



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเพิ่มฟลักซ์ในกระบวนการอัลตราฟิเตรชันโดยใช้
ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนในหลายรูปแบบ
Flux Enhancement During Ultrafiltration Using
Various Types of Turbulence Promoter

ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

RDH
ค ๕๘๒๓
๒๕๕๘

สาขา.....
เลขทะเบียน.....**137791**
วันเดือนปี.....**16 ต.ค. 2558**

.b.....**1210085X**
.i.....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การเพิ่มฟลักซ์ในกระบวนอัลตราฟิลเตรชันโดยใช้ตัวสนับสนุนความปั่นป่วน
ในหลายรูปแบบ

แหล่งเงิน คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2555 ถึง กันยายน 2556

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) สันติ วัฒนานูสรณ์

ตำแหน่งทางวิชาการ อาจารย์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทรศัพท์ 02-3298360-3 ต่อ 166

โทรสาร 02-3298360-3 ต่อ 4

E-mail santi_wattananusorn@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างตัวสนับสนุนความปั่นป่วน (turbulence promoter) ต่อรูปแบบการไหลในเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันชนิดไหลขวางด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics; CFD) โดยแบบจำลองถูกคำนวณด้วยโปรแกรม FLUENT ซึ่งใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ผลการจำลองถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่ทำการศึกษามี 6 รูปแบบคือ แบบทรงกระบอกสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพชรปริซึมแบบที่ 1 ปริซึมแบบที่ 2 และแผ่นสี่เหลี่ยมบางผลการจำลองพบว่า การติดตัวสนับสนุนความปั่นป่วนเพิ่มความเร็วของของไหล และสร้างบริเวณการไหลไม่คงตัวซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง ลดการสร้างชั้นเค้กที่ทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรน จากการติดตัวสนับสนุนความปั่นป่วนทั้ง 6 แบบ พบว่าการติดตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบสี่เหลี่ยมบางมีประสิทธิภาพการกรองมากกว่าการติดตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบอื่น นอกจากนี้การติดตัวสนับสนุนความปั่นป่วนจะเพิ่มความดันสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการไหลและการเกิดกระแสหมุนวนข้างหลังตัวสนับสนุนความปั่นป่วน แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของความดันตกคร่อมไม่มีความสำคัญเมื่อเทียบกับเพอมีเอทฟลักซ์ (permeate flux)

คำสำคัญ : เมมเบรน, CFD, ตัวสนับสนุนความปั่นป่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Research Title: Flux Enhancement During Ultrafiltration Using Various Types of Turbulence Promoter

Researcher: Dr.Santi Wattananusorn

Faculty: Engineering **Department:** Chemical Engineering

ABSTRACT

In this work, the effects of turbulence promoter geometry on flow pattern in cross-flow membrane ultrafiltration were studied. The commercial Computational Fluid Dynamics(CFD) package FLUENT, which employs the finite-volume method, was used for numerical computation. The simulation result was validated by comparing with published experimental data. The simulation models were performed in cross-flow membrane ultrafiltration using six types of turbulence promoters. The results showed that the presence of turbulence promoters cause remarkable increase in the fluid velocity and generate the region of unsteady flow, which can significantly improve the filtration performance and can greatly disrupt the development of cake boundary layer, as well as the growth of fouling. Among the six types of turbulence promoters, the vertical flat-plate shape showed better performances than the others. The presence of turbulence promoters caused the frequent change in flow direction

Keywords : membrane, CFD, turbulence promoter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2556 จำนวนเงิน 80,000 บาท
จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

สันติ วัฒนานุสรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผลของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD).....	2
2.2 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล.....	3
2.3 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล.....	5
2.4 การจำลองการไหลภายในตัวกลางที่มีรูพรุน.....	6
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	7
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการคำนวณ.....	11
4.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลจากงานวิจัยที่ใช้อ้างอิง.....	11
4.2 อิทธิพลของตัวสนับสนุนความปั่นป่วน.....	11
บทที่ 5 สรุปผลการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข.....	20
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	20
บรรณานุกรม.....	21
ประวัตินักวิจัย.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 วิธีเชิงตัวเลข.....	9
4.1 ประสิทธิภาพของเมมเบรนที่ติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่แตกต่างกัน.....	13
4.2 ประสิทธิภาพของเมมเบรนที่ติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนทั้งสามรูปแบบ.....	17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 รายละเอียดของเมมเบรน	7
3.2 โดเมนการคำนวณ	8
3.3 เมชของแบบจำลอง	8
3.4 ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่ใช้ในการศึกษา	10
4.1 คอนทัวร์ความเร็วในแนวแกน x สำหรับตัวสนับสนุนความปั่นป่วน (a) ทรงกระบอก (b) ปริซึม-1 (c) เพชร (d) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (e) ปริซึม-2	12
4.2 ความเร็วแนวแกน y ใต้ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบ (a) ไม่มี (b) ทรงกระบอก (c) ปริซึม-1 (d) เพชร (e) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (f) ปริซึม-2 เมื่อ $v_y^* = v_y/v_{inlet}$ and $x^* = x/L$	13
4.3 การกระจายตัวของความเร็วที่ผิวของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนเมื่อ $v_x^* = v_x/v_{inlet}$ และ $x_{tp}^* = x_{tp} / x_{total,tp}$	15
4.4 การกระจายตัวของความดันสถิตยของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบ (a) ไม่มี (b) ทรงกระบอก (c) ปริซึม-1 (d) เพชร (e) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (f) ปริซึม-2 เมื่อ $P^* = P/P_{inlet}$	16
4.5 ความทัวร์ความเร็วในแนวแกน x ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบ (a) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (b) ปริซึม-2 (C) แผ่นเรียบในแนวตั้ง	18
4.6 ความเร็วแนวแกน y ใต้ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบ (a) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (b) ปริซึม-2 (C) แผ่นเรียบในแนวตั้ง	18
4.7 การกระจายตัวของความดันสถิตยของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบ (a) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (b) ปริซึม-2 (C) แผ่นเรียบในแนวตั้ง	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผลของโครงการวิจัย

การกรองโดยใช้เมมเบรน (Membrane) เป็นกระบวนการที่สำคัญในการแยกอนุภาคแขวนลอยออกจากของผสม ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีการแยกโดยใช้เมมเบรนนี้เข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย เช่น การแยกแก๊สคลอรีน การแยกในอุตสาหกรรมอาหาร ฯลฯ ซึ่งปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในกระบวนการกรองในลักษณะนี้คือ การอุดตันของแผ่นเมมเบรน ซึ่งทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่เสนอวิธีการบวกรวมการสะสมของตะกอนเหนือแผ่นเมมเบรนโดยใช้ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่มีลักษณะพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลม ในงานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของลักษณะพื้นที่หน้าตัดรูปทรงต่างๆที่มีต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองโดยใช้ตัวสนับสนุนการปั่นป่วนเพื่อลดการอุดตันเหนือแผ่นเมมเบรน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ศึกษาการไหลในช่องแคบผ่านตัวขัดขวางการไหลที่มีรูปทรงต่างๆที่ทำให้เกิดการแยกของการไหล (Flow separation) และบริเวณของเวก (Wake Region) ที่กว้างที่สุด

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 เปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลอง : เป็นการจำลองสภาวะการไหลผ่านเมมเบรนด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) เพื่อแสดงค่าสนามความเร็วและความดันที่สภาวะเดียวกันกับข้อมูลที่ใช้อ้างอิง เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

