

การศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในด้านอิทธิพลรูปร่าง
หน้าตัดการไหลที่มีต่อเพอร์มิเอตพลักซ์ในเมมเบรนไมโครฟิวเตรชัน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2556 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS STUDY OF THE EFFECT OF CROSS-SECTIONAL
CHANNEL SHAPE ON PERMEATE FLUX IN MICROFILTRATION MEMBRANE



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ACADEMIC YEAR 2013 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในด้านอิทธิพลรูปร่างหน้าตัดการไหลที่มีต่อเพอร์มิเอตฟลักซ์ในเมมเบรนไมโครฟิวเตรชั่น

โดย นายธรรมมงคล กาญจนสุต

นายสิทธิพร โหยหวล

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.วลัยรัตน์ จันทระอัมพร

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

วลัยรัตน์ จันทระอัมพร

ประธานกรรมการ

(ดร.วลัยรัตน์ จันทระอัมพร)

Ym

กรรมการ

(ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ)

สันทิ วัฒนานุสรณ์

กรรมการ

(ดร.สันทิ วัฒนานุสรณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในด้านอิทธิพลรูปร่างหน้าตัดการไหลที่มีต่อเพอร์มิเอตฟลักซ์ในเมมเบรนไมโครฟิวเตรชั่น		
จัดทำโดย	นายธรรมมงคล กาญจนสุด	รหัสประจำตัว	53010710
	นายสิทธิพร โหยหวล	รหัสประจำตัว	53011685
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.วลัยรัตน์	จันทรอำพร	
ปริญญาานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี		
	คณะวิศวกรรมศาสตร์		
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		
ปีการศึกษา	2556		

บทคัดย่อ

กระบวนการกรองด้วยเมมเบรนไมโครฟิวเตรชั่น ถูกนำมาประยุกต์อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมรูปทรงของพื้นที่หน้าตัดของการไหลเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการแยก งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของพื้นที่หน้าตัดของไหลที่ส่งผลต่อการไหลภายในช่องเมมเบรนและเพอร์มิเอตฟลักซ์ด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ของไหลที่ศึกษาถูกกำหนดเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้และมีความหนืดคงที่ จำนวนกริดที่เหมาะสมถูกนำไปคำนวณเพอร์มิเอตฟลักซ์และเปรียบเทียบกับกรทดลอง หน้าตัดการไหลที่ศึกษาประกอบไปด้วย ดาวสามแฉก ดาวสี่แฉก ดาวห้าแฉก ดาวหกแฉก ข้าวหลามตัด และสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยผลการจำลองพบว่า พื้นที่หน้าตัดที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อแกนกลางไหล ชั้นขอบเขต และการไหลทุติยภูมิ พบว่าดาวสี่แฉกจะมีประสิทธิภาพการกรองที่สูงที่สุด เนื่องจากชั้นขอบเขตบริเวณพื้นที่มุมกลับมีความบางกว่ารูปอื่น และมีตำแหน่งมุมกลับถึงสี่ตำแหน่ง แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเร็วของการไหลส่งผลให้เพอร์มิเอตฟลักซ์ลดลง เพราะเกิดการขยายตัวของแกนการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Computational Fluid Dynamics Study of The Effect of Cross-sectional Channel Shape on Permeate Flux in Microfiltration Membrane
By	Mr. Thammongkon Kanjansut ID.NO. 53010710 Mr. Sittiporn Hoihuan ID.NO. 53011685
Advisor	Dr. Walairat Chandra-ambhorn
Report for	Bachelor Degree of Chemical Engineering Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	2013

ABSTRACT

Microfiltration membrane is commonly used in various industrials. Shape of cross-sectional area of the channel is an important factor for separation process. In this research, the effects of difference cross section areas on flow pattern in membrane channel and permeate flux were studied by Computational Fluid Dynamic technique. The Fluid was considered to the incompressible fluid with constant viscosity. The extensive grid was adopted to calculate permeate flux. This simulated flux was validated by comparing with the experimental result. Difference of cross-section areas, including 3-point star, 4-point star, 5-point star, 6-point star, diamond and rectangular were studied. The simulated results showed that the difference of cross-section area affected on core flow, boundary layer and secondary flow. The highest separation efficiency was achieved by 4-point star cross-sectional area because of the thin boundary layer and its 4-reflex angles. However, the permeate flux found to decrease with increasing the velocity because of the expansion in core flow region.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.วลัยรัตน์ จันทรัมย์พร ที่คอยช่วยเหลือ แนะนำ และให้แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาและประสบการณ์ต่างๆ แก่ข้าพเจ้าทั้งสองคน คอยชี้แนะและแก้ไข ในการเขียนวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณกรรมการสอบหัวข้องานวิจัย ดร. สันติ วัฒนานุกรณ์ ที่คอยให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ข้อมูลทางพลศาสตร์ของไหล ให้ข้อมูลและความรู้ที่เป็นประโยชน์ ต่อการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ และ ดร. ญาณิพร พัทธวรโชติที่ให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ แนวทางและจุดผิดพลาดในการทำวิจัย เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไข และพัฒนาให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณนายเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่คอยให้คำแนะนำและคำสั่งสอน เกี่ยวกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ช่วยเหลือในกระบวนการจำลองที่สำคัญในงานวิจัยในครั้งนี้ ทั้งในส่วนของการใช้โปรแกรม FLUENT และ GAMBIT

ขอขอบคุณนายกฤษณะ สายหยุด ที่คอยช่วยเหลือทุกอย่างในการวิจัยในครั้ง ช่วยแนะนำการทำงาน และข้อมูลที่มีความสำคัญ แนวทางทุกอย่าง เปรียบเสมือนพี่ที่คอยช่วยเหลือ และเคียงข้างให้งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่คอยช่วยเหลือแนะนำ และให้ความรู้ คำสั่งสอน และความห่วงใยต่อลูกศิษย์ตลอดมา รวมทั้งเพื่อนๆวิศวกรรมเคมีรุ่นที่ 17 ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจที่ดีตลอดมาในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ตลอดจนครุอาจารย์ผู้เป็นที่เคารพรักทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

นายธรรมมงคล กาญจนสุด

นายสิทธิพร โทยหวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กระบวนการไมโครฟิวเตรชั่น.....	3
2.2 ฟาวลิงและโพราไรเซชันของความเข้มข้น.....	4
2.3 เพอร์มิเอตฟลักซ์ (Permeate Flux).....	6
2.4 ค่าฟลักซ์วิกฤต (Critical flux, J_{crit}).....	7
2.5 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	8
2.6 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation).....	10
2.7 สมการโมเมนตัมสำหรับการไหลผ่านตัวกลางที่มีรูพรุน.....	11
2.8 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน.....	13
2.9 แบบจำลองสองสมการ Standard k- ϵ Model และ RNG k- ϵ Model.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10 ความหนาของชั้นขอบเขต.....	21
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 การตั้งค่าแบบจำลอง.....	27
3.1.1 แบบจำลองของการไหลภายในท่อเมมเบรน.....	27
3.1.2 สภาวะขอบเขต.....	28
3.1.3 รูปแบบการจำลอง.....	29
3.1.4 วัสดุในการจำลอง.....	29
3.1.3 สภาวะ Cell-zone.....	29
3.1.4 ระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข.....	31
3.2 การจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี.....	31
3.2 การศึกษาอิทธิพลรูปทรงของท่อเมมเบรน	32
3.2 การศึกษาอิทธิพลความเร็วของของไหล.....	32
บทที่ 4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลอง	
4.1 การหากริดที่เหมาะสม.....	34
4.2 การเปรียบเทียบฟลักซ์ของเพอร์มิเอตของการไหลในเมมเบรนรูปแบบต่างๆ.....	35
4.3 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ใช้ในการกรองกับฟลักซ์ของเพอร์มิเอต.....	40
บทที่ 5 สรุปผลการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข	
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	47
ภาคผนวก ข.....	50
ภาคผนวก ค.....	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 เรขาคณิตของท่อเมมเบรนต่างๆ.....	27
ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	31
ตารางที่ 3.3 การคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์และเปอร์เซ็นต์ความปั่นป่วนจากความเร็วของน้ำ.....	33
ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองกระบวนการของจำนวนกริดต่างๆ.....	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 หลักการของเทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน.....	3
รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดฟาวลิง.....	4
รูปที่ 2.3 ผลของฟลักซ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน.....	7
รูปที่ 2.4 ความเร็วการไหลแบบปั่นป่วน.....	14
รูปที่ 2.5 ชั้นขอบเขตของการไหลผ่านแผ่นราบ.....	21
รูปที่ 2.6 รูปแบบการทดลองและโครงสร้างเมมเบรนของ T.Y. Chiu.....	22
รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงชั้นขอบเขตของแผ่นราบทำมุม.....	23
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแผ่นราบกับปัจจัยการרבกวน.....	25
รูปที่ 3.1 การกำหนดสภาวะขอบเขตของแบบจำลองท่อเมมเบรนรูปทรงดาวสี่แฉก.....	28
รูปที่ 3.2 กริดของแบบจำลองที่สร้างด้วยโปรแกรม GAMBIT.....	30
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี.....	32
รูปที่ 4.1 ผลของจำนวนกริดต่อฟลักซ์เชิงปริมาตรในการจำลองกระบวนการ.....	35
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์เชิงปริมาตรของเพอร์มิเอตต่อพื้นที่สัมผัสของเหลว กับความดันแตกต่างผ่านเมมเบรนที่ความเร็ว 2 m/s.....	36
รูปที่ 4.3 มุมของรูปทรงเรขาคณิตของแฉกดาว และ รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	37
รูปที่ 4.4 คอนทัวร์ความเร็วของการไหลภายในท่อเมมเบรนที่ความดันแตกต่างผ่าน เมมเบรน 3 bar.....	39
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์เชิงปริมาตรของเพอร์มิเอตกับความเร็วของ ท่อเมมเบรนรูปดาวสี่แฉกที่ความดันแตกต่างผ่านเมมเบรน 3 bar.....	40
รูปที่ 4.6 คอนทัวร์ความเร็วของการไหลภายในท่อเมมเบรนรูปดาวสี่แฉก.....	42
รูปที่ ข.1 การสร้าง vertex.....	50
รูปที่ ข.2 การสร้างวงกลม.....	50
รูปที่ ข.3 การ project จุดบนเส้น.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวน ใ้สำหรับกร ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุยให้ไปใช้บ้ระจรงหน้ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งถึน อึกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ข.4 การตัดลอกจุดเพื่อสร้างແຂດดาว.....	51
รูปที่ ข.5 การสร้างเส้นແຂດดาว	52
รูปที่ ข.6 การลบเส้นวงกลม.....	52
รูปที่ ข.7 รูปท่อดาวสี่ແຂດ.....	53
รูปที่ ข.8 การตัดลอกโดยการเคลื่อนย้ายเส้น.....	53
รูปที่ ข.9 การ sweep เส้น	54
รูปที่ ข.10 การ spilt เส้น	54
รูปที่ ข.11 การตัดลอกเส้นโดยการหมุน.....	55
รูปที่ ข.12 รูปท่อดาวสี่ແຂດที่ทำการแบ่งขอบเขต.....	55
รูปที่ ข.13 การตัดลอกจุดทำมุม 90°	56
รูปที่ ข.14 การสร้างเส้นเพื่อแบ่งพื้นผิว.....	56
รูปที่ ข.15 การสร้างพื้นผิวแบบ wireframe.....	57
รูปที่ ข.16 การสร้าง mesh edge แบบ interval.....	57
รูปที่ ข.17 การสร้าง mesh face แบบ map	58
รูปที่ ข.18 การสร้างเส้นเพื่อใช้สำหรับการ sweep เพื่อสร้าง volume	58
รูปที่ ข.19 การสร้าง volume เมมเบรน.....	59
รูปที่ ข.20 การตั้ง boundary condition	59
รูปที่ ข.21 การตั้ง cell zone.....	60
รูปที่ ค.1 การเปิดโปรแกรม FLUENT.....	61
รูปที่ ค.2 การเปิดแฟ้มงานในโปรแกรม FLUENT.....	61
รูปที่ ค.3 การตั้งค่า General.....	62
รูปที่ ค.4 การตั้งค่า Model.....	62
รูปที่ ค.5 การตั้งค่า Materials และขั้นตอนการเพิ่ม Materials.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ค.6 การตั้งค่า Cell zone condition ของ fluid.....	63
รูปที่ ค.7 การตั้งค่า Cell Zone Condition ของ membrane.....	64
รูปที่ ค.8 การตั้งค่า Boundary Condition ของด้าน inlet.....	64
รูปที่ ค.9 การตั้งค่า Boundary Condition ของด้าน out_membrane.....	65
รูปที่ ค.10 การตั้งค่า Solution Control.....	65
รูปที่ ค.11 การตั้งค่า Monitor.....	66
รูปที่ ค.12 การตั้งค่า Solution Initialization.....	66
รูปที่ ค.13 การตั้งค่า Run Calculation.....	67
รูปที่ ค.14 การตั้งค่า Contours และการแสดงผล Contours.....	67
รูปที่ ค.15 การตั้งค่า Iso-Surface.....	68
รูปที่ ค.16 การตั้งค่า และการแสดงผลความดัน.....	68
รูปที่ ค.17 การบันทึกงาน.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์

A_η, A_ξ	แอมพลิจูดของการสั่น (Amplitude of oscillation) ในแนวแกน η, ξ
C, D	เมตริกซ์เส้นทแยงมุมที่มี $1/\alpha$ และ C_2 อยู่ในแนวเส้นทแยงมุม
C_2	ค่าความต้านทานเริ่มต้น
f_x, f_y, f_z	แรงที่กระทำต่อปริมาตรในทิศทาง x, y, z
G_k	พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนท์ความเร็วเฉลี่ย
G_b	พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว
J	เพอร์มิเอตฟลักซ์
K_m	ค่าความสามารถในการซึมผ่าน
k	พลังงานจลน์ปั่นป่วน
$\Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z$	ความหนาของตัวกลางในทิศทาง x, y, z
P	ความดัน
\bar{P}	ความดันเฉลี่ย
P'	ความดันเนื่องจากการเกิดความเร็วแกว่ง
\bar{P}'	ความดันเฉลี่ยเนื่องจากการเกิดความเร็วแกว่ง
R_t	ความต้านทานรวม
R_m	ความต้านทานของเมมเบรน
R_f	ความต้านทานของการเกิดฟาวลิง

R_f เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ความต้านทานฟาวลิงแบบผันกลับได้ (Reversible fouling) ครอบคลุมการกีดขวางที่เกิดจากอนุภาคที่ติดอยู่บนพื้นผิวของเมมเบรน ซึ่งสามารถล้างออกได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนเมมเบรน อย่างไรก็ตาม การกีดขวางที่เกิดจากอนุภาคที่ติดอยู่บนพื้นผิวของเมมเบรนอาจไม่สามารถล้างออกได้ และจำเป็นต้องเปลี่ยนเมมเบรน

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

R_{irf}	ความต้านทานฟาวลิงแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible fouling)
R_g	ผลของการหมุนวน
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)
S_k, S_ε	Source Terms
S_i	แหล่งของโมเมนตัมในทิศทาง i
S_{Mx}, S_{My}, S_{Mz}	แหล่งของโมเมนตัมในทิศทาง x, y, z
T	อุณหภูมิ
TMP	ความดันแตกต่างผ่านเมมเบรน
t	เวลา
$\bar{t}^{(i)}$	ความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stresses)
U	ขนาดของเวกเตอร์ความเร็ว
\bar{U}	เวกเตอร์ความเฉลี่ย
u, v, w	ความเร็วในทิศทาง x, y, z
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน x, y, z
$\bar{u}', \bar{v}', \bar{w}'$	ความเร็วเฉลี่ยเนื่องจากการเกิดความเร็วแกว่ง
u', v', w'	ความเร็วเนื่องจากการเกิดความเร็วแกว่ง
V	ความเร็วของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

Y_m	ผลของการก่อดัดเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน
α	ความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability)
$\sigma_\varepsilon, \sigma_k$	ตัวเลขแปรผันเทิลแบบปั่นป่วนสำหรับ ε, k
β	สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน
δ	ความหนาของชั้นขอบเขต
ε	อัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน
μ	สัมประสิทธิ์พลศาสตร์ความหนืด
ρ	ความหนาแน่นของของไหล
τ	เทนเซอร์ของความเค้น
λ	มีค่าเป็น $-2/3$ ของความหนืด
μ_t	สัมประสิทธิ์ความหนืดปั่นป่วน (Turbulent viscosity coefficient)
μ_{eff}	สัมประสิทธิ์ความหนืดประสิทธิผล (Effective viscosity coefficient)
Ω	แฟคเตอร์อุปสรรค (Interference factor)
ω	ความถี่เชิงมุม
ψ	ฟังก์ชันคลื่น
ψ^*	คอนจูเกตของฟังก์ชันคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบัน กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนถือว่าเป็นกระบวนการที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างมาก ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเมมเบรนชนิดไมโครฟิวเตรชั่นเป็นกระบวนการแยกสารด้วยเมมเบรนเพื่อทำให้สารมีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น เช่น การบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรม การเพิ่มความเข้มข้นของสาร เป็นต้น โดยในปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะรูพรongของท่อเมมเบรนเป็นรูปแบบดาวหกแฉก ส่งผลทำให้เพอร์มิเอตฟลักซ์ (Permeate flux) เพิ่มสูงขึ้นกว่าท่อเมมเบรนรูพรongกระบอกทั่วไป อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลภายในท่อ รวมไปถึงชั้นขอบเขตที่บริเวณใกล้เคียงกับพื้นผิวเมมเบรน โดยที่บริเวณแฉกของดาวที่เป็นมุมแหลม รวมไปถึงความยาวแฉกของรูปดาว ก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อเพอร์มิเอตฟลักซ์เช่นกันเพราะฉะนั้นรูพรongของท่อเมมเบรน จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกรองนั้นมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น

ในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปจำนวนมากที่ช่วยจำลองพลศาสตร์ของของไหล โดยเรียกเทคนิคการจำลองพลศาสตร์ของของไหลนี้ว่าเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic: CFD) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้การคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical method) และขั้นตอนวิธี (Algorithm) ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของของไหล ซึ่งเป็นอีกหนึ่งเครื่องมือที่เหมาะสมในการนำมาวิเคราะห์รูปแบบการไหลภายในเมมเบรนที่มีหน้าตัดทางเข้าที่รูปร่างแตกต่างกัน เนื่องจากการวิเคราะห์กระบวนการโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยแก้ไขกระบวนการที่ซับซ้อนให้มากยิ่งขึ้น และสามารถผลิตข้อมูลจำนวนมากเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์รูปแบบการไหลและยังสามารถทำนายเพอร์มิเอตฟลักซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยฟลักซ์ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองและนอกจากนี้ยังช่วยลดต้นทุนที่เกิดจากการทดลองได้ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลในเมมเบรนที่มีหน้าตัดทางเข้าที่แตกต่างกันและใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพการกรองของเมมเบรนที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เปรียบเทียบการทำนายเพอร์มิเอตฟลักซ์ให้สอดคล้องกับการทดลอง [1] โดยใช้โปรแกรม FLUENT
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพลักษณะรูปร่างของท่อเมมเบรน ในการกรองโดยใช้เมมเบรนแบบ ไมโครฟิวเตรชั่น
3. เพื่อศึกษาผลของความเร็วของของไหลที่ผ่านท่อเมมเบรน ที่มีผลต่อเพอร์มิเอตฟลักซ์
4. เพื่อศึกษาถึงรูปแบบการไหลภายในท่อเมมเบรน รวมไปถึงพิจารณาแกนการไหล (Core flow) ชั้นขอบเขต (Boundary layer) รวมไปถึง การไหลทุติยภูมิ (Secondary flow) ของของไหลเมื่อไหลผ่านท่อรูปร่างต่างๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ศึกษาโปรแกรม GAMBIT สำหรับสร้างแบบจำลองและศึกษาโปรแกรม FLUENT สำหรับการคำนวณและวิเคราะห์ผล
3. สร้างแบบจำลองเมมเบรนไมโครฟิวเตรชั่นและคำนวณผล
4. ทำการเปรียบเทียบเพอร์มิเอตฟลักซ์ที่ไหลผ่านเมมเบรนไมโครฟิวเตรชั่นที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับผลการทดลอง [1] ให้มีความสอดคล้องกัน
5. พิจารณารูปร่างของท่อเมมเบรนที่สามารถปรับปรุงฟลักซ์ที่ไหลผ่านเมมเบรนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยพิจารณาจากการเกิดชั้นขอบเขต รวมไปถึงแกนการไหล และการไหลทุติยภูมิที่เกิดขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. เข้าใจถึงเทคนิคทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ กระบวนการทำงานของโปรแกรม GAMBIT และ FLUENT
2. สามารถนำรูปร่างของท่อเมมเบรนที่ได้จากการจำลองกระบวนการ นำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการกรองเมมเบรนแบบไมโครฟิวเตรชั่นได้

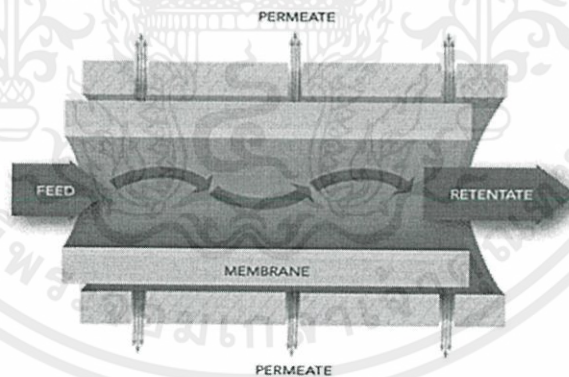
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการไมโครฟิวเตรชัน [2, 3]

กระบวนการไมโครฟิวเตรชัน เป็นกระบวนการกรองโดยใช้เมมเบรน มีแรงขับ (Driving force) เป็นความดันของของเหลว โดยที่มีขนาดรูพรุนของเมมเบรน (Pore size) อยู่ระหว่าง 0.05 นาโนเมตร ถึง 20 นาโนเมตร และมีความดันที่สามารถทำงานอยู่ในช่วง 1-5 บาร์ ใช้สำหรับการแยกสารละลายที่มีตัวถูกละลายเป็นอนุภาคขนาดเล็ก คอลลอยด์ อิมัลชัน หรือสารแขวนลอย โดยกระบวนการไมโครฟิวเตรชันจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย อาทิเช่น การบำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรมอาหาร หรือ อุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพ เป็นต้น

ในกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนมีหลักการทำงานที่แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยมีสารป้อน (Feed) เข้าทางด้านหนึ่งของเมมเบรน ซึ่งจะมีส่วนที่ผ่านเมมเบรนได้เรียกว่าเพอร์มิเอต (Permeate) และส่วนของสารป้อนที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้เรียกว่า รีเทนเตต (Retentate) แรงขับที่ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวล คือ ความดัน ความเข้มข้น และแรงเคลื่อนไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 หลักการของเทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ฟาวลิงและโพราไรเซชันของความเข้มข้น [2, 3]

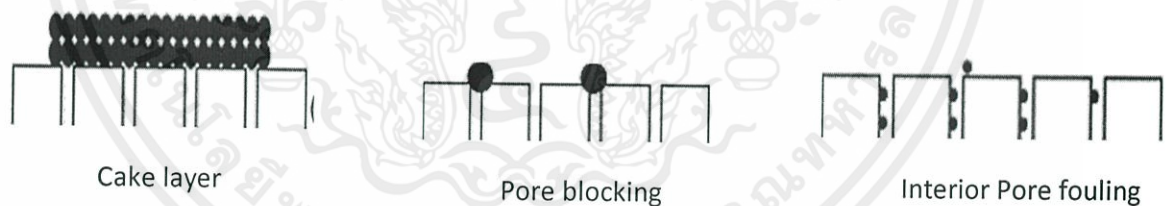
โพราไรเซชันของความเข้มข้น เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายใต้แรงดัน เมื่อตัวละลายเกิดการสะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน จะทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายที่ไม่ผ่านเมมเบรนนั้นสูงกว่าความเข้มข้นของสารละลายในสารป้อน ทำให้เกิดขึ้นขอบที่บริเวณชั้นผิวของเบมเบรน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ฟาวลิง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการลดลงของสารที่ไหลผ่านเมมเบรน คือ เพอร์มิเอตฟลักซ์ และสมรรถนะการเลือกผ่านลดลง

การเกิดฟาวลิง จะแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ

1. เกิดบนผิวด้านนอกของเมมเบรนเป็นชั้นเค้ก (Cake layer)
2. เกิดที่ช่องเปิดของรูเมมเบรน (Pore blocking)
3. เกิดภายในรูของเมมเบรน (Interior pore fouling) ทำให้ขนาดของรูเล็กลง และทำความสะอาดเมมเบรนได้ยาก

การเกิดฟาวลิงทั้ง 3 ลักษณะแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

ถ้าชั้นของอนุภาคที่เกาะอยู่ด้านบนของเมมเบรนมีปริมาณมากจนเกิดเป็นโครงข่ายสามมิติฟองตัวจะส่งผลให้เกิดเป็นชั้นเค้ก (Cake layer) ขึ้น



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดฟาวลิง [2]

การควบคุมการเกิดฟาวลิงและโพราไรเซชันของความเข้มข้น

1. การบำบัดเบื้องต้นแก่สายป้อน ก่อนเข้ากระบวนการกรองโดยใช้เมมเบรน เช่น การเติมสารตกตะกอน (Coagulant) การกรองเบื้องต้น การปรับพีเอชของสารละลายให้มีความเหมาะสม การเติมคลอรีนหรือการดูดซับโดยใช้คาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การดัดแปลงผิวหน้าของเมมเบรน โดยการเติมหมู่ขบน้ำหรือหมู่ที่มีประจุที่ผิวหน้าของเมมเบรน
3. การออกแบบทางพลศาสตร์ของไหลของสารละลายที่ไหลผ่านเมมเบรนให้มีความเหมาะสม โดยออกแบบให้เกิดแรงเฉือนจากการไหลที่ผิวหน้าของเมมเบรนให้สูงมากพอ
4. การล้างเมมเบรน ด้วยสารเคมี เมื่อฟลักซ์ลดลงจนถึงระดับหนึ่ง จะใช้สารเคมีเพื่อทำความสะอาด กำจัดแค้กที่บริเวณพื้นผิว เช่น กรดไนตริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ สารซักฟอก สารฆ่าเชื้อ เป็นต้น

ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเมมเบรนไมโครฟิวเตรชั่น

1. ความเร็วของสารป้อน

เมื่อความเร็วของสารป้อนเพิ่มขึ้น แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของเมมเบรนจะเพิ่มขึ้น ทำให้การเกิดฟาวลิงที่ผิวหน้าของเมมเบรนลดลง ส่งผลให้เพอร์มิเอตฟลักซ์เพิ่มขึ้น แต่มีข้อเสียคือต้องมีการสูญเสียพลังงานในการเพิ่มความเร็วของสารละลาย จึงต้องหาจุดที่เหมาะสมในการกำหนดความเร็วของสายป้อนและเพอร์มิเอตฟลักซ์ให้มีความคุ้มค่ามากที่สุด
2. ความดัน

ความดันที่ให้แก่ระบบจะแปรผันตรงกับเพอร์มิเอตฟลักซ์ที่ไหลผ่านเมมเบรน แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความดันของระบบจะส่งผลต่อการอุดตันของฟาวลิงที่ผิวหน้าของเมมเบรนเช่นกัน
3. อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้เพอร์มิเอตฟลักซ์เพิ่มมากขึ้น แต่ในเมมเบรนแบบไมโครฟิวเตรชั่น ตัวถูกละลายส่วนมาก อาทิเช่น โปรตีนหรือสารอินทรีย์จะไม่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงมาก ดังนั้น อุณหภูมิจึงไม่ใช่ปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดการเพิ่มขึ้นของเพอร์มิเอตฟลักซ์
4. ความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น จะส่งผลต่อการเกิดโพราไรเซชันของความเข้มข้นและฟาวลิงได้มากขึ้นตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เพอร์มิเอตฟลักซ์ (Permeate Flux) [2]

ค่าที่แสดงสมรรถนะในกระบวนการของเมมเบรนคือค่าฟลักซ์ โดยที่ค่าฟลักซ์จะแสดงถึง ปริมาตรของเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรนต่อหน่วยพื้นที่ และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแรงขับเคลื่อน และความต้านทานการไหล ดังสมการที่ 2.1

$$J = \frac{\text{TMP}}{\mu \cdot R_t} \quad (2.1)$$

โดย J คือ เพอร์มิเอตฟลักซ์ ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ หรือ $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

TMP คือ ความดันแตกต่างผ่านเมมเบรน (Pa) คำนวณได้จากสมการ

$$\text{TMP} = \frac{P_{\text{in}} + P_{\text{out}}}{2} - P_p \quad (2.2)$$

เมื่อ P_{in} คือ ความดันขาเข้า หรือความดันของสารป้อน (Pa)

P_{out} คือ ความดันขาออก หรือความดันของรีเทนเนต (Pa)

P_p คือ ความดันด้านเพอร์มิเอต (Pa)

μ คือ ความหนืดของเพอร์มิเอต ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)

R_t คือ ความต้านทานรวม ($1/\text{m}$)

โดย

$$R_t = R_m + R_f \quad (2.3)$$

$$R_f = R_{\text{rf}} + R_{\text{irf}} \quad (2.4)$$

เมื่อ R_m คือ ความต้านทานของเมมเบรน ($1/\text{m}$)

R_f คือ ความต้านทานของการเกิดฟาวลิง ($1/\text{m}$)

R_{rf} คือ ความต้านทานฟาวลิงแบบผันกลับได้ (Reversible fouling) ($1/\text{m}$)

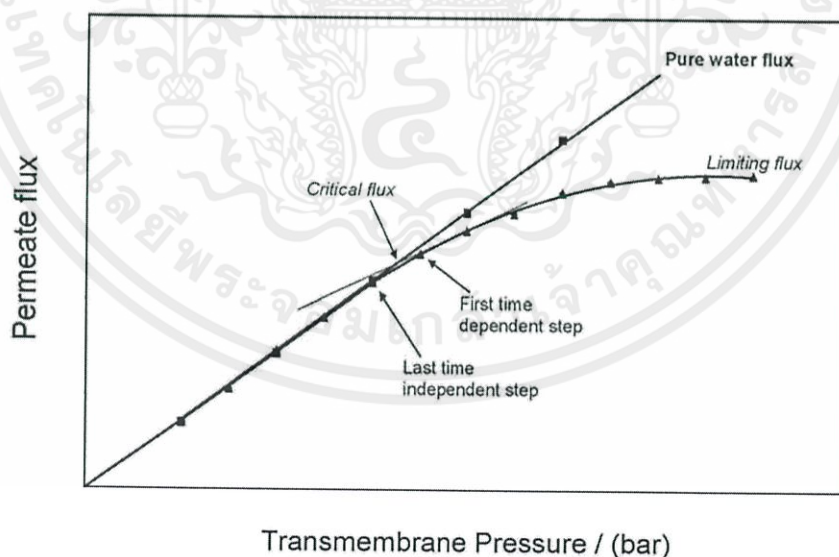
R_{irf} คือ ความต้านทานฟาวลิงแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible fouling) ($1/\text{m}$)

ความต้านทานที่เกิดขึ้นมีผลต่อเพอร์มิเอตฟลักซ์ของกระบวนการเมมเบรนในสภาวะปกติ ความต้านทาน R_m คำนวณโดยตรงจากฟลักซ์น้ำก่อนใช้งาน ค่า R_f หาได้จากฟลักซ์น้ำของเมมเบรนหลังใช้งาน และ R_t คือความต้านทานรวม จากการศึกษาพบว่า R_m มีค่าคงที่ โดยทั่วไป R_{irf} มีค่าขึ้นกับสมบัติของสารป้อน สภาวะการดำเนินการ และการทำความสะอาดเมมเบรนส่วน R_{rf} ขึ้นกับความเร็วมวลของสารป้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดัน และฟลักซ์ และจะมีการแปรผกผันกับอัตราการไหลผ่านเมมเบรน เนื่องจากอัตราการไหลมีผลต่อชั้นเค้ก คืออัตราการไหลสูงจะทำให้การเกาะติดของอนุภาคที่สะสมเป็นชั้นเค้กหลุดออกและมีความหนาลดลง ค่าความต้านทาน R_{tf} มีค่าสูงกว่าค่า R_m และ R_{if} มาก จึงเป็นความต้านทานที่มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์

2.4 ค่าฟลักซ์วิกฤต (Critical flux, J_{crit}) [1, 2]

ค่าฟลักซ์วิกฤตเป็นจุดที่เพอร์มิเอตฟลักซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเกิดชั้นเค้ก ซึ่งเป็นฟาวลิ่งที่อัตราการไหลมีผลต่อการเกิดฟาวลิ่ง โดยแปรผกผันกับอัตราการไหล ถ้าอัตราการไหลมากจะเกิดฟาวลิ่งได้น้อย เรียกฟาวลิ่งลักษณะนี้ว่า ฟาวลิ่งรูปแบบผันกลับได้ ฟาวลิ่งที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของเพอร์มิเอตฟลักซ์เมื่อความดันแตกต่างผ่านเมมเบรนเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.3 เมื่อเพอร์มิเอตฟลักซ์เริ่มมีค่าน้อยกว่าฟลักซ์วิกฤตเพอร์มิเอตฟลักซ์ที่ได้จะถูกจำกัด เรียกว่า ฟลักซ์จำกัด (Limiting flux) โดยในการกรองจะนำหลักการของค่าฟลักซ์จำกัด เข้ามาควบคุมการเกิดโพลารไรเซชันของความเข้มข้น และลดการเกิดฟาวลิ่งในกระบวนการได้ ค่าฟลักซ์จำกัดนี้มีความใกล้เคียงกับค่าฟลักซ์วิกฤต แต่ค่าฟลักซ์จำกัดจะเป็นช่วงที่เกิดเป็นชั้นเค้กและฟลักซ์ของเพอร์มิเอตค่อนข้างคงที่ การลดและควบคุมปรากฏการณ์การเกิดการสะสมของฟาวลิ่งดังกล่าวสามารถกระทำโดยดำเนินระบบการกรองให้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอตให้มีค่าต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต



รูปที่ 2.3 ผลของฟลักซ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [4, 5]

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เป็นเทคนิคการคำนวณการไหลของของไหลที่ใช้วิธีเชิงตัวเลขและระเบียบวิธี มาวิเคราะห์และแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของของไหล ซึ่งเทคนิคนี้สามารถหาคำตอบของสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations) ที่มีความยุ่งยากในการหาคำตอบได้ ความยุ่งยากนี้เป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity) โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขเปลี่ยนสมการอนุพันธ์ย่อยให้เป็นสมการเชิงเส้น (Linear equation) แล้วจึงหาคำตอบของสมการ

หลักการทำงานของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการหลัก

1. กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processor)
2. กระบวนการคำนวณ (Solver)
3. กระบวนการหลังการคำนวณ (Post-processor)

กระบวนการก่อนการคำนวณ เป็นกระบวนการเตรียมความพร้อมก่อนการคำนวณ ประกอบด้วยส่วนที่ป้อนข้อมูลของการไหลที่ง่ายต่อการคำนวณและเปลี่ยนข้อมูลให้เหมาะสมต่อการคำนวณของโปรแกรม ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- กำหนดโดเมนการคำนวณ (Computational domain) เพื่อกำหนดขอบเขตและรูปร่างที่สนใจศึกษา
- สร้างกริด (Grid) หรือเมช (Mesh) แบ่งโดเมนการคำนวณให้มีขนาดเล็กมากๆ และมีความเหมาะสมกับรูปร่างที่สนใจศึกษา เพื่อให้การคำนวณมีความละเอียด และได้ผลการคำนวณที่คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด
- เลือกสมการหรือแบบจำลองที่จำเป็นต่อปรากฏการณ์ที่ศึกษา
- กำหนดคุณสมบัติของของไหล (Fluid properties)
- กำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary conditions)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการคำนวณ เป็นกระบวนการคำนวณซึ่งใช้วิธีเชิงตัวเลข แบ่งออกเป็น 3 วิธีที่สำคัญ คือ วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method: FDM) วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) และวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method: FVM) โดยทั่วไปแล้วขั้นตอนของกระบวนการคำนวณประกอบไปด้วย

- การประมาณค่าตัวแปรการไหลที่ไม่ทราบค่าด้วยการเฉลี่ยของฟังก์ชันอย่างง่าย
- การแยก (Discretisation) คือ การแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิต (Algebraic equations)
- การหาคำตอบของสมการพีชคณิต

กระบวนการหลังการคำนวณ เป็นส่วนที่ใช้แสดงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ปัจจุบันโปรแกรมเชิงพาณิชย์ การคำนวณพลศาสตร์ของไหลได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจากความสามารถในการทำกราฟฟิกที่ดึงดูดสายตาต่อการใช้งาน นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถแสดงผลจากการคำนวณในรูปแบบต่างๆ เช่น

- รูปร่างของขอบเขตของปัญหาและแสดงกริด
- เวกเตอร์
- คอนทัวร์และเส้น
- พล็อตพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ
- เส้นการวิ่งของอนุภาค (Particle Tracking)
- จัดภาพการมองให้เหมาะสม (ในการหมุน การเคลื่อนที่ การย่อ-ขยาย เป็นต้น)
- การสร้างไฟล์ Postscript เป็นสี

ในปัจจุบันได้มีการทำภาพเคลื่อนไหวเสมือนจริง (Animation) สำหรับการแสดงผลเชิงพลศาสตร์ และนอกจากนี้ยังแสดงผลลัพธ์ที่แสดงอักษร รวมทั้งการทำข้อมูลส่งออก (Export) ไปยังโปรแกรมอื่นๆ

วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method)

วิธีปริมาตรสืบเนื่องถูกพัฒนาเริ่มมาจากวิธีของผลต่างสืบเนื่องแบบสเปกตรัล กล่าวคือมีการตัดพจน์อันดับสูงออก ในที่นี้จะสนใจเพียงสูตรและวิธีที่ถูกสร้างขึ้นจนเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ซึ่งเป็นวิธีการที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ในโปรแกรมเชิงพาณิชย์หลายตัว เช่น FLUENT และ STAR-CD เป็นต้น ลำดับขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขของวิธีการนี้ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- การอินทิเกรตสมการควบคุมของของไหลทั้งปริมาตรควบคุมเล็กๆ ทุกปริมาตรภายใต้ขอบเขตของปัญหา
- การแปลงรูปสมการ ซึ่งประกอบด้วย การแทนค่าเทอมต่างๆ (การพา การแพร่ การก่อดำ หรือ การสูญเสีย) ของสมการควบคุมที่อินทิเกรตแล้วนั้น ด้วยการประมาณค่าที่อยู่ในรูปแบบที่เหมือนกับผลต่างสี่เหลี่ยม คือ เทอมที่อยู่ในรูปแบบของค่าผลเฉลยที่โหนด การประมาณค่าดังกล่าวมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ทั้งนี้การแปลงรูปสมการนี้ทำให้เกิดระบบสมการพีชคณิตขึ้น
- การหาคำตอบของสมการพีชคณิตโดยวิธีการกระทำซ้ำ (Iterative processes)

2.6 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) [5, 6]

สมการนาเวียร์-สโตกส์ เป็นสมการที่ใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งถูกสร้างขึ้น โดยการประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันบนของไหล โดยมีสมมติฐานว่าความเค้นบนของไหลคือ ผลรวมของเทอมของความหนืดของการกระจายตัวและเทอมของความดัน ชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ ที่ไม่มีการระบุความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่แน่นอน แต่จะระบุเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงแทน ชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์ไม่สามารถใช้ระบุตำแหน่งได้ แต่สามารถบอกความเร็วได้ ทำให้คำตอบของชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์ ถูกเรียกว่าสนามความเร็วหรือสนามการไหล ซึ่งเป็นตัวอธิบายถึงความเร็วของของไหล ณ ตำแหน่ง และเวลาที่กำหนด โดยทั่วไปสมการนาเวียร์-สโตกส์ จะประกอบด้วยชุดสมการที่เกี่ยวข้อง 3 ชุดสมการด้วยกันคือ สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัมและสมการพลังงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีชุดสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2.5)$$

โดยที่

$$U = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการโมเมนตัม

x component:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2.7)$$

y component:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2.8)$$

z component:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2.9)$$

โดยที่ V คือ ความเร็วของของไหล S_{Mx}, S_{My}, S_{Mz} คือ แหล่งของโมเมนตัมในทิศทาง x, y, z
 ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล u, v, w คือ ความเร็วในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ
 P คือ ความดัน τ คือ เทนเซอร์ของความเค้น

2.7 สมการโมเมนตัมสำหรับการไหลผ่านตัวกลางที่มีรูพรุน [7]

ตัวกลางที่เป็นรูพรุนสามารถจำลองโดยการเพิ่มเทอมของโมเมนตัมไปในสมการโมเมนตัม โดยสมการที่เพิ่มเข้าไปประกอบไปด้วยสองส่วนคือ เทอมของความหนืดสูญเสีย (เทอมแรกทางขวาของสมการ 2.10) และเทอมของความเฉื่อยสูญเสีย (เทอมที่สองทางขวาของสมการ 2.10)

$$S_i = -(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_j) \quad (2.10)$$

โดยที่ S_i คือ เทอมของสมการโมเมนตัมในทิศ i (x, y หรือ z), $|v|$ คือ ขนาดของความเร็ว และ D กับ C คือเมตริกซ์ แหล่งของโมเมนตัมนี้จะส่งผลต่อเกรเดียนต์ของความดัน ทำให้เกิดความดันลดที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วของของไหลในแต่ละเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีของตัวกลางที่เป็นรูพรุนแบบสม่ำเสมอ (Simple homogeneous porous media)

$$\begin{aligned} S_i &= -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_j + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_j\right) \\ S_i &= -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_j + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_j\right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

โดยที่ α คือ ค่าของความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability) และ C_2 คือค่าความต้านทานเริ่มต้น นิยาม D และ C เป็นเมตริกซ์เส้นทแยงมุมที่มี $1/\alpha$ และ C_2 อยู่ในแนวเส้นทแยงมุม โดยค่าอื่นๆในเมตริกซ์เป็นศูนย์

โดยในการจำลองเทอมของโมเมนตัมนี้ในรูปยกกำลังของความเร็ว เขียนได้ดังสมการ (2.12)

$$S_i = -C_0 |v|^{C_1} = -C_0 |v|^{(C_1-1)v} \quad (2.12)$$

โดยที่ C_0 และ C_1 คือ ค่าคงที่ที่ผู้ใช้งานจะป้อนให้กับโปรแกรม โดยการจำลองเทอมโมเมนตัมในรูปยกกำลังนี้ ความดันลดที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับทิศทางและค่า C_0 เป็นหน่วย SI

กฎของดาร์ซีในตัวกลางที่เป็นรูพรุน

การไหลแบบราบเรียบผ่านตัวกลางที่เป็นรูพรุน ความดันลดที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วและค่าคงที่ C_2 สามารถคิดว่ามีค่าเป็นศูนย์กลางได้ ไม่คิดความเร่งในการพาและการแพร่ แบบจำลองการไหลผ่านตัวกลางที่เป็นรูพรุน จะลดรูปเป็นกฎของดาร์ซี

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha} \vec{v} \quad (2.13)$$

โดยความดันลดที่คำนวณในแต่ละทิศทาง (x , y และ z) ในขอบเขตที่เป็นรูพรุนคือ

$$\begin{aligned} \Delta p_x &= \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{xj}} v_j \Delta n_x \\ \Delta p_y &= \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{yj}} v_j \Delta n_y \\ \Delta p_z &= \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{zj}} v_j \Delta n_z \end{aligned} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $1/\alpha_x$ เป็นส่วนประกอบในเมตริกซ์ ในสมการ (2.14) v_j คือ ความเร็วในทิศ x, y และ z และ $\Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z$ คือความหนาของตัวกลางในทิศทาง x, y และ z

การสูญเสียความเฉื่อยในตัวกลางที่เป็นรูพรุน

เมื่อมีการไหลด้วยความเร็วที่มาก ค่าคงที่ C_2 ในสมการ (2.10) จะใช้เป็นค่าแก้ไขสำหรับเทอมของความเฉื่อยสูญเสียในตัวกลางที่เป็นรูพรุน ค่าคงที่นี้จะมองเป็นสัมประสิทธิ์ความสูญเสียต่อความยาวทิศทางการไหล ดังนั้น ความดันลดจะถูกนิยามให้เป็นฟังก์ชันของไดนามิกเฮด (dynamic head)

หากเป็นการจำลองแผ่นรูพรุน จะสามารถตัดเทอมของความสามารถในการผ่าน และใช้แค่เทอมของความเฉื่อยสูญเสียอย่างเดียวได้ ผลที่ได้คือ รูปแบบอย่างง่ายของสมการตัวกลางที่เป็นรูพรุน

$$\Delta p = -\sum_{j=1}^3 C_{2ij} \left(\frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (2.15)$$

สามารถเขียนในเทอมของความดันลดในทิศ x, y และ z ได้ดังสมการที่ (2.16)

$$\begin{aligned} \Delta p &\approx \sum_{j=1}^3 C_{2xj} \Delta n_x \left(\frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \\ \Delta p &\approx \sum_{j=1}^3 C_{2yj} \Delta n_y \left(\frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \\ \Delta p &\approx \sum_{j=1}^3 C_{2zj} \Delta n_z \left(\frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

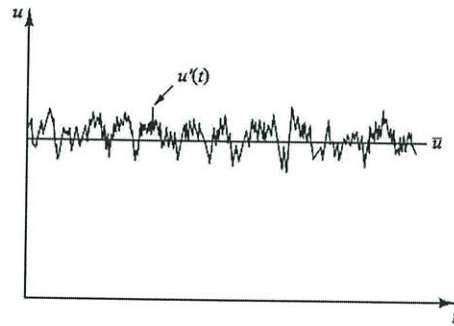
โดยที่ $\Delta n_x, \Delta n_y$ และ Δn_z คือ ความหนาของตัวกลางในทิศทาง x, y และ z

2.8 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน [4]

ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน (Characteristics of the turbulent flow) จะมีลักษณะดังต่อไปนี้

- สภาวะไม่คงตัวสูง (Highly unsteady): การไหลมีสภาวะไม่คงตัวสูง ความเร็วเป็นฟังก์ชันกับเวลาและรูปแบบของการวัดความเร็ว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ความเร็วการไหลแบบปั่นป่วน [4]

- มีความไม่ปกติ (Irregularity): การไหลมีความผิดปกติ ไม่สม่ำเสมอ เป็นลักษณะการไหลที่ทำให้การหาค่าตอบแบบแม่นยำตรงเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทางสถิติ (Statistical)
- สภาพการแพร่ (Diffusivity): การไหลมีการแพร่กระจายถ้ารูปแบบการไหลมีลักษณะสุ่ม (Random) แต่ไม่แสดงการกระจายตัวของการแกว่งไปมาของความเร็วที่รอบๆ ของไหล การไหลนี้จะไม่เรียกเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วนนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและเพิ่มอัตราการถ่ายโอนของโมเมนตัมความร้อนและมวล
- การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลแบบสามมิติและเกิดการหมุนวน (Rotational) ของของไหล
- การสลาย (Dissipative): การไหลแบบปั่นป่วนสามารถสลายตัวได้
- ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) สูง: การไหลแบบปั่นป่วนมักเกิดที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูง

2.9 แบบจำลองสมการ Standard $k - \epsilon$ Model และ RNG $k - \epsilon$ Model [4, 8]

แบบจำลองสมการ $k - \epsilon$ เป็นแบบจำลองความปั่นป่วน โดยแบบจำลองนี้จะถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อให้มีความใกล้เคียงกับสมการ RANS หรือ สมการนาเวียร์-สโตกส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ ซึ่งเป็นแบบจำลองหนึ่งที่แสดงถึงลักษณะการไหลของของไหล ณ ช่วงเวลาเฉลี่ยหนึ่ง ที่ซึ่งแบบจำลองนี้จะใช้กับการไหลแบบปั่นป่วนเป็นหลัก สำหรับสมการในแบบจำลอง โดยแบบจำลองสมการ $k - \epsilon$ จะถูกแบ่งออกได้เป็น แบบจำลองสมการ Standard $k - \epsilon$ Model และ RNG $k - \epsilon$ Model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองสมการ Standard $k - \varepsilon$ Model

สำหรับสถานะที่มีความปั่นป่วนเนื่องจากผลของการแกว่ง (Fluctuation) จึงทำให้ต้องนิยามตัวแปร u, v, w ไปเป็นเทอม

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.17)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (2.18)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (2.19)$$

โดยที่ $\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dT$ (สำหรับ v และ w เขียนในทำนองเดียวกัน) โดย T เป็นเวลาในช่วงการอินทิเกรตที่มีค่าเข้าใกล้ ∞ เนื่องจากผลของการแกว่งมีค่าทั้งบวกและลบ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ u' คือ

$$\bar{u}' = \frac{1}{T} \int_0^T u' dT \approx 0 \quad (2.20)$$

โดยแกน y และ z เขียนได้ในทำนองเดียวกัน

จากสมการความต่อเนื่องจะได้ว่า

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (2.21)$$

แทนสมการ (2.17), (2.18) และสมการ (2.19) ลงในสมการ (2.21) จะได้ว่า

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \rho u'}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho v'}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \rho w'}{\partial z} = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (2.23)$$

โดยที่

$$\frac{\partial \rho u'}{\partial x} + \frac{\partial \rho v'}{\partial y} + \frac{\partial \rho w'}{\partial z} = 0 \quad (2.24)$$

จากสมการอนุรักษ์โมเมนตัม เมื่อใช้ความสัมพันธ์จากสมการ (2.22) ถึงสมการ (2.24) และเพิ่ม

ความสัมพันธ์ของการแกว่งของความดัน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารทศวงวน ไร้สารบบการ ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = \bar{P} + P' \quad (2.25)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P dT \quad (2.26)$$

และ

$$\bar{P}' = \frac{1}{T} \int_0^T P' dT \approx 0 \quad (2.27)$$

หลังจากจัดรูปสมการใหม่ สมการอนุรักษ์โมเมนตัมทั้ง 3 สมการจะถูกเขียนใหม่ในรูปสมการเรย์โนลด์ (Reynolds Equation) ดังนี้

แกน x

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{U}) = & -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot \bar{U} + 2\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x \\ & + \left[\frac{\partial(\rho \bar{u}'^2)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \bar{u}' \bar{v}')}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \bar{u}' \bar{w}')}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (2.28)$$

แกน y

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{U}) = & -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot \bar{U} + 2\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) \right] + \rho f_y \\ & + \left[\frac{\partial(\rho \bar{u}' \bar{v}')}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \bar{v}'^2)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \bar{u}' \bar{w}')}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกน z

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\bar{w})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{w}\bar{U}) = & -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial\bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial\bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial\bar{w}}{\partial y} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot \bar{U} + 2\mu \frac{\partial\bar{w}}{\partial z} \right) + \rho f_z \\ & + \left[\frac{\partial(\rho\bar{u}'\bar{w}')}{\partial x} - \frac{\partial(\rho\bar{v}'\bar{w}')}{\partial y} - \frac{\partial(\rho\bar{w}'^2)}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (2.30)$$

