจากรูปที่ 2-10 [14]

สำหรับผลการจำลองที่ได้จากระบบสมการที่พัฒนาจากเครือข่ายการไหลดังที่แสดงในรูปที่ 2-10 นั้นนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากรูปที่ 2-11 และผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม SINDA/FLUINT [25] 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

อย่างไรก็ตามได้มีการทดลองเพื่อวัดการกระจายความเร็วของการไหลที่เกิดขึ้นในช่องนำการไหลโดยใช้ Laser Doppler Velocimetry (LDV) เป็นเครื่องมือวัดซึ่งผลที่ได้พบว่ามีความคลาดเคลื่อนมากจากปัจจัยหลายประการด้วยกัน แต่ที่สำคัญที่สุดคือตำแหน่งการวางลำแสงที่เหมาะสม ส่วนปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ การแกว่งของอัตราการไหล การรบกวนทางไฟฟ้า การสะท้อนกลับเนื่องจากกระทบกับผนังช่องการไหล แสดงการกระจายการไหลภายในช่องนำการไหล 21 ช่องเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการทดลอง

ซึ่งวัดโดยเครื่อง LDV กับผลที่ได้จากการคำนวณโดย GT Code โปรแกรม SINDA/FLUINT และจากการ
ดัดแปลง GT Code โดยใช้ Automatic loop generation



รูปที่ 2-12 การเปรียบเทียบค่าความดันสูญเสียด้านคาโทดที่ได้จากการวัดและการจำลอง [14]

นอกจากนี้พวกเขายังได้สรุปไว้ว่าในการออกแบบเครื่องจ่ายการไหลเพื่อให้เกิดการกระจายที่
สม่ำเสมอต้องทำให้เกิดความดันสูญเสียใน plenum ให้น้อยที่สุดโดยที่ไม่ทำให้ความดันสูญเสียใน
ช่องการไหลเพิ่มขึ้น

บทที่ 3

การจำลองการไหล

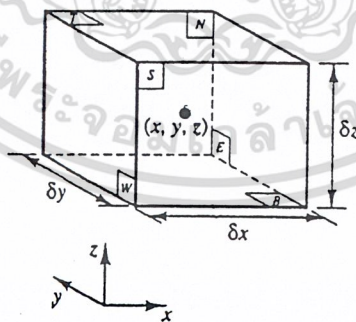
3.1 บทนำ

ถึงแม้ว่าสามารถทำการทดลองเพื่อวัดการกระจายการไหลภายในชั้นวางเซลล์ได้ก็ตาม แต่ในการทำการทดลองนั้นต้องใช้ต้นทุนในการสร้างชุดทดลองสูงพอสมควร นอกจากนี้ยังสูญเสียเวลาในการทดลองค่อนข้างมาก รวมทั้งไม่สามารถนำข้อมูลเก่ามาปรับปรุงได้จึงต้องการทดลองใหม่เมื่อมีการปรับปรุงรูปร่างและขนาดที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองจึงเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้แก้ปัญหาดังกล่าว Computational Fluid Dynamic, CFD เป็นกระบวนการวิธีที่พัฒนาจากแนวคิดเกี่ยวกับวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ปัญหาในทางวิศวกรรมที่ได้รับความนิยม ในปัจจุบันได้มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทาง CFD หลายโปรแกรมให้เลือกใช้เพื่อความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น อย่างไรก็ตามต้องอาศัยความเข้าใจพื้นฐานของทฤษฎีที่ใช้มาพัฒนาโปรแกรมเหล่านี้ จึงจะสามารถใช้งานโปรแกรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดจนสามารถวิเคราะห์ผลได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นในบทที่ 3 จึงกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการไหล ตลอดจนรายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับแบบจำลองการไหลรวมทั้งเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนดให้กับแบบจำลอง

3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.2.1 สมการพื้นฐานของการไหล [30]

กำหนดให้เอลิเมนต์ของของไหลมีขนาด δx , δy , δz ดังแสดงในรูปที่ 3-1 ในรูปที่ 3-1 แต่ละผิวหน้าของเอลิเมนต์กำหนดชื่อดังนี้ N, S, E, W, T และ B ซึ่งหมายถึงผิวหน้าที่อยู่ด้านทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก ทิศตะวันตก ด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ



รูปที่ 3-1 เอลิเมนต์ของของไหล [26]

โดยที่จุดศูนย์กลางของเอลิเมนต์อยู่ที่ตำแหน่ง (x, y, z) คุณสมบัติต่าง ๆ ของเอลิเมนต์เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลาดังนี้ $\rho(x, y, z, t)$, $P(x, y, z, t)$, $T(x, y, z, t)$ และ $u(x, y, z, t)$ ซึ่งแสดงถึงความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่น ความดัน อุณหภูมิและเวกเตอร์ของความเร็วของเอลิเมนต์ตามลำดับ เนื่องจากเอลิเมนต์ที่พิจารณานี้มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นคุณสมบัติที่ผิวหน้าของเอลิเมนต์จึงสามารถแสดงในรูปของสองเทอมแรกของ Taylor series ก็มีความถูกต้องเพียงพอ ยกตัวอย่างเช่น ความดันที่ผิวหน้า E และ W ซึ่งอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของเอลิเมนต์เท่ากับ $\frac{1}{2} \delta x$ ทั้งคู่ ซึ่งแสดงค่าของความดันที่ผิวหน้าทั้งสองได้ดังนี้

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

3.2.1.1 สมการอนุรักษ์มวล

ในลำดับแรกของการสร้างอนุพันธ์ของสมการอนุรักษ์มวลนั้นต้องทำการสมดุลมวลของเอลิเมนต์ของไหลก่อนดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในเอลิเมนต์ของไหล = อัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้ามา
ในเอลิเมนต์ของไหล (3-1)

โดยที่อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในเอลิเมนต์คือ

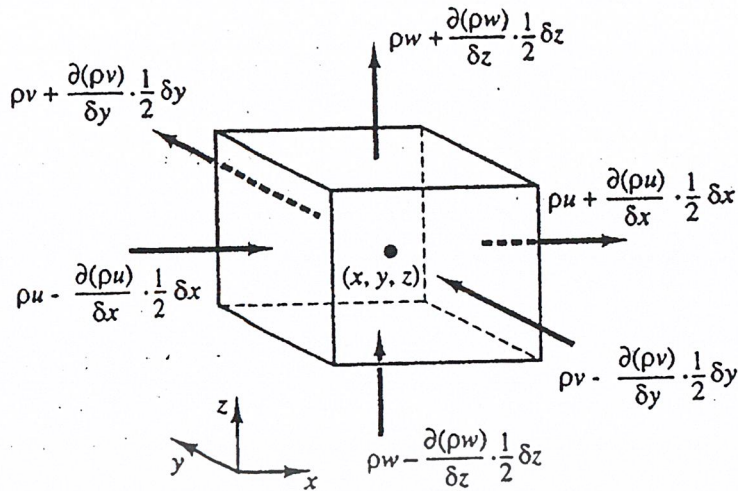
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (3-2)$$

สำหรับอัตราการไหลของมวลผ่านผิวหน้าของเอลิเมนต์แสดงในรูปของผลคูณของความหนาแน่นพื้นที่และองค์ประกอบของความเร็ว (Velocity component) ที่ตั้งฉากกับผิวหน้านั้น จากรูปที่ 3-2 แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลสุทธิของมวลที่ไหลเข้าเอลิเมนต์โดยผ่านพื้นผิวคือ

$$\left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \quad (3-3)$$

การไหลที่มีทิศทางการไหลเข้าสู่เอลิเมนต์ทำให้มวลของเอลิเมนต์เพิ่มขึ้นแสดงในเครื่องหมายบวก ส่วนการไหลที่มีทิศทางการไหลออกจากเอลิเมนต์แสดงในเครื่องหมายลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-2 การไหลเข้าและออกจากเอลิเมนต์ของของไหล [26]

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 3-1 จะได้ว่าสมการที่ 3-2 เท่ากับสมการที่ 3-3 และเมื่อจัดเรียงสมการใหม่พร้อมกับหารทั้งสองข้างของสมการด้วย $\delta x \delta y \delta z$ จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3-4)$$

สมการที่ 3-4 เป็นสมการอนุรักษ์มวลสามมิติแบบไม่คงตัว (unsteady, three-dimensional mass conservation) หรือ continuity equation สำหรับการไหลแบบอัดตัวได้ (compressible fluid) เทอมแรกของสมการด้านซ้ายมือคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น (มวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร) ต่อเวลา ส่วนเทอมที่เหลือของสมการด้านซ้ายมือนั้นแสดงการไหลออกสุทธิของมวลผ่านผิวหน้าซึ่งเป็นขอบเขตของเอลิเมนต์ซึ่งรวมเรียกว่า กอนเวกทีฟเทอม (convective term)

สำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (incompressible fluid) นั้นความหนาแน่นคงที่ สมการที่ 3-4 จึงเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3-5)$$

3.2.1.2 สมการโมเมนตัม

จากกฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมของอนุภาคของไหลเท่ากับผลบวกของแรงที่กระทำต่ออนุภาคนั้น ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ในทิศทาง x, y, z ของอนุภาคของไหลแสดงโดย

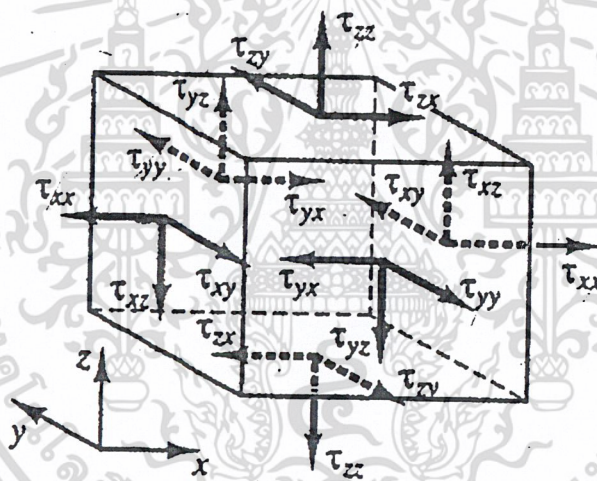
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho \frac{Du}{Dt}, \rho \frac{Dv}{Dt} \text{ และ } \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (3-6)$$

เราสามารถแบ่งแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหลออกได้เป็นสองประเภทด้วยกันกล่าวคือ

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

โดยปกติแล้วแรงที่กระทำต่อพื้นผิวจะแยกเป็นเทอมหนึ่งของสมการ โมเมนตัม ส่วนแรงที่กระทำต่อ body นั้นเป็นอีกเทอมที่แสดงในรูปของ source term สำหรับความเค้นของเอลิเมนต์ของไหลถูกกำหนดในเทอมของความดันและความเค้นเฉือนแสดงในรูปที่ 3-3 ความดันซึ่งได้แก่ความเค้นฉาก (normal stress) ถูกแสดงโดย p ความเค้นเฉือนถูกแสดงโดย τ โดยปกติแล้วแสดงในรูปของ τ_{ij} โดยที่ j แสดงว่าองค์ประกอบของความเค้นกระทำในทิศทาง j ต่อพื้นผิวที่ตั้งฉากกับทิศทาง i



รูปที่ 3-3 องค์ประกอบของความเค้นบนพื้นผิวทั้งหมดด้านของเอลิเมนต์ของไหล [26]

แรงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่กระทำต่อของไหลเนื่องจากความเค้นที่พื้นผิวทั้งหมดเท่ากับผลรวมของแรงสุทธิที่กระทำในทิศทาง x, y, z รวมกัน ซึ่งเท่ากับ

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (3-7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\text{x-component: } \rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (3-8a)$$

$$\text{y-component: } \rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (3-8b)$$

$$\text{z-component: } \rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (3-8c)$$

3.2.1.3 สมการ Navier-Stokes สำหรับ Newtonian fluid

สำหรับ Newtonian fluid แล้วความเค้นเฉือนเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนรูป (rate of deformation) และในกฎของนิวตันที่เกี่ยวกับความหนืดของการไหลแบบอัดตัวได้นั้นเกี่ยวข้องกับค่าคงที่สองตัว ได้แก่ ความหนืดจลน์, μ (dynamic viscosity) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของความเค้นกับการเปลี่ยนรูปแบบเชิงเส้น และความหนืดตัวที่สอง, λ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของความเค้นกับการเปลี่ยนรูปเชิงปริมาตร ประกอบด้วยเก๋อองค์ประกอบของความเค้นเฉือนและหกตัวแปรอิสระได้แก่

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u}, \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u}, \quad \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u}, \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3-9)$$

นำค่าความเค้นเฉือนจากสมการ (3-9) แทนในสมการ (3.8a-c) จะได้สมการที่เรียกว่า Navier-Stokes equations:

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} \right] \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (3-10a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_{M_y} \quad (3-10b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \mu u \right] + S_{M_z} \quad (3-10c)$$

3.3 การ Discretisation

ในการหาผลลัพธ์ของการไหลนั้น สมการอนุกรมมวลและโมเมนตัมในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียลจะถูก Discretised ด้วยวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method) ได้แก่การอินทิเกรตสมการทั้งสองตลอดทั้งปริมาตรควบคุม (Control volume) เพื่อให้ได้สมการ Discretised ของแต่ละเอลิเมนต์ภายในบริเวณที่ศึกษา [27] อย่างไรก็ตามวิธีการที่ให้มาได้มาซึ่งสมการ Discretised นั้นมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น the Central differencing scheme, The upwind differencing scheme, หรือ Quadratic upwind differencing scheme เป็นต้น สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธี Upwind differencing, UD [26]

กำหนดให้ ϕ คือคุณสมบัติใดๆ ของการไหล ซึ่งวิธี UD สามารถหาค่าต่างๆ ของการไหลได้โดยพิจารณาทิศทางการไหลร่วมด้วย ในรูปที่ 3-4 แสดงค่าที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อการไหลมีทิศทางไปทางขวา และในรูปที่ 3-5 แสดงการไหลในทิศทางกลับ

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

$$\phi_w = \phi_e \text{ และ } \phi_e = \phi_w \quad (3-11)$$

และจะได้สมการ Discretised ดังนี้

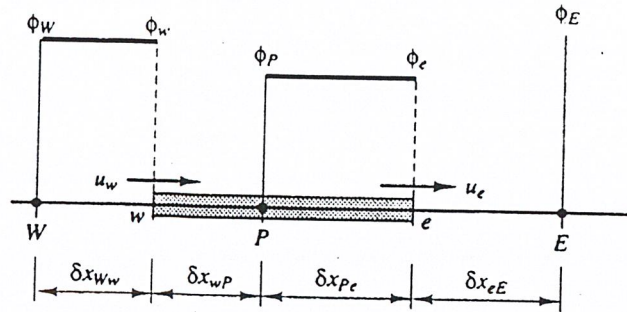
$$F_e \phi_e - F_w \phi_w = D_e (\phi_e - \phi_w) - D_w (\phi_e - \phi_w)$$

หรือจัดรูปใหม่ได้เป็น

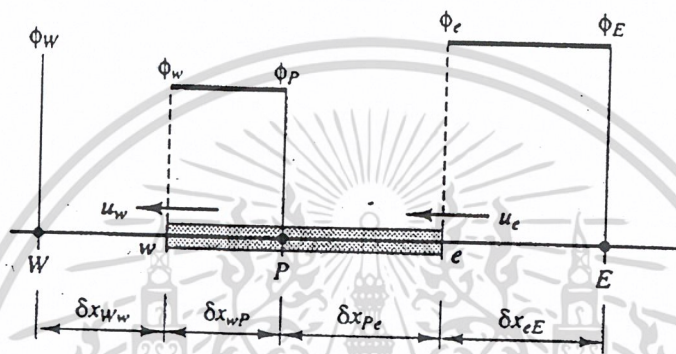
$$[(D_w + F_w) + D_e + (F_e - F_w)] \phi_e = (D_w + F_w) \phi_w + D_e \phi_e \quad (3-12)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-4 ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสมการ Discretised เมื่อการไหลไปในทิศทางบวก [26]



รูปที่ 3-5 ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสมการ Discretised เมื่อการไหลไปในทิศทางลบ [26]

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

$$\phi_w = \phi_P \text{ และ } \phi_e = \phi_E \quad (3-13)$$

หรือ

$$[D_w + (D_e - F_e) + (F_e - F_w)] \phi_P = D_w \phi_w + (D_e - F_e) \phi_E \quad (3-14)$$

สมการ (3-12) และ (3-14) สามารถเขียนในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$a_P \phi_P = a_w \phi_w + a_E \phi_E \quad (3-15)$$

เมื่อสัมประสิทธิ์ที่จุดศูนย์กลางคือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	$D_e - F_e$

3.3.1 เงื่อนไขขอบเขต [27]

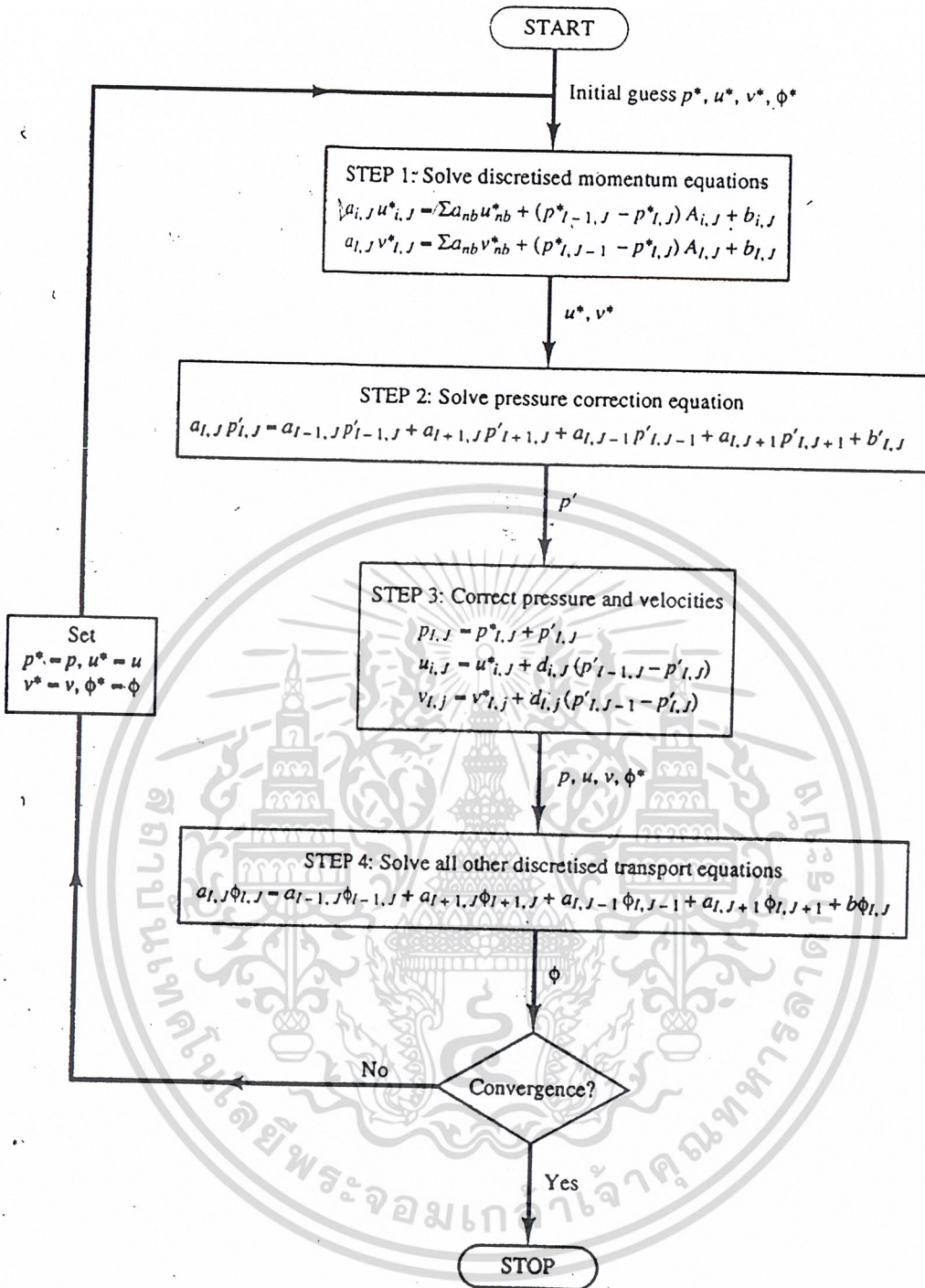
สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองศึกษาการไหลภายในชั้นวางเซลล์ของวิทยานิพนธ์นี้มีรายละเอียดดังนี้

- เงื่อนไขที่ทางเข้า กำหนดให้ Mass flux คงที่
- เงื่อนไขที่ทางออก กำหนดให้เป็น Zero gradient
- ขอบเขตที่เป็นแกนสมมาตร เนื่องจากระบบการไหลที่พิจารณานั้นสมมาตรในแนวแกน y (แสดงในรูปที่ 3-4) ดังนั้นจึงศึกษาการไหลเพียงครึ่งเดียวตามแนวแกนสมมาตร เพื่อลดขนาดของปัญหาและลดเวลาในการหาคำตอบของปัญหา โดยเงื่อนไขที่กำหนดสำหรับขอบเขตที่เป็นแกนสมมาตร คือ Velocity gradient ในทิศทางตั้งฉากกับแกนสมมาตรเท่ากับศูนย์
- เงื่อนไขของผนัง กำหนดให้ผนังทุกด้านราบเรียบ

3.3.2 กระบวนการหาคำตอบโดยวิธี SIMPLE Algorithm

SIMPLE algorithm เป็นวิธีการที่นำมาช่วยในการแก้ระบบสมการที่มีการเชื่อมกันระหว่างความดันและความเร็วในสมการอนุพันธ์โมเมนต์ โดยสร้างความสัมพันธ์กันของทั้งสองและจัดลำดับในการแก้ระบบสมการ [27] โดยมีขั้นตอนเริ่มจากการสมมติค่า p^* , u^* และ v^* แล้วแทนค่าในสมการอนุพันธ์โมเมนต์และสมการความต่อเนื่อง จากนั้นนำคำตอบที่ได้มาใช้ในการปรับค่าสมมติค่าใหม่ เพื่อป้อนให้กับขั้นตอนการแทนค่าในสมการทั้งสอง ทำเช่นนี้จนกว่าคำตอบจะลู่เข้า

สำหรับรายละเอียดขั้นตอนของกระบวนการหาคำตอบโดยวิธี SIMPLE algorithm แสดงในรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 แผนผังของ SIMPLE algorithm [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทำการทดลองและการทำการ Simulation ในรูปทรงที่ ทำการศึกษา

4.1 การทำการเปรียบเทียบการทดลองกับการ Simulation

4.1.1 การออกแบบชุดทดลอง

4.1.1.1 กำลังไฟฟ้าจากชุดทดลอง

$$P_c = V_c \times I \times n \quad (4-1)$$

โดยที่ P_c คือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง, V_c คือความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อหนึ่งเซลล์ มีค่า $0.65 \frac{\text{Volts}}{\text{Cell}}$ [28], n คือจำนวนเซลล์ในชั้นวางเซลล์ (ในที่นี้มีค่า 10 เซลล์), และ I คือกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงมีค่า $400 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$ [28] โดยพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาต่อเซลล์มีค่า 8 cm^2 ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ

$$I = \left(400 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \right) \times (8 \text{ cm}^2) \times \left(\frac{1}{1000} \frac{\text{A}}{\text{mA}} \right) \\ = 3.2 \text{ A}$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงคือ

$$P_c = \left(0.65 \frac{\text{Volt}}{\text{cell}} \right) \times (3.2 \text{ A}) \times (10 \text{ cells}) \\ = 20.8 \text{ watts}$$

4.1.1.2 อัตราการไหลของไฮโดรเจน[28]

สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\dot{m}_{H_2} = 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{P_c}{V_c} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4-2)$$

แทนที่จะได้

$$\dot{m}_{H_2} = 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{20.8}{0.65} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\ = 3.36 \times 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

หรือ

$$Q_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\rho_{H_2, @ 800^\circ\text{C}} [29]}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \frac{3.36 \times 10^{-7}}{0.022634} \frac{\text{kg/s}}{\text{kg/m}^3} \\
 &= 1.48 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \\
 &= 0.89 \text{ LPM}
 \end{aligned}$$

4.1.1.3 อัตราการไหลของอากาศ[28]

สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$m \cdot_{\text{O}_2} = 8.29 \times 10^{-8} \times \frac{P_c}{V_c} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4-3)$$

หรือ)

$$m \cdot_{\text{Air}} = 3.57 \times 10^{-7} \times \lambda \times \frac{P_c}{V_c} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4-4)$$

โดยค่า λ ปกติกำหนดให้เท่ากับ 2 [28] ดังนั้นสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการได้คือ

$$\begin{aligned}
 m \cdot_{\text{Air}} &= 3.57 \times 10^{-7} \times 2 \times \left(\frac{20.8}{0.65} \right) \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\
 &= 2.2848 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{Air}} &= \frac{m \cdot_{\text{Air}}}{\rho_{\text{Air}, @ 800^\circ \text{C}} [29]} \\
 &= \frac{2.248 \times 10^{-5} \frac{\text{kg/s}}{\text{kg/m}^3}}{0.325132 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \\
 &= 7.03 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \\
 &= 4.22 \text{ LPM}
 \end{aligned}$$

4.1.1.4 จำนวนค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

ในการหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการไหลของไฮโดรเจนและอากาศ ว่ามีการไหลเป็นแบบลามินาร์ หรือ เทอร์บูแลนท์ โดยนำค่าอัตราการไหลของอากาศ นำมาพิจารณาเท่านั้น (เนื่องจาก $Q_{\text{Air}} > Q_{\text{H}_2}$)

$$\text{Re} = \frac{V \times D}{\nu} \quad (4-5)$$

พิจารณาที่ท่อทางเข้า

$$\begin{aligned}
 V_{\text{Air},1} &= \frac{Q}{A_1} = \frac{Q}{\pi D^2 / 4} = \frac{7.03 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}}{\pi (4 \times 10^{-3} \text{ m})^2 / 4} \\
 &= 5.59 \frac{\text{m}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\begin{aligned} \text{Re}_{Air,1} &= \frac{(5.59 \text{ m/s})(4 \times 10^{-3} \text{ m})}{136.427 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \\ &= 163.9 \end{aligned}$$

∴ ที่จุดท่อทางเข้าไฮโดรเจนและอากาศมีพฤติกรรมการไหลแบบลามินาร์

4.1.1.5 คำนวณหาค่าความเร็วของไนโตรเจนที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ใช้ไนโตรเจนในการทำการทดลอง เนื่องจากไนโตรเจนมีข้อได้เปรียบกว่าการใช้ไฮโดรเจนและอากาศ คือไนโตรเจนมีความปลอดภัยกว่าการใช้ไฮโดรเจนและมีความดันที่ค่อนข้างคงที่กว่าการใช้อากาศ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนวณหาความเร็วและอัตราการไหลของของไนโตรเจนเพื่อเป็นค่าที่ใช้ในการทดลอง และใช้ในการ Simulation เพื่อเปรียบเทียบกัน

เนื่องจากการไหลของไฮโดรเจนและอากาศ เป็นการไหลแบบลามินาร์ทั้งในชุดกระจายการไหลและในชั้นวางเซลล์ ดังนั้นเพื่อให้คงพฤติกรรมการไหล (ไหลแบบลามินาร์) จึงสามารถหาความเร็วและอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ใช้ในการทดลองได้จาก

$$\begin{aligned} \text{Re}_{Air,1} &= \text{Re}_{N_2,1} = 163.9 \\ \text{จะได้} \\ \frac{(V_{N_2,1}) \times (D_1)}{v_{N_2, @ 25^\circ \text{C}}} &= 163.9 \\ V_{N_2,1} &= \frac{163.9 \times (v_{N_2, @ 25^\circ \text{C}})}{D_1} \\ &= \frac{163.9 \times (15.6848 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})}{(4 \times 10^{-3} \text{ m})} \\ &= 0.64 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ Q_{N_2} &= A_1 \times V_{N_2,1} \\ &= \left(\frac{\pi(4 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{4} \right) \times \left(0.64 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \\ &= 8.04 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \\ &= 0.48 \text{ LPM} \end{aligned}$$

เนื่องจากว่าอัตราการไหลของไนโตรเจนที่คำนวณได้นี้ ถ้าเปรียบเทียบกับสเกลของเครื่องมือการวัดอัตราการไหล (ดังรูปที่ 4-1) จะมีย่านน้อยมาก ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทดลอง ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมในการทำการทดลอง คณะผู้จัดทำจึงได้กำหนดให้อัตราการไหลของไนโตรเจนที่ใช้ในการทดลองมีค่ามากที่สุดโดยที่ยังมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบลามินาร์ ซึ่งค่าของอัตราการไหลของไนโตรเจนที่เลือกใช้คือ 2.5 LPM โดยที่อัตราการไหลดังกล่าวนี้สามารถคำนวณหาความเร็ว และสามารถตรวจสอบค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ได้ดังต่อไปนี้

เมื่อกำหนดให้อัตราการไหลของไนโตรเจนมีค่า 2.5 LPM

$$V_{N_2,1} = \frac{Q_{V_1}}{A_1} \quad (4-6)$$

$$= \frac{(2.5 \text{ LPM}) \times \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right)}{\pi (4 \times 10^{-3} \text{ m})^2 / 4}$$

$$= 3.3157 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

ตรวจสอบค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

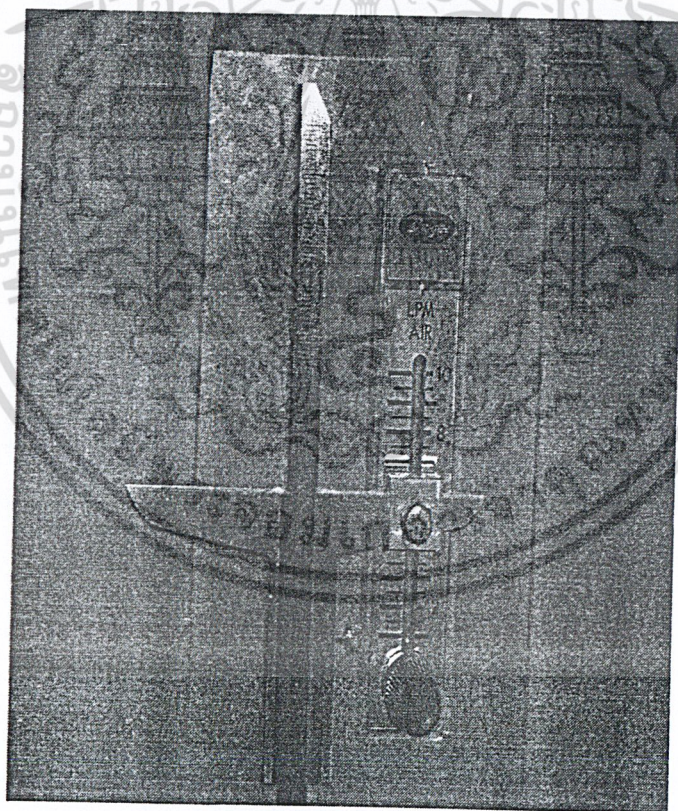
จากสมการที่ (3.5) จะได้

$$\text{Re} = \frac{(V_{N_2,1}) \times (D_1)}{\nu_{N_2, @ 25^\circ \text{C}}}$$

$$= \frac{(3.3157 \text{ m/s}) \times (4 \times 10^{-3} \text{ m})}{15.6848 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$= 845.6$$

ซึ่งที่อัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 2.5 LPM ยังคงมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบลามินาร์ ดังนั้น จึงเลือกใช้อัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 2.5 LPM โดยมีความเร็วที่ทางเข้าคือ $3.3157 \frac{\text{m}}{\text{s}}$



รูปที่ 4-1 รูปของโรตاميเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

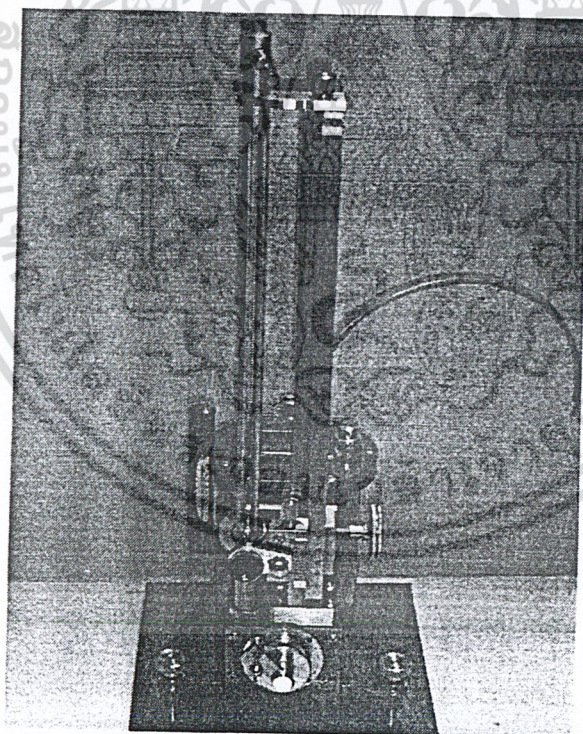
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 เครื่องมือวัดและเทคนิคการวัด

เครื่องมือวัดที่สำคัญในการทดลองได้แก่ มานอมิเตอร์สำหรับวัดความดัน และ โรตاميเตอร์สำหรับปรับอัตราการไหลที่ป้อนให้แก่ชั้นวางเซลล์

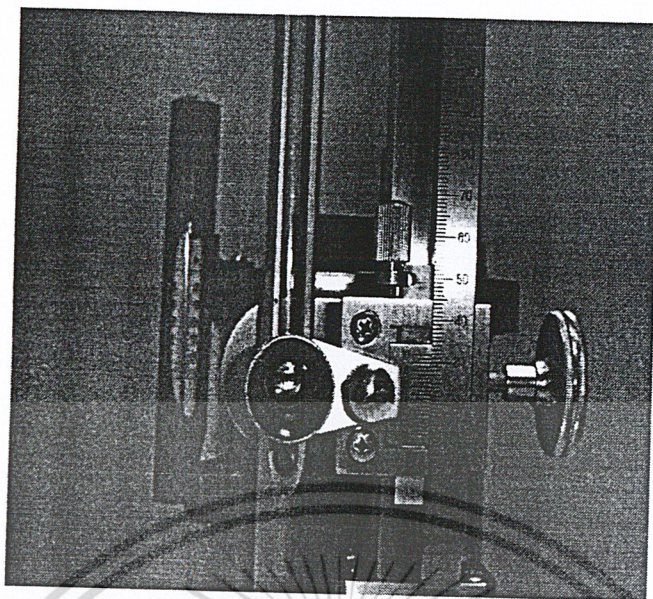
4.1.2.1 การวัดความดัน

จากการคำนวณความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อแก๊สไหลผ่านช่องทางการไหล โดยสมมติให้เกิดการกระจายการไหลอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชั้นวางเซลล์ พบว่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงเลือกใช้ไมโครมานอมิเตอร์ สำหรับใช้ในการทดลองนี้ซึ่งมีความละเอียดมากกว่ามานอมิเตอร์แบบธรรมดา อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดลองพบว่า เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลเพื่อศึกษาค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นพบว่า ความดันสูญเสียที่อ่านค่าได้แตกต่างกันน้อยมาก และไม่สามารถสรุปได้ว่าค่าที่อ่านได้แตกต่างกันนั้นเกิดจากอัตราการไหลที่เปลี่ยนไปหรือเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง ดังนั้นจึงทำการปรับอัตราการไหลที่ป้อนให้แก่ชั้นวางเซลล์ให้มากกว่าค่าที่ใช้งานจริง เพื่อทำให้เกิดความดันสูญเสียที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามอัตราการไหลที่ปรับสูงขึ้นนั้นก็ไม่ควรมีค่ามากจนเกินไป เนื่องจากการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการซื้อแก๊สสำหรับการทดลอง และอาจทำให้การไหลในช่องการไหลไม่อยู่ในช่วงของการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งทำให้วิธีการวัดจากแนวคิดที่เสนอไปข้างต้นคลาดเคลื่อนไปได้



รูปที่ 4-2 รูปของมานอมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

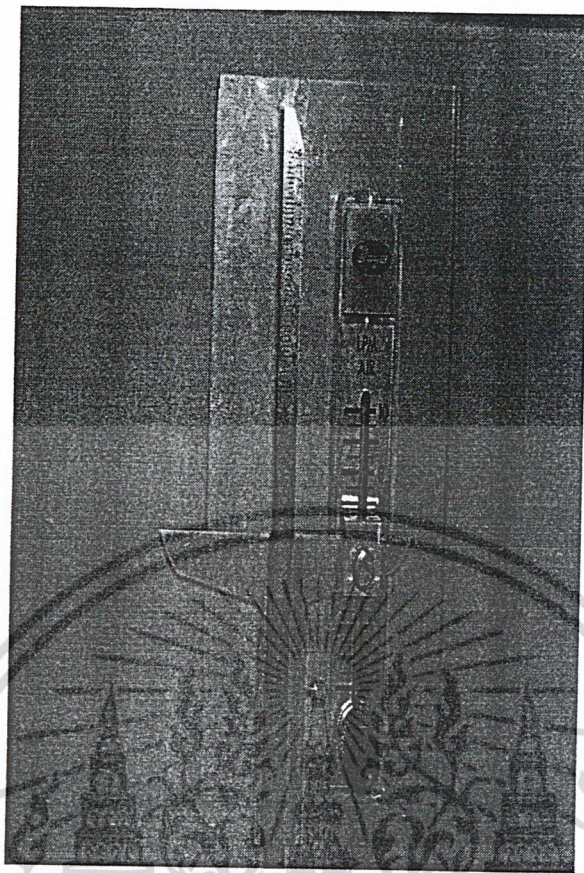


รูปที่ 4-3 ภาพระดับสายตาที่ใช้วัด

4.1.2.2 การปรับอัตราการไหล

เนื่องจากการไหลที่เกิดขึ้นในช่องนำการไหลมีค่าต่ำทำให้เกิดความดันสูญเสียต่ำไปด้วย ดังนั้นในการทดลองหาปรับอัตราการไหลคลาดเคลื่อนไปเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลให้ความดันสูญเสียที่อ่านค่าได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าเมื่อลองทำการทดลองโดยป้อนแก๊สที่อัตราการไหลค่าหนึ่งให้แก่ชั้นวางเซลล์ จากนั้นจึงอ่านค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น แล้วปิดแก๊สจากนั้นป้อนแก๊สให้แก่ชั้นวางเซลล์ใหม่ที่อัตราการไหลเท่าเดิม พบว่าความดันสูญเสียที่อ่านได้นั้นมีค่าไม่เท่าเดิม ดังนั้นในการทำการทดลองแต่ละครั้งมีความจำเป็นต้องสามารถอ่านค่าอัตราการไหลที่ได้ อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตามโรตاميเตอร์ที่ให้ความแม่นยำสูงนั้นราคาแพงมาก จึงได้คิดแปลงใช้โรตاميเตอร์ที่ราคาไม่สูงมากนักให้สามารถกำหนดตำแหน่งการป้อนอัตราการไหลแต่ละครั้งได้แม่นยำ

โดยในการทดลองนั้นให้เปิดวาล์วของโรตاميเตอร์แบบเปิดเต็มที่ และปรับอัตราการไหลของแก๊สโดยใช้วาล์วแบบเข็ม (Needle valve) เนื่องจากสามารถปรับอัตราการไหลได้ละเอียดกว่าวาล์วแบบธรรมดา โดยอ่านค่าที่ปรับได้จากโรตاميเตอร์ อย่างไรก็ตามการอ่านค่าด้วยสายตานั้นถ้าวางระดับสายตาไม่ตรงกับตำแหน่งเดิมก็อาจทำให้ค่าที่อ่านได้คลาดเคลื่อน จึงได้สร้างชุดกำหนดตำแหน่งการอ่านประกอบเข้ากับโรตاميเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4-4 เพื่อให้วางระดับสายตาในตำแหน่งเดิมทุกครั้งก่อนอ่านค่าอัตราการไหล และใช้หลักการเดียวกันนี้กับการอ่านค่าความดันที่ไมโครมานอมิเตอร์ โดยที่มานอมิเตอร์นั้นมีเลนส์ขยายติดอยู่หน้าระดับของของไหลในท่อของมานอมิเตอร์ สำหรับวิธีการกำหนดระดับสายตานั้นได้แก่ นำเอาเส้นผมที่มีขนาดเล็กติดในแนวระนาบไว้ที่หน้าและหลังเลนส์ ขณะอ่านค่าความดันให้ปรับระดับสายตาอยู่ในตำแหน่งที่มองเห็นผมด้านหน้า ด้านหลัง และระดับของของไหลอยู่ในระนาบเดียวกัน