1.4.2 การทำนายของแบบจำลอง : เป็นการจำลองการไหลผ่านตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่มีพื้นที่หน้าตัดรูปทรงต่างๆ นอกเหนือจากวงกลมซึ่งเป็นที่ใช้แพร่หลายในปัจจุบัน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้รับองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่ประยุกต์ใช้ในกระบวนการกรองด้วยเอกสามมีเปร์น นอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) [1]

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เป็นสาขาหนึ่งในวิชากลศาสตร์ของไหล ที่นำกระบวนการเชิงตัวเลขและระเบียบวิธีมาใช้แก้และวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของของไหล โดยอาศัยกฎทางฟิสิกส์ 3 ข้อ ซึ่งประกอบไปด้วย กฎการอนุรักษ์มวล กฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและกฎการอนุรักษ์พลังงาน CFD สามารถแสดงกราฟ คอนทัวร์ เวกเตอร์ของปริมาณต่างๆที่ผู้วิจัยสนใจ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และแก้ปัญหาเกี่ยวกับของไหล รวมทั้ง CFD มีต้นทุนในการดำเนินการต่ำและสามารถผลิตข้อมูลได้เป็นจำนวนมาก จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ CFD เป็นที่ยอมรับในงานด้านวิศวกรรมและด้านต่างๆ เช่น

- ทางด้านวิศวกรรมกระบวนการทางเคมี เช่น การผสม การแยกสาร และการขึ้นรูปของพอลิเมอร์
 - ทางด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า เช่น การทำความเย็นบนอุปกรณ์และแผงวงจรไฟฟ้า
 - ทางด้านอากาศพลศาสตร์ของเครื่องบินและยานพาหนะ เช่น แรงยกและแรงต้าน
 - พลศาสตร์ของน้ำที่เกิดขึ้นรอบๆเรือ
 - สิ่งแวดล้อมภายในและภายนอกของอาคาร เช่น แรงของลมที่กระทำกับอาคารและการระบายอากาศ
 - ทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เช่น การกระจายตัวของมลภาวะและการไหลออก
 - ทางด้านวิศวกรรมชีวการแพทย์ เช่น การไหลในหลอดเลือดแดงและหลอดเลือดดำ
 - ทางด้านอุตุนิยมวิทยา เช่น การพยากรณ์อากาศ
 - ทางด้านอุทกวิทยาและชลศาสตร์ เช่น การไหลในแม่น้ำ ปากน้ำ และมหาสมุทร
- ข้อดีของเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สามารถสรุปได้ดังนี้

- สามารถศึกษาระบบที่มีสภาวะความเสี่ยงสูงหรือศึกษาระบบที่มีข้อจำกัดมาก
- สามารถลดระยะเวลาและลดค่าใช้จ่ายของการออกแบบ พัฒนาและปรับปรุงอุปกรณ์ได้
- สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เข้ากับการทดลอง และอุปกรณ์อื่นๆได้ง่าย
- สามารถเห็นปรากฏการณ์การไหลภายในอุปกรณ์ซึ่งเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

หลักการทำงานของ CFD สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ Pre-processor Solver ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ทำการคำนวณและแก้ปัญหา โดยเทคนิคที่นิยมใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขมีอยู่ 3 วิธี คือ Finite Difference Method Finite Element Method และ Finite Volume Method และส่วนสุดท้ายคือ Post-processor

2.2.1 Pre-processor

Pre-processor ในขั้นตอนนี้เป็นส่วนที่ป้อนข้อมูลเกี่ยวกับปัญหาการไหลของของไหลให้กับโปรแกรมคำนวณ ขั้นตอนนี้เป็นการนิยามรูปร่างขอบเขตของปัญหาที่เราสนใจ มีการกำหนดขอบเขตของปัญหาที่ต้องการคำนวณโดยการสร้างกริด (Grid หรือ Mesh) ซึ่งเป็นการแบ่งขอบเขตปัญหาเป็นส่วนเล็กๆ และเลือกแบบจำลองเพื่อนำมาแก้ปัญหาปรากฏการณ์ที่เราสนใจ รวมถึงการกำหนดสภาวะขอบเขตและสภาวะเริ่มต้นที่เหมาะสมกับขอบเขตของปัญหา จากการสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลลัพธ์หรือคำตอบที่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนของกริด จำนวนกริดยิ่งมากคำตอบที่ได้ยิ่งมีความแม่นยำ กริดที่ดีนั้นจะมีการแบ่งอย่างสม่ำเสมอ มีความละเอียดในบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของคำตอบเป็นอย่างมาก

2.2.2 Solver

Solver เป็นขั้นตอนการคำนวณและแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหล โดยเทคนิคที่นิยมใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขมีอยู่ 3 วิธี คือ Finite Difference Method Finite Element Method และ Finite Volume Method ขั้นตอนการคำนวณสามารถทำได้ดังนี้ ประมาณค่าตัวแปรการไหลที่ไม่รู้ค่าด้วยฟังก์ชันอย่างง่าย และแปลงรูปให้เป็นฟังก์ชันของโหนด (Discretisation) ซึ่งจะแทนค่าตัวแปรที่ประมาณไว้ในสมการควบคุมและจัดรูปให้เป็นสมการคณิตศาสตร์ จากนั้นจึงเป็นการหาคำตอบของสมการพีชคณิต (Algebraic Equations) จากการคำนวณเชิงตัวเลข 3 วิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นมีความแตกต่างกันตรงที่วิธีการประมาณค่าตัวแปร และขั้นตอนการแปลงรูปให้เป็นฟังก์ชันของค่าตัวแปรที่โหนด

2.2.2.1 วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method)

วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขขั้นสูง ใช้ในการแก้สมการอนุพันธ์ย่อยของปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ที่ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ โดยขั้นตอนในเทคนิคนี้คือแปลงรูปสมการอนุพันธ์ของตัวแปรที่ไม่รู้ค่าจากปัญหาของปรากฏการณ์การไหล โดยพิจารณาตัวแปรที่

ตำแหน่งกริดและอาศัยการกระจายฟังก์ชันด้วยอนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series) ซึ่งจะทำให้การตัดพจน์อันดับสูงออกทำให้ได้สมการพีชคณิตของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในแต่ละกริดออกมาเพื่อประมาณค่าผลเฉลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นกรณีอื่น มิฉะนั้น กรุณาติดต่อขอสงวนสิทธิ์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.2.2 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หรือที่เรียกว่า FEM คือเทคนิควิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการหาคำตอบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยพร้อมกับสมการปริพันธ์ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ เขียนเป็นโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อใช้คำนวณแก้ปัญหาทางวิศวกรรม เช่น คำนวณหาความแข็งแรงของวัสดุหรือชิ้นส่วนเครื่องกล ศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหล การถ่ายเทความร้อน ในชิ้นส่วนเครื่องกล รูปแบบการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นเสียง เป็นต้น ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีนี้มีพื้นฐานมาจากการกำจัดสมการเชิงอนุพันธ์อย่างสมบูรณ์ (สำหรับปัญหาที่อยู่ในสภาวะคงที่) หรือการปรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ให้กลายเป็นระบบของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญซึ่งเป็นปริพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยการใช้เทคนิคมาตรฐานทางคณิตศาสตร์เช่น Euler method Runge-Kutta methods ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนั้น

ปัญหาพื้นฐานคือการสร้างสมการที่สามารถประมาณค่าสมการที่กำลังสนใจศึกษาแต่มีความแน่นอนทางตัวเลข ซึ่งหมายความว่าความคลาดเคลื่อนในข้อมูลนำเข้า (Input) และการคำนวณระหว่างกลางจะไม่ถูกรวมเข้าไป และส่งผลให้ข้อมูลส่งออก (Output) ไร้ความหมาย ซึ่งวิธีการนั้นมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นทางเลือกที่ดีในการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในขอบเขตที่ซับซ้อน (Complex Domains) เมื่อขอบเขตมีการเปลี่ยนแปลงหรือเมื่อผลที่ต้องการมีการเปลี่ยนแปลงตลอดขอบเขต หรือเมื่อผลลัพธ์ไม่มีความราบเรียบ

