

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์โบคอมเพรสเซอร์



นายกิตติศักดิ์ คู่ขวัญ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4270-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NUMERICAL STUDY OF TURBULENT FLOW AND HEAT TRANSFER IN GAS
TURBINE BLADE WITH TURBULATOR



Mr. Kittisak Kauwaranyu

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4270-3

กิตติศักดิ์ กุ์วัญญู : การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อน ใน ใบ พัดกังหัน ก๊าซ ที่มีเทอร์บิวเลเตอร์. (NUMERICAL STUDY OF TURBULENT FLOW AND HEAT TRANSFER IN GAS TURBINE BLADE WITH TURBULATOR) อ. ที่ปรึกษา : ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์, 145 หน้า. ISBN 974-17-4270-3.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และ $k-\omega$ ในที่นี้ สมมติให้การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ใน 2 มิติที่สภาวะคงตัวและการถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาเพียงการพาความร้อนแบบบังคับเท่านั้น

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มทำได้โดยการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับปัญหาที่มีผลการทดลองหรือผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ พบว่า แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ ให้ผลการทำนายที่ดีกว่าแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ โดยเฉพาะสำหรับปัญหาการไหลที่มีการถ่ายเทความร้อน จากนั้นจึงนำโปรแกรมไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ต่อไป สำหรับปัญหานี้สามารถแบ่งการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์ที่แตกต่างกันออกเป็น 3 รูปแบบ คือ การจัดวางบนผนังด้านล่างเพียงด้านเดียว การจัดวางบนผนังด้านบนและล่างแบบ In-lined และการจัดวางบนผนังด้านบนและล่างแบบ Staggered ของช่องทางไหล โดยจะศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์หลัก เช่น Re , h/w และ Pi/h ด้วย

จากผลการศึกษาพบว่า ช่องทางไหลซึ่งติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าช่องทางไหลผนังเรียบ และจากการเปรียบเทียบรูปแบบการจัดวางทั้ง 3 แบบพร้อมด้วยการแปรผันพารามิเตอร์ สามารถสรุปได้ว่าการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์แบบ Staggered มีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเส้นทางไหลและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซมากกว่าอีกสองแบบที่เหลือ

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

ปีการศึกษา 2546.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... -.....

##4470228821 :MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
 KEY WORD: FINITE VOLUME / TURBULATOR / GAS TURBINE BLADE / TURBULENT FLOW

KITTISAK KAUWARANYU : NUMERICAL STUDY OF TURBULENT FLOW AND HEAT TRANSFER IN GAS TURBINE BLADE WITH TURBULATOR. THESIS ADVISOR : SOMPONG PUTIVISUTISAK, Ph.D. 145 pp. ISBN 974-17-4270-3.

This thesis presents a finite volume method for turbulent flow and heat transfer in a gas turbine blade with turbulator. The flows are assumed to be two dimensional, incompressible and steady. The standard $k - \varepsilon$ and $k - \omega$ models are used to simulate the turbulent transport quantities of the flow. Only force convection heat transfer is considered in this case.

A computer program based on the finite volume method has been developed for predicting the heat transfer and flow phenomena. The developed program were validated with simple problems, in which experimental or other numerical results are available. It was found that the $k - \omega$ model gave a better results than the standard $k - \varepsilon$ model especially for thermal flow problems. Then the computer program was employed for calculation of the main problem – turbulent flow and heat transfer in gas turbine blade with turbulator. Effects of turbulator arrangements, Reynolds number (Re), height-to-width ratio (h/w) and pitch-to-height ratio (Pi/h) on the flow patterns and heat transfer characteristics are presented.

The results demonstrate that the cooling capability of the channel with turbulator is much better than that of the smooth channel, and it can be shown that the staggered arrangement is the best choice compared to other arrangements.

Department Mechanical Engineering Student's signature _____
 Field of study Mechanical Engineering Advisor's signature _____
 Academic Year 2003 Co-advisor's signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดเห็นที่มีประโยชน์อย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ ประธานกรรมการ ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณี มณีรัตน์ กรรมการ ที่ให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณอาจารย์นิพนธ์ วรรณโสภากย์ พี่สุทธิศักดิ์ พงษ์ธนาพานิช ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์การคำนวณทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำและเอื้อเฟื้อน้ำใจตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาอันเป็นที่รักอย่างยิ่งที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอด อนึ่งคุณค่าที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาแด่บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.1.1 เครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas turbine engine).....	2
1.1.2 ใบพัดกังหันก๊าซ (Gas turbine blade).....	3
1.1.3 การระบายความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซ (Turbine blade cooling) ...	4
1.2 การศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	6
1.2.1 การไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวาง.....	6
1.2.2 การไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวาง และเทอร์บิวเลเตอร์.....	8
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	10
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์.....	11
1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	11
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	12
1.7 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	12
บทที่ 2 ทฤษฎี	15
2.1 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2	แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence modeling) 17
2.2.1	แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ 18
2.2.2	แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$ 22
2.3	สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy equation) 26
2.4	สรุปสมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน 27
2.5	ขั้นตอนโดยทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม 28
บทที่ 3	ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม 32
3.1	บทนำ 32
3.2	สมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equations) 32
3.3	ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มสำหรับปัญหาการพาและการแพร่กระจาย 33
3.3.1	เทอมการพา 35
3.3.2	เทอมการแพร่กระจาย 36
3.3.3	Source term 37
3.4	การประมาณค่าโดยใช้ Numerical scheme 37
3.4.1	Central differencing scheme 37
3.4.2	Upwind differencing scheme 38
3.4.3	Hybrid differencing scheme 39
3.4.4	Power-law differencing scheme 40
3.5	การแบ่งกริดแบบเอียง (Staggered grid) 41
3.6	กริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) 43
3.7	เงื่อนไขขอบ (Boundary conditions) 44
3.7.1	เงื่อนไขขอบที่ผนัง (Wall boundary condition) 45
3.7.2	เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า (Inlet boundary condition) 50
3.7.3	เงื่อนไขขอบที่ทางออก (Outlet boundary condition) 50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7.4 เงื่อนไขขอบแบบสมมาตร (Symmetry conditions)	51
3.8 กระบวนการหาผลเฉลย (Solution procedure)	51
3.8.1 การหาผลเฉลยสมการดิสครีไทซ์ด้วยวิธี TDMA	52
3.8.2 ค่า Under-relaxation	53
3.8.3 SIMPLE algorithm	54
3.8.4 เงื่อนไขการลู่เข้า (Convergence criterion)	59
3.9 บทสรุป	59
บทที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	60
4.1 ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่าน ช่องทางไหลผนังเรียบ	60
4.1.1 ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ	60
4.1.2 ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่าน ช่องทางไหลผนังเรียบ	64
4.2 ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่าน Backward-facing step	66
4.3 ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว	73
บทที่ 5 การทำนายการไหลและการถ่ายเทความร้อน ในใบพัดกังหันก๊าซ ที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง	81
5.1 การพิจารณาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซที่มี เทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง	81
5.2 การคำนวณการพาความร้อนแบบบังคับ	82
5.3 รูปร่างของช่องทางไหลและการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์	83
5.4 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์	86

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการไหลและ การถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์มิวเลเตอร์	99
6.1 ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์มิวเลเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านล่างของช่องทางไหล	99
6.2 ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์มิวเลเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined	113
6.3 ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์มิวเลเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered	124
6.4 การเปรียบเทียบการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่าน เทอร์มิวเลเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังช่องทางไหลแบบต่างๆ	130
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	136
7.1 บทสรุป	136
7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	138
รายการอ้างอิง	140
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	145

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในรูปแบบของเทนเซอร์ สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$	27
ตารางที่ 2.2 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในรูปแบบของเทนเซอร์ สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$	28
ตารางที่ 3.1 สมการควบคุมพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในรูปทั่วไปของตัวแปร ϕ	33
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า	51
ตารางที่ 5.1 ขนาดและเงื่อนไขต่างๆ ของการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวาง จำนวน 1 คู่	86
ตารางที่ 5.2 ขนาดที่ใช้ในการจำลองปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 2 คู่ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล	93

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 เครื่องยนต์กังหันก๊าซ	2
รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ	3
รูปที่ 1.3 ใบพัดกังหันซึ่งถูกติดตั้งอยู่บนโรเตอร์และใบพัด	3
รูปที่ 1.4 เส้นทางการไหลในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง	4
รูปที่ 1.5 เส้นทางการไหลภายในใบพัดกังหันก๊าซและภาพตัดของใบพัด ซึ่งแสดงลักษณะการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์	5
รูปที่ 1.6 การจำลองเส้นทางการไหลภายในใบพัดกังหันก๊าซที่เทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง	6
รูปที่ 2.1 ลักษณะของความเร็วที่เวลาใดๆ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน	16
รูปที่ 2.2 การแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยๆ	29
รูปที่ 2.3 ตำแหน่ง Node ต่างๆ ในปริมาตรควบคุม	30
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	31
รูปที่ 3.1 การวางตัวของปริมาตรควบคุมใน 2 มิติ	35
รูปที่ 3.2 ลักษณะการวาง Cell แบบเยื้อง (Staggered)	41
รูปที่ 3.3 ลักษณะการวางของ Scalar cell ในโดเมนการคำนวณ	42
รูปที่ 3.4 ลักษณะการวางของ u -cell ซึ่งวางเยื้องกับ Scalar cell ในโดเมนการคำนวณ	42
รูปที่ 3.5 ลักษณะการวางของ v -cell ซึ่งวางเยื้องกับ Scalar cell ในโดเมนการคำนวณ	42
รูปที่ 3.6 ลักษณะของกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (a) กริดที่มีขนาดเล็กทางด้านขวา (b) กริดที่มีขนาดเล็กทางด้านซ้าย (c) กริดที่มีขนาดเล็กทั้งทางด้านซ้ายและขวา	43
รูปที่ 3.7 การคำนวณกริดแบบไม่สม่ำเสมอ	44
รูปที่ 3.8 เงื่อนไขขอบสำหรับโดเมนการคำนวณ	45
รูปที่ 3.9 ปริมาตรควบคุมที่ผนัง	45
รูปที่ 3.10 Turbulent boundary layer	47
รูปที่ 3.11 โดเมนการคำนวณ (Computational domain) ที่ใช้วิธี TDMA ในการคำนวณ	52
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนของ SIMPLE algorithm	58
รูปที่ 4.1 ลักษณะของปัญหาการไหลผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ	61

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 ลักษณะของกริดแบบสม่ำเสมอที่ใช้สำหรับปัญหาการไหลผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ	62
รูปที่ 4.3 ความเร็ว u/U_0 ที่ตำแหน่งทางออกซึ่งได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ สำหรับ $Re_H = 13750$	62
รูปที่ 4.4 ความเร็ว u/U_0 ที่ตำแหน่งทางออกซึ่งได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$ สำหรับ $Re_H = 13750$	63
รูปที่ 4.5 ความเร็ว u/U_0 ที่ตำแหน่งทางออกซึ่งได้จากการจำลองการไหลเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธี DNS สำหรับ $Re_H = 13750$	63
รูปที่ 4.6 ลักษณะของปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ	65
รูปที่ 4.7 ความเร็ว u/U_0 ที่ตำแหน่งทางออก สำหรับ $Re = 20000$ และ $q'' = 1000 \text{ W/m}^2$	65
รูปที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทที่เรย์โนลด์สสัมประสิทธิ์ต่างๆกัน สำหรับ $q'' = 1000 \text{ W/m}^2$	66
รูปที่ 4.9 ลักษณะของปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่าน Backward-facing step	67
รูปที่ 4.10 รูปแบบกริดแบบสม่ำเสมอในการจำลองการไหลผ่าน Backward-facing step สำหรับ $Re_h = 5540$	68
รูปที่ 4.11 ความเร็ว u/U_{ref} ที่ตำแหน่ง $x/h = 7$ และทางออก ($x/h = 20$) สำหรับการไหลผ่าน Backward-facing step จากการคำนวณด้วยกริดขนาดต่างกัน (a) Standard $k - \varepsilon$ (b) $k - \omega$	69
รูปที่ 4.12 ความเร็ว u/U_{ref} ที่ได้จากการจำลองการไหลผ่าน Backward-facing step เปรียบเทียบกับผลจากวิธี DNS สำหรับ $Re_h = 5540$ ที่ x/h ต่างๆ กัน	70
รูปที่ 4.13 ความเร็ว v/U_{ref} ที่ได้จากการจำลองการไหลผ่าน Backward-facing step เปรียบเทียบกับผลจากวิธี DNS สำหรับ $Re_h = 5540$ ที่ x/h ต่างๆ กัน	70
รูปที่ 4.14 เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่าน Backward-facing step สำหรับ $Re_h = 5540$	71
รูปที่ 4.15 Streamline ของการไหลผ่าน Backward-facing step สำหรับ $Re_h = 5540$	71

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.16 รายละเอียดของเวกเตอร์ความเร็วและ Streamline บริเวณที่เกิดการหมุนวน สำหรับ $Re_h = 5540$	71
รูปที่ 4.17 ค่าสแตนต์นัมเบอร์หลังการไหลผ่าน Backward-facing step ที่ x/h ต่างๆ กัน	72
รูปที่ 4.18 การกระจายอุณหภูมิรัศมีที่ x/h ต่างๆ กัน	73
รูปที่ 4.19 ลักษณะของปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว	74
รูปที่ 4.20 ความเร็ว u/U_0 ที่ $x/h = 7.1$ สำหรับ $Re_H = 14000$ (a) Standard $k - \epsilon$ (b) $k - \omega$	75
รูปที่ 4.21 กริดขนาด 155×36 สำหรับการจำลองการไหลผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว	75
รูปที่ 4.22 ความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากการจำลองการไหลผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว เปรียบเทียบกับผลการทดลองสำหรับ $Re_H = 14000$ ที่ x/h ต่างๆ กัน	76
รูปที่ 4.23 ความเร็ว v/U_0 ที่ได้จากการจำลองการไหลผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว เปรียบเทียบกับผลการทดลองสำหรับ $Re_H = 14000$ ที่ x/h ต่างๆ กัน	76
รูปที่ 4.24 เวกเตอร์ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว สำหรับ $Re_H = 14000$	77
รูปที่ 4.25 Streamline ของการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว สำหรับ $Re_H = 14000$	77
รูปที่ 4.26 ลักษณะของปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว	78
รูปที่ 4.27 ค่า Nu_D หลังการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง x/h ต่างๆ กัน	79
รูปที่ 4.28 อุณหภูมิเฉลี่ยหลังการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง x/h ต่างๆ กัน	80
รูปที่ 5.1 ช่องทางไหลซึ่งมีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง	83
รูปที่ 5.2 การจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์แบบ In-lined	84
รูปที่ 5.3 การจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านล่างเพียงด้านเดียว	84
รูปที่ 5.4 การจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์แบบ Staggered	84
รูปที่ 5.5 มุมการจัดวางของเทอร์บิวเลเตอร์แบบต่างๆ (a) มุมปะทะ $\alpha = 90^\circ$ (b) มุมปะทะ $\alpha = 60^\circ$ (c) V-shape (d) Discrete	85

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.6 ลักษณะของปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 1 คู่ ซึ่งติดตั้งบน ผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล.....	87
รูปที่ 5.7 ความเร็ว u/U_0 ที่ $x/w = -1.27$ และ 2.67 สำหรับ $Re_D = 39000$	88
รูปที่ 5.8 ความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากการจำลองการไหลเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับ $Re_D = 39000$ ที่ x/w ต่างๆ กัน ($w/h = 3.75$).....	88
รูปที่ 5.9 เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง 1 คู่ ซึ่งติดตั้ง บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล ($w/h = 3.75$).....	89
รูปที่ 5.10 Streamline ของการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง 1 คู่ ซึ่งติดตั้ง บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล ($w/h = 3.75$).....	89
รูปที่ 5.11 ความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากการจำลองการไหลเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับ $Re_D = 30000$ ที่ x/w ต่างๆ กัน ($w/h = 1.50$).....	90
รูปที่ 5.12 เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง 1 คู่ ซึ่งติดตั้ง บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล ($w/h = 1.50$).....	91
รูปที่ 5.13 Streamline ของการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง 1 คู่ ซึ่งติดตั้ง บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล ($w/h = 1.50$).....	91
รูปที่ 5.14 Contour ของความดันของการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง 1 คู่ ซึ่งติดตั้ง บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล ($w/h = 1.50$).....	91
รูปที่ 5.15 ค่าความยาว Reattachment ที่เกิดหลังสิ่งกีดขวางด้านบน (x_{R1}) และล่าง (x_{R2}) ที่ Normalized rib height ต่างๆ กัน.....	92
รูปที่ 5.16 ลักษณะของปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 2 คู่ ซึ่งติดตั้ง บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล.....	93
รูปที่ 5.17 รูปแบบของกริดที่ใช้ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 2 คู่ (a) PR = 5 (b) PR = 10 (c) PR = 15	94
รูปที่ 5.18 ความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากการจำลองการไหลเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับ $Re_D = 42000$ ที่ x/h ต่างๆ กัน (a) PR = 5 (b) PR = 10 (c) PR = 15	95

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.19	เวกเตอร์ความเร็วและ Streamline ของการไหลผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 2 คู่ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล (a) PR = 5 (b) PR = 10 (c) PR = 15	97
รูปที่ 5.20	การเปรียบเทียบบริเวณการหมุนวนที่เกิดขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวาง ทั้งสองสำหรับการไหลผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 2 คู่ (a) PR = 5 (b) PR = 10 (c) PR = 15	98
รูปที่ 6.1	ลักษณะของปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่าน สิ่งกีดขวางจำนวน 8 แห่ง ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านล่างของช่องทางไหล.....	100
รูปที่ 6.2	ความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากการคำนวณปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อน ผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 8 แห่ง เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ x/h ต่างๆ.....	102
รูปที่ 6.3	ความเร็ว v/U_0 ที่ได้จากการคำนวณปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อน ผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 8 แห่ง เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ x/h ต่างๆ.....	102
รูปที่ 6.4	ค่า Nu_D หลังการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง x/h ต่างๆ กัน.....	103
รูปที่ 6.5	อุณหภูมิเฉลี่ยหลังการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง x/h ต่างๆ กัน.....	103
รูปที่ 6.6	ขนาดและตำแหน่งการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล.....	104
รูปที่ 6.7	การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Re_H ตั้งแต่ 7000 ถึง 21000 สำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านล่าง ของช่องทางไหล.....	105
รูปที่ 6.8	อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ ที่ Re_H ต่างๆ กัน สำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์ บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล.....	106
รูปที่ 6.9	การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า h/w ตั้งแต่ 1 ถึง 5 สำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล (a) $h/w = 1, 2$ (b) $h/w = 3, 4$ และ 5	107
รูปที่ 6.10	การหมุนวนที่เกิดขึ้นบริเวณระหว่างสิ่งกีดขวางที่ h/w ต่างๆ กัน สำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านล่าง (a) $h/w = 1$ (b) $h/w = 2$ (c) $h/w = 3$ (d) $h/w = 4$ (e) $h/w = 5$	108

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.11 อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ ที่ h/w ต่างๆ กัน สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล.....	109
รูปที่ 6.12 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing ตั้งแต่ 7 ถึง 69 (18 ถึง 3 แห่ง) สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล (a) $Pi/h = 69$ (3แห่ง) (b) $Pi/h = 34$ (5แห่ง) (c) $Pi/h = 16.5$ (9แห่ง) (d) $Pi/h = 11.73$ (12แห่ง) (e) $Pi/h = 7$ (18แห่ง).....	110
รูปที่ 6.13 การไหลหมุนวนที่เกิดบริเวณระหว่างสิ่งกีดขวาง (a) เมื่อ Rib spacing มีค่ามาก (b) เมื่อ Rib spacing มีค่าน้อย.....	112
รูปที่ 6.14 อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ ที่จำนวนสิ่งกีดขวางต่างๆ กัน สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล.....	112
รูปที่ 6.15 ลักษณะของปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างแบบ In-lined.....	114
รูปที่ 6.16 อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ บริเวณระหว่างสิ่งกีดขวางคู่ที่ 21 กับ 22	115
รูปที่ 6.17 อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ บริเวณระหว่างสิ่งกีดขวางคู่ที่ 22 กับ 23	116
รูปที่ 6.18 อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ บริเวณระหว่างสิ่งกีดขวางคู่ที่ 21 กับ 22 และ 22 กับ 23	116
รูปที่ 6.19 ขนาดและการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined	117
รูปที่ 6.20 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Re_H ตั้งแต่ 7000 ถึง 21000 สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined	118
รูปที่ 6.21 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า h/w ตั้งแต่ 1 ถึง 3 สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined (a) $h/w = 1, 1.5$ และ 2 (b) $h/w = 2.5$ และ 3.....	119

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.22 รูปแบบการกระจายค่า Nu_x เทียบกับรูปแบบการไหลซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า h/w สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined (a) การไหลแบบสมมาตร (b) การไหลแบบไม่สมมาตร.....	120
รูปที่ 6.23 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing ตั้งแต่ 45 ถึง 7 (จำนวนสิ่งกีดขวาง 4 ถึง 18 คู่) สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined (a) $Pi/h = 45$ (4คู่) (b) $Pi/h = 27$ (6คู่) (c) $Pi/h = 16.5$ (9คู่) (d) $Pi/h = 9.7$ (14คู่) (e) $Pi/h = 7$ (18คู่).....	121
รูปที่ 6.24 อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined ที่พารามิเตอร์ต่างๆ กัน (a) Re_H (b) h/w (c) No. of Ribs.....	123
รูปที่ 6.25 ลักษณะของปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างแบบ Staggered.....	124
รูปที่ 6.26 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Re_H ตั้งแต่ 7000 ถึง 21000 สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered.....	125
รูปที่ 6.27 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า h/w ตั้งแต่ 1 ถึง 3 สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered.....	126
รูปที่ 6.28 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing ตั้งแต่ 7 ถึง 27 (จำนวนสิ่งกีดขวางตั้งแต่ 9 ถึง 3 คู่) สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered (a) $Pi/h = 27$ (3คู่) (b) $Pi/h = 19$ (4คู่) (c) $Pi/h = 14.5$ (5คู่) (d) $Pi/h = 9.7$ (7คู่) (e) $Pi/h = 7$ (9คู่).....	127

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.29 อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ สำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านบนและล่าง
ของช่องทางไหลแบบ Staggered ที่พารามิเตอร์ต่างๆ

(a) Re	(b) h/w	(c) No. of Ribs	129
--------	-----------	-----------------------	-----

รูปที่ 6.30 ค่าอัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ สำหรับการจัดวางและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กัน

รูปที่ 6.31 ค่าอัตราส่วน f / f_s สำหรับการจัดวางและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดของปริมาตรควบคุม
C	ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน
C_p	ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
D	การแพร่ของความปั่นป่วน, Viscous diffusion, สัมประสิทธิ์การแพร่, Hydraulic diameter
E	ค่าความขรุขระของผิว
F	สัมประสิทธิ์การพา
f	Interpolation factor, สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction coefficient)
G	Rate of turbulent energy production
Gr	กราชอฟนัมเบอร์ (Grashof number)
g	แรงโน้มถ่วงโลก
H	ความสูงของช่องทางไหล
h	ความสูงของสิ่งกีดขวาง
k	Turbulent kinetic energy, สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity)
L	Characteristic length scale
Nu	นัสเซิลนัมเบอร์ (Nusselt number)
p	ความดัน
Pi	ค่า Pitch
Pe	เพกเลตนัมเบอร์ (Peclet number)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

Pr	พรีนซ์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl number)
PR	อัตราส่วน Pitch ต่อความสูงของสิ่งกีดขวาง
q''	ฟลักซ์ความร้อน
R_{ij}	Kinetic Reynolds stresses
Ra	เรย์เลห์นัมเบอร์ (Rayleigh number)
Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number)
S	เทอม Source
s_{ij}	Strain rate tensor
T	อุณหภูมิ
t	เวลา
u	ความเร็วในแนวแกน x
V	ปริมาตรควบคุม
v	ความเร็วในแนวแกน y
w	ความกว้างของสิ่งกีดขวาง
x	ระยะในแนวแกน x
x_R	Reattachment length
y	ระยะในแนวแกน y
ϕ	ตัวแปรเกลาร์

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

τ_w	ความเค้นเฉือนที่ผนัง
μ	ความหนืดสัมบูรณ์
l	Turbulent length scale
ε	Dissipation rate
ω	Specific Dissipation rate
ρ	ความหนาแน่น
μ_t	Turbulent viscosity
ν	ความหนืดจลศาสตร์
δ_{ij}	Kronecker delta function
κ	Von Karman constant
Π_{ij}	เทอมการแพร่ของความดัน
α	Under-relaxation
Γ	สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)
β	สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of thermal expansion)
$\frac{D}{Dt}$	Total derivative
ตัวห้อย (Subscripts)	
b	Bulk
i, j, k	Cartesian indices