รูปที่ 4-4 การดัดแปลงโรตารีเตอร์เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการอ่านค่าอัตราการใช้

จากเทคนิคที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น การทดลองต้องระมัดระวังในเรื่องความแม่นยำทั้งการวัดและการอ่านค่า เพราะความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยนั้นส่งผลกระทบต่อให้ค่าที่วัดได้นั้นคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งนอกจากการวัดและการอ่านค่าแล้วสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการทดลองเกี่ยวกับระบบการไหลได้แก่ การรั่วของของไหล กล่าวคือต้องป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วขึ้นในระบบ โดยเฉพาะเมื่อของไหลเป็นแก๊สนั้นทำให้การป้องกันการรั่วนั้นทำได้ยากยิ่งขึ้น นอกจากนั้นแล้วการที่ชั้นวางเซลล์ที่ใช้ทำการทดลองนั้น ประกอบด้วยหลายชั้นส่วนด้วยกันทำให้ความยากในการป้องกันการรั่วเพิ่มมากขึ้น

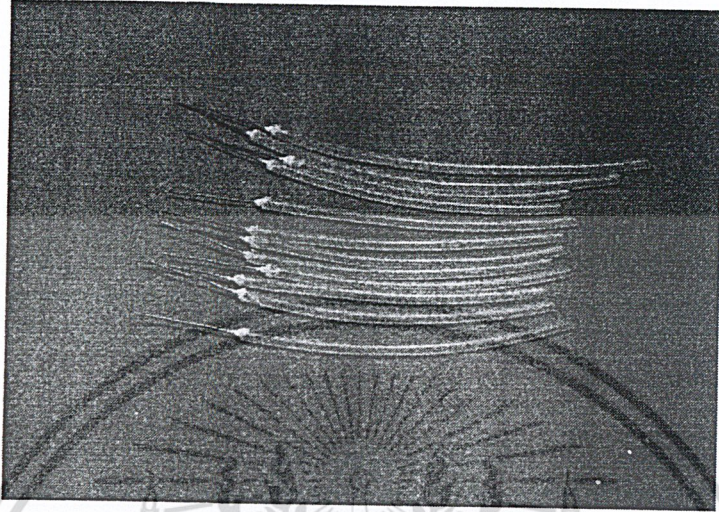
สำหรับการสร้างชุดทดลองนี้นั้น การป้องกันการรั่วเมื่อป้อนแก๊สให้แก่ชั้นวางเซลล์นั้นเป็นขั้นตอนที่ยากที่สุด ได้มีการพยายามลองผิดลองถูกนานพอสมควรจึงหาวิธีทำให้เกิดการรั่วที่เกิดขึ้นในค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นในการประกอบชั้นวางเซลล์เพื่อวัดการกระจายการไหลในแต่ละครั้งนั้น ต้องจัดการให้การรั่วนั้นอยู่ในค่าที่ยอมรับจึงสามารถทำการทดลองได้ สำหรับวิธีป้องกันการรั่วนั้นจะกล่าวถึงในการประกอบชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.3 การประกอบชุดทดลอง

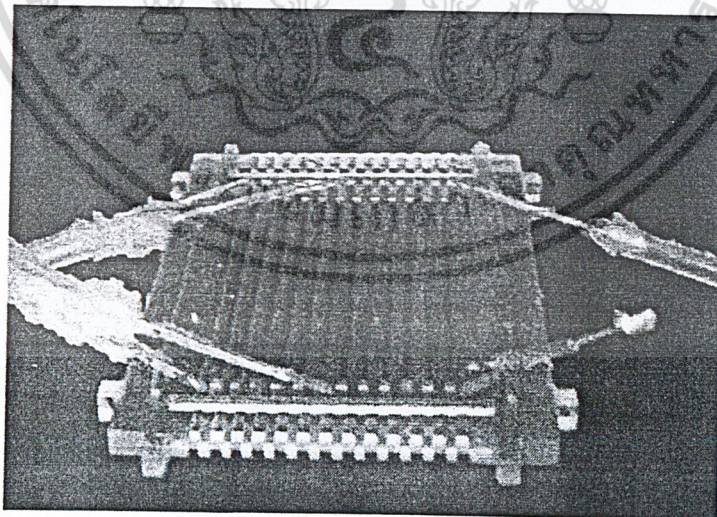
วางเซลล์ที่ใช้วัดความดันสูญเสียไว้ตามลำดับเซลล์ที่ต้องการวัด ซึ่งจะเริ่มวัดที่เซลล์ลำดับที่ 1-3 ก่อน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ประกอบเข็มฉีดยาเข้ากับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. ที่จะใช้วัดความดันแสดงในรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 แสดงการประกอบเข็มฉีดยาเข้ากับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม

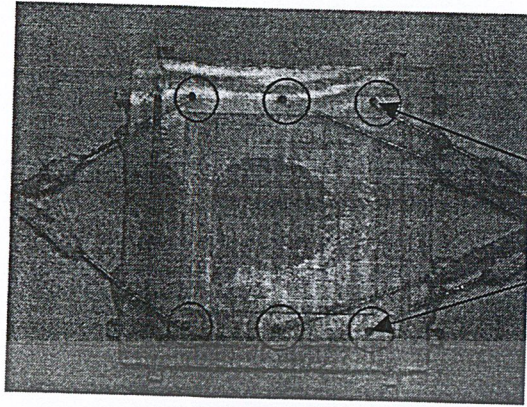
2. วางท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. ที่จะใช้วัดความดันลงบนร่องของอินเตอร์คอนเนกเตอร์ แล้วยึดท่อให้ติดกับอินเตอร์คอนเนกเตอร์โดยใช้กาวซิลิโคน จากนั้นเสียบท่อซิลิโคนใส่เข้ากับท่อและใช้กาวซิลิโคนทาตรงรอยต่อ แล้วทิ้งให้กาวแห้งดังแสดงในรูปที่ 4-6



รูป 4-6 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

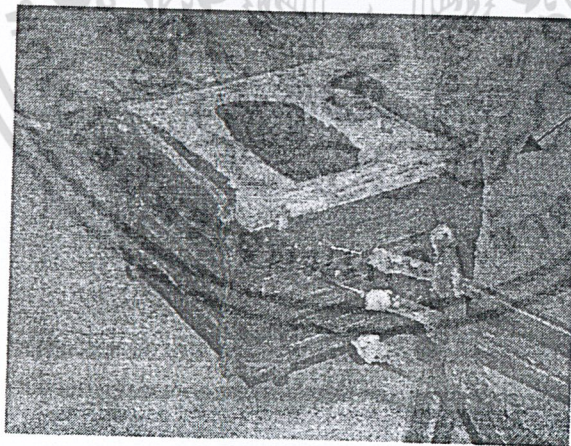
3. ทากาวซิลิโคนให้ทั่วพื้นที่ของอินเตอร์คอนเนกเตอร์แล้ววางซีลลงบนอินเตอร์คอนเนกเตอร์ที่ทากาวไว้ โดยให้รูของซีลตรงกับตำแหน่งของปลายร่องแต่ละร่อง ดังแสดงในรูปที่ 4-7



รูที่ใช้วัดความดันสถิตย์ที่ตำแหน่งช่องริมซ้าย ตรงกลาง และริมขวาที่ทางเข้าและทางออก

รูปที่ 4-7 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 3

4. วางเซลล์ตามลำดับที่ต้องการ โดยต้องทากาวซิลิโคนระหว่างหน้าสัมผัสของแต่ละชั้นที่ประกอบขึ้นเป็นชั้นวางเซลล์ ซึ่งมีความขรุขระไม่เท่ากันเพื่อทำหน้าที่กันรั่ว วิธีประกอบคือนำซิลิโคนที่ใช้วัดความดันสูญเสียซึ่งเจาะรูตรงตำแหน่งที่ต้องการวัด วางบนอินเตอร์คอนเนกเตอร์ที่มีช่องการไหลที่ต้องการวัดความดันสูญเสีย แล้ววางอินเตอร์คอนเนกเตอร์ที่ใช้วัดความดันสูญเสียด้านที่มีร่องที่เสียบท่อไว้ลงบนซิลิโคน โดยให้ปลายร่องแต่ละร่องตรงกับรูของซีล ทำในลักษณะนี้จนครบ 3 เซลล์ที่ใช้วัดความดันสูญเสีย และชั้นเซลล์อื่นๆ โดยให้ซิลิโคนระหว่างอินเตอร์คอนเนกเตอร์จนครบ 10 เซลล์ แล้วประกบด้วยโครงสร้างของชั้นวางเซลล์ทั้งสองด้านแล้วทากาวซิลิโคนที่หน้าสัมผัสทุกด้านเข้าชั้นวางเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 4-8

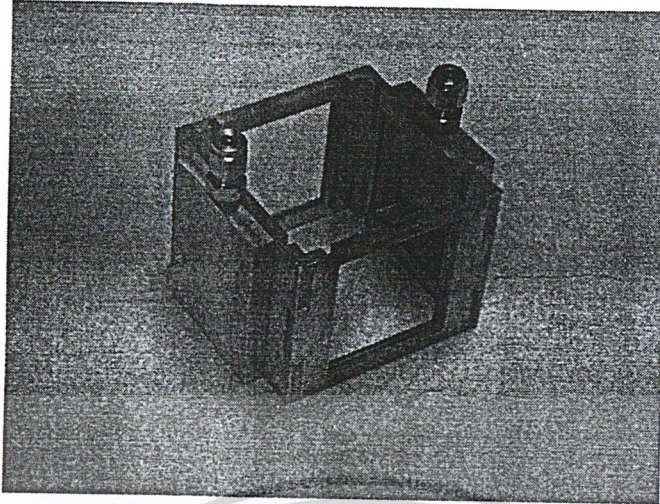


โครงสร้างของชั้นวางเซลล์

รูปที่ 4-8 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 4

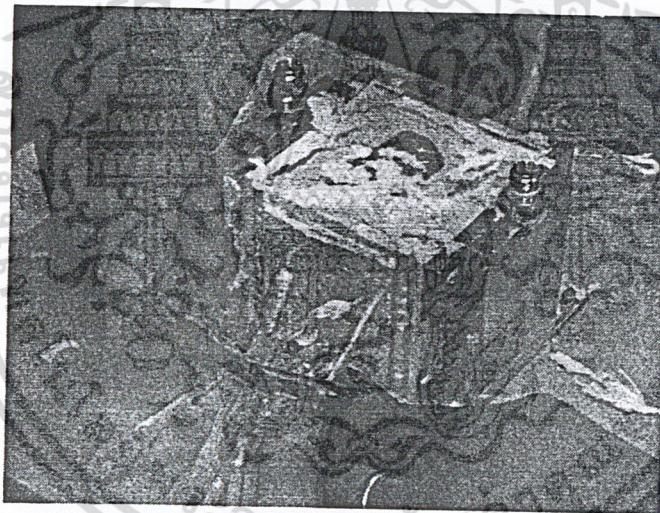
5. ประกอบชุดกระจายการไหลเข้ากับโครงสร้างชั้นวางเซลล์ให้แน่นดังแสดงในรูปที่ 4-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-9 แสดงโครงสร้างของชุดกระจายการไหล

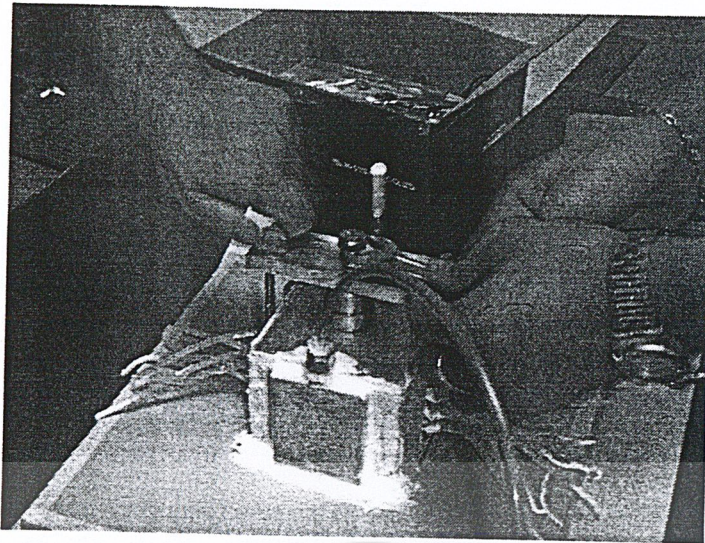
ประกอบชุดกระจายการไหลเข้ากับโครงสร้างของชั้นวางเซลล์ทั้งสองด้านที่ต้องการนำแก๊สเข้าและออก ทากาวซีติโคนบริเวณรอยต่อ ทิ้งไว้รอให้กาวแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4-10



รูปที่ 4-10 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 5

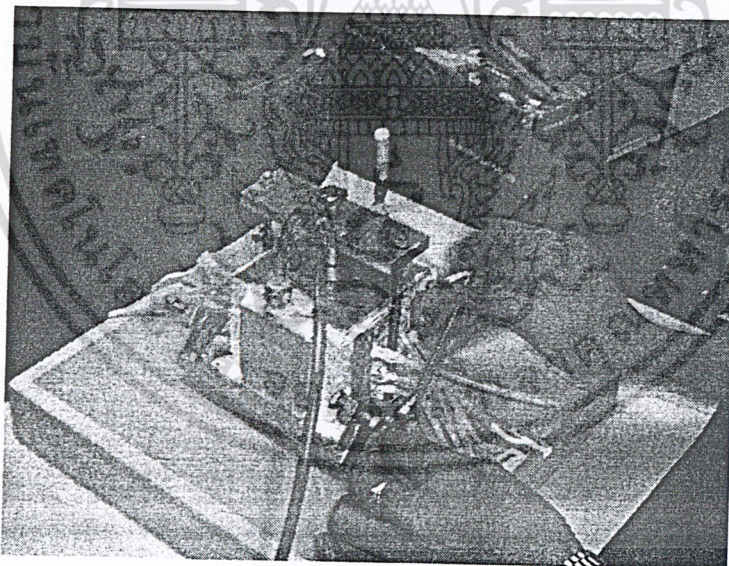
6. นำชั้นวางเซลล์ที่ประกอบได้วางบนแท่นวาง และอัดชั้นวางเซลล์ในแนวคิงด้วยชุดอัดอีกครั้งเพื่อไม่ให้มีการรั่วบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 4-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-11 การประกอบชุดทดลองตามข้อที่ 5

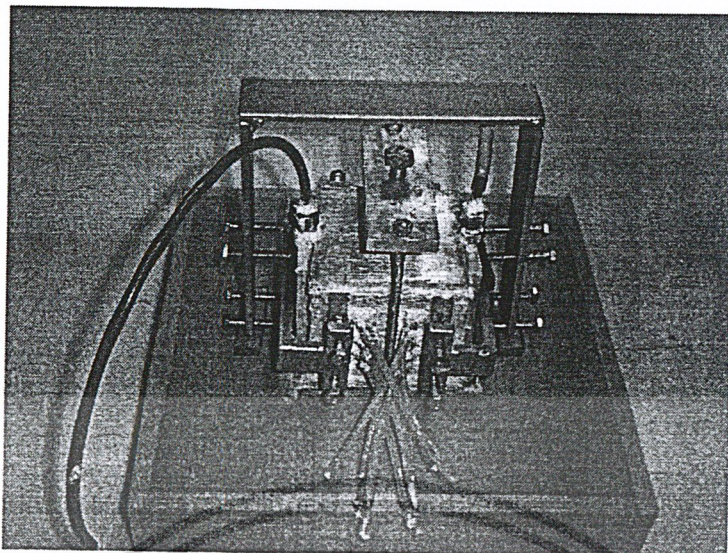
7. ใช้ปากกาจับชิ้นงานบีบโครงสร้างของชั้นวางเซลล์ที่ยึดติดกับชุดกระจายการไหลทั้งสองด้านให้แน่น ดังแสดงในรูปที่ 4-12 จากนั้นทิ้งไว้ประมาณสองถึงสามชั่วโมงเพื่อให้กาวแห้ง



รูปที่ 4-12 การประกอบชุดทดลองตามข้อ 7

8. เสียบท่อเข้ากับทางเข้าและทางออกของชั้นวางเซลล์ แล้วทากาวซิลิโคนตรงรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 4-13 จากนั้นทิ้งให้กาวแห้งโดยใช้เวลาประมาณ 7-8 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-13 การประกอบชุดทดลองตามข้อ 8 เป็นชั้นวางเซลล์ที่สมบูรณ์พร้อมสำหรับการทำการทดลอง

9. ตรวจสอบบริเวณรอยต่อของแต่ละชั้นส่วนของชั้นวางเซลล์อีกครั้งและทากาวบริเวณที่เป็นรอยต่อซ้ำอีกครั้งโดยเฉพาะบริเวณ ท่อที่ใช้วัดความดัน และทิ้งให้กาวแห้งโดยใช้เวลาประมาณ 7-8 ชั่วโมง

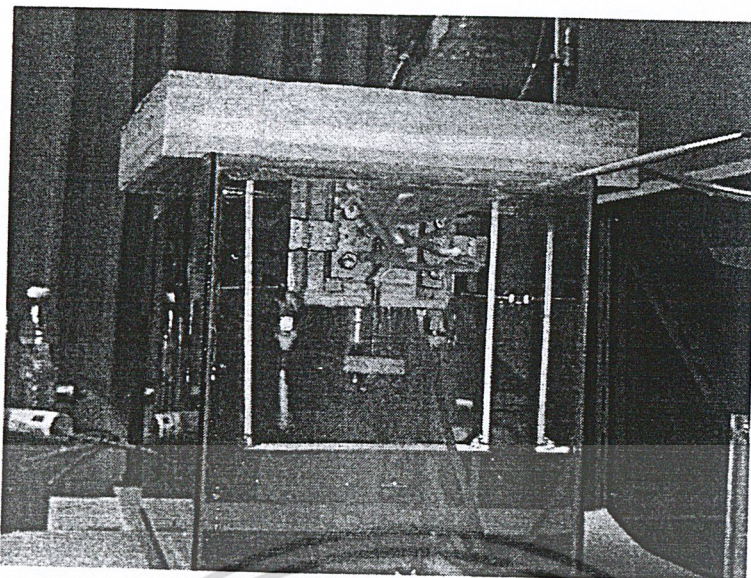
4.1.2.4 วิธีการทดลอง

ภายหลังจากประกอบชุดทดลองตามหัวข้อ 4.1.2.3 เรียบร้อยแล้วนำชุดทดลองที่ได้คือเข้ากับอุปกรณ์ดังแผนผังที่แสดงในรูปที่ 4-15

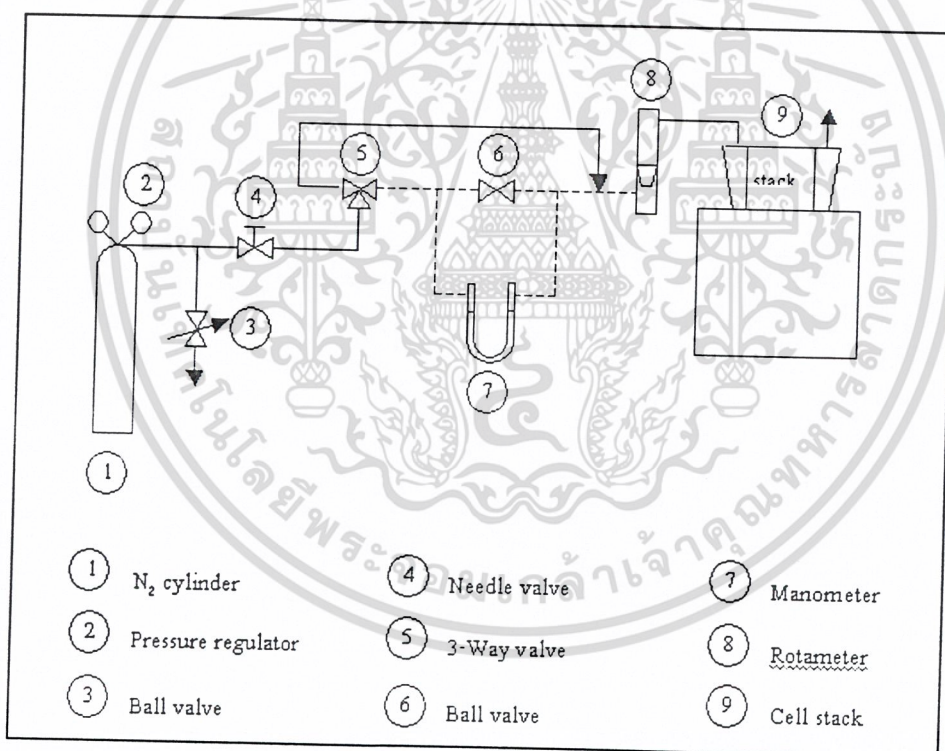
4.1.2.4.1 วิธีการตรวจสอบการรั่ว

ทำการตรวจสอบรอยรั่วของชุดทดลองในขั้นแรกโดยการใช้น้ำผสมกับสบู่เพื่อทำให้เกิดฟองและนำภูกันจุ่มน้ำสบู่ทาในบริเวณรอยต่อของกาวซิลิโคนให้ทั่วชุดทดลอง หากชุดทดลองมีการรั่วจะปรากฏฟองขนาดเล็กๆขึ้นมาและมองเห็นได้ชัดเจน ให้ทำการเช็ดฟองและน้ำสบู่ในบริเวณนั้นออกให้แห้งด้วยสำลีหรือผ้าสะอาดแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วจึงนำกาวซิลิโคนทาในบริเวณที่เกิดรอยรั่วให้ทั่วแล้วทิ้งไว้ให้แห้งสนิท เมื่อแน่ใจว่าไม่เกิดรอยรั่วแล้วจึงทำการทดสอบโดยใช้วิธีการนำชุดทดลองทั้งชุดจุ่มในน้ำสะอาดและทำการสังเกตการรั่วหากมีการรั่วเกิดขึ้นจะต้องทำการแก้ไขให้เรียบร้อยเสียก่อน หากชุดทดลองไม่เกิดการรั่ว คือจะไม่ปรากฏฟองขึ้นในขณะที่จุ่มน้ำจึงจะนำมาทดลองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

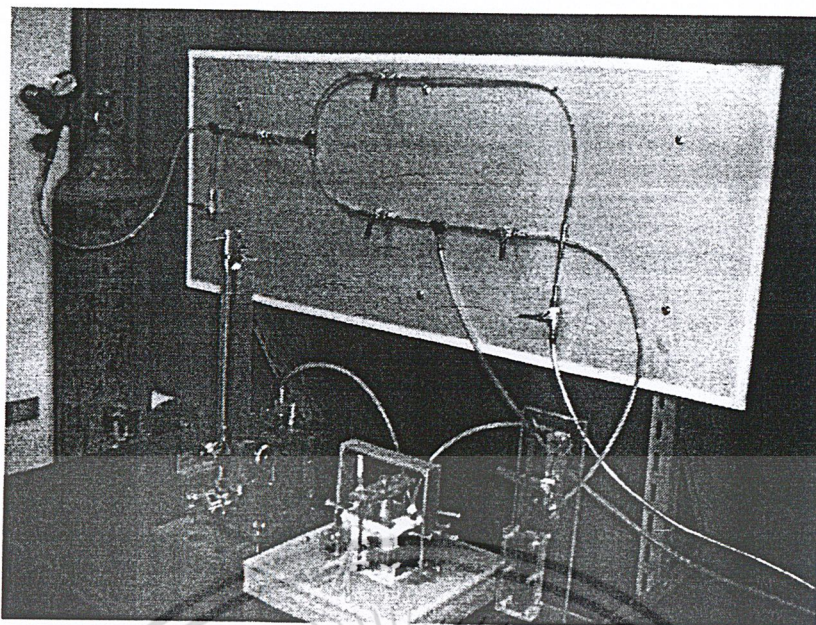


รูปที่ 4-14 การตรวจสอบการรั่วโดยการนำชุดทดลองทั้งชุดจุ่มในน้ำสะอาด



รูปที่ 4-15 แผนผังอุปกรณ์ต่างๆในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-16 แสดงชุดทดลองที่พร้อมทำการทดลอง

4.1.2.4.2 การวัดค่าความดันสูญเสียในช่องการไหล

1. เปิดหัวถังแก๊สและปรับ Pressure regulator ไปที่ค่าที่ต่ำที่สุดแสดงในรูปที่ 4-17
2. ปิดวาล์วหมายเลข 3 และหมุนวาล์วหมายเลข 5 ให้การไหลไปตามเส้นทึบ นั่นคือไหลผ่านโรตاميเตอร์แล้วเข้าชั้นวางเซลล์
3. ปรับชุดกำหนดตำแหน่งอัตราการไหลไปยังค่า 2.5 ลิตรต่อนาที
4. ค่อย ๆ ปรับวาล์วหมายเลข 4 โดยสังเกตให้ลูกกลอยของโรตاميเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งที่กำหนดไว้ ทั่วไว้ประมาณห้านาทีเพื่อให้ลูกกลอยนิ่ง
5. อ่านระดับความสูงของน้ำมันในมานอมิเตอร์แล้วเก็บค่าเป็น H_{ref}
6. นำท่อซลิโคนที่ต่อจากเซลล์ลำดับที่หนึ่ง ตำแหน่งแรก (P_1) ทางด้านทางเข้าของแก๊สมาเสียบเข้ากับมานอมิเตอร์ ซึ่งปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยสู่บรรยากาศ
7. ปิดท่อซลิโคนตำแหน่งอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการวัด
8. ทั่วไว้ประมาณยี่สิบวินาที แล้วอ่านระดับความสูงของน้ำมันที่เพิ่มขึ้น แล้วเก็บค่าเป็น H_{in}
9. ถอดท่อซลิโคนอันเดิมออกแล้วปิดท่อไว้ นำท่อซลิโคนของ P_1 ทางด้านทางออกของแก๊สมาเสียบเข้ากับมานอมิเตอร์แทนแล้วทั่วไว้ประมาณยี่สิบวินาที
10. อ่านระดับความสูงของน้ำมันในมานอมิเตอร์ที่เพิ่มขึ้น แล้วเก็บค่าเป็น H_{out} แสดงในรูปที่

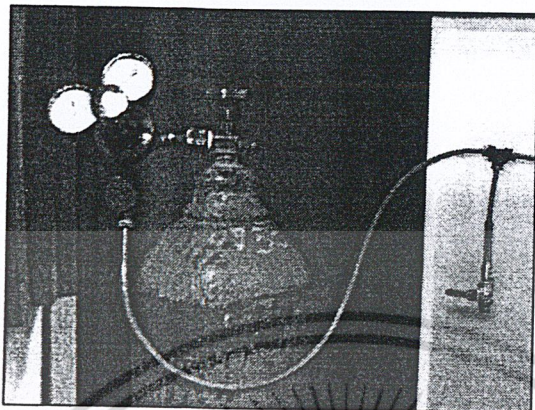
4-18

11. คำนวณหาค่าความดันสูญเสียภายในช่องการไหล จากการเอาค่าความแตกต่างระหว่าง H_{in} และ H_{out} คูณกับค่าความหนาแน่นของน้ำมันในมานอมิเตอร์ แล้วเก็บค่าเป็นความดันสูญเสียของช่องการไหล ตำแหน่งที่หนึ่งของเซลล์ลำดับที่หนึ่ง (ΔP_{11})

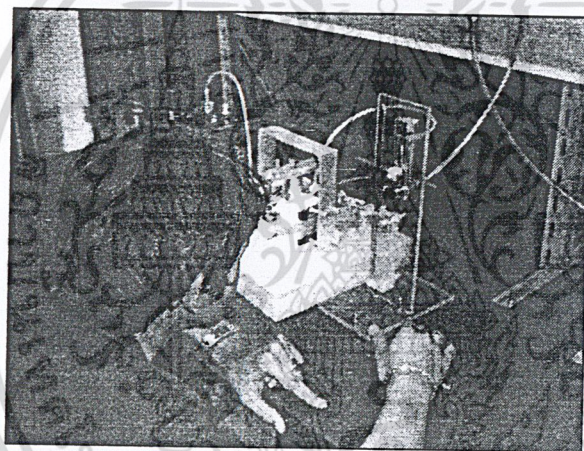
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 3 ถึงข้อ 12 จนได้ค่าความดันสูญเสียที่ทุกตำแหน่งที่ค่าอัตราการไหลทั้ง 3 ค่า ได้แก่ 2.5.3 และ 7 ลิตรต่อนาที

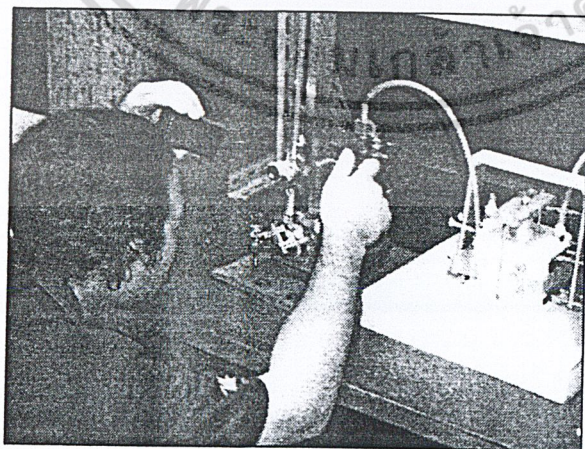
14. ทำการทดลองซ้ำใหม่ทั้งหมดตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 13 เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง



รูปที่ 4-17 แสดงการปรับ Pressure regulator ไปที่ค่าที่ต่ำที่สุด



รูปที่ 4-18 แสดงการอ่านอัตราการไหลจากโรตาริเตอร์



รูปที่ 4-19 แสดงการอ่านระดับความสูงของน้ำมันในมานอมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การ Simulation เปรียบเทียบกับการทดลอง

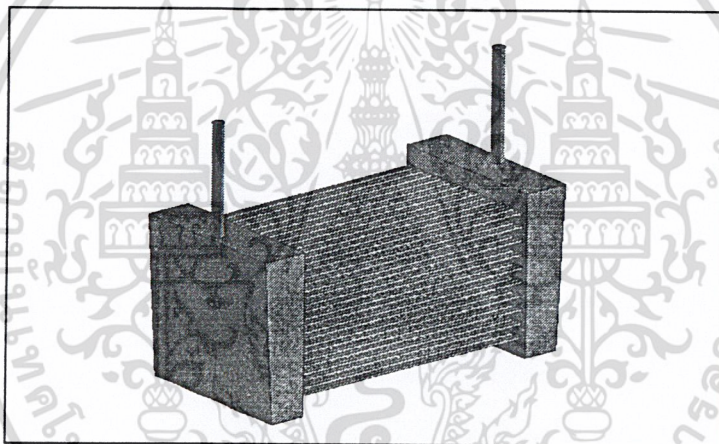
ในการทำ Simulation เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองนั้น กระทำขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบว่าโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมการไหล (STAR-CD) มีความใกล้เคียงกันหรือแตกต่างกับการทดลองอย่างไร ซึ่งถ้ามีความใกล้เคียงกันแล้วนั้นหมายถึงว่าโปรแกรมน่าจะสามารถทำนายพฤติกรรมการไหลในรูปแบบอื่นๆ ที่คล้ายกันได้

อย่างไรก็ดีในการทำ Simulation นั้น ไม่ได้หมายความว่าผลการ Simulation จะถูกต้องเสมอไป แต่การทำ Simulation จะเป็นเพียงการทำนายแนวโน้มของรูปร่างที่ต้องการเปรียบเทียบกัน ซึ่งจะมีข้อดีคือทำให้ประหยัดเวลาและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลองหรือการสร้างชิ้นงานจริงด้วยการลองผิดลองถูก

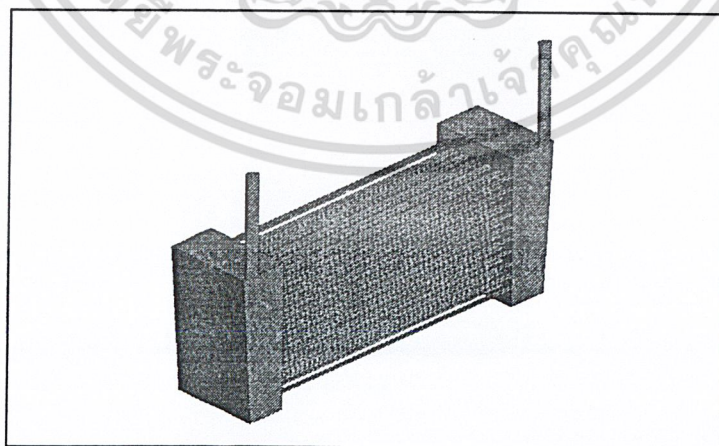
ดังนั้น เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการ Simulation จึงต้องใช้ความเร็วของไนโตรเจนที่ความเร็วเช่นเดียวกับการทดลอง คือ 3.3157 m/s โดยมีอัตราการไหล 2.5 LPM

4.1.3.1 ขั้นตอนการสร้างแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 1 ทำการวาดแบบที่วัดขนาดมาจากชุดการทดลอง(นำปริมาตรของชุดทดลองมาเขียนแบบ)
- 2 นำแบบที่วาดมาแบ่งครึ่งคิ่งรูปที่ 2 เพราะรูปทรงมีความสมมาตรกัน
- 3 นำแบบที่ทำการแบ่งครึ่งนี้ออก (Export) ไปเข้าโปรแกรมแบ่ง Mesh



รูปที่ 4-20 แบบของปริมาตรของชุดทดลองที่นำไปวิเคราะห์

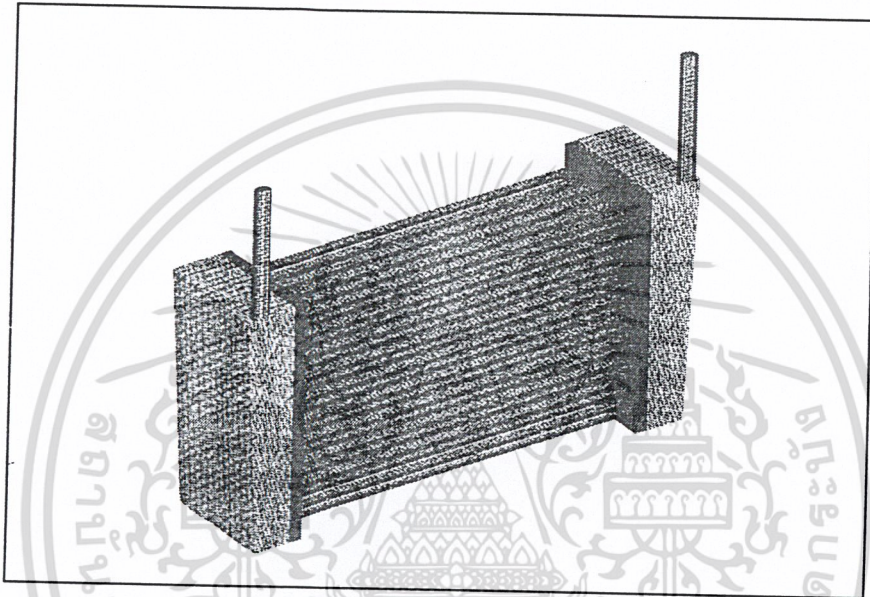


รูปที่ 4-21 แบบที่ทำการแบ่งครึ่งเพื่อนำไปแบ่ง Mesh

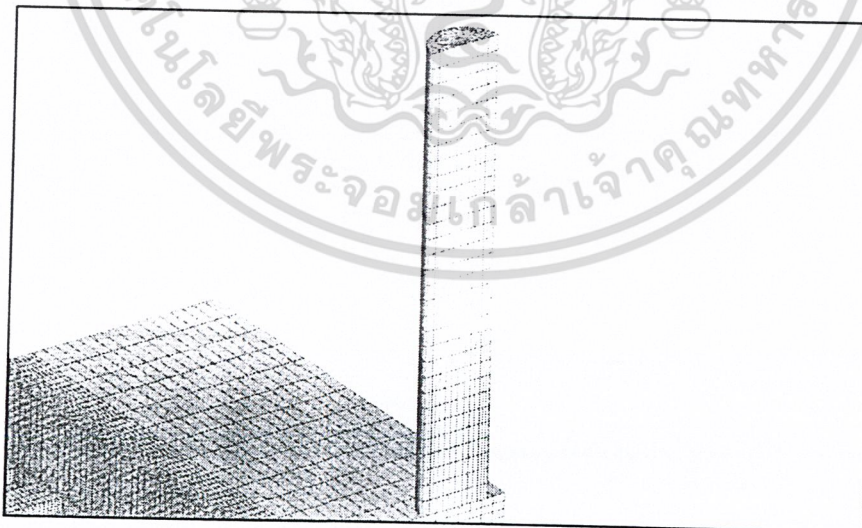
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.2 ขั้นตอนการแบ่ง Mesh ในโปรแกรมแบ่ง Mesh

- 1 นำแบบที่ได้ทำการวาดใน โปรแกรม Unigraphics นำเข้า (import) ในโปรแกรมแบ่ง Mesh
- 2 นำแบบที่ได้ import เข้ามา มาทำการแบ่งเป็นส่วนพื้นที่ย่อยๆ (Partition) เพื่อจะทำการแบ่ง Mesh เพื่อสะดวกในการแบ่ง Mesh
- 3 ทำการแบ่ง Mesh โดยแบ่ง Mesh ที่ละเอียดในส่วนบริเวณที่สำคัญในที่นี้เราจะพิจารณาในส่วนทางเข้าของช่องทางไหลของชั้นวางเซลล์ และแบ่ง Mesh ที่หยาบในส่วนที่ไม่สำคัญเพื่อเป็นการประหยัดทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์และใช้เวลาในการคำนวณรวดเร็วยิ่งขึ้น
- 4 นำแบบที่ทำการแบ่ง Mesh เสร็จเรียบร้อยแล้ว export ไปเข้าโปรแกรม STAR-CD เพื่อไปทำการวิเคราะห์เพื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีทดลอง

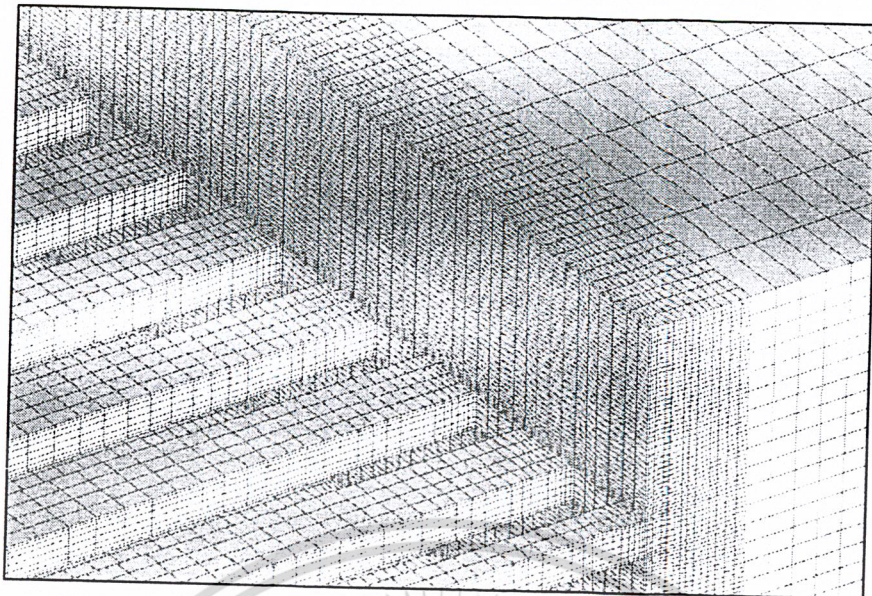


รูป 4-22 แบบที่ทำการแบ่ง Mesh

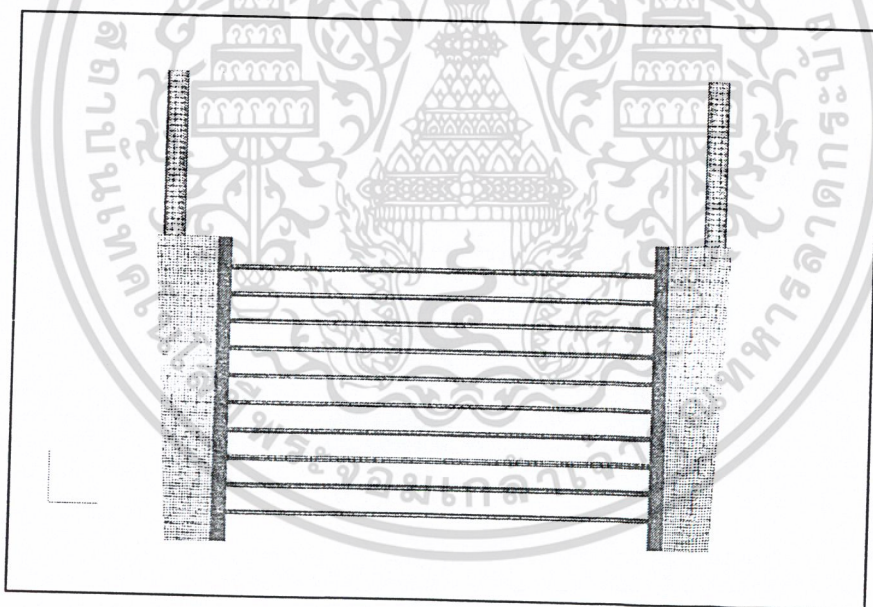


รูปที่ 4-23 แบบที่แบ่ง Mesh บริเวณท่อทางออกของไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

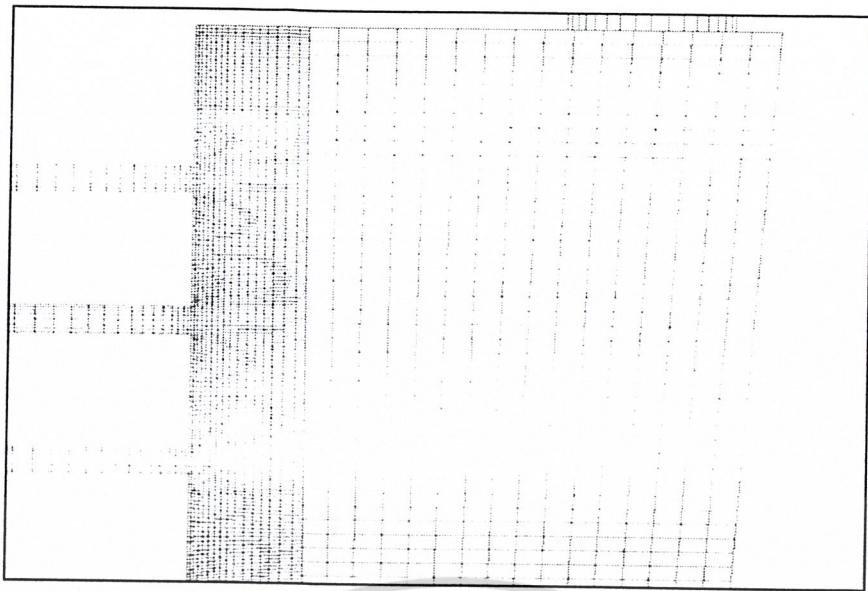


รูปที่4-24 รูปขยายของ Mesh ที่บริเวณทางเข้าช่องทางการไหลของชั้นวางเซลล์โดยจะมีความละเอียดบริเวณทาง
เข้าของช่องทางการไหล



รูปที่4-25 รูปของการแบ่ง Mesh ที่ระนาบ 2 มิติ โดยจะเห็นได้ว่าที่ทางเข้าของชั้นวางเซลล์นั้นมีความละเอียดมาก
กว่าพื้นที่อื่นๆ เพราะจะให้ความสำคัญในส่วนช่องทางเข้าของชั้นวางเซลล์มาก

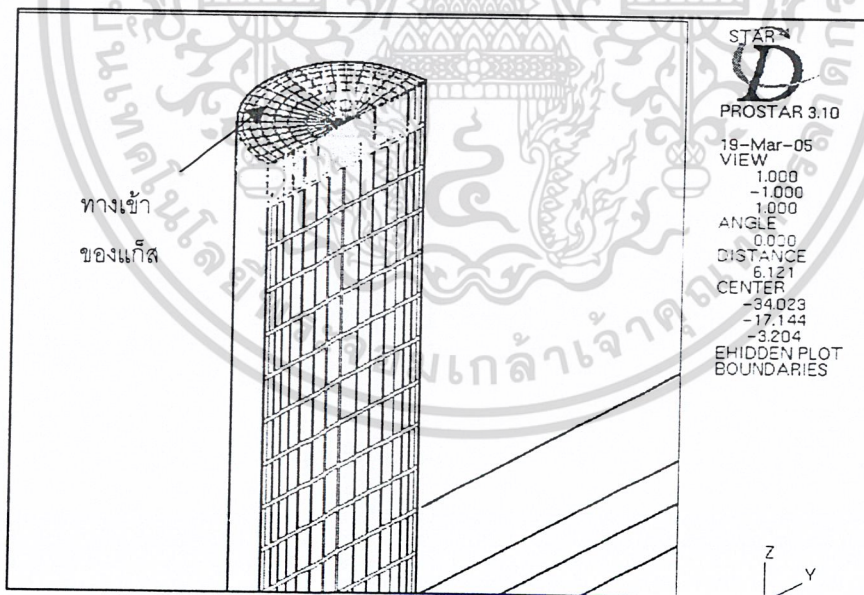
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-26 รูปขยายของการแบ่ง Mesh บริเวณทางเข้าของชั้นวางเซลด์

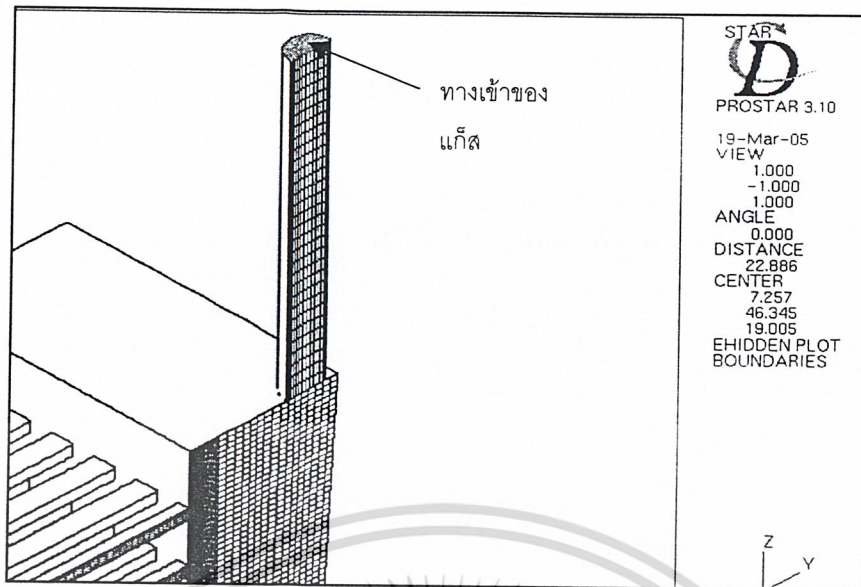
4.1.3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

- 1 นำแบบที่ทำการแบ่ง Mesh เสร็จเรียบร้อยแล้ว นำเข้ามาใน โปรแกรม STAR-CD
- 2 นำแบบที่ได้มาทำการกำหนดเงื่อนไข (Boundary Condition) ให้กับแบบ
- 3 นำแบบที่ทำการกำหนด Condition แล้วมาทำการคำนวณ
- 4 เก็บผลลัพธ์ที่ได้ แล้วไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง (ในที่นี้จะเก็บผลของ Static Pressure)

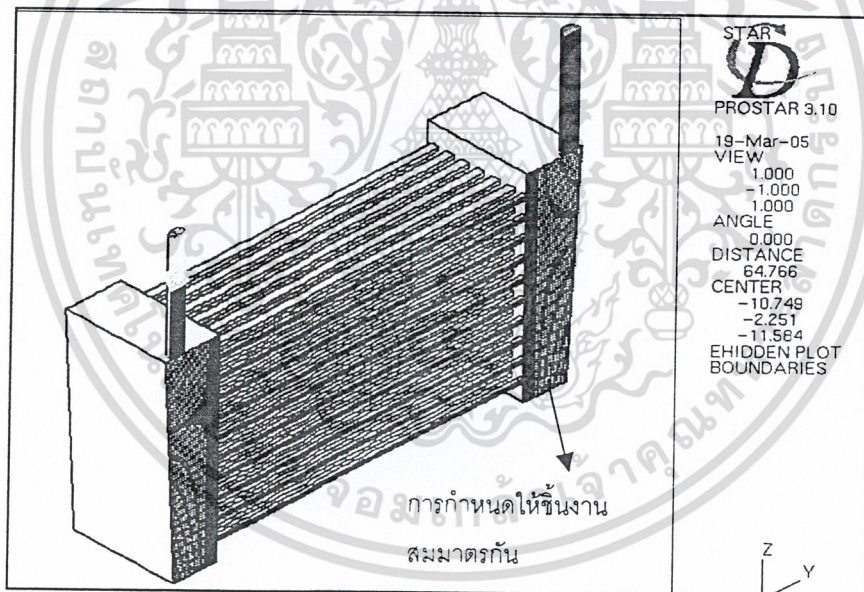


รูปที่ 4-27 รูปของการใส่ เงื่อนไขทางเข้าของแก๊สในโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-28 รูปของการใส่เงื่อนไขทางออกของแก๊สในโครเจน

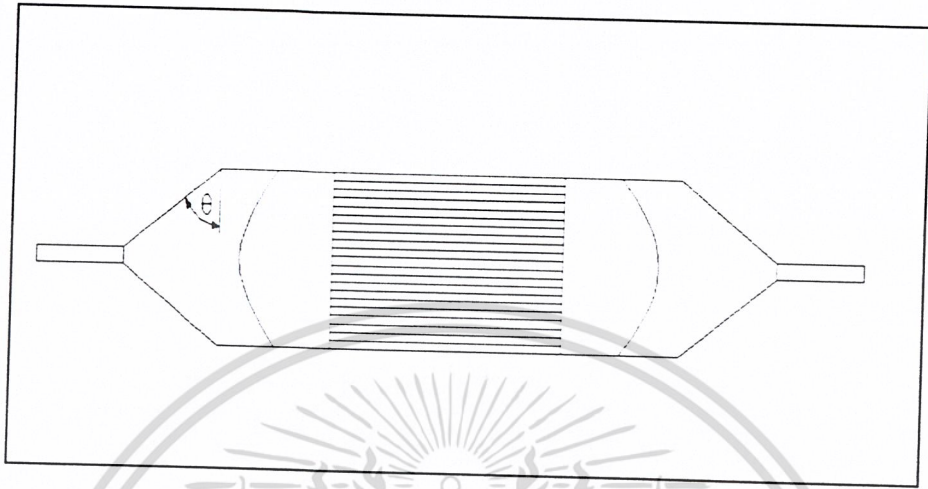


รูปที่ 4-29 รูปของการทำการกำหนดให้แบบสม่ำเสมอ คือการกำหนดให้ชั้นงานที่เข้ามาในโปรแกรมมีความ
 สมมาตรโดยแบบที่เข้ามามีแค่เพียงครั้งเดียวฉะนั้นต้องกำหนดความสามารถให้กับชั้นงานโดยทำการใส่ตรงผิว
 หน้าของระนาบที่ทำการผ่าครึ่ง

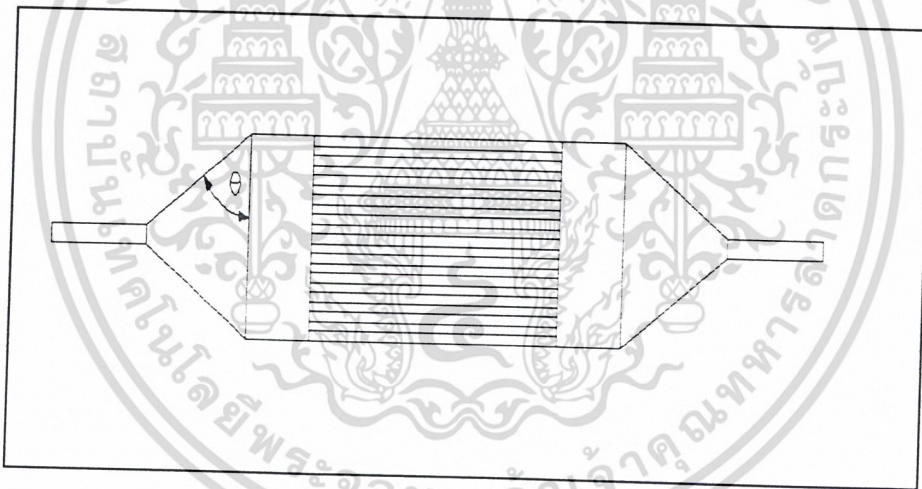
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทำการ Simulation ในรูปทรงที่เปลี่ยนแปลงมุม

โดยทำการเปลี่ยนแปลงมุมทั้งรูปทรงโค้งและรูปทรงเหลี่ยม ดังรูปที่ 4-30 และรูปที่ 4-31 ตามลำดับ โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงมุมที่ 15 องศา, 30 องศา, 45 องศา, 60 องศา และ 75 องศา



รูปที่ 4-30 แบบทรงโค้งมนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงมุม



รูปที่ 4-31 แบบทรงเหลี่ยมที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงมุม

4.2.1 กำลังไฟฟ้าจากชุดทดลอง

$$P_c = V_c \times I \times n \quad (4-1)$$

โดยที่ P_c คือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง (ในที่นี้ต้องการให้มีกำลังไฟฟ้าประมาณ 25 วัตต์ ต่อห่อเซลล์เชื้อเพลิง), V_c คือความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อหนึ่งเซลล์ มีค่า $0.65 \frac{\text{Volts}}{\text{Cell}}$ [28], n คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนเซลล์ในชั้นวางเซลล์, และ I คือกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงมีค่า $400 \frac{mA}{cm^2}$ [28]
โดยพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาต่อเซลล์มีค่า 8 cm^2

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ

$$I = \left(400 \frac{mA}{cm^2} \right) \times (8 \text{ cm}^2) \times \left(\frac{1}{1000} \frac{A}{mA} \right)$$

$$= 3.2 \quad A$$

จากสมการ (4.1) สามารถคำนวณหาจำนวนเซลล์ของชั้นวางเซลล์ได้จาก

$$n = \frac{P_c}{V_c \times I}$$

$$= \frac{25 \text{ watts}}{(0.65 \text{ Volt}) \times (3.2 \text{ A})}$$

$$= 12.02 \quad \text{ชั้น}$$

ดังนั้น จึงเลือกใช้จำนวนเซลล์ในชั้นวางเซลล์ 12 ชั้น

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงคือ

$$P_c = \left(0.65 \frac{\text{Volts}}{\text{cell}} \right) \times (3.2 \text{ A}) \times (12 \text{ cells})$$

$$= 24.96 \quad \text{watts}$$

4.2.2 อัตราการไหลของไฮโดรเจน[28]

สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\dot{m}_{H_2} = 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{P_c}{V_c} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4-2)$$

แทนที่จะได้

$$\dot{m}_{H_2} = 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{24.96}{0.65} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$= 4.032 \times 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

หรือ

$$Q_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\rho_{H_2, @ 800^\circ C} [29]}$$

$$= \frac{4.032 \times 10^{-7} \text{ kg/s}}{0.022634 \text{ kg/m}^3}$$

$$= 1.78 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$= 1.07 \quad \text{LPM}$$

4.2.3 อัตราการไหลของอากาศ[28]

สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m^{\circ}_{O_2} = 8.29 \times 10^{-8} \times \frac{P_c}{V_c} \frac{kg}{s} \quad (4-3)$$

หรือ

$$m^{\circ}_{Air} = 3.57 \times 10^{-7} \times \lambda \times \frac{P_c}{V_c} \frac{kg}{s} \quad (4-4)$$

โดยค่า λ ปกติกำหนดให้เท่ากับ 2 [1] ดังนั้นสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการได้คือ

$$\begin{aligned} m^{\circ}_{Air} &= 3.57 \times 10^{-7} \times 2 \times \left(\frac{24.96}{0.65} \right) \frac{kg}{s} \\ &= 2.74 \times 10^{-5} \frac{kg}{s} \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} Q_{Air} &= \frac{m^{\circ}_{Air}}{\rho_{Air, @ 800^\circ C [29]}} \\ &= \frac{2.74 \times 10^{-5} \frac{kg}{s}}{0.325132 \frac{kg}{m^3}} \\ &= 8.43 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} \\ &= 5.056 \text{ LPM} \end{aligned}$$

4.2.4 กำหนดค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

ในการหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการไหลของไฮโดรเจนและอากาศ ว่ามีการไหลเป็นแบบลามินาร์ หรือ เทอร์บูแลนท์ โดยนำค่าอัตราการไหลของอากาศ นำมาพิจารณาเท่านั้น (เนื่องจาก $Q_{Air} > Q_{H_2}$)

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad (4-5)$$

จากรูป 4-1 พิจารณาที่จุด 1

$$\begin{aligned} V_{Air,1} &= \frac{Q}{A_1} = \frac{Q}{\pi D^2 / 4} = \frac{8.43 \times 10^{-5} m^3 / s}{\pi (4 \times 10^{-3} m)^2 / 4} \\ &= 6.7 \frac{m}{s} \end{aligned}$$

จะได้

$$\begin{aligned} Re_{Air,1} &= \frac{(6.7 m/s)(4 \times 10^{-3} m)}{136.427 \times 10^{-6} m^2 / s} \\ &= 196.4 \end{aligned}$$

∴ ที่ช่องทางเข้าไฮโดรเจนและอากาศมีพฤติกรรมการไหลแบบลามินาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ขั้นตอนสร้างแบบที่ใช้ในการศึกษาของชุดกระจายการไหลในการทำ Simulation

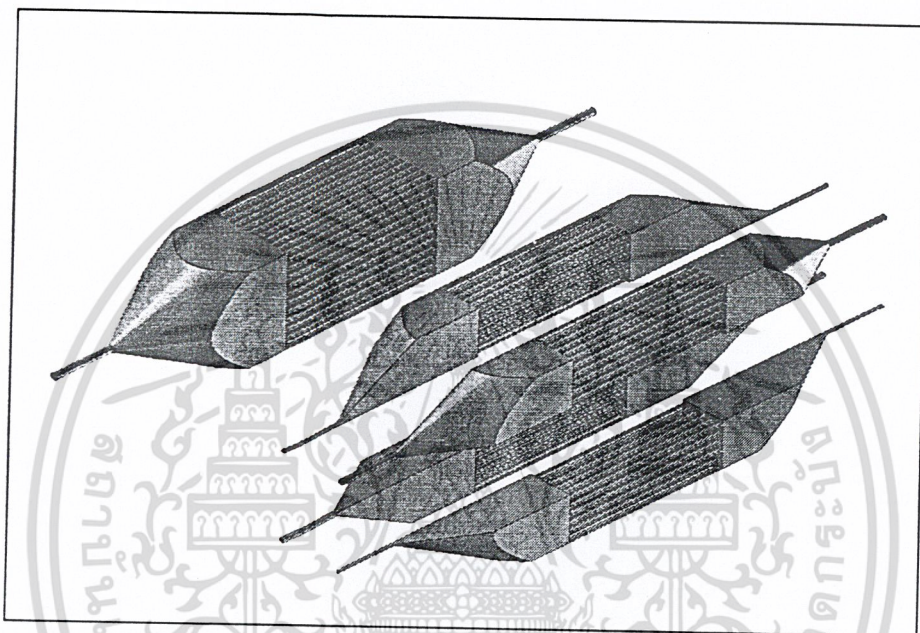
4.2.5.1 รูปแบบทรงโค้ง

4.2.5.1.1 ทำการสร้างโมเดลรูปแบบทรงโค้งมนในโปรแกรม Unigraphics

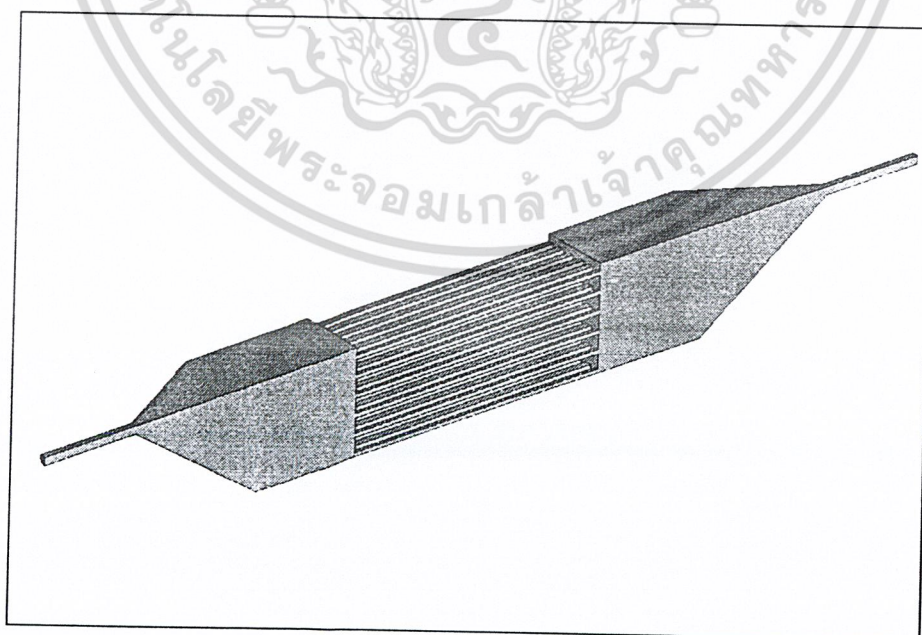
1 ทำการวาดแบบตามขนาดที่ได้คำนวณมาโดยจะนำปริมาตรของอากาศมาวิเคราะห์

2 ทำการแบ่งขนาดที่ได้วาดมาเป็น 4 ส่วนโดยจะนำไปวิเคราะห์เพียง 1 ส่วนเท่านั้นเพราะว่าชิ้นงานมีความสมมาตรกัน

3 นำรูปที่วาดจากโปรแกรม Unigraphics นำออก (export) ไปเข้าในโปรแกรมแบ่ง Mesh เพื่อที่จะทำการแบ่ง Mesh ต่อไป



รูปที่ 4-32 รูปของแบบที่วาดและทำการแบ่งเป็น 4 ส่วน

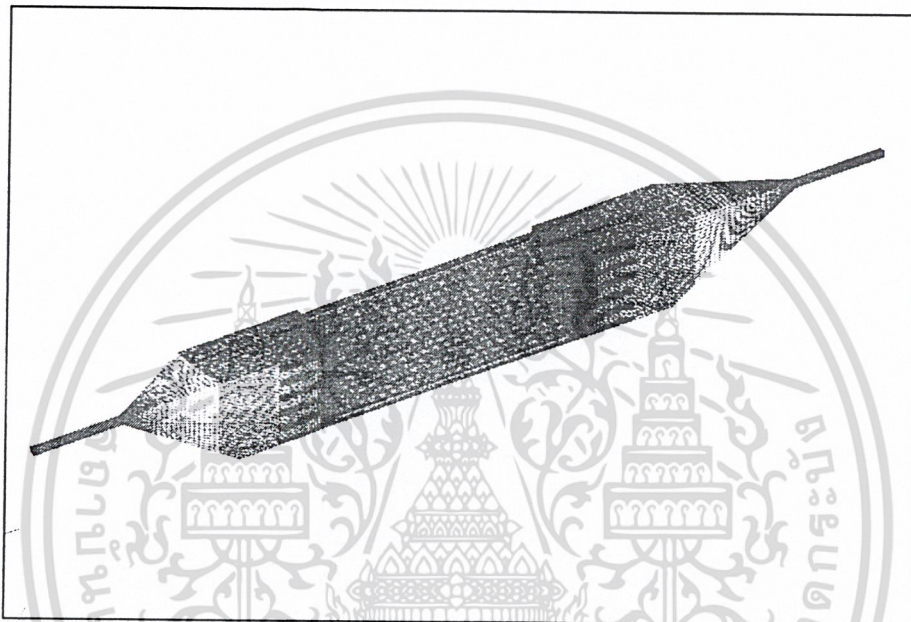


รูปที่ 4-33 รูปของแบบ 1 ใน 4 ส่วนที่นำไปวิเคราะห์

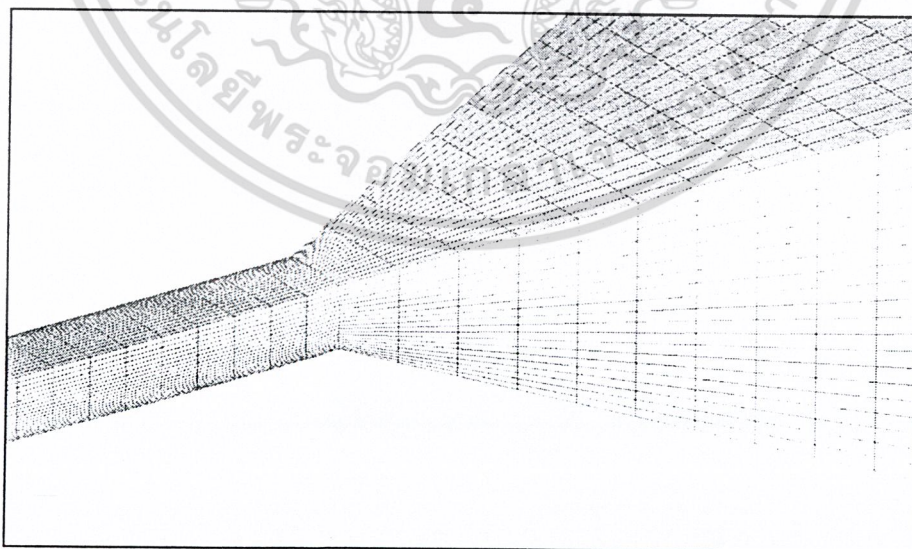
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5.1.2 ขั้นตอนของการแบ่ง Mesh ของชิ้นงาน

- 1 นำแบบที่ทำการวาดจากโปรแกรม Unigraphics มาทำการ Import เข้าในโปรแกรม แบ่ง Mesh
- 2 ทำการแบ่ง Partition ชิ้นงานออกเป็นส่วนๆ
- 3 ทำการแบ่ง Mesh ของแต่ละส่วนโดยแบ่งความละเอียดของชิ้นงานแต่ละส่วนไม่เท่ากัน โดยจะเน้น Mesh ที่ละเอียดตรงบริเวณที่ให้ความสำคัญมาก ส่วนบริเวณที่ไม่สำคัญเราจึงทำการตี Mesh ที่มีขนาดใหญ่เพื่อจะเป็นการประหยัดทรัพยากรทาง Computer และสามารถคำนวณได้เร็วขึ้น
- 4 นำชิ้นงานที่ทำการแบ่ง Mesh เสร็จเรียบร้อยแล้วให้นำออก (export) ไปเข้าโปรแกรม STAR-CD เพื่อทำการวิเคราะห์ผลที่ต้องการต่อไป

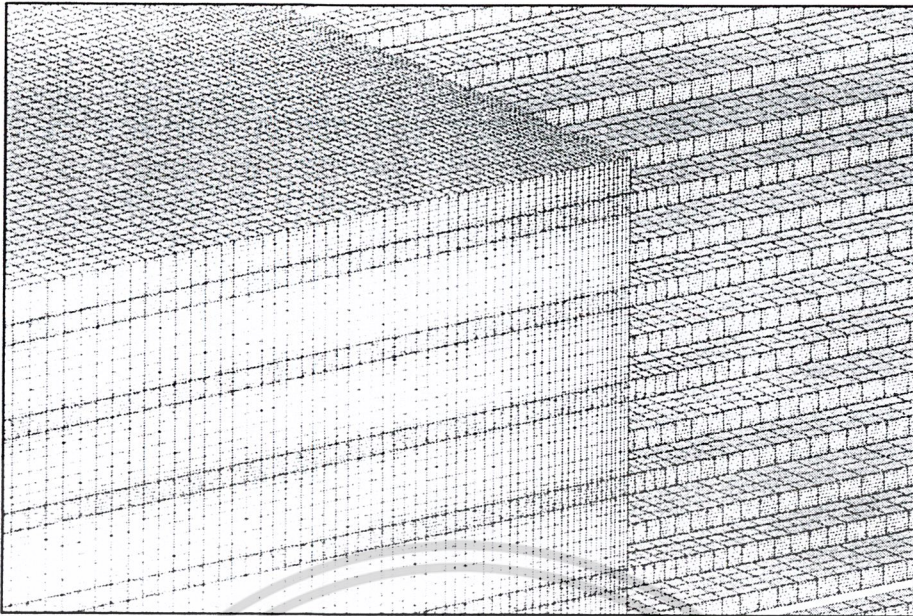


รูปที่ 4-34 รูปของการแบ่ง Mesh



รูปที่ 4-35 ภาพขยายของ Mesh บริเวณทางท่อทางเข้า

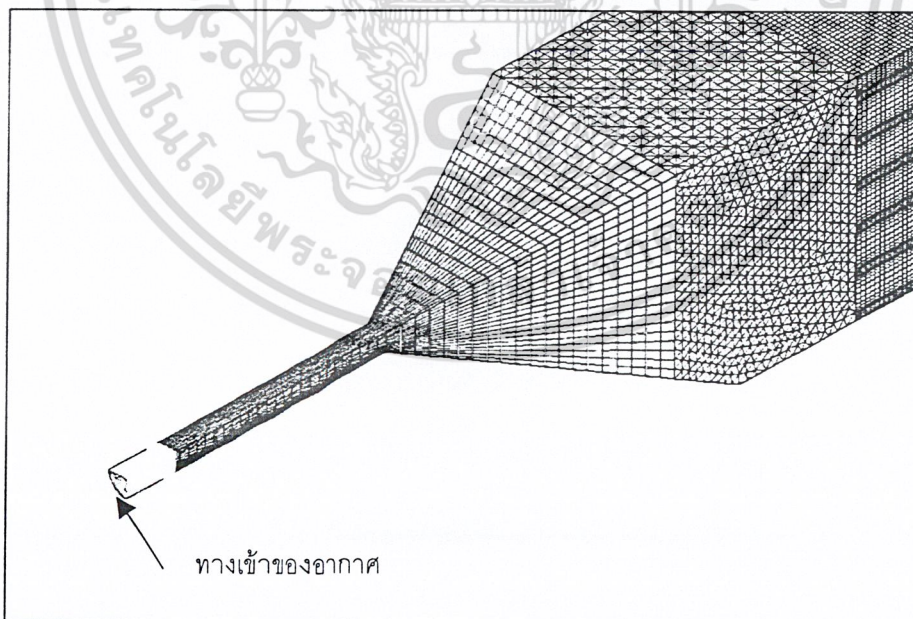
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-36 ภาพขยายของ Mesh บริเวณทางเข้าของช่องทางไหลของชั้นวางเซลล์

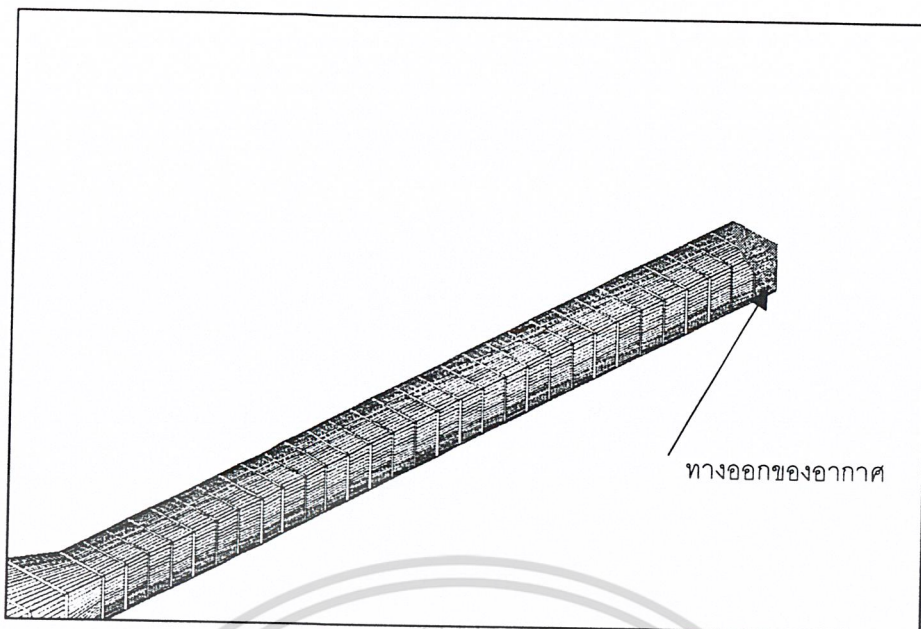
4.2.5.1.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

- 1 นำแบบที่ทำการแบ่ง Mesh เสร็จเรียบร้อยแล้ว นำเข้ามาในโปรแกรม STAR-CD
- 2 นำแบบที่ได้มาทำการกำหนดเงื่อนไข (Boundary Condition) ให้กับแบบ
- 3 นำแบบที่ทำการกำหนด Condition แล้วมาทำการคำนวณ
- 4 เก็บผลลัพธ์ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์การกระจายการไหล

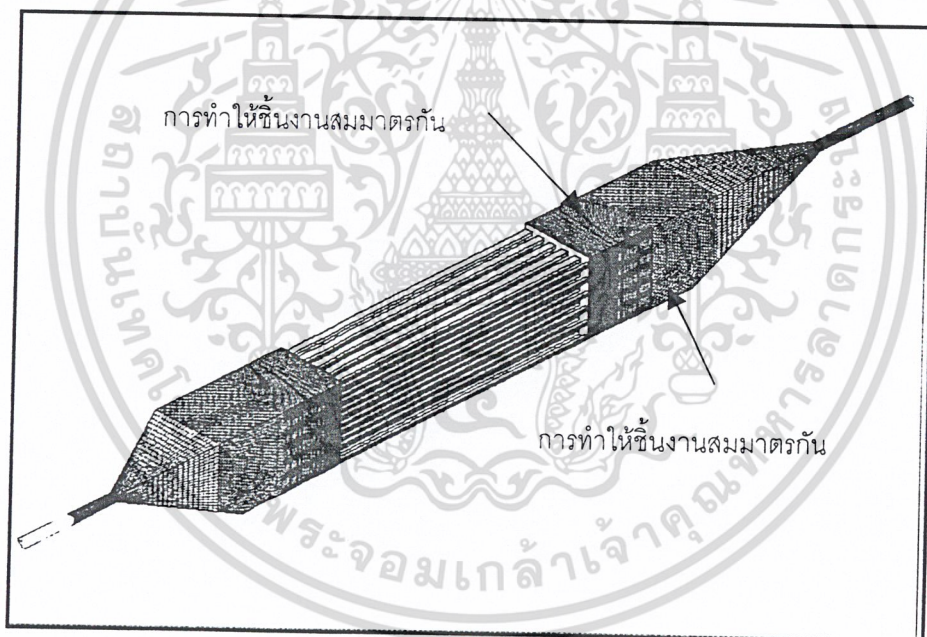


รูปที่ 4-37 รูปของการใส่เงื่อนไขทางเข้าของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-38 รูปของการใส่เงื่อนไขทางออกของอากาศ



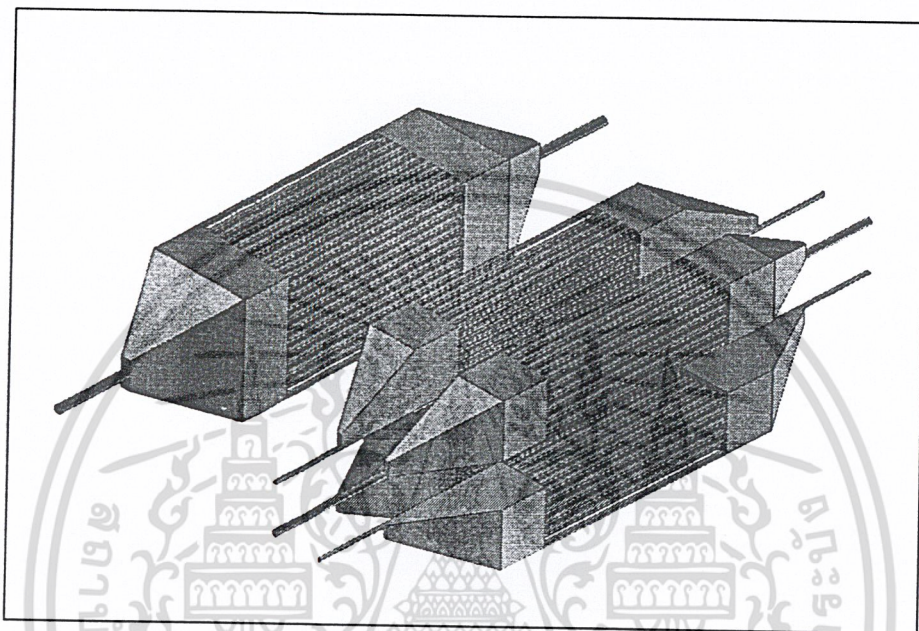
รูปที่ 4-39 รูปของการทำการกำหนดให้แบบสมมาตรกัน คือการกำหนดให้ชิ้นงานที่เข้ามาในโปรแกรมมีความสมมาตรโดยแบบที่เข้ามามีเพียง 1 ใน 4 เท่านั้น ฉะนั้นต้องกำหนดความสมมาตรให้กับชิ้นงานโดยทำการใส่ตรงผิวหน้าของระนาบที่ทำการผ่าแบ่งผิวของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

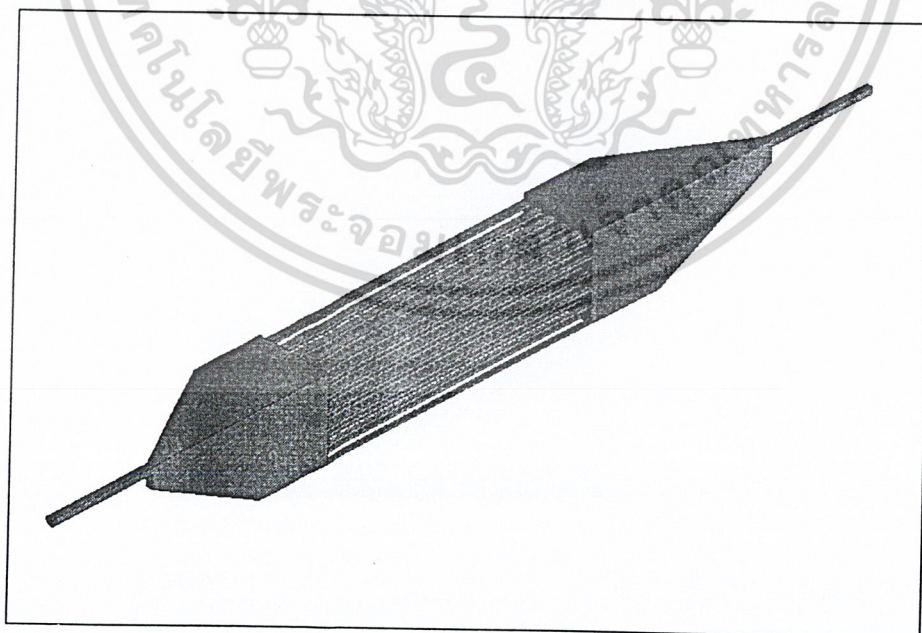
4.2.5.2 รูปทรงแบบเหลี่ยม

4.2.5.2.1 ทำการสร้างโมเดลรูปแบบทรงแบบเหลี่ยมในโปรแกรม Unigraphics

- 1 ทำการวาดแบบตามขนาดที่ได้คำนวณมาโดยจะนำปริมาตรของอากาศมาวิเคราะห์
- 2 ทำการแบ่งขนาดที่ได้วัดมาเป็น 4 ส่วน โดยจะนำไปวิเคราะห์เพียง 1 ส่วนเท่านั้นเพราะว่าชิ้นงานมีความสมมาตรกัน
- 3 นำรูปที่วาดจากโปรแกรม Unigraphics นำออก (export) ไปเข้าใน โปรแกรมแบ่ง Mesh เพื่อที่จะทำการแบ่ง Mesh ต่อไป