2.2.2.3 วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method)

ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องเป็นระเบียบวิธีมาตรฐานสำหรับใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์และโปรแกรมสำหรับงานวิจัย สมการควบคุม (Governing Equation) จะถูกแก้โดยพิจารณาให้เป็นปริมาตรควบคุมแบบเป็นช่วง (Discrete Control Volumes) และอาศัยการอินทิเกรตเพื่อให้ได้ปริมาณที่มีการอนุรักษ์

2.2.3 Post-processor

Post-processor เป็นส่วนของการแสดงผลการคำนวณที่ได้จำลองออกมาในรูปแบบต่างๆ เช่น เวกเตอร์ รูปร่างขอบเขตของปัญหาและแสดงกริด คอนทัวร์และเส้น พื้นผิว 2 มิติและ 3 มิติ การติดตามอนุภาค เป็นต้น จะเห็นได้ว่าพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีความสามารถในการทำกราฟฟิคมาก และได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือเป็นอย่างมากจึงได้รับความนิยมในการแก้ไขปัญหาการไหลโดยใช้เทคนิคนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล

2.3.1 สมการควบคุม (Governing Equation)

สมการควบคุมจะใช้กฎทางฟิสิกส์ 3 ข้อ ซึ่งประกอบไปด้วย กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) โดยจะเขียนสมการควบคุมได้ดังนี้

2.3.1.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2-1)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่น (Density)
 t คือ เวลา (Time)
 \vec{u} คือ เวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector) และกระจายออกได้เป็น
 ซึ่งสมการที่ (1) เป็นสมการทั่วไปของของไหล สำหรับกรณีที่ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) ซึ่งมีความหนาแน่นคงที่ สมการที่ (1) จะลดรูปได้ดังนี้

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2-2)$$

2.3.1.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันกล่าวว่าแรงเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม ดังนั้นสมการโมเมนตัมแสดงได้ดังนี้

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2-3)$$

โดย p คือ ความดัน (Pressure)
 τ คือ ความเค้นเฉือน (Shear stress)
 S_M คือ แหล่งโมเมนตัมอื่นๆ (Momentum source terms)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.1.3 สมการพลังงาน (Energy equation)

สมการนี้ นำมาจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ที่กล่าวไว้ว่า พลังงานสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ แต่ไม่สามารถสร้างหรือทำให้พลังงานสูญหายได้

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\nabla \cdot (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\vec{u} \cdot \tau) + \nabla \cdot (k \nabla T) + S_E \quad (2-4)$$

โดย	E	คือ	พลังงานจำเพาะของของไหล
	k	คือ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
	T	คือ	อุณหภูมิ
	S_E	คือ	แหล่งพลังงานอื่นๆ (Energy source terms)

2.4 การจำลองการไหลภายในตัวกลางที่มีรูพรุน

การจำลองการไหลภายในตัวกลางที่มีรูพรุนหรือเมมเบรนสามารถทำได้โดยเพิ่มแหล่งโมเมนต์อื่นๆ เข้าไปในสมการโมเมนต์ ซึ่งแหล่งโมเมนต์สำหรับกรณีนี้การจำลองการไหลภายในตัวกลางที่มีรูพรุนสามารถแสดงได้ดังนี้

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (2-5)$$

โดย	α	คือ	permeability
	C_2	คือ	inertial resistance factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

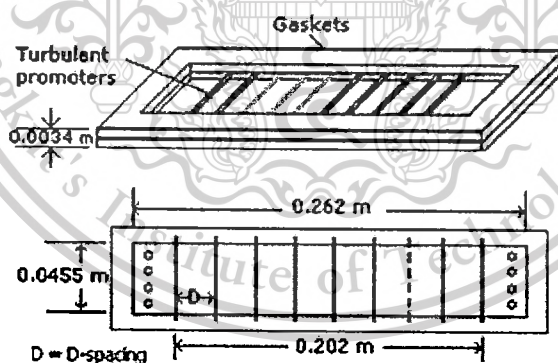
วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะแสดงกระบวนการจำลองในงานวิจัยนี้ โดยการศึกษาทั้งหมดนี้อ้างอิงจากงานวิจัยของ S. Pal และคณะ [2] โดยรายละเอียดของกระบวนการวิจัยแสดงได้ดังนี้

3.1 การสร้างแบบจำลอง

3.1.1 การจำลองของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนในเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันแบบไหลขวาง

การจำลองทั้งหมดมีพื้นฐานมาจากงานวิจัยของ S. Pal และคณะ [2] เมมเบรนมีพื้นที่ใช้ในการกรองเท่ากับ 0.012 m^2 มีความยาวและกว้างเท่ากับ 0.26 m และ 0.0455 m ตามลำดับ ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $1.68 \times 10^{-3} \text{ m}$ โดยรายละเอียดของเมมเบรนนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



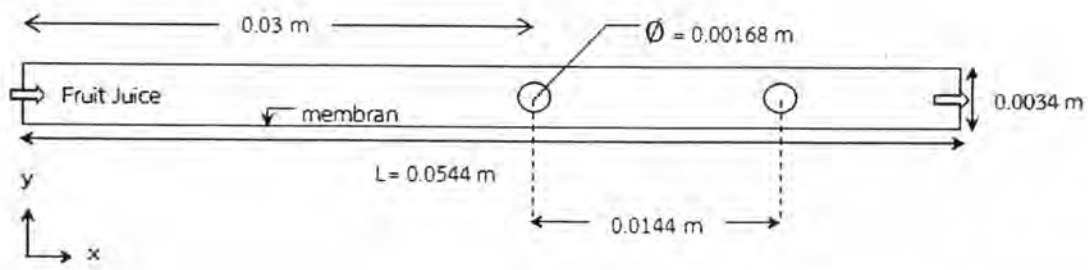
รูปที่ 3.1 รายละเอียดของเมมเบรน [2]

แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองนี้ถูกกำหนดให้เป็นแบบจำลอง 2 มิติ โดยแบบจำลองทั้งหมดถูกสร้างโดยโปรแกรม GAMBIT โดยรายละเอียดของแบบจำลองและการสร้างเมชของแบบจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ตามลำดับ

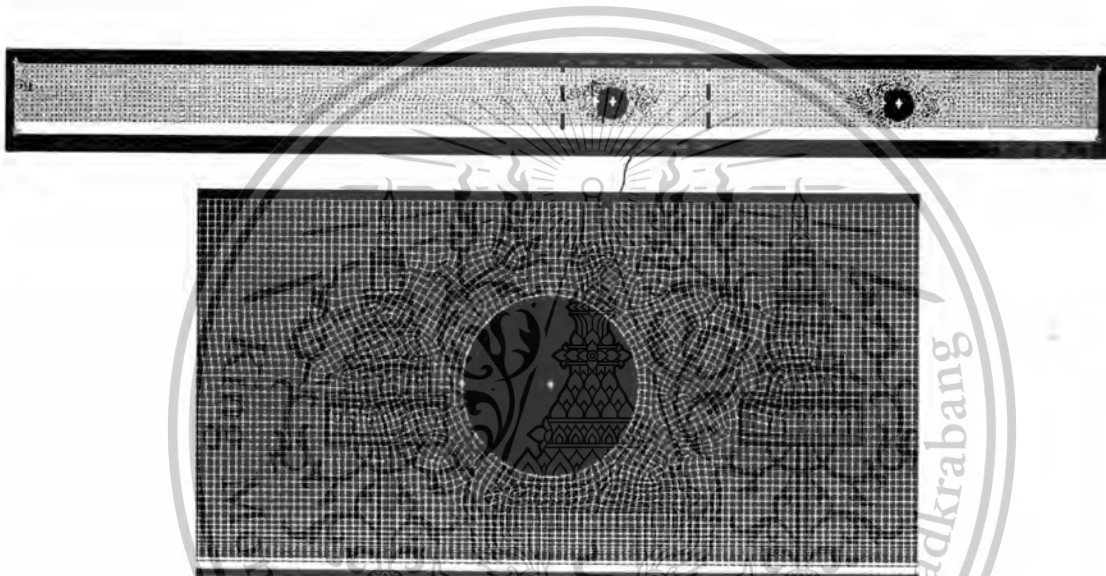
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.2 โดเมนการคำนวณ