เทอมที่เพิ่มขึ้นมาในสมการ (2.28), (2.29) และสมการ (2.30) มีความสัมพันธ์กับความเร็วเนื่องจากการแกว่ง เพื่อความสะดวก จึงนิยามตัวแปรเหล่านี้ใหม่เป็น

$$\bar{\tau}_{xx}^{(t)} = -\rho\bar{u}'^2 \quad (2.31)$$

$$\bar{\tau}_{xy}^{(t)} = -\rho\bar{u}'\bar{v}' \quad (2.32)$$

ซึ่งเทอมเหล่านี้เป็นองค์ประกอบของโมเมนตัมฟลักซ์ของความปั่นป่วน (Turbulent momentum flux : $\bar{\tau}^{(t)}$) ซึ่งก็คือ ความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stresses) เพื่อที่จะปรับสมการ (2.28), (2.29) และสมการ (2.30) ให้อยู่ในรูปของโปรไฟล์ของความเร็ว (\bar{u} , \bar{v} , \bar{w}) จึงได้เสนอตัวแปรขึ้นมาใหม่ดังนี้

$$\bar{\tau}_{xy}^{(t)} = \mu_t \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (2.33)$$

โดย μ_t คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดปั่นป่วน (Turbulent viscosity coefficient) และจาก

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2.34)$$

โดย μ_{eff} คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดประสิทธิภาพ (Effective viscosity coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (2.35)$$

โดยที่ ค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy: k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Dissipation rate of turbulent kinetic energy: ε) สามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \bar{U}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad } k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \bar{U}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} + G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.37)$$

โดยที่ค่า $C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.00, \sigma_\varepsilon = 1.30, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92$

G_k คือ ผลของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนท์ของความเร็วเฉลี่ย (Mean velocity gradient) ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์

$$G_k = -\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.38)$$

G_b คือ ผลของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์

$$G_b = \beta g_i \frac{\partial u_i}{\partial \text{Pr}_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.39)$$

โดย

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2.40)$$

β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion)

$$\text{Pr} = \frac{k}{\mu C_p} \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Y_m คือ ผลของการก่อดันเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน (Compressibility on turbulence)

$$Y_m = 2\rho\varepsilon M_t^2 \quad (2.42)$$

โดย M_t คือ ตัวเลขมัคปั่นป่วน (Turbulent Mach number)

S_ε, S_k คือ ผลของ Source terms

$C_{3\varepsilon}$ คือ ค่าคงที่ซึ่งหาได้จากสมการ (2.43)

$$C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right| \quad (2.43)$$

โดย v คือ องค์ประกอบของความเร็วยกกำลังสองของไหลที่ไหลขนานกับเวกเตอร์ตามแรงโน้มถ่วง

u คือ องค์ประกอบของความเร็วยกกำลังสองของไหลที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์ตามแรงโน้มถ่วง

Renormalization group $k - \varepsilon$ Model

แบบจำลอง Renormalization group $k - \varepsilon$ ถูกพัฒนามาจากสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes) โดยใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Renormalization group ซึ่งทำให้สมการมีความแตกต่างจากแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังนี้

- 1.) แบบจำลอง Renormalization group $k - \varepsilon$ มีการเพิ่มเทอมในส่วนของสมการอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) ซึ่งทำให้เกิดความแม่นยำสำหรับการไหลที่เกิดความเครียดอย่างรวดเร็ว (Rapidly strained flow)
- 2.) ผลของการหมุนวน (Swirl) บนความปั่นป่วนได้ถูกรวมเข้าไปในแบบจำลอง Renormalization group $k - \varepsilon$ เพื่อเพื่อความแม่นยำของการไหลหมุนวน (Swirling flow)
- 3.) แบบจำลอง Renormalization group $k - \varepsilon$ กำหนดสมการสำหรับตัวเลขพรันด์เทิลปั่นป่วน (Turbulent Prandtl number) แต่ในขณะที่แบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ กำหนดเป็นค่าคงที่
- 4.) แบบจำลอง Renormalization group $k - \varepsilon$ ครอบคลุมตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการของแบบจำลอง Renormalization group $k - \varepsilon$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_B - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (2.44)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_B) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2.45)$$

โดยที่สามารถหาค่า μ_{eff} ได้จาก

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad (2.46)$$

โดยที่

$$\hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu} \quad (2.47)$$

และ

$$C_v \approx 100 \quad (2.48)$$

โดยที่เมื่อตัวเรย์โนลด์มีค่าสูงสามารถเขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้เป็น

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.49)$$

โดยที่ $C_\mu = 0.0845$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่า 0.09 ของแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$

R_ε คือ ผลของการหมุนวน ซึ่งหามาได้จากความสัมพันธ์

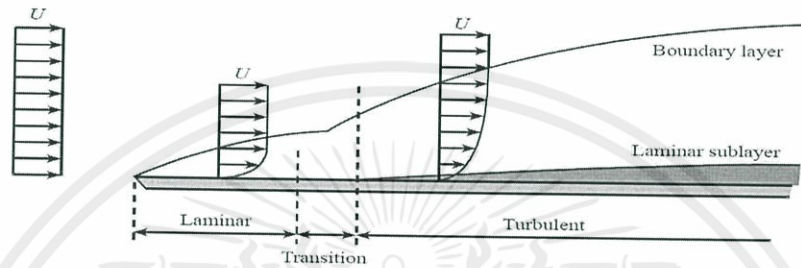
$$\text{โดยที่ } \eta \equiv S k / \varepsilon, \eta_0 = 4.38, \beta = 0.012$$

$$\text{โดยที่ } C_\mu = 0.0854, \sigma_k = 0.7194, \sigma_\varepsilon = 0.7194, C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{2\varepsilon} = 1.68, \eta_0 = 4.38$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 ความหนาของชั้นขอบเขต [6, 9]

ชั้นขอบเขตเป็นชั้นซึ่งติดกับพื้นผิวของแข็ง ซึ่งแรงหนืดมีผลต่อการไหลมาก ความหนาของชั้นขอบเขต δ (Boundary-layer thickness) นิยามว่า คือระยะทางจากพื้นผิวในแนวตั้งไปถึงจุดที่มีความเร็วเป็น 99% ของความเร็วของการไหลภายนอกชั้นขอบเขตซึ่งมีค่าสม่ำเสมอก่อนที่จะไหลผ่านแผ่นราบ (Free stream velocity) หรือ U



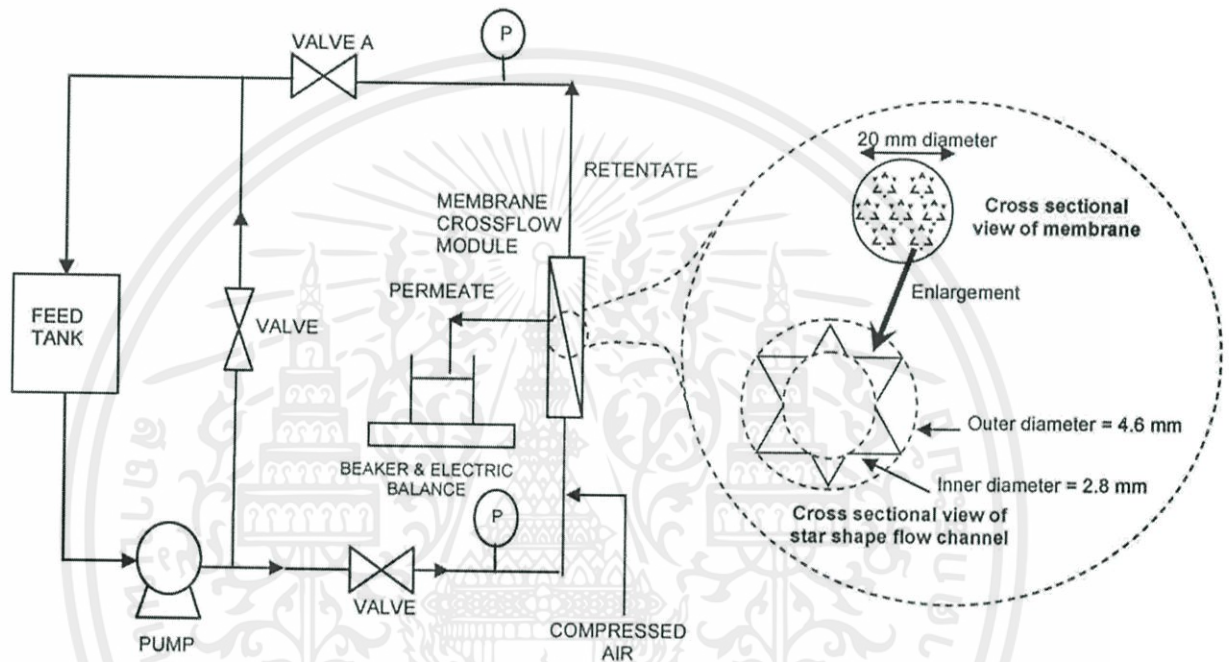
รูปที่ 2.5 ชั้นขอบเขตของการไหลผ่านแผ่นราบ [10]

ผลของแรงหนืดในชั้นขอบเขตทำให้การไหลช้าลง ดังนั้นอัตราการไหลโดยมวลในชั้น ขอบเขตจะน้อยกว่าอัตราการไหลโดยมวลของการไหลซึ่งไม่มีชั้นขอบเขต ถ้าไม่มี แรงหนืดความเร็วจะมีค่าเท่ากับ U ตลอด เรานิยาม ความหนาระยะขจัด (Displacement thickness) ว่าเป็นระยะซึ่งพื้นผิวราบจะต้องเลื่อนขึ้นไป ในการไหลแบบไม่มีความหนืด เพื่อที่จะชดเชยการสูญเสียอัตราการไหลโดยมวลที่เกิดขึ้นในชั้นขอบเขต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

T.Y. Chiu และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มฟลักซ์วิกฤต (Critical flux) ในระบบการกรองแบบไมโครฟิวเตรชันโดยใช้แก๊สเป็นตัวช่วยเพิ่มฟลักซ์วิกฤต ในการศึกษาจะใช้สารแขวนลอยของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) ในน้ำ ซึ่งขนาดเฉลี่ยของอนุภาคประมาณ 3 ไมโครเมตร กรองผ่านท่อเมมเบรนที่มีช่องรูปดาวหกแฉกจำนวน 7 ช่อง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รูปแบบการทดลองและโครงสร้างเมมเบรนของ T.Y. Chiu

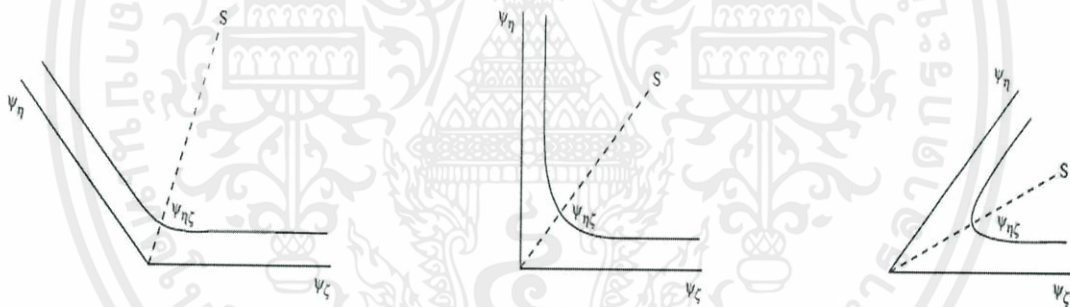
จากการทดลอง แบ่งการศึกษาและสรุปผลออกได้เป็น 3 แบบ ดังนี้

1. ศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊ส โดยกำหนดอัตราการไหลของของเหลวให้มีอัตราการไหลคงที่ พบว่าฟลักซ์วิกฤตจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความปั่นป่วนเพิ่มสูงขึ้น ตัวเลขเรโนลด์และค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall shear stress) จึงมีค่าสูงขึ้น การไหลภายในท่อเมมเบรนจึงเกิดการไหลหมุนวนที่บริเวณแฉกของดาวทำให้การสะสมของตะกอนบริเวณแฉกของดาวได้น้อยลงฟลักซ์วิกฤตจึงสูงขึ้น ฟลักซ์วิกฤตมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนการไหลของของเหลวและแก๊ส (Injection ratio) 0.23 ถึง 0.46 แต่เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราการไหลของของเหลวและแก๊สมีค่าสูงขึ้นฟลักซ์วิกฤตจะลดลง เพราะอัตราเร็วของแก๊สที่สูงเกินไปจะทำให้การไหลหมุนวนบริเวณแฉกของดาวเกิดได้น้อยลงฟลักซ์วิกฤตจึงลดลง
2. ศึกษาผลของอัตราการไหลของของเหลว โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สให้มีค่าคงที่ พบว่าฟลักซ์วิกฤตจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของของเหลวเพิ่มขึ้น
 3. ศึกษาขนาดของหัวฉีด โดยใช้หัวฉีดที่มีขนาดต่างกัน พบว่าฟลักซ์วิกฤตจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของหัวฉีดจนมีค่าสูงที่สุดที่ขนาดหัวฉีด 1.6 มิลลิเมตร และฟลักซ์วิกฤตจะลดลงเมื่อขนาดหัวฉีดใหญ่กว่า 1.6 มิลลิเมตร นอกจากนี้ขนาดของหัวฉีดจะส่งผลต่อฟลักซ์วิกฤตน้อยลงเมื่อความเร็วของของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น

S Wattananusorn [10] ได้แสดงถึงโมเดลทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ฟังก์ชันคลื่นอธิบายถึงปรากฏการณ์การไหลผ่านแผ่นราบสองแผ่นทำมุม โดยพิจารณาถึงความหนาของชั้นขอบเขต (Displacement thickness) ที่มีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแผ่นราบที่ทำมุมกันในสนามการไหล ดังรูปที่ 2.7 โดยอธิบายสมการฟังก์ชันคลื่นเป็น



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงชั้นขอบเขตของแผ่นราบทำมุม

$$\psi_{\eta\xi} = \psi_{\eta} + \psi_{\xi} + \beta \tag{2.50}$$

โดยที่

$$\psi_{\eta} = A_{\eta} e^{i(\omega t)} \tag{2.51}$$

$$\psi_{\xi} = A_{\xi} e^{i(\omega t)} \tag{2.52}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.52) การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสมการ (2.51) และ (2.52) ฟังก์ชันคลื่นตามพิกัด η, ξ ตามลำดับ

$$\text{โดยที่} \quad \xi = Z' / (vx / U_\infty)^{0.5} \quad (2.53)$$

$$\eta = y' / (vx / U_\infty)^{0.5} \quad (2.54)$$

$$\beta = -\Phi(\eta, \xi)e^\alpha \quad (2.55)$$

ซึ่ง n เป็นค่าคงที่

ทำการจัดรูปของสมการสังยุคของจำนวนเชิงซ้อน ได้เป็น

$$\psi_{\eta\xi}^* \psi_{\eta\xi} = A_\eta^2 (e^{2\alpha} - 4e^\alpha + 4) \quad (2.56)$$

$$\psi_{\eta\xi}^* \psi_{\eta\xi} = A_\eta^2 \Omega \quad (2.57)$$

โดยที่ แผ่นราบเรียบทำมุม 180° จะมีค่า $\Omega = 1$

โดยจาก สมการบลาสีอุส (Blasius) ของแผ่นราบเรียบ

$$\delta_n = \frac{1.721}{\sqrt{\text{Re}}} \quad (2.58)$$

และ แผ่นทำมุมตั้งฉาก

$$\delta_{n,\theta} = \frac{3.304}{\sqrt{\text{Re}}} \quad (2.59)$$

จึงจัดรูปสมการเพื่อหาค่าตั้งแปร n และ α จึงได้รูปสมการ

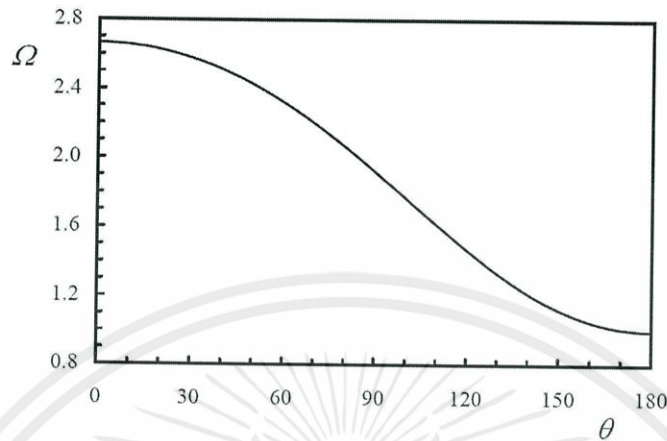
$$\alpha = -\{[\cos \theta + 1] / 2\}^{1.037} \quad (2.60)$$

และได้ฟังก์ชันคลื่นของการไหลผ่านมุม

$$\psi_{\eta\xi} = \frac{1.312}{\text{Re}^{0.25}} [2e^{i(\omega t)} - e^{\alpha+i(\omega t)}] \quad (2.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการรบกวน (Interference factor) ที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นขอบเขตเมื่อแผ่นราบที่ทำมุมต่างๆ กัน ได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแผ่นราบกับปัจจัยการรบกวน

K.A. CARIDIS และคณะ [11] ได้กล่าวถึงกระบวนการแก้วิธีการเชิงตัวเลขของการคำนวณหาเพอร์มิเอตฟลักซ์ ของเมมเบรนรูปดาวหกแฉก เจ็ดท่อนภายในเมมเบรน ด้วยวิธีการอินทิเกรตขอบเขต (Boundary integral method) เพื่อแก้ปัญหасมารดาซี (Darcy's equation) สำหรับการไหลผ่านตัวกลางรูพรุน ที่ซึ่งใช้ในการคำนวณหา effective permeability (K_m) สำหรับการคำนวณและการทดลอง โดยวิธีการอินทิเกรตขอบเขตนี้ สามารถนำไปใช้ในการดำเนินการในการออกแบบลักษณะโมดูลของเมมเบรน รวมไปถึงรัศมีของท่อเมมเบรน ที่ส่งผลต่อเพอร์มิเอตฟลักซ์ได้

M. Rahimi และคณะ [12] ได้ทำการจำลองการหาเพอร์มิเอตฟลักซ์ที่ไหลผ่านเมมเบรนไมโครพิวเตรชัน โดยการคำนวณจะใช้สมการ Darcy equation เพื่อคำนวณหาฟลักซ์ทั้งหมดบนพื้นผิวของเมมเบรน โดยทำการเปรียบเทียบเพอร์มิเอตที่ได้จากจำลองด้วยการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับทางการทดลอง ในการทดลองจะทำการทดลองสี่แบบ ได้แก่ ปราศจากตัวกีดขวาง มีตัวกีดขวางขนาดเล็ก ตัวกีดขวางขนาดใหญ่ และตัวกีดขวางวางสลับกัน โดยจะใช้ของไหลเป็นน้ำปราศจากไอออน สำหรับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำลองโดยใช้โปรแกรม CFD จะเป็นการจำลองแบบปั่นป่วนซึ่งใช้รูปแบบการจำลองแบบ $k-\varepsilon$ การจำลองจะอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของความดันตั้งแต่ทางเข้าจนถึงทางออกบนพื้นผิวเมมเบรน ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลบนเมมเบรน โดยพลาสมาที่ผ่านการกรองจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลเชิงมวล รวมไปถึงความดันแตกต่างผ่านเมมเบรน (TMP)

T.Y. Chiu และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของท่อเมมเบรนรูปทรงดาวหกแฉกหลายท่อ ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษได้แก่ความเร็ว สารประกอบของสารลดแรงตึงผิว สารสร้างตะกอน ค่าพีเอชและผลของค่าความแรงไอออน โดยใช้อนุภาค คือ โทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน โดยจะพบว่าชนิดของเมมเบรน รวมไปถึงอนุภาคที่ทำการกรอง ก็ส่งผลต่อค่าพลาสมาอีกด้วย นอกจากนี้ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น โดยบริเวณที่เกิดการไหลแบบปั่นป่วน จะส่งผลต่อการเกิดพลาสมาที่สูง เนื่องจากการเกิดกระแสหมุนวนที่มุมแฉกของเมมเบรน จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าท่อวงกลมถึง 50% นอกจากนี้ชนิดของสารลดแรงตึงผิวจะไปช่วยลดการเกาะตัวของตะกอนบนเมมเบรน รวมทั้งในสภาวะที่เป็นเบสจะช่วยให้ประสิทธิภาพของการกรองเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และสำหรับการเติมสารสร้างตะกอน จะเป็นตัวช่วยให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกันได้ดีขึ้น ขนาดของอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ช่วยลดการเกาะตัวของอนุภาคที่พื้นผิวของเมมเบรน การใช้แรงเฉือนในการกำจัดตะกอนบนพื้นผิวจึงลดลงตามไปด้วย

Laura De Angelis และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นของอนุภาคที่ใช้ในการกรอง โดยการใช้เมมเบรนชนิดเซรามิก โดยจะทำการศึกษการเกิดตะกอนบนพื้นผิว รวมไปถึงความเข้มข้นของอนุภาคที่ส่งผลต่อพลาสมา จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคต่ำ จะไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงพลาสมา แต่เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของพลาสมาจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยความเข้มข้นที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพลาสมาจะขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 การตั้งค่าแบบจำลอง

3.1.1 แบบจำลองของการไหลภายในท่อเมมเบรน

แบบจำลองสร้างขึ้นตามการไหลภายในเมมเบรน โดยลักษณะของรูปทรง พื้นที่หน้าตัดของของไหลจะถูกกำหนดให้ทุกรูปมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางไฮโดรลิกเท่ากับ 2.3 mm และรัศมีของท่อเมมเบรนเท่ากับ 5 mm ความยาวของท่อเมมเบรนเท่ากับ 300 mm เส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรลิกรอบเมมเบรนเท่ากับ 0.6 m โดยจะทำการสร้างท่อเมมเบรนภายในเป็นรูปทรงดาวสามแฉก ดาวสี่แฉก ดาวห้าแฉก ดาวหกแฉก ข้าวหลามตัด และสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทิศทางการไหลมีทิศทางด้านแรงโน้มถ่วงของโลก โดยตารางที่ 3.1 แสดงถึงเรขาคณิตของท่อเมมเบรนรูปแบบต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยพื้นที่หน้าตัดของของไหล รวมไปถึงเส้นรอบรูปของพื้นที่หน้าตัดของของไหล เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางไฮโดรลิก นอกจากนี้ยังมีความยาวของมุมแฉกที่ยาวที่สุด ความยาวมุมแฉกที่สั้นที่สุด และพื้นที่สัมผัสของไหล

ตารางที่ 3.1 เรขาคณิตของท่อเมมเบรนต่างๆ

ลักษณะเมมเบรน	พื้นที่หน้าตัดของ ของไหล (mm ²)	เส้นรอบรูปของ พื้นที่หน้าตัดของ ของไหล (mm)	ความยาวของ มุมแฉกที่ยาว ที่สุด (mm)	ความยาวของ มุมแฉกที่สั้น ที่สุด (mm)	พื้นที่สัมผัส ของไหล (mm ²)
ดาวสามแฉก	12.28	21.36	4.00	1.18	6406.86
ดาวสี่แฉก	14.77	25.70	4.00	1.32	7709.46
ดาวห้าแฉก ^[18]	15.55	27.04	3.72	1.42	8111.44
ดาวหกแฉก ^[18]	9.16	15.93	2.30	1.33	4780.46
ข้าวหลามตัด	9.61	16.71	4.00	1.20	5011.69
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	6.95	12.09	2.25	0.77	3627.00

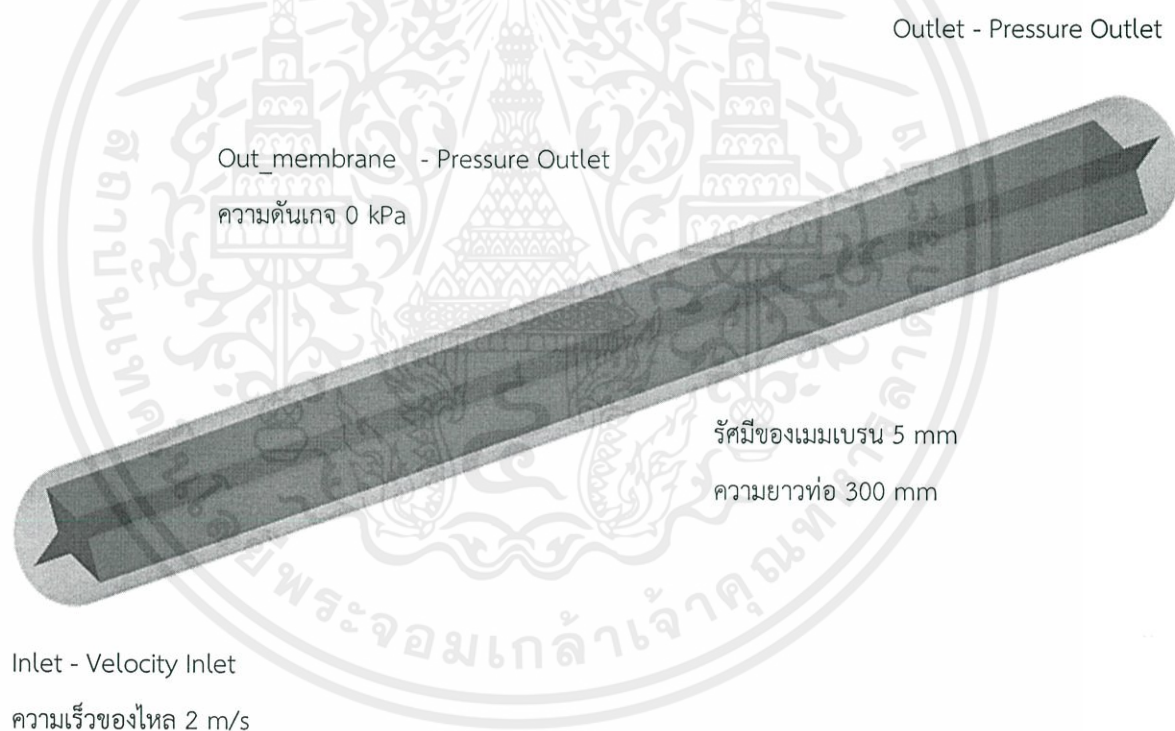
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 สภาวะขอบเขต

Inlet	-	ชนิด Velocity-inlet กำหนดให้ขนาดของความเร็วเท่ากับ 2 m/s
Outlet	-	ชนิด Pressure-outlet กำหนดความดันเกจตามความดันแตกต่างผ่านเมมเบรน (TMP)
Out_membrane	-	ชนิด Pressure-outlet กำหนดความดันเกจเท่ากับ 0 Pascal