รูปที่ 4-40 รูปของแบบที่วาดและทำการแบ่งเป็น 4 ส่วน

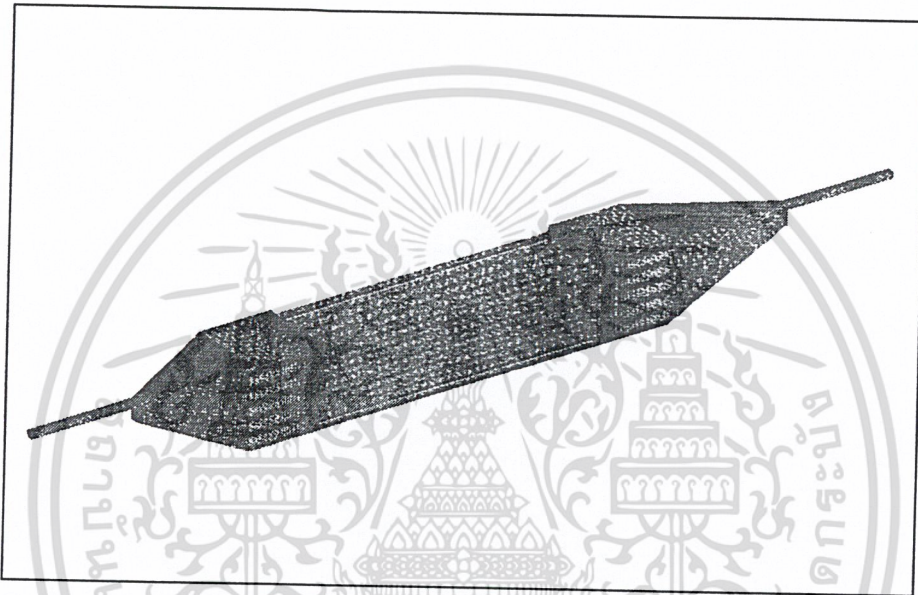


รูปที่ 4-41 รูปของแบบ 1 ใน 4 ส่วนที่นำไปวิเคราะห์

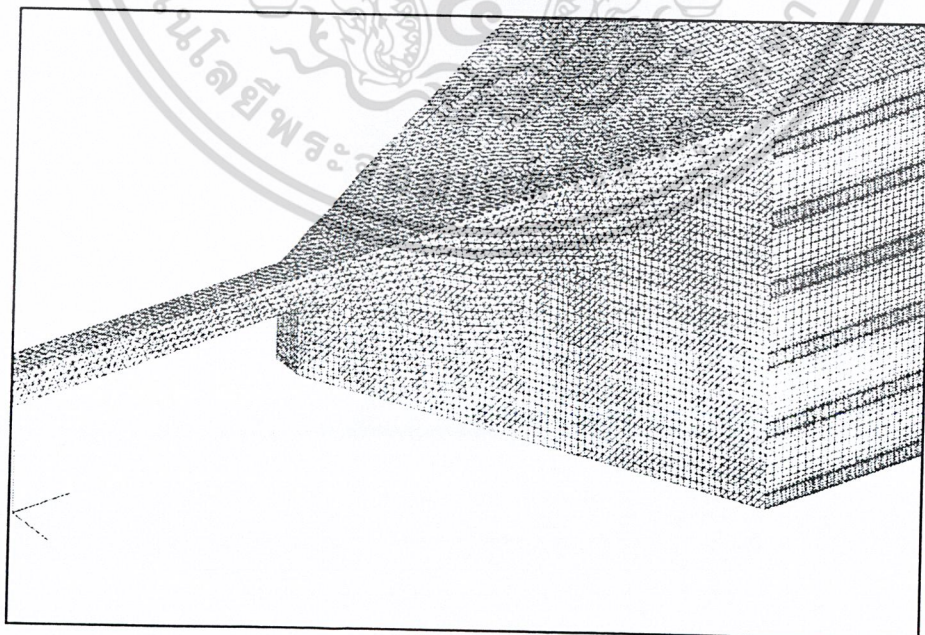
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5.2.2 ขั้นตอนของการแบ่ง Mesh ของชิ้นงาน

- 1 นำแบบที่ทำการวาดจากโปรแกรม Unigraphics มาทำการ Import เข้าในโปรแกรม แบ่ง Mesh
- 2 ทำการแบ่ง Partition ชิ้นงานออกเป็นส่วนๆ
- 3 ทำการแบ่ง Mesh ของแต่ละส่วน โดยแบ่งความละเอียดของชิ้นงานแต่ละส่วนไม่เท่ากัน โดยจะเน้น Mesh ที่ละเอียดตรงบริเวณที่ให้ความสำคัญมาก ส่วนบริเวณที่ไม่สำคัญเราทำการตี Mesh ที่มีขนาดใหญ่เพื่อจะเป็นการประหยัดทรัพยากรทาง Computer และสามารถคำนวณได้เร็วขึ้น
- 4 นำชิ้นงานที่ทำการแบ่ง Mesh เสร็จเรียบร้อยแล้วให้นำออก (export) ไปเข้าโปรแกรม STAR-CD เพื่อทำการวิเคราะห์ผลที่ต้องการต่อไป

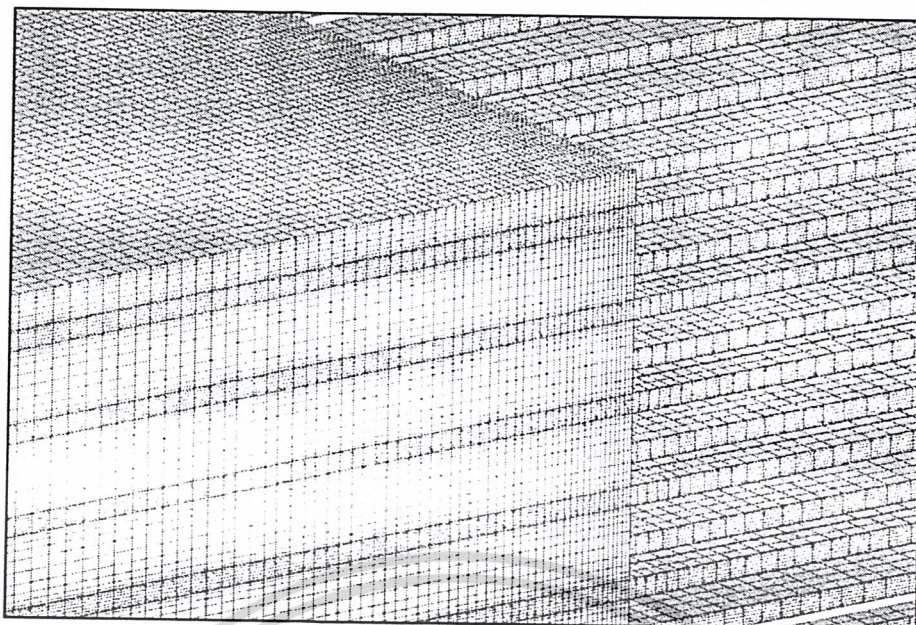


รูปที่4-42 รูปของการแบ่ง Mesh



รูปที่4-43 ภาพขยายของ Mesh บริเวณทางท่อทางเข้า

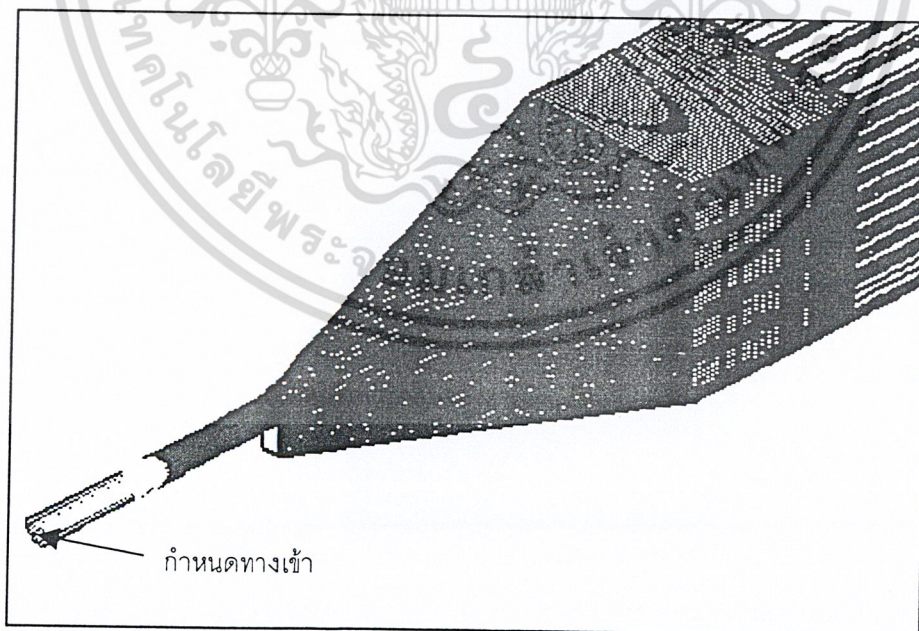
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-44 ภาพขยายของ Mesh บริเวณทางเข้าของช่องทางการไหลของชั้นวางเซลล์

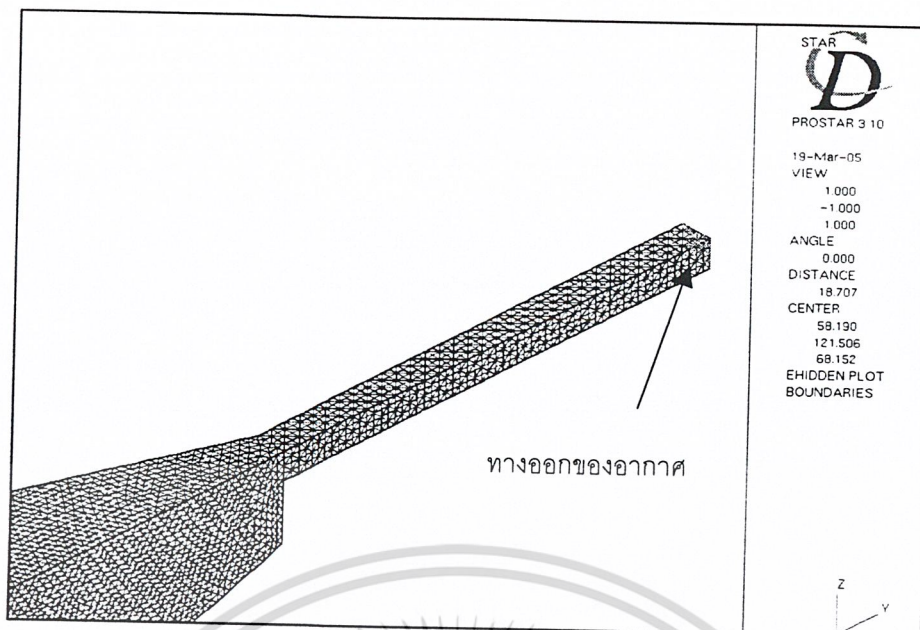
4.2.5.2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

- 1 นำแบบที่ทำการแบ่ง Mesh เสร็จเรียบร้อยแล้ว นำเข้ามาในโปรแกรม STAR-CD
- 2 นำแบบที่ได้มาทำการกำหนดเงื่อนไข (Boundary Condition) ให้กับแบบ
- 3 นำแบบที่ทำการกำหนด Condition แล้วมาทำการคำนวณ
- 4 เก็บผลลัพธ์ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์การกระจายการไหล

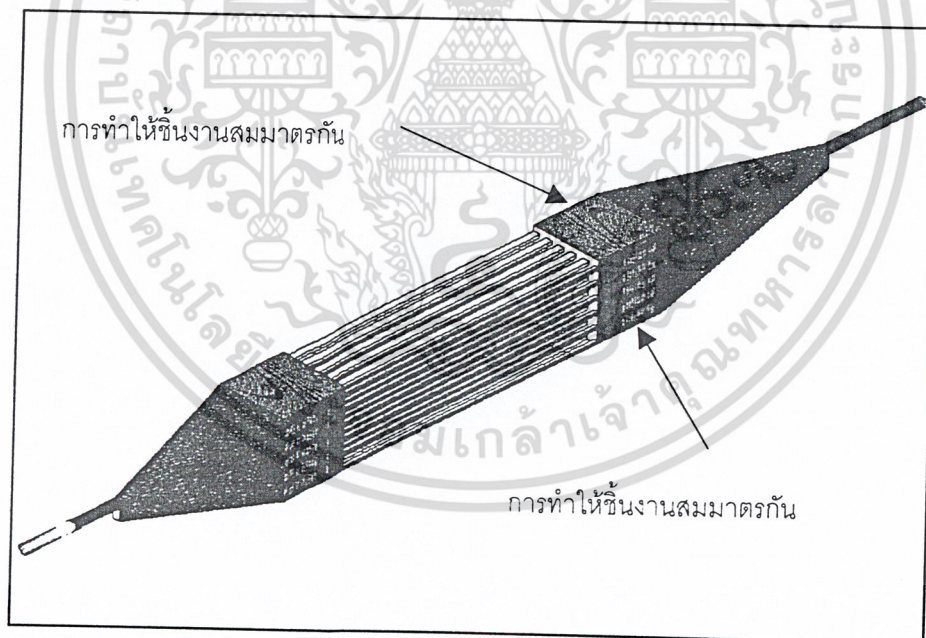


รูปที่ 4-45 รูปของการใส่ เงื่อนไขทางเข้าของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-46 รูปของการใส่เงื่อนไขทางออกของอากาศ



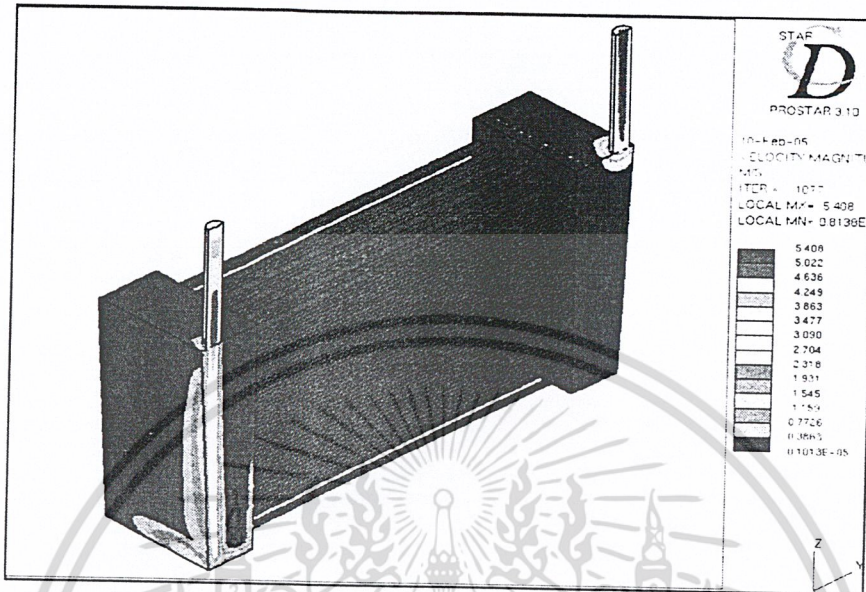
รูปที่ 4-47 รูปของการทำการกำหนดให้แบบสมมาตรกัน คือการกำหนดให้ชิ้นงานที่เข้ามาในโปรแกรมมีความสมมาตรโดยแบบที่เข้ามามีเพียง 1 ใน 4 เท่านั้น ฉะนั้นต้องกำหนดความสมมาตรให้กับชิ้นงานโดยทำการใส่ตรงผิวหน้าของระนาบที่ทำการผ่าแบ่งผิวของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

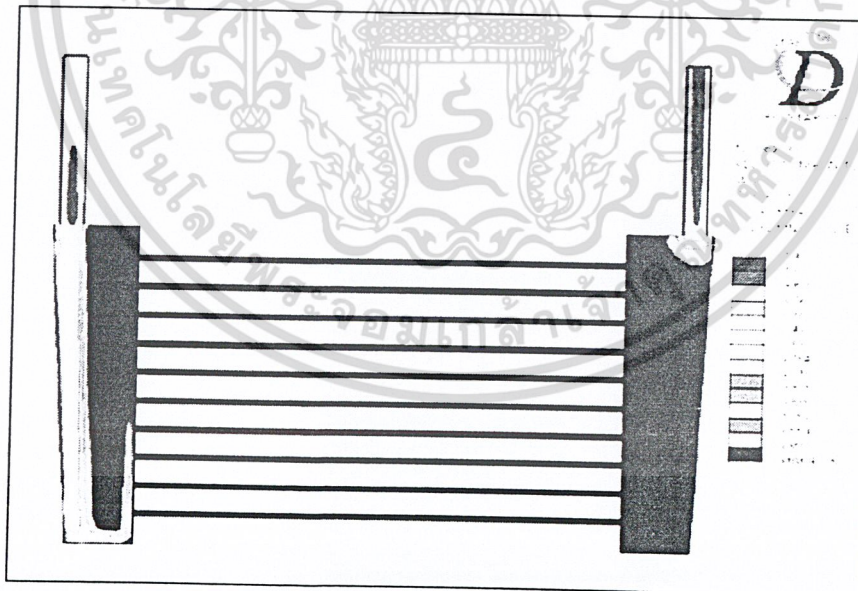
บทที่ 5

ผลการทดลองและผลที่ได้จากการ Simulation

5.1 ผลของการ Simulation ที่จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

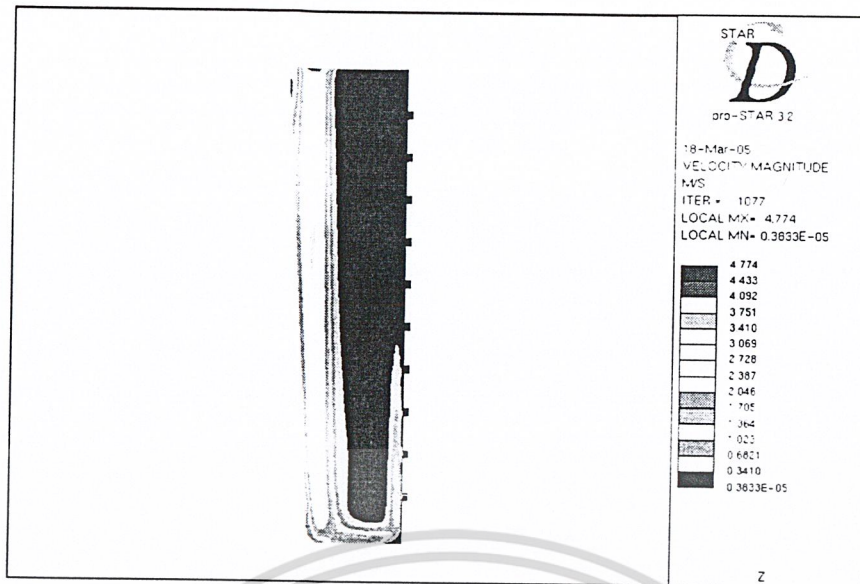


รูปที่ 5-1 ผลของความเร็วที่ได้จากการ Simulation ในรูปแบบทรง 3 มิติ



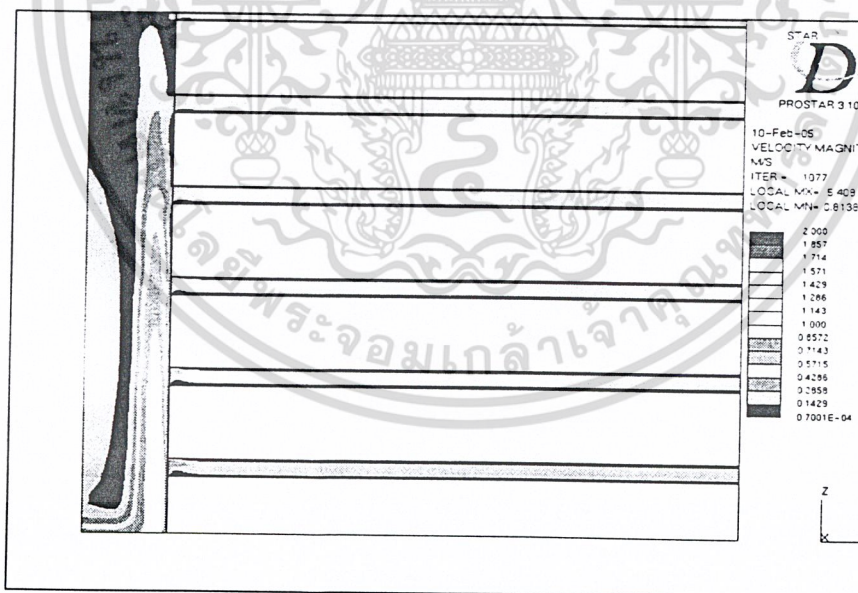
รูปที่ 5-2 ผลของความเร็วที่ระนาบ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



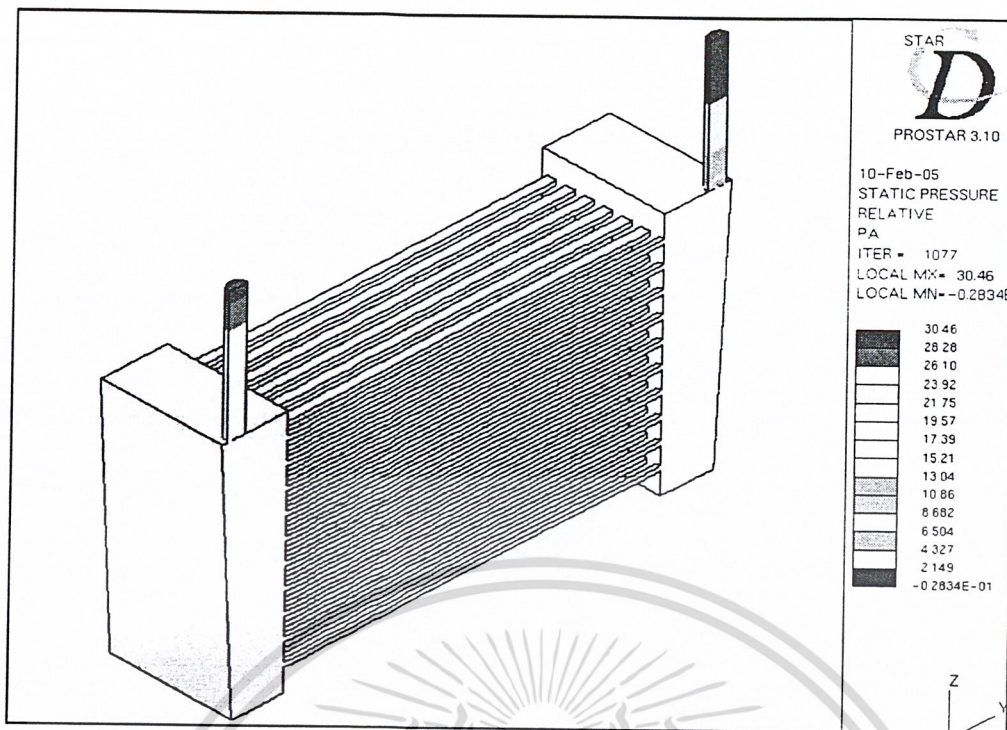
รูปที่ 5-3 ภาพของความเร็วที่ชุดกระจายการไหลที่ใช้ในการทดลอง

จากรูป 5.3 พบว่าความเร็วของลำเจ็ทจะพุ่งลงมากระทบกับด้านล่างของชุดกระจายการไหลทำให้ความเร็วที่จุดชนมีความเร็วต่ำมาก จากนั้นเมื่อความเร็วพุ่งชนด้านล่างแล้วก็เกิดการม้วนตัวกลับขึ้นไปไหลเข้าในชั้นเซลล์ที่ 1 อย่างเร็วแล้วก็เข้าชั้นเซลล์อื่นๆแต่ความเร็วช้ากว่าความเร็วที่เข้าชั้นวางเซลล์ที่ 1 (ชั้นล่างสุด)

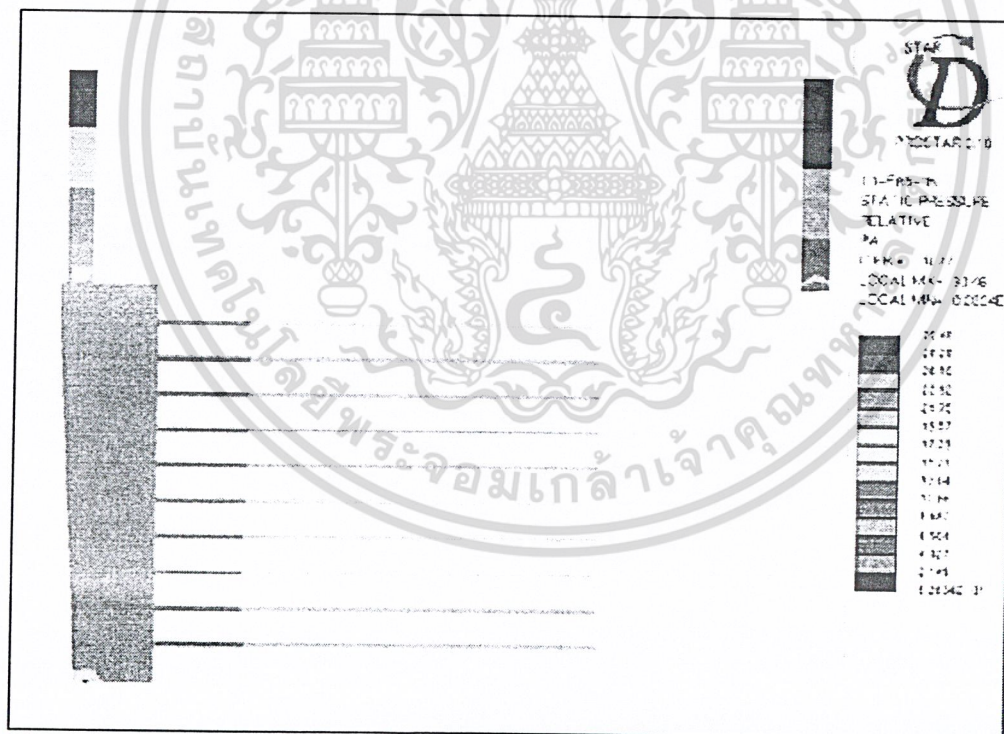


รูปที่ 5-4 ภาพขยายบริเวณทางเข้าของชั้นวางเซลล์ที่ตำแหน่งชั้นล่างสุดและชั้นสูงขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

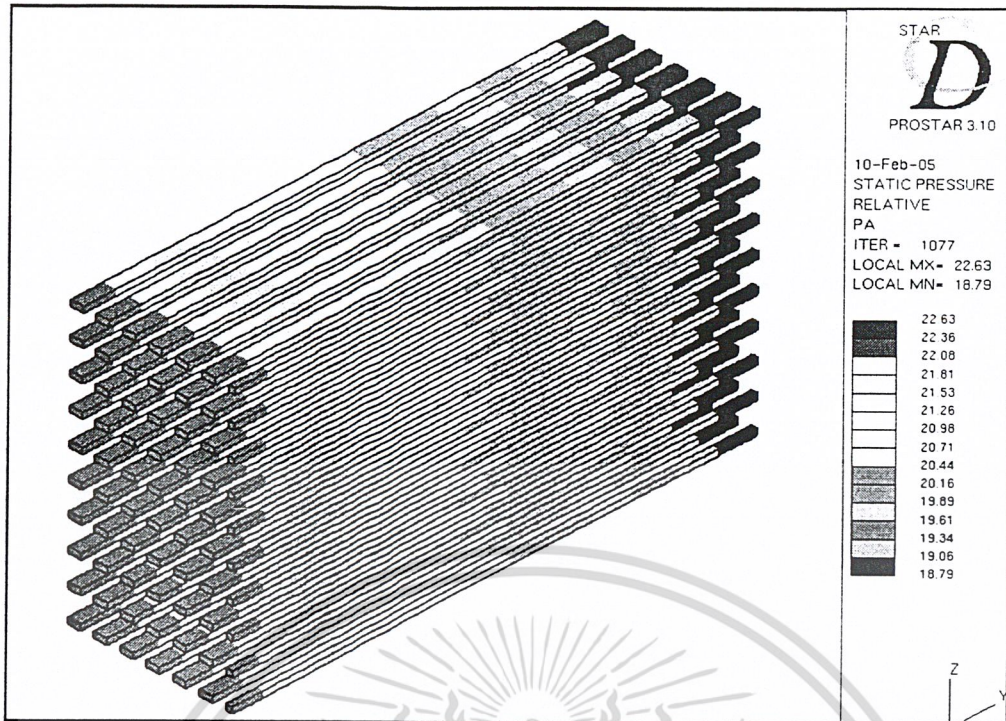


รูปที่ 5-5 ผลของความดันสถิตที่ได้จากการ Simulation ในรูปทรง 3 มิติ

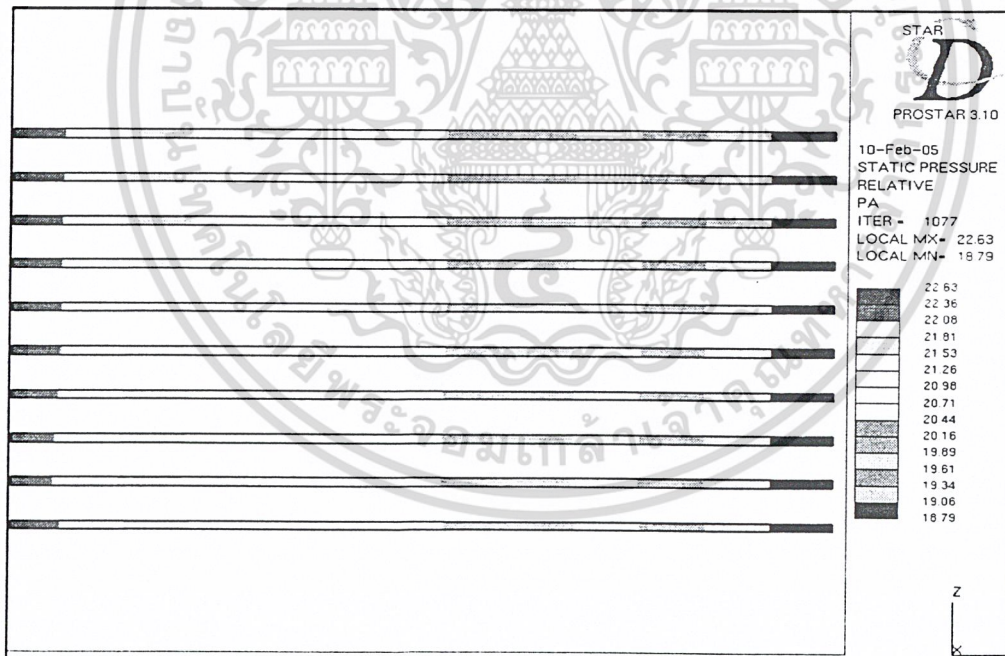


รูปที่ 5-6 ผลของความดันสถิตที่ได้จากการ Simulation ที่ระนาบ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

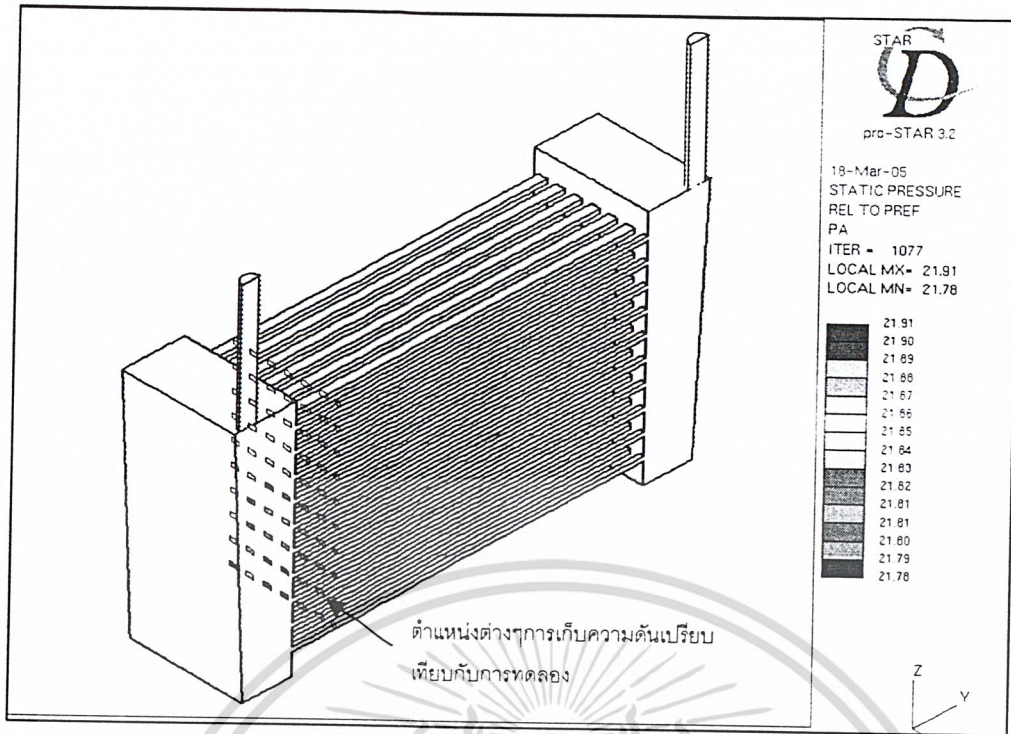


รูปที่ 5-7 ผลของความดันสถิตที่ได้จากการ Simulation ในช่องทางการไหลของชั้นวางเซลล์ใน
รูปทรง 3 มิติ

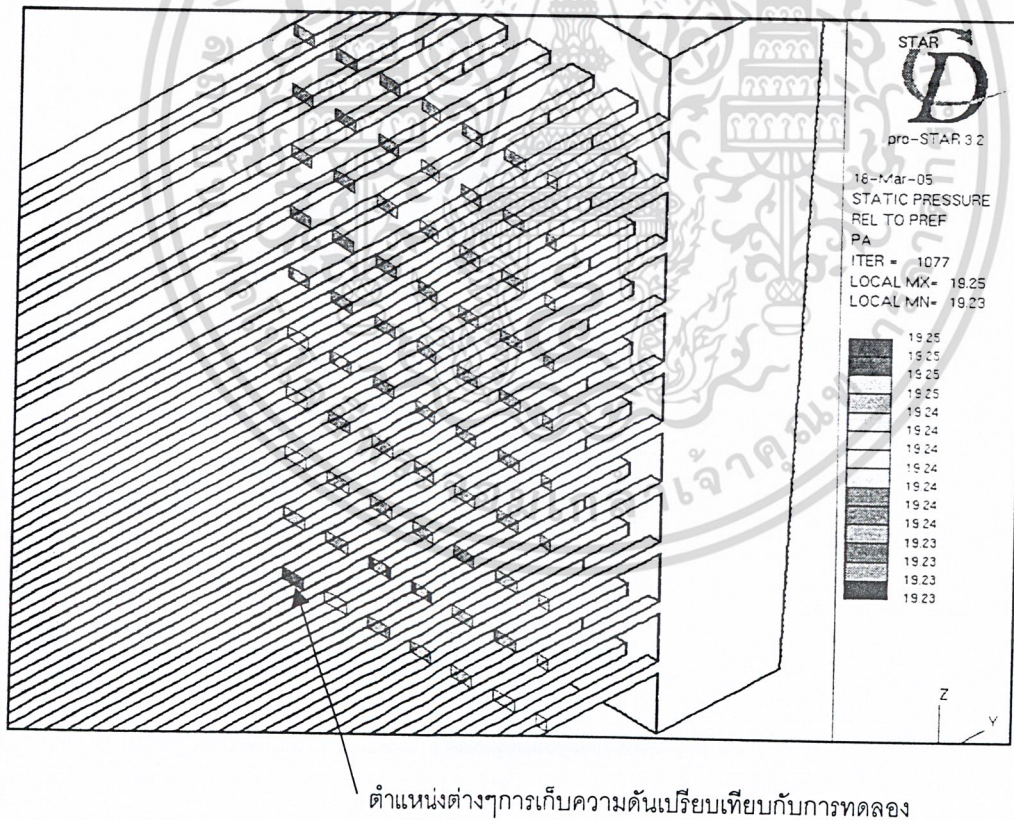


รูปที่ 5-8 ผลของความดันสถิตที่ได้จากการ Simulation ในช่องทางการไหลของชั้นวางเซลล์ใน
ระนาบ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

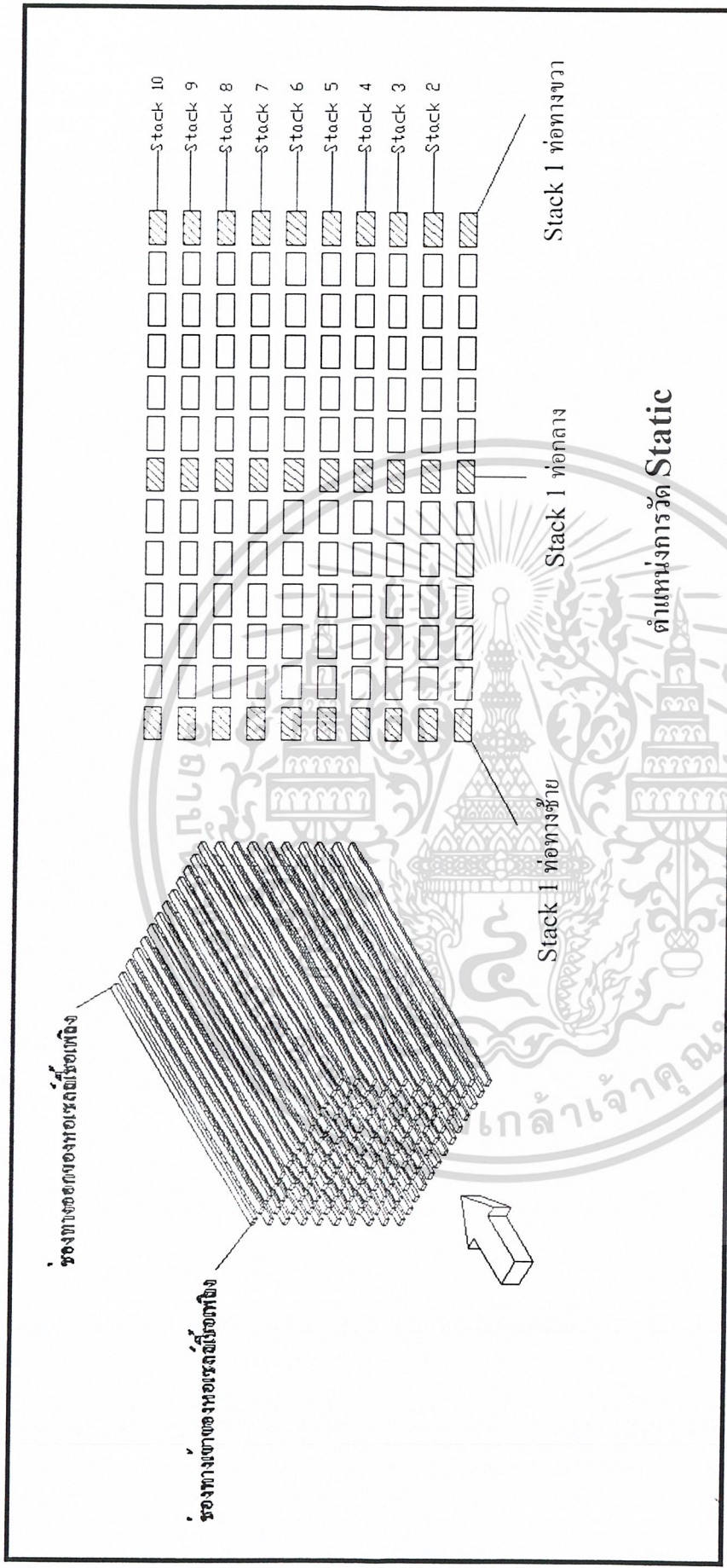


รูปที่ 5-9 ตำแหน่งต่างๆของการเก็บผลของความดันสถิตที่ทางเข้าของช่องทางการไหล



รูปที่ 5-10 ตำแหน่งต่างๆของการเก็บผลของความดันสถิตที่ทางออกของช่องทางการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