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

e, w, n, s Control volume face ระหว่าง P และ E, P และ W, P และ N, P และ S

E, W, N, S จุดที่อยู่ข้างเคียงทางทิศ east, west, north และ south

nb จุดต่อที่อยู่ข้างเคียง

s ผนังเรียบ (Smooth wall)

t Turbulent

ตัวยก (Superscripts) และ Over bars

$+$ ค่า Normalized ใน Wall function

$'$ ค่าของการสั่นใน Turbulent

$*$ Current value

$-$ ค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์การไหลด้วยวิธีการทดลองจริงนั้น จัดว่าเป็นวิธีเริ่มต้นที่ทำให้เราทราบถึงปรากฏการณ์และพฤติกรรมของการไหลที่ซับซ้อนต่างๆ อย่างไรก็ตาม ในการทำการทดลองแต่ละครั้ง เราจะต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายจำนวนมาก ดังนั้น จึงได้มีการพยายามหาทางเลือกอื่นที่สะดวกขึ้นในการศึกษาปรากฏการณ์การไหลต่างๆ ในทศวรรษที่ผ่านมาความสามารถของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนเป็นผลทำให้การแก้ปัญหาทางด้านการไหลและการถ่ายเทความร้อนด้วยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะความได้เปรียบของการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการศึกษา อีกทั้งยังสามารถแปรผันตัวแปรหรือพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อปรากฏการณ์ได้สะดวกรวดเร็วกว่าการทดลอง นั่นเอง

โดยทั่วไป ลักษณะทางกายภาพของปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ได้ อย่างไรก็ตาม การหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์อาจทำได้ไม่ถายนักหากว่าปัญหาดังกล่าวมีลักษณะไม่เชิงเส้น ในการหาผลเฉลยของปัญหาแบบนี้สามารถทำได้โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งจะทำการตัดแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ต่างๆ ให้กลายเป็นชุดสมการพีชคณิต แล้วประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของชุดสมการนั้นๆ ต่อไป

รูปแบบการไหลในงานทางวิศวกรรม ที่ได้รับความสนใจและใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางรูปแบบหนึ่งก็คือ การไหลผ่านช่องทางไหลที่มีการติดตั้งสิ่งกีดขวางไว้ภายใน ซึ่งรูปแบบการไหลเช่นนี้สามารถพบได้ในงานวิศวกรรมจำนวนมาก เช่น การระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ, การถ่ายเทความร้อนในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์, การถ่ายเทความร้อนผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ และการระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งบนแผงวงจร เป็นต้น ทั้งนี้ ช่องทางไหลหรือท่อที่ติดตั้งสิ่งกีดขวางที่เพิ่มขึ้น จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดการผสมกันของของไหลที่ดีขึ้น โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อสภาวะการทำงานและอายุการใช้งานของอุปกรณ์นั้นๆ อย่างยิ่ง

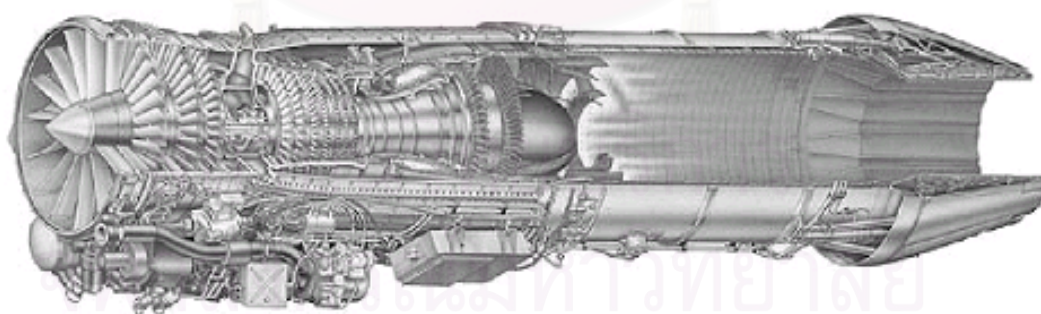
ในงานวิทยานิพนธ์นี้ เราจะทำการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์ทางวิศวกรรมชนิดหนึ่ง นั่นก็คือ การระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ซึ่งในการออกแบบใบพัดกังหันก๊าซนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal efficiency) ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซและยืดอายุการใช้งานของใบพัดกังหันให้ยาวนานขึ้น ในการศึกษาเกี่ยวกับปัญหานี้ เราจะต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับ สิ่งต่อไปนี้ คือ

- 1) เครื่องยนต์กังหันก๊าซ
- 2) ใบพัดกังหันก๊าซ (Gas turbine blade)
- 3) การระบายความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซ (Turbine blade cooling)

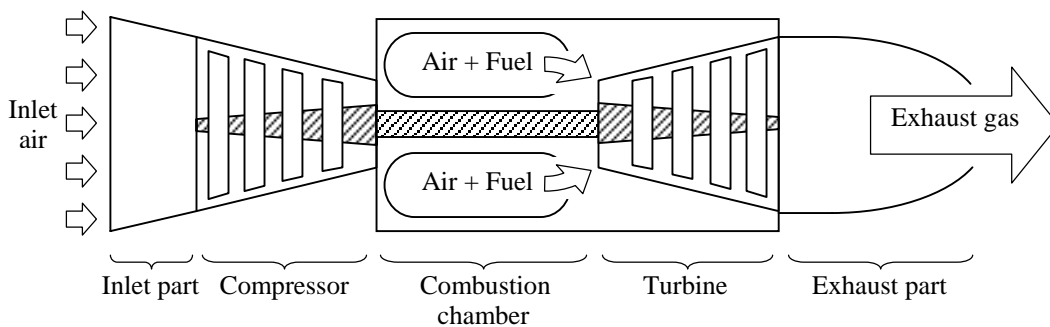
1.1.1 เครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas turbine engine)

เครื่องยนต์กังหันก๊าซ (รูปที่ 1.1) มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากเนื่องจากเครื่องยนต์ประเภทนี้มีเสถียรภาพในการทำงานสูงและมีอัตราส่วนกำลังงานที่ให้ออกมาต่อน้ำหนักของเครื่องยนต์ที่สูง ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้กับงานหลายๆ ด้าน เช่น ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า, การบิน และยุทธโศปกรณ์ทางทหาร เป็นต้น

ส่วนประกอบหลักๆ ของเครื่องยนต์ลักษณะนี้ (รูปที่ 1.2) ได้แก่ บริเวณทางเข้า (Inlet part), คอมเพรสเซอร์ (Compressor), ห้องเผาไหม้ (Combustion chamber), กังหัน (Turbine) และส่วนของทางออกไอเสีย (Exhaust part)



รูปที่ 1.1 เครื่องยนต์กังหันก๊าซ

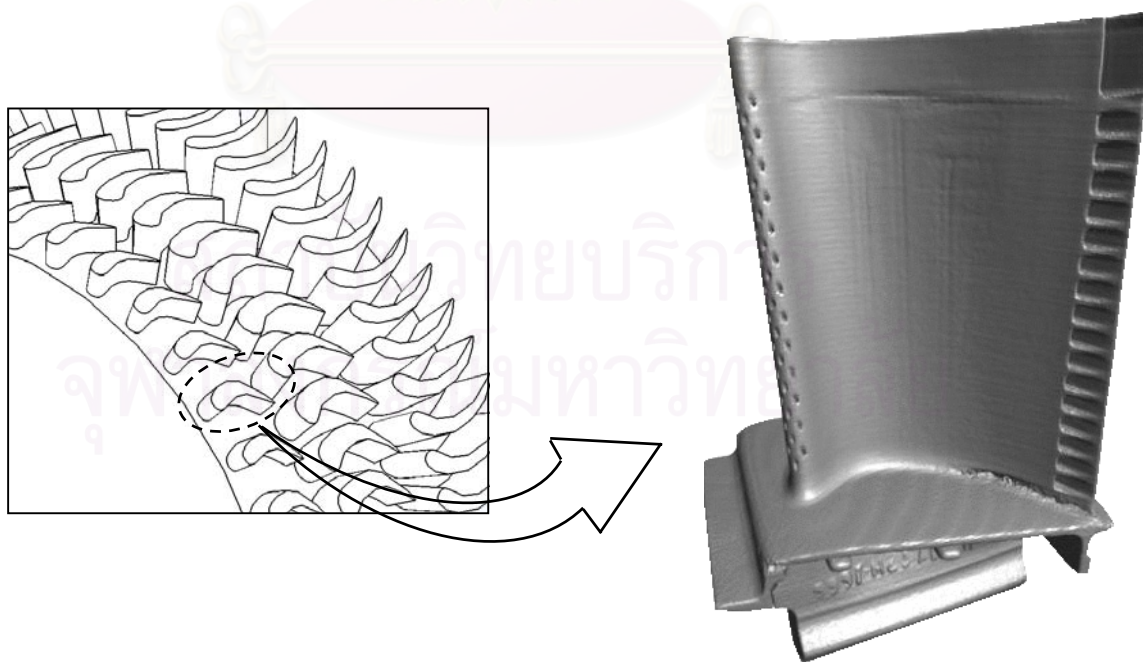


รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

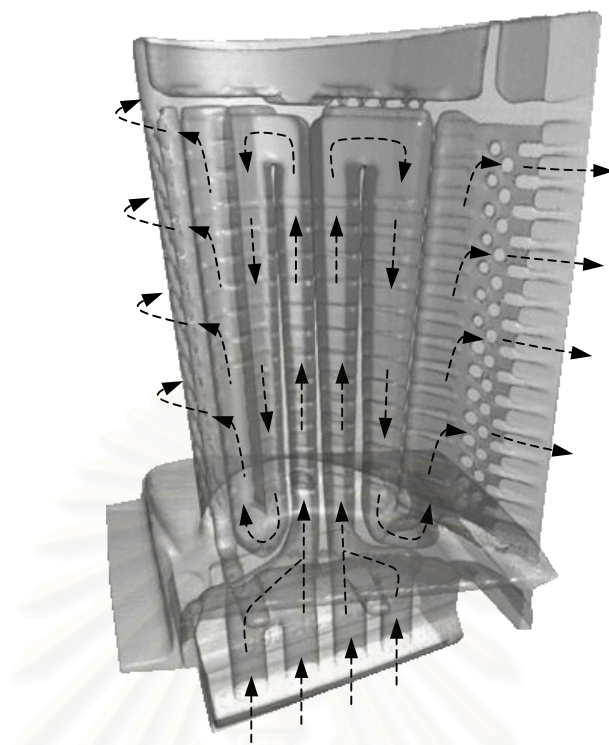
ในที่นี้เราสนใจส่วนของชุดกังหันก๊าซ ซึ่งใบพัดแต่ละใบถูกติดตั้งอยู่บนโรเตอร์ และถูกจัดเรียงเป็นชุดต่อกันไป ดังแสดงในรูปที่ 1.3

1.1.2 ใบพัดกังหันก๊าซ (Gas turbine blade)

เส้นทางการไหลที่คาดเดาภายในใบพัดกังหันก๊าซ (รูปที่ 1.4) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ซับซ้อน ดังนั้นในการศึกษาปรากฏการณ์ดังกล่าวด้วยการจำลองแบบจึงควรพิจารณาแยกออกเป็นส่วนๆ ซึ่งอาจจะประกอบไปด้วย ส่วนของผลกระทบจากผนัง (Wall effect), ผลกระทบจากสิ่งกีดขวาง (Rib effect), ผลกระทบจากการหมุน (Rotation effect) เป็นต้น สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะผลจากผนังและผลจากสิ่งกีดขวางเท่านั้น



รูปที่ 1.3 ใบพัดกังหันซึ่งถูกติดตั้งอยู่บนโรเตอร์และใบพัด



รูปที่ 1.4 เส้นทางไหลในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง

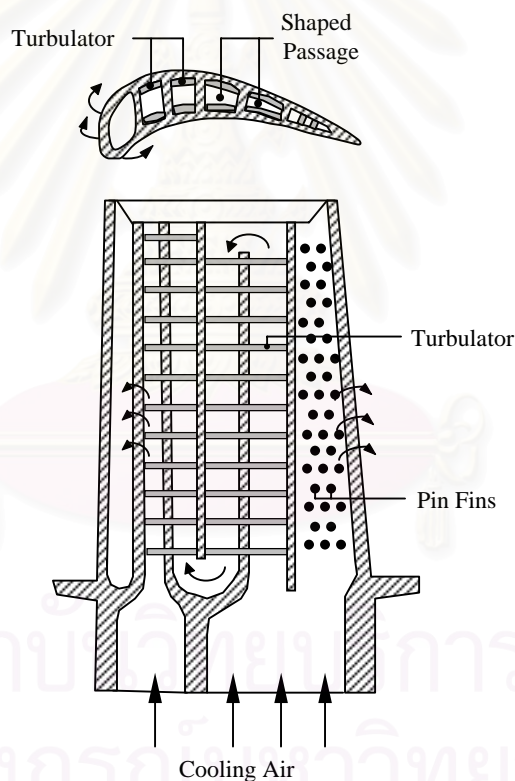
1.1.3 การระบายความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซ (Turbine blade cooling)

ในการออกแบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซให้มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงขึ้นและยืดอายุการใช้งานของใบพัดกังหันก๊าซให้ยาวนานขึ้น อาจทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิที่ทางเข้า (Inlet temperature) ร่วมกับการใช้เทคนิคการระบายความร้อน (Cooling techniques) เช่น เพิ่มการระบายความร้อนโดยการพาแบบบังคับ (Force convection cooling), ใช้การระบายความร้อนแบบฉีดกระทบ (Impingement cooling) หรือใช้การระบายความร้อนแบบ Film cooling โดยทั่วไปการเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของใบพัดกังหันสามารถทำได้ 2 แนวทาง คือ ทำการวิจัยทางด้านวัสดุ (Material research) ที่ใช้ทำใบพัด และทำการวิจัยทางด้านวิธีการระบายความร้อนของใบพัดกังหัน (Turbine blade cooling) ทั้งนี้ในการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ทำใบพัด เราจะต้องใช้ Superalloy ซึ่งมีความแข็งแรงและความทนทานต่ออุณหภูมิที่สูงได้ ซึ่งวัสดุประเภทนี้นอกจากมีราคาแพงมากแล้วยังหาได้ยากอีกด้วย ดังนั้นการออกแบบใบพัดกังหันก๊าซด้วยวิธีการระบายความร้อนที่เหมาะสมจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจกว่าการเลือกเปลี่ยนวัสดุ

การวิเคราะห์การระบายความร้อนของใบพัดกังหันมีอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปและมีประสิทธิภาพอย่างมาก คือ การระบายความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับภายใน

ใน (Internal forced convection) ซึ่งเทคนิคนี้ถูกใช้เป็นที่เทคนิคหลักในการระบายความร้อนผ่านช่องทางไหลของอากาศที่คดเคี้ยวภายในใบพัดที่ติดตั้งด้วยสิ่งกีดขวางวางเรียงห่างกันแบบซ้ำๆ ซึ่งนักอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamicists) เรียกว่า Turbulence promoter หรือ Turbulator (รูปที่ 1.5)

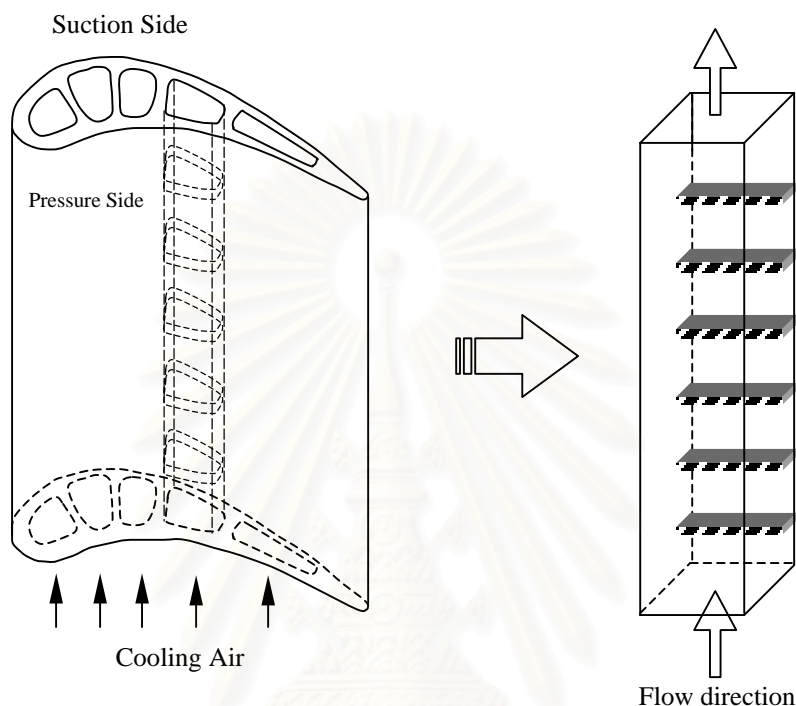
การระบายความร้อนโดยการพา สามารถทำได้โดยบังคับให้การไหลของอากาศที่ใช้ระบายความร้อน (Coolant air) เริ่มต้นไหลจากฐานด้านล่างขึ้นไปสู่ด้านบน แล้วจึงไหลผ่านไปตามเส้นทางภายในของใบพัด โดยรูปที่ 1.5 แสดงเส้นทางการไหลที่มีสิ่งกีดขวางติดตั้งอยู่ และที่ด้านท้ายของใบพัดมีชุด Pin fin ซึ่งถูกใช้เสมือนเป็น Turbulence promoter อีกแบบหนึ่ง ชุดท้ายอากาศจะถูกบังคับให้ไหลออกทางด้านส่วนต้นของใบพัด เพื่อใช้ในการระบายความร้อนแบบ Film cooling บนผิวด้านนอกของใบพัดต่อไป



รูปที่ 1.5 เส้นทางการไหลภายในใบพัดกังหันก๊าซและภาพตัดของใบพัด
ซึ่งแสดงลักษณะการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์

เนื่องจากประสิทธิภาพการระบายความร้อนจะถูกจำกัดด้วยขนาดของเส้นทางไหลภายใน (Internal passages) และถูกจำกัดด้วยตัวกลางที่ใช้ในการระบายความร้อน คือ อากาศที่มีความหนาแน่นและค่าความจุความร้อนจำเพาะต่ำ ดังนั้นการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อน

ร้อนของใบพัดให้สูงขึ้นจึงจำเป็นที่จะต้องใช้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่มีอยู่อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้พื้นผิวภายในใบพัดอย่างมีประสิทธิภาพนั้นมีอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งโดยส่วนใหญ่งานวิจัยดังกล่าวจะจำลองเส้นทางการไหลในใบพัดเสมือนเป็นการไหลผ่านช่องทางไหลที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้งแสดงในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 การจำลองเส้นทางการไหลภายในใบพัดกังหันก๊าซที่เทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง

ผลงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งเกี่ยวกับปรากฏการณ์การไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องทางไหลที่มีสิ่งกีดขวางติดตั้งสำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้ สามารถแบ่งแยกออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- 1) การไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวาง
- 2) การไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางและเทอร์บิวเลเตอร์

1.2 การศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา

1.2.1 การไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวาง

Bergeles and Athanassiadis [1] ศึกษาทดลองหาความยาวของบริเวณที่เกิดการหมุนวนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยวใน 2 มิติ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของสิ่งกีดขวางหลายๆ ค่า พบว่าบริเวณทางเข้าที่เกิดการหมุนวนหลักยังคงไม่เปลี่ยนแปลง แต่ที่บริเวณทางออกในช่วงซึ่งค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของสิ่งกีดขวาง (w/h) เท่ากับ 1 ถึง 3 สามารถสรุปได้

ว่า ความยาวบริเวณที่เกิดการหมุนวนเปลี่ยนแปลงตามค่าความกว้างของสิ่งกีดขวางเป็นแบบเชิงเส้นและเมื่อ w/h มีค่ามากกว่า 4 ความยาวของบริเวณการหมุนวนจะแปรผันเป็นแบบไม่เชิงเส้น

Tropea and Gackstatter [2] นำเสนอการทดลองเกี่ยวกับปรากฏการณ์การไหลผ่าน Fence และ Block ที่ติดตั้งในช่องทางไหล พบว่าในช่วงที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่าตั้งแต่ 150 ถึง 4500 นั้น ผลการทดลองที่ได้สามารถอธิบายถึงตำแหน่งที่ตั้ง ขนาดของบริเวณที่เกิดการหมุนวนแรก บริเวณที่เกิดการหมุนวนที่สอง และรูปร่างของความเร็วเฉลี่ย

Antoniou and Bergeles [3] ศึกษาทดลองเกี่ยวกับคุณลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว 2 มิติ โดยพวกเขาสนใจการเกิด Reattachment หลังจากมีการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง พบว่าการเพิ่มความยาวของสิ่งกีดขวางจะเกิด Reattachment ขึ้น 2 บริเวณคือ ที่ด้านบนและด้านหลังของสิ่งกีดขวาง ทั้งนี้เนื่องมาจากค่า Integral length scale ของ Turbulent eddies มีขนาดเล็กจนทำให้เกิดการแบ่งแยกขึ้น 2 ครั้งที่จุด Reattachment บริเวณด้านบนและด้านหลังของสิ่งกีดขวาง

Liou et al. [4] ศึกษาทดลองและคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$ เพื่อหาค่าความเร็วเฉลี่ยและค่า Turbulence intensity ของการไหลผ่านช่องทางไหลที่มีสิ่งกีดขวางติดตั้งทั้งด้านบนและด้านล่างของผนัง เมื่อค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์และค่า Pitch Ratio (PR) แปรผันในช่วง 1.2×10^4 ถึง 1.2×10^5 และ 1 ถึง 100 ตามลำดับ พบว่าทั้งค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์และค่า PR นี้มีผลต่อความยาว Reattachment ที่เกิดขึ้น โดยพวกเขาเลือกค่า PR = 5, 10 และ 15 ในการศึกษาคุณลักษณะการไหลด้วยแบบจำลองการคำนวณ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่า PR มีค่าเท่ากับ 10 จะช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าเมื่อค่า PR = 5 และ 15

Durst et al. [5] ศึกษาทดลองและคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$ เพื่อหาค่าความเร็วเฉลี่ยและค่าความแปรปรวน (Fluctuation) ของการไหลแบบ Fully developed ในช่องทางไหลที่มี Fence 2 อันวางเรียงต่อกันอยู่ภายใน ซึ่งผลของค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ (คำนวณจากความสูงของสิ่งกีดขวาง) และค่า Blockage ratio ที่มีต่อขนาดและตำแหน่งบริเวณที่เกิดการหมุนวนบริเวณแรกและบริเวณที่สอง พบว่าในช่วงที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่าไม่เกิน 100 ลักษณะการไหลผ่าน Fence แต่ละอันมีความคล้ายคลึงกัน โดยเกิดรูปแบบการไหลที่ซ้ำกัน จนกระทั่งเมื่อค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์สูงกว่า 100 สนามการไหลผ่าน Fence ทั้งสองจึงมีความแตกต่างกันเนื่องจากการไหลผ่าน Fence อันแรกจะส่งผลต่อลักษณะการไหลผ่าน Fence ที่สอง ซึ่งสามารถสังเกตได้ชัดเจนจากความยาวของบริเวณการหมุนวนด้านหน้าของแต่ละ Fence ที่มีค่าแตกต่างกัน

Acharya et al. [6] นำเสนอการทดสอบความสามารถของแบบจำลอง Non-linear $k - \varepsilon$ ในการทำนายการไหลแบบแยกตัวในช่องทางไหลผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว 2 มิติ โดยเปรียบเทียบค่าความเร็วเฉลี่ยและค่า Turbulence intensity กับผลการคำนวณด้วยแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ และผลการทดลอง พบว่าแบบจำลองทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับผลการทดลองในบริเวณแกนของการไหลและบริเวณใกล้ Reattachment แต่ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีนักในบริเวณที่เกิดการแยกตัวและเกิดขึ้นบางใกล้กับสิ่งกีดขวาง

Panyarattana and Putivisutisak [7] นำเสนอการวิเคราะห์การไหลแบบ 2 มิติ ผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงสี่เหลี่ยม 2 แห่งในช่องทางไหลโดยวิธีไฟไนต์วอลูม โดยผลกระทบจากการไหลแบบปั่นป่วนถูกคำนวณโดยใช้ Standard $k - \varepsilon$ model และยังทำการศึกษาผลกระทบต่อขนาดของบริเวณการหมุนวนข้างหลังสิ่งกีดขวางทั้งที่ Upstream และ Downstream ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรหลัก เช่น เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์และค่า Pitch ratio ในการวิเคราะห์นี้สิ่งกีดขวางได้ถูกจัดวางในรูปแบบต่างๆ ตัวอย่างเช่น สูง-สูง, ต่ำ-สูง, สูง-ต่ำ และต่ำ-ต่ำ ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้ พบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรหลักและการจัดวางแบบต่างๆ นี้มีผลต่อรูปร่างความเร็วของการไหลที่เปลี่ยนไป

1.2.2 การไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางและเทอร์มิสเตอร์

Aliaga et al. [8] ศึกษาทดลองการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส 2 มิติซึ่งวางเรียงเป็นแถวเดี่ยวในอุโมงค์ลมที่มีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ตั้งแต่ 0.5×10^6 ถึง 1.5×10^6 และค่า Roughness height (e/D_h) เท่ากับ 0.052 และ 0.093 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณด้านบนของสิ่งกีดขวาง และมีค่าต่ำสุดบริเวณด้านหลังของสิ่งกีดขวาง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการเกิด Separation-reattachment และการเกิดการหมุนวน

Acharya et al. [9] ทำการทดลองและทำการคำนวณการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลที่เกิดการแยกตัวผ่านสิ่งกีดขวาง 2 มิติในช่องทางไหล โดยในการคำนวณใช้แบบจำลองความปั่นป่วน 3 แบบด้วยกัน คือ Standard $k - \varepsilon$, Algebraic-stress (A-S) และ Non-linear $k - \varepsilon$ ของ Speziale [10] และใช้ Wall function 3 แบบ คือ WFI, WFII และ WFIII ของ Launder and Spalding [11], Chieng and Launder [12] และ Johnson and Launder [13] ตามลำดับ (Wall function ทั้งสามแบบมีความแตกต่างกันดังต่อไปนี้ WFI มีการกำหนดให้ Grid point แรกต้องวางสูงจากผนังในตำแหน่ง $y^+ > 11.5$ และต้องดัดแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ผนังให้เป็นไปตาม Law of wall ด้วย ส่วน WFII มีลักษณะการนิยามที่คล้ายกับ WFI แต่