รูปที่ 3.3 เมชของแบบจำลอง

3.1.2 สภาวะขอบเขต

รูปแบบความเร็วขาเข้าของของไหลถูกกำหนดให้เป็นรูปแบบสม่ำเสมอ ซึ่งมีตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 615.29 ที่ขาออกของโดเมนกำหนดให้มีความดันคงเท่ากับศูนย์ ที่ผนังกำหนดสภาวะขอบเขตเป็นแบบ no-slip แบบจำลองที่ใช้มีจำนวนเมชประมาณ 55,000 เมช และกำหนดให้ค่าคงเหลือมีค่าน้อยกว่า 10^{-4}

3.1.3 สมมติฐานของแบบจำลอง

สมมติให้เป็นการจำลอง 2 มิติ โดยของไหลเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้แบบนิวโตเนียน การไหล

เป็นการไหลแบบราบเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1.4 วิธีเชิงตัวเลข

การจำลองในงานวิจัยนี้ถูกคำนวณด้วยโปรแกรม FLUENT และวิธีเชิงตัวเลขที่กำหนดในการจำลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีเชิงตัวเลข

ตัวแปร	วิธี
Pressure-Velocity Coupling	SIMPLE
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Standard
Momentum	Second Order Upwind

3.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลอง

ผลลัพธ์ที่คำนวณได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Pal และคณะ [2]

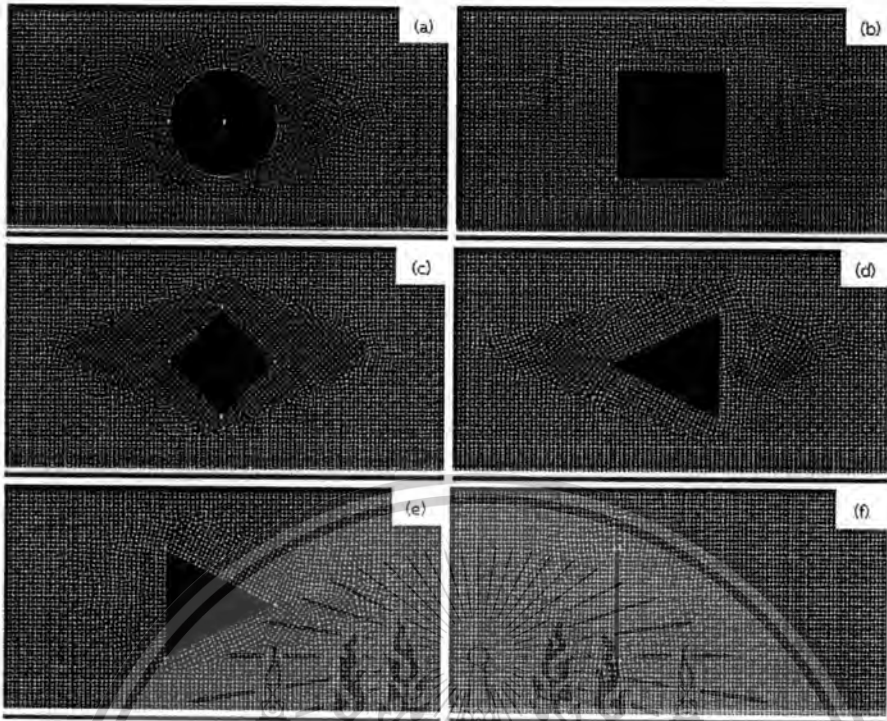
3.3 การจำลองของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนในอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนทั้ง 6 รูปแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างสไลด์ความบันเทิงที่ใช้ในการศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการคำนวณ

4.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลจากงานวิจัยที่ใช้อ้างอิง

สำหรับการพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลอง ผลการจำลองการไหลของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่มีความเร็วขาเข้าเท่ากับ 0.16 m/s และมีความดันเท่ากับ 350 kPa จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ S. Pal และคณะ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายและการทดลองมีค่าเท่ากับ 6.84 และ 7.11 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ตามลำดับ พบว่าผลการทำนายมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองร้อยละ 3.8 จากค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนาย ผลลัพธ์สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณให้ผลการทำนายที่สอดคล้องกับการทดลอง

4.2 อธิพจน์ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วน

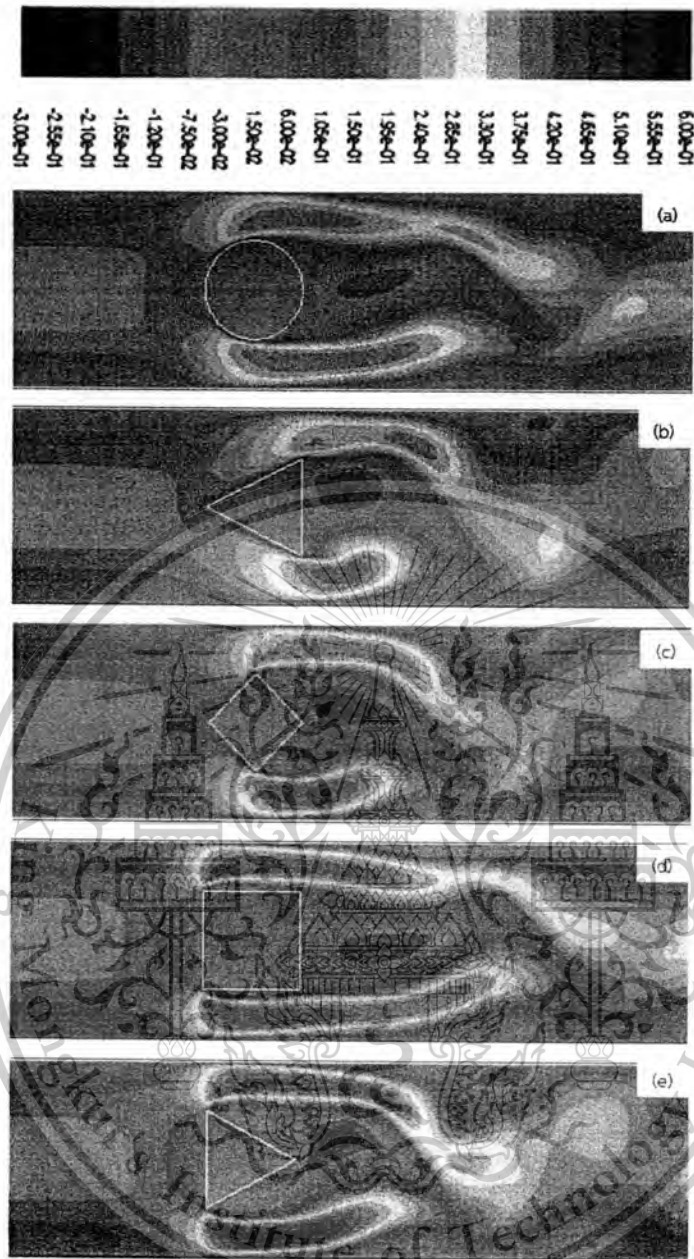
คอนทิวร์ของความเร็วในแนวแกน x สำหรับตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่มีรูปร่างต่างกันแสดงได้ในรูปที่ 4.1 โดยปกติแล้วอนุภาคที่อยู่ในสารละลายจะสะสมอยู่บนผิวเมมเบรนทำให้เกิดชั้นเค้กและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกรองมีค่าลดลง โดยผลลัพธ์ของการกรองนิยามได้จากอัตราการไหลเชิงปริมาตรต่อพื้นที่ของเมมเบรน ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้โดยการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนเข้าไปในกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน การติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนนี้ไม่ใช่แค่ทำให้เกิดความปั่นป่วนที่บริเวณผิวของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแต่ยังช่วยทำลายการพัฒนาชั้นขอบเขตบนผิวของเมมเบรนด้วยการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนจะช่วยลดการเกิดชั้นเค้กและเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง

ชั้นเค้กทำให้ค่าของเพอร์มิเอตต์หรือผลลัพธ์ของการกรองมีค่าลดลง เมื่อติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนไปในระบบจะทำให้รูปแบบการไหลเปลี่ยน ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนนี้ทำให้แรงดันเฉือนที่ผิวเมมเบรนมีค่าสูงขึ้นซึ่งทำให้ผิวของเมมเบรนสะอาดมากกว่าระบบที่ไม่มีการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ายิ่งผิวเมมเบรนสะอาดมากขึ้นหรือความหนาของชั้นเค้กลดลงจะทำให้ผลลัพธ์มีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.1 คอนทัวร์ความเร็วในแนวแกน x สำหรับตัวสนับสนุนความปั่นป่วน (a) ทรงกระบอก (b) ปริซึม-1 (c) เพชร (d) สีเหลี่ยมจตุรัส (e) ปริซึม-2

จากรูปที่ 4.1 พบว่าคอนทัวร์ของปริซึม-2 มีค่าความเร็วในแนวแกน x สูงที่สุด ซึ่งทำให้เพอร์มิเอตฟลักซ์มีค่าสูงสุด นอกจากนี้ ความเร็วในแนวแกน y ถูกนำมาพล็อตและใช้วิเคราะห์เพื่อยืนยันผลจากการจำลอง ซึ่งความเร็วในแนวแกน y ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่แตกต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 4.2

ในรูปที่ 4.2 พบว่าความเร็วในแนวแกน y มีลักษณะแฉ่ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรากฏตัวของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนเป็นสาเหตุของการเกิดลักษณะที่ไม่แน่นอนและค่าสูงสุดของความเร็ว นอกจากนี้ยังพบว่าการนำเอาความเร็วในแนวแกน y ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบปริซึม-2 มาคำนวณค่าเอกสารเป็นเอกสารที่สูงกว่าสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

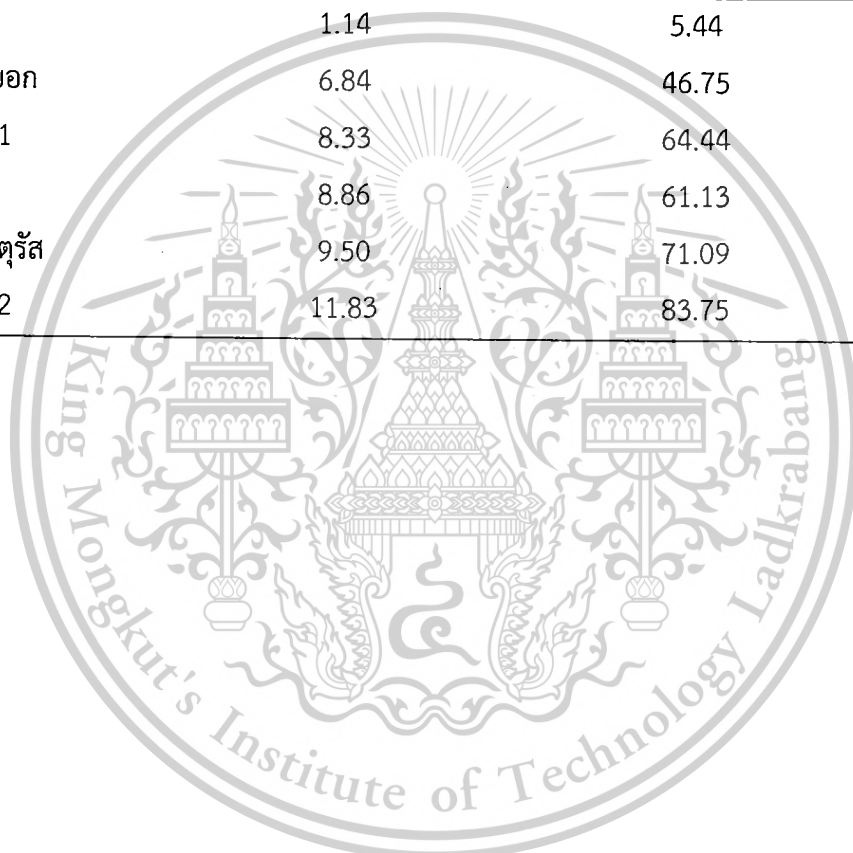
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การทำนายเพอร์มิเอตฟลักซ์ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่แตกต่างกันสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 โดยผลการจำลองพบว่าตัวสนับสนุนความปั่นป่วนช่วยทำให้เพอร์มิเอตฟลักซ์มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วน จากผลการจำลองสามารถพิสูจน์ได้ว่าการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนทำให้ชั้นเค้กถลอกและทำให้เพอร์มิเอตฟลักซ์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพของเมมเบรนที่ติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่แตกต่างกัน