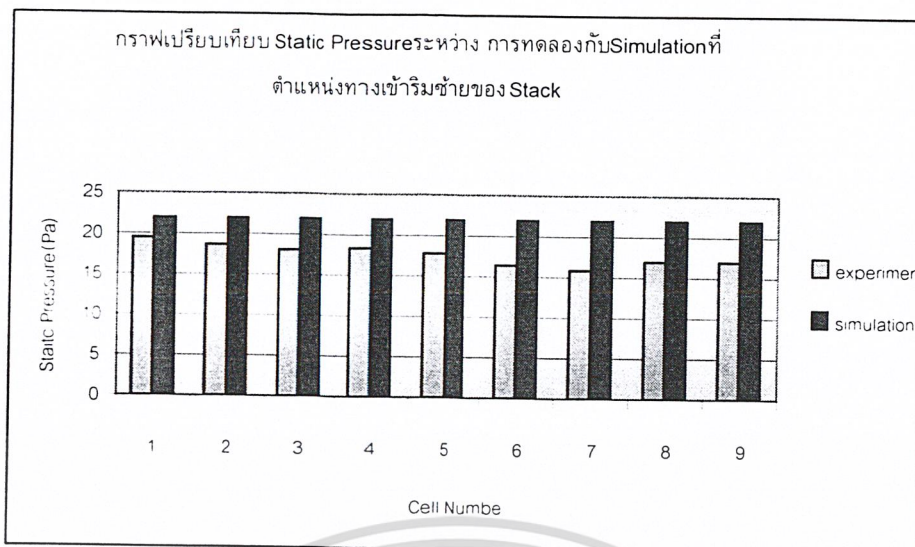
รูปที่ 5-11 รูปของจำนวนหัวเซลล์ (Stack) ที่ทำการวัดและเก็บค่าของ Static Pressure ของการทดลองและ Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางของการเก็บค่าความดัน Static Pressure ของการทดลองเปรียบเทียบกับการ Simulation

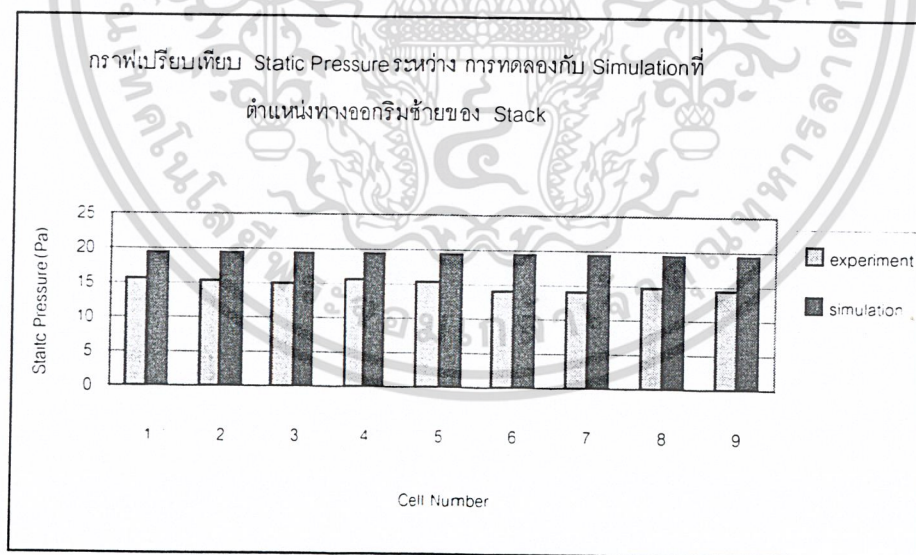
			Inlet Pressure (N/m ²)		% error	Outlet Pressure (N/m ²)		% error
			experiment	simulation		experiment	simulation	
2.5 LPM	stack 1	left	19.37	21.91	11.59	15.70	19.25	22.61
		middle	18.67	21.84	14.51	15.81	19.24	21.70
		right	19.21	21.91	12.32	15.37	19.25	25.24
	stack 2	left	18.66	21.87	14.68	15.26	19.25	26.15
		middle	18.12	21.81	16.92	14.85	19.24	29.56
		right	18.94	21.87	13.40	16.22	19.25	18.68
	stack 3	left	17.99	21.86	17.70	14.99	19.24	28.35
		middle	17.99	21.82	17.55	15.12	19.24	27.25
		right	17.85	21.86	18.34	15.53	19.24	23.89
	stack 4	left	18.26	21.85	16.43	15.53	19.24	23.89
		middle	16.35	21.83	25.10	14.17	19.24	35.78
		right	17.44	21.85	20.18	15.26	19.24	26.08
	stack 5	left	17.70	21.85	18.99	15.26	19.24	26.08
		middle	16.48	21.84	24.54	15.26	19.24	26.08
		right	17.85	21.85	18.31	15.40	19.24	24.94
	stack 6	left	16.35	21.84	25.14	14.17	19.24	35.78
		middle	15.81	21.84	27.61	14.72	19.24	30.71
		right	16.08	21.84	26.37	13.90	19.24	38.42
	stack 7	left	15.84	21.84	27.47	14.17	19.24	35.78
		middle	15.53	21.84	28.90	14.14	19.24	36.07
		right	15.80	21.84	27.66	14.55	19.24	32.23
	stack 8	left	16.90	21.84	22.62	14.72	19.24	30.71
		middle	16.51	21.84	24.40	14.99	19.24	28.35
		right	16.76	21.84	23.26	14.72	19.24	30.71
	stack 9	left	16.92	21.85	22.56	14.47	19.24	32.96
		middle	16.76	21.85	23.30	14.55	19.23	32.16
		right	16.76	21.85	23.30	14.70	19.24	30.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-12 กราฟเปรียบเทียบ Static Pressure ระหว่างการทดลองกับการทำ Simulation ที่ตำแหน่งทางเข้าริมซ้ายของชั้นวางเซลล์(Stack)

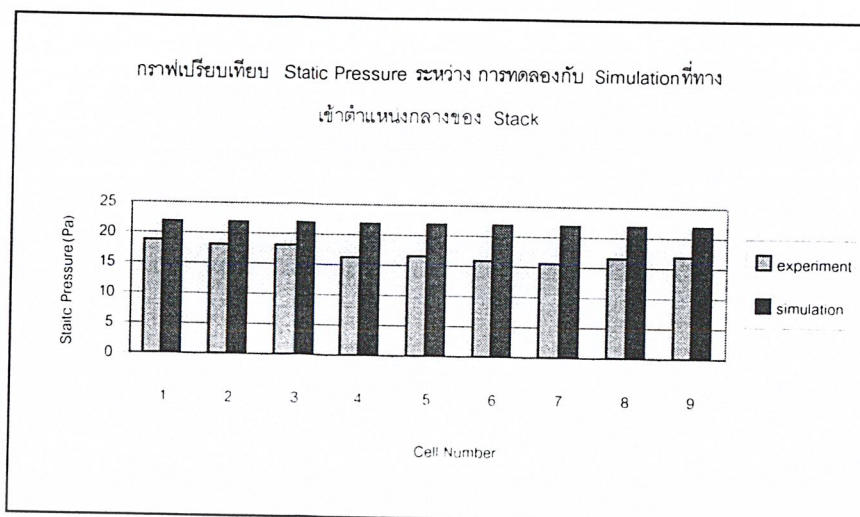
จากรูปที่ 5-12 พบว่าในการทำ Simulation แล้วทำการเก็บค่า Static Pressure แต่ละชั้นเซลล์พบว่ามีความดันใกล้เคียงกันทุกช่องทางการไหลของแต่ละชั้น แต่ชั้นเซลล์ที่ 1 ยังมีความดันที่สูงอยู่กว่าชั้นอื่น และเมื่อทำการวัด Static Pressure ของการทดลองพบว่าค่าของ Static Pressure มีค่าของ Static pressure ของแต่ละชั้นเซลล์ต่างกันให้เห็น ได้ชัดโดยความดันที่ชั้นเซลล์ที่ 1 มีค่าสูงสุดซึ่งใกล้เคียงที่ทำการ Simulation และความดันทุกชั้นมีค่าต่ำกว่าการทำ Simulation



รูปที่ 5-13 กราฟเปรียบเทียบ Static Pressure ระหว่างการทดลองกับการทำ Simulation ที่ตำแหน่งทางออกริมซ้ายของชั้นวางเซลล์

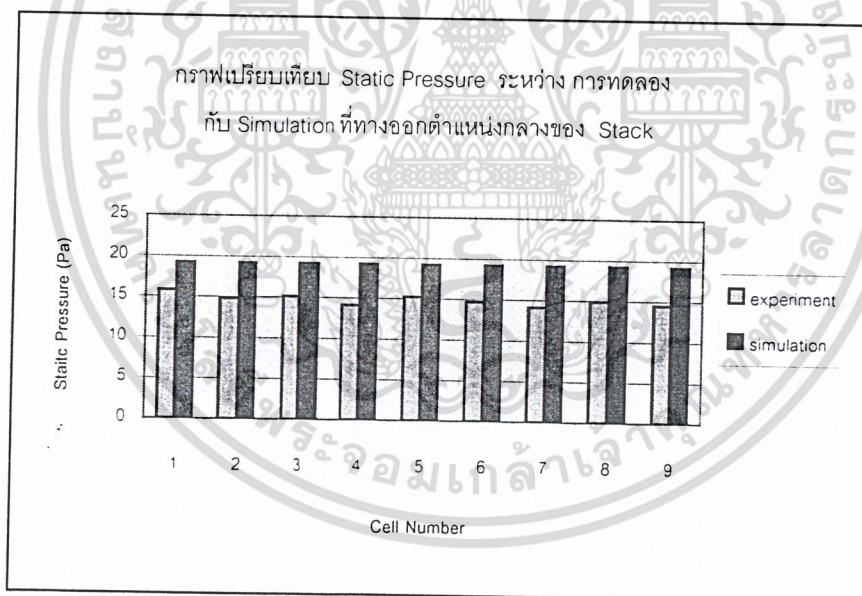
จากรูปที่ 5-13 พบว่าความดัน Static Pressure ที่ได้จากการทำ Simulation ยังมีความดันที่ใกล้เคียงกันอยู่ก่อนข้างจะเท่ากัน และที่ทำการทดลองเก็บค่าก็มีค่าความดันที่ใกล้เคียงกันแต่ความดันก็ยังต่ำกว่าค่าของการทำ Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-14 กราฟเปรียบเทียบ Static Pressure ระหว่างการทดลองกับการทำ Simulation ที่ตำแหน่งทางเข้ากลางของชั้นวางเซลล์ในชั้นเซลล์ต่างๆ

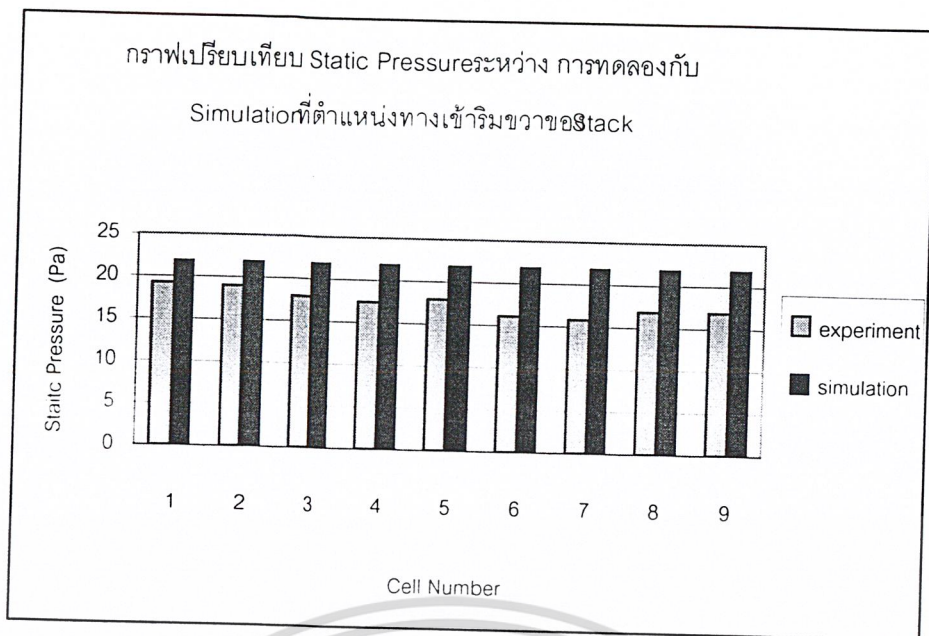
จากรูป 5-14 พบว่าค่าของ Static Pressure ที่ได้จากการ Simulation ยังมีความดันที่ใกล้เคียงกันอยู่โดยค่าของความดันที่ชั้นที่ 1 ยังคงมีความดันสูงกว่าเซลล์อื่นๆ อยู่เล็กน้อย และเมื่อทำการเก็บผลจากการทดลองพบว่าที่ชั้นเซลล์ที่ 1 ก็ยังมีความดันที่สูงกว่าเซลล์อื่นๆ เช่นเดียวกัน และผลของความดันที่ได้จากการทดลองพบว่า ยังคงมีความดันที่ได้จากการ Simulation เช่นเดียวกัน



รูปที่ 5-15 กราฟเปรียบเทียบ Static Pressure ระหว่างการทดลองกับการทำ Simulation ที่ตำแหน่งทางออกกลางของชั้นวางเซลล์ในชั้นเซลล์ต่างๆ

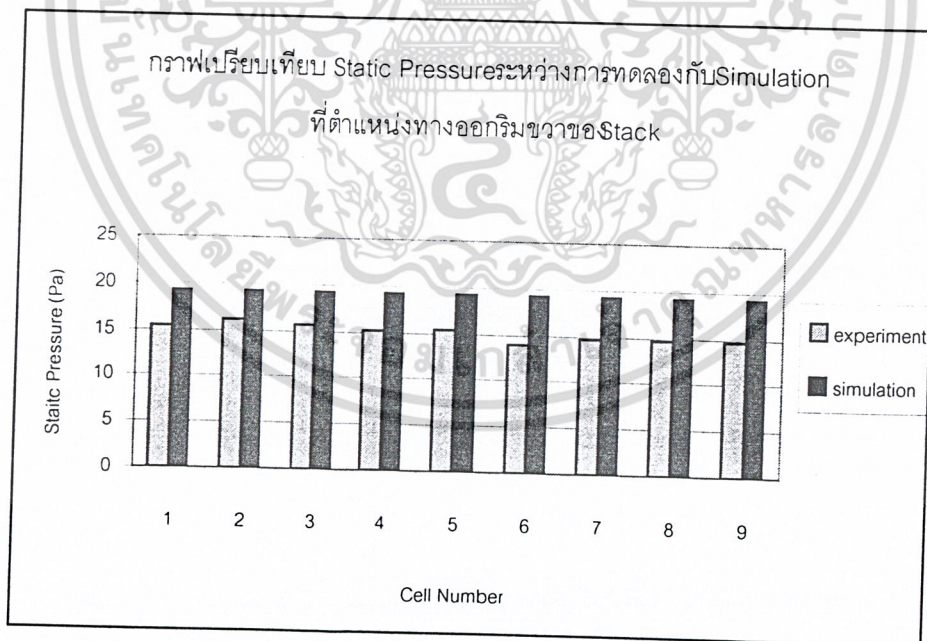
จากรูป 5-15 พบว่าค่าของ Static Pressure จากการ Simulation ยังคงมีความดันที่ทางออกใกล้เคียงกัน และที่ทำการทดลองความดันที่วัดได้แต่ละชั้นเซลล์นั้นมีความดันที่ใกล้เคียงกัน โดยชั้นเซลล์ที่ 1 ยังคงสูงอยู่และค่าความดันที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าความดันของที่ทำ การ Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-16 กราฟเปรียบเทียบ Static Pressure ระหว่างการทดลองกับการทำ Simulation ที่ตำแหน่งทางเข้าริมขวาของชั้นวางเซลล์(Stack)

จากรูป 5-16 พบว่าในการทำ Simulation แล้วทำการเก็บค่า Static Pressure แต่ละชั้นเซลล์พบว่ามีความดันใกล้เคียงกันทุกช่องทางการไหลของแต่ละชั้นแต่ชั้นเซลล์ที่ 1 ยังมีความดันที่สูงอยู่กว่าชั้นอื่น และเมื่อทำการวัด Static Pressure ของการทดลองพบว่าค่าของ Static Pressure มีค่าของ Static pressure ของแต่ละชั้นเซลล์ต่างกันอย่างเห็น ได้ชัดโดยความดันที่ชั้นเซลล์ที่ 1 มีค่าสูงสุดซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงที่ทำการ Simulation และความดันทุกชั้นมีค่าต่ำกว่าการทำ Simulation



รูปที่ 5-17 กราฟเปรียบเทียบ Static Pressure ระหว่างการทดลองกับการทำ Simulation ที่ตำแหน่งทางออกทางขวาของชั้นวางเซลล์ในชั้นเซลล์ต่างๆ

จากรูป 5-17 พบว่าค่าของ Static Pressure จากการ Simulation ยังคงมีความดันที่ทางออกใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการวัดผลการทดลองความดันที่วัดได้แต่ละชั้นเซลล์นั้นมีความดันที่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ความเร็วที่ได้จากการทำ Simulation

เมื่อเราทำการทำ Simulation ที่อัตราการไหล 2.5 ลิตรต่อนาที พบว่าแก๊สมีพฤติกรรมการไหลคือความเร็วที่ไหลเข้าท่อทางเข้าด้านบนมีความเร็วที่ค่อนข้างเท่ากันแต่เมื่อมีการไหลลงมาเรื่อยๆเมื่อเจอกับความเค้นเฉือนที่ผนังทำให้ความเร็วที่ใกล้กับผนังมีน้อยจนเป็นศูนย์และความเร็วจะเกิดสูงที่บริเวณกลางท่อเนื่องจากไม่มีความเค้นเฉือนของผนังและความเร็วจะยังพุ่งลงมาอย่างรวดเร็วเนื่องจากโมเมนตัม และจากรูปจะเห็นได้ว่าเกิดความเร็วสูงที่สุดที่บริเวณปากทางเข้าของชุดกระจายการไหล ความเร็วที่พุ่งลงมาจะไปกระทบกับด้านล่างของชุดกระจายการไหลทำให้เกิดเป็นจุด stagnation โดยที่ความเร็วที่จุดนี้จะเข้าใกล้ศูนย์และความดันที่จุดนี้จะสูงมาก(ดังรูปที่ 5-6) ทำให้เกิดการไหลย้อนกลับโดยจะหมุนขึ้นดังรูปที่ 5-2 และจะไหลเข้าชั้นเซลล์ที่ 1 และเซลล์อื่นๆต่อไปโดยเมื่อเราทำการขยายตรงทางเข้าของชั้นวางเซลล์ที่เซลล์ที่ 1 ดังรูป(5-4) พบว่าบริเวณทางเข้าของชั้นวางเซลล์เกิด recirculation โดยที่ชั้นเซลล์ที่ 1 จะเกิดสูงสุดดังรูป(5-4) และชั้นเซลล์ที่ 2,3 ,4 และ 5 โดยที่ชั้นเซลล์ที่ 5 นั้นเกิดน้อยมากจากรูป

ต่อไปจะมาดูความดันที่เกิดขึ้นโดยพบว่าความดันจะมีค่าสูงบริเวณท่อทางเข้าของแก๊สในโตรเจนและลดต่ำลงมาเรื่อยๆเพราะความเร็วมีความสูงขึ้นและความดันจะค่อนข้างต่ำตรงบริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลเพราะว่าที่ตำแหน่งตรงนั้นมีความเร็วที่สูง หลังจากท่อไหลลงมาปะทะที่ด้านล่างของชุดกระจายการไหลทำให้ความเร็วของแก๊สเป็นศูนย์ (จุด stagnation point) จึงทำให้มีความดันสูงดังรูป 5-6 และบริเวณทางออกของแก๊สสู่ภายนอกมีความดันเป็นศูนย์ซึ่งเป็นความดันเทียบเท่ากับบรรยากาศซึ่งตรงกับความเป็นจริงที่ไต่เงื่อนไขให้ เมื่อทำการเอาส่วนของช่องทางการไหลของชั้นวางเซลล์แต่ละชั้นมาวิเคราะห์ดังรูป 5-8 จะพบว่าผลของการทำการ Simulation ที่ชั้นวางเซลล์ที่ 1 มีความดันตกคร่อมสูงสุดคือมีการไหลในช่องทางการไหลเร็วที่สุดและชั้นวางเซลล์อื่นๆมีความดันตกคร่อมใกล้เคียงกันคือมีการไหลในท่อใกล้เคียงกัน

วิเคราะห์ผลจากการทดลองเก็บค่าของ Static Pressure เปรียบเทียบกับการ Simulation

เมื่อเราทำการเก็บค่าของ Static Pressure ที่จุดต่างๆของชั้นวางเซลล์พบว่าที่ชั้นวางเซลล์ที่ 1 มีค่าของ Static Pressure สูงที่สุด และช่องทางการไหลที่ชั้นวางเซลล์ที่ 2 ก็ยังมีค่าสูงอยู่ และเมื่อเราพิจารณาที่ ชั้นเซลล์ที่ 1 พบว่าที่ช่องการไหลเข้ากลางมีความดันต่ำกว่าช่องทางการไหลของซ้ายและขวา ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลทาง Simulation พบว่ามีแนวโน้มที่ตรงกันคือความดันทางด้านช่องทางการไหลเข้ากลางมีความดันต่ำกว่าทางด้านซ้ายและขวา และเมื่อไปดูความดันที่ทางช่องทางการไหลเข้าทางซ้ายและขวาที่ชั้นวางเซลล์ที่ 1 ของเคทการทดลองพบว่า ความดันที่วัดได้ทางท่อซ้ายและขวามีค่าไม่เท่ากันคือต่างกันเล็กน้อยเท่านั้นอาจจะเป็นผลมาจากการเครื่องมือมีขีดจำกัดในการวัดหรือการผิดพลาดในการวัดไปบ้าง เมื่อเราทำการดูผลของความดันของชั้นเซลล์ที่ 2 พบว่าที่ช่องทางการไหลในท่อกกลางยังคงมีความดันต่ำกว่าทางซ้ายและขวาซึ่งมีแนวโน้มตรงกับผลของการ Simulation เช่นเดียวกัน และเมื่อนำผลของข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับการทำ Simulation พบว่าความดันทั้งหมดที่ทดลองได้มีค่าต่ำกว่าผลของการทำ Simulation ซึ่งทำให้ต้องศึกษาโปรแกรม STAR-CD กันต่อไป

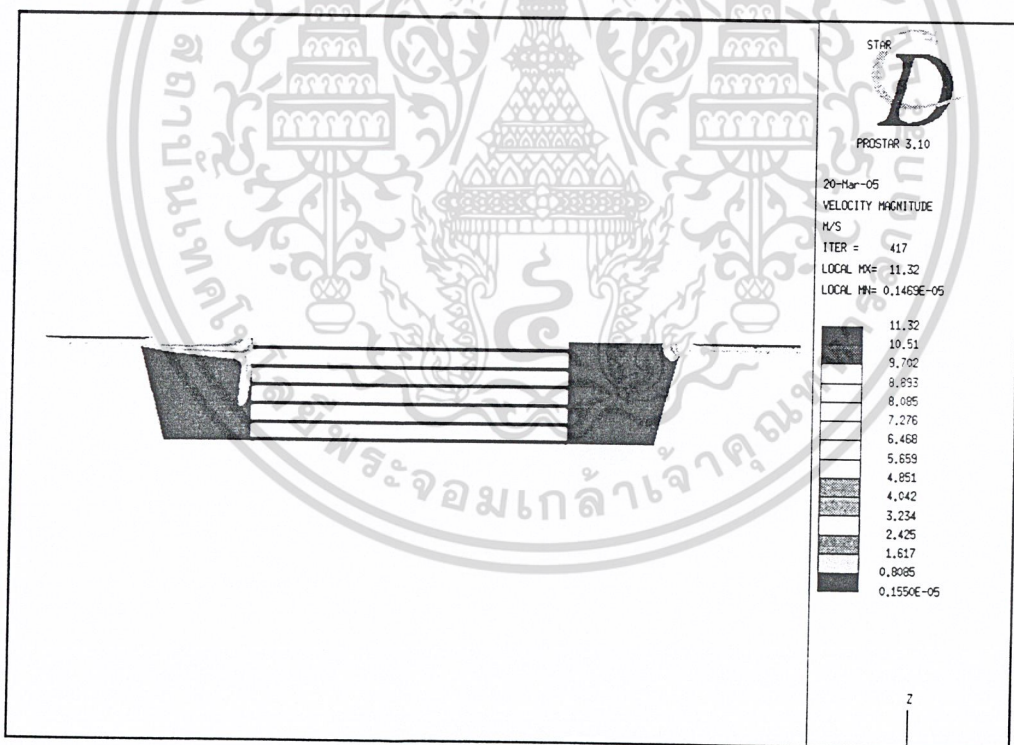
5.2 ผลของการ Simulation ของชุดกระจายการไหลที่นำมาศึกษา

5.2.1 ผลของการ Simulation ของชุดกระจายการไหลแบบทรงโค้งมนที่นำมาศึกษา

5.2.2 ผลของการ Simulation ของชุดกระจายการไหลแบบทรงเหลี่ยมที่นำมาศึกษา

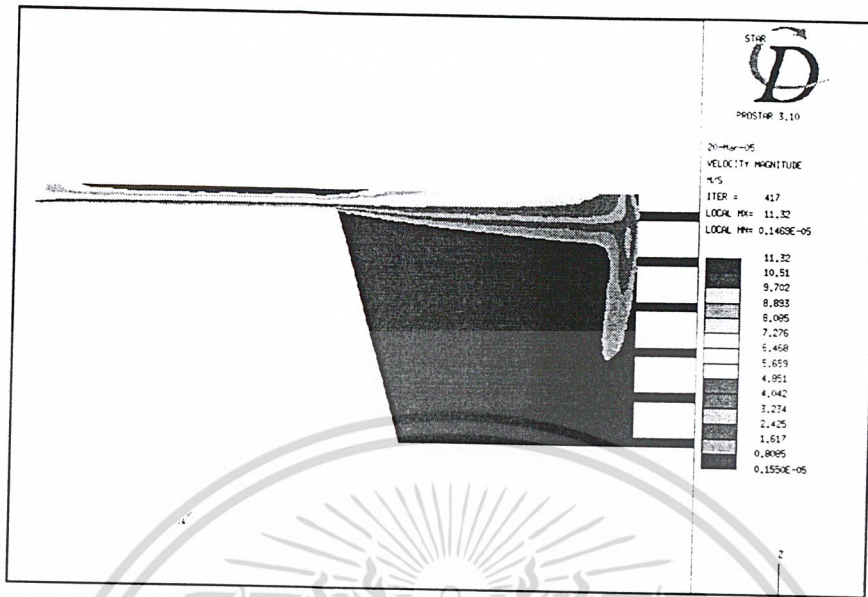
รูปทรงโค้งมนที่มุม 15 องศา

อากาศที่ไหลผ่านทางเข้าจะมีความเร็วบริเวณตรงกลางท่อที่สูงขึ้น (Fully Developed Flow) ดังรูปที่ 18,19 ส่วนบริเวณผนังท่อทางเข้าจะมีความเร็วที่ต่ำลง(เข้าใกล้ศูนย์) ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากที่บริเวณผนังท่อจะมีค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall Shear Stress) หลังจากที้อากาศไหลเข้าสู่ชุดกระจายการไหลโดยไหลผ่านบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงมุม (15 องศา) ซึ่งอากาศยังคงมีโมเมนตัมที่ยังสูงอยู่เนื่องจากขนาดของชุดกระจายไหลมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นผลกระทบของความเค้นเฉือนที่ผนัง จึงมีผลกระทบต่อ การไหลของอากาศน้อย(ด้านทานการไหลของอากาศน้อย) ประกอบกับที่มุม 15 องศาที่มีระยะห่างระหว่างทางเข้าของอากาศกับชั้นวางเซลล์ที่น้อย ดังนั้นอากาศที่มีโมเมนตัมสูง จึงไหลไปปะทะกับทางเข้าของชั้นวางเซลล์ จึงส่งผลให้บริเวณทางเข้าของชั้นวางเซลล์(ต่อหมายเลข 6) มีความดันสถิตที่สูงกว่าความดันที่จุดอื่น ดังรูปที่ 20,21,22 การกระจายตัวของอากาศไม่ดี

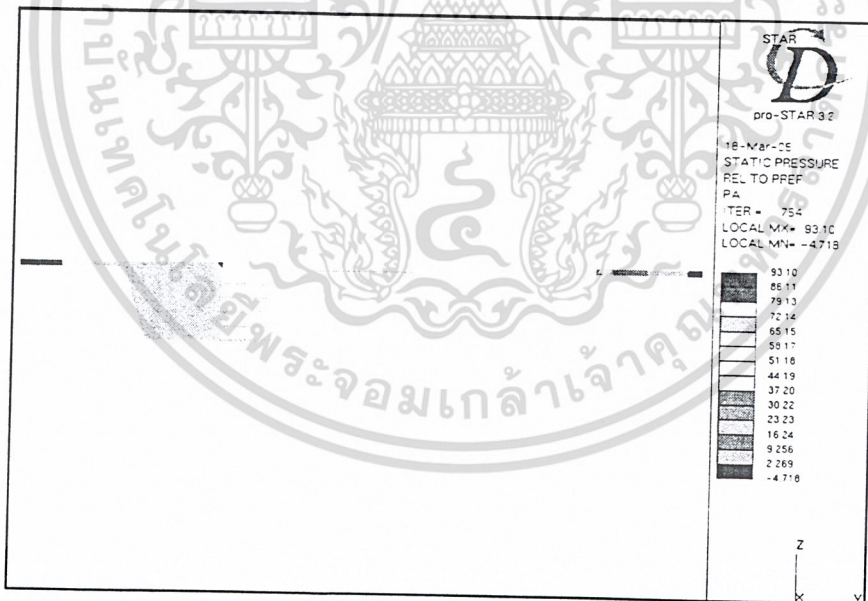


รูปที่ 5-18 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งมนที่มุม 15 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

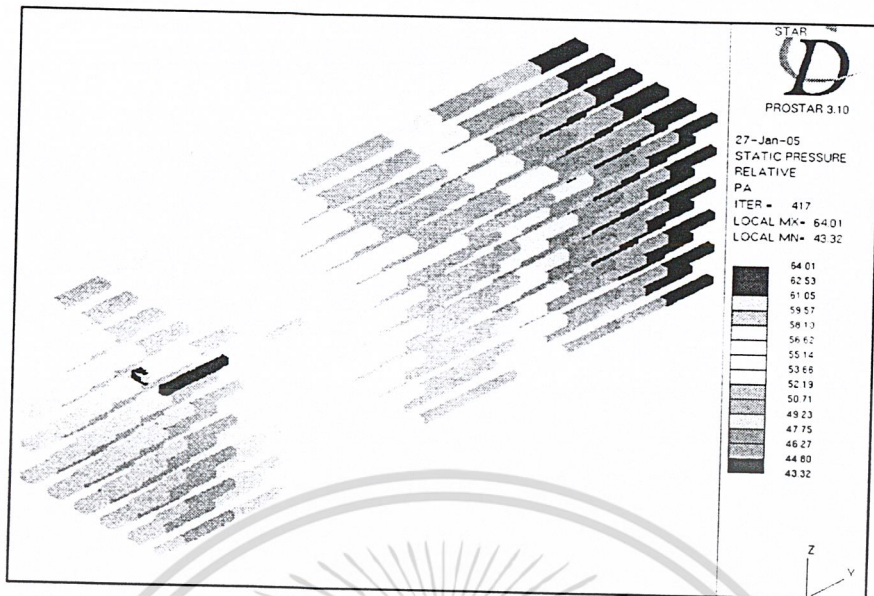


รูปที่ 5-19 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 15 องศา

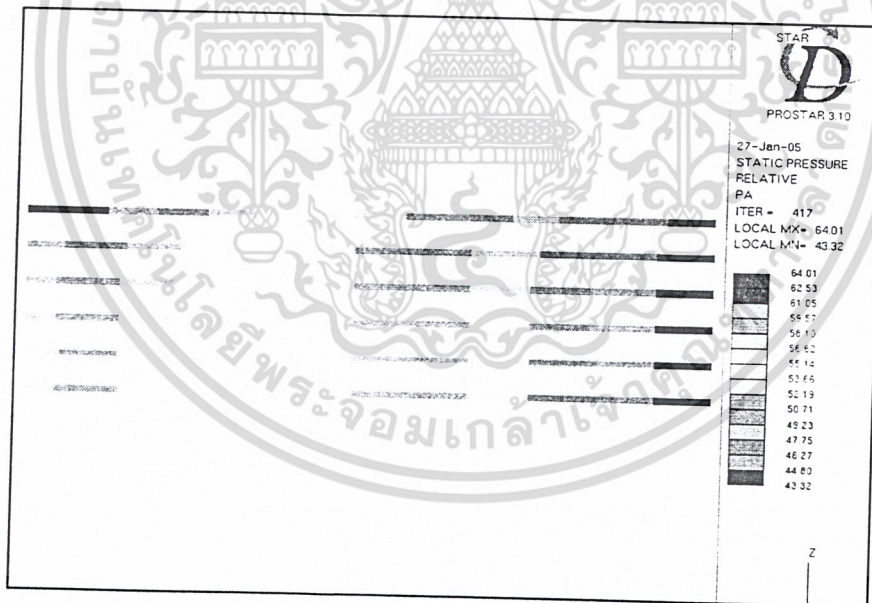


รูปที่ 5-20 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 15 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-21 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 15 องศา

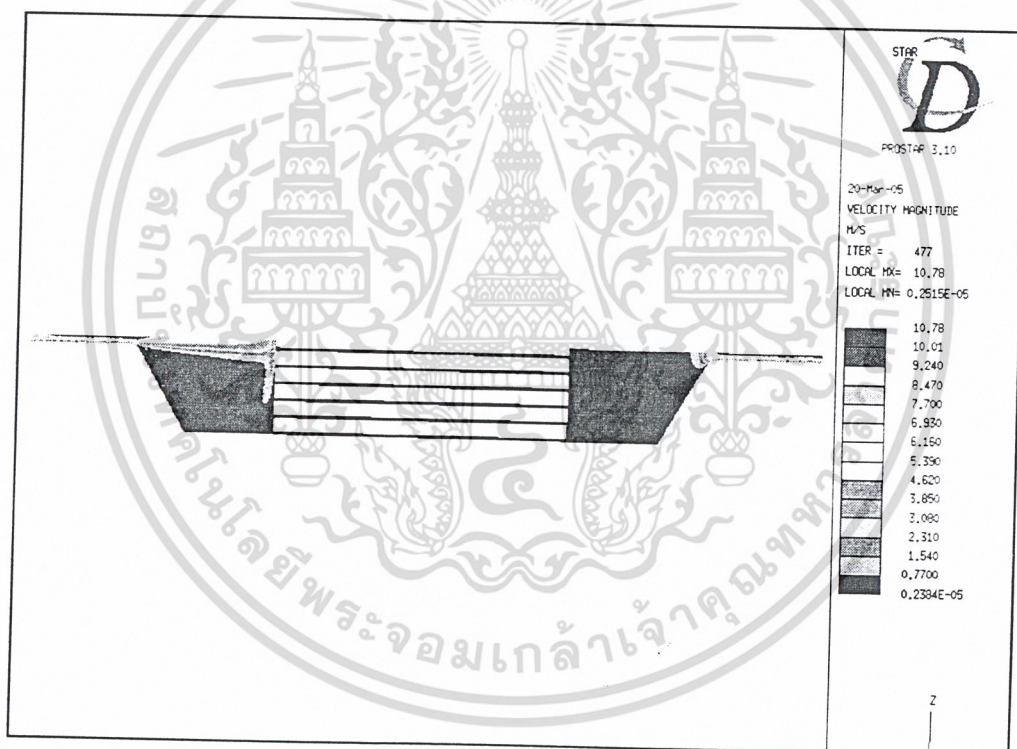


รูปที่ 5-22 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 15 องศา (ระนาบ Y-Z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

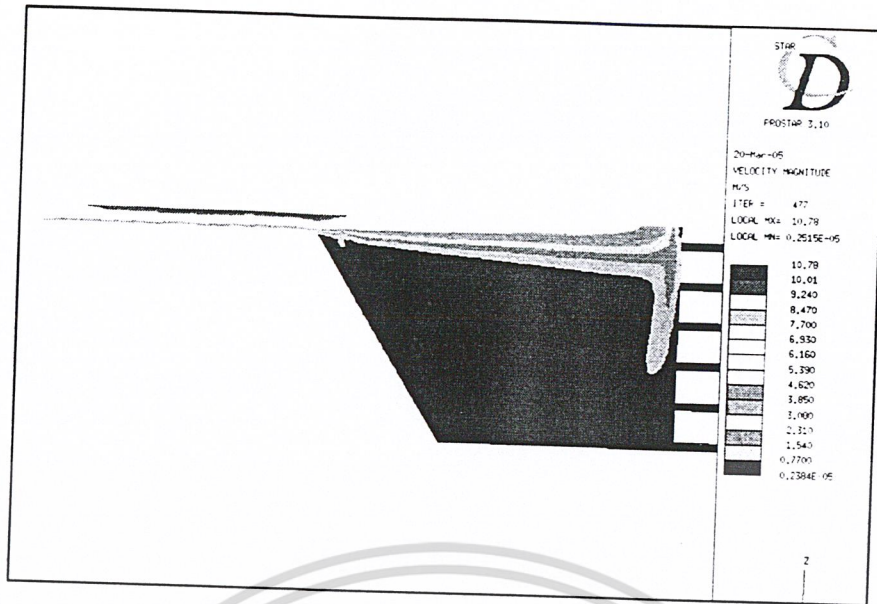
รูปทรงโค้งมนที่มุม 30 องศา

อากาศที่ไหลผ่านทางเข้าจะมีความเร็วบริเวณตรงกลางท่อที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 23,24 ส่วนบริเวณผนังท่อทางเข้าจะมีความเร็วที่ต่ำลง(เข้าใกล้ศูนย์) เช่นเดียวกับที่มุม 15 องศา หลังจากที่อากาศไหลเข้าสู่ชุดกระจายการไหลโดยไหลผ่านบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงมุม (30 องศา) ซึ่งอากาศยังมีโมเมนตัมที่ยังสูงอยู่ เนื่องจากขนาดของชุดกระจายไหลมีขนาดใหญ่ขึ้น(แต่น้อยกว่าที่มุม 15 องศา) ดังนั้นผลกระทบของความเค้นเฉือนที่ผนัง จึงมีผลกระทบต่อการไหลของอากาศน้อย(แต่ยังต้านทานการไหลของอากาศมากกว่าที่มุม 15 องศา) และที่มุม 30 องศา นี้มีระยะห่างระหว่างทางเข้าของอากาศกับชั้นวางเซลล์ที่น้อย(แต่มากกว่าที่มุม 15 องศา) ดังนั้นอากาศที่มีโมเมนตัมสูง จึงไหลไปปะทะกับทางเข้าของชั้นวางเซลล์ จึงส่งผลให้บริเวณทางเข้า (ต่อหมายเลข 6) ของชั้นวางเซลล์มีความดันสถิตที่สูงกว่าความดันที่จุดอื่น ดังรูปที่ 25,26,27 การกระจายตัวของอากาศยังไม่ดีนัก แต่ดีกว่าที่มุม 15 องศา