ใช้ค่า y^+ ซึ่งหาจาก Turbulent kinetic energy ที่คำนวณได้จากบริเวณขอบของ Viscous sublayer และกำหนดให้ Sublayer thickness มีค่าคงที่เท่ากับ 20 Johnson and Launder [13] พบว่า WFII ไม่สามารถใช้คำนวณการถ่ายเทความร้อนที่เป็นคาบได้ แต่ WFI สามารถใช้ได้ พวกเขาจึงเสนอ WFIII ซึ่งจะคำนวณค่า Dissipation rate ที่ผนังใหม่และกำหนดให้เกรเดียนท์ของ Turbulent kinetic energy และ Dissipation rate ที่ผนังมีค่าเท่ากับศูนย์) ส่วนการทดลองมีการวัดการไหลด้วย LDV (Laser Dropler Velocimetry) จากการวัดอุณหภูมิและคำนวณหาค่าดัชนีเชลนัมเบอร์ พบว่า WF I และ WFII สามารถใช้ร่วมกับแบบจำลอง Non-linear $k - \epsilon$ ในการทำนายค่าความเร็วเฉลี่ยและค่า Turbulence intensity ในบริเวณใกล้เคียงขอบและบริเวณที่เกิดการแยกตัวได้ดี ส่วนการใช้ WFI และ WFII ร่วมกับแบบจำลองอื่นนั้น พบว่าค่าดัชนีเชลนัมเบอร์ที่ทำนายได้ต่ำเกินจริงและทำนายค่าอุณหภูมิสูงเกินจริง สำหรับการัน WFIII ทำนายค่าดัชนีเชลนัมเบอร์เทียบกับผลการทดลอง จะได้ผลที่ดีในบริเวณทางเข้าจนถึงบริเวณที่เกิด Reattachment แต่จะทำนายค่าดัชนีเชลนัมเบอร์มีค่าสูงเกินจริงหลังบริเวณที่เกิด Reattachment ส่วนผลการทำนายด้วยแบบจำลอง Algebraic-stress ใช้ได้ในกรณีที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าสูงๆ เท่านั้น ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถทำนายอุณหภูมิได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

Meinders et al. [14] ศึกษาทดลองการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยวที่ติดตั้งในช่องทางไหล ในช่วงซึ่งค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าตั้งแต่ 2750 ถึง 4970 โดยพวกเขาสนใจศึกษาการถ่ายเทความร้อนจากสิ่งกีดขวางที่มีอุณหภูมิผิวคงที่สู่สนามการไหล พบว่าการเกิดการหมุนวนมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงเนื่องจากเกิด Trapped vortex ซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นชั้นฉนวนที่ป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกจากผิวของผนัง แต่การเกิด Reattachment นั้นทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น

Meinders and Hanjalic [15] ศึกษาทดลองหารูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนผิวของสิ่งกีดขวางเป็นกลุ่ม ซึ่งวางบนผนังของช่องทางไหล จากการสังเกตพบว่ารูปแบบการไหลในบริเวณที่เกิดการแยกตัวและ Reattachment เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอย่างมาก ที่บริเวณผิวด้านบนและผิวด้านข้างของสิ่งกีดขวาง

Liou and Kao [16] ศึกษาทดลองโดยใช้อุปกรณ์วัด LDV สำหรับการไหลในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผ่านสิ่งกีดขวางที่ติดตั้งเป็นคู่บนผนังที่มีค่า Aspect ratio เท่ากับ 2 โดยพวกเขาสนใจค่าความเร็วเฉลี่ยและค่า Turbulence intensity ในช่วงของเรย์โนลด์นัมเบอร์ซึ่งแปรผันค่าอัตราส่วนความสูงของสิ่งกีดขวางต่อความสูงของช่องทางไหลจาก 0.13 ถึง 0.33 และแปรผันค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของสิ่งกีดขวางจาก 1 ถึง 10 พบว่าที่ความสูงของสิ่งกีด

ขวางและเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ค่าหนึ่ง จะทำให้รูปแบบการไหลเปลี่ยนจากแบบสมมาตรเป็นแบบไม่สมมาตรเนื่องจากความดันทางด้านบนและล่างของผนังช่องทางไหลที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ Liou and Kao ยังได้นำผลการไหลทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน เพื่อแสดงถึงอิทธิพลของดีกรีความปั่นป่วนด้วย

Acharya et al. [17] ศึกษาทดลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางทรงสี่เหลี่ยมที่วางเรียงต่อกัน และยังทำการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขร่วมกับการใช้แบบจำลอง Non-linear และ Standard $k - \epsilon$ ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าความยาวบริเวณการหมุนวนและค่าสเกลนัมเบอร์ที่คำนวณและวัดได้มีความสอดคล้องกัน แต่แบบจำลองทั้งสองมีประสิทธิภาพในการคำนวณค่าในบริเวณการไหลแยกตัวหลังสิ่งกีดขวางและยังทำนายค่า Reynolds stresses ความเร็วเฉลี่ยและค่าสเกลนัมเบอร์ได้ต่ำกว่าผลการทดลอง ส่วนค่าอุณหภูมิที่ทำนายได้มีค่าสูงกว่าผลการทดลอง อย่างไรก็ตามแบบจำลอง Non-linear สามารถทำนายค่า Reynolds stresses ได้ใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่า Standard $k - \epsilon$ ในบริเวณ Core flow ด้านบนของสิ่งกีดขวาง

Han [18] ศึกษาทดลองผลของ Channel aspect ratio ที่มีต่อการกระจายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลทรงสี่เหลี่ยมที่มีสิ่งกีดขวางติดตั้งตรงข้ามกันบนผนังทั้งด้านบนและล่าง (จำลองจากช่องทางไหลใน Turbine airfoil cooling) เมื่อค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์อยู่ในช่วง 10000 ถึง 60000 และค่า Channel Width-to-Height ratio (W/H) เท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 อีกทั้งยังศึกษาถึงผลของความห่างและความสูงของสิ่งกีดขวางอีกด้วย ซึ่งผลการทดลองการไหลผ่านช่องทางไหลสี่เหลี่ยมถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดลองที่มีผู้หาไว้แล้ว พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกันดีและยังสามารถนำความสัมพันธ์ที่ได้จากผลการทดลองนี้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเส้นทางการระบายความร้อนในกังหันที่มีรูปร่างเป็นแบบ Airfoil (Turbine airfoil cooling passages)

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

งานวิทยานิพนธ์นี้จะประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) สำหรับการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านช่องระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์ไบน์เลเตอร์ติดตั้งโดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1.3.1 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านช่องระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซ

- 1.3.2 เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีความสอดคล้องกับปัญหาพลศาสตร์ของไหลที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านช่องระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์ไบน์เทอร์โบดีเซล โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาและวิจัยในระดับสูงต่อไป

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์

- 1.4.1 ศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มสำหรับการแก้ปัญหาพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อของวิทยานิพนธ์
- 1.4.2 ศึกษาแบบจำลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน
- 1.4.3 พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม สำหรับปัญหาพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วน
- 1.4.4 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นกับปัญหาอย่างง่ายที่มีผลการทดลองหรือผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ
- 1.4.5 ปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์หลังจากทำการตรวจสอบกับปัญหาอย่างง่าย
- 1.4.6 นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ตรวจสอบความถูกต้องแล้วไปใช้แก้ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซ
- 1.4.7 วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์การไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซด้วยการคำนวณ พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยระดับสูงต่อไป
- 1.4.8 จัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.5.1 ศึกษาปรากฏการณ์การไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนด้วยการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence modeling) 2 แบบด้วยกัน คือ
- 1) แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$
 - 2) แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$
- 1.5.2 ในการคำนวณนี้จะพัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับปัญหาอย่างง่ายที่มีผลการทดลองหรือผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ โดยปัญหาที่ใช้ตรวจสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีดังนี้
- 1) ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ

- 2) ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่าน Backward-facing step
- 3) ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว

1.5.3 นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ตรวจสอบความถูกต้องแล้วไปประยุกต์แก้ปัญหาการไหลที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านช่องทางไหลภายในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์ไบลเตอร์ติดตั้ง และทำการศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรหลักต่างๆ ที่มีผลต่อรูปร่างการไหลและการถ่ายเทความร้อน ซึ่งประกอบไปด้วย Re , h/w , Pi/h และรูปแบบการจัดวางเทอร์ไบลเตอร์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 สามารถนำโปรแกรมไฟไนต์ออลุ่มที่พัฒนาขึ้นไปใช้วิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซ และปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนอื่นๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน
- 1.6.2 สามารถประยุกต์โปรแกรมเพื่อใช้ในการออกแบบการระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กังหันก๊าซและยืดอายุการใช้งานของใบพัดกังหัน

1.7 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ

กล่าวถึงความสำคัญและที่มา การศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา วัตถุประสงค์ ขั้นตอนการดำเนินงาน ขอบเขต ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎี

อธิบายถึงสมการพื้นฐานสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วน รวมทั้งแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ ซึ่งได้แก่ แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ และแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$

บทที่ 3 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม

ประกอบไปด้วยรายละเอียดของสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equations) และการดิสครีไทซ์ (Discretization) โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม รวมถึงการประมาณค่าที่บริเวณ Interface ด้วย Numerical scheme และเงื่อนไขขอบแบบต่างๆ ตลอดจนกระบวนการหาผลเฉลยด้วยวิธี TDMA ร่วมกับการใช้ขั้นตอนวิธี SIMPLE

บทที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

กล่าวถึงกรณีศึกษาที่นำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย

- 1) ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ
- 2) ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่าน Backward-facing step
- 3) ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว

บทที่ 5 การทำนายการไหลและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง

อธิบายถึงส่วนที่เกี่ยวข้องกับการทำนายการไหลและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง ซึ่งได้แก่ การพิจารณาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง การคำนวณการพาความร้อนแบบบังคับ รูปร่างของช่องทางไหลและการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์ รวมทั้งผลกระทบและตัวอย่างปัญหาจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

บทที่ 6 การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์

สามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ

- 1) ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านล่างของช่องทางไหล
- 2) ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined

3) ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered

จากนั้นจึงนำผลที่ได้จากทั้งสามปัญหามาทำการเปรียบเทียบการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งติดตั้งบนผนังช่องทางไหลแบบต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเส้นทางการระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซ

บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ประกอบด้วยบทสรุปของวิทยานิพนธ์และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อเนื่องที่อาจดำเนินการได้ต่อไปในอนาคต



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนของของไหล ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปชุดสมการเชิงอนุพันธ์ที่ประกอบด้วยสมการพื้นฐาน ดังนี้

1. สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)
2. สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum equation)
3. สมการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy equation)

โดยทั่วไป เมื่อพิจารณาการไหลสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน แต่ในที่นี้เราจะกล่าวถึงการไหลแบบปั่นป่วนเป็นหลัก ส่วนการไหลแบบราบเรียบจะกล่าวถึงเพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการหาสมการพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วนต่อไป สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้จะตั้งสมมติฐานว่าของไหลที่นำมาพิจารณามีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

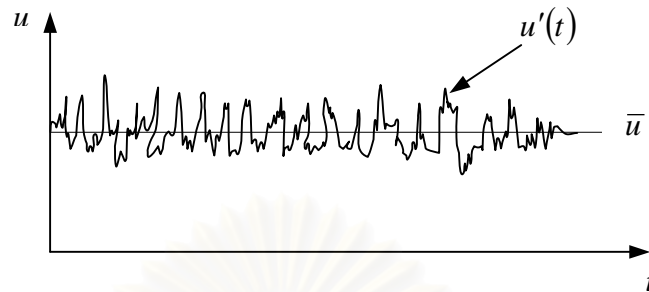
- 1) การไหลเป็นแบบปั่นป่วน
- 2) การไหลเป็นแบบหนืดและไม่อัดตัวภายใต้สถานะอยู่ตัว
- 3) ของไหลเป็นแบบนิวโตเนียน
- 4) คุณสมบัติของของไหลมีค่าสม่ำเสมอทั่วทั้งขอบเขตการไหล
- 5) ไม่คิดผลกระทบที่เกิดจากการลอยตัว (Buoyancy)

2.1 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

ในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลโดยทั่วไป ทำได้โดยการหาผลเฉลยของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum equation)

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนโดยทั่วไปนั้น ค่าของตัวแปรต่างๆ จะมีค่าไม่คงที่ และค่าเหล่านั้นจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป เช่น ความเร็ว u ที่แสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งลักษณะเช่นนี้ทำให้การคำนวณค่าตัวแปรมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้นมาก เพราะฉะนั้นจึงสมมติว่าคุณสมบัติต่างๆ ที่พิจารณาอันเกิดจากธรรมชาติของการไหลแบบปั่นป่วน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วน

ที่เป็นค่าเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลา เช่น \bar{u} , \bar{v} หรือ \bar{p} และส่วนที่แทนผลของการสั่น (Fluctuation) ที่สัมพันธ์กับเวลา เช่น u' , v' หรือ p'



รูปที่ 2.1 ลักษณะของความเร็วที่เวลาใดๆ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

สมการพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วน สามารถพัฒนาได้จากสมการในกรณีของการไหลแบบราบเรียบได้ ซึ่งสมการความต่อเนื่องและสมการอนุรักษ์โมเมนตัมสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบเทนเซอร์ (Tensor) ได้ดังนี้

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.2)$$

เมื่อ σ_{ij} คือ Deviatoric part ของ Viscous stress tensor และหาค่าได้จากความสัมพันธ์ของของไหลแบบนิวโตเนียน คือ

$$\sigma_{ij} = 2\mu s_{ij} \quad (2.3)$$

เมื่อ $s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ คือ ค่า Strain tensor

จากการพิจารณาการไหลแบบปั่นป่วน ทุกตัวแปรในการไหลสามารถแบ่งแยกออกเป็น ส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยและส่วนที่แทนผลของการสั่น ตัวอย่างเช่น ฟังก์ชัน ϕ สามารถเขียนได้เป็น

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.4)$$

จากนั้นทำการเฉลี่ยตัวแปรต่างๆ ในช่วงเวลาหนึ่ง (Time-averaging) จะได้

$$\bar{\phi}(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \phi(x,t) dt \quad (2.5)$$

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ยแล้ว จะทำให้ค่าเฉลี่ยของส่วนที่แทนผลของการสั่นนั้นมีค่าเป็นศูนย์ ($\overline{\phi'} = 0$) และจะได้ค่าเฉลี่ยของผลคูณทั้งสองตัวแปรที่มีค่าเป็น $\overline{fg} = \bar{f}\bar{g} + \overline{f'g'}$ ดังนั้นจึงเขียนสมการ 2.1 และ 2.2 ได้ใหม่ ในรูปค่าเฉลี่ยของเวลาในรูปเทนเซอร์ ดังนี้

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (2.6)$$

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{\rho u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2.7)$$

สมการ (2.6) และ (2.7) นี้เรียกว่า สมการ Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) ซึ่งจากการสังเกตจะเห็นได้ว่า สมการ (2.7) มีเทอม Kinetic Reynolds stresses ($R_{ij} = \overline{\rho u'_i u'_j}$) เพิ่มขึ้นมา ทำให้มีจำนวนตัวแปรมากกว่าจำนวนสมการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนมาช่วยในการคำนวณ ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ และแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$

2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence modeling)

ในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา การศึกษาปรากฏการณ์การไหลแบบปั่นป่วนด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้มีผู้คิดค้นและสร้างแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model) ขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งแบบจำลองส่วนใหญ่สร้างบนพื้นฐานของ Two-equation model โดยที่แนวคิดแบบนี้ใช้ Boussinesq approximation ร่วมกับสมการ Kinetic energy และ Auxiliary quantities เช่น Dissipation rate (ε), Turbulence length scale (ℓ), Specific dissipation rate (ω) เป็นต้น

แบบจำลองความปั่นป่วนมีด้วยกันหลายรูปแบบ เช่น Standard $k - \varepsilon$ (Launder and Spalding [11]), Modified $k - \varepsilon$ (Sloan et al. [19]), Non-linear $k - \varepsilon$ (Speziale [10]), $k - \omega$ (Wilcox [20]) และ Modified $k - \omega$ (Bredberg et al. [21]) แต่รูปแบบที่ได้รับความนิยมใช้กันมากและถูกเลือกนำมาใช้ในงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ คือ

- 1) แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ ของ Launder and Spalding [11]
- 2) แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$ ของ Wilcox [20]

2.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$

1) สมการ Turbulent kinetic energy, TKE

การจำลองสมการ Turbulent kinetic energy ถูกเสนอโดย Prandtl ในปี ค.ศ. 1945 (อ้างอิงใน [20]) ซึ่งเขาได้ประมาณค่า Characteristic velocity scale, v_{mix} สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนโดยให้ v_{mix} มีค่าประมาณ $l_{\text{mix}} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right|$ และได้กำหนดให้ค่า Turbulent kinetic energy ของ Turbulent fluctuation ต่อหนึ่งหน่วยมวล (k) มีความสัมพันธ์กับค่า Turbulent velocity fluctuation ดังนี้

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \quad (2.8)$$

เราสามารถเขียน Eddy viscosity ในเทอมของความหนาแน่น (ρ), Turbulence length scale (ℓ) และ Turbulent kinetic energy ดังนี้

$$\mu_t = \text{Constant} \cdot \rho k^{\frac{1}{2}} \ell \quad (2.9)$$

การหาค่า k มาแทนลงในสมการ (2.9) ทำได้โดยอาศัยเทอม Reynolds stress tensor ซึ่งจัดอยู่ในรูป

$$R_{ii} = -\overline{\rho u'_i u'_i} = -2\rho k \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) จะเห็นได้ว่า ถ้าค่า Reynolds stress tensor แปรผันตามค่า Kinetic energy ต่อหน่วยปริมาตรของ Turbulent fluctuation แล้ว จะได้ว่าค่า k ที่ถูกต้องควรเรียกว่า Specific turbulent kinetic energy แต่บางครั้งเราอาจเรียกว่า Turbulent kinetic energy เฉยๆก็ได้ และสมการ Reynolds stress สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.11)

$$\overline{u}_k \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_k} = -R_{ik} \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_k} - R_{jk} \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_k} + \varepsilon_{ij} - \Pi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_k} + C_{ijk} \right] \quad (2.11)$$

เมื่อแทน R_{ij} จากสมการ (2.10) ลงในสมการ (2.11) แล้วจัดรูปใหม่จะได้เป็น

$$\rho \overline{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = R_{ij} \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \overline{\rho u'_i u'_i u'_j} - \overline{p' u'_j} \right] \quad (2.12)$$

(1)

(2)

(3)

(4)

(5)

(6)

เมื่อค่า ε คือ Dissipation ต่อหนึ่งหน่วยมวล ซึ่งสามารถนิยามโดยความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k}} \quad (2.13)$$

เทอมต่าง ๆ ในสมการ (2.12) แสดงถึงกระบวนการทางกายภาพที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนในการไหล ดังนี้

เทอมที่ 1 คือ เทอมการพา (Convection) ซึ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า k ตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหล (Fluid particle)

เทอมที่ 2 คือ เทอม Production ซึ่งแทนอัตราการส่งถ่ายด้วยพลังงานจลน์จาก Mean flow ไปยัง Turbulent flow ซึ่งเขียนได้เป็น $R_{ij}\bar{s}_{ij}$

เทอมที่ 3 คือ เทอม Dissipation ที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลง Turbulent kinetic energy ไปเป็น Thermal internal energy

เทอมที่ 4 คือ เทอม Molecular diffusion แสดงถึงค่า Diffusion turbulence ซึ่งเกิดจากกระบวนการส่งถ่ายโมเลกุลของของไหลในธรรมชาติ

เทอมที่ 5 คือ เทอม Turbulent transport แสดงถึงอัตราการถ่ายเท Turbulent energy คู่ของไหลโดย Turbulent fluctuation

เทอมที่ 6 คือ เทอมการแพร่ความดัน (Pressure diffusion) แสดงถึงการถ่ายเท Turbulence ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับ Velocity fluctuation

สมการ (2.12) จะสามารถหาผลเฉลยได้ก็ต่อเมื่อเราต้องทราบค่า Reynolds stress tensor, Turbulent transport, Pressure diffusion และ Dissipation ซึ่งหาได้ดังนี้

สำหรับเทอม Reynolds stress tensor เราใช้การประมาณด้วย Boussinesq approximation ซึ่งในการประมาณแบบนี้ กำหนดให้ Kinetic Reynolds stress มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับค่า Mean strain rate tensor (\bar{s}_{ij}) ดังต่อไปนี้ [20]

$$R_{ij} = -\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} + 2\mu_t\bar{s}_{ij} \quad (2.14)$$

เมื่อ \bar{s}_{ij} คือ Mean strain rate tensor ซึ่งหาได้จาก $\bar{s}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)$

μ_t คือ Turbulent kinetic viscosity ซึ่งถูกกำหนดโดย $\mu_t = C_\mu\rho\frac{k^2}{\varepsilon}$ และ

$$C_\mu = 0.09$$

และ δ_{ij} คือ Kronecker delta function ซึ่งนิยามโดย

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & ; \quad i \neq j \\ 1 & ; \quad i = j \end{cases} \quad (2.15)$$

เทอม Turbulent transport และ Pressure diffusion ได้มาจากข้อมูลการทดลองโดย Mansour et al. [22] ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{2} \overline{\rho u'_i u'_i u'_j} + \overline{p' u'_j} = - \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (2.16)$$

เมื่อ σ_k คือ Prandtl-Schmidt number ซึ่งมีค่าประมาณ 1.0

เทอม Dissipation ถูกจัดอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของ Turbulent kinetic energy (k) กับ Turbulence length scale (ℓ) ซึ่งเสนอโดย Taylor ในปีค.ศ.1935 (อ้างอิงใน [21]) คือ

$$\varepsilon \approx k^{\frac{3}{2}} / \ell \quad (2.17)$$

เมื่อรวมสมการ (2.12) – (2.17) เข้าด้วยกันแล้ว เราจะได้สมการ Turbulent kinetic energy (TKE) ดังนี้

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = G - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.18)$$

เมื่อ G คือ Rate of turbulent energy production ซึ่งคำนวณได้จาก

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (2.19)$$

2) สมการ Dissipation rate

การพิสูจน์หาสมการ Dissipation rate (ε) ไม่สามารถทำได้ง่ายนัก แต่สามารถคำนวณโดยใช้ความคล้ายคลึงทางมิติที่สอดคล้องกัน (Dimensionally consistent analogy) กับสมการ TKE ดังนั้นจึงกำหนดให้ ε สามารถอธิบายในรูปของ Turbulent kinetic energy และ Turbulence length scale ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L} \quad (2.20)$$

เมื่อ L มีความสัมพันธ์กับค่า l_m ดังนี้ $L = C_\mu^{-0.75} l_m$ และ l_m คือ Prandtl mixing length ซึ่งนิยามจาก $l_m = \max[\kappa y, \lambda \delta]$ (โดยที่ δ คือ Boundary layer thickness, κ คือ Von Karman constant ($\kappa = 0.41$) และ λ คือ ค่าคงที่ ($\lambda = 0.09$))

ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการ ε ได้เป็น

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.21)$$

(1)

(2)

(3)

(4)

ซึ่งเทอมต่าง ๆ ในสมการ (2.21) แสดงถึงความหมายทางกายภาพที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนในการไหล ดังนี้

เทอมที่ 1 คือ เทอมการพาของ ε

เทอมที่ 2 คือ เทอมการแพร่ของความปั่นป่วน

เทอมที่ 3 คือ อัตราการผลิตของ ε

เทอมที่ 4 คือ อัตราการแยกสลายของ ε

3) ค่าคงที่ของแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$

ในการพิจารณาการไหลแบบปั่นป่วนที่ง่ายที่สุด ทำได้โดยกำหนดให้การไหลเป็นแบบ Isotropic turbulence ดังนั้นสมการ TKE และสมการ ε จึงลดรูปได้เป็น

$$\bar{u} \frac{\partial k}{\partial x} = -\varepsilon \quad \text{และ} \quad \bar{u} = -C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.22)$$

โดยที่ค่า k มีความสัมพันธ์แบบ Power – law กับ x ($k \propto x^{-n}$) ซึ่งจะได้

$$C_{\varepsilon 2} = \frac{n+1}{n} \quad (2.23)$$

จากข้อมูลผลการทดลอง (อ้างอิงใน Durbin and Reif [23]) ค่า n อยู่ในช่วง 1.3 ± 0.2 ในที่นี้เราเลือกใช้ $n = 1.2$ ทำให้สมการ (2.23) กลายเป็น

$$C_{\varepsilon 2} = 1.83$$

เมื่อพิจารณาที่บริเวณใกล้ผนัง (k มีค่าคงที่) จะได้ว่าค่าอนุพันธ์ของทุกเทอมในสมการ TKE เป็นศูนย์หมด ทำให้สมการ TKE กลายเป็น

$$P = \varepsilon \quad (2.24)$$

จากสมการ(2.23) สังเกตได้ว่าค่า Production เท่ากับค่า Dissipation ซึ่งอยู่ในสภาพที่เรียกว่า Local equilibrium ดังนั้นเราจะได้

$$k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad \varepsilon = \frac{u_\tau^3}{\kappa y} \quad \text{และ} \quad \mu_t = \rho k u_\tau y$$

เมื่อ u_τ คือ Friction velocity จากนั้น แทนค่า ε และ μ_t จากความสัมพันธ์ของสมการข้างบนลงในสมการ ε จะได้

$$\kappa^2 = (C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}) \sigma_\varepsilon \sqrt{C_\mu} \quad (2.25)$$

ดังนั้นค่าคงที่สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \varepsilon$ เมื่อ Re มีค่าสูงๆ [11] คือ

$$C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad \text{และ} \quad C_{\varepsilon 2} = 1.83$$

2.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$

แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$ ได้รับการพัฒนาขึ้น โดยคาดว่าจะสามารถใช้ในการอธิบายถึงคุณลักษณะของปรากฏการณ์การไหลหมุนวน (Recirculating flow phenomena) ได้ เนื่องจากสมการ Specific dissipation rate (ω) สามารถให้ผลเฉลยที่เสมือนว่าค่า Turbulent kinetic energy มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และไม่ต้องใช้ Damping function ในการคำนวณบริเวณ Viscous sub-layer อีกด้วย [24,25]) และแบบจำลองนี้ถูกประยุกต์ใช้กับงานทางวิศวกรรมทั่วไป ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงกว่า Two-equation model แบบอื่นๆ สำหรับการทำนายการไหลแบบ Adverse pressure gradient และการไหลแบบแยกตัว (Separate flows) อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีข้อพิสูจน์ที่ชัดเจนในการอธิบายถึงความมีประสิทธิภาพของแบบจำลองนี้สำหรับการทำนายการไหลหมุนวน ซึ่งแบบจำลอง $k - \omega$ นี้จัดเป็น Two-equation model ที่ได้รับความสนใจศึกษาอีกแบบหนึ่ง โดยถูกเสนอครั้งแรกโดย Kolmogorov ในปี ค.ศ.