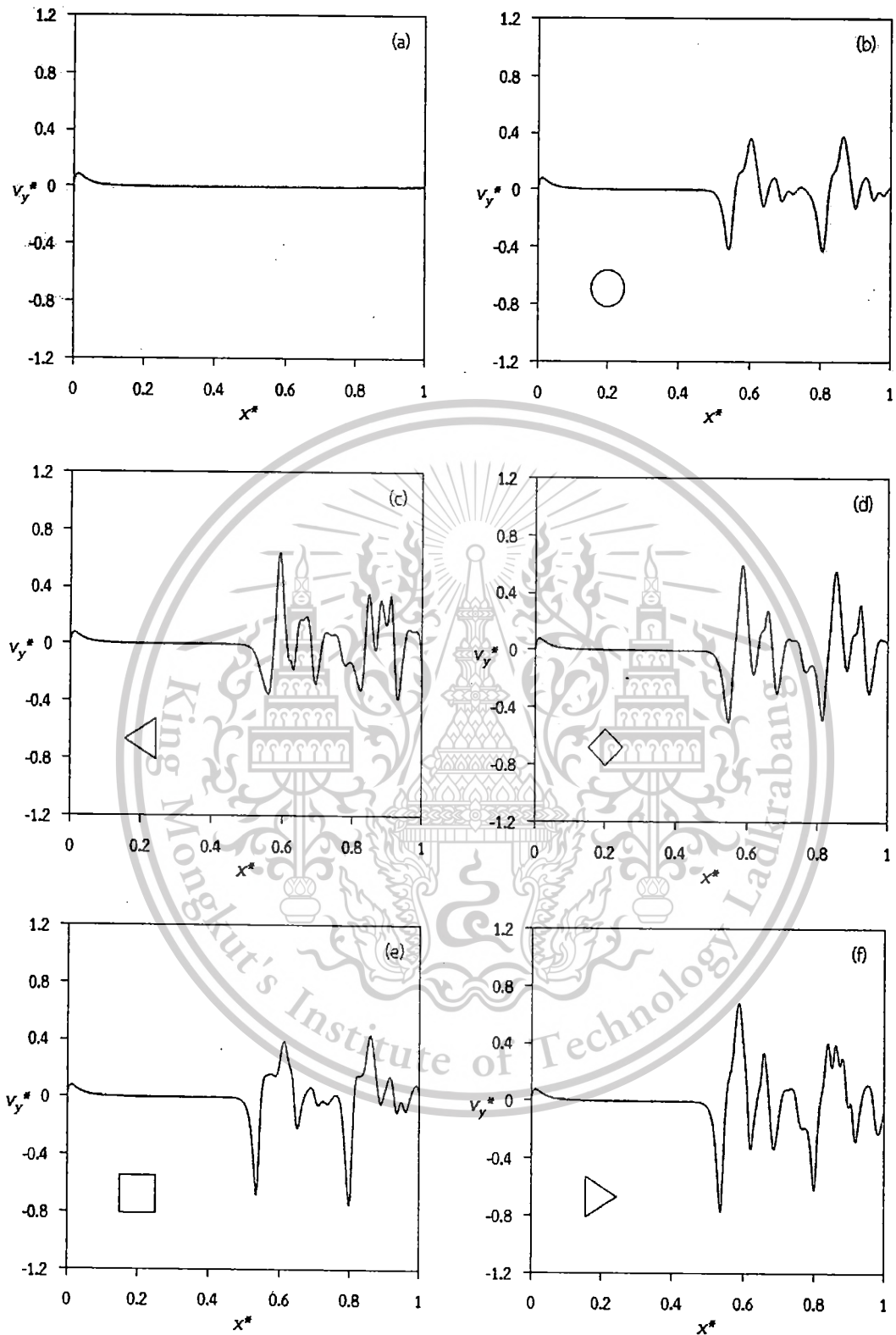
ตัวสนับสนุนความปั่นป่วน	เพอร์มิเอตฟลักซ์ $\times 10^6$ ($m^3/(m^2 \cdot s)$)	ความดันตกผล (Pa)	จุดแยก (-)
ไม่มี	1.14	5.44	-
ทรงกระบอก	6.84	46.75	0.7
ปริซึม-1	8.33	64.44	1
เพชร	8.86	61.13	0.57
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	9.50	71.09	0
ปริซึม-2	11.83	83.75	0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.2 ความเร็วแนวแกน y ใต้ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบ (a) ไม่มี (b) ทรงกระบอก (c) ปริซึม-1

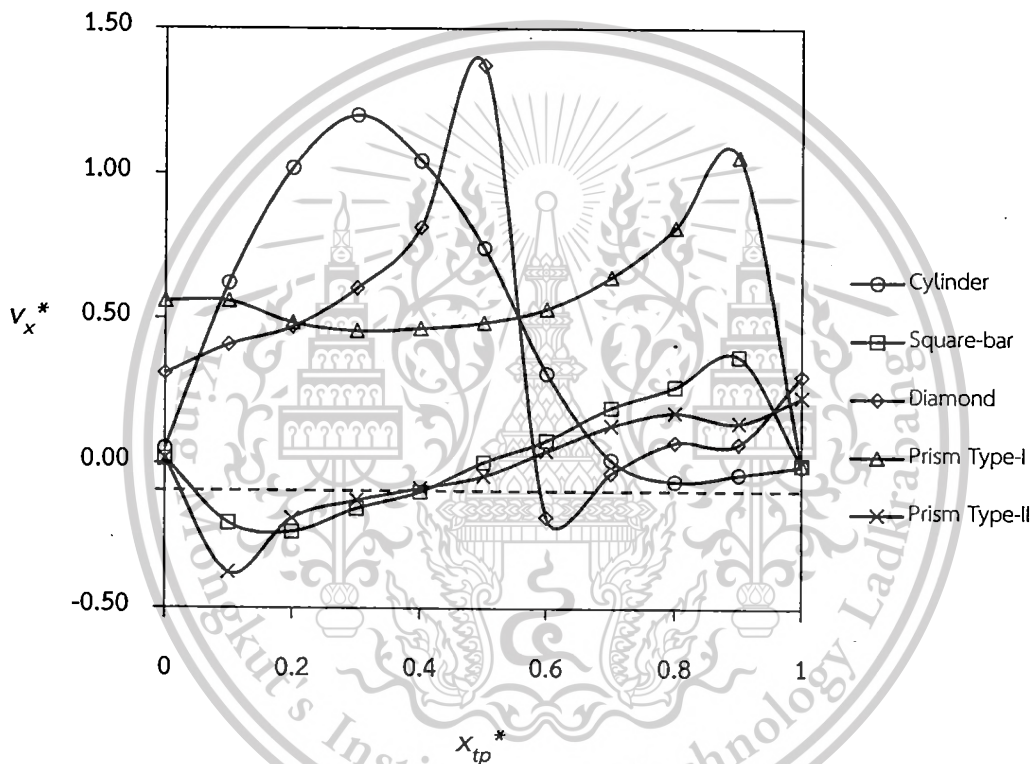
(d) เพชร (e) สี่เหลี่ยมจตุรัส (f) ปริซึม-2 เมื่อ $v_y^* = v_y/v_{inlet}$ and $x^* = x/L$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในรูปที่ 4.3 แสดงถึงการกระจายตัวของความเร็วที่ผิวของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนจากขอบด้านหน้าจนถึงด้านหลังของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนตัวแรก บริเวณที่อยู่ใกล้จุดปะทะจะมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ จุดแยกคือจุดที่ความเร็วเปลี่ยนจากบวกเป็นลบ ซึ่งจุดแยกของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบทรงกระบอกและปริซึม-1 เกิดขึ้นเมื่อ x_{tp}^* เท่ากับ 0.7 และ 1 ตามลำดับ แต่เพอร์มิเอตพลักซ์ของปริซึม-1 มีค่ามากกว่าทรงกระบอก สำหรับตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบจตุรัสและปริซึม-2 เกิดการแยกที่จุดเดียวกันแต่จุดที่มาบรรจบของปริซึม-2 มีค่าน้อยกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของบริเวณที่ปั่นป่วนจะทำให้เพอร์มิเอตพลักซ์เพิ่มขึ้นด้วย