ทั้งสามขอบเขตจะมีความเข้มข้นความปั่นป่วนเท่ากับ 5.58 % โดยบริเวณ Inlet และ outlet จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางไฮโดรลิกเท่ากับ 0.0023 m และบริเวณ Out_membrane จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางไฮโดรลิกเท่ากับ 0.6 m ดังรูปที่ 3.1 ที่แสดงภาพแบบจำลองการกำหนดสภาวะขอบเขตของท่อเมมเบรนรูปทรงดาวสี่



รูปที่ 3.1 การกำหนดสภาวะขอบเขตของแบบจำลองท่อเมมเบรนรูปทรงดาวสี่แฉก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติฐานของแบบจำลอง

- แบบจำลองที่สร้างขึ้น เป็นการจำลองแบบสามมิติ
- ของไหลเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ และความหนืดมีค่าคงที่
- ความเร็วของของไหลที่เข้าสู่หน้าตัดท่อมีค่าคงที่
- ของไหลมีความเข้มข้นของอนุภาคน้อยมากจนคุณสมบัติมีความใกล้เคียงกับน้ำ

รูปที่ 3.2 แสดงกริดของแบบจำลองที่สร้างโดยการใช้โปรแกรม GAMBIT โดยกำหนดให้บริเวณพื้นที่หน้าตัด แต่ละเส้นจะมีการตีกริดแบบ interval count เท่ากับ 8 หรือเป็นการกำหนดจำนวนของกริดทั้งหมดที่จะสร้างบนเส้นเท่ากับ 8 กริด ที่บริเวณใกล้กับพื้นผิวของเมมเบรนกับของไหลจะกำหนดให้มีการตีกริดอย่างละเอียดที่บริเวณนี้ โดยกำหนดระยะห่างเท่ากับ 0.3 mm และแต่ละระยะห่างมีการตีกริดแบบ interval count เท่ากับ 4 และสำหรับเส้นตามความยาวท่อตีกริดแบบ interval count เท่ากับ 300

3.1.3 รูปแบบการจำลอง

ในกระบวนการจำลองใช้รูปแบบการจำลองคือ k-epsilon แบบ RNG โดยมีค่า Cmu เท่ากับ 0.0845 และสำหรับ C1-epsilon และ C2-epsilon เท่ากับ 1.42 และ 1.68 ตามลำดับ

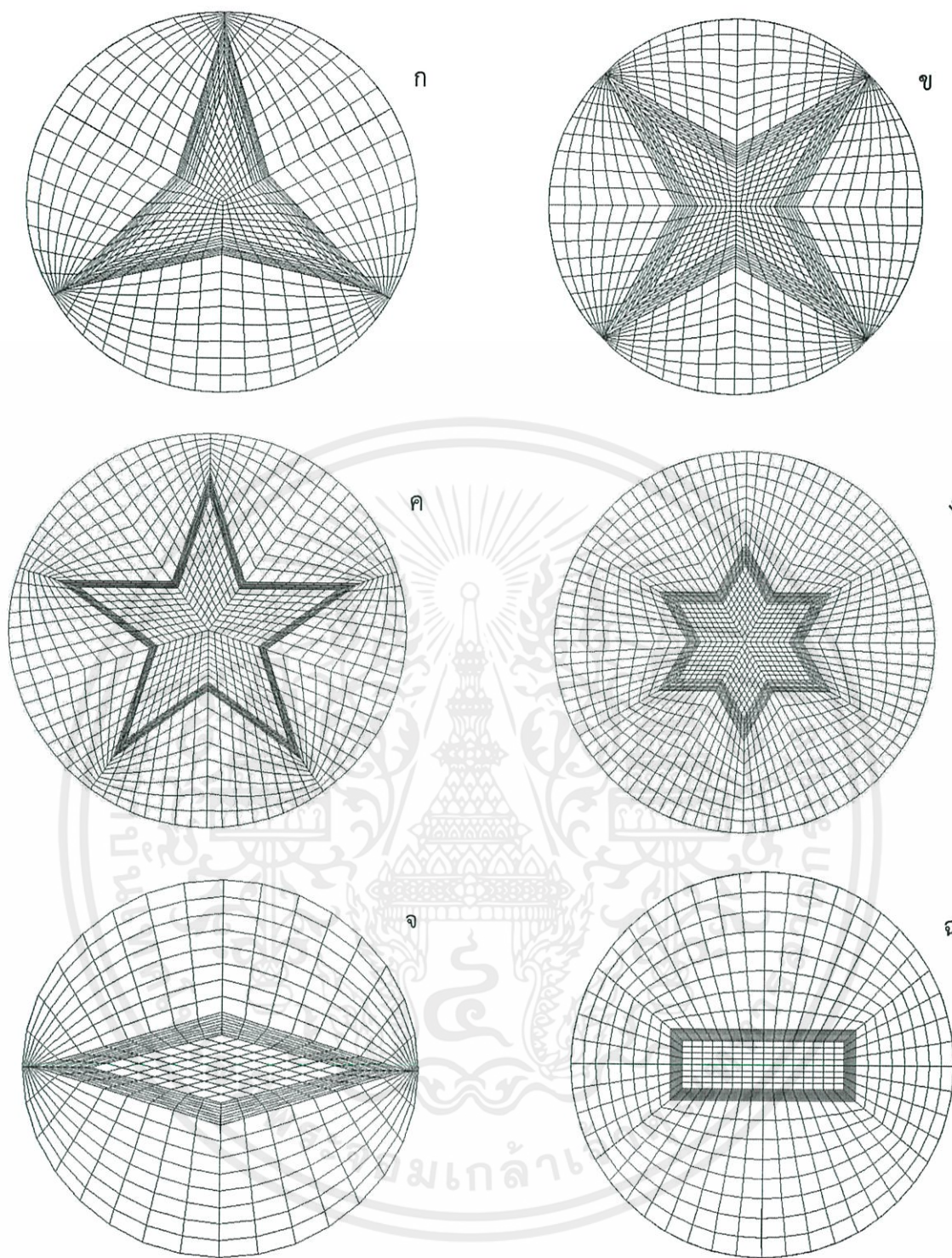
3.1.4 วัสดุในการจำลอง

ในการจำลองชนิดของวัสดุ (Material type) จะใช้ของไหลคือ water-liquid โดยที่น้ำในสถานะของเหลวที่ความดัน 1 bar อุณหภูมิ 25 °C มีความหนาแน่นเท่ากับ 998.2 kg/m³ และความหนืดของน้ำเท่ากับ 0.001003 kg/m·s

3.1.5 สภาวะ Cell-zone

ในกระบวนการจำลองในโซนของเมมเบรน จะตั้งค่าเป็นโซนรูพรุน (Porous zone) โดยที่จะมีความต้านทานความหนืด 5×10^{14} 1/m² และความเป็นรูพรุนของของไหลเท่ากับ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กริดของแบบจำลองที่สร้างด้วยโปรแกรม GAMBIT

ก. ท่อดาวสามแฉก ข. ท่อดาวสี่แฉก ค. ท่อดาวห้าแฉก^[18]

ง. ท่อดาวหกแฉก^[18] จ. ท่อข้าวหลามตัด ฉ. ท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการวิจัยทางวิทยาศาสตร์เท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 ระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข

สมการควบคุมทั้งหมดถูกคำนวณด้วยโปรแกรม FLUENT ซึ่งเป็นวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยการคำนวณ เริ่มจากแบ่งขอบเขตการคำนวณเป็นเซลล์ขนาดเล็กจำนวนมาก และอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ทั้งหมดให้เป็นเซตของสมการพีชคณิต โดยสมการพีชคณิตจะถูกคำนวณจนได้สมการการกระจายตัวของตัวแปรตามที่ต้องการ โดยตารางที่ 3.2 แสดงถึงการตั้งค่าของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในโปรแกรม FLUENT

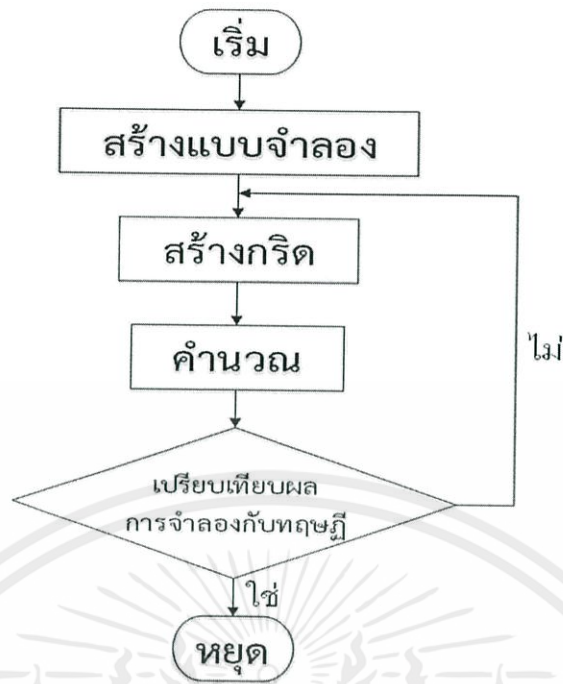
ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ประเภท	ระเบียบวิธีการ
Pressure-velocity coupling	SIMPLE
Gradient	Least squares cell based
Pressure	Standard
Momentum	Second order upwind
Turbulent kinetic energy	First order upwind
Turbulent dissipation energy	First order upwind

3.2 การจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี

ผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม FLUENT จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง โดยกระบวนการในขั้นตอนนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี

3.3 ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของท่อเมมเบรน

เป็นการจำลองอิทธิพลรูปทรงของท่อเมมเบรนรูปทรงต่างๆ ของน้ำที่ไหลผ่านภายในท่อ ซึ่งประกอบไปด้วยรูปดาวสามแฉก รูปดาวสี่แฉก รูปดาวห้าแฉก รูปดาวหกแฉก รูปข้าวหลามตัด และรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเพอร์มิเอตฟลักซ์ต่อพื้นที่สัมผัสของไหลกับความดันตกต่างผ่านเมมเบรน (TMP) เพื่อเปรียบเทียบฟลักซ์ที่ได้จากการกรองผ่านเมมเบรน โดยกำหนดให้ตัวเลขเรย์โนลด์ และเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรลิกคงที่

3.4 ศึกษาอิทธิพลความเร็วของของไหล

เป็นการจำลองอิทธิพลของความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านเมมเบรนที่ส่งผลต่อเพอร์มิเอตฟลักซ์ที่ความดันตกต่างผ่านเมมเบรนที่ 0.3 bar ของท่อรูปดาวสี่แฉก โดยความเร็วจะส่งผลถึงตัวเลขเรย์โนลด์และความเข้มข้นความปั่นป่วน โดยจะนำไปใช้กำหนดสภาวะขอบเขต ตามตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 การคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์และเปอร์เซ็นต์ความปั่นป่วนจากความเร็วของน้ำ

ความเร็วของน้ำ (m/s)	ตัวเลขเรย์โนลด์	เปอร์เซ็นต์ความปั่นป่วน (%)
0.5	1144	-
1	2288	6.08
1.6	3662	5.74
2	4577	5.58
2.5	5722	5.43
3	6866	5.30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลอง

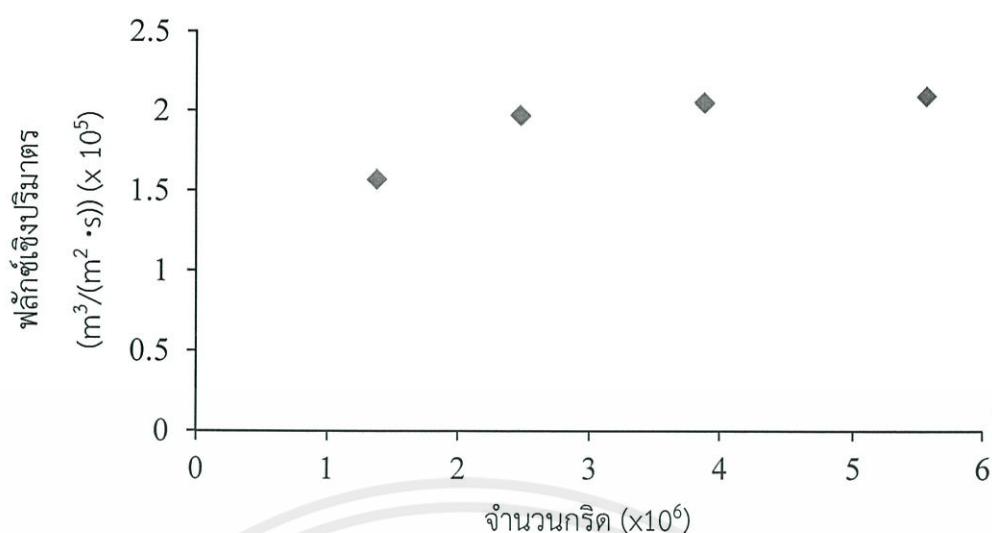
4.1 การหากริตที่เหมาะสม

ขนาดและความละเอียดของกริดส่งผลต่อความแม่นยำของผลคำตอบและเวลาในการคำนวณ ในการจำลองกระบวนการจึงจำเป็นต้องหาขนาดและความละเอียดของกริดที่มีความเหมาะสม โดยกำหนดจำนวนกริดที่ศึกษาให้มีจำนวนแตกต่างกัน และใช้โมเดลการคำนวณเป็นแบบ Renormalization group k-epsilon (RNGKE) ความเร็วขาเข้า 2 m/s ความดันตกต่างผ่านเมมเบรน (Transmembrane Pressure: TMP) 0.3 bar โดยผลการจำลองกระบวนการของจำนวนกริดต่างๆจะแสดงตามตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อทำการใช้จำนวนกริดที่เพิ่มมากขึ้น ฟลักซ์เชิงปริมาตรจะมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากยิ่งขึ้น หรือมีความคลาดเคลื่อนลดลง แต่อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการจำลองก็จะเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

ตาราง 4.1 ผลการจำลองกระบวนการของจำนวนกริดต่างๆ

จำนวนกริด	ฟลักซ์เชิงปริมาตร ($m^3/(m^2 \cdot s)$)	ความคลาดเคลื่อน (%)	เวลาการคำนวณ (ชั่วโมง)
ผลการทดลอง	2.79×10^{-5}	-	-
1,372,800	1.57×10^{-5}	43.66	6
2,484,000	1.97×10^{-5}	29.46	8
3,878,400	2.05×10^{-5}	26.37	12
5,556,000	2.09×10^{-5}	25.15	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



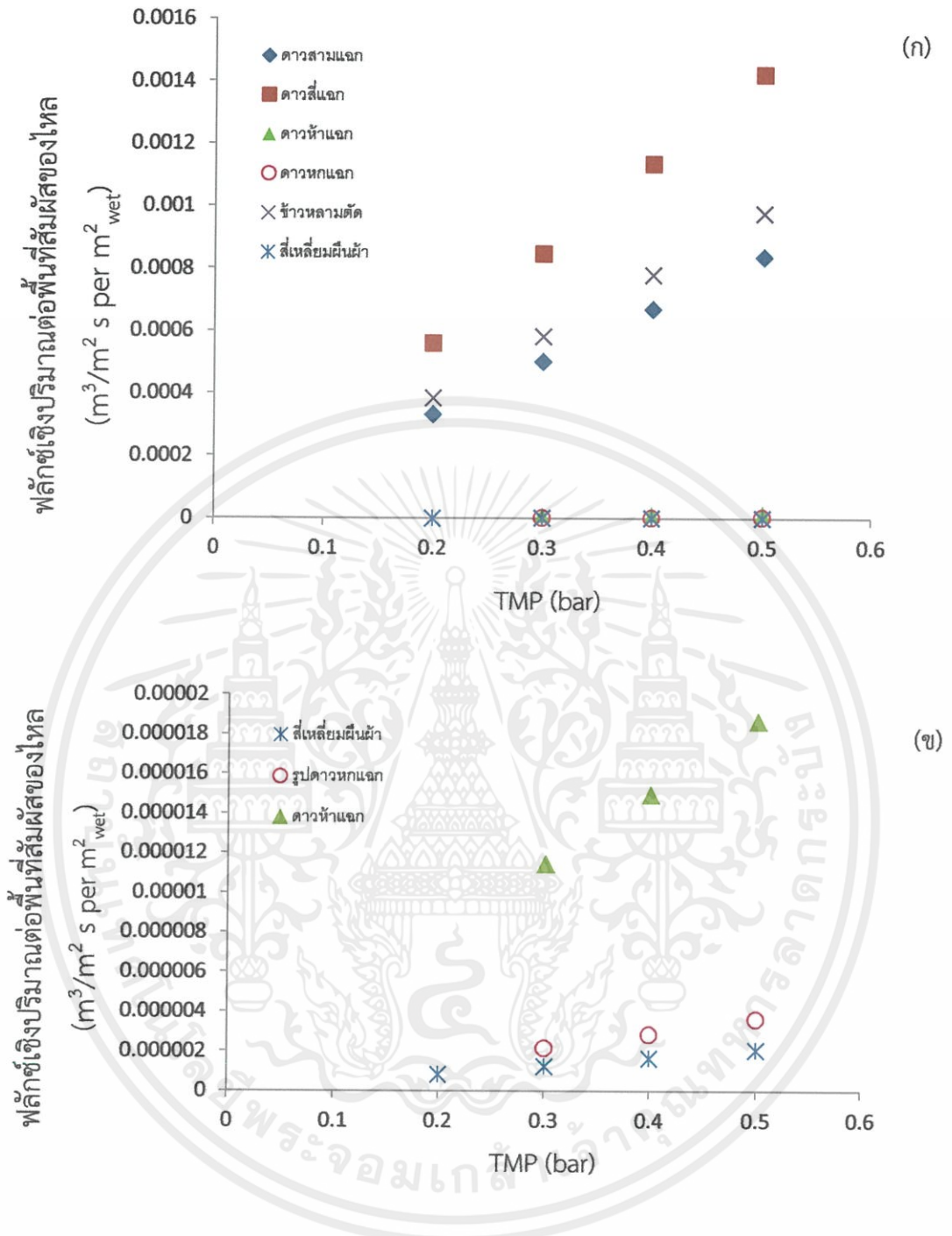
รูปที่ 4.1 ผลของจำนวนกริตต่อฟลักซ์เชิงปริมาตรในการจำลองกระบวนการ

จากรูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์เชิงปริมาตรกับจำนวนกริตที่ใช้ พบว่ากริตจำนวน 3,878,400 จะมีความเหมาะสมที่สุดในการจำลองกระบวนการ ถึงแม้ว่าจะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่ากริตจำนวน 5,556,000 แต่ความคลาดเคลื่อนของฟลักซ์เชิงปริมาตรเทียบกับผลการทดลองต่างกันเพียง 1.05 เท่า และเวลาที่ใช้ในการคำนวณน้อยกว่าถึง 1.67 เท่า ดังนั้นจึงใช้กริตจำนวน 3,878,400 ในการจำลองกระบวนการ

4.2 การเปรียบเทียบฟลักซ์ของเพอร์มิเอตของการไหลในเมมเบรนรูปแบบต่างๆ

จากการสร้างแบบจำลองของท่อเมมเบรนรูปทรงต่างๆ โดยแต่ละรูปจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรลิกเท่ากับ 2.3 mm เพื่อนำไปพิจารณาเพอร์มิเอตฟลักซ์ที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์เชิงปริมาตรต่อพื้นที่สัมผัสของไหลกับความดันตกต่างผ่านเมมเบรนของเมมเบรนของท่อรูปแบบต่างๆ จะพบเห็นว่า ท่อเมมเบรนรูปดาวสี่แฉกจะมีเพอร์มิเอตฟลักซ์เชิงปริมาตรมากที่สุด ตามด้วย ท่อรูปข้าวหลามต้อ ท่อรูปดาวสามแฉก ท่อรูปดาวห้าแฉก ท่อรูปดาวหกแฉก และท่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเพอร์มิเอตฟลักซ์เชิงปริมาตรต่อพื้นที่สัมผัสของเหลวกับความดันตกต่างผ่านเมมเบรนที่ความเร็ว 2 m/s

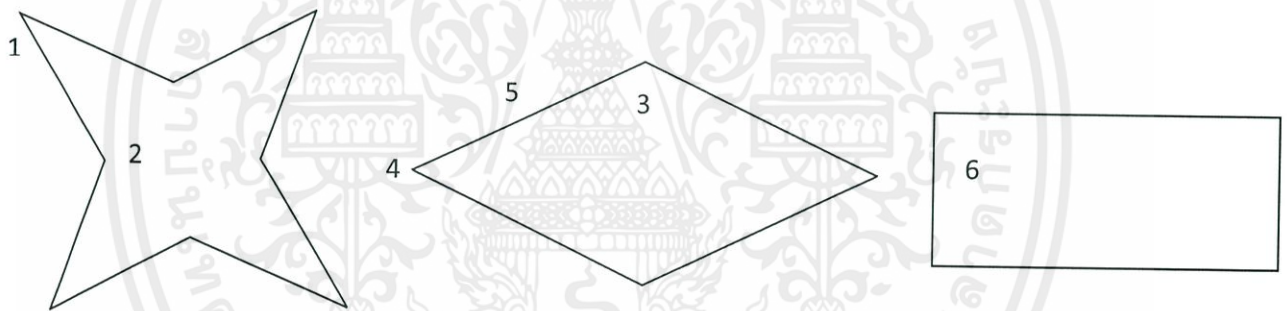
(ก) ท่อเมมเบรนทุกรูปทรง

(ข) ท่อเมมเบรนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดาวห้าแฉก และดาวหกแฉก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเพอร์มิเอตเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในกระบวนการกรองโดยใช้เมมเบรนนั้น จะใช้แรงขับคือ ความดัน การเพิ่มผลต่างความดันระหว่างความดันภายในเมมเบรนกับความดันของเพอร์มิเอต จะส่งผลให้เกิดแรงขับของเหลวให้ไหลผ่านเมมเบรนได้เพิ่มมากขึ้น โดยในการจำลองเป็นการจำลองโดยการใช้อุณหภูมิที่เป็นน้ำ ลักษณะแนวโน้มระหว่างฟลักซ์เชิงปริมาณต่อพื้นที่สัมผัสของไหลกับความดันแตกต่างผ่านเมมเบรนจึงเป็นเส้นตรง เช่นเดียวกับรูปที่ 2.3

ลักษณะของรูปทรงเรขาคณิตของท่อก็เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความแตกต่างของเพอร์มิเอตฟลักซ์ที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างรูปทรงเรขาคณิตของรูปดาวสี่แฉก รูปข้าวหลามตัด และรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ซึ่งอธิบายถึงตำแหน่งต่างๆที่สำคัญของรูปทรงเรขาคณิต โดยกำหนดให้มุม 1 คือมุมแหลมของแฉกดาว มุม 2 คือมุมกลับของแฉกดาว มุม 3 คือมุมป้านของรูปข้าวหลามตัด มุม 4 คือมุมแหลมของรูปข้าวหลามตัด มุม 5 คือระยะกึ่งกลางระหว่างมุมแหลมและมุมป้านของรูปข้าวหลามตัด มุม 6 คือมุมฉากของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 4.3 มุมของรูปทรงเรขาคณิตของแฉกดาว รูปข้าวหลามตัด และรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

พิจารณาตามคอนทัวร์การไหลภายในท่อเมมเบรนตามรูปที่ 4.4 พบว่าปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้น จะเป็นการไหลภายในท่อที่มีลักษณะภายในทำมุมซึ่งกันและกัน ซึ่งเปรียบเสมือนแผ่นเรียบสองแผ่นทำมุม ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของชั้นขอบเขต บริเวณปลายมุมแหลมจะมีความหนาของชั้นขอบเขตที่หนากว่าบริเวณอื่น และความหนาของชั้นขอบเขตจะลดลงเรื่อยๆ จนบริเวณมุมกลับของแฉกดาวจะมีชั้นขอบเขตที่บางที่สุด ตามรูปที่ 2.7