1942 และถูกปรับปรุงขยายผลอีกครั้งโดย Saffman ในปี ค.ศ. 1970 และยังมีผู้ให้ความสนใจศึกษาอีกหลายคน (รายละเอียดอยู่ใน Wilcox [26]) เช่น Launder and Spalding ในปี 1972 และ Wilcox et al. (Wilcox and Alber ในปี 1972, Saffman and Wilcox ในปี 1974, Wilcox and Traci ในปี 1976, Wilcox and Rubesin ในปี 1980 และ Wilcox ในปี 1988) เป็นต้น

1) สมการ Turbulent kinetic energy, TKE

สมการ TKE ที่ใช้ในแบบจำลอง $k-\omega$ หาได้โดยอาศัยสมการ TKE ที่ใช้ในแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ ร่วมกับความสัมพันธ์ $\varepsilon = \beta \omega k$ (เมื่อ β คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 3/40) ทำให้ได้สมการ TKE คือ

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = R_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.26)$$

2) สมการ Specific dissipation rate, ω

Wilcox [26] ให้คำจำกัดความของ Specific dissipation rate, ω คือ อัตราการสูญเสียพลังงานต่อหน่วยปริมาตรและต่อเวลา ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\omega \approx k^{1/2} / \ell \quad (2.27)$$

เมื่อ ℓ คือ Turbulence length scale ซึ่งกำหนดให้เท่ากับ $\frac{C_\mu k^{3/2}}{\varepsilon}$

เราสามารถนิยามสมการ ω โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง ε และ k ดังนี้

$$\omega \equiv \frac{\varepsilon}{k} \quad (2.28)$$

สมการของแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ สามารถหาได้จากการแปลงรูปสมการของแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ โดยเริ่มต้นจากการแทนค่า ω จากสมการ (2.28) ลงในสมการ TKE (สมการ (2.18)) และ สมการ Dissipation (สมการ (2.21)) จะได้

$$\frac{D\omega}{Dt} = \frac{1}{k} \frac{D\varepsilon}{Dt} - \frac{\omega}{k} \frac{Dk}{Dt} \quad (2.29)$$

โดยที่ สมการ TKE และสมการ ε ซึ่งจัดอยู่ในรูป Total derivative คือ

$$\frac{Dk}{Dt} = P_k - \varepsilon + \Pi_k + D_k^T + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (2.30)$$

$$\text{และ} \quad \frac{D\varepsilon}{Dt} = P_\varepsilon - \Phi_\varepsilon + \Pi_\varepsilon + D_\varepsilon^T + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (2.31)$$

แทนสมการ (2.30) และ (2.31) ลงในสมการ (2.29) และพิจารณาการไหลภายใต้สถานะอยู่ตัว จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = & \left(\frac{P_\varepsilon - \omega P}{k} \right) + \left(\frac{\Phi_\varepsilon - \omega \varepsilon}{k} \right) + \left(\rho \omega^2 - \frac{\Pi_\varepsilon}{k} \right) \\ & + \left(\frac{\omega D_\omega^T}{k} - \frac{D_\varepsilon^T}{k} \right) + \left(\mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{2\mu}{k} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (2.32)$$

จัดรูปสมการ (2.32) ใหม่ จะได้

$$\frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \underbrace{P_\omega}_{(1)} - \underbrace{\Phi_\omega}_{(2)} + \underbrace{\Pi_\omega}_{(3)} + \underbrace{D_\omega^T}_{(4)} + \underbrace{D_\omega^v}_{(6)} \quad (2.33)$$

ซึ่งความหมายของเทอมต่าง ๆ ในสมการ (2.33) คือ

เทอมที่ 1 คือ เทอมการพา

เทอมที่ 2 คือ เทอม Production ของ ω

เทอมที่ 3 คือ เทอม Destruction ของ ω

เทอมที่ 4 คือ เทอมการแพร่ของความดัน

เทอมที่ 5 คือ เทอมการแพร่ของความปั่นป่วน (Turbulent diffusion)

เทอมที่ 6 คือ เทอม Viscous diffusion

ดังนั้นสมการ ω ซึ่งพัฒนาโดย Bredberg et al. [21] สามารถหาได้จากสมการ

$$D_\omega^T = \left(\frac{\omega D_\omega^T}{k} - \frac{D_\varepsilon^T}{k} \right) = \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + C_\omega \frac{\mu_t}{k} \left(\frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \right] \quad (2.34)$$

เมื่อพิจารณาบริเวณใกล้ผนังและละทิ้งผลจากเทอม Viscous diffusion เราจะได้

$$\mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial^2 y} + \frac{2\mu}{k} \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial k}{\partial y} - \beta \rho \omega^2 = 0 \quad (2.35)$$

จากสมการ (2.34) และ (2.35) จึงทำให้สมการ ω ลดรูปได้เป็น

$$\rho u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (2.36)$$

ในการไหลแบบปั่นป่วนนั้น บริเวณใกล้ผนังจะมีผลของความหนืดและ Turbulence ซึ่งเป็นอิทธิพลที่สำคัญต่อการไหล โดยที่ค่าความเร็วจะขึ้นอยู่กับ Boundary layer ซึ่งในที่นี้การคำนวณค่าความเร็วที่บริเวณใกล้ผนังจะใช้วิธี Wall function สำหรับรายละเอียดจะได้กล่าวถึงต่อไปในหัวข้อเรื่องเงื่อนไขขอบในบทที่ 3

3) ค่าคงที่ของแบบจำลอง $k - \omega$

ในบริเวณใกล้ผนังนั้นเมื่อเราใช้ความสัมพันธ์และข้อสมมติที่ว่าเทอม Production เท่ากับเทอม Dissipation ของ Turbulent kinetic energy เราจะได้

$$\sqrt{\alpha^* \beta^*} = \frac{u_\tau^2}{k} = -\frac{\overline{u'v'}}{k} \quad (2.37)$$

จากข้อมูลผลการทดลอง (อ้างอิงใน [23]) $u_\tau^2 / k \approx 0.3$ จึงได้

$$\alpha^* \beta^* = 0.09 \quad (2.38)$$

เมื่อพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของ Decaying homogeneous และ Isotropic turbulence สมการ ω (สมการ(2.36)) จะกลายเป็น

$$\frac{dk}{dx} = -\beta^* \omega k \quad \text{และ} \quad \frac{d\omega}{dx} = -\beta \omega^2 \quad (2.39)$$

จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ $k = x^{-\beta^*/\beta}$ โดยที่ $\beta^*/\beta \approx 1.00 - 1.25$ (ถ้า β^*/β สามารถหาได้จากข้อมูลการทดลอง (อ้างอิงใน [23]) ดังนั้น

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_\omega \sqrt{\alpha^* \beta^*}} \quad (2.40)$$

สามารถสรุปค่าคงที่ซึ่งใช้ในแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ ได้ดังนี้

$$\alpha^* = 1, \alpha = 5/9, \beta^* = 9/100, \beta = 3/40, \sigma_\omega = 2 \text{ และ } \sigma_k = 2$$

2.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy equation)

จากสมการอนุรักษ์พลังงาน ในกรณีการไหลแบบราบเรียบสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบเทนเซอร์ ดังนี้

$$\rho u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{\text{Pr}} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (2.41)$$

โดยที่ μ คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์

$$\text{Pr} \text{ คือ } \text{พริ้นด์เทิลนัมเบอร์โดย } \text{Pr} = \frac{\mu c_p}{k}$$

c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (Specific heat)

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity)

หลังจากนั้นแทนค่า T ด้วย $T = \bar{T} + T'$ ลงในสมการ (2.41) แล้วทำการเฉลี่ยเช่นเดียวกับสมการความต่อเนื่องและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม จะได้

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{\text{Pr}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \overline{u'_j T'} \right) \quad (2.42)$$

ในการไหลแบบปั่นป่วนสำหรับสมการ (2.42) นั้นใช้การประมาณโดยใช้สมการของ Boussinesq, $-\overline{u'_j T'} = \left(\frac{\mu_t}{\text{Pr}_t} \right) \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right)$ และจัดในรูปสมการ Transport ได้

$$\rho \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \rho \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) \quad (2.43)$$

เมื่อ μ_e คือ Effective diffusion coefficient, $\mu_e = \frac{\mu}{\text{Pr}} + \frac{\mu_t}{\text{Pr}_t}$

2.4 สรุปสมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

จากเนื้อหาที่กล่าวไปแล้วในบทนี้ เราสามารถสรุปสมการพื้นฐานที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนดังแสดงในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในรูปแบบของเทนเซอร์สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$

Transport equation	Differential form
Continuity	$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$
Momentum	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \rho \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j}$
Turbulent kinetic energy	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = G - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$
Dissipation rate	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$
Energy	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \overline{u'_j T'} \right)$
Boussinesq approximation	$R_{ij} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + 2 \mu_t \bar{s}_{ij}$

$$\text{เมื่อ } R_{ij} = \overline{\rho u'_i u'_j}, \bar{\sigma}_{ij} = 2 \mu \bar{s}_{ij}, \bar{s}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, G = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.83$$

และ $\sigma_\varepsilon = 1.3$

ตารางที่ 2.2 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในรูปแบบของเทนเซอร์สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$

Transport equation	Differential form
Continuity	$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$
Momentum	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \rho \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j}$
Turbulent kinetic energy	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = R_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$
Specific dissipation rate	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$
Energy	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \overline{u'_j T'} \right)$
Boussinesq approximation	$R_{ij} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + 2 \mu_t \bar{s}_{ij}$

$$\text{เมื่อ } R_{ij} = \overline{\rho u'_i u'_j}, \bar{\sigma}_{ij} = 2 \mu \bar{s}_{ij}, \bar{s}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \mu_t = \rho C_\mu \frac{k}{\omega},$$

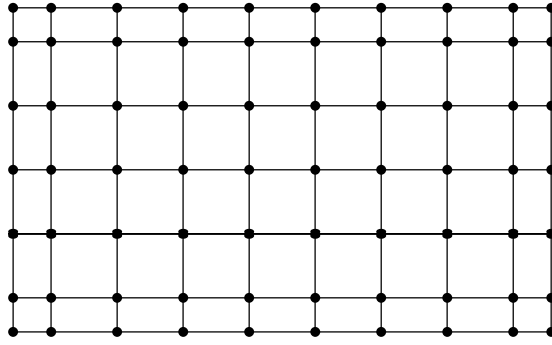
$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}, C_\mu = 0.09, \alpha^* = 1.0, \alpha = 5/9, \beta^* = 9/100,$$

$$\beta = 3/40, \sigma_\omega = 2 \text{ และ } \sigma_k = 2$$

2.5 ขั้นตอนโดยทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม

โดยทั่วไป ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มจะประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ 4 ขั้นตอน (Versteeg and Malalasekera [27]) ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 แบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาเป็นปริมาตรควบคุม (Control volume) ย่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยๆ

ขั้นตอนที่ 2 จัดรูปสมการทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับการไหล (สมการความต่อเนื่อง, สมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการอนุรักษ์พลังงาน) ให้อยู่ในรูปสมการ Transport

$$\frac{\partial(\rho\phi u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (2.44)$$

ขั้นตอนที่ 3 ทำการดิสกรีไทซ์ (Discretization) สมการที่จัดรูปแล้วในขั้นตอนที่ 2 (สมการ(2.44)) โดยอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุมในมิติที่พิจารณา (2 มิติ หรือ 3 มิติ) ซึ่งเป็นขั้นตอนการเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ไปเป็นสมการพีชคณิตในรูปทั่วไป ซึ่งสมการที่พิจารณาใน 2 มิติ แสดงได้ดังนี้

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho\phi u_i)}{\partial x_i} dV = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.45)$$

เมื่อ ϕ คือ ค่าตัวแปรในสมการเชิงอนุพันธ์ เช่น u, v, p, T เป็นต้น

S_ϕ คือ Source term

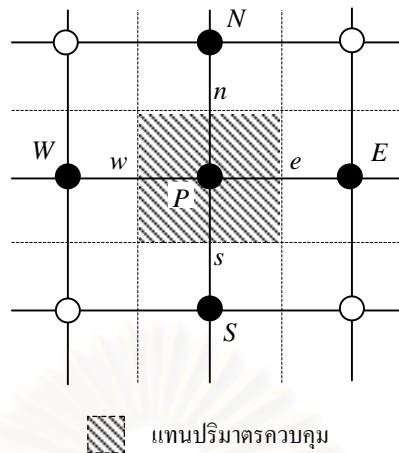
เมื่อทำการดิสกรีไทซ์แล้ว จะได้สมการพีชคณิตดังต่อไปนี้ (ตำแหน่งของ Node ต่างๆ ถูกแสดงในรูปที่ 2.3)

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_e \phi_e + a_s \phi_s + a_n \phi_n + \bar{S} \Delta V \quad (2.46)$$

เมื่อ ϕ_n คือ ค่าของตัวแปร ϕ ที่ Node เมื่อ $n = W, E, S, N$

a_n คือ สัมประสิทธิ์ของตัวแปร ϕ_n เมื่อ $n = W, E, S, N$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร a_n หาได้จากการประมาณด้วย Numerical scheme แบบต่างๆ เช่น Upwind, Hybrid หรือ Power-law เป็นต้น

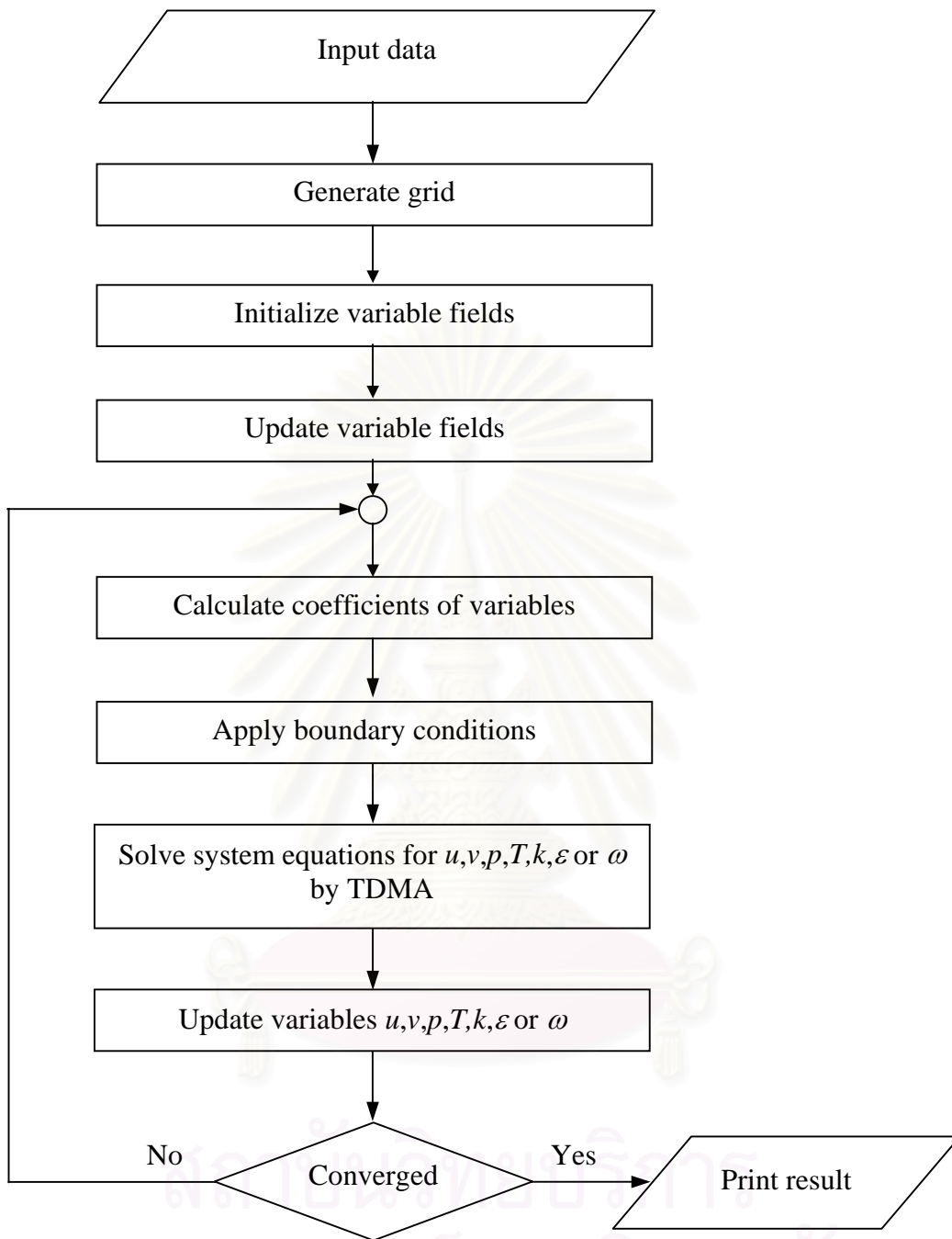


รูปที่ 2.3 ตำแหน่ง Node ต่างๆ ในปริมาตรควบคุม

ขั้นตอนที่ 4 ทำการหาผลเฉลยด้วย Solver ชนิดต่างๆ เช่น Tri-diagonal Matrix Algorithm (TDMA) หรือ Strongly Implicit Procedure (SIP) โดยสมมติว่าทราบค่าบริเวณจุดต่อข้างเคียง และใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (Iteration method) จนได้ผลลัพธ์ที่ลู่อเข้าของสมการดิสครีไทซ์ (สมการ(2.46)) ร่วมกับ Algorithms ต่างๆ เช่น SIMPLE, SIMPLER หรือ SIMPLEC เป็นต้น เพื่อให้ผลการคำนวณที่ได้จากสมการความต่อเนื่องและสมการอนุรักษ์โมเมนตัมมีความสอดคล้องกัน

จากขั้นตอนทั้งสี่ที่กล่าวมา สามารถนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 2.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

บทที่ 3

ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม

3.1 บทนำ

จากการพิจารณาการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนที่แสดงอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ (รายละเอียดอยู่ในบทที่ 2) เมื่อเราต้องการศึกษาปรากฏการณ์ดังกล่าว เราจะต้องทำการหาผลเฉลยของระบบสมการเหล่านั้น สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้จะทำการประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มกับปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อน ซึ่งขั้นตอนและวิธีการของระเบียบวิธีนี้ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก คือ

- 1) สมการควบคุมพื้นฐานและการดิสครีไทซ์
- 2) การประมาณค่าที่บริเวณ Interface ด้วย Numerical scheme แบบต่างๆ
- 3) เงื่อนไขขอบแบบต่างๆ ตลอดจนกระบวนการหาผลเฉลยด้วยวิธี TDMA ร่วมกับการใช้ SIMPLE algorithm

3.2 สมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equations)

ในการแก้ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม สามารถแสดงสมการควบคุมพื้นฐานรูปทั่วไปของตัวแปร ϕ ได้ดังนี้

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{Rate of change term}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\phi u_i)}_{\text{Convection term}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i}\right)}_{\text{Diffusion term}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Source term}} \quad (3.1)$$

เมื่อ ϕ คือ ตัวแปรหลักต่างๆ ของของไหล เช่น u, v, T เป็นต้น
 Γ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)

สมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (ตารางที่ 2.1 และ 2.2) เมื่อจัดให้อยู่ในรูปเดียวกับสมการ (3.1) สามารถแสดงรายละเอียดของแต่ละสมการสำหรับแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ และแบบจำลอง $k-\omega$ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมการควบคุมพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในรูปทั่วไปของตัวแปร ϕ

Transport equation	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Continuity	1	0	0
x-Momentum	\bar{u}	μ_t	$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)$
y-Momentum	\bar{v}	μ_t	$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)$
Turbulent kinetic energy	k	$\frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G - \rho\varepsilon$
Dissipation rate	ε	$\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$(C_{\varepsilon 1} G \varepsilon - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2) / k$
Specific dissipation rate	ω	$\frac{\mu_t}{\sigma_\omega}$	$\frac{\alpha \omega}{k} P_k - \rho \beta \omega^2$
Energy	\bar{T}	$\frac{\mu_e}{Pr_t}$	0

โดยที่ $\mu_e = \mu + \mu_t$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.83$, $\sigma_\omega = 2$, $\alpha = 5/9$,

$$\beta = 3/40, P_k = G = \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 \right] \text{ และ}$$

$\sigma_k = 1$ (สำหรับแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$), $\sigma_k = 2$ (สำหรับแบบจำลอง $k-\omega$)

3.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มสำหรับปัญหาการพาและการแพร่กระจาย (The Finite volume method for convection-diffusion problems)

สำหรับปัญหาการไหลโดยทั่วไป เราจะพิจารณาเทอมการนำ (หรือการแพร่กระจาย) และเทอมการพาควบคู่กันไปในสนามการไหลที่เกิดขึ้น ถ้าเราทราบสนามการไหลที่เกิดขึ้นแล้ว เราสามารถหาค่าตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงของการไหลได้ เช่น อุณหภูมิหรือความเข้มข้นของมวล

จากสมการในรูปทั่วไป (สมการ (3.1)) ซึ่งเขียนอยู่ในรูปตัวแปร ϕ เมื่อนำมาใช้วิเคราะห์หาผลเฉลย เราสามารถใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มทำการเปลี่ยนรูปแบบของสมการที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิตด้วยการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุม (Control volume) ได้ดังนี้

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho\phi u_i) dV = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \right) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (3.2)$$

ในกรณีที่พิจารณาของไหลในสถานะอยู่ตัว (Steady state) นั่นคือ กรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ ϕ เทียบกับเวลา เราสามารถตัดเทอมที่ 1 ทางด้านซ้ายของสมการ (3.2) ออกได้ ทำให้สมการ (3.2) ถูกลดรูปกลายเป็น

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho\phi u_i) dV = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \right) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (3.3)$$

ซึ่งสมการนี้ก็คือ สมการพื้นฐานในรูปทั่วไปที่เขียนอยู่ในรูปของอินทิกรัลนั่นเอง

แต่เมื่อพิจารณาเป็นปัญหาการแพร่กระจายและการพาใน 2 มิติในสถานะอยู่ตัว สมการจะกลายเป็น

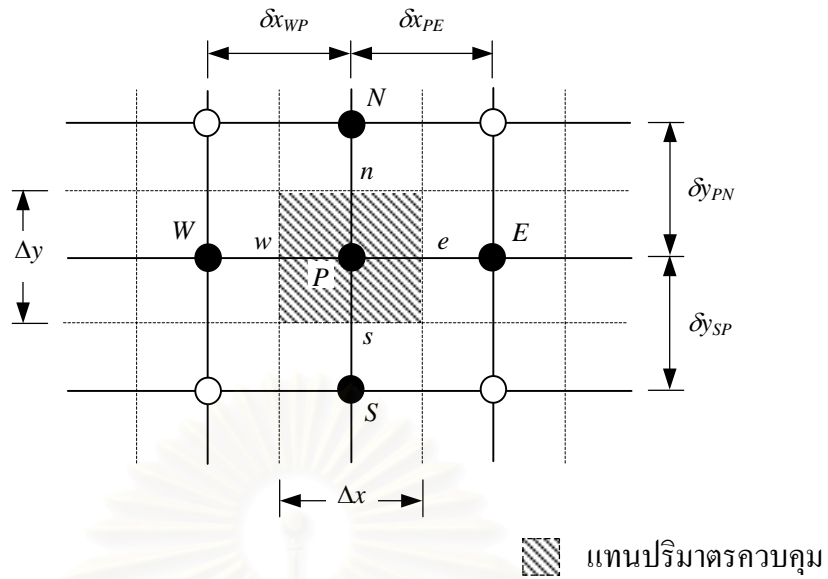
$$\frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (3.4)$$

ในการเปลี่ยนรูปสมการ เริ่มจากการจัดรูปสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม ซึ่งสามารถทำได้โดยทำการอินทิเกรตสมการเริ่มต้นตลอดปริมาตรควบคุม

$$\int_{\Delta V} \left[\frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} \right] dV = \int_{\Delta V} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) + S_\phi \right] dV \quad (3.5)$$

พิจารณาปริมาตรควบคุมใน 2 มิติ (รูปที่ 3.1)