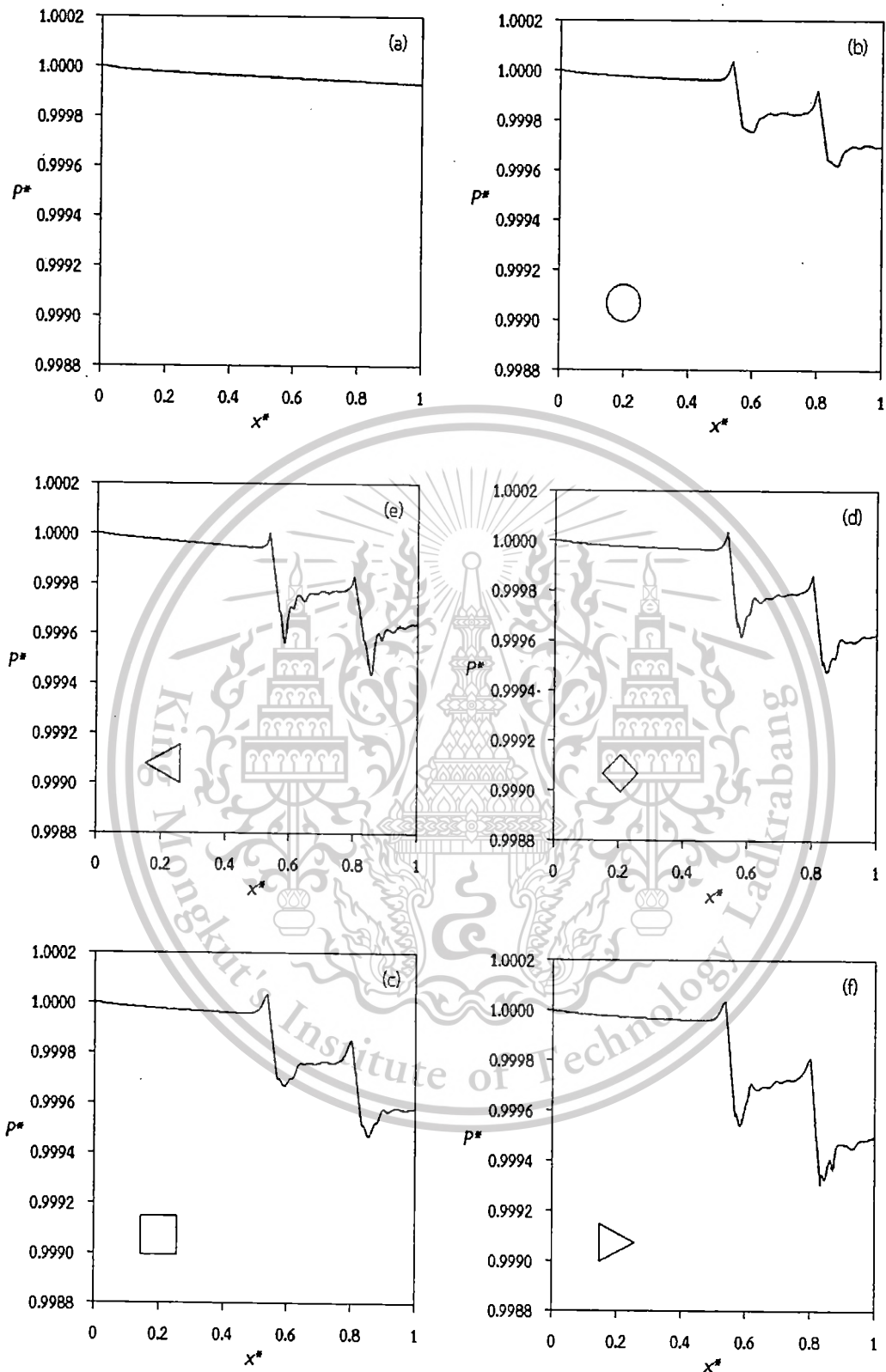


รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของความเร็วที่ผิวของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนเมื่อ $v_x^* = v_x/v_{inlet}$ และ $x_{tp}^* = x_{tp} / x_{total,tp}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของความดันสถิตยของตัวสับสนุนความปั่นป่วนแบบ (a) ไม่มี (b) ทรงกระบอก (c) ปริซึม-1 (d) เพชร (e) สี่เหลี่ยมจตุรัส (f) ปริซึม-2 เมื่อ $P^* = P/P_{inlet}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การกระจายตัวของความดันสถิตย์แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 สำหรับกรณีที่มีตัวสนับสนุนความปั่นป่วนเมื่อของไหลไหลผ่านตัวสนับสนุนความปั่นป่วนจะก่อให้เกิดการลดลงของความดันสถิตย์ ซึ่งส่งผลให้เกิดการแกว่งของความเร็วและการเกิดการหมุนวน จากรูปที่ 4.4 แสดงความดันตกที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวสนับสนุนความปั่นป่วน ซึ่งวัดได้จากความแตกต่างของความดันสถิตย์ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0.0228 m และ x เท่ากับ 0.0372 m (ที่ปากทางเข้า x มีค่าเป็นศูนย์) ที่สภาวะความเร็วขาเข้าเป็น 0.16 m/s และความดันเท่ากับ 350 kPa ความดันลดของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบ ทรงกระบอก ปริซึม-1 เพชร สีเหลี่ยมจตุรัส และปริซึม-2 มีค่าเท่ากับ 46.75 64.44 61.13 71.09 และ 83.75 Pa ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีตัวสนับสนุนความปั่นป่วน (5.44 Pa) เมื่อความดันลดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ต้องเพิ่มต้นทุนด้านพลังงานให้แก่เมมเบรน สาเหตุของการเกิดความดันลดเกิดจากการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนก่อให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและการเกิดการหมุนวนบริเวณด้านหลังตัวสนับสนุนความปั่นป่วนเป็นสิ่งที่ก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานเช่นกัน

จากรูปที่ 4.1(d) และ 4.1(e) พบว่าบริเวณหมุนวนของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบปริซึม-2 มีค่ามากกว่าแบบสี่เหลี่ยมจตุรัส ซึ่งทำให้เพอร์มิเอตฟลักซ์สูงขึ้น จากผลการจำลองพบว่าพื้นที่ด้านหลังตัวสนับสนุนความปั่นป่วนมีความแตกต่างกัน โดยที่พื้นที่ด้านหลังของปริซึม-2 มีค่าน้อยกว่าสี่เหลี่ยมจตุรัส ดังนั้นตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปแบบใหม่คือ แผ่นเรียบในแนวตั้ง เมื่อของไหลไหลผ่านขอบของแผ่นเรียบแนวตั้ง การหมุนวนจะเกิดขึ้นทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.5(c) และ 4.6(c) นอกจากนี้ยังช่วยทำให้ผิวเมมเบรนมีความสะอาดมากกว่าตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบสี่เหลี่ยมจตุรัสและปริซึม-2 นอกจากนี้ ความดันลดที่เกิดจากตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบแผ่นเรียบในแนวตั้งมีค่าสูงกว่าตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอื่นดัง ถึงแม้ว่าจะเกิดความดันลดมากแต่ก็ทำให้เกิดเพอร์มิเอตฟลักซ์มากเช่นเดียวกัน ซึ่งความดันลดและเพอร์มิเอตฟลักซ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.2

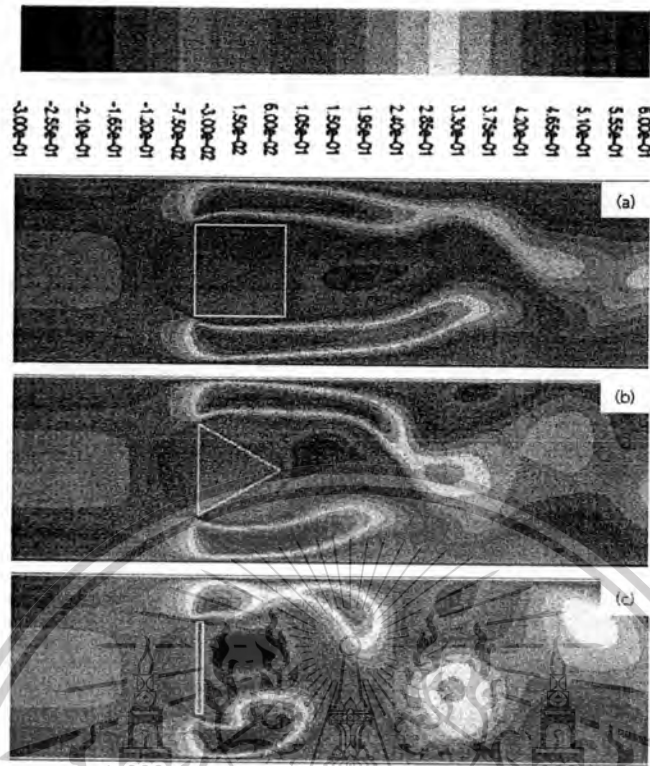
ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของเมมเบรนที่ติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนทั้งสามรูปแบบ