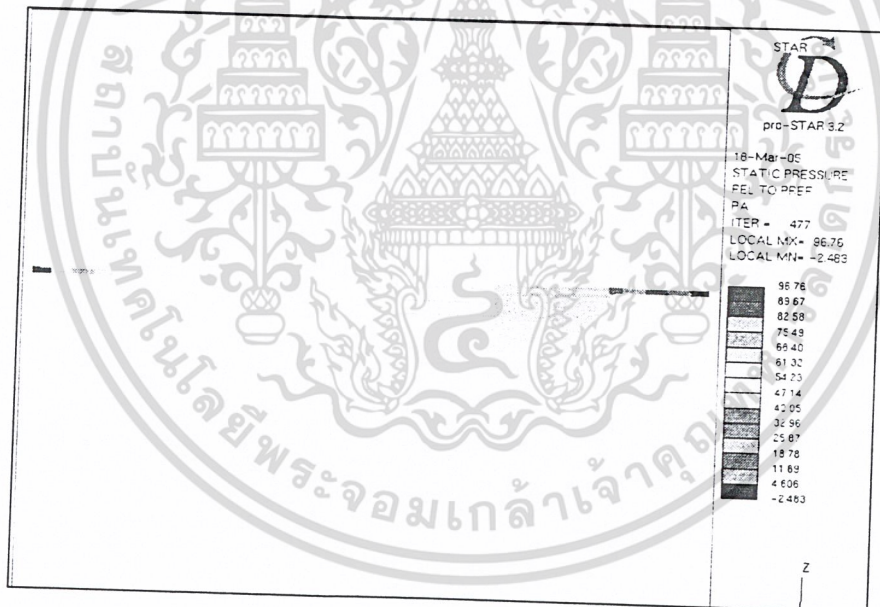


รูปที่ 5-23 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

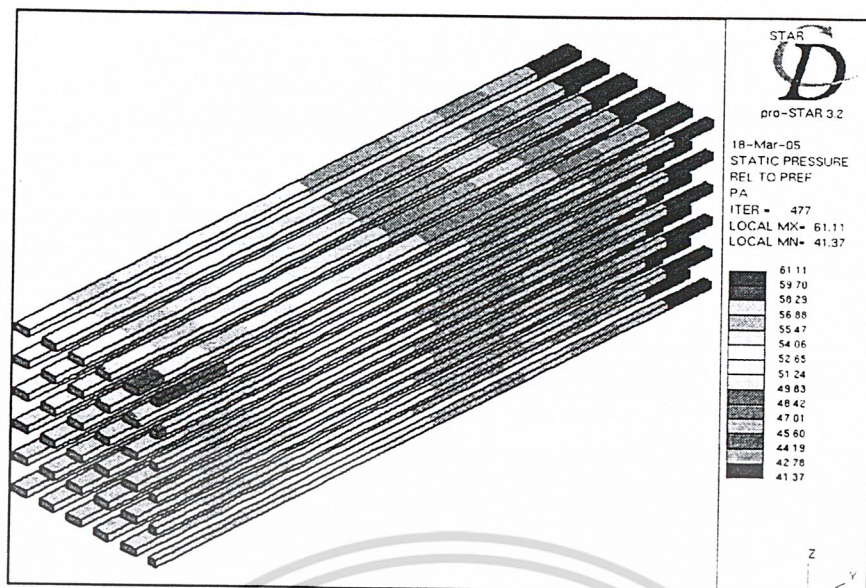


รูปที่ 5-24 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 30 องศา

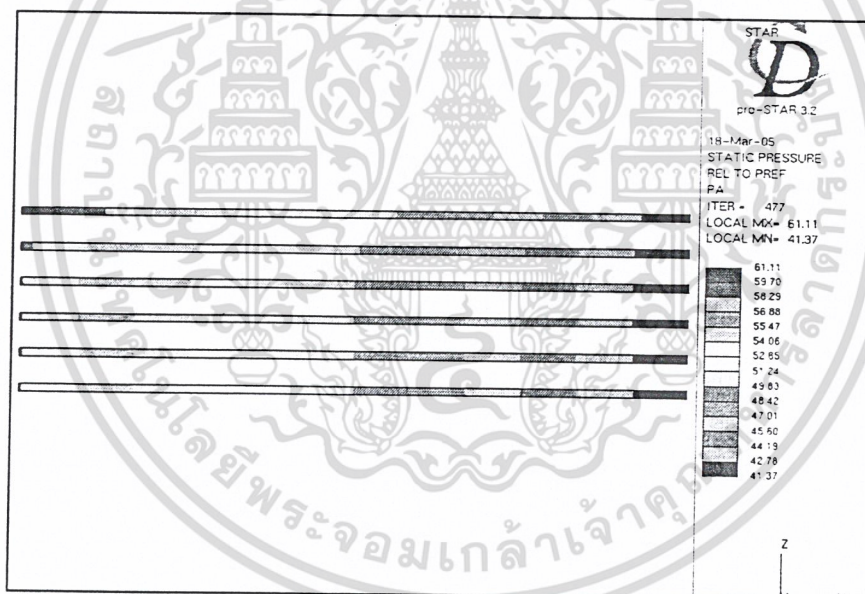


รูปที่ 5-25 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-26 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 30 องศา

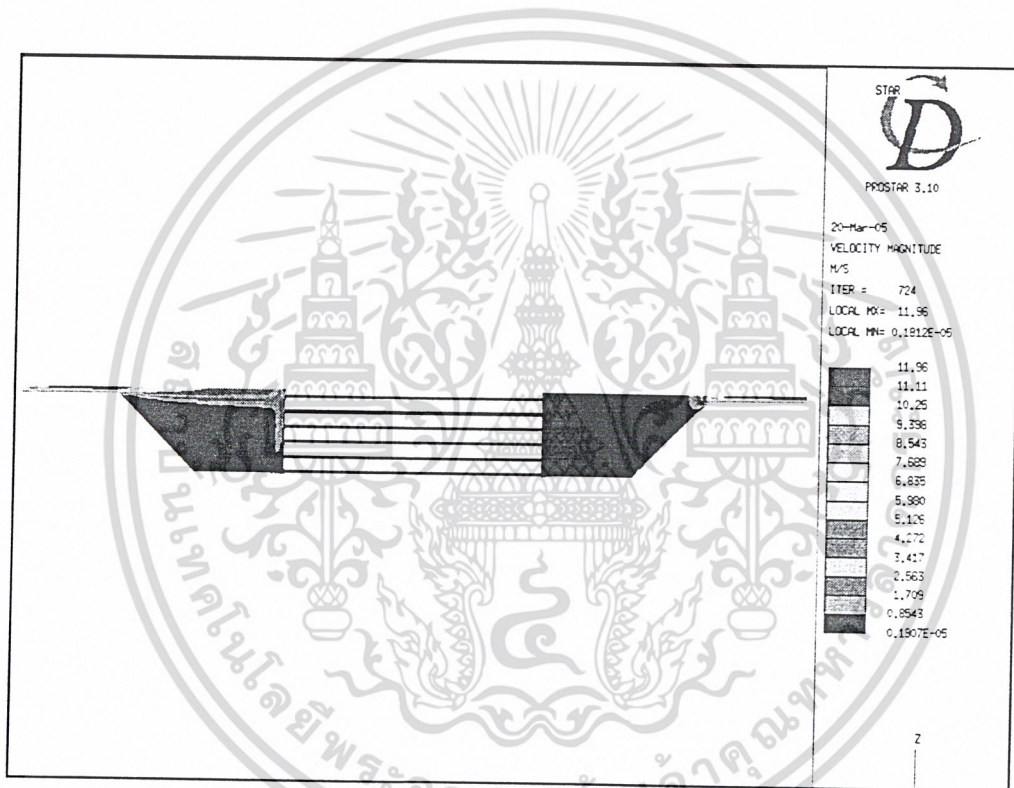


รูปที่ 5-27 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 30 องศา (ระนาบ Y-Z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

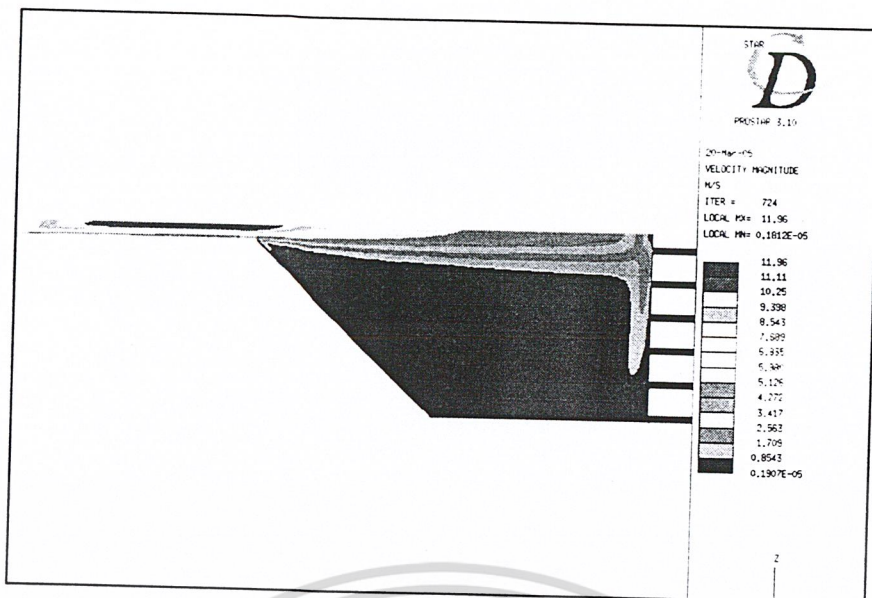
รูปทรงโค้งมนที่ มุม 45 องศา

อากาศที่ไหลผ่านทางเข้าจะมีความเร็วบริเวณตรงกลางท่อที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 28,29 ส่วนบริเวณผนังท่อทางเข้าจะมีความเร็วที่ต่ำลง(เข้าใกล้ศูนย์) เช่นเดียวกับที่มุม 30 องศา หลังจากที่อากาศไหลเข้าสู่ชุดกระจายการไหลโดยไหลผ่านบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงมุม (45 องศา) ซึ่งอากาศยังคงมีโมเมนตัมที่ยังสูงอยู่ เนื่องจากขนาดของชุดกระจายไหลมีขนาดใหญ่ขึ้น(แต่น้อยกว่าที่มุม 30 องศา) ดังนั้นผลกระทบของความเค้นเฉือนที่ผนัง จึงมีผลกระทบต่ออัตราการไหลของอากาศน้อย(แต่ยังต้านทานการไหลของอากาศมากกว่าที่มุม 30 องศา) และที่มุม 45 องศาที่มีระยะห่างระหว่างทางเข้าของอากาศกับชั้นวางเซลล์ที่น้อย (แต่มากกว่าที่มุม 30 องศา) ดังนั้นอากาศที่มีโมเมนตัมสูง จึงไหลไปปะทะกับทางเข้าของชั้นวางเซลล์ จึงส่งผลให้บริเวณทางเข้า (ท่อหมายเลข 6 และ 5) ของชั้นวางเซลล์มีความดันสถิตที่สูงกว่าความดันที่จุดอื่น(ตามลำดับ) ดังรูปที่ 30.31.32 การกระจายตัวของอากาศค่อนข้างดี และดีกว่าที่มุม 30 องศา

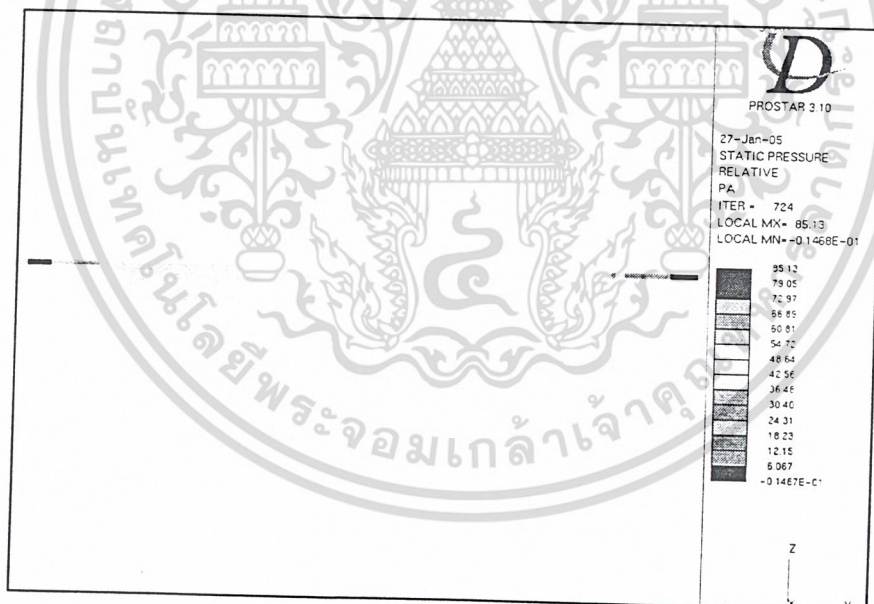


รูปที่ 5-28 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

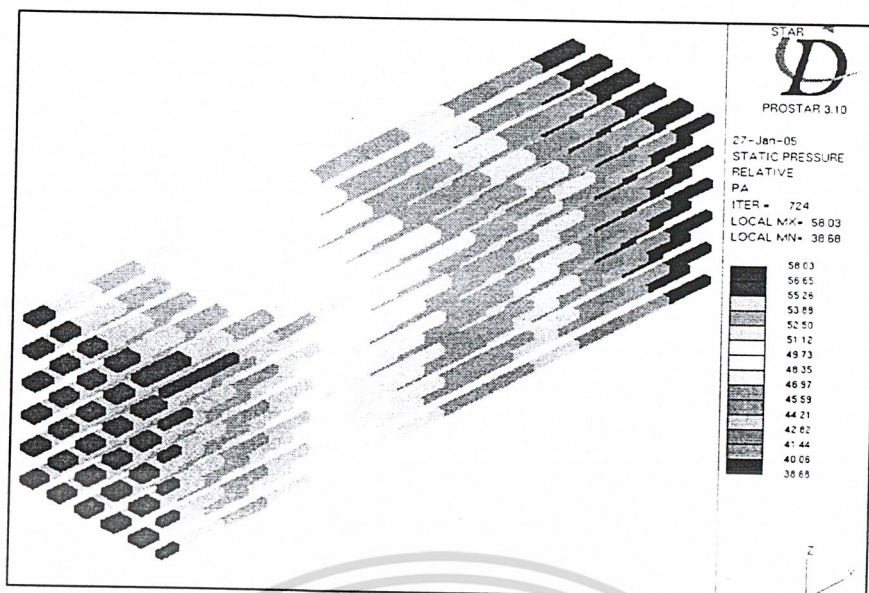


รูปที่ 5-29 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 45 องศา

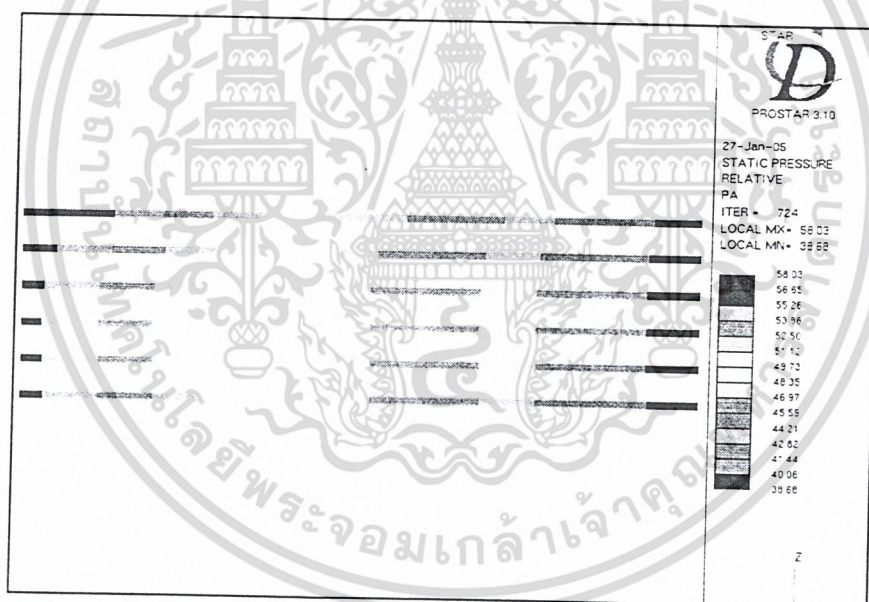


รูปที่ 5-30 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-31 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มีมุม 45 องศา

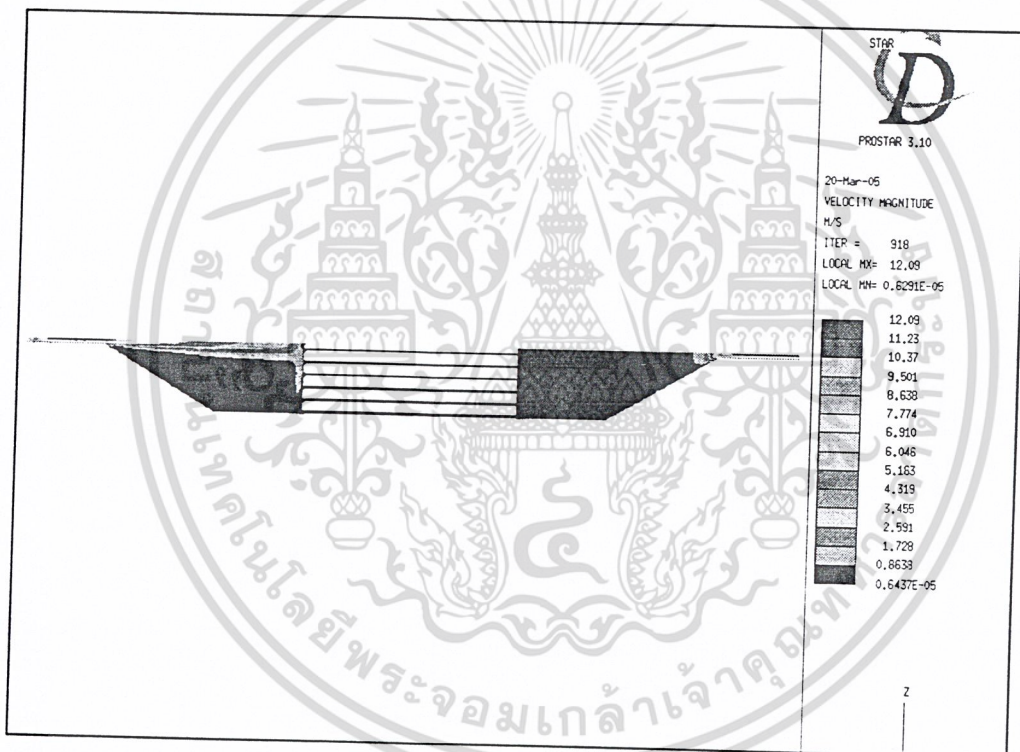


รูปที่ 5-32 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มีมุม 45 องศา (ระนาบ Y-Z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

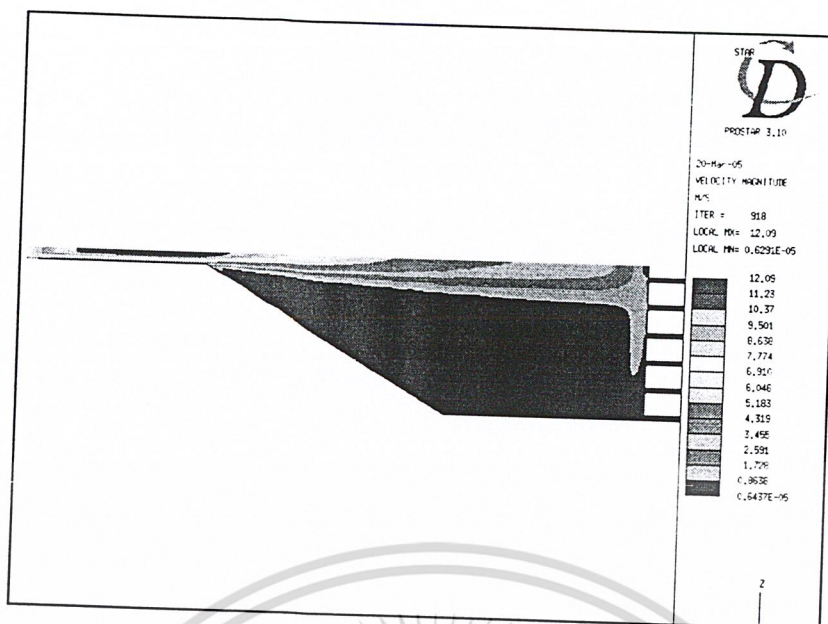
รูปทรงโค้งมนที่มุม 60 องศา

อากาศที่ไหลผ่านทางเข้าจะมีความเร็วบริเวณตรงกลางท่อที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 33,34 ส่วนบริเวณผนังท่อทางเข้าจะมีความเร็วที่ต่ำลง(เข้าใกล้ศูนย์)เช่นเดียวกับที่มุม 45 องศา หลังจากที่อากาศไหลเข้าสู่ชุดกระจายการไหลโดยไหลผ่านบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงมุม (60 องศา) ซึ่งอากาศยังคงมีโมเมนตัมที่ค่อนข้างสูงอยู่เนื่องจากขนาดของชุดกระจายไหลมีขนาดใหญ่ขึ้น(แต่น้อยกว่าที่มุม 45 องศา) และผลกระทบของความเค้นเฉือนที่ผนัง มีผลกระทบต่อการไหลของอากาศมากกว่าที่มุม 45 องศา(ด้านทานการไหลของอากาศมากกว่าที่มุม 45 องศา) และที่มุม 60 องศา นี้มีระยะห่างระหว่างทางเข้าของอากาศกับชั้นวางเซลล์ที่มากกว่าที่มุม 45 องศา ดังนั้นอากาศจึงมีการสูญเสียโมเมนตัมบางส่วนให้กับความเค้นเฉือนที่ผนังในชุดกระจายการไหล จึงส่งผลให้โมเมนตัมของอากาศมีค่าลดลงและเกิดการกระจายตัวในบริเวณทางเข้าของชั้นวางเซลล์ ดังรูปที่ 35,36,37 การกระจายตัวของอากาศดีกว่าที่มุม 45 องศา

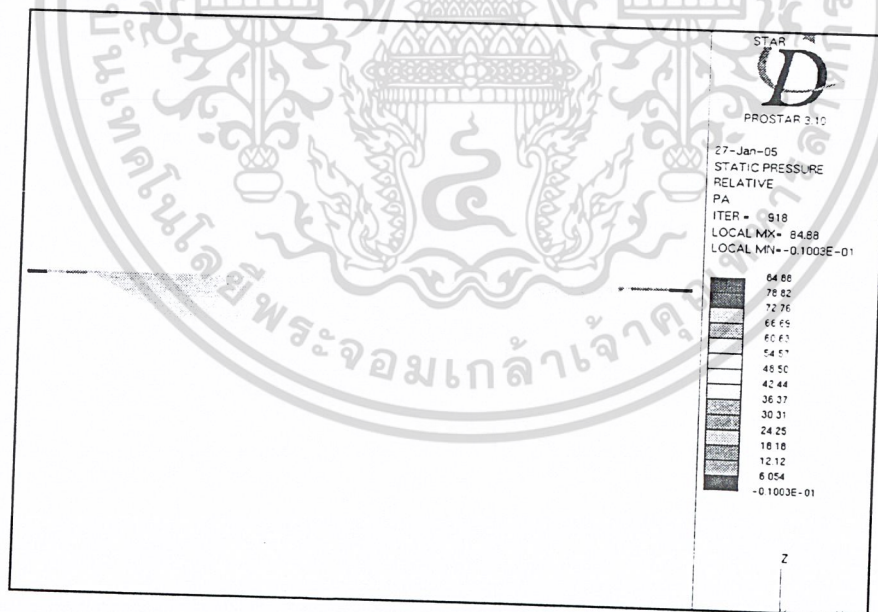


รูปที่ 5-33 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

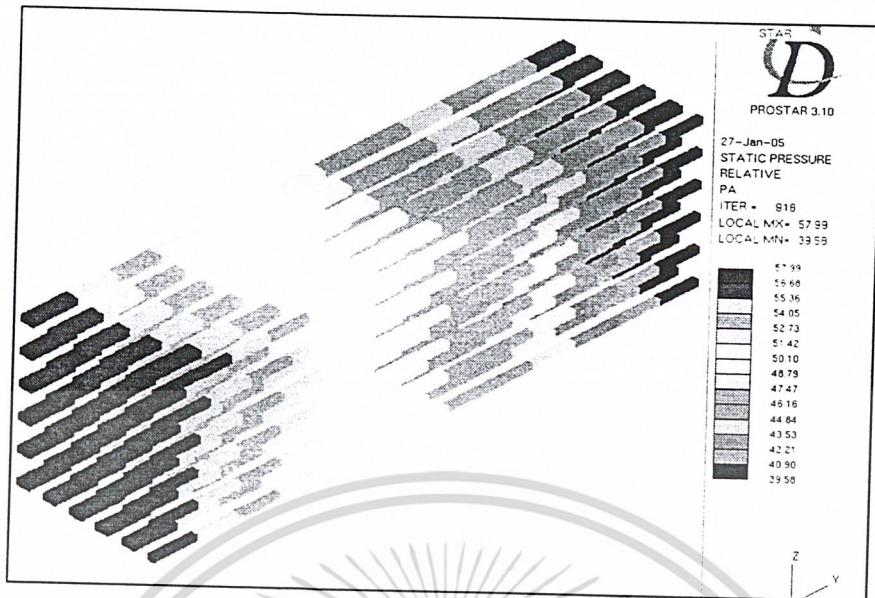


รูปที่ 5-34 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 60 องศา

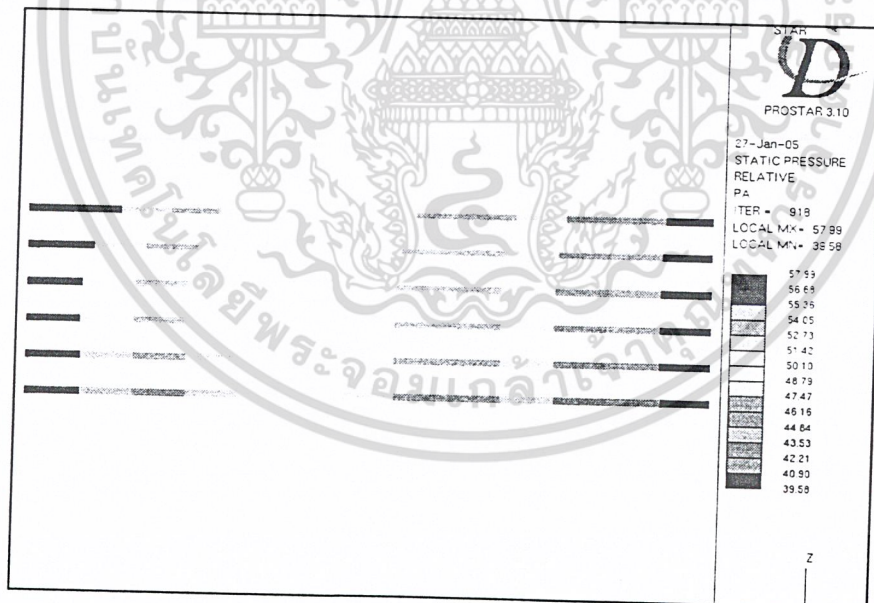


รูปที่ 5-35 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-36 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 60 องศา

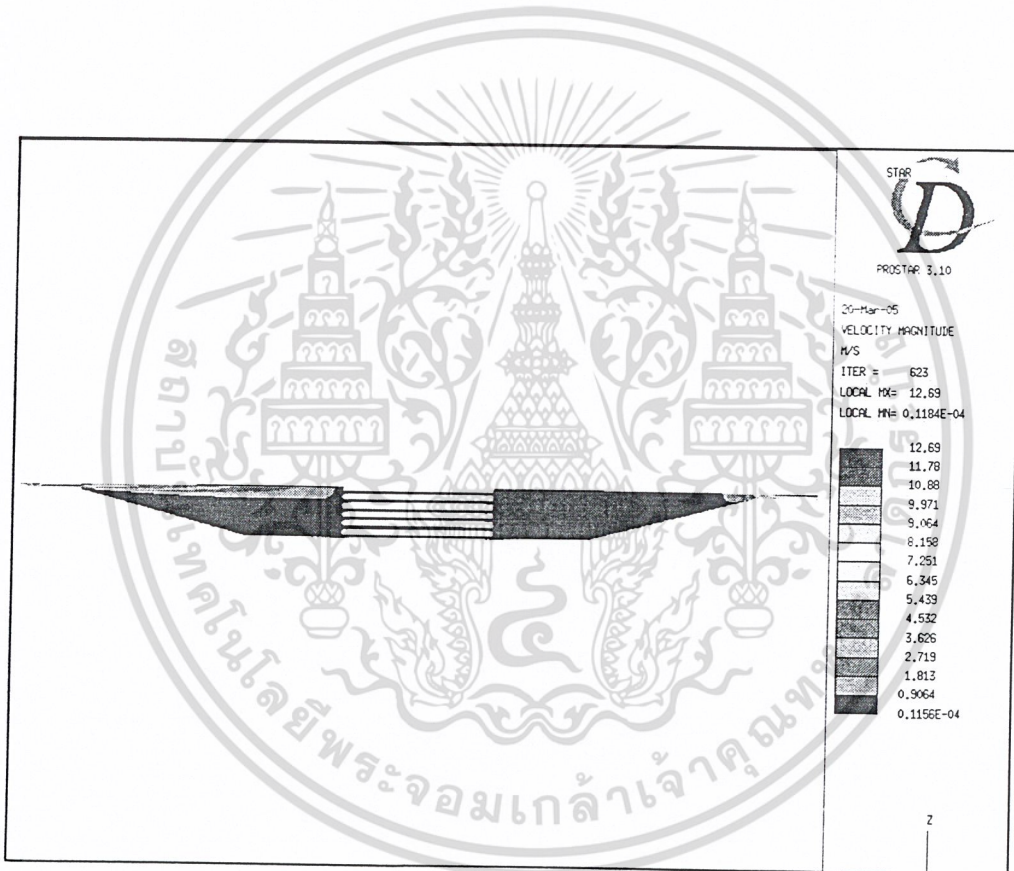


รูปที่ 5-37 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 60 องศา (ระนาบ Y-Z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

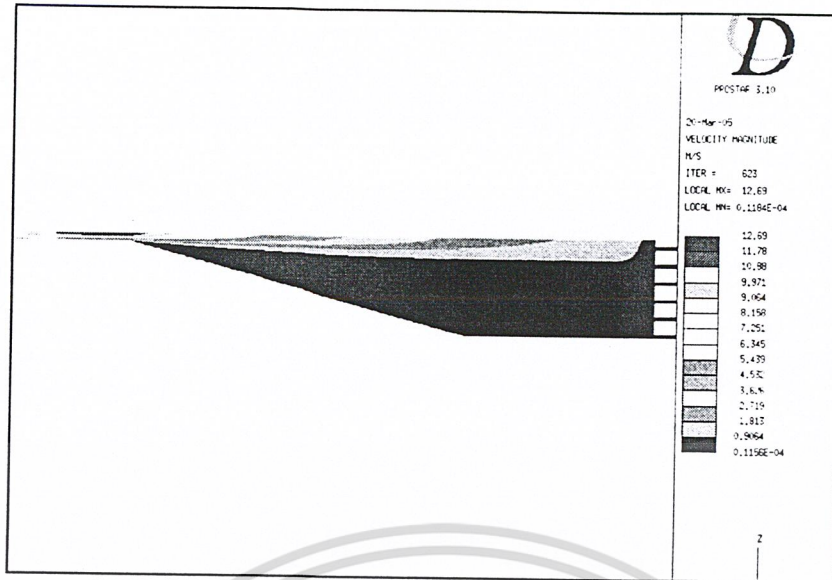
รูปทรงโค้งมนที่ 75 องศา

อากาศที่ไหลผ่านทางเข้าจะมีความเร็วบริเวณตรงกลางท่อที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 38,39 ส่วนบริเวณผนังท่อทางเข้าจะมีความเร็วที่ต่ำลง(เข้าใกล้ศูนย์)เช่นเดียวกับที่มุม 45 องศา หลังจากท่ออากาศไหลเข้าสู่ชุดกระจายการไหลโดยไหลผ่านบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงมุม (75 องศา) ซึ่งอากาศยังคงมีโมเมนตัมที่ค่อนข้างสูงอยู่เนื่องจากขนาดของชุดกระจายไหลมีขนาดใหญ่ขึ้น(แต่น้อยกว่าที่มุม 60 องศา) และผลกระทบของความเค้นเฉือนที่ผนัง มีผลกระทบต่ออัตราการไหลของอากาศมากกว่าที่มุม 60 องศา(ต้านทานการไหลของอากาศมากกว่าที่มุม 60 องศา) และที่มุม 75 องศา นี้มีระยะห่างระหว่างทางเข้าของอากาศกับชั้นวางเซลล์ที่มากกว่าที่มุม 60 องศา ดังนั้นอากาศจึงมีการสูญเสียโมเมนตัมให้กับความเค้นเฉือนที่ผนังในชุดกระจายการไหล จึงส่งผลให้โมเมนตัมของอากาศมีค่าลดลงและเกิดการกระจายตัวในบริเวณทางเข้าของชั้นวางเซลล์ ดังรูปที่ 40,41,42 การกระจายตัวของอากาศดีกว่าที่มุม 60 องศา

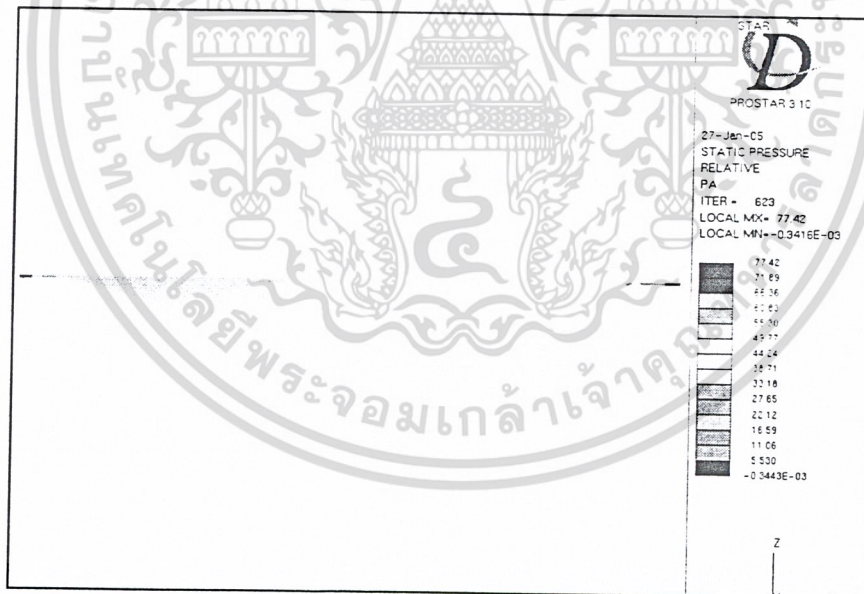


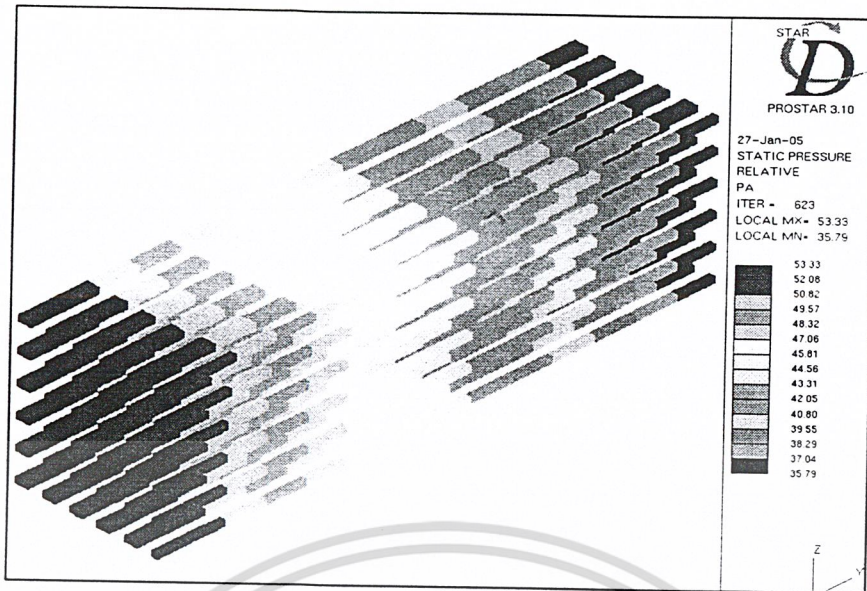
รูปที่ 5-38 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 75 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

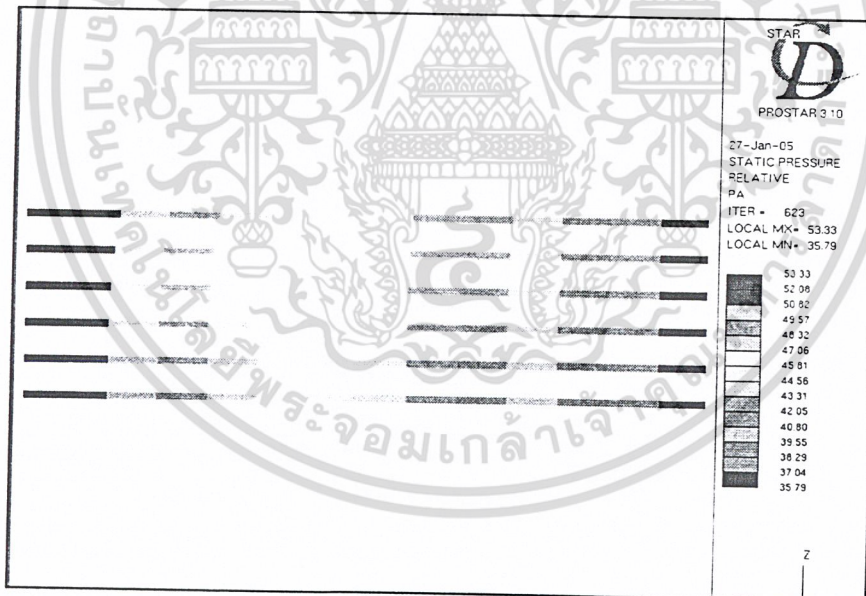


รูปที่ 5-39 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 75 องศา





รูปที่ 5-41 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 75 องศา

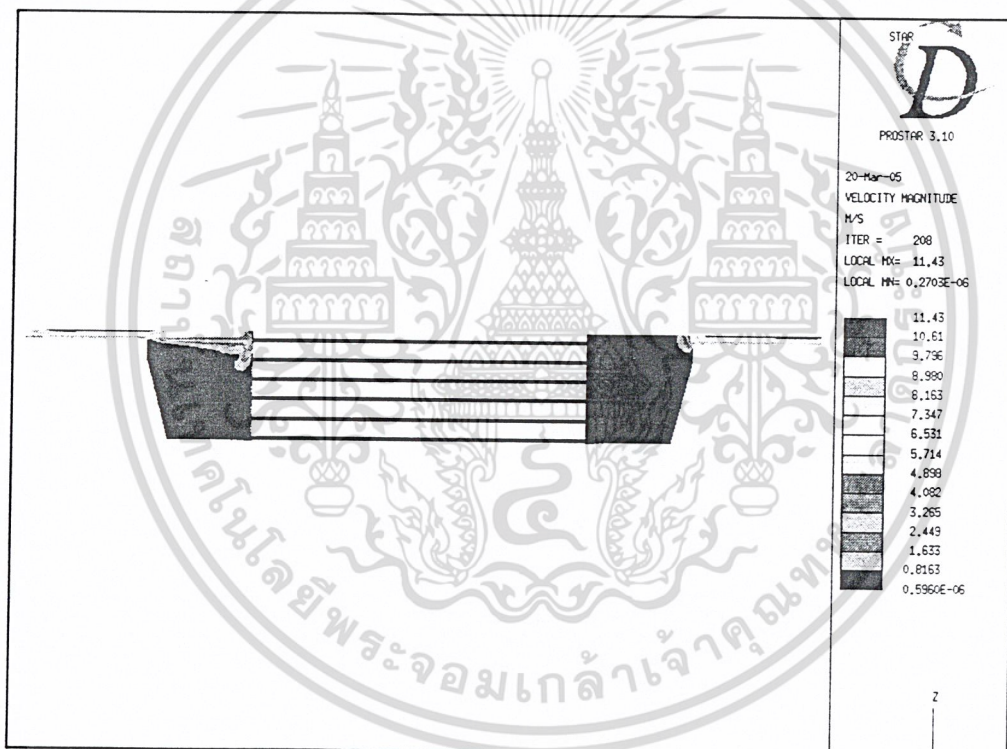


รูปที่ 5-42 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 75 องศา (ระนาบ Y-Z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