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} dx dy + \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} dx dy = \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) dx dy + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) dx dy + \int_{\Delta V} S_\phi dV \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.1 การวางตัวของปริมาตรควบคุมใน 2 มิติ

จากการแยกพิจารณาที่ละเทอม โดยกำหนดให้ $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$ และ $A_n = A_s = 1 \times \Delta x$ เราสามารถอธิบายถึงรายละเอียดของเทอมต่างๆ ในสมการ (3.6) ได้ดังนี้

3.3.1 เทอมการพา

เมื่อพิจารณาใน 2 แนวแกน เทอมการพาคือ

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} dx dy + \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} dx dy = [(\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w] + [(\rho v A)_n \phi_n - (\rho v A)_s \phi_s] \quad (3.7)$$

จากสมการ (3.7) สามารถแสดงฟลักซ์ที่ไหลผ่านปริมาตรควบคุมได้ดังนี้

ฟลักซ์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งไหลผ่านปริมาตรควบคุมทางทิศตะวันออก (E)

$$(\rho u A)_e \phi_e = F_e \phi_e \quad (3.8 \text{ ก})$$

ฟลักซ์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งไหลผ่านปริมาตรควบคุมทางทิศตะวันตก (W)

$$(\rho u A)_w \phi_w = F_w \phi_w \quad (3.8 \text{ ข})$$

ฟลักซ์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งไหลผ่านปริมาตรควบคุมทางทิศเหนือ (N)

$$(\rho v A)_n \phi_n = F_n \phi_n \quad (3.8 \text{ ค})$$

ฟลักซ์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งไหลผ่านปริมาตรควบคุมทางทิศใต้ (S)

$$(\rho v A)_s \phi_s = F_s \phi_s \quad (3.8 \text{ ง})$$

เมื่อ F คือ สัมประสิทธิ์การพา ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\rho u A$

3.3.2 เทอมการแพร่กระจาย

เทอมการแพร่กระจายสามารถทำการดิสครีไทซ์ได้ดังนี้

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy = \left[\Gamma_e A_e \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \Gamma_w A_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] + \left[\Gamma_n A_n \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \Gamma_s A_s \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] \quad (3.9)$$

การแพร่กระจายผ่านผิวของปริมาตรควบคุมทางทิศตะวันออก

$$\Gamma_e A_e \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e = \Gamma_e A_e \frac{(\phi_E - \phi_P)}{\delta x_{PE}} = D_e (\phi_E - \phi_P) \quad (3.10 \text{ ก})$$

การแพร่กระจายผ่านผิวของปริมาตรควบคุมทางทิศตะวันตก

$$\Gamma_w A_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w = \Gamma_w A_w \frac{(\phi_P - \phi_W)}{\delta x_{WP}} = D_w (\phi_P - \phi_W) \quad (3.10 \text{ ข})$$

การแพร่กระจายผ่านผิวของปริมาตรควบคุมทางทิศเหนือ

$$\Gamma_n A_n \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n = \Gamma_n A_n \frac{(\phi_N - \phi_P)}{\delta y_{PN}} = D_n (\phi_N - \phi_P) \quad (3.10 \text{ ค})$$

การแพร่กระจายผ่านผิวของปริมาตรควบคุมทางทิศใต้

$$\Gamma_s A_s \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s = \Gamma_s A_s \frac{(\phi_P - \phi_S)}{\delta y_{SP}} = D_s (\phi_P - \phi_S) \quad (3.10 \text{ ง})$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{\Gamma A}{\delta x}$

3.3.3 Source term

เราสามารถประมาณค่า Source term ในรูปของความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear relation) เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้ ดังนี้

$$S_\phi = S_u + S_p\phi_P \quad (3.11)$$

เมื่อ S_u คือ เทอมค่าคงที่

S_p คือ เทอมสัมประสิทธิ์ของ ϕ_P

หลังจากนั้นทำการอินทิเกรตสมการ (3.11) จะได้

$$\int_{\Delta V} S_\phi dV = S_u\Delta V + S_p\phi_P\Delta V \quad (3.12)$$

3.4 การประมาณค่าโดยใช้ Numerical scheme

เมื่อพิจารณาถึงค่า ϕ บนผิวปริมาตรควบคุมในเทอมการพาซึ่งแสดงในสมการ (3.8) เราสามารถประมาณค่า ϕ ที่บริเวณ Interface ได้ด้วยการใช้ Numerical scheme แบบต่างๆ เช่น Central differencing scheme, Upwind differencing scheme, Hybrid differencing scheme หรือ Power-law differencing scheme เป็นต้น

3.4.1 Central differencing scheme ใช้ในการประมาณค่า ϕ ที่บริเวณ Interface ของปริมาตรควบคุมโดยอาศัยค่าจากจุดข้างเคียง ซึ่งมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น ดังนี้

$$\phi_e = \frac{1}{2}(\phi_E + \phi_P) \quad (3.13ก)$$

$$\phi_w = \frac{1}{2}(\phi_P + \phi_W) \quad (3.13ข)$$

$$\phi_n = \frac{1}{2}(\phi_N + \phi_P) \quad (3.13ค)$$

$$\phi_s = \frac{1}{2}(\phi_P + \phi_S) \quad (3.13ง)$$

เมื่อนำสมการ (3.8), (3.10), (3.12) และนำค่าเฉลี่ยของ ϕ ที่ Interface ต่างๆ ตามสมการ (3.13) แทนลงในสมการ (3.6) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}F_e(\phi_E + \phi_P) - \frac{1}{2}F_w(\phi_P + \phi_W) + \frac{1}{2}F_n(\phi_N + \phi_P) - \frac{1}{2}F_s(\phi_P + \phi_S) - S_p\phi_P\Delta V = \\ D_e(\phi_E - \phi_P) - D_w(\phi_P - \phi_W) + D_n(\phi_N - \phi_P) - D_s(\phi_P - \phi_S) + S_u\Delta V \end{aligned} \quad (3.14)$$

จัดรูปใหม่ จะได้

$$\left(D_e - \frac{F_e}{2} + D_w + \frac{F_w}{2} + D_n - \frac{F_n}{2} + D_s + \frac{F_s}{2} + F_e - F_w + F_n - F_s - S_p \Delta V \right) \phi_p =$$

$$\left(D_e - \frac{F_e}{2} \right) \phi_E + \left(D_w + \frac{F_w}{2} \right) \phi_W + \left(D_n - \frac{F_n}{2} \right) \phi_N + \left(D_s + \frac{F_s}{2} \right) \phi_S + S_u \Delta V \quad (3.15)$$

ดังนั้นสมการ (3.15) สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการพีชคณิต ได้ดังนี้

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + S_u \Delta V \quad (3.16)$$

เมื่อ

$$a_E = D_e - \frac{F_e}{2}$$

$$a_W = D_w + \frac{F_w}{2}$$

$$a_N = D_n - \frac{F_n}{2}$$

$$a_S = D_s + \frac{F_s}{2}$$

และ

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + (F_e - F_w + F_n - F_s) - S_p \Delta V$$

3.4.2 Upwind differencing scheme ถูกเสนอครั้งแรกโดย Courant et al. [28] ซึ่งพวกเขามีวัตถุประสงค์ที่จะแก้ไขจุดอ่อนของการประมาณค่า ϕ_e ที่ Interface ซึ่งแบบเดิมนั้นหาจากค่าเฉลี่ยของ ϕ_E และ ϕ_P โดยเสนอแนวคิดใหม่ว่า เทอมการพาดูกคำนวณจากข้อสมมติที่ว่าค่า ϕ ที่ Interface มีค่าเท่ากับ ค่า ϕ ที่ Grid point ทางด้านต้นกระแสการไหล (Upwind) ดังนั้น เราจะได้

$$\begin{aligned} \phi_e &= \phi_p & \text{เมื่อ } F_e > 0 \\ \phi_e &= \phi_E & \text{เมื่อ } F_e < 0 \end{aligned} \quad (3.17ก)$$

และ

$$\begin{aligned} \phi_w &= \phi_w & \text{เมื่อ } F_w > 0 \\ \phi_w &= \phi_p & \text{เมื่อ } F_w < 0 \end{aligned} \quad (3.17ข)$$

สำหรับค่า ϕ_n และ ϕ_s สามารถหาได้ในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นสามารถเขียนสมการพีชคณิตของสมการทั่วไปได้เป็น

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_w \phi_w + a_N \phi_N + a_S \phi_S + S_u \Delta V$$

เมื่อ $a_E = \max[-F_e, 0]$

$$a_w = \max[F_w, 0]$$

$$a_N = \max[-F_n, 0]$$

$$a_S = \max[F_s, 0]$$

และ $a_p = a_E + a_w + a_N + a_S + (F_e - F_w + F_n - F_s) - S_p \Delta V$

โดย $\max[A, B]$ คือ ค่าสูงสุดที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าระหว่าง A และ B

3.4.3 Hybrid differencing scheme ได้รับการพัฒนาโดย Patankar and Spalding [29] โดยเป็นการรวมข้อดีของ Central differencing scheme และ Upwind differencing scheme เข้าด้วยกัน โดยใช้แนวคิดว่าในการประมาณค่าปริมาณฟลักซ์ที่ผ่านผิวปริมาตรควบคุมสามารถหาโดยใช้ค่าเพกเลตน์เบอร์ (Peclet number, Pe) เป็นตัวกำหนดเงื่อนไขในการประมาณค่า ซึ่ง Pe หาได้จาก

$$Pe = \frac{F}{D} = \frac{\rho u}{\Gamma / \delta x} \quad (3.18)$$

ด้วยแนวคิดที่เสนอไปแล้วข้างต้น การประมาณค่า ϕ ที่ Interface เมื่อ Pe มีค่าน้อย ($|Pe| < 2$) สามารถประมาณค่า โดยใช้ Central differencing scheme และ เมื่อ Pe มีค่ามาก ($|Pe| \geq 2$) ให้ใช้ Upwind differencing scheme ในการประมาณค่า โดยที่แสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_p & ; Pe > 2 \\ \frac{\phi_E + \phi_p}{2} & ; -2 \leq Pe \leq 2 \\ \phi_E & ; Pe < -2 \end{cases} \quad (3.19)$$

ค่า ϕ_w , ϕ_n และ ϕ_s สามารถหาได้ในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นสามารถเขียนสมการพีชคณิตของสมการทั่วไปได้เป็น

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_w \phi_w + a_N \phi_N + a_S \phi_S + S_u \Delta V$$

เมื่อ $a_E = \max\left[-F_e, \left(D_e - \frac{F_e}{2}\right), 0\right]$

$$a_w = \max \left[F_w, \left(D_w + \frac{F_w}{2} \right), 0 \right]$$

$$a_n = \max \left[-F_n, \left(D_n - \frac{F_n}{2} \right), 0 \right]$$

$$a_s = \max \left[F_s, \left(D_s + \frac{F_s}{2} \right), 0 \right]$$

และ $a_p = a_E + a_w + a_n + a_s + (F_e - F_w + F_n - F_s) - S_p \Delta V$

โดย $\max[A, B, C]$ คือ ค่าสูงสุดที่ได้จากการเปรียบเทียบค่า A, B และ C

3.4.4 Power-law differencing scheme [30] เป็นการประมาณค่า ϕ ที่ Interface ซึ่งมีความแม่นยำและให้ผลที่ดีกว่า Hybrid differencing scheme โดยใช้การประมาณค่าแบบ Exponential ดังต่อไปนี้ เมื่อ Pe มีค่าน้อยกว่าศูนย์กำหนดให้ค่าการนำมีค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อ $Pe > 0$ สามารถประมาณค่า ϕ ที่ Interface ได้ดังนี้

$$\phi_e = \begin{cases} F_e [\phi_P - \beta_e (\phi_E - \phi_W)] & ; \quad 0 < Pe < 10 \\ F_e \phi_E & ; \quad Pe > 10 \end{cases} \quad (3.20)$$

เมื่อ $\beta_e = (1 - 0.1Pe_e)^5 / Pe_e$

ค่า ϕ_w, ϕ_n และ ϕ_s สามารถหาได้ในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นสามารถเขียนสมการพีชคณิตของสมการทั่วไปได้เป็น

$$a_p \phi_P = a_E \phi_E + a_w \phi_w + a_n \phi_n + a_s \phi_s + S_u \Delta V$$

เมื่อ $a_E = D_e \max \left[0, (1 - 0.1|Pe_e|)^5 \right] + \max[-F_e, 0]$

$$a_w = D_w \max \left[0, (1 - 0.1|Pe_w|)^5 \right] + \max[F_w, 0]$$

$$a_n = D_n \max \left[0, (1 - 0.1|Pe_n|)^5 \right] + \max[-F_n, 0]$$

$$a_s = D_s \max \left[0, (1 - 0.1|Pe_s|)^5 \right] + \max[F_s, 0]$$

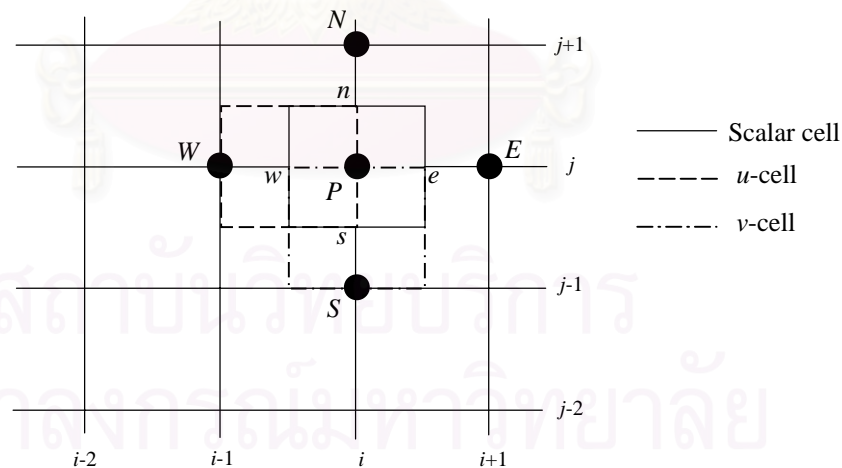
$$\text{และ} \quad a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + (F_e - F_w + F_n - F_s) - S_p \Delta V$$

โดย $\max[A, B]$ คือ ค่าสูงสุดที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าระหว่าง A และ B

3.5 การแบ่งกริดแบบเยื้อง (Staggered grid)

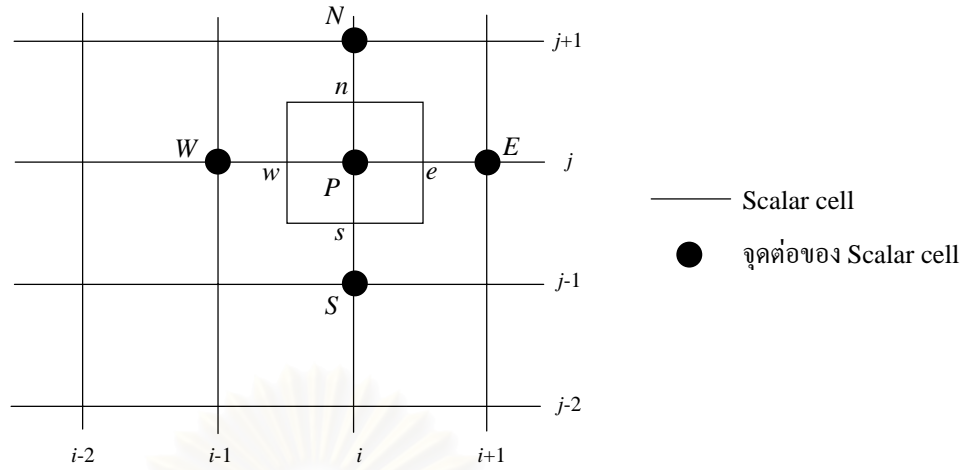
เมื่อเราพิจารณาเทอมการพาในสมการอนุพันธ์โมเมนต์ (เช่น เทอม ρu^2 ในสมการอนุพันธ์โมเมนต์ตามแนวแกน x ซึ่งมีเทอมไม่เชิงเส้น) และเทอมของความดัน จะเห็นได้ว่าเทอมดังกล่าวทำให้สมการความต่อเนื่อง สมการอนุพันธ์โมเมนต์ในแนวแกน x และสมการอนุพันธ์โมเมนต์ในแนวแกน y มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน (Coupled equations) ดังนั้นในการหาค่าความเร็วและความดันจะต้องหาโดยแก้ระบบสมการทั้งสามข้างต้นให้สอดคล้องกัน โดยเริ่มต้นจากการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ทั่วทั้งปริมาตรควบคุม แล้วทำการแบ่งแยกค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ที่พิจารณาลงบนจุดต่อ (Node) ต่างๆ โดยจะแยกเทอมของความเร็วตามแนวแกนกับความดันเป็น u -cell, v -cell และ Scalar cell ทั้งนี้เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิด Checkerboard effect [30] ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่ไม่เกิดขึ้นจริง ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ใช้ Non-staggered grid แล้วทำการ Interpolated ค่าที่ Interface ไม่ถูกวิธีเป็นผลให้เกิดการสั่นของค่าความดันและส่งผลถึงการเกิดความผิดพลาดในการคำนวณตามมาได้

รูปที่ 3.2 แสดงการวาง Cell แบบเยื้องในโดเมนการคำนวณที่ประกอบด้วย u -cell, v -cell และ Scalar-cell ซึ่งวางเยื้องกัน

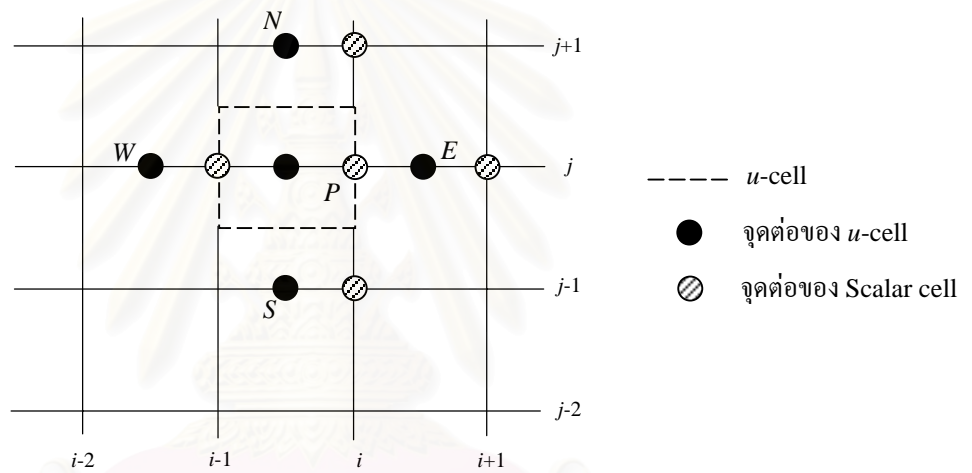


รูปที่ 3.2 ลักษณะการวาง Cell แบบเยื้อง (Staggered)

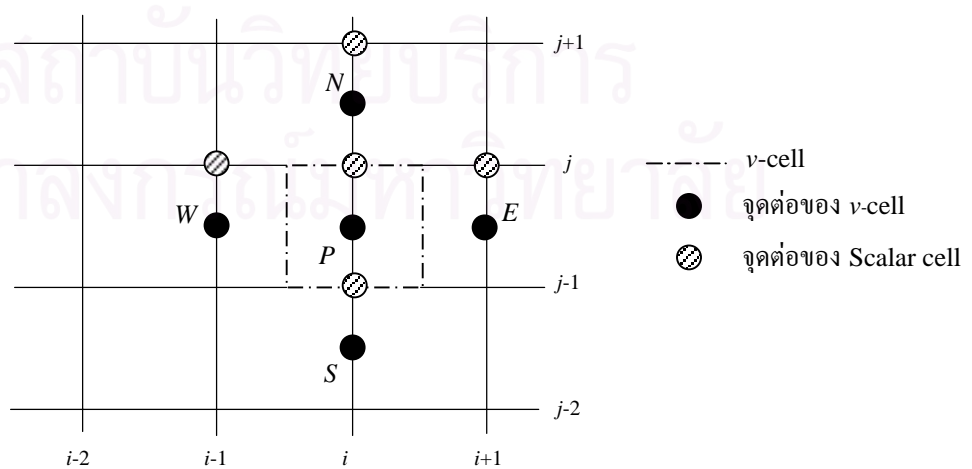
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะการวางของ Scalar-cell และตำแหน่งการวางจุดต่อ ส่วนรูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการวางของ u -cell ซึ่งวางเยื้องมาทางด้านหลังเมื่อเทียบกับ Scalar-cell และรูปที่ 3.5 แสดงลักษณะการวางของ v -cell ซึ่งวางเยื้องมาทางด้านล่างเมื่อเทียบกับ Scalar-cell



รูปที่ 3.3 ลักษณะการวางของ Scalar cell ในโดเมนการคำนวณ



รูปที่ 3.4 ลักษณะการวางของ u-cell ซึ่งวางเชื่อมกับ Scalar cell ในโดเมนการคำนวณ

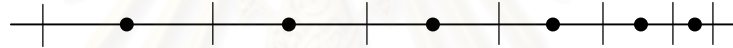


รูปที่ 3.5 ลักษณะการวางของ v-cell ซึ่งวางเชื่อมกับ Scalar cell ในโดเมนการคำนวณ

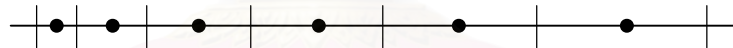
3.6 กริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid)

โดยทั่วไป ในการคำนวณบางบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของผลเฉลยไม่มากนัก ถ้าเราใช้กริดแบบสม่ำเสมอจะเป็นการสิ้นเปลืองหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์โดยไม่จำเป็น ดังนั้น เพื่อเป็นการลดหน่วยความจำที่ใช้และประหยัดเวลาในการคำนวณ เราจึงควรเลือกใช้กริดแบบไม่สม่ำเสมอในบริเวณดังกล่าวข้างต้นซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าผลเฉลยมาก

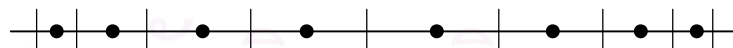
ลักษณะของกริดแบบไม่สม่ำเสมอนี้ อาจมีได้หลายรูปแบบ (ยกตัวอย่างใน 1 มิติ และการใช้อ้างอิงกับปัญหาที่มีสิ่งกีดขวาง) เช่น รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของกริดแบบไม่สม่ำเสมอ 3 แบบ โดยรูปที่ 3.6 (ก) แสดงกริดที่มีขนาดเล็กทางด้านขวา ซึ่งกริดแบบนี้เหมาะสำหรับบริเวณทางเข้าก่อนถึงสิ่งกีดขวาง รูปที่ 3.6 (ข) แสดงกริดที่มีขนาดเล็กทางด้านซ้าย เลือใช้ในบริเวณทางออกของการไหลหลังผ่านสิ่งกีดขวางสุดท้ายมาแล้ว และรูปที่ 3.6 (ค) แสดงกริดที่มีขนาดเล็กทั้งทางด้านซ้ายและขวา ซึ่งกริดแบบนี้เหมาะที่จะใช้ในบริเวณการไหลระหว่างสิ่งกีดขวางสองแห่ง



(a)



(b)



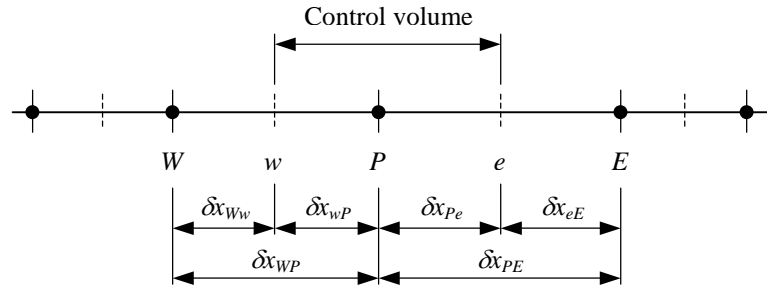
(c)

รูปที่ 3.6 ลักษณะของกริดแบบไม่สม่ำเสมอ

(a) กริดที่มีขนาดเล็กทางด้านขวา (b) กริดที่มีขนาดเล็กทางด้านซ้าย

(c) กริดที่มีขนาดเล็กทั้งทางด้านซ้ายและขวา

การนำกริดแบบนี้ไปประยุกต์ใช้กับการคำนวณ ซึ่งจากเดิมใช้เป็นแบบสม่ำเสมอ สามารถทำได้โดยเปลี่ยนการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Γ) ที่บริเวณ Interface ให้คำนวณตามความสัมพันธ์นี้ (รูปประกอบตัวแปรที่ใช้ในความสัมพันธ์แสดงในรูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 การคำนวณกริดแบบไม่สม่ำเสมอ

$$\Gamma_w = (1 - f_w) \Gamma_W + f_w \Gamma_P \quad (3.21)$$

เมื่อ f_w คือ Interpolation factor ซึ่งหาได้จาก

$$f_w = \frac{\Delta x_{ww}}{\Delta x_{ww} + \Delta x_{wp}}$$

และ $\Gamma_e = (1 - f_p) \Gamma_P + f_p \Gamma_E \quad (3.22)$

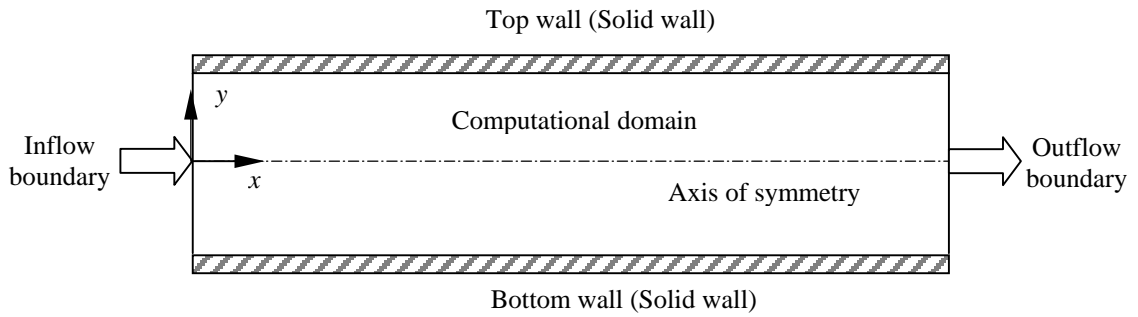
เมื่อ $f_p = \frac{\Delta x_{pe}}{\Delta x_{pe} + \Delta x_{eE}}$