ตัวสนับสนุนความปั่นป่วน	เพอร์มิเอตฟลักซ์ x $10^6 (\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	ความดันลด (Pa)
สี่เหลี่ยมจตุรัส	9.50	71.09
ปริซึม-2	11.83	83.75
แผ่นเรียบในแนวตั้ง	14.67	88.78

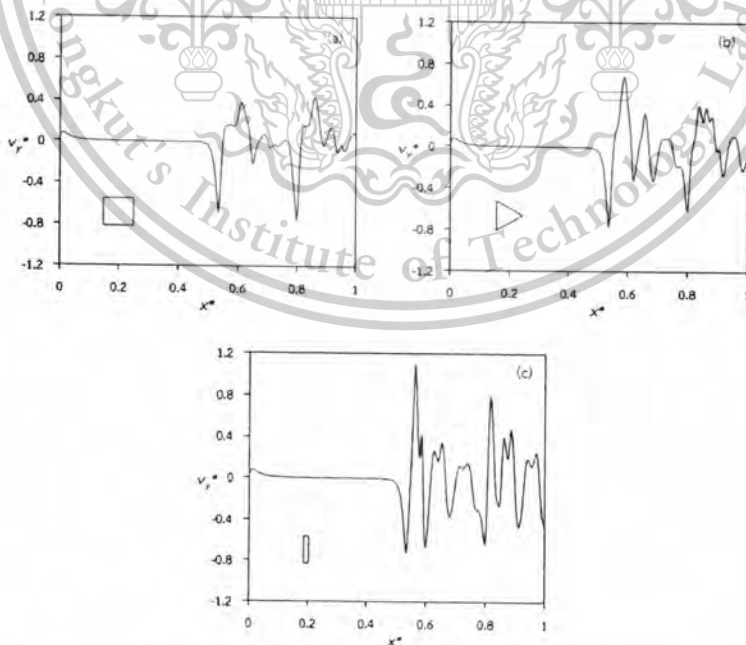
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.5 ความเร็วในแนวแกน x ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบ (a) สี่เหลี่ยมจตุรัส (b) ปริซึม-2 (c) แผ่นเรียบในแนวตั้ง

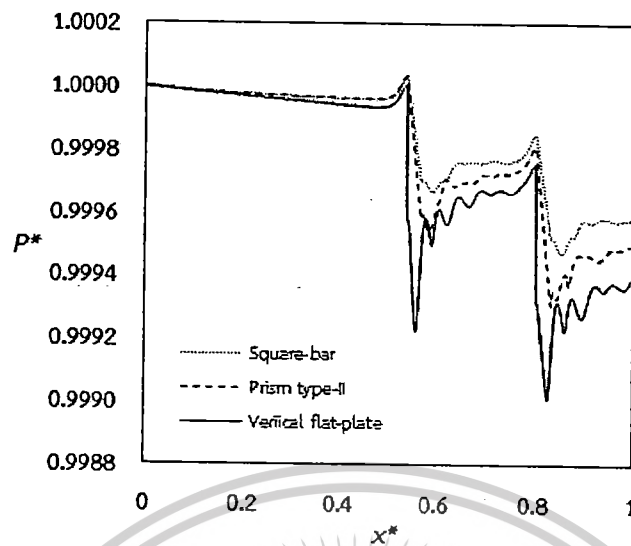


รูปที่ 4.6 ความเร็วแนวแกน y ได้ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบ (a) สี่เหลี่ยมจตุรัส (b) ปริซึม-2

(c) แผ่นเรียบในแนวตั้ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่โรงเรียนได้ขออนุญาตใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของความดันสถิตย์ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบ (a) สี่เหลี่ยมจตุรัส (b) ปริซึม-2 (c) แผ่นเรียบในแนวตั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข

5.1 สรุปผลการจำลอง

ในงานวิจัยนี้ เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่ประกอบด้วยตัวสนับสนุนความปั่นป่วนถูกศึกษาด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ FLUENT โดยตัวแปรสำคัญที่ทำการศึกษาคือรูปทรงของตัวสนับสนุนความปั่นป่วน การจำลองอ้างอิงจากงานวิจัยของ Pal และคณะ แบบจำลองถูกกำหนดเป็นแบบสองมิติ ของไหลเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้

จากผลการจำลองพบว่า ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแยกในกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันได้ โดยตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบแผ่นเรียบแนวตั้งจะให้ประสิทธิภาพหรือเพอร์มิเอตฟลักซ์สูงสุด และเมื่อเทียบประสิทธิภาพการแยกกับระบบที่ไม่มีตัวสนับสนุนความปั่นป่วนพบว่า ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแบบแผ่นเรียบตั้งมีค่ามากกว่า 12.86 เท่า การติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนส่งผลให้สนามการไหลเปลี่ยนแปลงและเกิดการหมุนวนด้านหลังตัวสนับสนุนความปั่นป่วน ซึ่งทำให้เกิดความดันสูญเสียและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของความดันตกก็มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการแยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บรรณานุกรม

- [1] Versteeg H. Malalasekera K., W. **An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method.**Malaysia: Prentice Hall. 1995.
- [2] Pal S., Bharihoke R., Chakraborty S., Ghatak S.K., De S., DasGupta S. “An experimental and theoretical analysis of turbulence promoter assisted ultra-filtration of synthetic fruit juice.” **Separation and Purification Technology**, vol. 62, 2008. pp. 659-667



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Dr.Santi Wattananusorn

เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน -

หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์

อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail) : สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-3298360-3 ต่อ 166 โทรสาร 02-3298360-3 ต่อ 4 E-mail santi_wattananusorn@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญาตรี วท.บ. (เคมี) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ไทย)

ระดับปริญญาโท วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ไทย)

ระดับปริญญาเอก Dr.-Ing. (วิศวกรรมเครื่องกล) Ruhr-University Bochum (เยอรมนี)

ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

1. Wattananusorn, S. (2012) : Special-Relativistic Hydrodynamics for Higher-Order Boundary-Layer Flow over a Flat Plate. [to be published]
2. Wattananusorn, S. (2009) : Explicit Analytical Solution for Drying Kinetics of Flat Materials. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, vol. 43, no. 1, pp. 70 - 73.
3. Wattananusorn, S. (2006) : New Space-Averaging Procedure for Inhomogeneous Flow Fields using Balance Equation Formulations. Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 220, no. 9, pp. 1363 - 1374.
4. Wattananusorn, S. (2008) : Determination of Membrane Resistance for Cross-Flow Microfiltration in a Rectangular Module including Back-Flow. Journal of Process Mechanical Engineering, vol. 222, no. 1, pp. 75 - 77.
5. Wattananusorn, S. (2004) : Interference of Laminar Flow on Displacement Thickness in a Streamwise Corner. Journal of Power and Energy, vol. 218, no. 1, pp. 51 - 53.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้เกี่ยวข้อง

6. Wattananusorn, S. (2007) : Significance of the Balance-Based Averaging

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Theory for Application in Energy and Process Engineering. [Dissertation, Ruhr-University Bochum]

7. Wattananusorn, S. (2002) : Umformung der Wellengleichung. [in the Prof. Dr. Heinz Dieter Papenfuss's manuscript notes for lecture course on Numerische Stroemungsmechanik, pp. 135 - 137, translated into German by Dr. Frank Seifert]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.