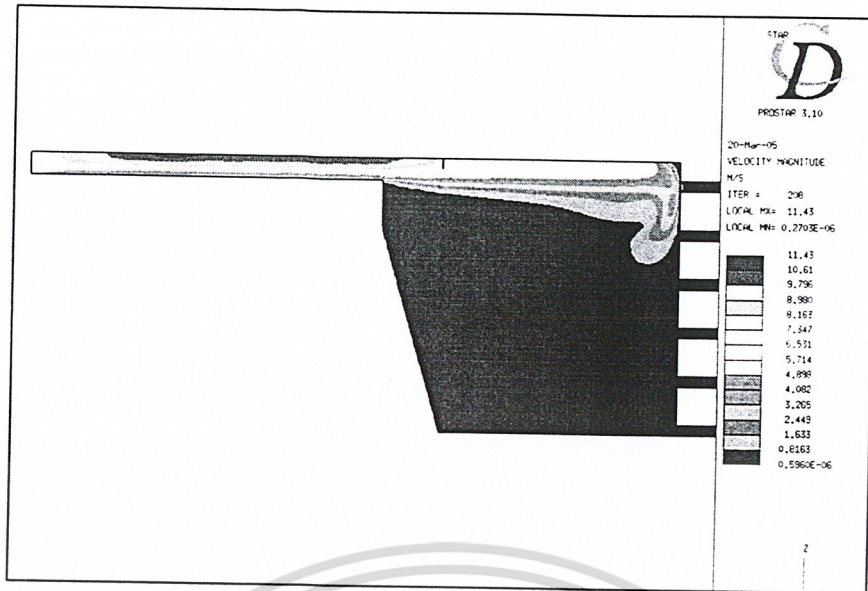
รูปทรงเหลี่ยมที่มุม 15 องศา

อากาศที่ไหลผ่านทางเข้าจะมีความเร็วบริเวณตรงกลางท่อที่สูงขึ้น (Fully Developed Flow) ดังรูปที่ 43.44 ส่วนบริเวณผนังท่อทางเข้าจะมีความเร็วที่ต่ำลง(เข้าใกล้ศูนย์) ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากที่บริเวณผนังท่อจะมีค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall Shear Stress) หลังจากที่อากาศไหลเข้าสู่ชุดกระจายการไหลโดยไหลผ่านบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงมุม (15 องศา) ซึ่งอากาศยังคงมีโมเมนตัมที่ยังสูงอยู่ เนื่องจากขนาดของชุดกระจายไหลมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นผลกระทบของความเค้นเฉือนที่ผนัง จึงมีผลกระทบต่อการไหลของอากาศน้อย(ด้านทานการไหลของอากาศน้อย) ประกอบกับที่มุม 15 องศาที่มีระยะห่างระหว่างทางเข้าของอากาศกับชั้นวางเซลล์ที่น้อย ดังนั้นอากาศที่มีโมเมนตัมสูง จึงไหลไปปะทะกับทางเข้าของชั้นวางเซลล์ จึงส่งผลให้บริเวณทางเข้าของชั้นวางเซลล์(ท่อหมายเลข 6) มีความดันสถิตที่สูงกว่าความดันที่จุดอื่น ดังรูปที่ 45,46,47 การกระจายตัวของอากาศไม่ดี

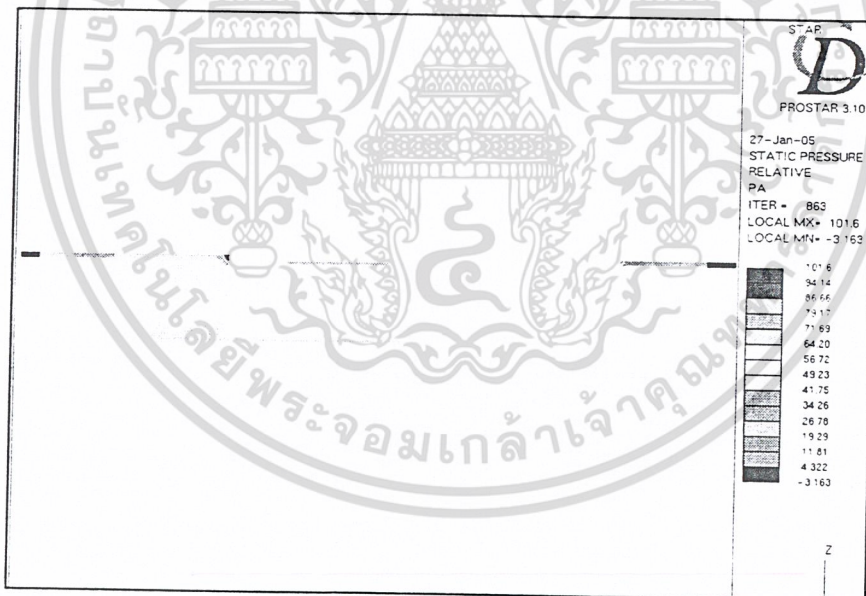


รูปที่ 5-43 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 15 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

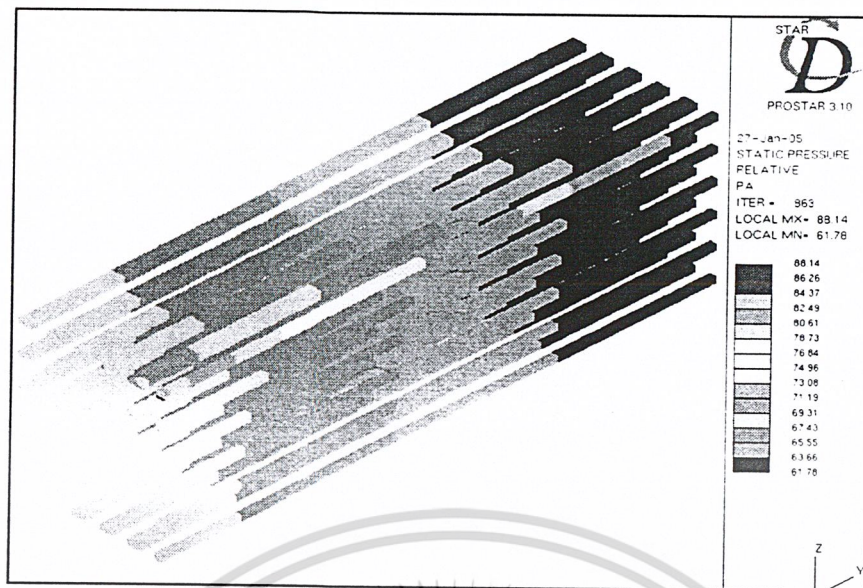


รูปที่ 5-44 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 15 องศา

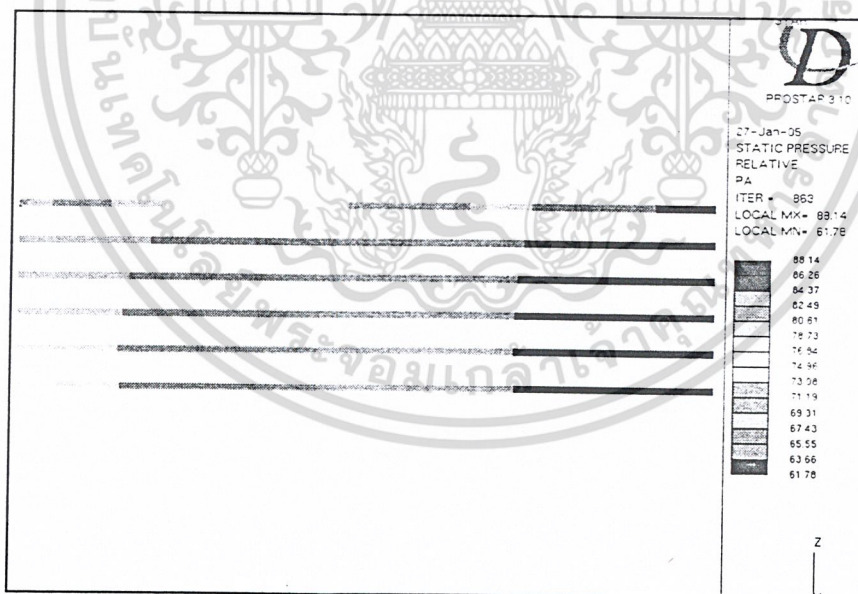


รูปที่ 5-45 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 15 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-46 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 15 องศา

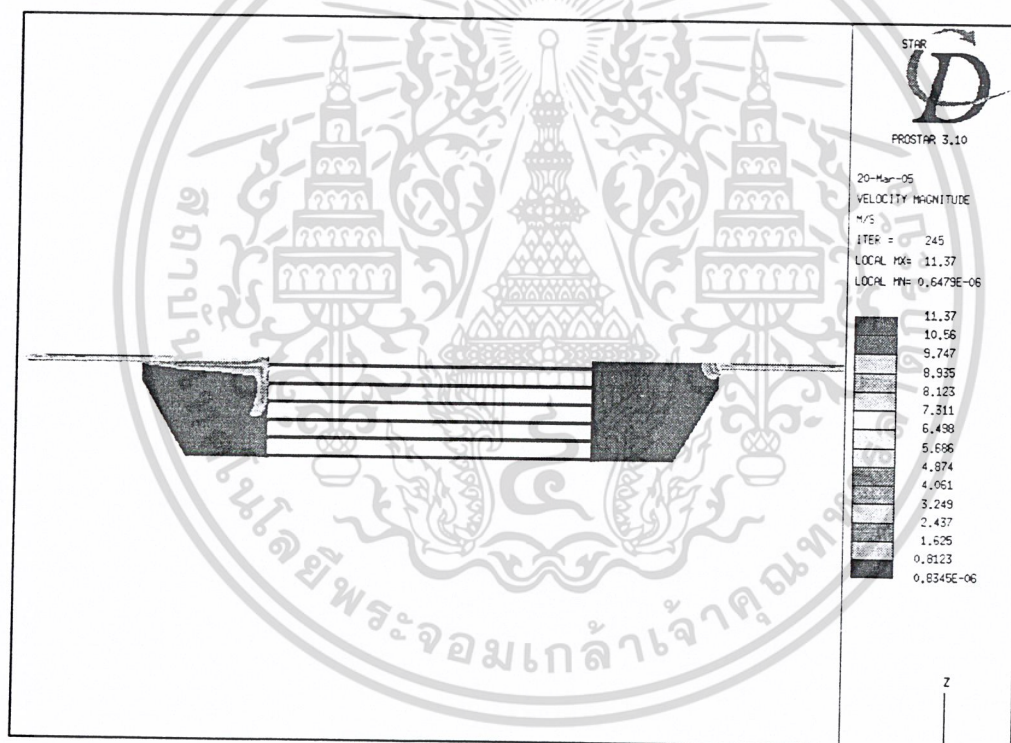


รูปที่ 5-47 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยม
ที่มุม 15 องศา (ระนาบ Y-Z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

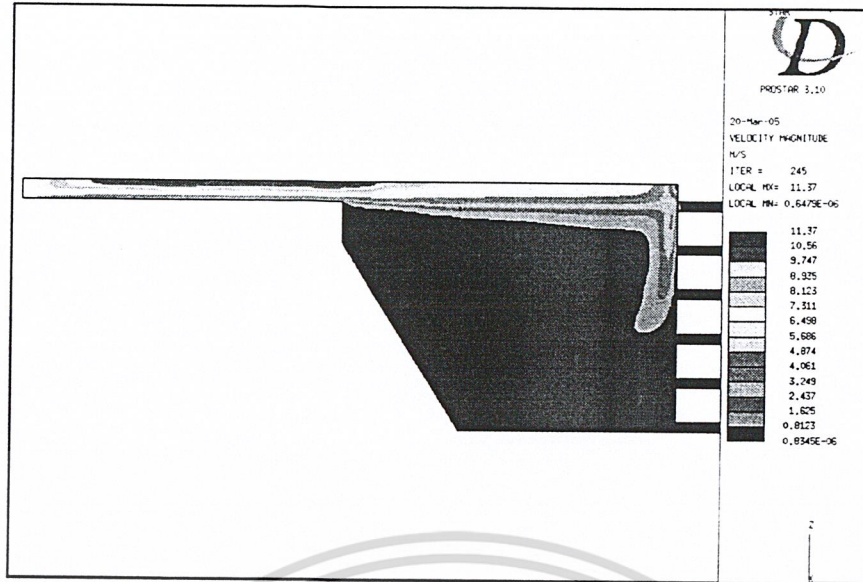
รูปทรงเหลี่ยมที่มุม 30 องศา

อากาศที่ไหลผ่านทางเข้าจะมีความเร็วบริเวณตรงกลางท่อที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 48,49 ส่วนบริเวณผนังท่อทางเข้าจะมีความเร็วที่ต่ำลง(เข้าใกล้ศูนย์) เช่นเดียวกับที่มุม 15 องศา หลังจากที่อากาศไหลเข้าสู่ชุดกระจายการไหลโดยไหลผ่านบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงมุม (30 องศา) ซึ่งอากาศยังคงมีโมเมนตัมที่ยังสูงอยู่ เนื่องจากขนาดของชุดกระจายไหลมีขนาดใหญ่ขึ้น(แต่น้อยกว่าที่มุม 15 องศา) ดังนั้นผลกระทบของความเค้นเฉือนที่ผนังจึงมีผลกระทบต่อการไหลของอากาศน้อย(แต่ยังต้านทานการไหลของอากาศมากกว่าที่มุม 15 องศา) และที่มุม 30 องศาจะมีระยะห่างระหว่างทางเข้าของอากาศกับชั้นวางเซลล์ที่น้อย (แต่มากกว่าที่มุม 15 องศา) ดังนั้นอากาศที่มีโมเมนตัมสูง จึงไหลไปปะทะกับทางเข้าของชั้นวางเซลล์ จึงส่งผลให้บริเวณทางเข้า (ท่อหมายเลข 6) ของชั้นวางเซลล์มีความดันสถิตที่สูงกว่าความดันที่จุดอื่น ดังรูปที่ 50,51,52 การกระจายตัวของอากาศยังไม่ดีนัก แต่ดีกว่าที่มุม 15 องศา

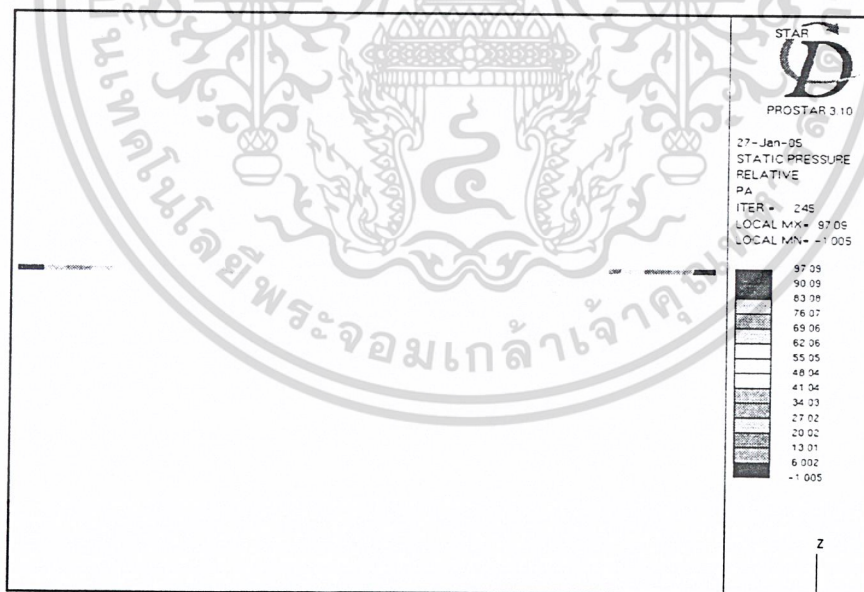


รูปที่ 5-48 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

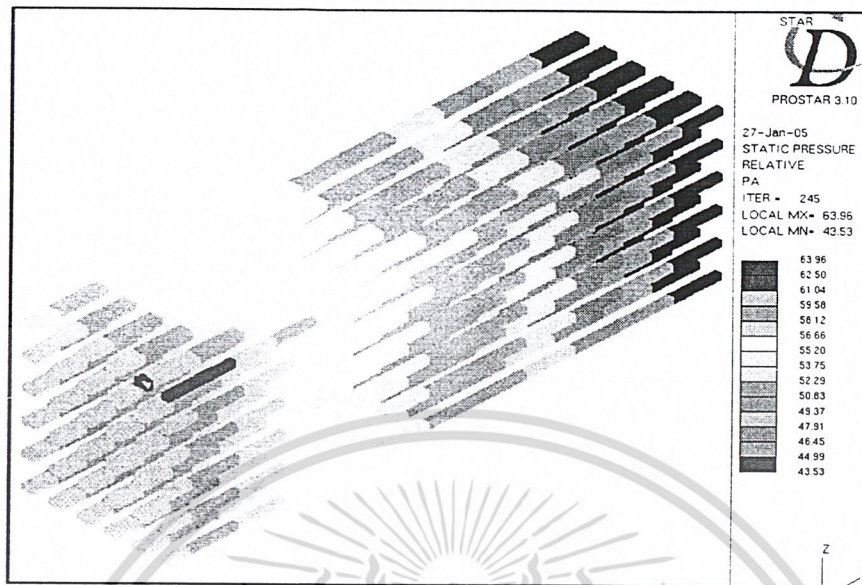


รูปที่ 5-49 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 30 องศา

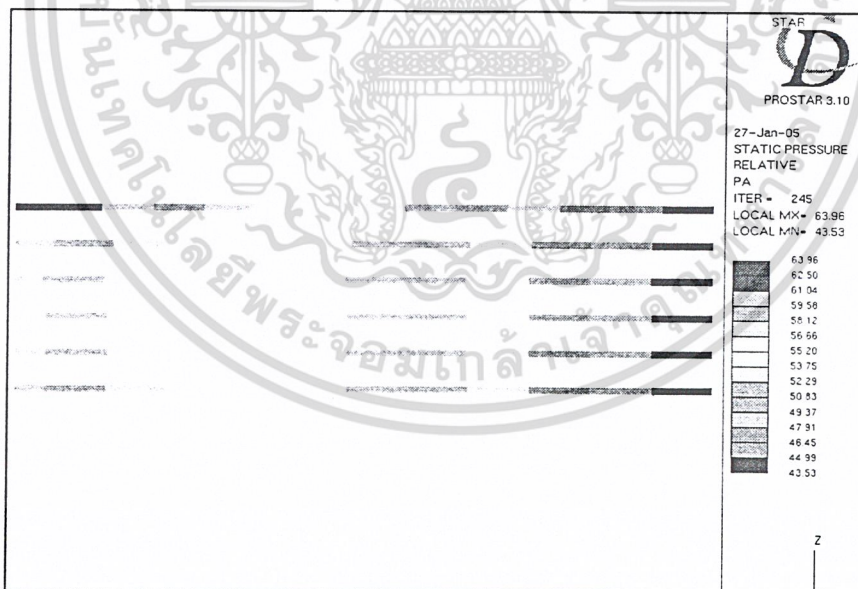


รูปที่ 5-50 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-51 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 30 องศา

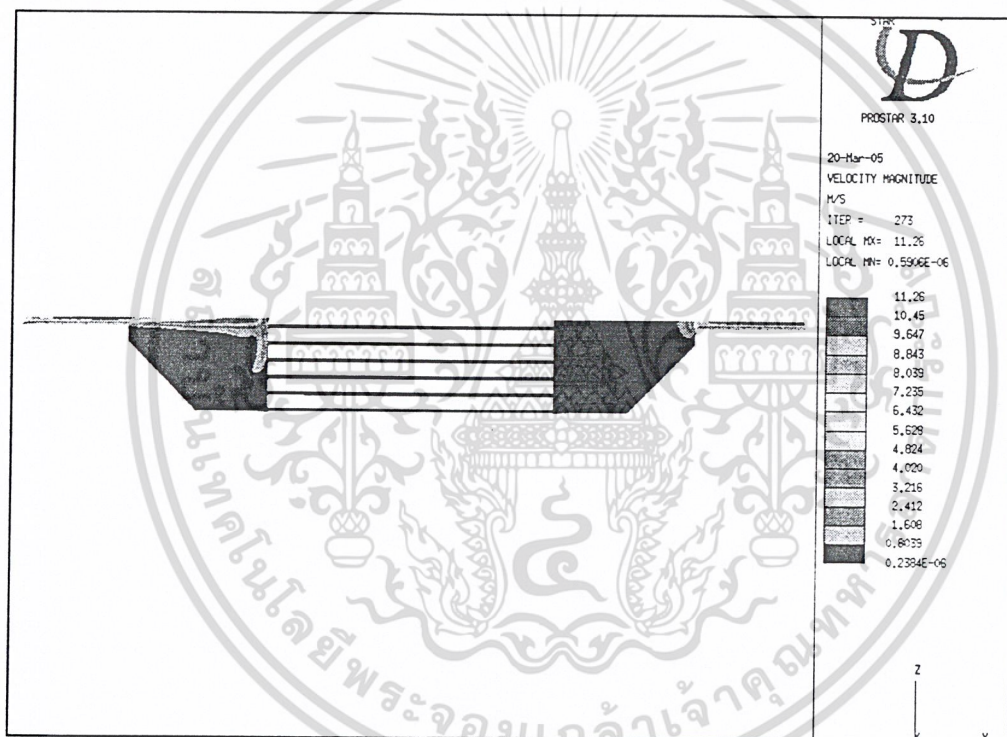


รูปที่ 5-52 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 30 องศา (ระนาบ Y-Z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

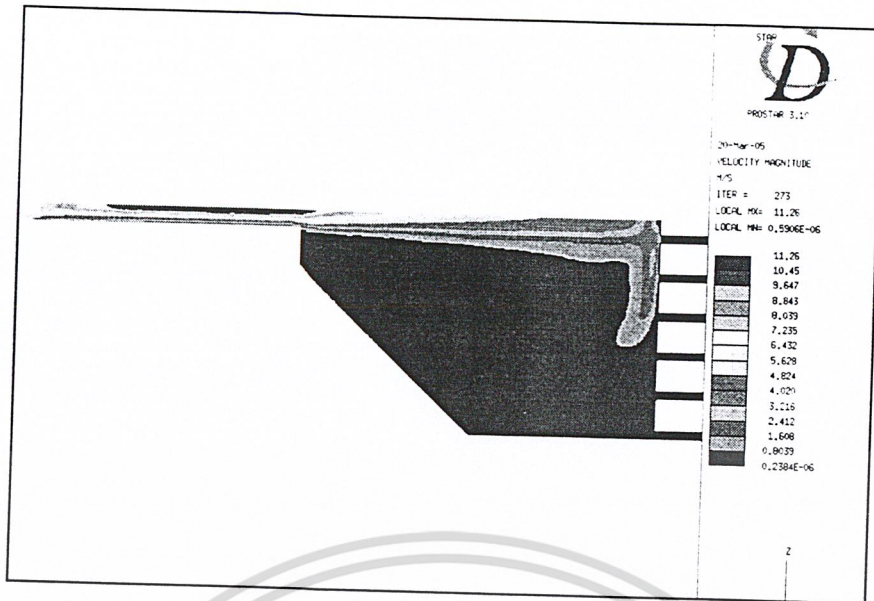
รูปทรงเหลี่ยมที่มุม 45 องศา

อากาศที่ไหลผ่านทางเข้าจะมีความเร็วบริเวณตรงกลางท่อที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 53,54 ส่วนบริเวณผนังท่อทางเข้าจะมีความเร็วที่ต่ำลง(เข้าใกล้ศูนย์) เช่นเดียวกับที่มุม 30 องศา หลังจากที่อากาศไหลเข้าสู่ชุดกระจายการไหลโดยไหลผ่านบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงมุม (45 องศา) ซึ่งอากาศยังคงมีโมเมนตัมที่ยังสูงอยู่ เนื่องจากขนาดของชุดกระจายไหลมีขนาดใหญ่ขึ้น(แต่น้อยกว่าที่มุม 30 องศา) ดังนั้นผลกระทบของความเค้นเฉือนที่ผนัง จึงมีผลกระทบต่อกรไหลของอากาศน้อย(แต่ยังคงต้านทานการไหลของอากาศมากกว่าที่มุม 30 องศา) และที่มุม 45 องศา นี้มีระยะห่างระหว่างทางเข้าของอากาศกับชั้นวางเซลล์ที่น้อย (แต่มากกว่าที่มุม 30 องศา) ดังนั้นอากาศที่มีโมเมนตัมสูง จึงไหลไปปะทะกับทางเข้าของชั้นวางเซลล์ จึงส่งผลให้บริเวณทางเข้า (ท่อหมายเลข 6 และ 5) ของชั้นวางเซลล์มีความดันสถิตที่สูงกว่าความดันที่จุดอื่น(ตามลำดับ) ดังรูปที่ 55,56,57 การกระจายตัวของอากาศค่อนข้างดี และดีกว่าที่มุม 30 องศา

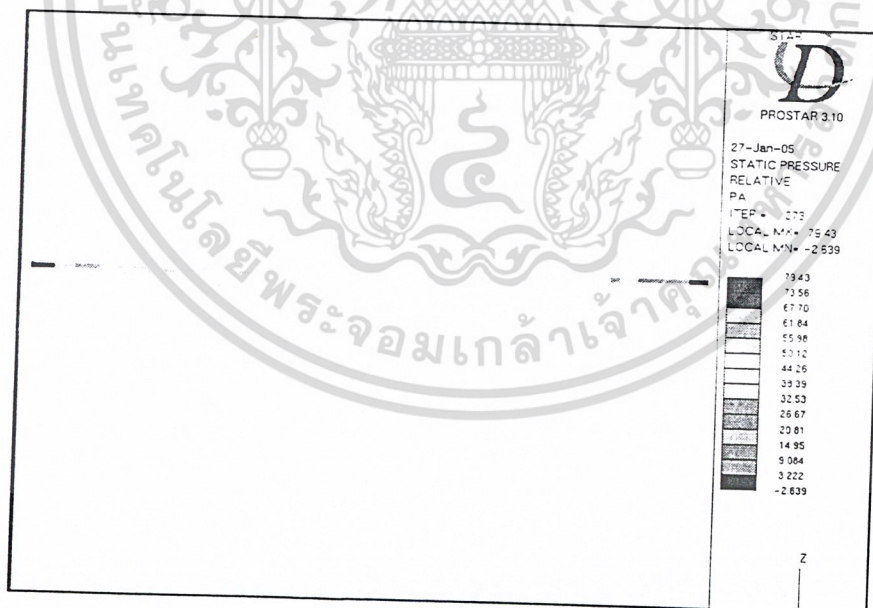


รูปที่ 5-53 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งที่มุม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

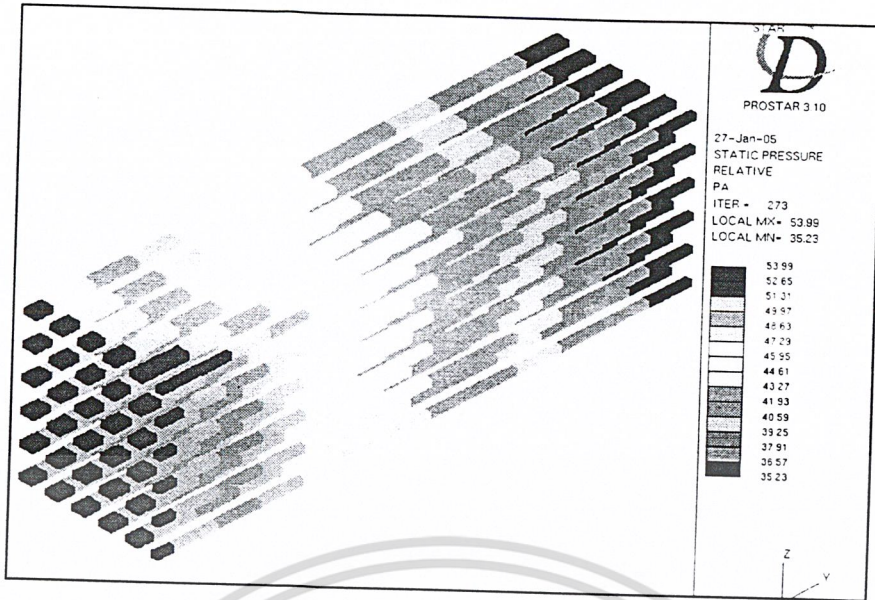


รูปที่ 5-54 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 45 องศา

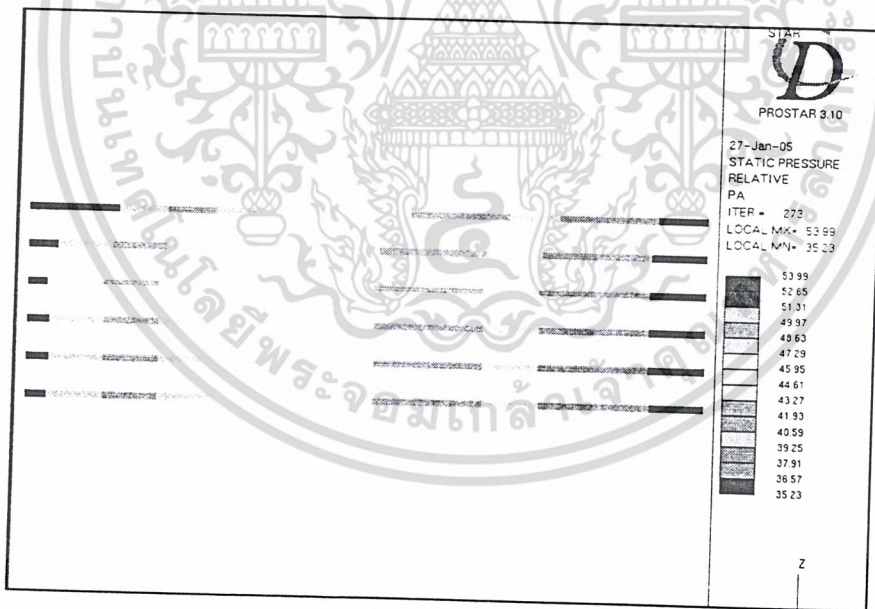


รูปที่ 5-55 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-56 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 45 องศา

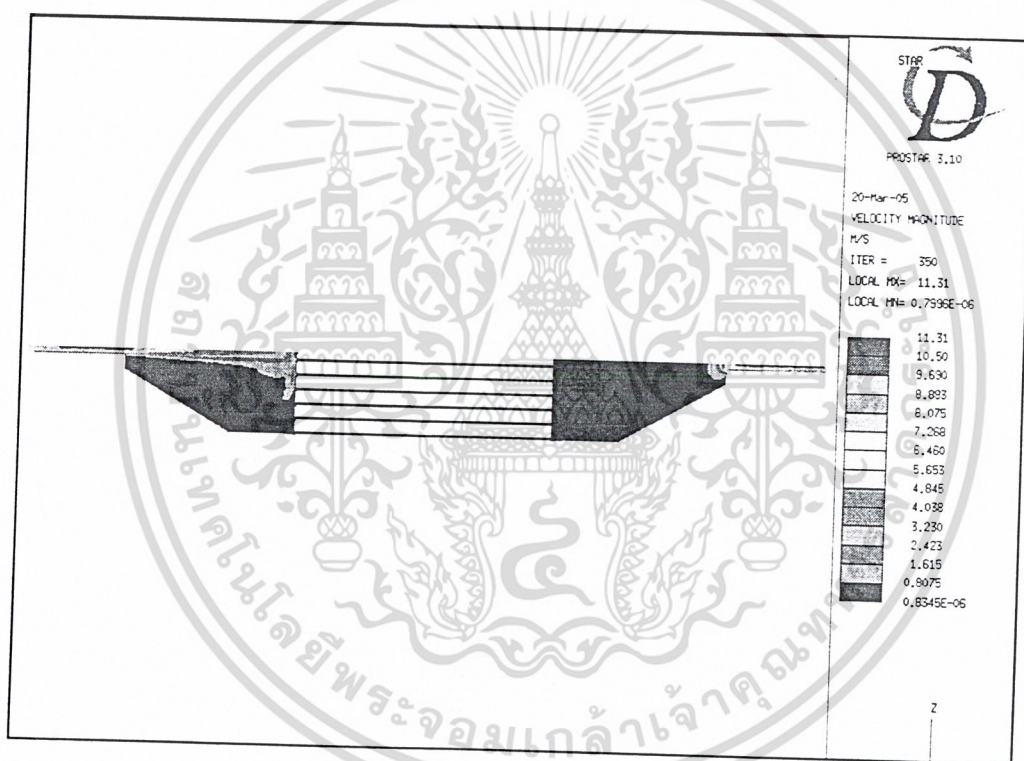


รูปที่ 5-57 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยม ที่มุม 45 องศา (ระนาบ Y-Z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

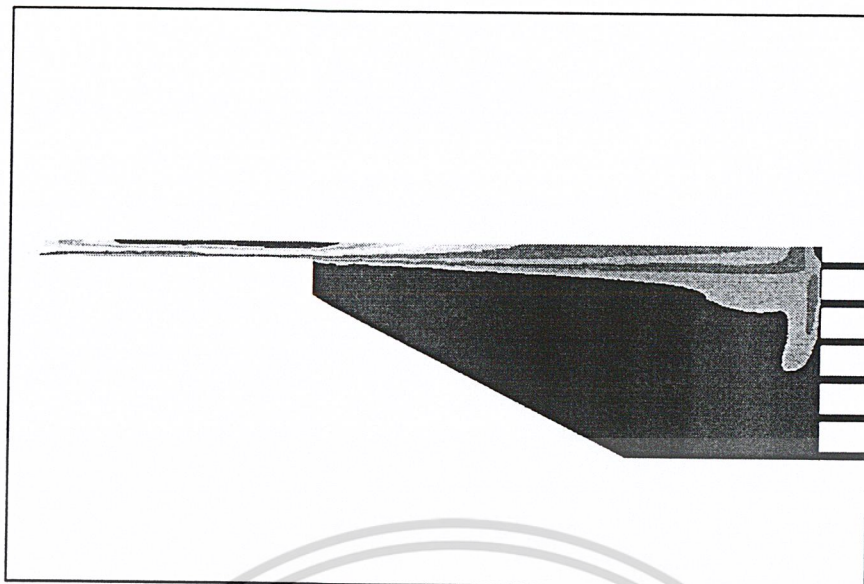
รูปทรงเหลี่ยมที่มุม 60 องศา

อากาศที่ไหลผ่านทางเข้าจะมีความเร็วบริเวณตรงกลางท่อที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 58,59 ส่วนบริเวณผนังท่อทางเข้า จะมีความเร็วที่ต่ำลง(เข้าใกล้ศูนย์)เช่นเดียวกับที่มุม 45 องศา หลังจากที่อากาศไหลเข้าสู่ชุดกระจายการไหล โดยไหลผ่านบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงมุม (60 องศา) ซึ่งอากาศยังคงมีโมเมนตัมที่ค่อนข้างสูงอยู่ เนื่องจากขนาดของชุดกระจายไหลมีขนาดใหญ่ขึ้น(แต่น้อยกว่าที่มุม 45 องศา) และผลกระทบของความเค้นเฉือนที่ผนัง มีผลกระทบต่อการไหลของอากาศมากกว่าที่มุม 45 องศา(ด้านทานการไหลของอากาศมากกว่าที่มุม 45 องศา) และที่มุม 60 องศา นี้มีระยะห่างระหว่างทางเข้าของอากาศกับชั้นวางเซลล์ที่มากกว่าที่มุม 45 องศา ดังนั้นอากาศจึงมีการสูญเสียโมเมนตัมบางส่วนให้กับความเค้นเฉือนที่ผนังในชุดกระจายการไหล จึงส่งผลให้โมเมนตัมของอากาศมีค่าลดลงและเกิดการกระจายตัวในบริเวณทางเข้าของชั้นวางเซลล์ ดังรูปที่ 60.61.62 การกระจายตัวของอากาศดีกว่าที่มุม 45 องศา

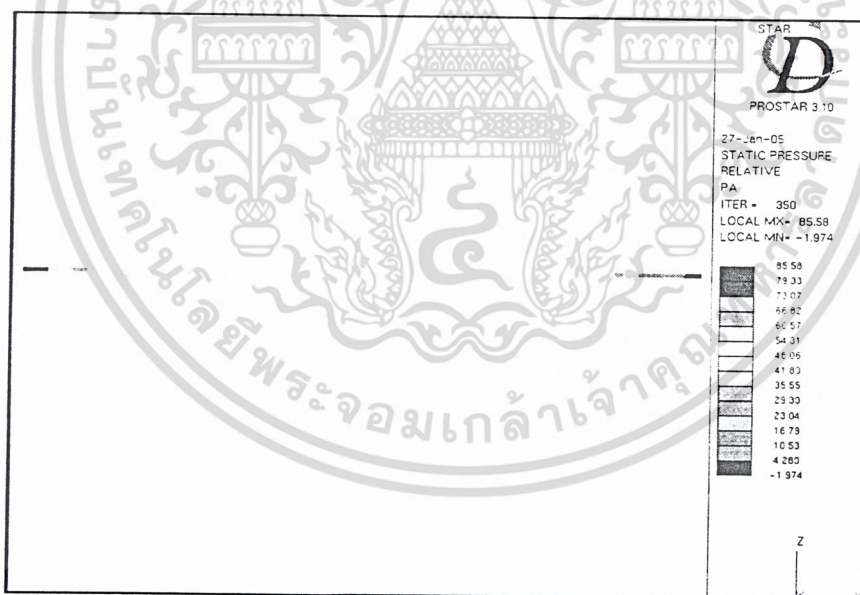


รูปที่ 5-58 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

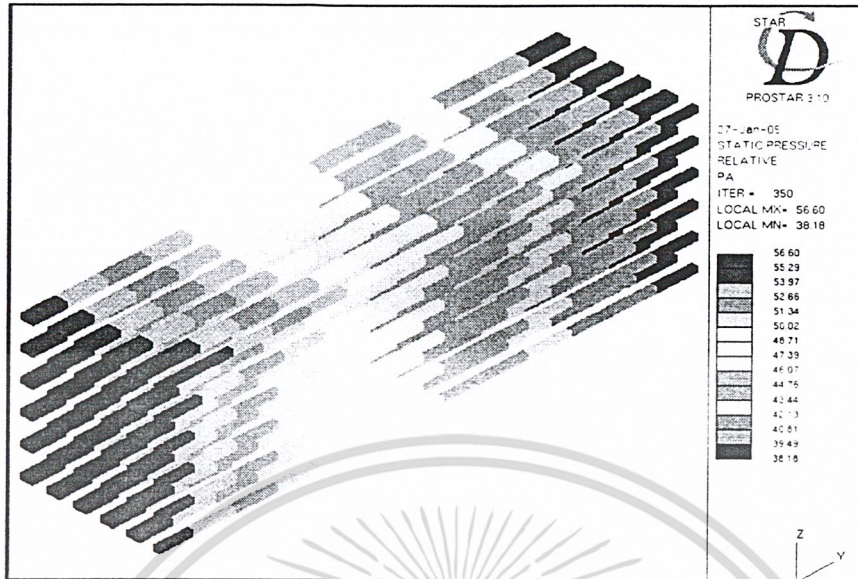


รูปที่ 5-59 แสดงภาพขยายของ *Velocity Magnitude* ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 60 องศา