(สำหรับกริดแบบสม่ำเสมอค่า f_w และ f_p จะมีค่าเท่ากับ 0.5 ทั้งสองค่า)

3.7 เงื่อนไขขอบ (Boundary conditions)

ในการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการหาผลเฉลยของปัญหาการคำนวณต่างๆ นั้น จำเป็นต้องมีการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบ เนื่องจากสภาพทางกายภาพของปัญหาที่จำลองนั้นจะขึ้นกับการกำหนดเงื่อนไขเหล่านั้น ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเงื่อนไขขอบทั่วไปที่ใช้ในระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม

รูปที่ 3.8 แสดงเงื่อนไขขอบที่ใช้ในโดเมนการคำนวณ ซึ่งประกอบด้วย เงื่อนไขขอบที่ผนัง (Wall boundary), เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า (Inlet boundary condition), เงื่อนไขขอบที่ทางออก (Outlet boundary condition) และ เงื่อนไขขอบแบบสมมาตร (Symmetry)

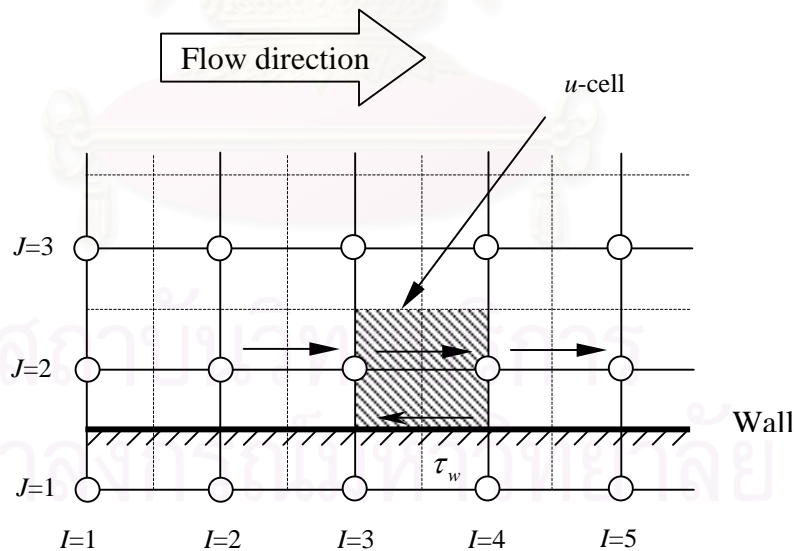


รูปที่ 3.8 เงื่อนไขขอบสำหรับโดเมนการคำนวณ

3.7.1 เงื่อนไขขอบที่ผนัง (Wall boundary condition)

ผนังเป็นเงื่อนไขขอบที่พบในปัญหาการไหลทั่วไป โดยอาจแบ่งเงื่อนไขขอบชนิดนี้เป็นเงื่อนไขย่อยหลายประเภท ซึ่งในที่นี้จะใช้ผนังที่ขนานกับแนวแกน x ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ในการพิจารณา

เงื่อนไขที่ไม่มีการลื่นไถล (No-slip condition ; $u = 0, v = 0$) เป็นเงื่อนไขการประมาณค่าความเร็วที่ผิวของแข็ง (Solid wall) โดยความเร็วที่ขอบเขต ($J=1$) มีค่าเท่ากับศูนย์ และปริมาตรควบคุมที่อยู่ติดผนังมีค่า $a_s = 0$ เนื่องจากไม่มีการคำนวณที่ตำแหน่งนี้



รูปที่ 3.9 ปริมาตรควบคุมที่ผนัง

เงื่อนไขที่มีการลื่นไถล (Slip condition ; $u \neq 0, v = 0$) เป็นเงื่อนไขที่ใช้สำหรับของไหลที่ถูกสมมติว่าไม่มีความเสียดทาน ($\mu = 0$) จัดเป็นการไหลที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า การไหลแบบไม่หนืด (Inviscid flow)

เงื่อนไขขอบที่ผนังสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน กำหนดให้ความเร็ว u และ v มีค่าเท่ากับศูนย์ แต่เนื่องจากบริเวณใกล้ผนังนั้นจะมีผลจาก Thin shear layer อยู่ ดังนั้นจึงต้องใช้ Wall function ควบคู่ไปกับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ (Launder and Spalding [11]) ในการประมาณค่าความเร็วบริเวณผนังโดยใช้ Wall function นั้นมีข้อสมมติฐานดังนี้

- 1) ค่า Shear stress ของของไหลที่บริเวณใกล้ผนังมีค่าเท่ากับ Shear stress ที่ผนัง
- 2) ค่าการนำและค่าการพาที่บริเวณใกล้ผนังถือว่าน้อยมากทำให้ Production term ของ k มีค่าเท่ากับ Dissipation term (หรือเรียกอย่างหนึ่งว่ามีสภาพของ Local equilibrium)

ตัวแปรไร้มิติ y^+ ที่ใช้แทนการวัดระยะใน Thin shear layer แสดงได้ดังนี้

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y_p}{\mu} \quad (3.23)$$

โดยที่ y_p คือ ระยะที่วัดจากผนังและ u_τ ถูกกำหนดจาก

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.24)$$

เมื่อ τ_w คือ ค่า Wall shear stress โดยในบริเวณชั้นขอบบางถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

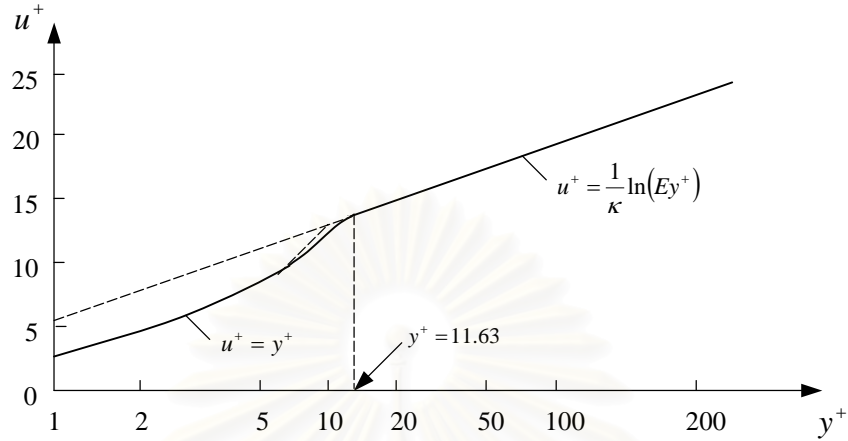
- 1) เมื่อ $0 < y^+ < 11.63$ บริเวณชั้นขอบบางถูกพิจารณาเป็น Laminar sub-layer ซึ่ง Molecular diffusion มีอิทธิพลสูง ($\mu \gg \mu_t$)
- 2) เมื่อ $11.63 < y^+ < 300$ บริเวณชั้นขอบบางถูกพิจารณาเป็น Turbulent sub-layer ซึ่ง Turbulent diffusion มีอิทธิพลสูง ($\mu_t \gg \mu$) และจะใช้ Wall function ในการคำนวณ (รูปที่ 3.10)

เกณฑ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ในบริเวณใกล้ผนังของ Buffer layer คือระหว่างช่วง Laminar sub-layer และช่วง Log-law layer ของ Turbulent region จะใช้ค่า $y^+ = 11.63$ ซึ่งเป็นค่าที่จุดต่อของทั้งสองช่วงนี้เป็นเกณฑ์ ซึ่งใน Log-law layer สามารถหาค่า u^+ ได้จาก

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (3.25)$$

เมื่อ κ คือ Von Karman constant มีค่าเท่ากับ 0.4

E คือ ค่าความขรุขระของผิว สำหรับผนังผิวเรียบ (Smooth wall) มีค่าเท่ากับ 9.8



รูปที่ 3.10 Turbulent boundary layer

สำหรับสมการอนุรักษ์โมเมนตัมที่บริเวณใกล้ผนังนั้นสามารถหาค่าแรงที่ผนัง (F_{wall}) ได้จาก

$$F_{wall} = \frac{\rho C_{\mu}^{\frac{1}{4}} k_p^{\frac{1}{2}} u_p}{u^+} A_{cell} \quad (3.26)$$

เมื่อ A_{cell} คือ พื้นที่ของ Cell

โดยที่บริเวณใกล้ผนังด้านล่างนั้นจะกำหนดให้ $a_s = 0$ ในสมการดิสกรีไทซ์และจะให้แรงที่ผนัง (F_{wall}) เป็น Source term ในสมการของความเร็ว u โดยที่

$$S_u = 0 \quad (3.27ก)$$

$$S_p = -\frac{\rho C_{\mu}^{\frac{1}{4}} k_p^{\frac{1}{2}}}{u^+} A_{cell} \quad (3.27ข)$$

สำหรับสมการ Turbulent kinetic energy ที่บริเวณใกล้ผนังด้านล่างนั้นจะกำหนดให้ $a_s = 0$ ในสมการดิสกรีไทซ์และสามารถหาค่า Source term ได้จาก

$$S = \frac{\tau_w u_p}{\Delta y_p} \Delta V - \frac{\rho C_{\mu}^{\frac{3}{4}} k_p^{\frac{3}{2}} u^+}{\Delta y_p} \Delta V \quad (3.28)$$

โดยที่

$$S_u = \frac{\tau_w u_p}{\Delta y_p} \Delta V \quad (3.29ก)$$

$$S_p = -\frac{\rho C_\mu^{\frac{3}{4}} k_p^{\frac{1}{2}} u^+}{\Delta y_p} \Delta V \quad (3.29ข)$$

และค่า ε ที่บริเวณใกล้ผนังสำหรับสมการ Dissipation rate หาได้จาก

$$\varepsilon_p = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} k_p^{\frac{3}{2}}}{\kappa \Delta y_p} \quad (3.30)$$

เพื่อเป็นการกำหนดค่า ε ในบริเวณนี้ให้มีค่าเท่ากับค่า ε_p ในสมการ (3.30) จึงต้องทำการกำหนดค่า Source term ดังนี้

$$S_u = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} k_p^{\frac{3}{2}}}{\kappa \Delta y_p} \times 10^{30} \quad (3.31ก)$$

$$S_p = -10^{30} \quad (3.31ข)$$

และสำหรับสมการ Specific dissipation rate บริเวณใกล้ผนัง กำหนดให้ ω มีค่าดังนี้ [25]

$$\omega_w = \frac{19}{6} \frac{6\mu}{\rho \beta y_1^2} \quad (3.32)$$

เมื่อ y_1 คือ ระยะทางจากผนังถึง Node แรกในบริเวณขอบเขตที่กำลังพิจารณาอยู่ในที่นี้เราจะกำหนด Source term เพื่อให้ค่าในบริเวณนี้มีค่าเท่ากับ ω_w ดังนี้

$$S_u = \frac{\alpha \rho G}{\mu} \Delta V \quad (3.33ก)$$

$$S_p = -\rho \beta \omega \Delta V \quad (3.33ข)$$

จากข้อจำกัดของ Total stress ที่เสนอโดย Zheng et al. [25] จึงทำให้การหาค่า Specific dissipation rate ดังสมการ (3.32) ถูกดัดแปลงให้อยู่ในความสัมพันธ์ใหม่ ดังนี้

$$\omega = \max[\omega_0, \sqrt{P_d}] \quad (3.34)$$

เมื่อ ω_0 คือ ค่า Specific dissipation rate ที่ได้จากสมการ (3.32)

ϕ คือ ค่าคงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\sqrt{3}/2$

P_d คือ Exact velocity strain ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$P_d = 2(s_{11}^2 + s_{22}^2 + s_{33}^2) + 4(s_{12}^2 + s_{13}^2 + s_{23}^2) \quad (3.35ก)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.35ข)$$

ในส่วนของ Wall function สำหรับสมการอนุพันธ์พลังงาน สามารถหาได้ในทำนองเดียวกับสมการอนุพันธ์โมเมนตัม โดยใช้ข้อสมมติว่าฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant heat flux) [31] ในบริเวณชั้นขอบ (Boundary layer) โดยสามารถหา Wall function ได้ดังนี้

$$q'' = (\Gamma + \Gamma_t) C_p \frac{dT}{dy} = q''_w \quad (3.36)$$

หรือ

$$\frac{q''}{q''_w} = \left(\frac{\Gamma}{\mu} + \frac{\Gamma_t}{\mu_t} \right) \frac{dT^+}{dy^+} = 1 \quad (3.37)$$

เมื่อ q''_w คือ ค่าฟลักซ์ความร้อนตลอดผิวบริเวณผนัง

กำหนดให้ T^+ คือ ตัวแปรไร้มิติซึ่งแทนระยะใน Boundary layer ซึ่งนิยามจาก

$$T^+ = \frac{\rho u_\tau C_p (T_w - T)}{q''_w} \quad (3.38)$$

เราสามารถแยกพิจารณาค่าฟลักซ์ความร้อนที่บริเวณใกล้ผนังออกเป็น 2 ส่วน คือ

- 1) เมื่อ $0 < y^+ < 11.63$ บริเวณชั้นขอบบางถูกพิจารณาเป็น Laminar sub-layer ซึ่ง Molecular diffusion มีอิทธิพลสูง ($\Gamma \gg \Gamma_t$) ดังนั้นจะได้

$$T^+ = \frac{C_p T}{\Gamma} y^+ = \sigma_\phi y^+ \text{ ซึ่ง } \sigma_\phi \text{ คือ פרנדท์เทิลนัมเบอร์ของการไหลแบบ}$$

ราบเรียบ

- 2) เมื่อ $11.63 < y^+ < 300$ บริเวณชั้นขอบบางถูกพิจารณาเป็น Turbulent sub-layer ซึ่ง Turbulent diffusion มีอิทธิพลสูง ($\Gamma_t \gg \Gamma$) ดังนั้นจะได้

$$T^+ = \sigma_\phi \left[u^+ + P \left(\frac{\sigma_\phi}{\sigma_{\phi,t}} \right) \right] \quad \text{ซึ่ง } \sigma_{\phi,t} \text{ คือ פרנדท์เทิลนัมเบอร์ของการไหล}$$

แบบปั่นป่วน

เมื่อความต้านทานของการถ่ายเทความร้อน (สมการ (3.36)) ทำให้เราสามารถหา P -function ได้จาก

$$P \left(\frac{\sigma_\phi}{\sigma_{\phi,t}} \right) = 9.24 \left[\left(\frac{\sigma_\phi}{\sigma_{\phi,t}} \right)^{0.75} - 1 \right] \left[1 + 0.28 e^{\left(\frac{-0.007/\sigma_{\phi,t}}{\sigma_{\phi,t}} \right)} \right] \quad (3.39)$$

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถสรุปเงื่อนไขขอบบริเวณผนังสำหรับสมการอนุรักษ์พลังงานดังนี้

$$\dot{q}_w'' = \begin{cases} \frac{\mu C_p (T - T_w)}{\sigma_\phi y_p} & ; \quad 0 < y^+ < 11.63 \\ \frac{\rho u_\tau C_p (T_w - T)}{\sigma_{\phi,t} \left(u^+ + P \left(\frac{\sigma_\phi}{\sigma_{\phi,t}} \right) \right)} & ; \quad 11.63 < y^+ < 300 \end{cases} \quad (3.40)$$

3.7.2 เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า (Inlet boundary condition)

ค่าของตัวแปรทุกตัวในการไหล (u , v , T , k , ε และ ω) จะต้องถูกระบุค่าที่บริเวณทางเข้า โดยในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

3.7.3 เงื่อนไขขอบที่ทางออก (Outlet boundary condition)

โดยปกติการพิจารณาเงื่อนไขขอบที่ทางออกในโดเมนการไหล เราจะไม่ทราบค่าของตัวแปรต่างๆ แต่ถ้าพิจารณาตำแหน่งทางออกที่อยู่ไกลจากรูปทรงที่รับกวนการไหลแล้ว จะได้ว่า การไหลเป็นแบบ Fully developed flow ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลในทิศทางการไหลนั้นๆ จึงสามารถกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า (Zero gradient)

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{\text{outlet}} = 0 \quad (3.41)$$

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า

ตัวแปร	ค่าสมมติ	หมายเหตุ
u	-	ใช้ข้อมูลจากผลการทดลอง
v	-	-
k	$\frac{3}{2}(U_{\text{ref}} T_i)^2$	T_i คือ Turbulence intensity
ε	$\frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\ell}$	$\ell = 0.07L$; $L = \text{Characteristic length}$
ω	$\frac{1}{\ell C_\mu^{1/4} k^2}$	$\ell = 0.07L$; $L = \text{Characteristic length}$
T	-	ใช้ข้อมูลจากผลการทดลอง ; $T = \text{Fluid temperature at inlet}$

3.7.4 เงื่อนไขขอบแบบสมมาตร (Symmetry conditions)

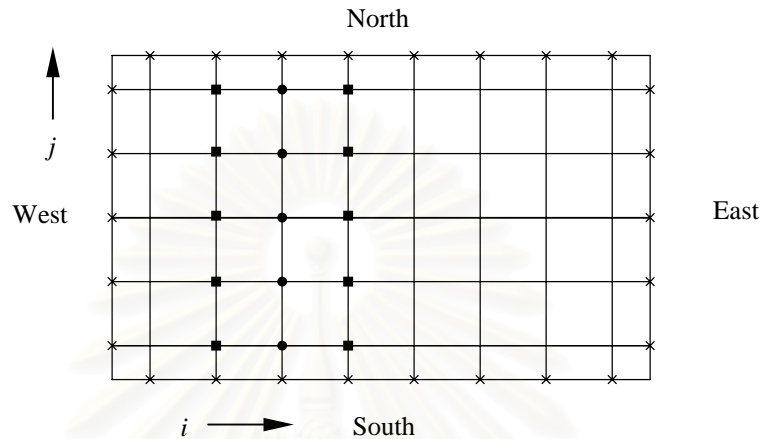
สำหรับกรณีเงื่อนไขขอบแบบสมมาตร เราสามารถพิจารณาโดเมนการคำนวณเพียงครึ่งเดียวเท่านั้น และตัวแปรต่างๆ ทุกตัว ถูกกำหนดให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าที่แกนสมมาตร (Zero gradient)

3.8 กระบวนการหาผลเฉลย (Solution procedure)

เราจะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มในการเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิตที่แต่ละจุดต่อ ซึ่งการหาผลเฉลยจะใช้เทคนิควิธี Tri-diagonal matrix algorithm (TDMA) แบบ Line-by-line ในการแก้ระบบสมการ และเพื่อให้สมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการความต่อเนื่องมีความสอดคล้องกัน จึงใช้กระบวนการหาคำตอบที่เรียกว่า ขั้นตอนวิธี SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) ซึ่งถูกพัฒนาโดย Patankar [30]

3.8.1 การหาผลเฉลยสมการดิสครีไทซ์ด้วยวิธี TDMA

เมื่อพิจารณาโดเมนการคำนวณดังรูปที่ 3.11 พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นๆ ประกอบกันและในแต่ละเส้นถูกหาผลเฉลยโดยใช้วิธี TDMA ด้วยการสมมติว่าทราบค่าของจุดต่อบริเวณข้างเคียง จากนั้นใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (Iterative method) จนได้ผลลัพธ์ที่ถูกรับ



- จุดที่ค่าถูกคำนวณ
- จุดที่ค่าถูกพิจารณาว่ารู้ค่า
- × จุดบริเวณขอบที่รู้ค่า

รูปที่ 3.11 โดเมนการคำนวณ (Computational domain) ที่ใช้วิธี TDMA

ในการคำนวณ

จากสมการพีชคณิต (3.15) สำหรับจุดหนึ่งบนเส้นตัวอย่างในรูปที่ 3.11 สามารถจัดสมการใหม่ได้เป็น

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + (a_N \phi_N + a_S \phi_S + S_C) \quad (3.42)$$

กำหนดให้ $a_N \phi_N + a_S \phi_S + S_C$ มีค่าเท่ากับ ค่าคงที่ (C) ดังนั้นจึงจัดสมการ (3.42) ให้อยู่ในรูปทั่วไปได้เป็น

$$D_i \phi_i = A_i \phi_{i+1} + B_i \phi_{i-1} + C_i \quad (3.43)$$

เมื่อ i คือ ตำแหน่งของจุดต่อบน Grid ในแนวแกน x หรือแกน y

ตัวอย่างเช่น ในแนวแกน x

$$A_i = a_E$$

$$B_i = a_W$$

$$C_i = (a_N \phi_N + a_S \phi_S + S_C)$$

$$D_i = \sum a_{nb} - S_P \quad (nb \text{ คือ จุดต่อที่อยู่ข้างเคียง})$$

จากกระบวนการทำซ้ำโดยการแทนไปข้างหน้าแล้วจัดรูปจะได้

$$\phi_i = A'_i \phi_{i+1} + C'_i \quad (3.44)$$

ซึ่ง A'_i และ C'_i หาได้จากกระบวนการทำซ้ำโดยการแทนไปข้างหน้า

$$A'_i = \frac{A_i}{D_i - B_i A'_{i-1}} \quad (3.45)$$

$$C'_i = \frac{C_i + C'_{i-1} B_i}{D_i - B_i A'_{i-1}} \quad (3.46)$$

เนื่องจากเราทราบเงื่อนไขขอบของโดเมนการคำนวณ คือ ที่จุด $i = 1$ และ $i = n+1$ ดังนั้นจะได้ว่าค่าของ A'_i และ C'_i ที่จุดเหล่านี้คือ

$$\begin{aligned} A'_{i=1} &= 0, & C'_{i=1} &= \phi_1 \\ A'_{i=n} &= 0, & C'_{i=n} &= \phi_{n+1} \end{aligned}$$

จากค่าที่ทราบข้างต้นจะทำให้เราสามารถหาค่า A'_i และ C'_i สำหรับทุกๆ ตำแหน่ง i ได้หลังจากนั้นเราสามารถหาค่า ϕ_i โดยใช้วิธีแทนย้อนกลับ (Backward substitution)

3.8.2 ค่า Under-relaxation

ในกระบวนการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์อาจมีการใช้ค่า Under-relaxation เพื่อควบคุมการลู่เข้าของกระบวนการหาผลเฉลย อีกทั้งยังช่วยลดระดับการเปลี่ยนแปลงค่าการคำนวณได้หลายระดับ ทำให้เกิดเสถียรภาพ (Stability) และความแม่นยำในการคำนวณ โดยเมื่อประยุกต์ใช้ค่า Under-relaxation กับตัวแปรทั่วไป ϕ ที่จุดต่อ P ใดๆ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\phi_p = \alpha \phi_p^{new} + (1-\alpha) \phi_p^{old} \quad (3.47)$$

เมื่อ ϕ^{old} คือ ค่า ϕ ที่ได้จากการคำนวณซ้ำรอบที่แล้ว

ϕ^{new} คือ ค่า ϕ ที่คำนวณได้โดยตรงจากสมการดิสครีไทซ์

และ α คือ ค่า Under-relaxation factor โดย α มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1

และเมื่อประยุกต์ใช้ค่า Under-relaxation กับสมการดิสครีไทซ์สำหรับ ϕ_p จะได้

$$\frac{a_p}{\alpha} = \sum a_{NB} \phi_{NB} + S_u + \frac{(1-\alpha)}{\alpha} a_p \phi_p^{old} \quad (3.48)$$

สำหรับการเลือกใช้ค่า Under-relaxation ที่เหมาะสมนั้น จะขึ้นอยู่กับปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์ ข้อเสนอแนะทั่วไปในการใช้ค่า Under-relaxation กับปัญหาใดๆ คือ ควรใช้ค่า Under-relaxation ที่มีค่าน้อย (มีค่าใกล้ 0) สำหรับกระบวนการทำซ้ำครั้งแรกๆ และค่อยเพิ่มขึ้น (มีค่าใกล้ 1) เมื่อผลการคำนวณลู่เข้า

3.8.3 SIMPLE algorithm

การใช้ SIMPLE algorithm ในงานวิจัยนี้ ได้ดำเนินการตาม Patankar and Spalding [29] ซึ่งรายละเอียดของ SIMPLE algorithm สามารถหาได้จาก Patankar [30] และ Versteeg and Malalasekera [27] โดยที่กระบวนการหาผลเฉลย SIMPLE เป็นวิธีการที่มีพื้นฐานจากการเริ่มแก้สมการอนุพันธ์โมเมนต์โดยการเดาค่าความดัน p^* และความเร็ว u^* , v^* จากนั้นแทนค่าที่เดาลงในสมการนาเวียร์-สโตกส์และสมการความต่อเนื่องเพื่อให้ได้สมการแก้ไขความดันและความเร็ว โดยคำตอบที่ได้จะถูกนำมาปรับค่าจนกว่าคำตอบจะลู่เข้า

สมการดิสครีไทซ์ของสมการอนุพันธ์โมเมนต์ในปริมาตรควบคุม (รูปที่ 3.2) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{ในแกน } x \quad a_w u_w = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + (p_w - p_p)A + S_u \Delta V \quad (3.49)$$

$$\text{ในแกน } y \quad a_s v_s = \sum_{nb} a_{nb} v_{nb} + (p_s - p_p)A + S_v \Delta V \quad (3.50)$$