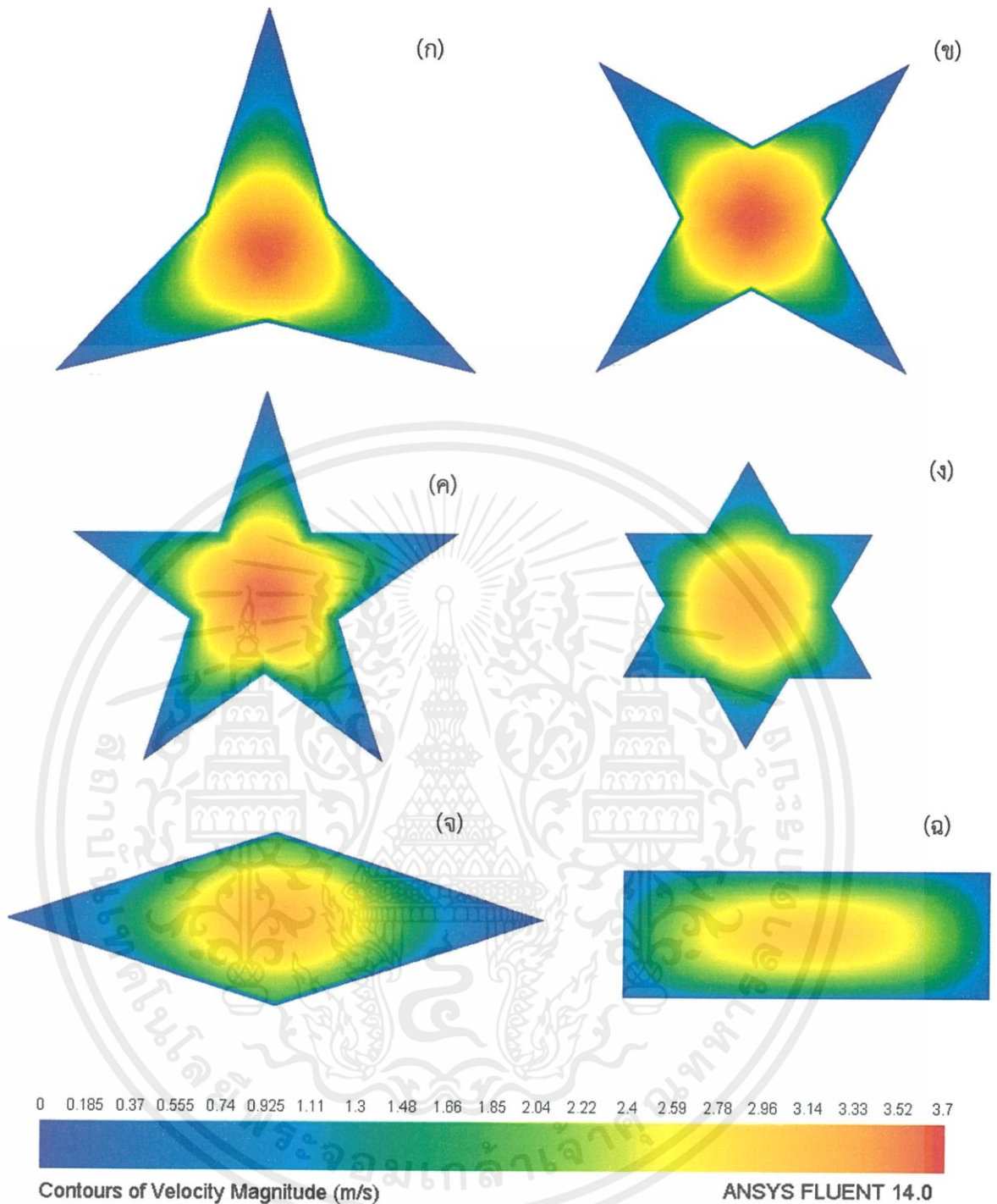
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 ก เป็นการไหลภายในท่อเมมเบรนรูปดาวสามแฉก จะพบว่าลักษณะคอนทัวร์ความเร็วของการไหลจะมีความเร็วสูง โดยแกนการไหลจะครอบคลุมบริเวณที่กว้างและเข้าไปใกล้บริเวณมุมกลับของแฉกรูปดาว ยิ่งไปกว่านั้นแกนการไหลยังมีการเปลี่ยนแปลงเข้าไปบริเวณแฉกมุมแหลม เมื่อทำการเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.4 ข ซึ่งเป็นการไหลภายในท่อเมมเบรนรูปดาวสี่แฉกจะมีลักษณะของแกนการไหลทรงกลม โดยไม่เปลี่ยนแปลงเข้าไปที่บริเวณมุมแฉกเหมือนรูปที่ 4.4 ก อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์การไหลทุติยภูมิซึ่งเป็นการไหลในทิศทางแกน x และ y โดยจะเกิดขึ้นบริเวณมุมแหลมของรูปดาว ลักษณะของการไหลทุติยภูมิจะเกิดขึ้นเป็นกระแสหมุนวน เข้าไปรอบวนและขัดขวางการถ่ายเทของไหลเข้าสู่เมมเบรน เป็นผลทำให้เพอร์มิเอตฟลักซ์ที่เกิดขึ้นลดลง โดยแกนการไหลของท่อรูปดาวสามแฉกมีลักษณะเข้าไปในบริเวณมุมแหลมอันเนื่องมาจากภายในมุมแหลมของดาวสามแฉกเกิดกระแสหมุนวนที่รุนแรงกว่าดาวสี่แฉก นอกจากนี้บริเวณที่เกิดการถ่ายโอนของไหลเข้าสู่เมมเบรนได้ดีจะเกิดขึ้นบริเวณมุมกลับของรูปดาว ทำให้ท่อรูปดาวสี่แฉกมีตำแหน่งการถ่ายโอนของเหลวถึงตำแหน่งมากกว่าท่อรูปดาวสามแฉกซึ่งมีเพียงสามตำแหน่ง จึงทำให้เพอร์มิเอตฟลักซ์ของท่อรูปดาวสี่แฉกมากกว่าท่อรูปดาวสามแฉก

พิจารณาชั้นของเขตของรูปที่ 4.4 ค ท่อเมมเบรนรูปดาวห้าแฉกและรูปที่ 4.4 ง ท่อเมมเบรนรูปดาวหกแฉก พบว่าไม่เพียงแต่จะพบชั้นขอบเขตที่บริเวณมุมแหลมของรูปดาวเท่านั้น แต่ยังพบว่าที่บริเวณมุมกลับของรูปดาวจะถูกปกคลุมด้วยชั้นขอบเขตเช่นกัน โดยชั้นขอบเขตนี้มีลักษณะเป็นตัวต้านทานการไหลของของไหลผ่านในรูพรุนของเมมเบรน ส่งผลทำให้เพอร์มิเอตฟลักซ์ของท่อรูปดาวห้าแฉกและดาวหกแฉกมีฟลักซ์ที่น้อยกว่ารูปดาวสี่แฉกและดาวสามแฉกที่ซึ่งไม่มีชั้นขอบเขตที่บริเวณมุมกลับของรูปดาว

พิจารณารูปที่ 4.4 ฉ เป็นท่อเมมเบรนรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า พบว่า ความเร็วสูงสุดของการไหลภายในท่อ มีความเร็วน้อยกว่ารูปอื่นๆ โดยชั้นขอบเขตจะปกปิดที่บริเวณของพื้นผิวเมมเบรนทั้งหมด โดยจะมีความหนาที่สุดที่มุมฉากของรูป ซึ่งจะขัดขวางการไหลผ่านเข้าสู่เมมเบรน ฟลักซ์ที่กรองได้จึงมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด สำหรับท่อรูปข้าวหลามตัดแกนการไหลจะมีความหนาที่บริเวณมุมแหลมและครอบคลุมบริเวณกว้างเข้าไปบริเวณมุมป้านของท่อ แต่อย่างไรก็ตามชั้นขอบเขตจะรักษาสมดุลการไหลส่งผลให้ที่ระยะกึ่งกลางระหว่างมุมแหลมและมุมป้านของรูปข้าวหลามตัดมีชั้นขอบเขตที่บางกว่าบริเวณอื่น ทำให้เหมือนมีตำแหน่งของของไหลผ่านเข้ารูพรุนได้ดีถึงตำแหน่ง เพอร์มิเอตฟลักซ์จึงมีความใกล้เคียงกับรูปดาวสามแฉกและดาวสี่แฉก แต่มีฟลักซ์มากกว่าท่อรูปดาวสามแฉกเล็กน้อยอันเนื่องมาจากตำแหน่งการไหลที่มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 คอนทัวร์ความเร็วของการไหลภายในท่อเมมเบรนที่ความดันแตกต่างผ่านเมมเบรน 0.3 bar

(ก) ดาวสามแฉก

(ข) ดาวสี่แฉก

(ค) ดาวห้าแฉก^[18]

(ง) ดาวหกแฉก^[18]

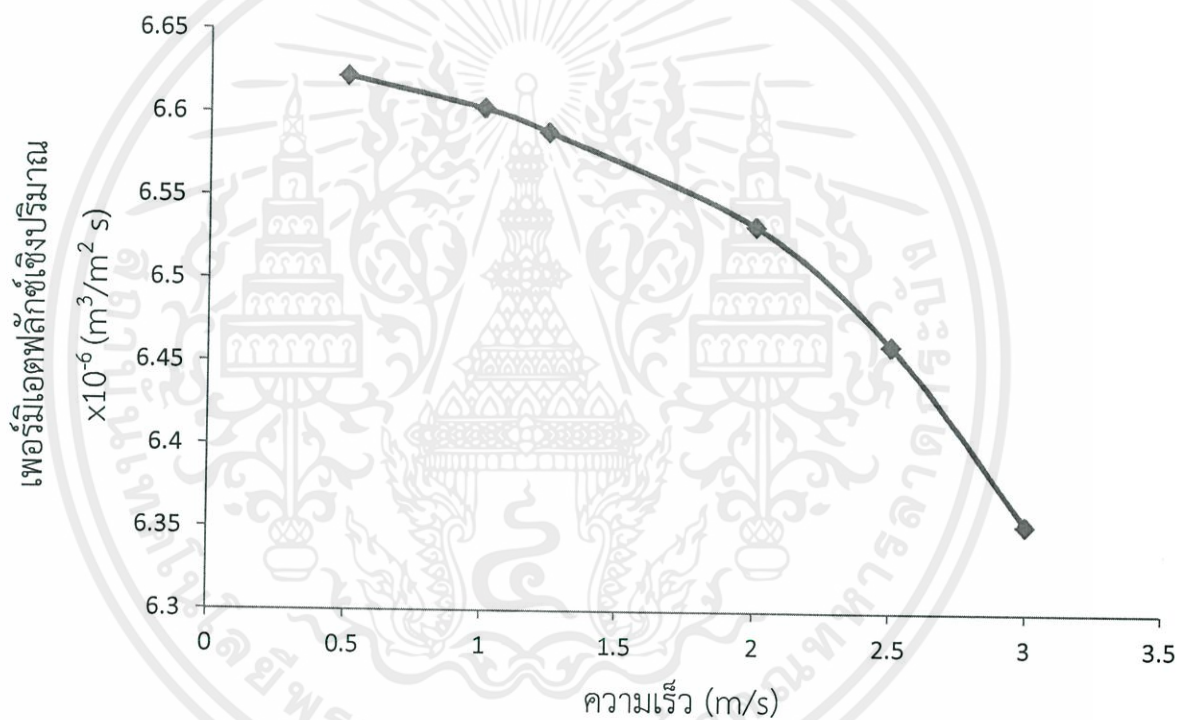
(จ) ข้าวหลามตัด

(ฉ) สี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ใช้ในการกรองกับฟลักซ์ของเพอร์มิเอต

จากการจำลองการไหลผ่านท่อเมมเบรนรูปดาวสี่แฉกพบว่าความเร็วที่ใช้ในการกรองก็เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อเพอร์มิเอตฟลักซ์ รูปที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความเร็วที่ใช้ในกระบวนการกรองกับเพอร์มิเอตฟลักซ์ของท่อรูปดาวสี่แฉกที่ความดันแตกต่างผ่านเมมเบรนเท่ากับ 0.3 bar เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เพอร์มิเอตฟลักซ์ลดลง โดยในช่วงความเร็วต่ำเป็นรูปแบบการไหลแบบราบเรียบ จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเพอร์มิเอตฟลักซ์เล็กน้อย แต่สำหรับที่ความเร็วสูงจะเป็นรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน จะส่งผลต่อการลดลงของเพอร์มิเอตฟลักซ์ที่รุนแรง



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเพอร์มิเอตฟลักซ์กับความเร็วของท่อเมมเบรนรูปดาวสี่แฉกที่ความดันแตกต่างผ่านเมมเบรน 0.3 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยความเร็วของการไหลที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลทำให้ลักษณะการไหลภายในท่อเมมเบรนเกิดการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.6 ที่แสดงถึงคอนทัวร์ความเร็วของการไหลภายในท่อเมมเบรนรูปดาวสี่แฉกที่ความเร็วต่างๆ ณ ความดันแตกต่างกันเท่ากับ 0.3 bar

รูปที่ 4.6 ก เป็นคอนทัวร์ความเร็วของรูปดาวสี่แฉกเมื่อใช้ความเร็วในการกรองเท่ากับ 1 m/s พบว่า ความเร็วที่บริเวณกึ่งกลางของรูปดาวมีความเร็วสูงที่สุด ซึ่งความเร็วจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อใกล้กับพื้นผิวของเมมเบรน บริเวณมุมแฉกของดาวที่มีลักษณะเป็นมุมแหลมจะมีความเร็วที่ต่ำกว่าที่บริเวณมุมกลับ อันเนื่องมาจากผลของชั้นขอบเขตของการไหลผ่านพื้นผิวทำมุม โดยเมื่อเราพิจารณาแกนการไหลจะพบว่า แกนการไหลจะอยู่ภายในส่วนกลางของรูปดาว และมีการเปลี่ยนแปลงตามมุมของรูปดาว อันเนื่องมาจากความเร็วของไหลที่ต่ำจะไม่สามารถทำลายชั้นขอบเขตที่มุมกลับของดาวได้ แรงเสียดทานที่มุมกลับจะมีอิทธิพลที่รุนแรง การไหลจึงมีการเปลี่ยนแปลงตามรูปทรงของผนัง

รูปที่ 4.6 ข เป็นคอนทัวร์ความเร็วของรูปดาวสี่แฉกเมื่อใช้ความเร็วในการกรองเท่ากับ 2 m/s พบว่าแกนการไหลนั้นมีลักษณะกว้างกว่ารูปที่ 4.6 ก ซึ่งแกนการไหลจะขยายบริเวณเข้าไปใกล้กับบริเวณมุมกลับของแฉกรูปดาว ทำให้ความเร็วที่บริเวณมุมกลับมีความเร็วที่สูงมากซึ่งใกล้เคียงกับบริเวณจุดศูนย์กลางของรูปดาว

รูปที่ 4.6 ค เมื่อใช้ความเร็วในการกรองเท่ากับ 3 m/s จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแกนการไหลค่อนข้างมาก อันเนื่องมาจากการไหลเป็นรูปแบบปั่นป่วน แกนการไหลจะขยายเข้ามาภายในบริเวณแฉกมุมกลับของรูปดาว

เมื่อทำการเปรียบเทียบแกนการไหลของแต่ละความเร็ว พบว่าเมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้นความเร็วที่บริเวณมุมกลับของแกนการไหล จะมีความเร็วที่ใกล้เคียงกับแกนกลางของความเร็วรูปดาวมากขึ้นเรื่อยๆ โดยจากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้สามารถนำสมการแบร์นูลลีมาอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงเพอร์มิเอตฟลักซ์ได้ โดยจากการที่ความเร็วของไหลเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ของไหลถูกเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในรูปของพลังงานจลน์ ความดันบริเวณนั้นจึงลดต่ำลง เพื่อรักษาสมดุลของพลังงานตามสมการแบร์นูลลี

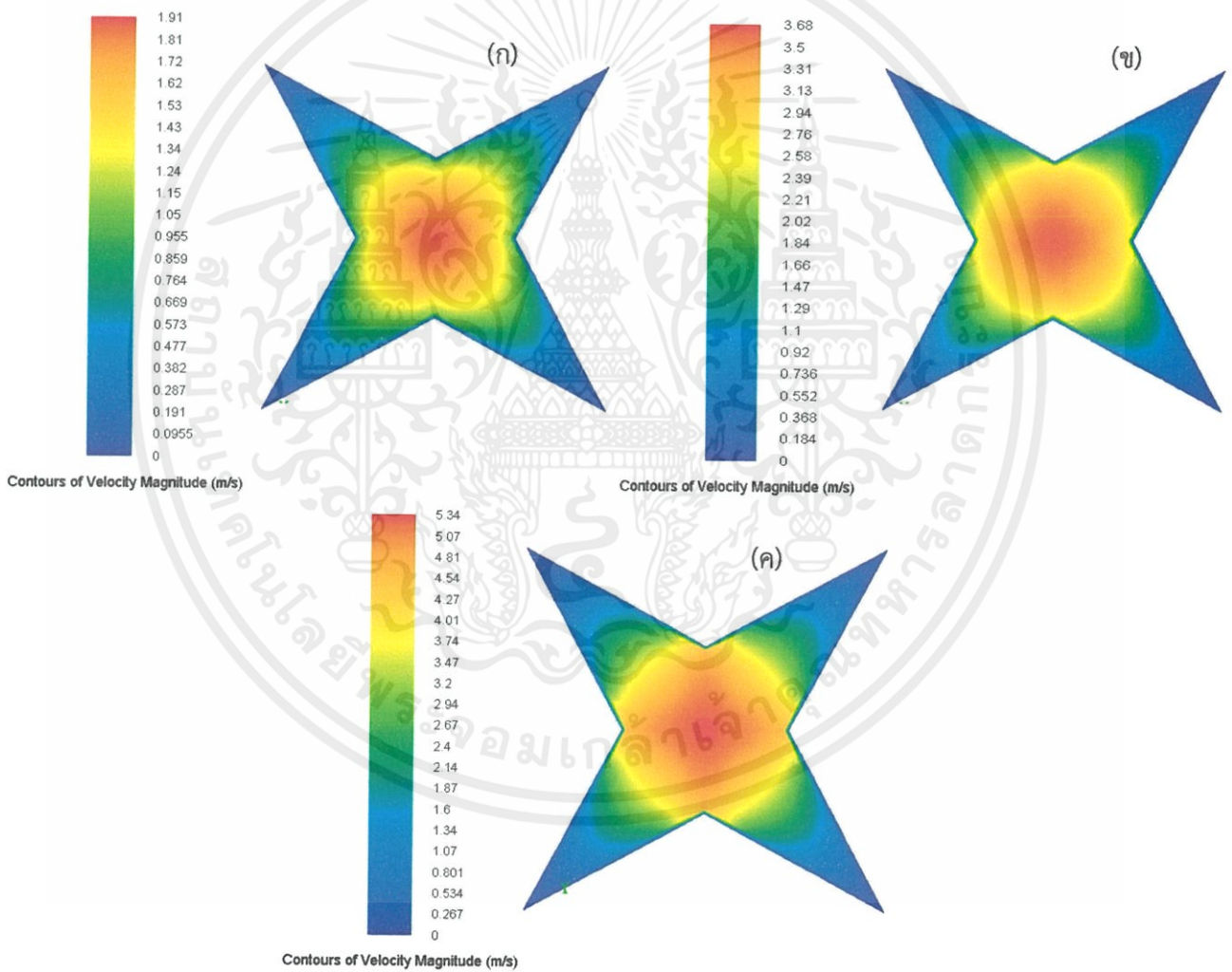
$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{const}$$

(4.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดเพอร์มิเอตฟลักซ์นั้นเกิดจากความแตกต่างของความดันระหว่างความดันด้านเพอร์มิเอตกับความดันที่แผ่นเยื่อผิวของเมมเบรนตามสมการที่ 2.1 ดังนั้นเมื่อความดันของการไหลที่บริเวณนั้นมีค่าต่ำ ฟลักซ์จากการกรองที่เกิดขึ้นจึงลดลงตามไปด้วย

แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มความเร็วกับเพอร์มิเอตฟลักซ์ที่เกิดขึ้น เหมาะสมสำหรับการกรองของอนุภาคที่มีความเข้มข้นที่ต่ำเท่านั้น เนื่องจากความเข้มข้นของอนุภาคต่ำจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเพอร์มิเอตฟลักซ์และฟลักซ์วิกฤตมากตามงานวิจัยของ Laura De Angelis [14] ความเร็วของไหลจึงมีอิทธิพลกับการกรองมากกว่าการเกิดตะกอนบนพื้นผิวเมมเบรน การเลือกใช้ความเร็วที่เหมาะสมจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพของการกรองเช่นกัน



รูปที่ 4.6 คอนทัวร์ความเร็วของการไหลภายในท่อเมมเบรนรูปดาวสี่แฉก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข

5.1 สรุปผลการจำลอง

1. การจำลองเป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหาเพอร์มิเอตพลักซ์ของท่อเมมเบรนรูปแบบต่างๆ ในการจำลองจะใช้รูปแบบการจำลองคือ RNG k-epsilon
2. ในกระบวนการจำลองจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองของท่อรูปดาวหกแฉกจำนวน 7 ท่อ โดยจากการทำผลเฉลยที่เป็นอิสระต่อกันนั้นจะอยู่ที่ 3.87 ล้านเซลล์ ซึ่งจะมีความคลาดเคลื่อนของพลักซ์เชิงปริมาตรที่ 26.37% และเวลาที่ใช้มีความเหมาะสมในกระบวนการจำลอง ซึ่งในการจำลองนั้นใช้ท่อเมมเบรนแบบท่อเดี่ยว เพื่อลดระยะเวลาในการจำลอง โดยจะเป็นท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางไฮโดรลิกเท่ากับ 2.3 mm รัศมีของท่อเท่ากับ 5 mm และความยาวเมมเบรน 300 mm
3. จากการเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างของเมมเบรนต่างๆ ได้แก่ รูปร่างดาวสามแฉก ดาวสี่แฉก ดาวห้าแฉก ดาวหกแฉก ข้าวหลามตัด และสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยกำหนดให้เส้นผ่าศูนย์กลางไฮโดรลิกเท่ากับ 2.3 mm จากการจำลองพบว่าเพอร์มิเอตพลักซ์หรือพลักซ์ที่ได้จากการกรองในกระบวนการไมโครฟิวเตรชันของรูปร่างดาวสี่แฉก จะได้พลักซ์ที่มากที่สุด ตามด้วย รูปร่างข้าวหลามตัด ดาวสามแฉก ดาวห้าแฉก ดาวหกแฉก และสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามลำดับ
4. ชั้นขอบเขต ความยาวของแฉกดาว รวมไปถึงขนาดมุมของแฉกดาว จะส่งผลต่อพลักซ์ทั้งหมด โดยรูปร่างดาวสี่แฉก และดาวสามแฉกจะมีแกนการไหลที่กว้างเข้าไปบริเวณมุมบ้านของแฉกดาว จึงทำให้ชั้นขอบเขตถูกทำลายลง แต่อย่างไรก็ตามดาวสี่แฉกจะมีพื้นที่บริเวณมุมกลับมากกว่าดาวสามแฉก จึงทำให้เพอร์มิเอตพลักซ์มากกว่า แต่สำหรับรูปร่างข้าวหลามตัดจะเกิดจากการรักษาสมดุลของชั้นขอบเขตการไหลในมุมแหลม จึงทำให้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของขอบเมมเบรน มีชั้นขอบเขตที่บางถึงสี่ตำแหน่ง การไหลผ่านรูพรุนจึงเกิดได้ดีกว่ารูปร่างดาวสามแฉกที่มีสามตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ภายในแฉกดาวจะเกิดการไหลทุติยภูมิ ซึ่งเป็นกระแสหมุนวนภายในมุมแหลมของแฉกดาว จึงเป็นการขัดขวางการถ่ายโอนมวลเข้าเมมเบรน แต่อย่างไรก็ตามหากภายในของไหลมีอนุภาค จะช่วยลดการเกาะติดบนพื้นผิวเมมเบรน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุภาคเช่นกัน
6. รูปร่างหัวแฉก และดาวหกแฉก จะมีชั้นขอบเขตเข้ามาปิดบริเวณมุมป้านของแฉกดาว เนื่องจากมีความยาวของแฉกที่สั้น ทำให้มีเพอร์มิเอตฟลักซ์ต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นต่อรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะมีชั้นขอบเขต ปกคลุมพื้นผิวทั้งหมด การถ่ายเทมวลผ่านรูพรุนจึงเกิดได้ยาก
7. ของไหลที่มีอนุภาคขนาดเล็กและมีความเข้มข้นน้อย เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้เพอร์มิเอตฟลักซ์ลดลง เนื่องจากแกนการไหลจะขยายขอบเขตที่กว้างขึ้น จะส่งผลต่อความดันที่ใช้ในการขับเคลื่อนฟลักซ์ลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในกระบวนการจำลอง ควรจะมีการใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลของอนุภาคที่อยู่บนพื้นผิวเมมเบรน รวมไปถึงจะได้ผลการจำลองที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น
2. ในกระบวนการจำลอง สามารถทำการศึกษาแนวโน้มผลของการเปลี่ยนแปลงเพอร์มิเอตฟลักซ์เมื่อความยาวมุมแฉกของรูปดาวและขนาดมุมของแฉกดาวเกิดการเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากปัจจัยทั้งสอง ก็ล้วนแต่เป็นปัจจัยส่งผลต่อประสิทธิภาพการกรองเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] T.Y. Chiu, A.E. James, Critical flux enhancement in gas assisted microfiltration, *Journal of Membrane Science*, 281 (2006), 274–280
- [2] Richard W. Baker. *Membrane Technology and Application*. 3rd Edition. California : John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [3] ชันทอง สุนทรภา. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane Separation Technology). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [4] เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ. *พื้นฐานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ*. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2013.
- [5] H. K. Versteeg, W. Malalasekera. *An introduce to Computational Fluid Dynamic The finite volume method*. Malaysia : Prentice Hall, 1995.
- [6] R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot. *Transport Phenomena*. 2nd Edition. United State of America : John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [7] ANSYS, Inc. ANSYS FLUENT 7.19.2 User's Guide - Momentum Equations for Porous Media , 2009
- [8] ANSYS, Inc. ANSYS FLUENT 4.2 User's Guide - Turbulent , 2009
- [9] Christie John Geankopls. *Transport Process and Seperation Process Principle (Include Unit Operation)*. 4th edition. The United State of America : Prentice Hall, 2003.
- [10] S. Wattananusorn, Interference of Laminar Flow on Displacement Thickness in a Streamwise Corner, *Journal of power and energy*, 218(2004), 51-53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] K.A. Caridis, T.D. Papathanasiou, Effective Permeability of Multi-Channel Cross-Flow Filtration Membranes from Permeate Flux Measurements Using the Boundary Integral Method, *Journal of chemical engineering of japan*, 30, 839-845
- [12] M. Rahimi, S.S. Madaeni, K. Abbasi, CFD modeling of permeate flux in cross-flow microfiltration membrane, *Journal of Membrane Science*, 255 (2005), 23–31
- [13] T.Y. Chiu, A.E. James, Critical flux determination of non-circular multi-channel ceramic membranes using TiO_2 suspensions, *Journal of Membrane Science*, 254 (2005), 295–301
- [14] Laura De Angelis a, María Marta Fidalgo de Cortalezzi, Ceramic membrane filtration of organic compounds: Effect of concentration, pH, and mixtures interactions on fouling, *Separation and Purification Technology*, 118 (2013), 762–775
- [15] Phenolic Enhancement and Tannin Adjustment with Ultrafiltration [Online]. Available : <http://www.winesecrets.com/wine-ultra-filtration.asp>
- [16] T.Y. Chiu, A.E. James, Critical flux determination of non-circular multi-channel ceramic membranes using TiO_2 suspensions, *Journal of Membrane Science*, 254 (2005), 295–301
- [17] S. WATTANANUSORN, Determination of Membrane Resistance for Cross-Flow Microfiltration in a Rectangular Module including Back-Flow, *Journal of Process Mechanical Engineering*, 222(2008), 75-77
- [18] K. Saiyood et al, CFD Modeling of Microfiltration with Seven-Star Channel, *Ladkrabang engineering journal*, in press.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณหา เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