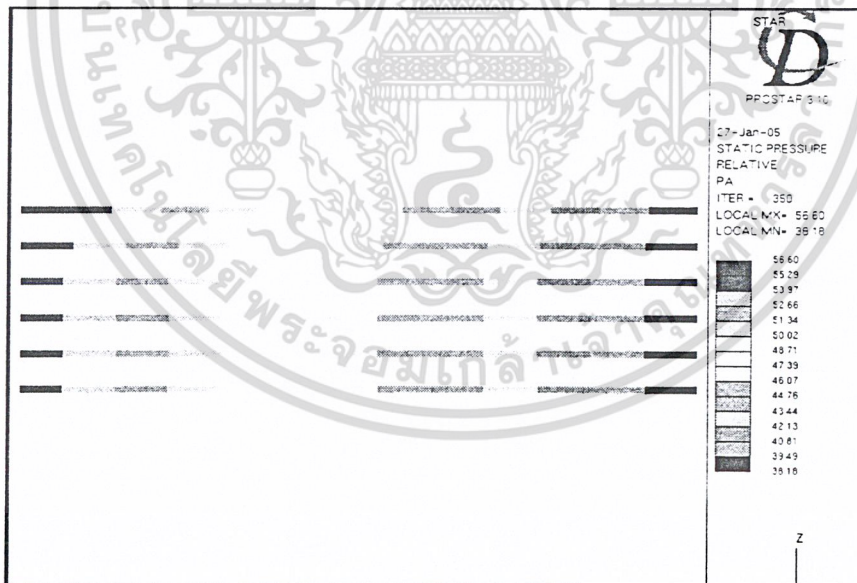


รูปที่ 5-60 แสดง *Static Pressure* ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-61 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 60 องศา

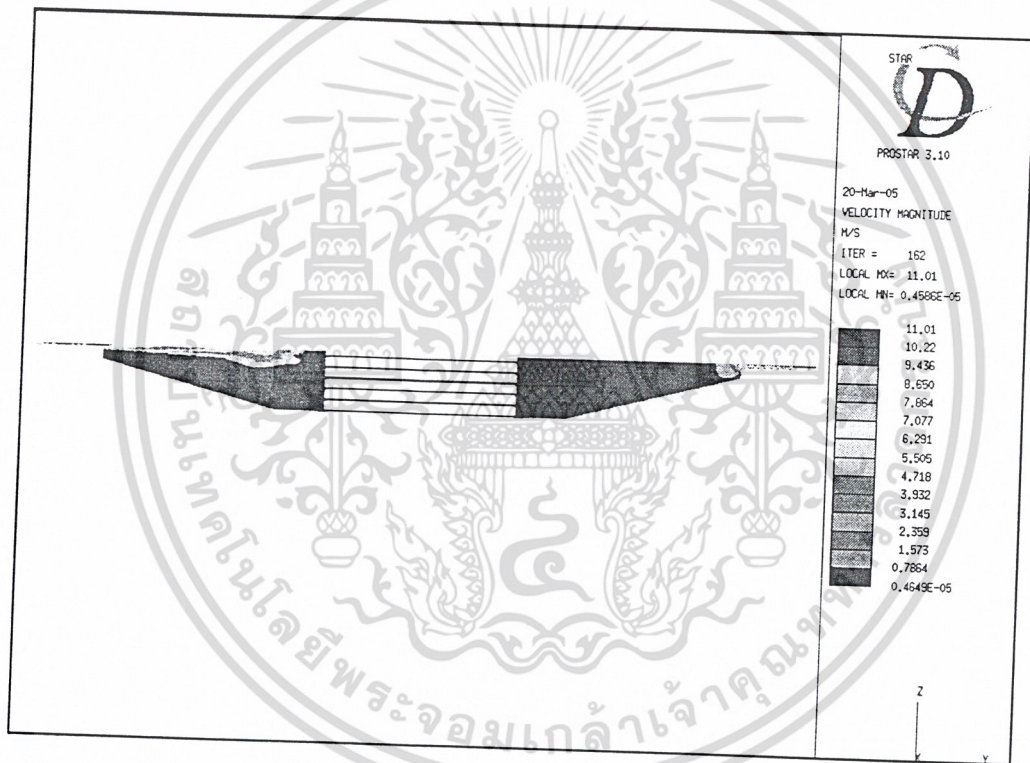


รูปที่ 5-62 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 60 องศา (ระนาบ Y-Z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

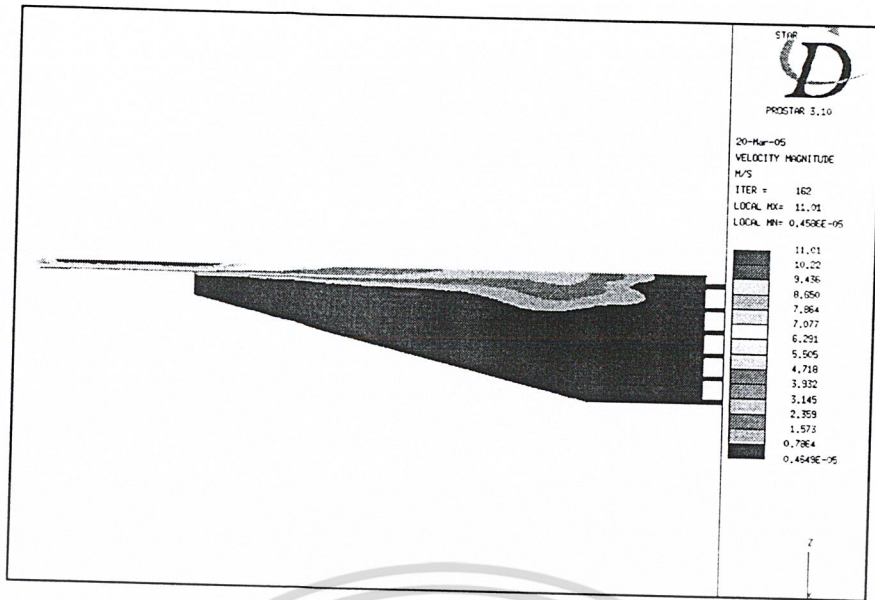
รูปทรงเหลี่ยมที่มุม 75 องศา

อากาศที่ไหลผ่านทางเข้าจะมีความเร็วบริเวณตรงกลางท่อที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 63,64 ส่วนบริเวณผนังท่อทางเข้าจะมีความเร็วที่ต่ำลง(เข้าใกล้ศูนย์)เช่นเดียวกับที่มุม 45 องศา หลังจากที่อากาศไหลเข้าสู่ชุดกระจายการไหลโดยไหลผ่านบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงมุม (75 องศา) ซึ่งอากาศยังคงมีโมเมนตัมที่ค่อนข้างสูงอยู่เนื่องจากขนาดของชุดกระจายไหลมีขนาดใหญ่ขึ้น(แต่น้อยกว่าที่มุม 60 องศา) และผลกระทบของความเค้นเฉือนที่ผนัง มีผลกระทบต่อการไหลของอากาศมากกว่าที่มุม 60 องศา(ด้านทานการไหลของอากาศมากกว่าที่มุม 60 องศา) และที่มุม 75 องศา นี้มีระยะห่างระหว่างทางเข้าของอากาศกับชั้นวางเซลล์ที่มากกว่าที่มุม 60 องศา ดังนั้นอากาศจึงมีการสูญเสียโมเมนตัมให้กับความเค้นเฉือนที่ผนังในชุดกระจายการไหล จึงส่งผลให้โมเมนตัมของอากาศมีค่าลดลงและเกิดการกระจายตัวในบริเวณทางเข้าของชั้นวางเซลล์ ดังรูปที่ 65,66,67 การกระจายตัวของอากาศดีกว่าที่มุม 60 องศา



รูปที่ 5-63 แสดง Velocity Magnitude ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 75 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

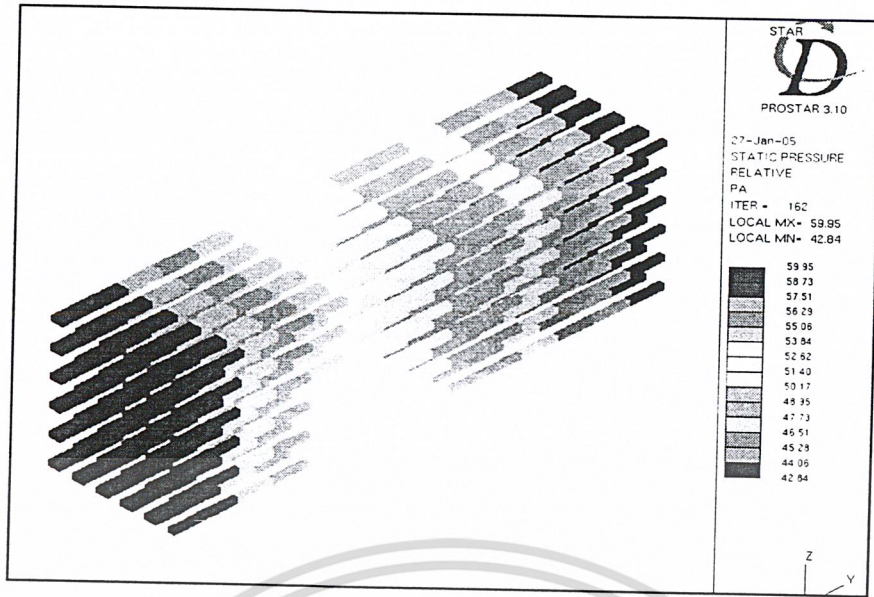


รูปที่ 5-64 แสดงภาพขยายของ Velocity Magnitude ที่บริเวณทางเข้าของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 75 องศา

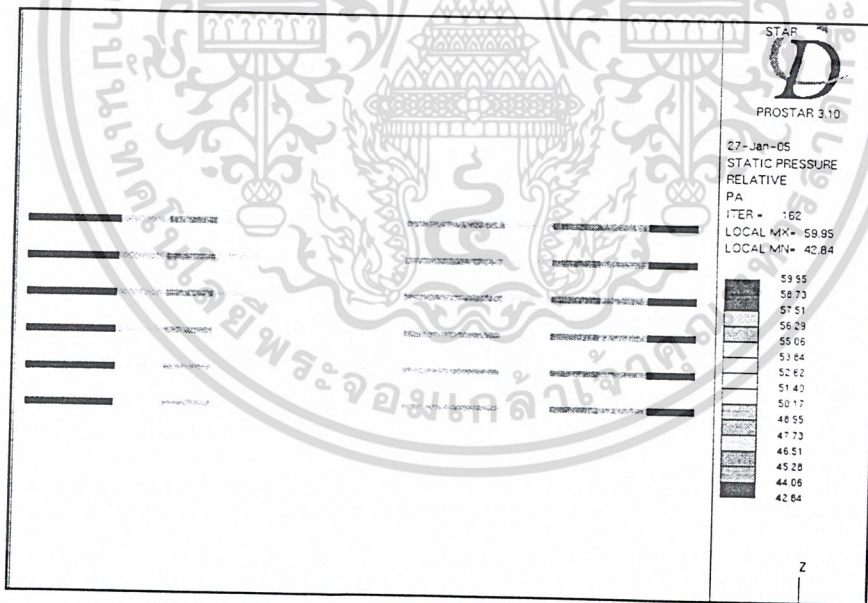


รูปที่ 5-65 แสดง Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 75 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



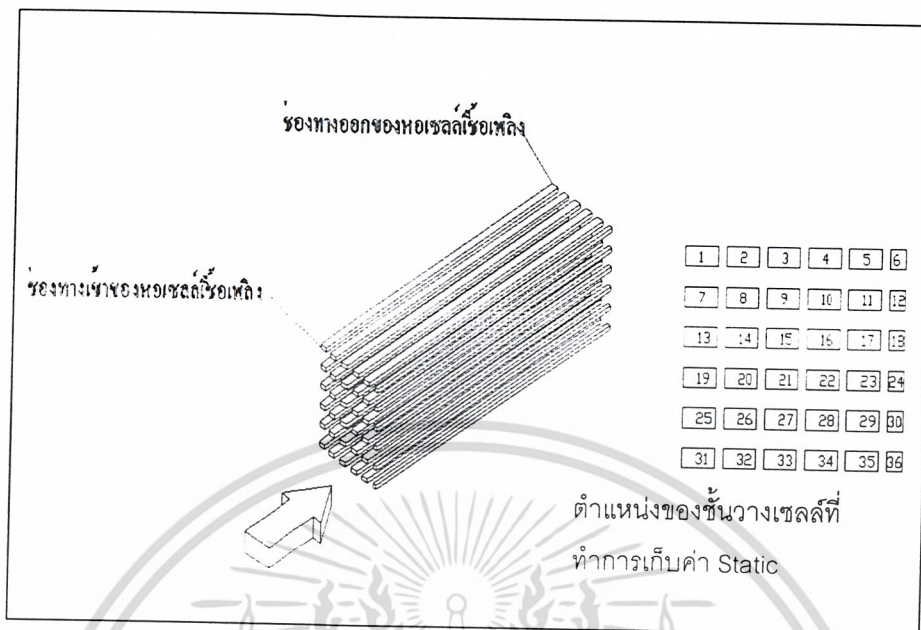
รูปที่ 5-66 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 75 องศา



รูปที่ 5-67 แสดง Static Pressure ในชั้นวางเซลล์ของชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมที่มุม 75 องศา (ระนาบ Y-Z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเก็บค่าความดัน Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบทรงโค้งมน



รูปที่ 5-68 รูปของตำแหน่งของชั้นวางเซลล์ที่ทำกรวัด Static Pressure

ตารางการเก็บค่าของความดัน Static Pressure ที่ทางเข้าและทางออกของชั้นวางเซลล์ที่มุมต่างๆของชุดกระจายการไหลรูปแบบทรงโค้งมน

number	15 องศา			30 องศา			45 องศา		
	Inlet	Outlet	Pressure Drop	Inlet	Outlet	Pressure Drop	Inlet	Outlet	Pressure Drop
1	61.41	43.38	18.03	58.42	41.47	16.95	55.95	38.84	17.11
2	60.38	43.36	17.02	58.39	41.44	16.95	55.9	38.83	17.07
3	60.34	43.36	16.98	58.36	41.44	16.92	55.9	38.83	17.07
4	60.40	43.36	17.04	58.43	41.44	16.99	56.08	38.83	17.25
5	61.19	43.37	17.82	58.19	41.44	16.75	56.83	38.84	17.99
6	63.26	43.36	19.90	60.67	41.45	19.22	57.92	38.88	19.04
7	60.40	43.38	17.02	58.39	41.47	16.92	55.93	38.84	17.09
8	60.28	43.36	16.92	58.39	41.44	16.95	55.89	38.83	17.06
9	60.35	43.36	16.99	58.37	41.44	16.93	55.87	38.83	17.04
10	60.34	43.36	16.98	58.38	41.44	16.94	55.92	38.83	17.09
11	60.40	43.36	17.04	58.51	41.44	17.07	56.06	38.83	17.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

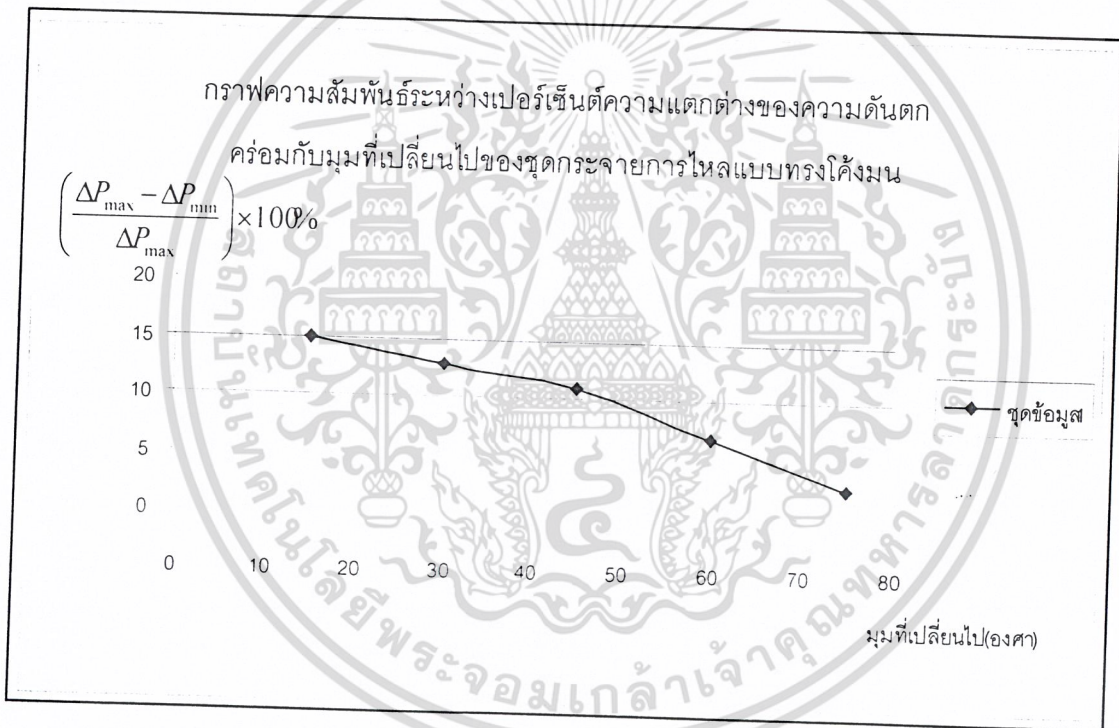
12	60.57	43.36	17.21	58.66	41.44	17.22	56.27	38.88	17.39
13	60.39	43.37	17.02	58.38	41.47	16.91	55.91	38.84	17.07
14	60.39	43.36	17.03	58.39	41.44	16.95	55.88	38.83	17.05
15	60.37	43.35	17.02	58.37	41.44	16.93	55.86	38.83	17.03
16	60.35	43.36	16.99	58.36	41.44	16.92	55.86	38.83	17.03
17	60.36	43.36	17.00	58.36	41.44	16.92	55.88	38.83	17.05
18	60.35	43.36	16.99	58.37	41.44	16.93	55.95	38.88	17.07
19	60.38	43.38	17.00	58.39	41.45	16.94	55.9	38.84	17.06
20	60.39	43.35	17.04	58.40	41.44	16.96	55.89	38.83	17.06
21	60.39	43.35	17.04	58.39	41.43	16.96	55.87	38.83	17.04
22	60.37	43.36	17.01	58.38	41.43	16.95	55.86	38.83	17.03
23	60.36	43.35	17.01	58.37	41.44	16.93	55.85	38.83	17.02
24	60.36	43.35	17.01	58.36	41.40	16.96	55.91	38.88	17.03
25	60.38	43.38	17.00	58.37	41.47	16.90	55.89	38.84	17.05
26	60.40	43.35	17.05	58.39	41.45	16.94	55.9	38.83	17.07
27	60.40	43.35	17.05	58.39	41.44	16.95	55.89	38.83	17.06
28	60.39	43.36	17.03	58.39	41.44	16.95	55.89	38.83	17.06
29	60.39	43.35	17.04	58.38	41.45	16.93	55.88	38.83	17.05
30	60.39	43.36	17.03	58.38	41.45	16.93	55.94	38.88	17.06
31	60.32	43.43	16.69	58.31	41.53	16.78	55.85	38.89	16.96
32	60.35	43.40	16.95	58.36	41.48	16.88	55.87	38.87	17
33	60.35	43.40	16.95	58.36	41.48	16.88	55.87	38.87	17
34	60.35	43.40	16.95	58.36	41.48	16.88	55.87	38.87	17
35	60.35	43.40	16.95	58.36	41.48	16.88	55.88	38.87	17.01
36	60.34	43.40	16.94	58.33	41.50	16.83	55.93	38.92	17.01
max			19.90			19.22			19.04
min			16.94			16.75			16.96
$((\text{max}-\text{min})/\text{max})100\%$			14.87			12.85			10.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

number	60 องศา			75 องศา		
	Inlet	Outlet	Pressure Drop	Inlet	Outlet	Pressure Drop
1	56.78	39.67	17.11	52.95	35.91	17.04
2	56.73	39.66	17.07	52.96	35.89	17.07
3	56.73	39.66	17.07	52.98	35.89	17.09
4	56.9	39.66	17.24	53.04	35.89	17.15
5	57.37	39.66	17.71	53.16	35.89	17.27
6	57.83	39.65	18.18	53.26	35.91	17.35
7	56.76	39.67	17.09	52.95	35.91	17.04
8	56.72	39.66	17.06	52.96	35.89	17.07
9	56.7	39.66	17.04	52.96	35.89	17.07
10	56.75	39.66	17.09	52.99	35.89	17.1
11	56.91	39.66	17.25	53.05	35.89	17.16
12	57.05	39.65	17.4	53.11	35.91	17.2
13	56.74	39.67	17.07	52.94	35.91	17.03
14	56.71	39.66	17.05	52.95	35.89	17.06
15	56.68	39.66	17.02	52.95	35.89	17.06
16	56.69	39.66	17.03	52.96	35.89	17.07
17	56.72	39.66	17.06	52.97	35.89	17.08
18	56.74	39.65	17.09	53	35.91	17.09
19	56.73	39.67	17.06	52.94	35.91	17.03
20	56.72	39.66	17.06	52.95	35.89	17.06
21	56.7	39.66	17.04	52.95	35.89	17.06
22	56.69	39.66	17.03	52.95	35.89	17.06
23	56.69	39.66	17.03	52.95	35.89	17.06
24	56.69	39.65	17.04	52.97	35.91	17.06
25	56.73	39.67	17.06	52.94	35.91	17.03
26	56.73	39.66	17.07	52.94	35.9	17.04
27	56.72	39.66	17.06	52.94	35.89	17.05
28	56.72	39.66	17.06	52.95	35.89	17.06
29	56.72	39.66	17.06	52.95	35.89	17.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

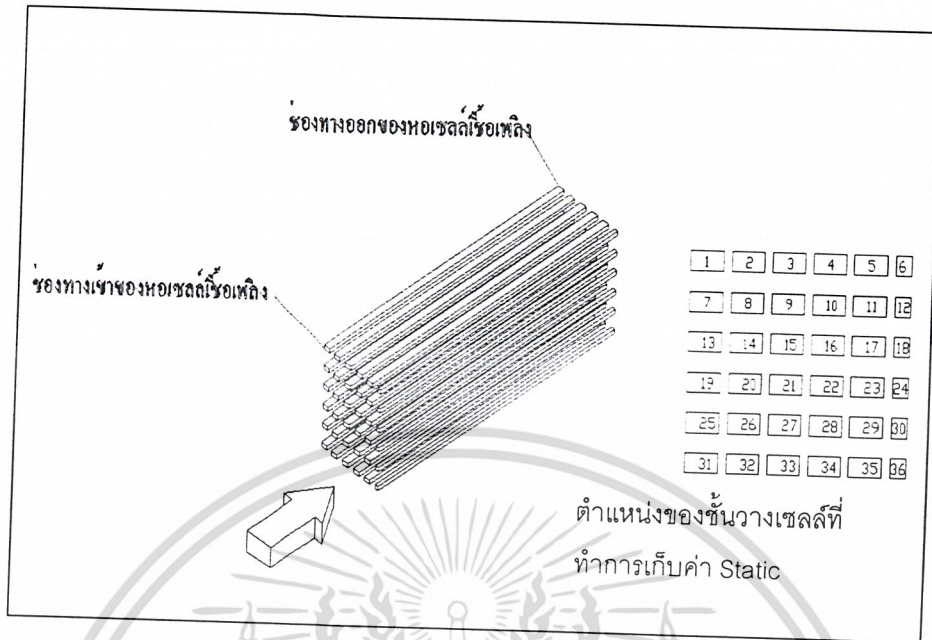
30	56.72	39.65	17.07	52.97	35.91	17.06
31	56.68	39.71	16.97	52.89	35.96	16.93
32	56.7	39.69	17.01	52.91	35.93	16.98
33	56.7	39.69	17.01	52.91	35.93	16.98
34	56.71	39.69	17.02	52.91	35.93	16.98
35	56.71	39.69	17.02	52.91	35.93	16.98
36	56.71	39.68	17.03	52.93	35.95	16.98
max			18.18			17.35
min			16.97			16.93
((max-min)/max)100%			6.66			2.42



รูปที่ 5-69 รูปความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความดันตกคร่อมกับมุมที่เปลี่ยนไปของชุดกระจายการไหลแบบโค้งมน

จากกราฟพบว่าที่มุมต่ำๆจะมีการกระจายตัวของการไหลเข้าชั้นวางเซลล์ที่ไม่ดีนักแต่เมื่อมุมสูงขึ้นจะพบว่ามีการกระจายตัวของการไหลเข้าชั้นวางเซลล์ของหอเซลล์เชื้อเพลิงดี

การเก็บค่าความดัน Static Pressure ของชุดกระจายการไหลแบบทรงเหลี่ยม



รูปที่ 70 รูปของตำแหน่งของชั้นวางเซลล์ที่ทำกรวัด Static Pressure

ตารางการเก็บค่าของความดัน Static Pressure ที่ทางเข้าและทางออกของชั้นวางเซลล์ที่มุมต่างๆของชุดกระจายการไหลแบบทรงเหลี่ยม

number	15 องศา			30 องศา			45 องศา		
	Inlet	Outlet	Pressure Drop	Inlet	Outlet	Pressure Drop	Inlet	Outlet	Pressure Drop
1	18.27	1.43	16.837	60.40	43.54	16.86	51.86	34.99	16.87
2	18.26	1.42	16.84	60.40	43.53	16.87	51.87	34.99	16.88
3	18.29	1.42	16.87	60.36	43.53	16.83	51.82	34.99	16.83
4	18.32	1.42	16.90	60.43	43.53	16.90	51.93	34.99	16.94
5	19.00	1.42	17.58	61.29	43.53	17.76	52.86	34.98	17.88
6	22.37	1.44	20.94	63.52	43.56	19.96	53.73	35.00	18.73
7	18.27	1.43	16.84	60.40	43.54	16.86	51.68	34.99	16.69
8	18.28	1.42	16.86	60.40	43.53	16.87	51.87	34.99	16.88
9	18.26	1.42	16.84	60.38	43.53	16.85	51.85	34.99	16.86
10	18.30	1.42	16.88	60.35	43.53	16.82	51.80	34.99	16.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

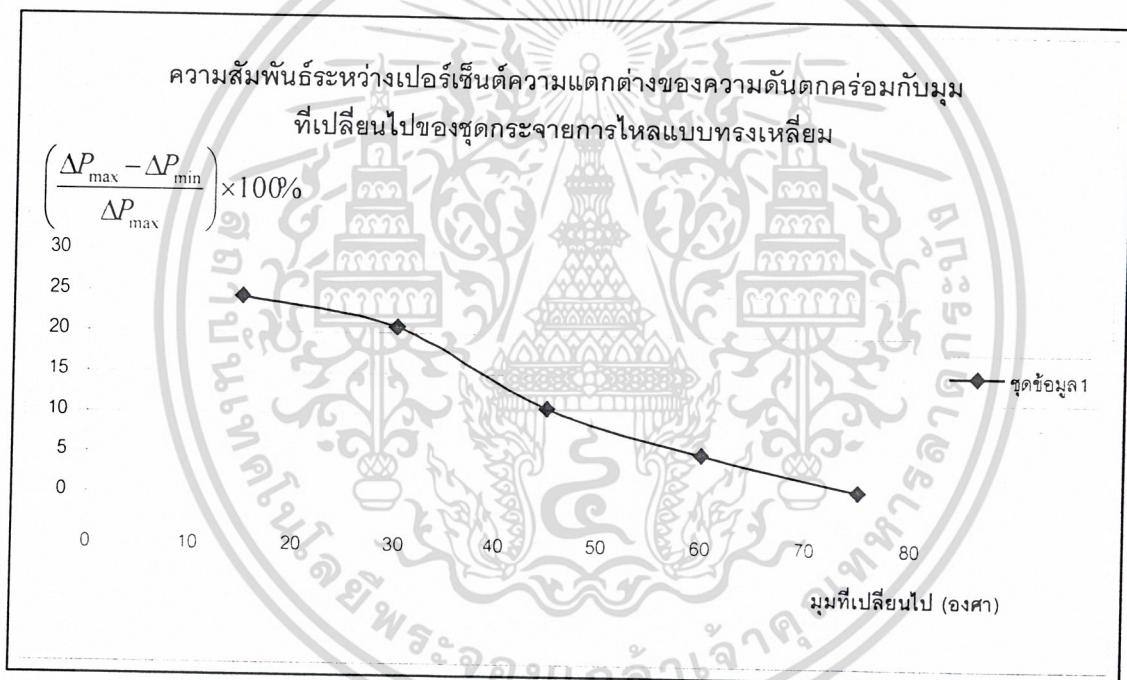
11	18.34	1.42	16.92	60.45	43.53	16.92	51.93	34.98	16.95
12	18.37	1.16	17.21	60.61	43.55	17.06	52.04	35.00	17.04
13	18.27	1.43	16.84	60.40	44.54	15.86	51.86	34.99	16.87
14	18.28	1.42	16.86	60.41	44.54	15.87	51.87	34.99	16.88
15	18.28	1.42	16.86	60.41	44.54	15.87	51.87	34.99	16.88
16	18.29	1.42	16.87	60.41	44.54	15.87	51.87	34.99	16.88
17	18.29	1.42	16.87	60.35	44.54	15.81	51.84	34.98	16.86
18	18.29	1.42	16.87	60.37	43.55	16.82	51.82	35.00	16.82
19	18.27	1.43	16.84	60.40	43.54	16.86	51.86	34.99	16.87
20	18.26	1.42	16.84	60.41	43.53	16.88	51.88	34.99	16.89
21	18.28	1.42	16.86	60.41	43.54	16.87	51.88	34.99	16.89
22	18.28	1.42	16.86	60.41	43.53	16.88	51.88	34.99	16.89
23	18.29	1.42	16.87	60.42	43.53	16.89	51.88	34.98	16.90
24	18.29	1.42	16.87	60.44	43.55	16.89	51.87	35.00	16.87
25	17.27	1.44	15.84	60.40	43.54	16.86	51.86	34.99	16.87
26	18.26	1.42	16.84	60.41	43.53	16.88	51.88	34.99	16.89
27	18.28	1.42	16.86	60.41	43.54	16.87	51.88	34.99	16.89
28	18.28	1.42	16.86	60.41	43.53	16.88	51.88	34.99	16.89
29	18.28	1.42	16.86	60.41	43.53	16.88	51.88	34.98	16.90
30	18.29	1.42	16.87	60.44	43.55	16.89	51.87	35.04	16.83
31	18.22	1.47	16.75	60.35	43.59	16.76	51.82	35.03	16.79
32	18.24	1.46	16.79	60.37	43.57	16.80	51.84	35.03	16.81
33	18.24	1.45	16.79	60.37	43.57	16.80	51.84	35.03	16.81
34	18.24	1.45	16.79	60.37	43.57	16.80	51.84	35.03	16.81
35	18.24	1.45	16.79	60.38	43.57	16.81	51.84	35.03	16.81
36	18.26	1.45	16.81	60.40	43.59	16.81	51.83	35.01	16.82
max			20.94			19.96			18.73
min			15.84			15.81			16.69
((max-min)/max)100%			24.36			20.79			10.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

number	60 องศา			75 องศา		
	Inlet	Outlet	Pressure Drop	Inlet	Outlet	Pressure Drop
1	55.02	38.15	16.87	59.98	43.16	16.82
2	55.02	38.14	16.88	60.11	43.13	16.98
3	55.03	38.14	16.89	60.00	43.13	16.87
4	55.16	38.14	17.02	60.00	43.13	16.87
5	55.87	38.14	17.73	60.00	43.13	16.87
6	55.39	38.13	17.26	60.19	43.32	16.87
7	55.02	38.15	16.87	60.02	43.11	16.91
8	55.03	38.14	16.89	60.03	43.10	16.93
9	55.03	38.14	16.89	60.03	43.13	16.90
10	55.00	38.14	16.86	60.03	43.10	16.93
11	55.15	38.14	17.01	60.04	43.10	16.94
12	55.29	38.13	17.16	60.23	43.29	16.94
13	55.02	38.15	16.87	60.03	43.11	16.92
14	55.03	38.14	16.89	60.03	43.10	16.93
15	55.03	38.14	16.89	60.03	43.10	16.93
16	55.03	38.14	16.89	60.04	43.10	16.94
17	55.02	38.14	16.88	60.04	43.10	16.94
18	55.01	38.12	16.89	60.24	43.29	16.95
19	55.02	38.15	16.87	60.03	43.11	16.92
20	55.03	38.14	16.89	60.04	43.10	16.94
21	55.03	38.14	16.89	60.04	43.10	16.94
22	55.03	38.14	16.89	60.05	43.10	16.95
23	55.02	38.14	16.88	60.04	43.10	16.94
24	55.02	38.12	16.90	60.25	43.29	16.96
25	55.01	38.15	16.86	60.14	43.11	17.03
26	55.02	38.14	16.88	60.05	43.10	16.95
27	55.03	38.14	16.89	60.06	43.10	16.96
28	55.03	38.14	16.89	60.07	43.10	16.97
29	55.03	38.14	16.89	60.05	43.10	16.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

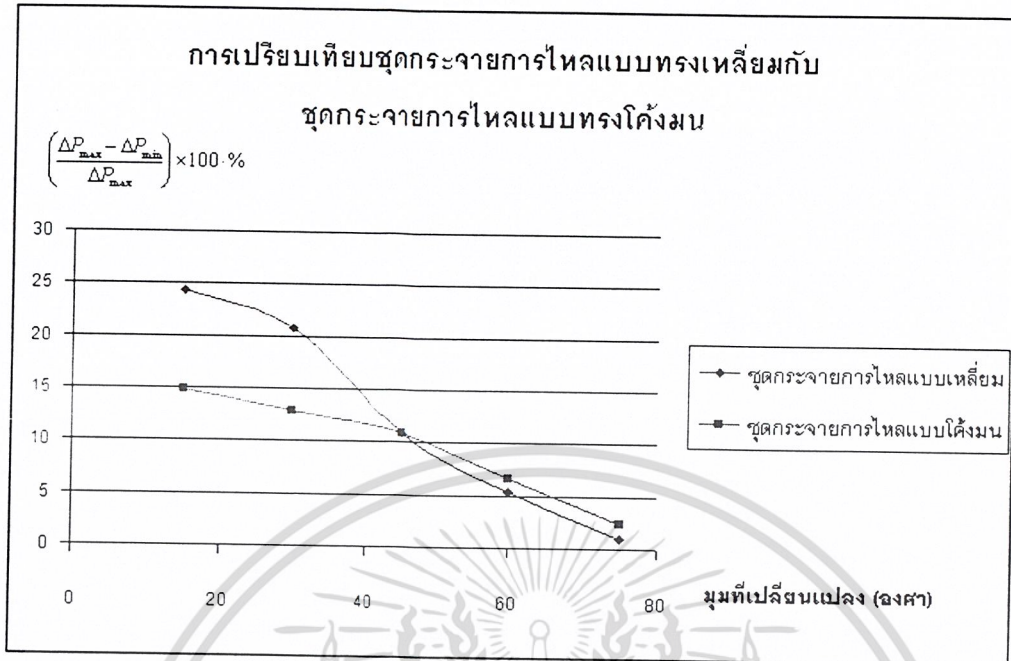
30	55.02	38.13	16.89	60.29	43.29	17.00
31	54.97	38.19	16.78	60.04	43.11	16.93
32	54.99	38.17	16.82	60.06	43.10	16.96
33	54.99	38.17	16.82	60.18	43.10	17.08
34	54.99	38.17	16.82	60.09	43.10	16.99
35	54.99	38.17	16.82	60.12	43.10	17.02
36	54.98	38.16	16.82	60.33	43.29	17.04
max			17.73			17.08
min			16.78			16.82
((max-min)/max)100%			5.36			2.42



รูปที่ 5-71 รูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความดันตกคร่อมกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของชุดกระจายการไหลแบบทรงเหลี่ยม

จากกราฟพบว่าที่มุมต่ำจะมีกระจายตัวของการไหลเข้าชั้นวางเซลล์ที่ไม่ดีนักแต่ที่มุมที่สูงขึ้นจะมีการกระจายตัวการไหลเข้าชั้นวางเซลล์ที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-72 รูปของกราฟเปรียบเทียบผลของความระหว่างเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความดันตกคร่อมกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของชุดกระจายการไหลแบบทรงเหลี่ยมเปรียบเทียบกับแบบของชุดกระจายการไหลแบบทรงโค้งมน

จากกราฟ รูปที่ 5-72 พบว่าจากการศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงมุมของชุดกระจายการไหล โดยการทำ Simulation พบว่าชุดกระจายการไหลทั้งรูปแบบทรงโค้งมนและแบบทรงเหลี่ยม ต่างก็มีการกระจายตัวของการไหลที่ดี ที่มุมของชุดกระจายการไหลที่สูง โดยมุมของชุดกระจายการไหลที่ 45 องศา จะมีการกระจายตัว (Distribution Factor)[15] ของอากาศเท่ากัน (รูป 5-72) พบว่าที่มุมของชุดกระจายการไหลน้อยกว่า 45 องศา รูปทรงแบบโค้งมนจะมีการกระจายตัวของอากาศที่ดีกว่าแบบทรงเหลี่ยม และที่มุมของชุดกระจายการไหลมากกว่า 45 องศา รูปทรงแบบเหลี่ยมจะมีการกระจายตัวของอากาศที่ดีกว่ารูปทรงแบบโค้งมน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผล

6.1.1 สรุปผลการทดลองเปรียบเทียบกับการทำ Simulation

โปรแกรม STAR-CD ยังไม่สามารถแสดงค่าของความดันสถิตได้ตรงกับผลการทดลอง แต่ทั้งนี้โปรแกรม STAR-CD ยังมีประโยชน์ในแง่ของการแสดงทิศทางการไหล โดยจะใช้เป็นเครื่องมือประกอบในการศึกษาการไหลของของไหลในหอเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจะช่วยให้ผู้ศึกษาสามารถจินตนาการการไหลได้ง่ายขึ้น

6.1.2 ผลจากการใช้กระบวนการทาง Finite Volume ด้วยโปรแกรม STAR-CD ช่วยในการทำนายพฤติกรรมการไหลรูปทรงและการไหลที่มุมต่างๆกัน (รูปที่ 5-72)

- 1 ชุดกระจายการไหลทั้งรูปแบบทรงโค้งมนและรูปทรงเหลี่ยมเมื่อมีมุมมากขึ้นจะมีการกระจายตัวของการไหลในชั้นวางเซลล์ที่ดีกว่ามนน้อย
- 2 ชุดกระจายการไหลทั้งรูปแบบทรงโค้งมนและรูปทรงเหลี่ยมจะมีการกระจายตัวของการไหลที่เท่ากันที่มุม 45 องศา
- 3 ที่มุมน้อยกว่า 45 องศา ชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งมนจะมีการกระจายตัวของการไหลที่ดีกว่าชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยม
- 4 ที่มุมมากกว่า 45 องศา ชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงเหลี่ยมจะมีการกระจายตัวของการไหลที่ดีกว่าชุดกระจายการไหลแบบรูปทรงโค้งมน

6.2 ข้อเสนอแนะ

- 1 ควรตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม STAR-CD ด้วยการทำการศึกษาและทดลองซ้ำในรูปแบบอื่น ๆ อีกต่อไป
- 2 ควรพัฒนาชุดทดลองให้มีการวัดความดันสถิตได้ละเอียดหรือแม่นยำมากขึ้น เช่น ใช้เครื่องมือวัดความดันสถิตที่ละเอียดมากขึ้น หรือ ขยายขนาดชุดทดลองให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อความละเอียดในการวัดความดันสถิต เป็นต้น

6.3 งานวิจัยที่ควรทำต่อ

- 1 ศึกษาผลกระทบของช่องทางไหลภายในหอเซลล์เชื้อเพลิง
- 2 จำลองการไหลโดยพิจารณาอุณหภูมิและปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] W. Wattana, **Study of Flow in Cell Stack and External Manifold for Solid Oxide Fuel Cell**, King Mongkut's Institute Of Technology Ladkrabang, Bangkok. 2004.
- [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] Computational Dynamics Ltd. **STAR-CD Version 3.15 Methodology**. 2001.
- [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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [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] Versteeg H.K., Malalasekera W. **An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method**. London : Longman Group Ltd. 1995.
- [27] Computational Dynamics Ltd. **STAR-CD Version 3.15 Methodology**. 2001.
- [28] Larminie J., Dick A. **Fuel Cell systems explained**. Chichester : John Wiley & Sons Ltd. 2000.
- [29] Inropera, Frank P., and David P. Dewitt: **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**, Willey, New York, 1990.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้