โดย

$$\sum_{nb} a_{nb} u_{nb} = a_E u_E + a_w u_w + a_N u_N + a_s u_s - S_p$$

$$\sum_{nb} a_{nb} v_{nb} = a_E v_E + a_w v_w + a_N v_N + a_s v_s - S_p$$

หาผลเฉลยเริ่มต้นจากการเดาค่า p^* , u^* และ v^* แล้วแทนลงในสมการ (3.49) และ (3.50) ซึ่งจะได้

$$a_w u_w^* = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}^* + (p_w^* - p_p^*)A_w + S_u \Delta V \quad (3.51)$$

$$a_s v_s^* = \sum_{nb} a_{nb} v_{nb}^* + (p_s^* - p_p^*)A_s + S_v \Delta V \quad (3.52)$$

หลังจากแทนค่าที่เดา p^* , u^* และ v^* เราจึงนิยามค่าแก้ไขความดัน (Pressure correction), p' ซึ่งก็คือ ความแตกต่างระหว่างความดันที่ถูกต้อง (Correct pressure), p กับความดันที่เดาขึ้น (Guessed Pressure), p^* ได้จากสมการ

$$p = p^* + p' \quad (3.53ก)$$

และสำหรับค่าแก้ไขความเร็วสามารถนิยามได้ในลักษณะเดียวกัน คือ

$$u = u^* + u' \quad (3.53ข)$$

$$v = v^* + v' \quad (3.53ค)$$

โดย u, v คือ ความเร็วที่ถูกต้อง (Correct velocity)

u^*, v^* คือ ความเร็วที่คำนวณจากสมการดิสครีไทซ์ของสมการโมเมนตัม

u', v' คือ ค่าแก้ไขความเร็ว (Velocity correction)

นำสมการ (3.53) แทนในสมการ (3.49) และ (3.50) แล้วลบสมการดังกล่าวด้วยสมการ (3.51) และ (3.52) ตามลำดับ ได้เป็น

$$a_w u'_w = \sum_{nb} a_{nb} u'_{nb} + (p'_w - p'_p) A_w \quad (3.54)$$

$$a_s v'_s = \sum_{nb} a_{nb} v'_{nb} + (p'_s - p'_p) A_s \quad (3.55)$$

เราจะกำหนดให้ $\sum_{nb} a_{nb} u'_{nb}$ และ $\sum_{nb} a_{nb} v'_{nb}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ เพื่อลดความยุ่งยากของสมการในการหาคำตอบ [30] เมื่อการไหลมีความสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง จะได้สมการของค่าแก้ไขความเร็วของ u_w คือ

$$a_w u'_w = (p'_w - p'_p) A_w$$

หรือ
$$u'_w = d_w (p'_w - p'_p) \quad (3.56)$$

เมื่อ
$$d_w = \frac{A_w}{a_w}$$

จากสมการ (3.53) และ สมการ (3.56) จะได้

$$u_w = u_w^* + d_w (p'_w - p'_p) \quad (3.57ก)$$

พิจารณาทำนองเดียวกันกับ u_w สำหรับ u_e , v_n และ v_s จะได้

$$u_e = u_e^* + d_e(p'_E - p'_P) \quad \text{เมื่อ} \quad d_e = \frac{A_e}{a_E} \quad (3.57\text{ข})$$

$$v_n = v_n^* + d_n(p'_N - p'_P) \quad \text{เมื่อ} \quad d_n = \frac{A_n}{a_N} \quad (3.57\text{ค})$$

$$v_s = v_s^* + d_s(p'_S - p'_P) \quad \text{เมื่อ} \quad d_s = \frac{A_s}{a_S} \quad (3.57\text{ง})$$

จากสมการความต่อเนื่องที่เขียนอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ (สมการ (2.6))

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0$$

อินทิเกรตสมการความต่อเนื่องตลอดปริมาตรควบคุมในรูปที่ 3.2 ได้เป็น

$$\int_{\Delta V} \left[\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} \right] dV = 0$$

$$[(\rho u A)_e - (\rho u A)_w] + [(\rho v A)_n - (\rho v A)_s] = 0 \quad (3.58)$$

เพราะฉะนั้น เมื่อแทนค่าความเร็วจากสมการ (3.57) ลงในสมการ (3.58) จะได้สมการของความดันแก้ไขเป็นดังนี้

$$a_P p'_P = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + b \quad (3.59)$$

เมื่อ

$$a_E = \rho_e d_e A_e$$

$$a_W = \rho_w d_w A_w$$

$$a_N = \rho_n d_n A_n$$

$$a_S = \rho_s d_s A_s$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S - S_P$$

และ

$$b = (\rho u^* A)_e - (\rho u^* A)_w + (\rho v^* A)_n - (\rho v^* A)_s$$

ซึ่งในการปรับค่าของความดันและความเร็ว นั้น บางครั้งจะมีการใส่ค่า Under-relaxation (รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 3.8.2) เพื่อให้การคำนวณซ้ำมีผลลัพธ์คู่เข้าอย่างมีเสถียรภาพ ดังนี้

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (3.60ก)$$

$$u = u^* + \alpha_u u' \quad (3.60ข)$$

$$v = v^* + \alpha_v v' \quad (3.60ค)$$

เมื่อ α_p คือ Under relaxation factor สำหรับความดัน p

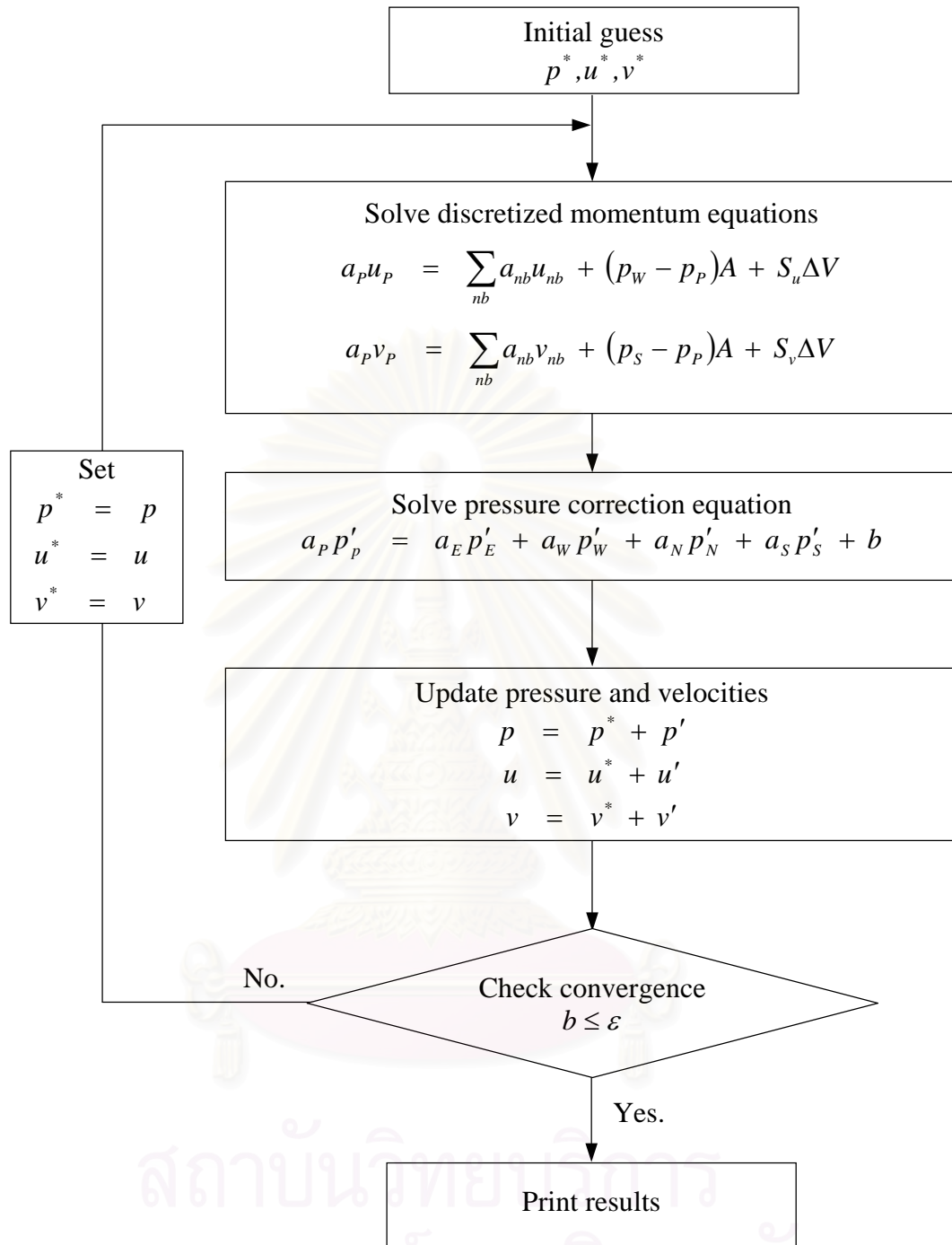
α_u คือ Under relaxation factor สำหรับความเร็ว u

α_v คือ Under relaxation factor สำหรับความเร็ว v

จากวิธีการที่กล่าวมาในหัวข้อนี้ข้างต้น สามารถสรุปขั้นตอนของกระบวนการหาผลเฉลยด้วย SIMPLE algorithm ได้ดังนี้

- 1) เริ่มต้นโดยการเดาค่า p^* , u^* และ v^*
- 2) คำนวณค่า u^* และ v^* จากสมการ (3.51) และ (3.52)
- 3) หาค่า p' จากสมการ (3.59)
- 4) คำนวณค่า p จากสมการ (3.60) แล้วแทนค่า p ที่คำนวณได้มาแทนเป็น p^* ค่าใหม่
- 5) คำนวณค่า u และ v จากสมการ (3.56) และ (3.57) โดยใช้ค่า p' ที่หาได้จากขั้นตอนที่ 4 จากนั้นจึงกำหนดค่า u และ v ที่ได้เป็น u^* และ v^* ค่าใหม่ในการเริ่มต้น
- 6) ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 ซ้ำจนกระทั่งค่า p^* , u^* และ v^* มีค่าคู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง โดยตรวจสอบการคู่เข้าใกล้ศูนย์ของเทอม b (Mass source term) ในสมการ (3.59) ซึ่งแสดงว่าค่า p^* , u^* และ v^* ที่คำนวณได้สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง

ขั้นตอนของกระบวนการข้างต้น สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนของ SIMPLE algorithm

3.8.4 เงื่อนไขการลู่เข้า (Convergence criterion)

ในการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ จากสมการเชิงอนุพันธ์ทุกสมการ เราจะสามารถบอกได้ว่าค่าต่างๆ ลู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการแล้ว โดยการตรวจสอบด้วยเงื่อนไขการลู่เข้า เมื่อ

$$|a_p - b| \leq \sum_n |a_n| \quad \text{สำหรับ } b \leq \varepsilon \quad (3.61)$$

ซึ่งการทดสอบการลู่เข้าอ้างอิงได้จากค่า Residual source (R_ϕ) ซึ่งนิยามจาก

$$R_\phi = (a_p - b)\phi_p - \sum_n a_n \phi_n - c \quad (3.62)$$

เราสามารถกำหนดค่า Non-dimensionless residual source, s_ϕ ได้จาก

$$s_\phi = \frac{\sum |R_\phi|}{R_{\phi, \text{ref}}} \quad (3.63)$$

ดังนั้น จากสมการ(3.62) และ (3.63) เราจะได้เงื่อนไขการลู่เข้าคือ

$$\max(s_\phi) < \varepsilon \quad (3.64)$$

เมื่อ $R_{\phi, \text{ref}}$ คือ ผลรวมของค่าฟลักซ์ที่ไหลเข้า เช่น มวลไหลเข้า เป็นต้น

$\sum |R_\phi|$ คือ ผลรวมของเศษจากการคำนวณ

ε คือ ค่าเกณฑ์การลู่เข้า ซึ่งกำหนดขึ้นได้เอง

3.9 บทสรุป

การหาผลเฉลยสำหรับปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนซึ่งแสดงอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ สามารถทำได้โดยอาศัยการประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม โดยพิจารณาปริมาตรควบคุมเป็นแบบกริดเอียงและกำหนดเงื่อนไขขอบของปัญหาแล้วจึงทำการดิสครีไทซ์ เพื่อเปลี่ยนระบบสมการเชิงอนุพันธ์ให้กลายเป็นสมการพีชคณิต จากนั้นจึงใช้วิธี TDMA แบบ Line-by-line ร่วมกับ SIMPLE algorithm เพื่อช่วยในการหาผลเฉลยที่มีค่าความเร็วและความดันสอดคล้องกัน

บทที่ 4

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในบทนี้จะนำโปรแกรมที่ประดิษฐ์ได้ในขั้นต้นจากระเบียบวิธีไฟในตัวอย่างรวมกับการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และ $k-\omega$ (รายละเอียดอยู่ในบทที่ 3) มาตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) กับปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนอย่างง่ายที่มีผลการทดลองหรือผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อแสดงว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ในระดับที่น่าพอใจ ก่อนจะพัฒนาโปรแกรมต่อไป

กรณีศึกษาที่นำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องมีดังต่อไปนี้

- 1) ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ
- 2) ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่าน Backward-facing step
- 3) ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว

4.1 ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ

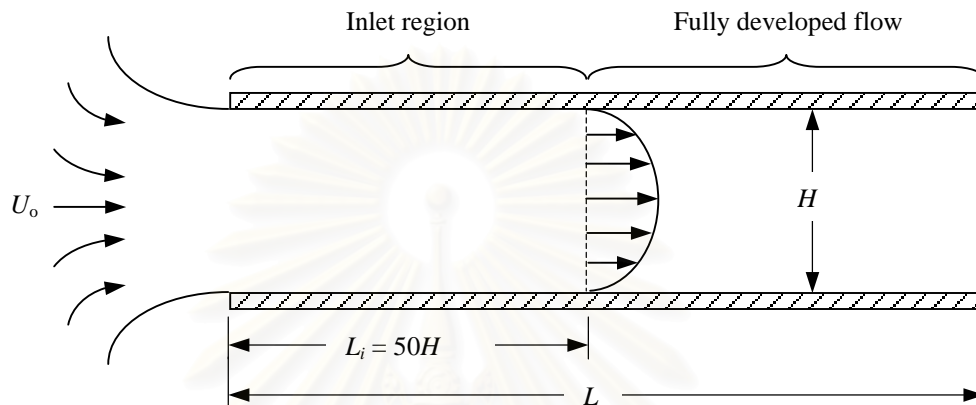
ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนอย่างง่ายและมีความซับซ้อนไม่มากนัก ซึ่งจะยกมาเป็นตัวอย่างเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม คือ การไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ โดยจะนำผลที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟในตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธี DNS (Direct Numerical Simulation) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ต้องอาศัยการเฉลี่ยหรือการประมาณค่าเหมือนระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ และเป็นวิธีที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วนได้ใกล้เคียงกับผลการศึกษาค้นคว้าทดลอง

4.1.1 ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ

เราจะใช้ผลการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนผ่านช่องทางไหลผนังเรียบด้วยวิธี DNS ของ Mansour et al. [22] เป็นข้อมูลอ้างอิงในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม โดยการจำลองการไหลนี้ กำหนดให้ช่องทางไหลมีความสูง ความกว้างและความยาวเท่ากับ H , W และ L (ดังรูปที่ 4.1) และสามารถหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re_H) ได้จากสมการ

$$Re_H = \frac{\rho U_o H}{\mu} \quad (4.1)$$

เมื่อ	Re_H	คือ	ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์อ้างอิงจากความสูงของช่องทางไหล (H)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของไหล
	U_o	คือ	ความเร็วที่ทางเข้า Free stream
	H	คือ	ความสูงของช่องทางไหล
	μ	คือ	ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล



รูปที่ 4.1 ลักษณะของปัญหาการไหลผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ

การคำนวณปัญหานี้ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม สามารถทำได้โดยกำหนดให้ช่องทางไหลมีขนาดความยาวและความสูงเท่ากับ 15.24 m และ 0.1524 m ตามลำดับ ซึ่งการไหลจะมีการพัฒนาตัวเข้าสู่การไหลแบบ Fully developed เมื่อบริเวณทางเข้า (Inlet region) มีความยาวประมาณ 50 เท่าของระยะ H (กำหนดให้ของไหลมีความหนาแน่นและความหนืดสัมบูรณ์เท่ากับ 1.19 kg/m^3 และ $1.80 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$ ตามลำดับ)

กำหนดให้ เรย์โนลด์์นัมเบอร์, $Re_H = 13750$

จากสมการ (4.1)

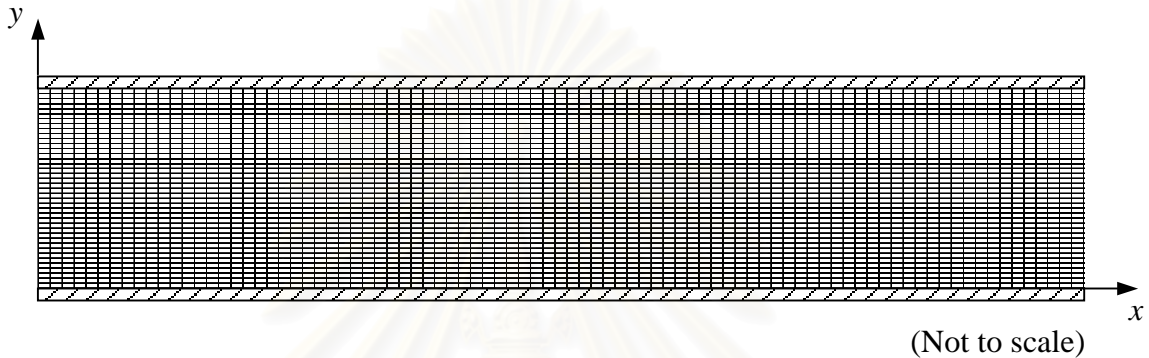
$$Re_H = \frac{\rho U_o H}{\mu}$$

$$13750 = \frac{1.19 \times U_o \times 0.1524}{1.80 \times 10^{-5}}$$

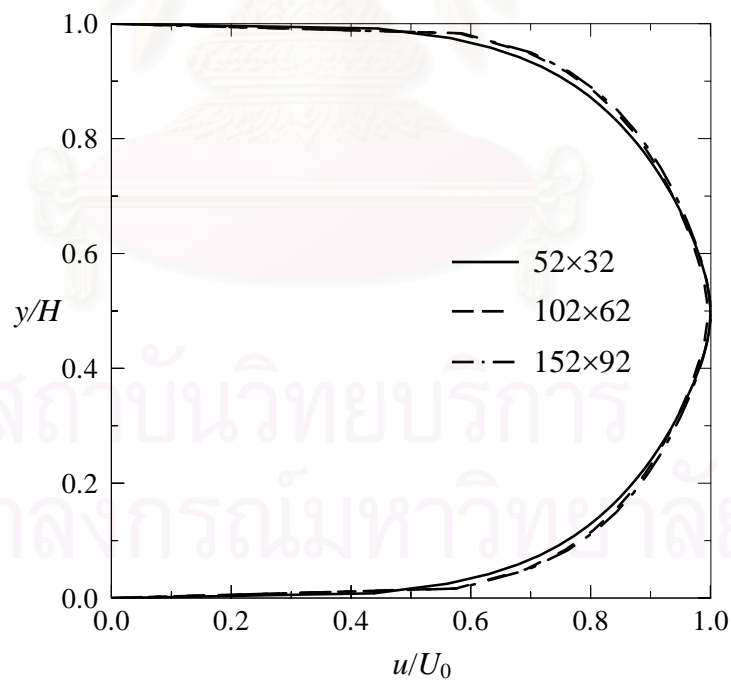
$$\therefore U_o = 1.3647 \text{ m/s}$$

ในกรณีนี้เลือกใช้กริดแบบสม่ำเสมอขนาดต่างๆกัน 3 ขนาดคือ 52×32 , 102×62 และ 152×92 (รูปที่ 4.2) และผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.3 – 4.5

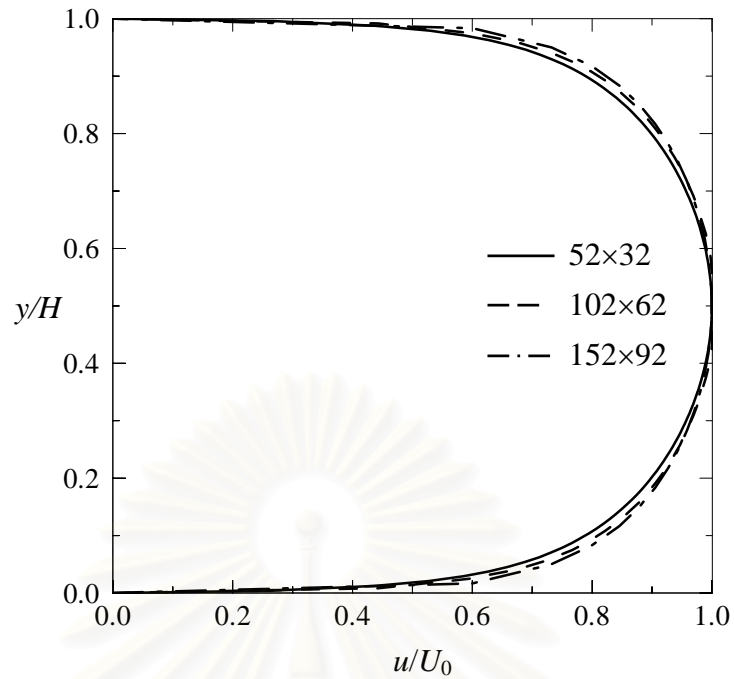
รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงความเร็ว u/U_0 ที่ตำแหน่งทางออกสำหรับ $Re_H = 13750$ จากการคำนวณด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าจากรูปที่ 4.3 และ 4.4 การใช้กริดขนาด 102×62 และ 152×92 ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความเป็น Grid independent หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ การใช้กริดขนาด 102×62 มีความละเอียดเพียงพอที่จะให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องและการเพิ่มจำนวนกริดให้มากกว่านี้จะไม่ส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมากนัก



รูปที่ 4.2 ลักษณะของกริดแบบสม่ำเสมอที่ใช้สำหรับปัญหาการไหลผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ

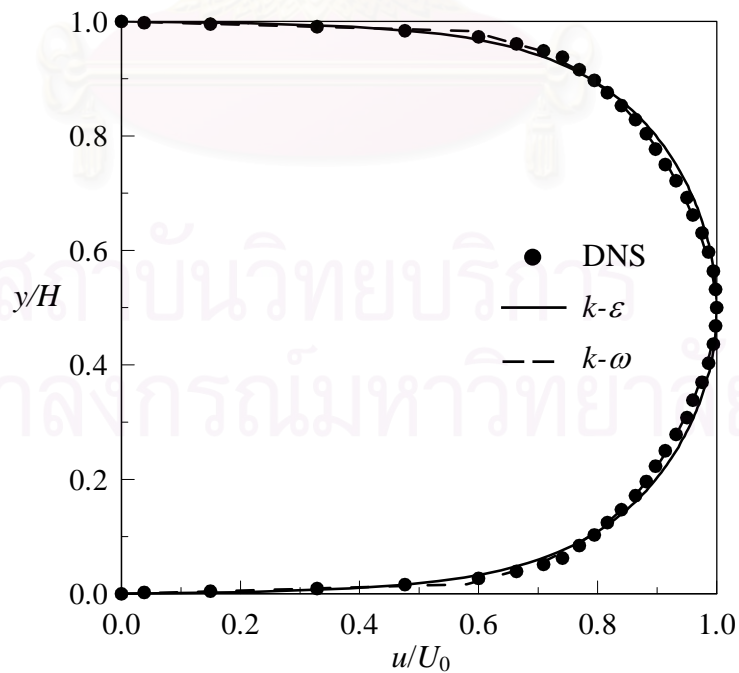


รูปที่ 4.3 ความเร็ว u/U_0 ที่ตำแหน่งทางออกซึ่งได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ สำหรับ $Re_H = 13750$



รูปที่ 4.4 ความเร็ว u/U_0 ที่ตำแหน่งทางออกซึ่งได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ สำหรับ $Re_H = 13750$

หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากแบบจำลองปั่น Standard $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ โดยใช้กริดขนาด 102×62 กับผลการคำนวณด้วยวิธี DNS ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความเร็ว u/U_0 ที่ตำแหน่งทางออกซึ่งได้จากการจำลองการไหลเปรียบเทียบ กับผลการคำนวณด้วยวิธี DNS สำหรับ $Re_H = 13750$

รูปที่ 4.5 แสดงความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากการจำลองการไหลเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธี DNS สำหรับ $Re_H = 13750$ (ความเร็ว u/U_0 ที่พิจารณานี้อยู่ในช่วงบริเวณการไหลแบบ Fully developed แล้ว) จะเห็นได้ว่า ค่าความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และแบบจำลอง $k-\omega$ มีความสอดคล้องกันดีกับผลจากวิธี DNS ซึ่งแสดงถึงความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

4.1.2 ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ

ปัญหากรณีแรกที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมในส่วนของ การถ่ายเทความร้อน คือ ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ จากผลการทดลองของ Sparrow et al. [32] ได้ทำการทดลองการไหลผ่านช่องทางไหลที่มีความสูงและความกว้างเท่ากับ 0.01524 m และ 0.0762 m ตามลำดับ และมีความยาวเป็น 140 เท่าของ D_H อีกทั้งกำหนดให้ผนังด้านบนและด้านล่างบริเวณทางเข้าไม่มีการให้ความร้อน (Unheated) เป็นระยะเท่ากับ $40D_H$ (รูปที่ 4.6) เพื่อให้แน่ใจว่าการไหลเป็นแบบ Fully developed ก่อนเข้าสู่บริเวณที่ให้ความร้อน (ระยะนี้ถูกเลือกโดย Harnett et al. [33])