จากรูปท่อเมมเบรนรูปดาวสี่แฉก จะมีพื้นที่หน้าตัดของของไหลเท่ากับ 25.70 mm^2 และเส้นรอบรูปของพื้นที่หน้าตัดของของไหลเท่ากับ 14.77 mm เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกจะเท่ากับ

$$D_H = \frac{4A}{P}$$

(ก.1)

โดย D_H คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก A คือ พื้นที่หน้าตัดของของไหล

P คือ เส้นรอบรูปของพื้นที่หน้าตัดของของไหล

$$D_H = \frac{4 \times 14.77 \text{ mm}^2}{25.70 \text{ mm}}$$

$$D_H = 2.3 \text{ mm}$$

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นความปั่นป่วน

จากสมการตัวเลขเรย์โนลด์

$$Re = \frac{\rho v D_H}{\mu}$$

(ก.2)

โดย ρ คือความหนาแน่นของของไหล v คือความเร็วของไหล และ μ คือความหนืดของของไหล

โดยในการศึกษาจะใช้น้ำในการจำลอง ซึ่งน้ำจะมีความหนาแน่นเท่ากับ 998.2 kg/m^3 และความหนืดเท่ากับ 0.001003 kg/m s ที่อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ความดัน 1 bar

$$Re = \frac{(998.2 \text{ kg/m}^3)(0.023 \text{ m})(2 \text{ m/s})}{0.001003 \text{ kg/m s}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Re = 4577.99$$

สำหรับการไหลเต็มท่อจะสามารถคำนวณหาความเข้มข้นความปั่นป่วนได้จากสมการ

$$I = 0.16Re^{-1/8} \quad (ก.3)$$

$$I = 0.16(4577.986)^{-1/8}$$

$$I = 0.05578$$

คิดเป็น ความเข้มข้นความปั่นป่วนเท่ากับ 5.578%

ตัวอย่างการคำนวณเพอร์มิเอตฟลักซ์

ท่อรูปดาวสี่แฉก ณ ความดันแตกต่างผ่านเมมเบรนเท่ากับ 0.3 bar ที่รัศมีของเมมเบรนที่ 0.0049 m และ 0.005 m จะมีความดันเท่ากับ 1491.45 Pa และ 1163.83 Pa ตามลำดับ โดยความต้านทานความหนืดเท่ากับ $5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2}$ และความหนาเมมเบรนที่ระยะวัดความดันเท่ากับ 0.0001 m

จากสมการการคำนวณหาเพอร์มิเอตฟลักซ์

$$J = \frac{\Delta P}{\mu \cdot R_t} \quad (ก.4)$$

$$J = \frac{1491.45 - 1163.83 \text{ Pa}}{(0.001003 \text{ kg/m} \cdot \text{s})(5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2})(0.0001 \text{ m})}$$

$$J = 6.53 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{s}$$

โดยพื้นที่ของท่อรูปดาวสี่แฉกที่สัมผัสของไหลทั้งหมดเท่ากับ 0.0077 m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J = \frac{6.53 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ s}}{0.0077 \text{ m}_{\text{wet}}^2}$$

$$J = 8.47 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ s per m}_{\text{wet}}^2$$

จึงได้ว่าเพอร์มิเอตฟลักซ์เชิงปริมาตรต่อพื้นที่สัมผัสของไหลจึงเท่ากับ $8.47 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ per m}_{\text{wet}}^2$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม GAMBIT

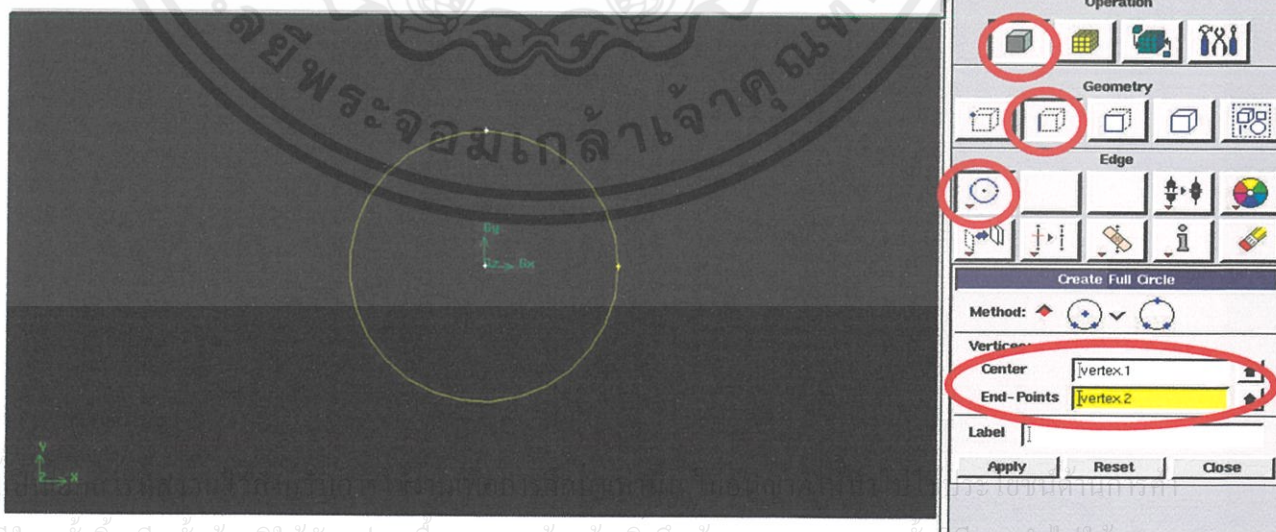
ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองของเมมเบรนรูปทรงดาวสี่แฉก

1. ทำการสร้าง vertex 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่ง $x=0, y=5$ และ $x=5, y=0$ โดยการเลือก operation – geometry – vertex – from coordinate และทำการระบุตำแหน่งพิกัด



รูปที่ ข.1 การสร้าง vertex

2. ทำการสร้างเส้นวงกลมรัศมี 4 mm โดยทำการเลือก operation – geometry – edge – circle ทำการระบุตำแหน่ง center และ end-points อีก 2 จุด



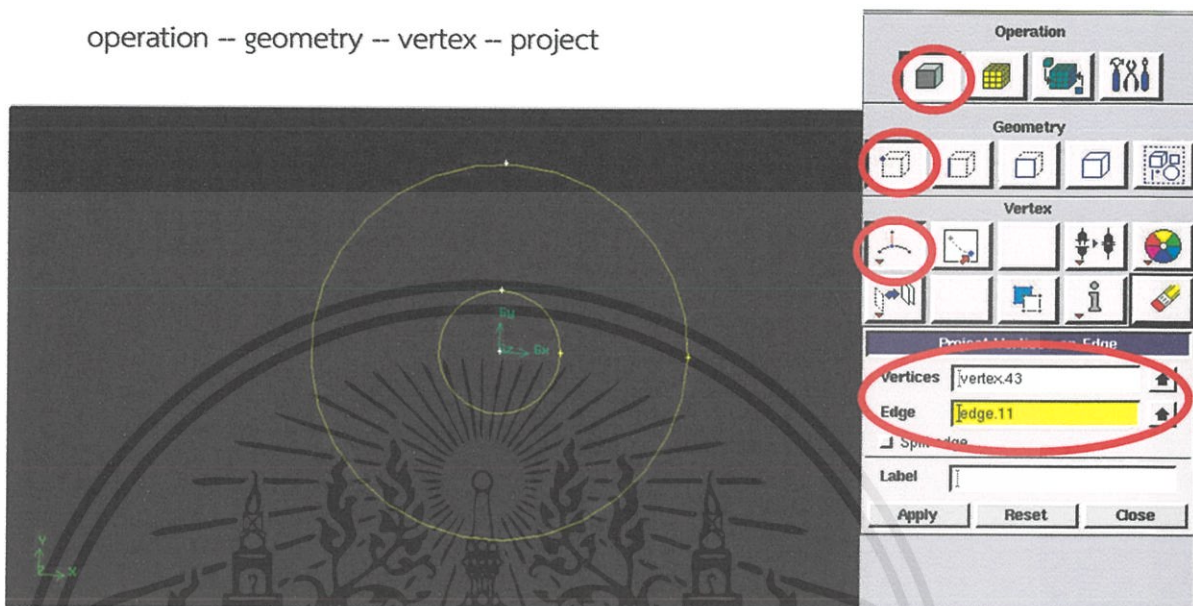
รูปที่ ข.2 การสร้างวงกลม

เอกสารนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและข้อมูลข้างต้นลงในเว็บไซต์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข

3. ทำการสร้างเส้นวงกลมรัศมีเท่ากับ 1.3160 mm และทำการ project จุดศูนย์กลางของวงกลมไปที่เส้นทั้งสอง

operation -- geometry -- vertex -- project



รูปที่ ข.3 การ project จุดบนเส้น

4. ที่วงกลมรัศมี 4 mm คัดลอกจุดทำมุม 45° และคัดลอกจุดนั้นอีก 3 ตำแหน่งทำมุม 90° ที่วงกลมรัศมี 1.3160 mm คัดลอกจุดทำมุม 90° จำนวน 3 ตำแหน่ง
operation -- geometry -- vertex -- move/copy -- rotate

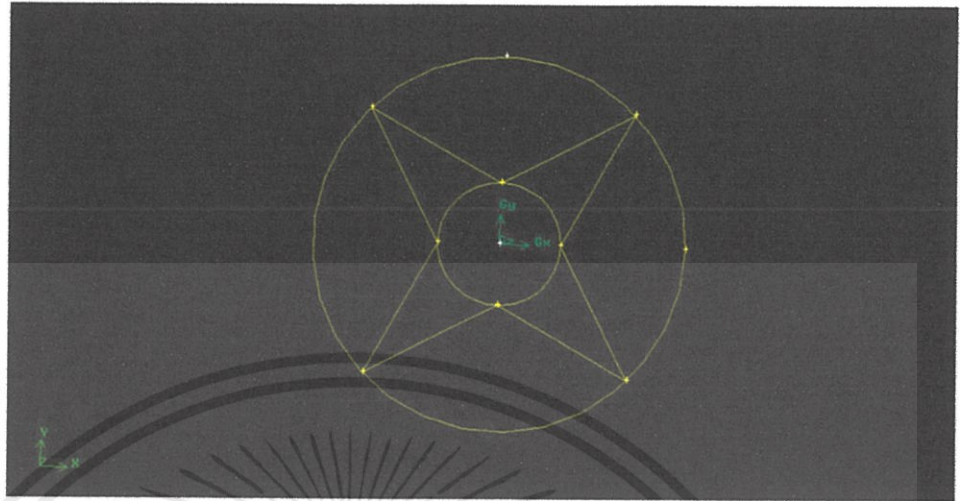


รูปที่ ข.4 การคัดลอกจุดเพื่อสร้างแฉกดาว

เอกสารนี้เป็น

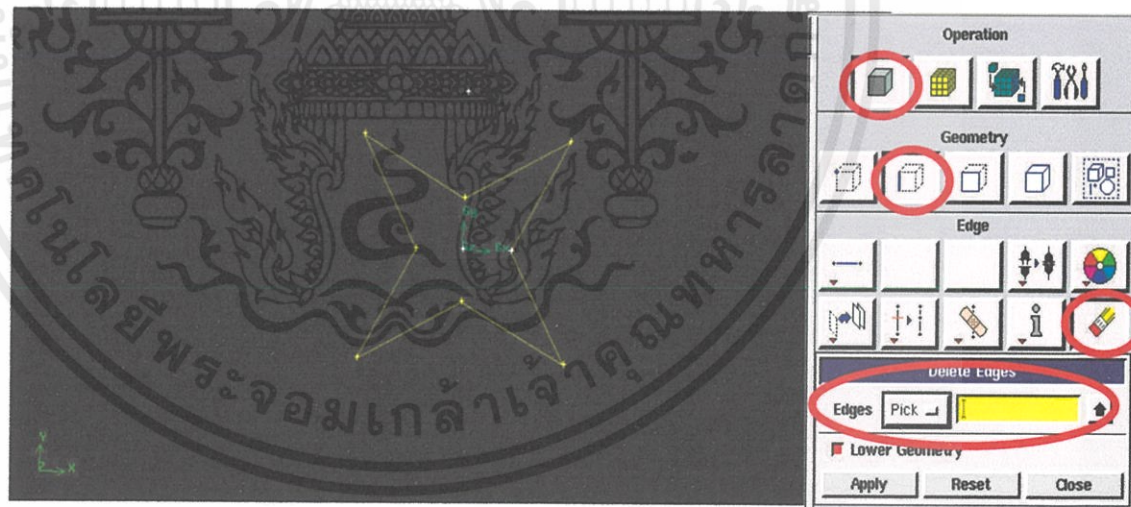
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่หรือแจกจ่ายข้อมูลใดๆของเอกสารทุกฉบับโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

5. ลากเส้นต่อจุดให้เกิดแฉกดาวดังรูป operation – geometry – edge – straight



รูปที่ ข.5 การสร้างเส้นแฉกดาว

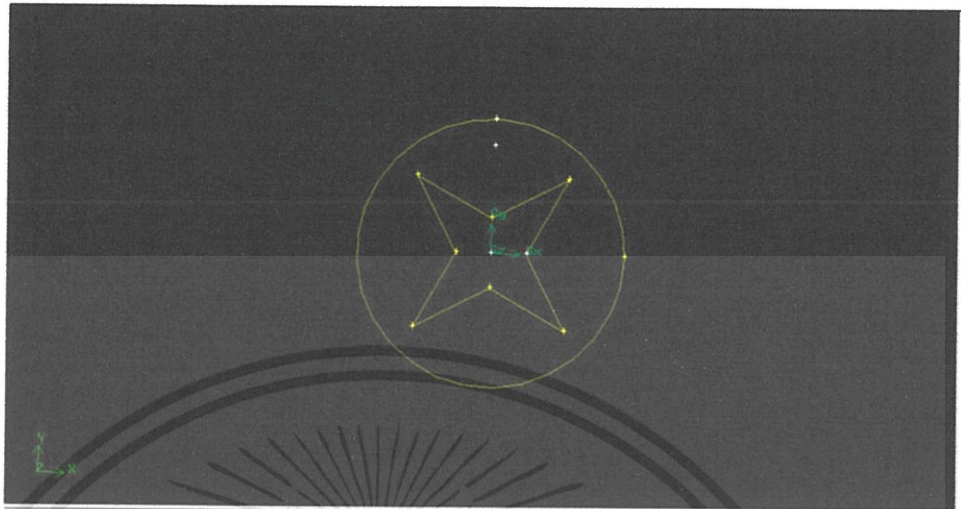
6. ทำการลบวงกลมทั้งสองวงออก operation – geometry – edge – delete edge



รูปที่ ข.6 การลบเส้นวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

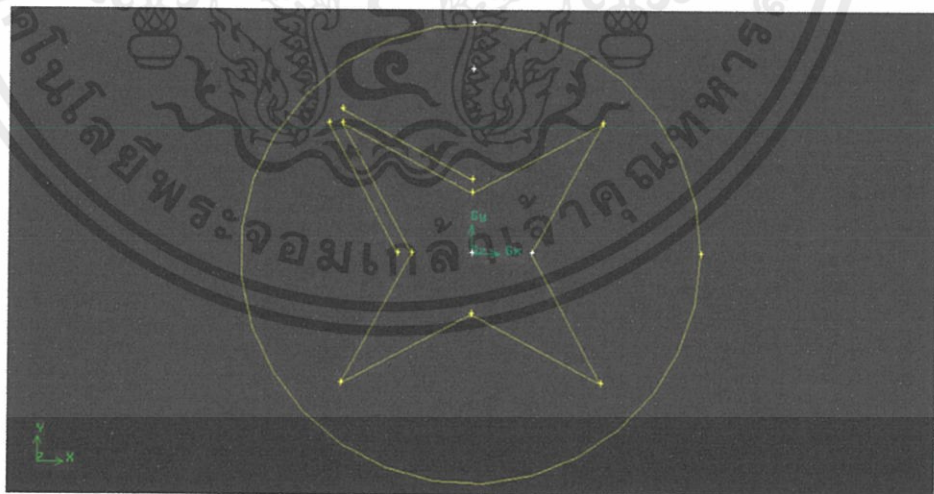
7. สร้างเส้นวงกลมรัศมีเท่ากับ 5 mm



รูปที่ ข.7 รูปท่อดาวสีแฉก

8. ทำการคัดลอก โดยการ translate โดยเส้นด้านบนเคลื่อนไปในแนวแกน y เท่ากับ 0.3 และเส้นด้านขวาเคลื่อนไปในแนวแกน x เท่ากับ -0.3

operation – geometry – vertex – move/copy – translate

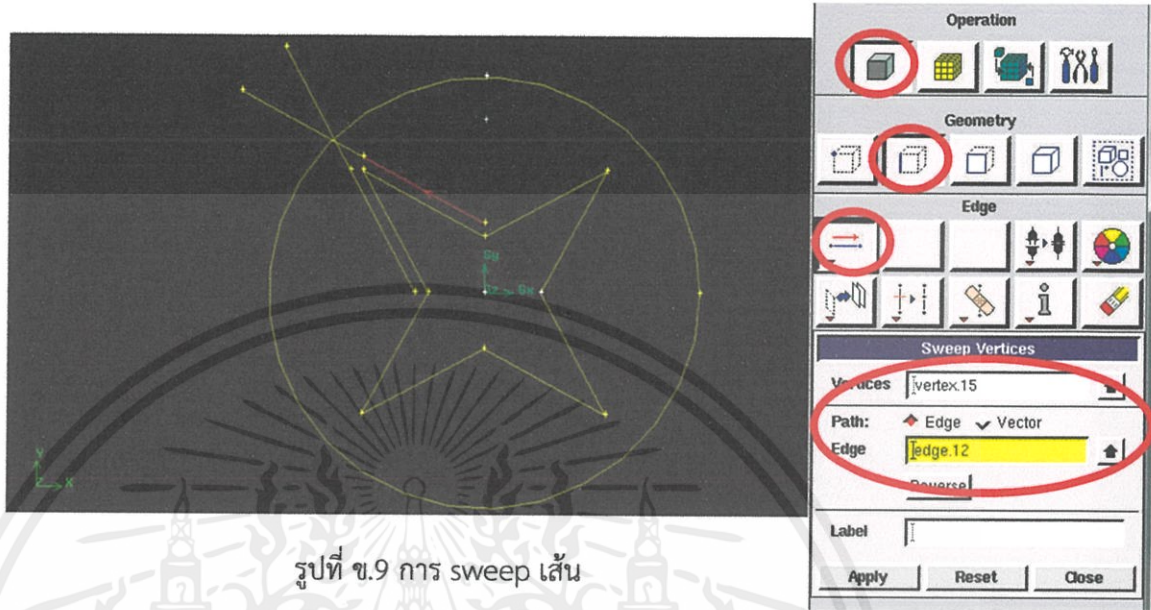


รูปที่ ข.8 การคัดลอกโดยการเคลื่อนย้ายเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

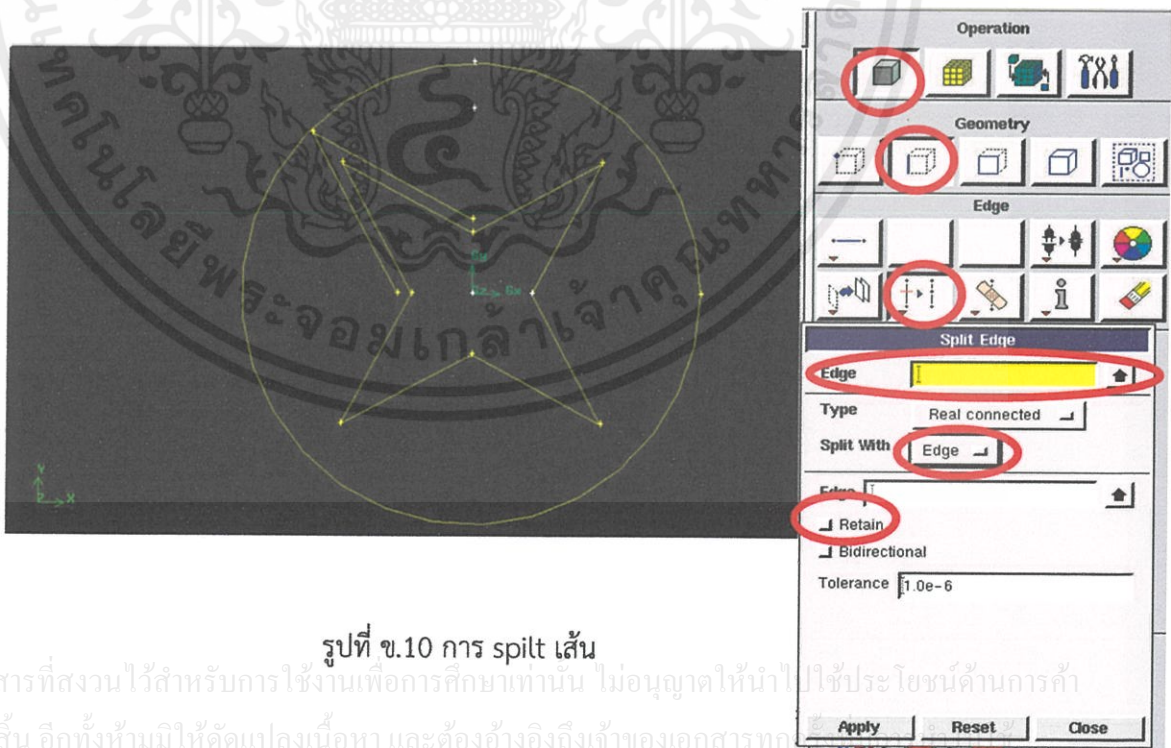
9. ลากเส้นทั้งสองเส้นให้เกิดจุด

operation -- geometry -- edge -- sweep -- เลือกจุดที่ต้องการลากเส้นต่อ



รูปที่ ข.9 การ sweep เส้น

10. ทำการ merge เส้นทั้งสอง และ ทำการ spilt เส้นทั้งสอง และลบเส้นส่วนเกินออก

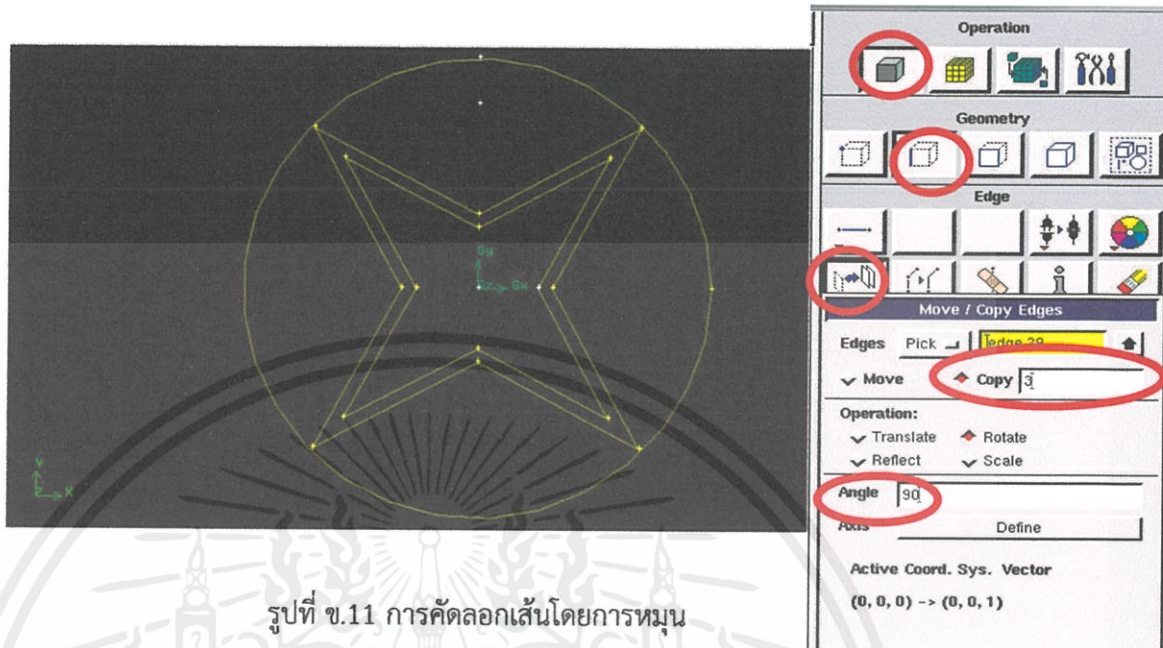


รูปที่ ข.10 การ spilt เส้น

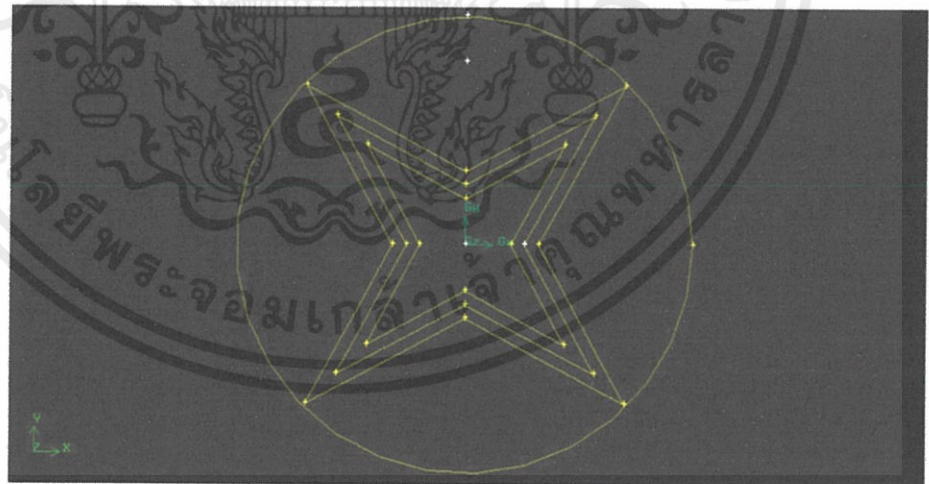
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุก

11. คัดลอกแฉกดาวห้ามุม 90° จำนวน 3 ตำแหน่ง

operation – geometry – edge – move/copy – rotate

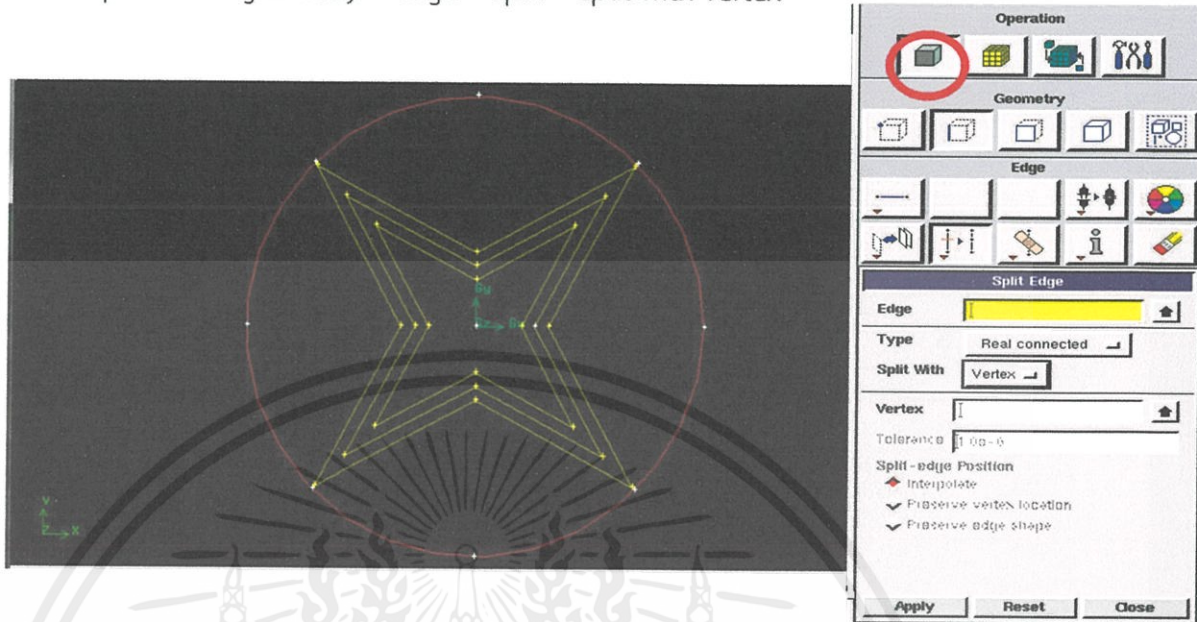


12. ทำการสร้างแฉกดาวภายในโดยมีระยะห่างเท่ากับ 0.3 mm ตามวิธีการข้อ 8-11



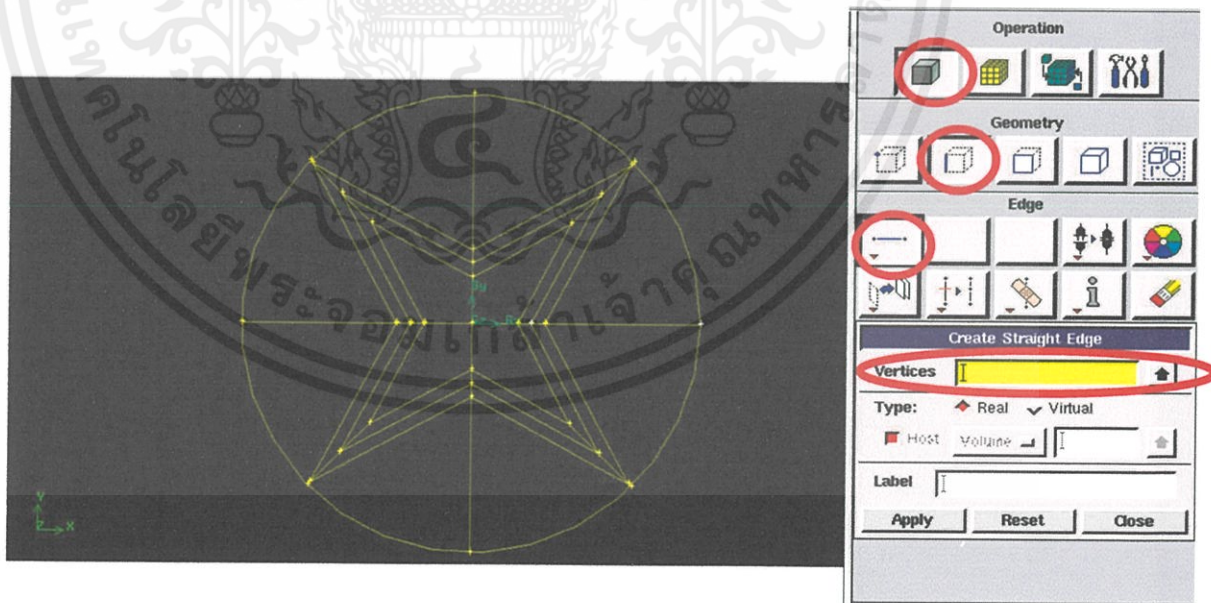
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. สร้างจุดทำมุม 90° จำนวน 3 ตำแหน่งและ split เส้นตามจุดนั้น
operation -- geometry -- edge -- split -- split with vertex



รูปที่ ข.13 การคัดลอกจุดทำมุม 90°

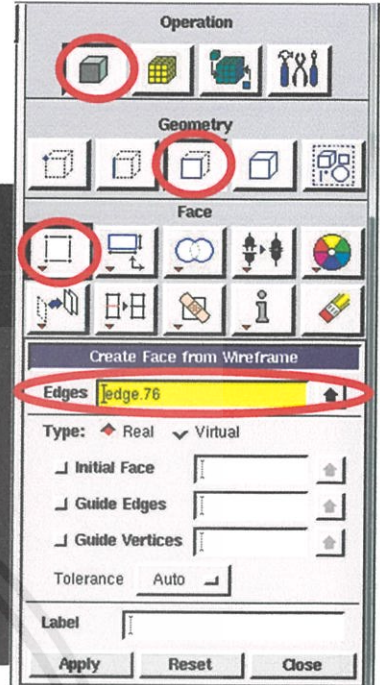
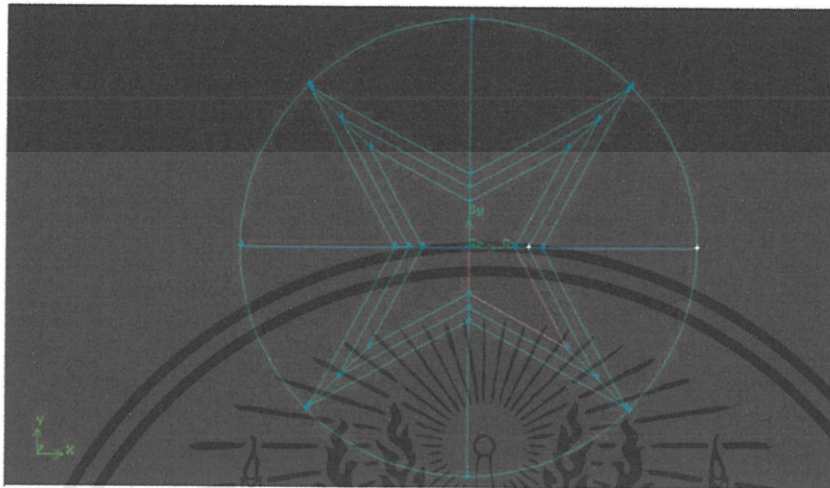
14. ลากเส้นตามรูปที่ ข.14 เพื่อทำการสร้าง face
operation -- geometry -- edge -- straight



รูปที่ ข.14 การสร้างเส้นเพื่อแบ่งพื้นผิว

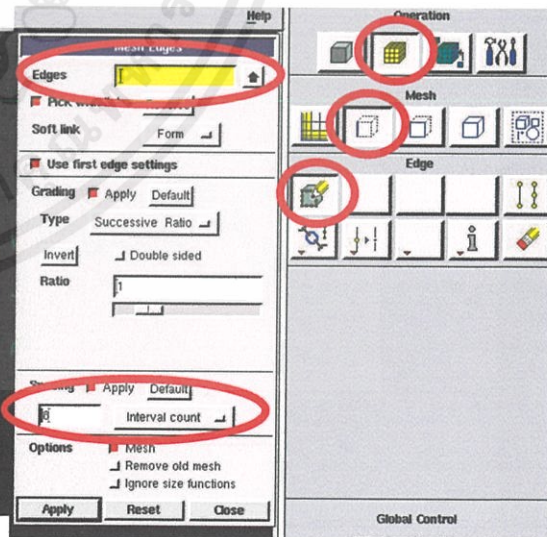
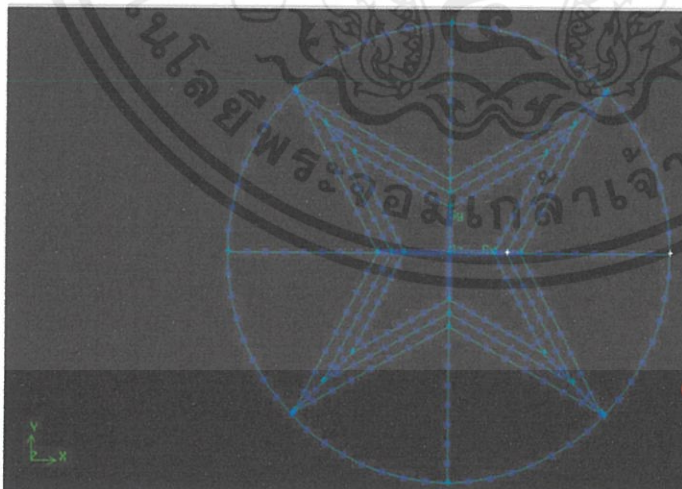
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. สร้าง face ดังรูป ข.15 ตามพื้นผิวที่ทำการแบ่ง
 operation -- geometry -- face -- wireframe



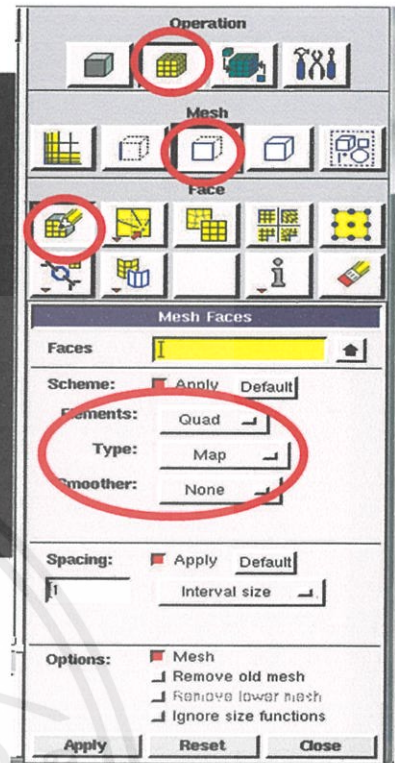
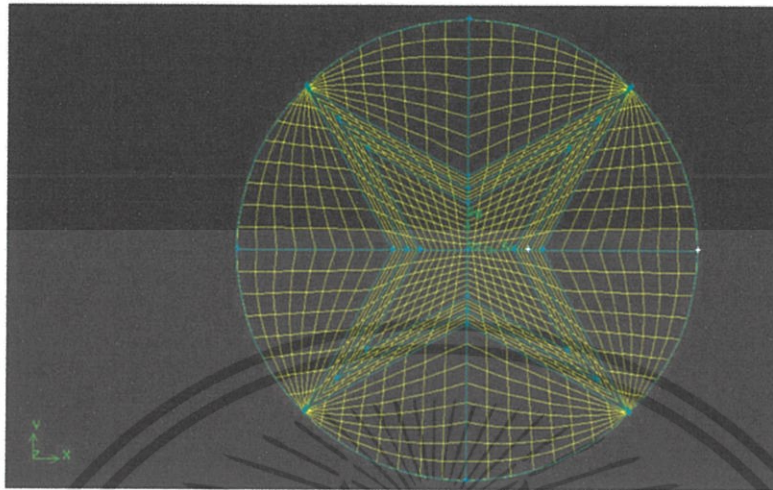
รูปที่ ข.15 การสร้างพื้นผิวแบบ wireframe

16. ทำการกำหนดกริดของรูปทรง กำหนดให้พื้นที่หน้าตัดมีการตีกริดแบบ interval count เท่ากับ 4 บริเวณเส้นเส้นทแยงมุมของแฉกดาว และตีกริดแบบ interval count เท่ากับ 8 ที่บริเวณอื่นทั้งหมด operation -- mesh -- mesh edge



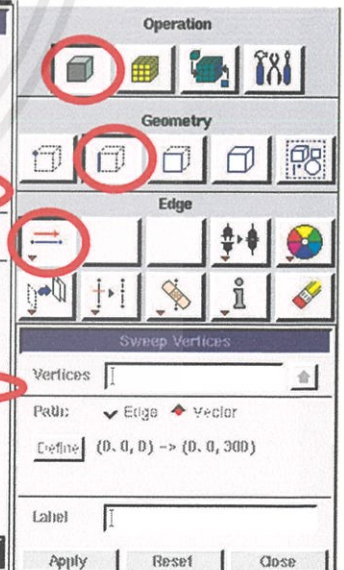
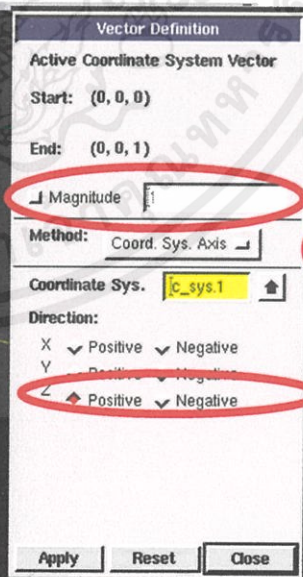
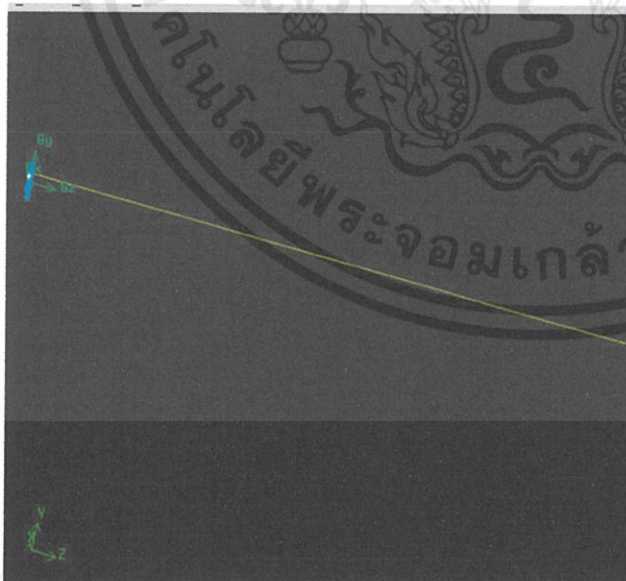
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ ข.16 การสร้าง mesh edge แบบ interval

17. ทำการตีกริดแบบ face โดย element แบบ Quad และ Type แบบ map
 operation -- mesh -- mesh face



รูปที่ ข.17 การสร้าง mesh face แบบ map

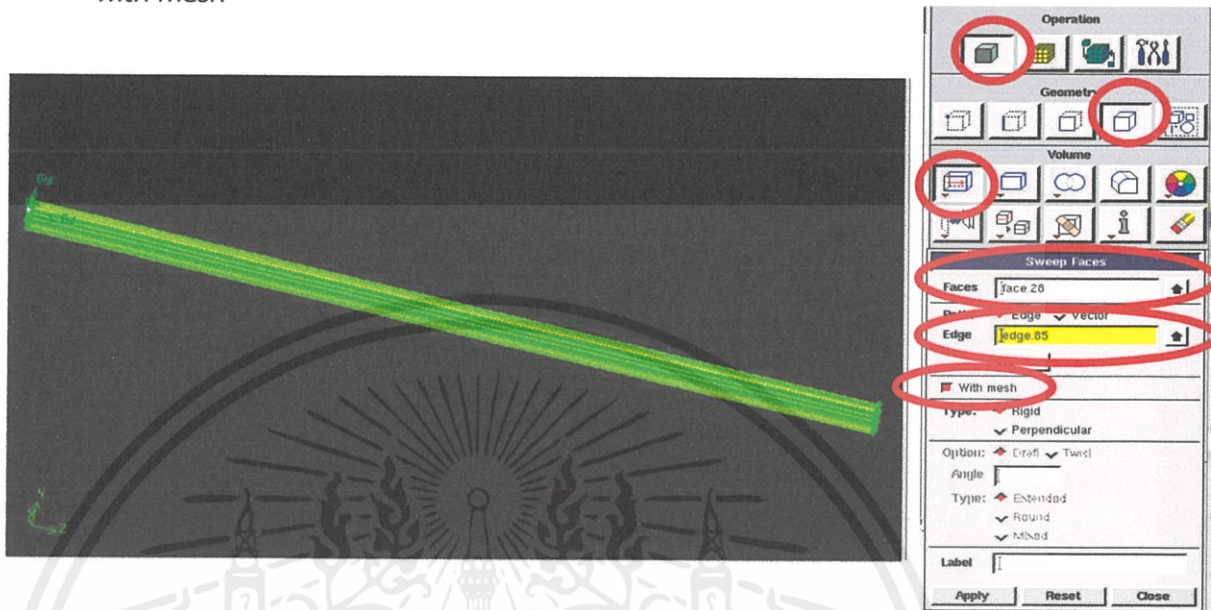
18. ทำการสร้างเส้นโดยการ sweep เส้นจากจุด โดยการใช้การสร้างแบบ vector ในแนวแกน z
 มีขนาดเท่ากับ 300 operation -- geometry -- edge -- sweep -- vector



เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวน วิศวกรรมศาสตรมหาวิทาลัยพระจอมเกล้า

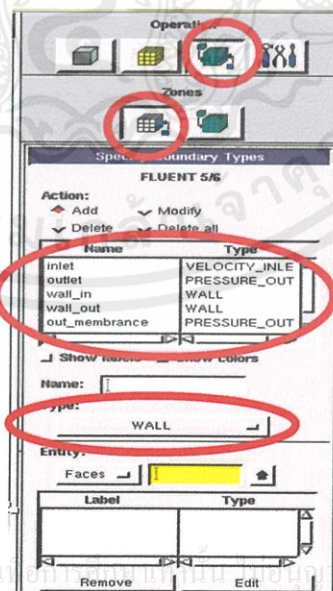
รูปที่ ข.18 การสร้างเส้นเพื่อใช้สำหรับการ sweep เพื่อสร้าง volume

19. ทำการสร้าง volume โดยการสร้างแบบ sweep face กับกริดโดยใช้เส้น จากข้อที่ 18
จะได้ท่อเมมเบรนรูปทรง 3 มิติ operation -- geometry -- volume -- sweep --
with mesh



รูปที่ ข.19 การสร้าง volume เมมเบรน

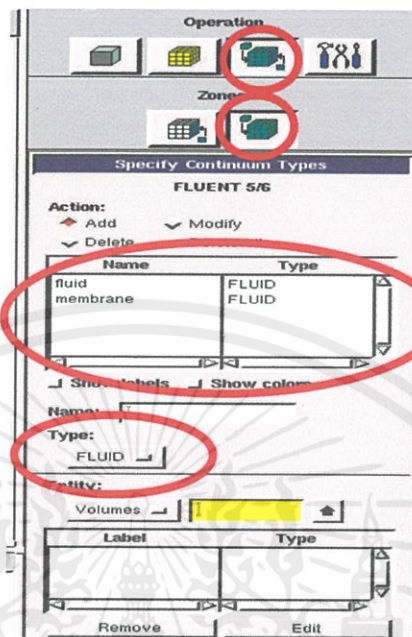
20. ทำการตั้งค่า boundary condition โดยกำหนดให้ inlet เป็น VELOCITY_INLET , outlet
และ out_membrane เป็น PRESSURE_OUTLET , บริเวณผนังทางเข้าและทางออก เป็น
WALL และส่วนอื่นๆ เป็น INTERIOR



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในโครงการวิจัยเท่านั้น หากมีข้อผิดพลาดประการใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.20 การตั้ง boundary condition

21. ทำการตั้งค่า cell zone โดยทำการกำหนดให้มีบริเวณที่ของไหลไหลผ่านและชั้นเมมเบรน



รูปที่ ข.21 การตั้ง cell zone

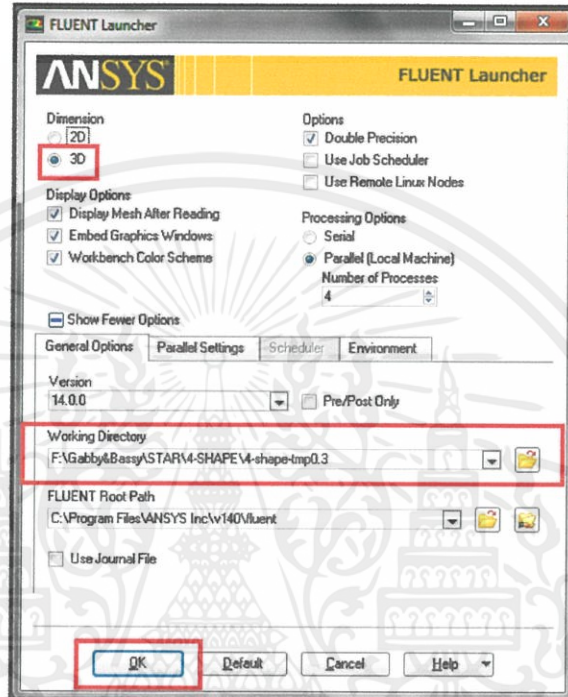
22. ทำการ export mesh เพื่อนำไปกระบวนการคำนวณให้โปรแกรม FLUENT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

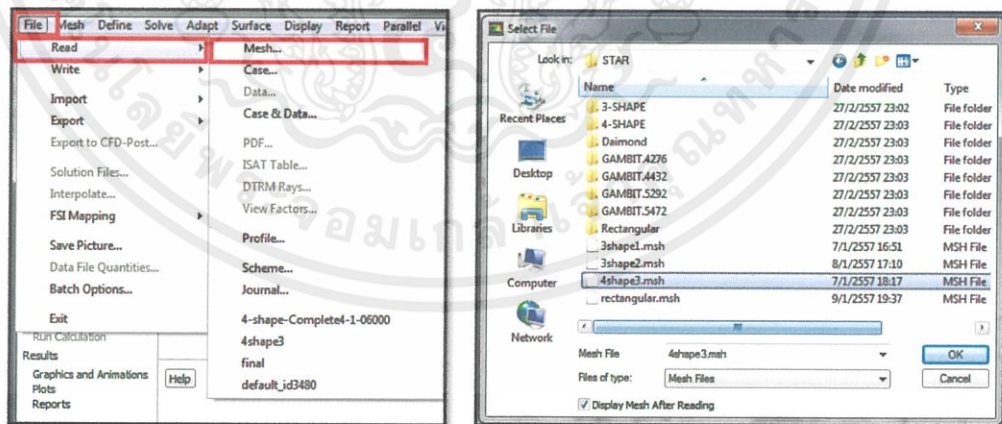
ตัวอย่างการใช้โปรแกรม FLUENT

1. เปิดโปรแกรม FLUENT -- เลือก Dimension เป็น 3D -- เลือก Working Directory เป็นตำแหน่งที่เก็บงานไว้ -- OK



รูปที่ ค.1 การเปิดโปรแกรม FLUENT

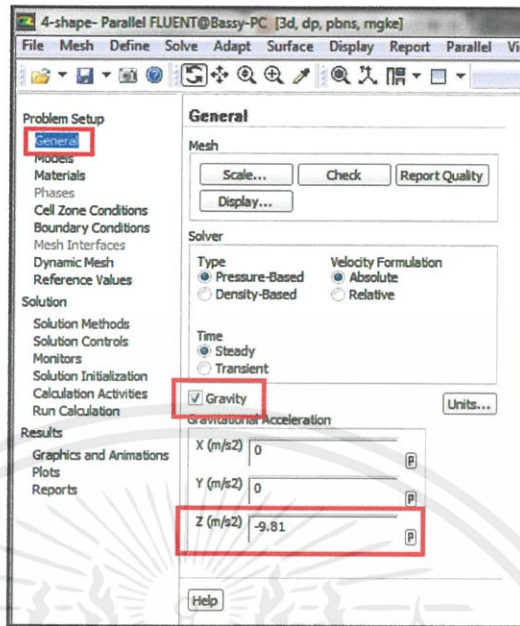
2. เลือก File -- Read -- Mesh -- เลือกเมช -- OK



รูปที่ ค.2 การเปิดแฟ้มงานในโปรแกรม FLUENT

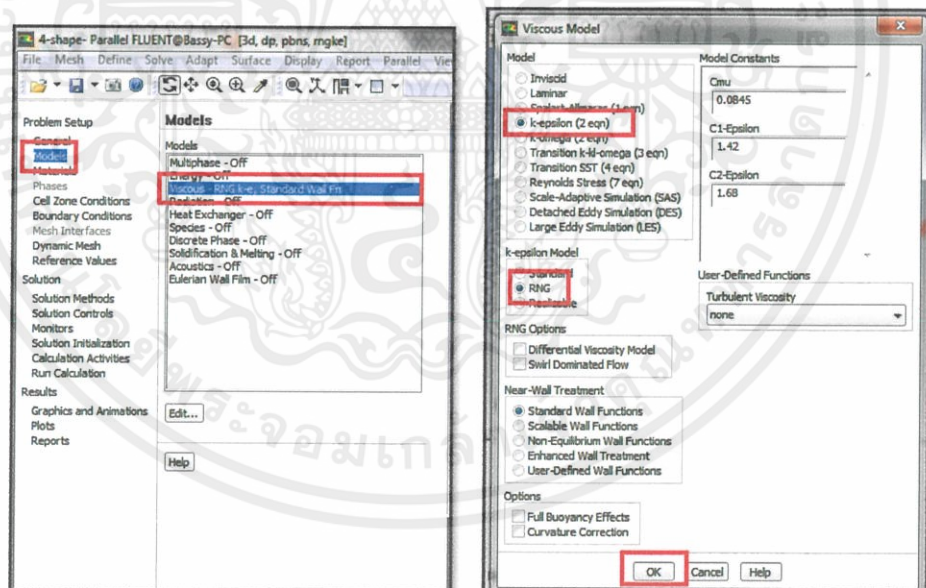
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือก General -- Gravity -- ใส่ค่าแกน z เป็น -9.81



รูปที่ ค.3 การตั้งค่า General

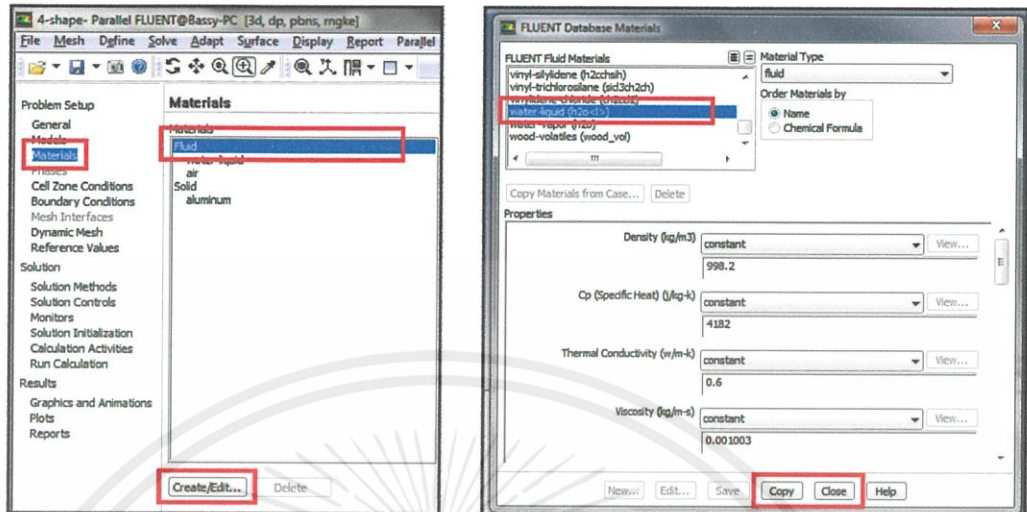
4. เลือก Models -- Viscous -- Edit -- k-epsilon (2 eqn) -- เลือก RNG ใน k-epsilon Model -- OK



รูปที่ ค.4 การตั้งค่า Model

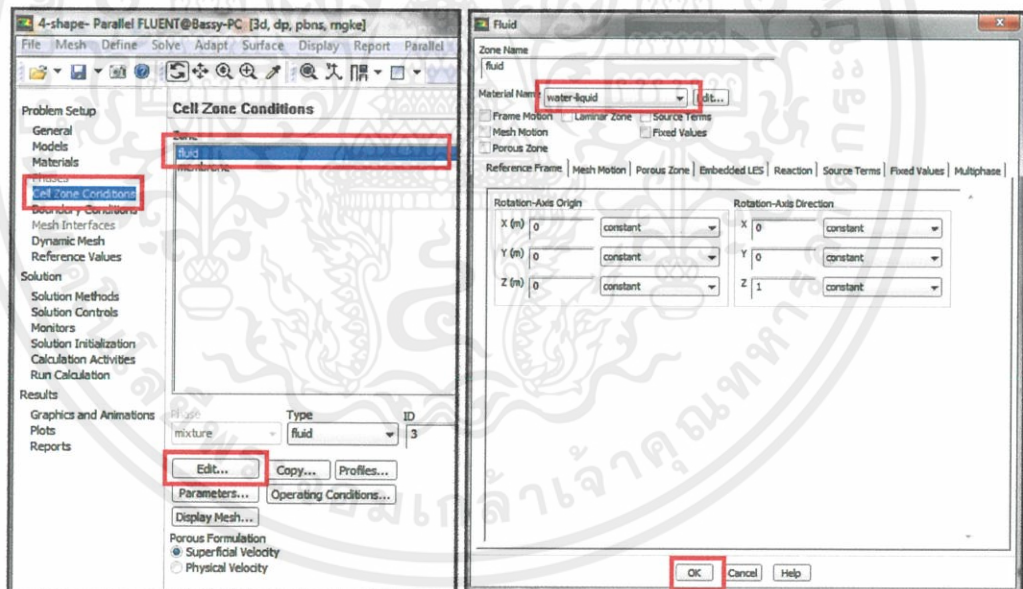
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เลือก Materials -- Fluid -- Create/Edit -- FLUENT Database -- water-liquid (h2o<l>) -- Copy -- Close



รูปที่ ค.5 การตั้งค่า Materials และขั้นตอนการเพิ่ม Materials

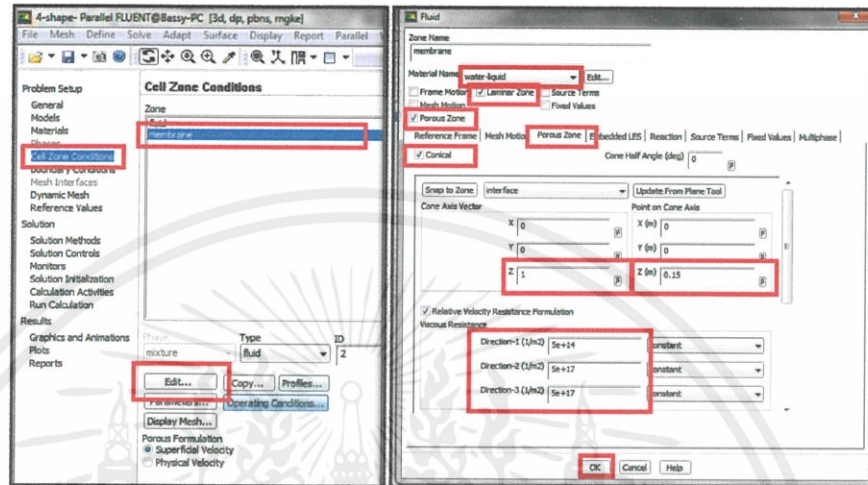
6. เลือก Cell Zone Condition -- fluid -- Edit -- เปลี่ยน Material Name เป็น water-liquid -- OK



รูปที่ ค.6 การตั้งค่า Cell zone condition ของ fluid

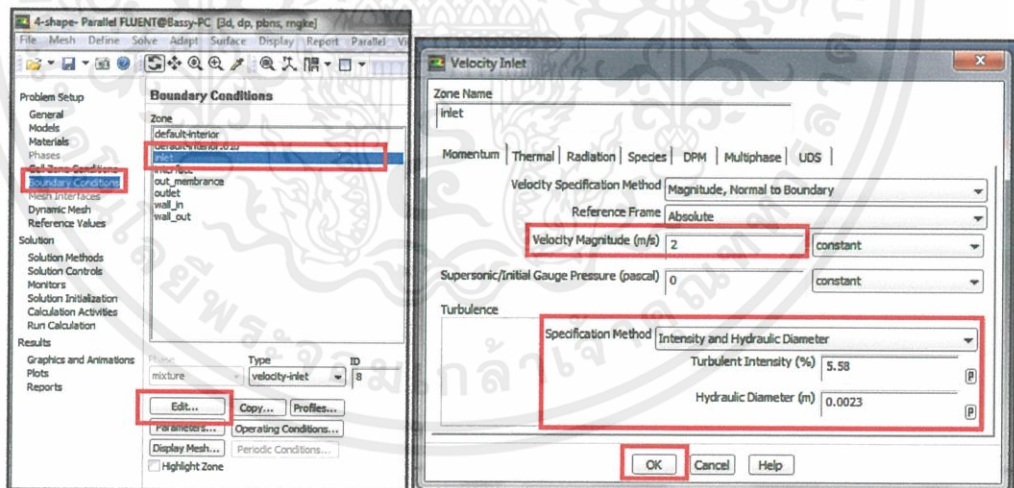
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เลือก Cell Zone Condition -- membrane -- Edit -- เปลี่ยน Material Name เป็น water-liquid -- เลือก Laminar Zone กับ Porous Zone -- Porous Zone -- Conical -- ใส่ค่า Cone Vector Axis ในแกน Z เป็น 1 -- ใส่ค่า Point of Cone Axis ในแกน z เป็น 0.15 ใส่ค่า Viscous Resistance ที่ Direction-1 เป็น $5e+14$ -- ใส่ค่า Viscous Resistance ที่ Direction-2 -- กับ Direction-3 เป็น $5e+17$



รูปที่ ค.7 การตั้งค่า Cell Zone Condition ของ membrane

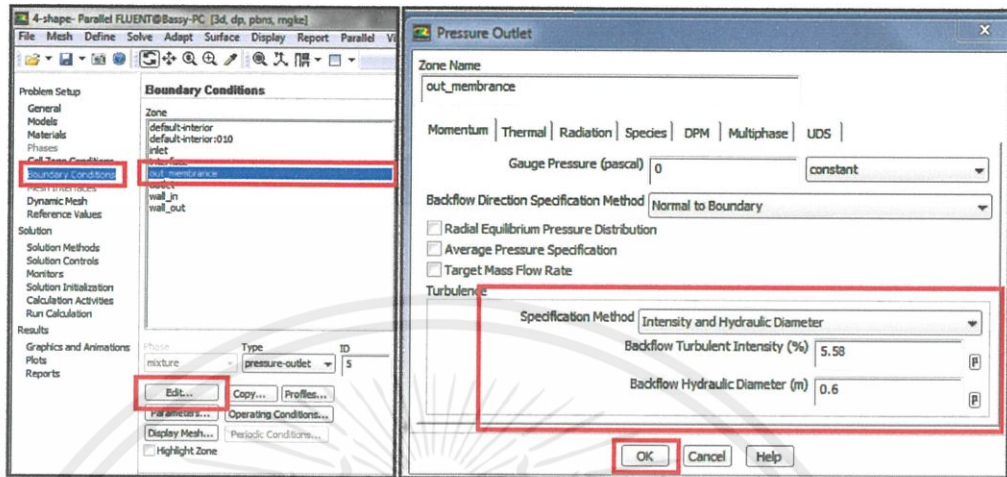
8. เลือก Boundary Condition -- inlet -- Edit -- ใส่ค่า Velocity Magnitude เป็น 2 -- เปลี่ยน Specification Method เป็น Intensity and Hydraulic Diameter -- ใส่ค่า Turbulent Intensity เป็น 5.58 -- ใส่ค่า Hydraulic Diameter เป็น 0.0023 -- OK



รูปที่ ค.8 การตั้งค่า Boundary Condition ของด้าน inlet

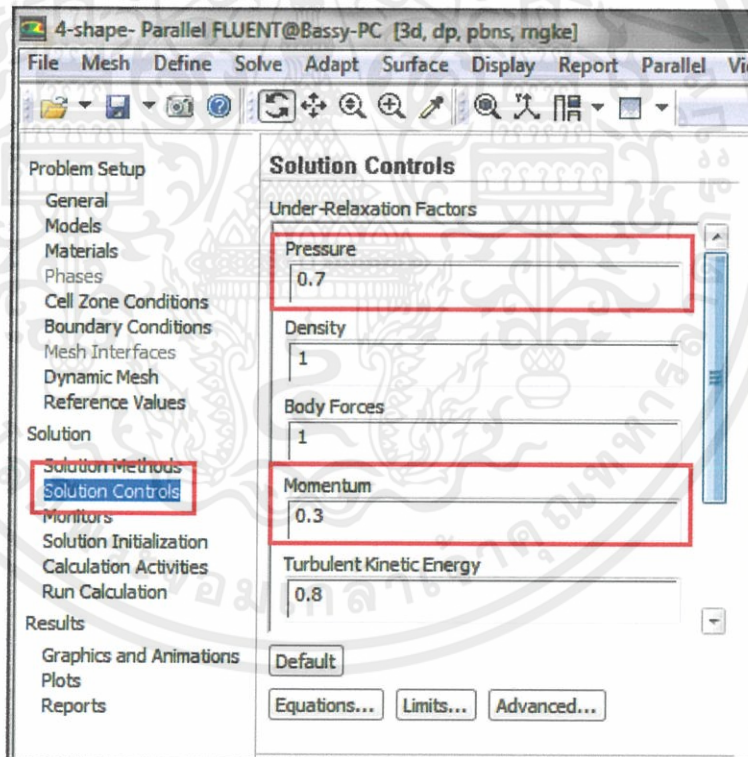
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. เลือก Boundary Condition -- out_membrane -- Edit เปลี่ยน Specification Method เป็น Intensity and Hydraulic Diameter -- ใส่ค่า Turbulent Intensity เป็น 5.58 -- ใส่ค่า Hydraulic Diameter เป็น 0.6 -- OK



รูปที่ ค.9 การตั้งค่า Boundary Condition ของด้าน out_membrane

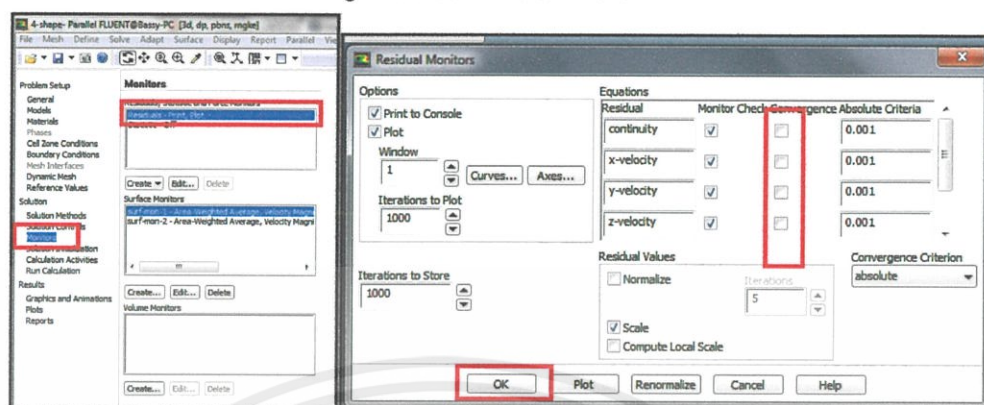
10. เลือก Solution Control -- เปลี่ยน Pressure เป็น 0.7 -- เปลี่ยน Momentum เป็น 0.3



รูปที่ ค.10 การตั้งค่า Solution Control

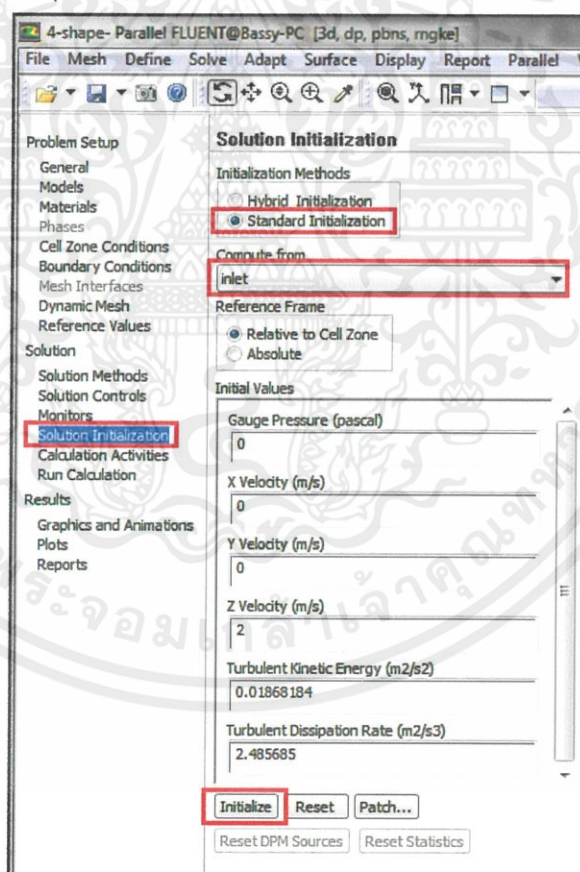
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เลือก Monitor -- Residuals – Print, Plot ใน Residuals, Statistic and Force Motion --
เลือก Monitor Check Convergence ออกทั้งหมด – OK



รูปที่ ค.11 การตั้งค่า Monitor

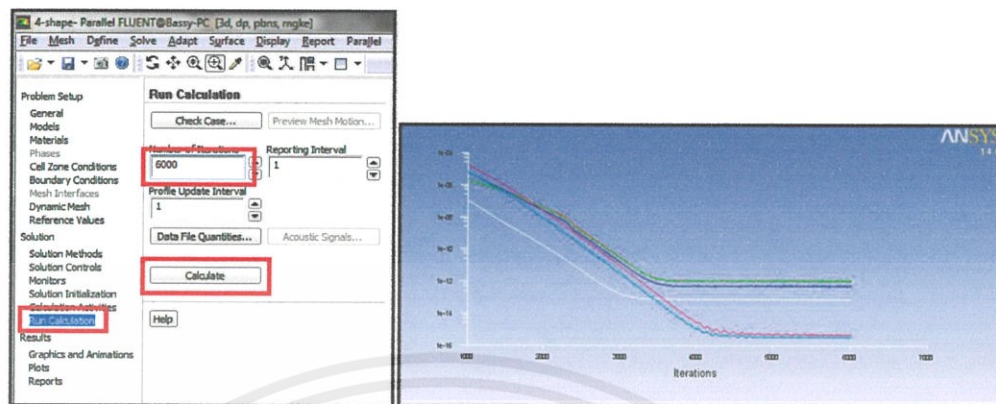
12. เลือก Solution Initialization -- เลือก Standard Initialization ใน Initialization Methods
-- เลือก inlet ใน Compute from -- Initialization



รูปที่ ค.12 การตั้งค่า Solution Initialization

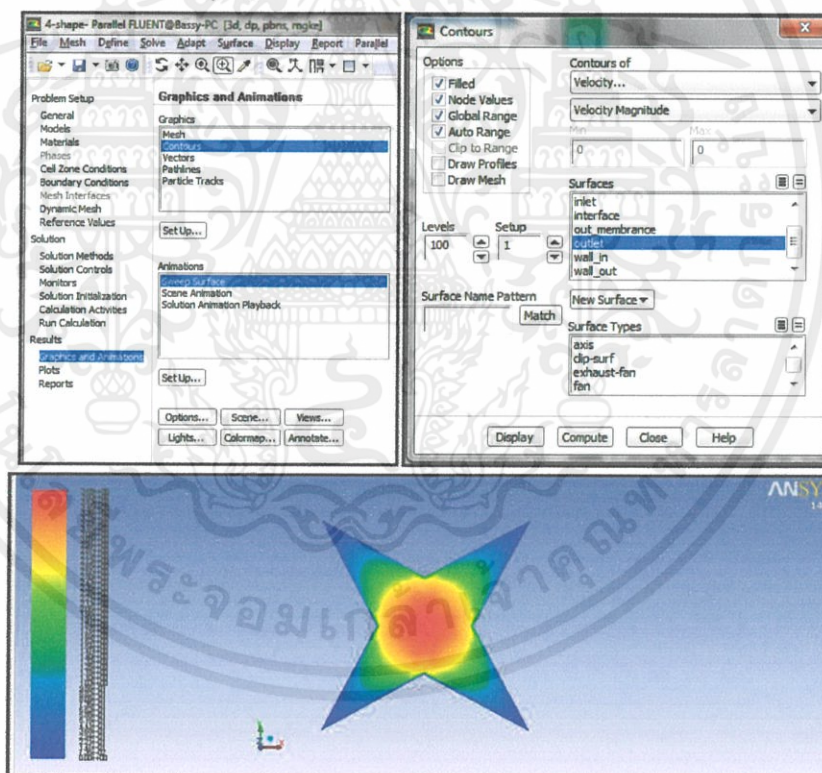
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. เลือก Run Calculation -- ใส่ Number Iteration เป็น 6000 -- Calculation -- คำนวณเสร็จ -- OK



รูปที่ ค.13 การตั้งค่า Run Calculation

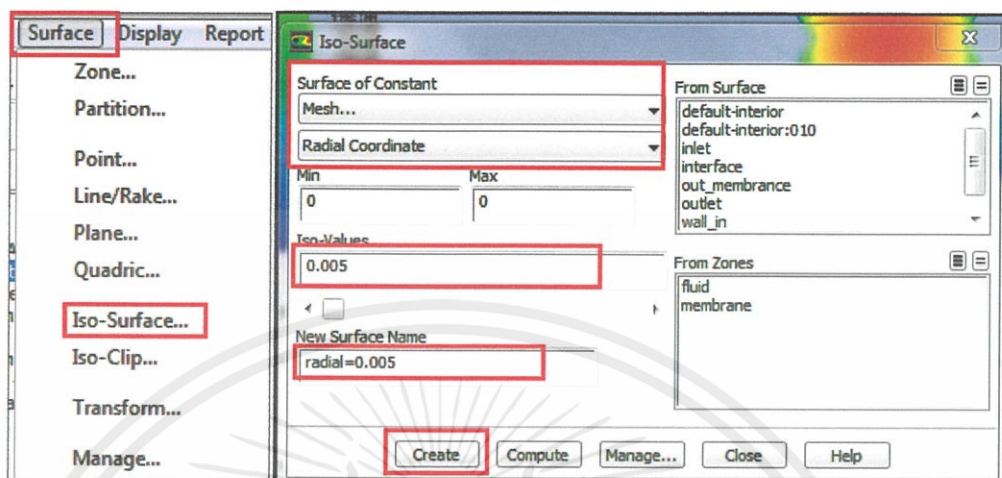
14. เลือก Graphics and Animations -- เลือก Contours ใน Graphics -- Set Up -- เลือก Filled ใน Options -- เลือก Contour of Velocity และ Velocity Magnitude -- เลือก outlet ใน Surfaces -- Display



รูปที่ ค.14 การตั้งค่า Contours และการแสดงผล Contours

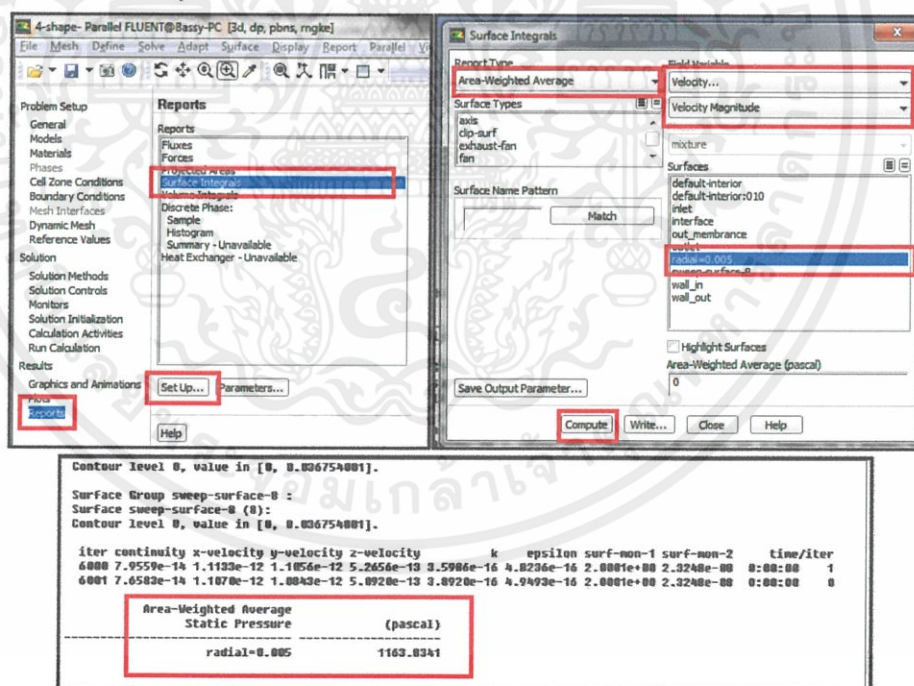
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. เลือก Surface -- Iso-Surface -- เลือก Mesh กับ Radial Coordinate ใน Surface of Constant -- ใส่ค่า Iso-Values เป็น 0.005 -- ตั้งชื่อใน New Surface Name เป็น radial=0.005 -- Create



รูปที่ ค.15 การตั้งค่า Iso-Surface

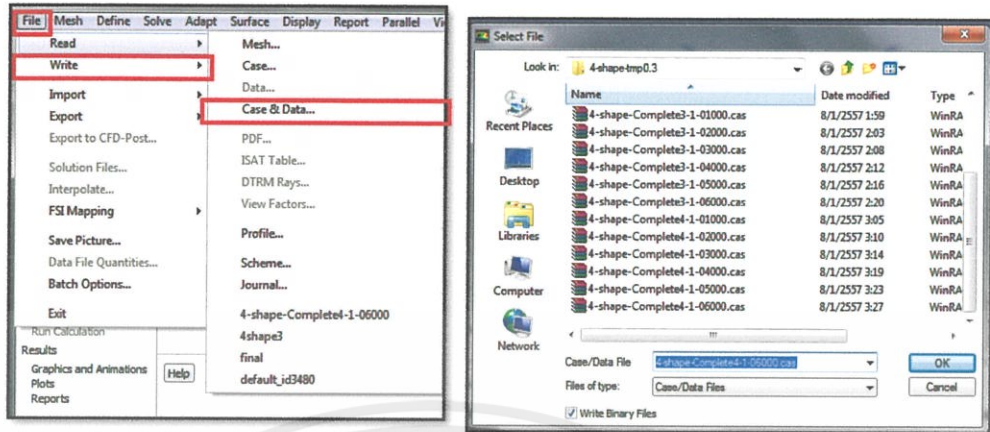
16. เลือก Report -- Surface Integrals -- Set Up -- เลือก Report Type เป็น Area-Weighted Average -- เลือก Field Variable เป็น Pressure กับ Static Pressure -- เลือก radial=0.005 ใน Surface -- Compute



รูปที่ ค.16 การตั้งค่า และการแสดงผลความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. เลือก File -- Write -- Case & Data -- เลือกตำแหน่งที่จะบันทึกงาน -- ตั้งชื่องาน -- OK



รูปที่ ค.17 การบันทึกงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้