ผลการทดลองในส่วนของ การถ่ายเทความร้อนถูกนำมาเทียบกับสูตรที่ได้จากการวิเคราะห์ ดังนี้

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (4.2)$$

เมื่อ Re คือ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์อ้างอิงจากค่า Hydraulic diameter

$$\text{ซึ่งหาได้จาก } Re = \frac{\rho u D_H}{\mu}$$

D_H คือ Hydraulic diameter มีค่าเท่ากับ 0.0254 m ซึ่งหาได้จาก $D_H = \frac{4A}{P}$

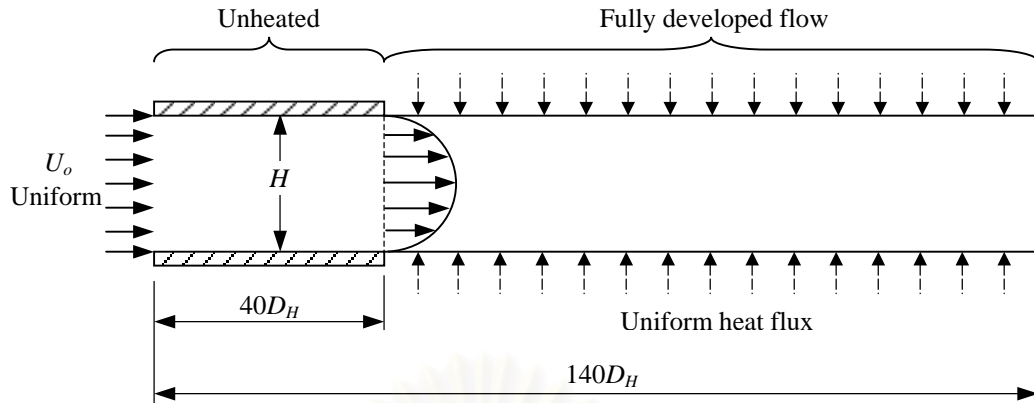
A คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหล

P คือ ความยาวรอบหน้าตัดช่องทางไหล

Pr คือ พรีนดท์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl number)

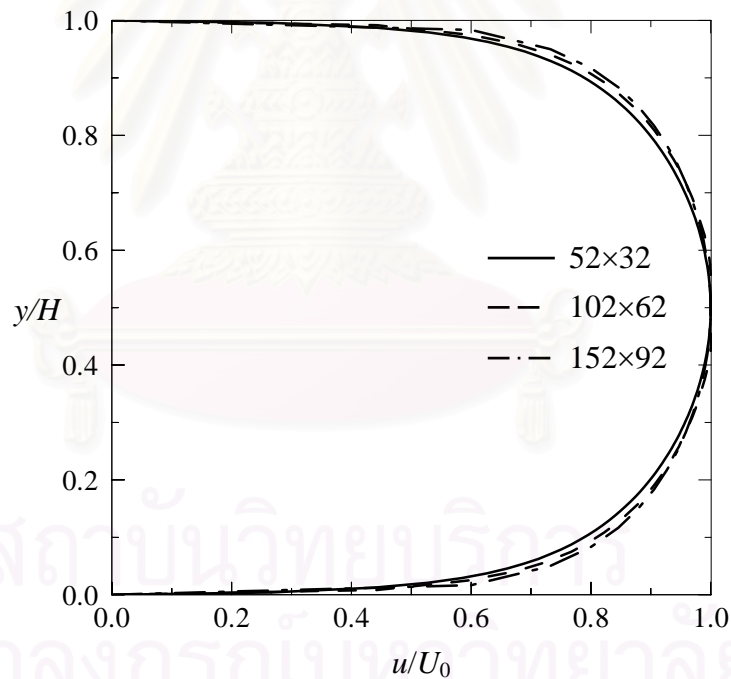
ซึ่งพบว่าสูตรที่ได้จากการวิเคราะห์ (สมการ(4.2)) มีความสอดคล้องกับผลการทดลอง ดังนั้นเราจะตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยเทียบกับค่าที่ได้จากสูตรนี้ ในการจำลองปัญหาเพื่อคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กำหนดให้ของไหลมีคุณสมบัติดังนี้

ความหนาแน่น	เท่ากับ	1.19	kg/m ³
ความหนืดสัมบูรณ์	เท่ากับ	1.80×10^{-5}	N.s/m ²
อุณหภูมิทางเข้า	เท่ากับ	298	K



รูปที่ 4.6 ลักษณะของปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ

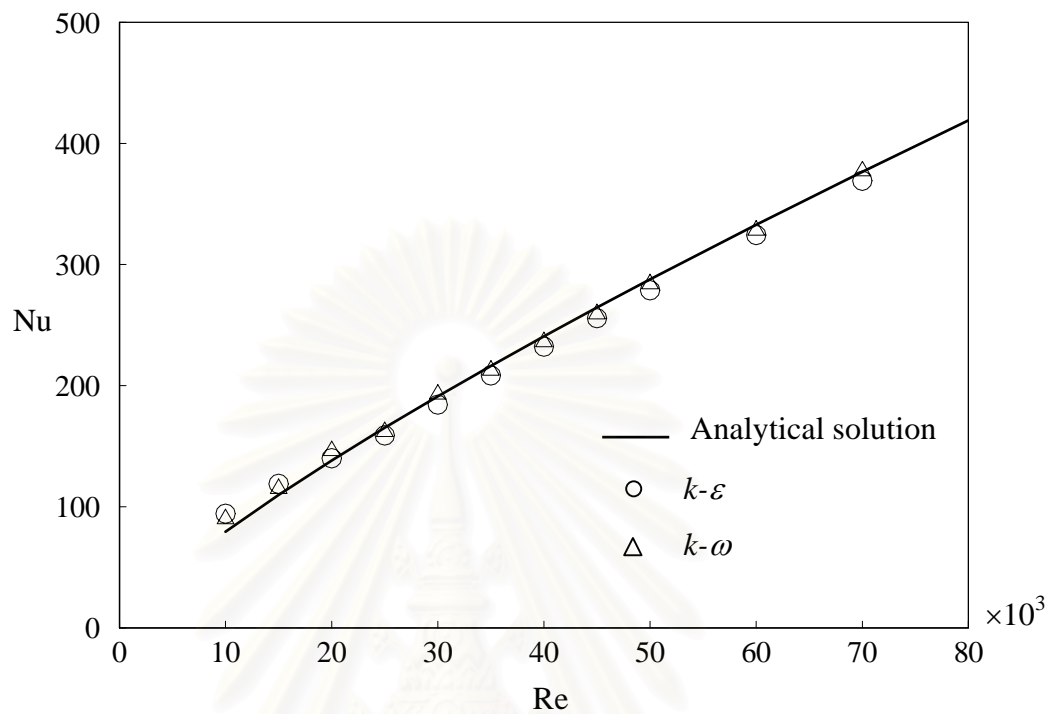
รูปที่ 4.7 แสดงการตรวจสอบความเป็น Grid independent ของผลลัพธ์โดยขนาดกริดที่เลือกใช้คือ 52×32 , 102×62 และ 152×92 ซึ่งพบว่ากริดขนาด 102×62 มีความละเอียดเพียงพอสำหรับปัญหานี้



รูปที่ 4.7 ความเร็ว u/U_0 ที่ตำแหน่งทางออก สำหรับ $Re = 20000$
และ $q'' = 1000 \text{ W/m}^2$

สำหรับผลลัพธ์ในส่วนของ การถ่ายเทความร้อนนั้น ถูกแสดงอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ นัสเซลล์เบอร์เฉลี่ย (Average Nusselt number, \overline{Nu}) รูปที่ 4.8 แสดงค่า นัสเซลล์เบอร์เฉลี่ยที่เรย์โนลด์ส์เบอร์แตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลอง Standard $k - \epsilon$

และ $k - \omega$ เปรียบเทียบกับค่าจากสมการ (4.2) มีความสอดคล้องกันที่ทุกๆ ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ซึ่งแสดงถึงความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในส่วนของการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 4.8 คำนวณตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่างๆกัน สำหรับ $q'' = 1000 \text{ W/m}^2$

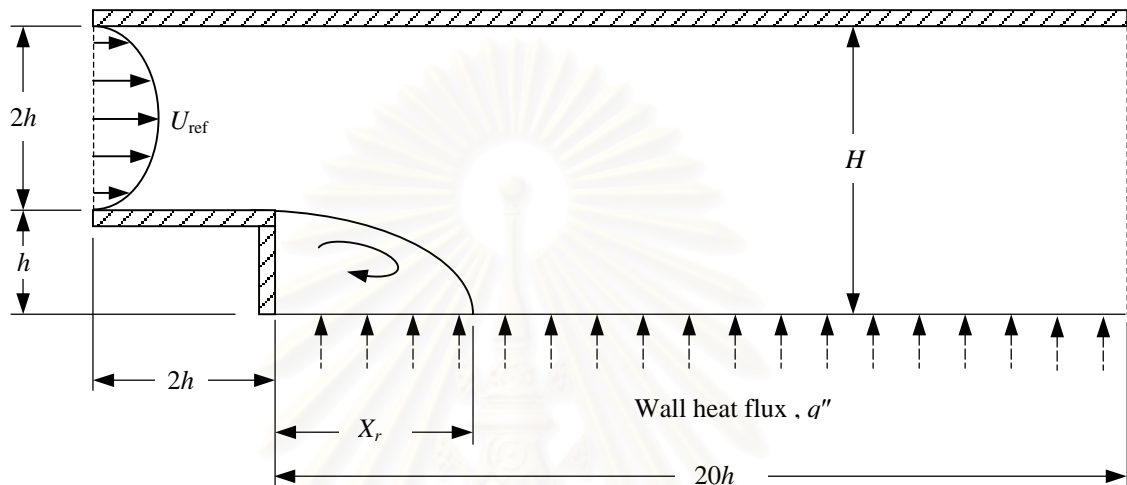
4.2 ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบป้อนผ่าน Backward-facing step

สำหรับการไหลผ่าน Backward-facing step ในส่วนนี้ จะทำการคำนวณทั้งในส่วนของ การไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยการไหลเป็นแบบป้อนผ่านใน 2 มิติและของไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ในสภาวะอยู่ตัว ซึ่งลักษณะของ Backward-facing step ถูกแสดงดังรูปที่ 4.9 โดยทางเข้ามีขนาดเท่ากับ $2h$ และมีความสูงของ Step เท่ากับ h โดยความยาวหลัง Step และความสูงมีขนาดเท่ากับ $20h$ และ $3h$ ตามลำดับ ความเร็วทางเข้าจะอ้างอิงเทียบกับความเร็วที่ Free stream (U_{ref}) ซึ่งเมื่อของไหลไหลผ่านช่องทางไหลที่ถูกขยายออกให้กว้างขึ้น จะทำให้เกิดบริเวณของการไหลหมุนวน (Recirculation region) ขึ้นที่มุมของผนังด้านล่างเป็นระยะทาง X_r ซึ่งเรียกว่า Reattachment length

ผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะถูกนำไปตรวจสอบกับผลการคำนวณด้วยวิธี DNS ของ Avancha and Pletcher [34] ซึ่งค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์สำหรับการไหลลักษณะนี้ สามารถได้จากสมการ

$$Re_h = \frac{\rho U_{ref} h}{\mu} \quad (4.3)$$

เมื่อ	Re_h	คือ	ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์อ้างอิงจากความสูงของ Step
	U_{ref}	คือ	ความเร็วที่ทางเข้า Free stream
	h	คือ	ความสูงของ Step



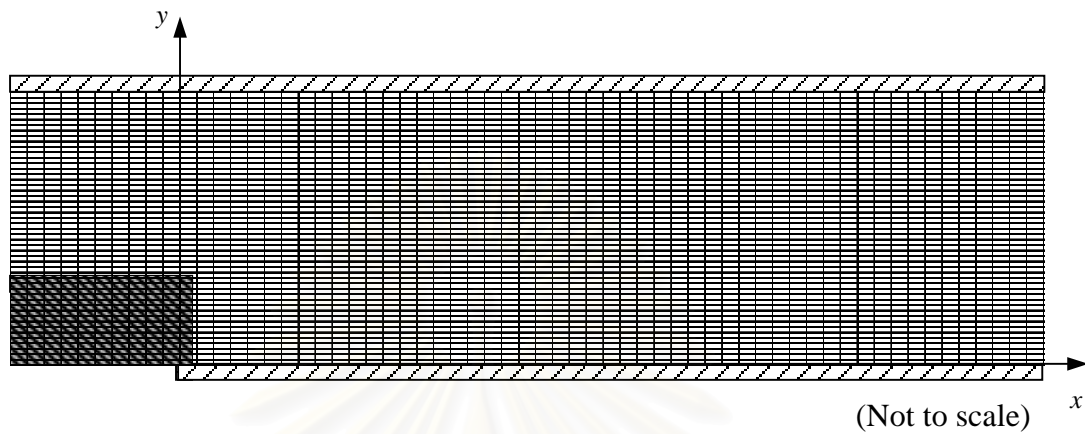
รูปที่ 4.9 ลักษณะของปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่าน Backward-facing step

กำหนดให้ Backward-facing step ในการจำลองการไหลมีค่า h เท่ากับ 0.041 m ดังนั้นทางเข้าของช่องทางไหลจะมีขนาดเท่ากับ 0.082 m ช่องทางไหลที่ขยายออกมีความสูงเท่ากับ 0.123 m ซึ่งทำให้มีอัตราส่วนขยาย (Expansion ratio) เท่ากับ 1.5 สำหรับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 5540 โดยคุณสมบัติของของไหลที่ใช้มีค่าดังนี้

ความเร็วอ้างอิง (U_{ref})	=	2.063 m/s
ความหนาแน่น (ρ)	=	1.194 kg/m ³
ความหนืดสัมบูรณ์ (μ)	=	1.823×10 ⁻⁵ N.s/m ²
ค่าการนำความร้อน (k)	=	0.02574 W/m.K
อุณหภูมิทางเข้า (T_{inlet})	=	293 K
ความจุความร้อนจำเพาะ (C_p)	=	1006.0 J/kg.K
พริ้นด์เทิลนัมเบอร์ (Pr)	=	0.71

และขนาดของกริดที่ใช้ในการจำลองมีขนาดต่าง ๆ กัน คือ 102×60, 202×120 และ 252×160 โดยรูปแบบของกริดเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform grid) ดังแสดงในรูปที่ 4.10

รูปที่ 4.11 แสดงค่า u/U_{ref} ที่ตำแหน่ง $x/h = 7$ และที่ทางออก ($x/h = 20$) จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทั้งสอง จะเห็นได้ว่ากริดขนาด 202×120 มีความละเอียดเพียงพอแล้วสำหรับการจำลองการไหลในลักษณะเช่นนี้

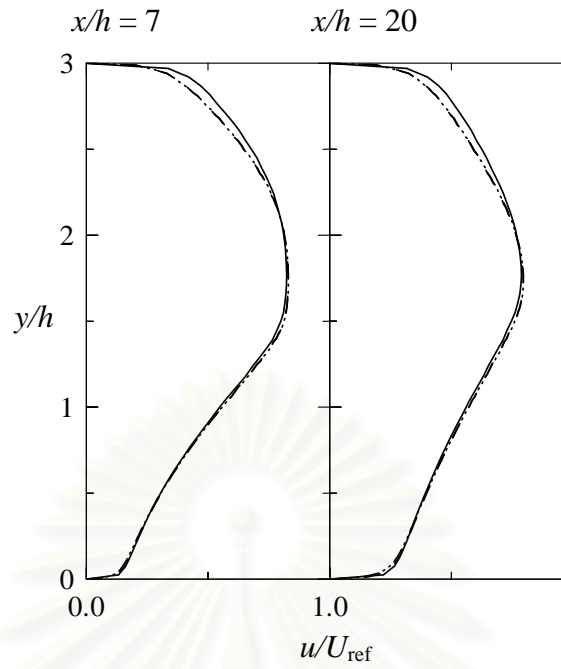


รูปที่ 4.10 รูปแบบกริดแบบสม่ำเสมอในการจำลองการไหลผ่าน Backward-facing step สำหรับ $Re_h = 5540$

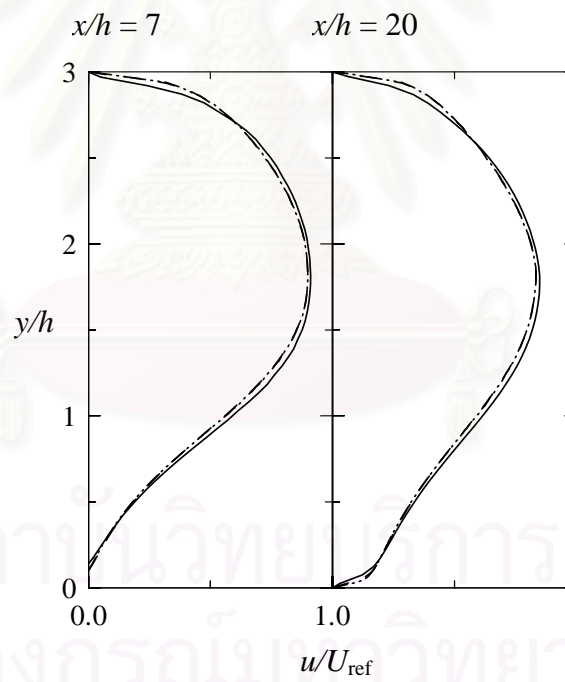
ผลการคำนวณการไหล

รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงความเร็ว u/U_{ref} และ v/U_{ref} ที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และแบบจำลอง $k-\omega$ เปรียบเทียบกับผลจากวิธี DNS สำหรับ $Re_h = 5540$ ที่ x/h ต่างๆ กัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ผลการคำนวณจากแบบจำลองทั้งสองแตกต่างกันไม่มากนักในทุกๆ บริเวณและพบว่าผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกันดีกับผลจากวิธี DNS ถึงแม้ว่าจะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นเล็กน้อยในบริเวณที่มีการหมุนวน

รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงเวกเตอร์ความเร็วและ Streamline ของการไหลผ่าน Backward-facing step ซึ่งจะสังเกตเห็นบริเวณการหมุนวนเกิดขึ้นใกล้ผนังด้านล่างติดกับช่องทางไหลที่ขยายออกโดยรายละเอียดของการหมุนวนจะเห็นได้อย่างชัดเจนในภาพขยายในรูปที่ 4.16 โดยจะพบบริเวณการหมุนวนขนาดเล็กเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้กับ Step ซึ่งบริเวณนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นในกรณีที่ขนาดความสูงของ Step เพิ่มมากขึ้น



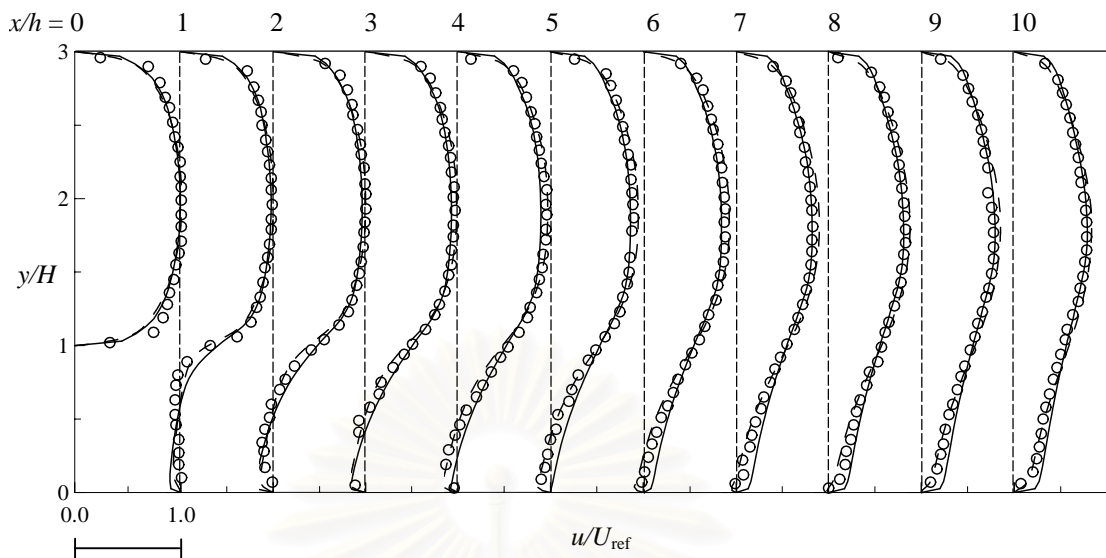
(a)



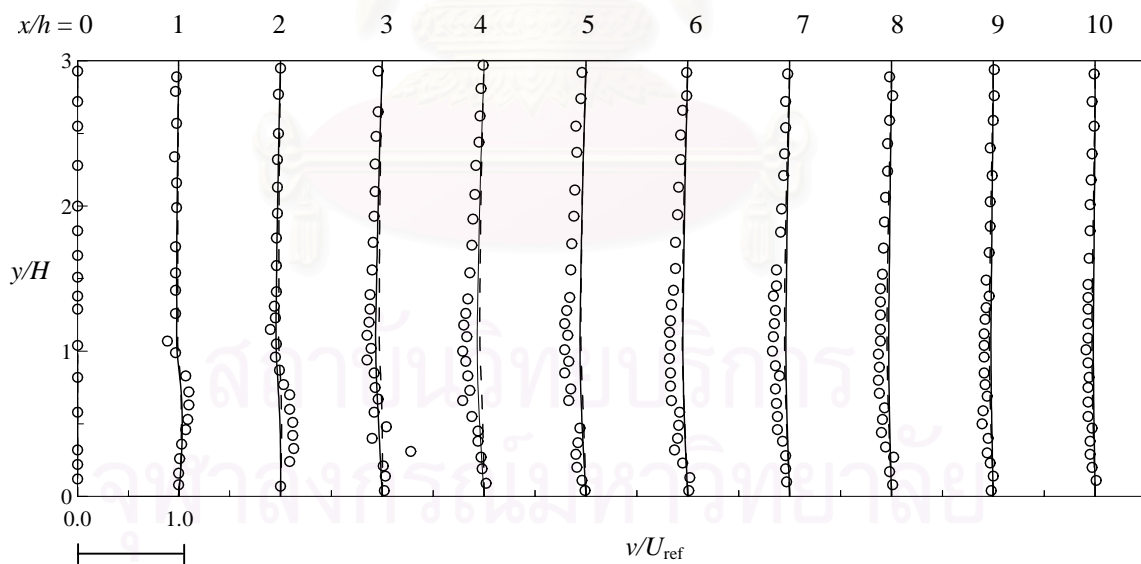
(b)

— 102×60, - - 202×120, - · - 252×160

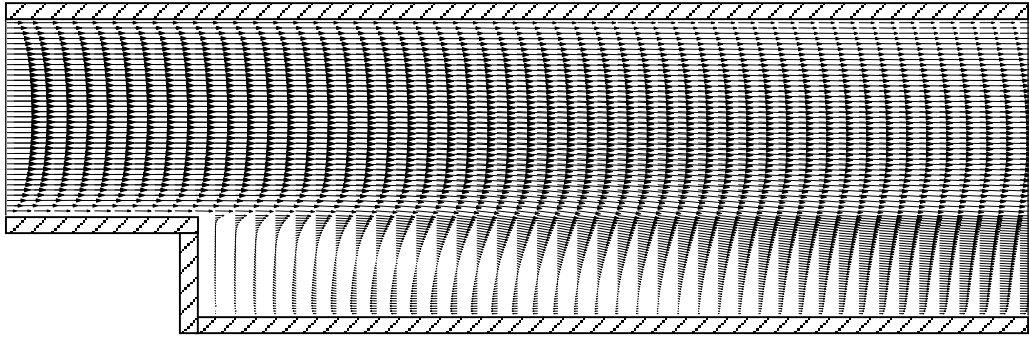
รูปที่ 4.11 ความเร็ว u/U_{ref} ที่ตำแหน่ง $x/h = 7$ และทางออก ($x/h = 20$) สำหรับการไหลผ่าน Backward-facing step จากการคำนวณด้วยกริดขนาดต่างกัน (a) Standard $k - \varepsilon$ และ (b) $k - \omega$



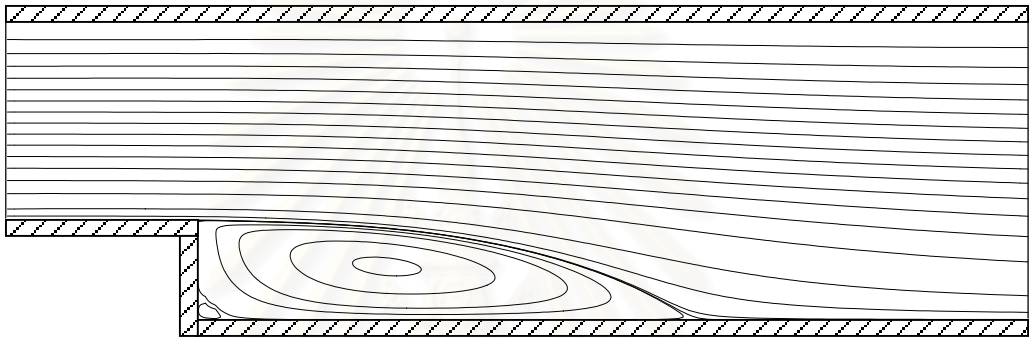
รูปที่ 4.12 ความเร็ว u/U_{ref} ที่ได้จากการจำลองการไหลผ่าน Backward-facing step
 เปรียบเทียบกับผลจากวิธี DNS สำหรับ $Re_h = 5540$ ที่ x/h ต่างๆ กัน
 (\circ DNS, — Standard $k-\varepsilon$, - - $k-\omega$)



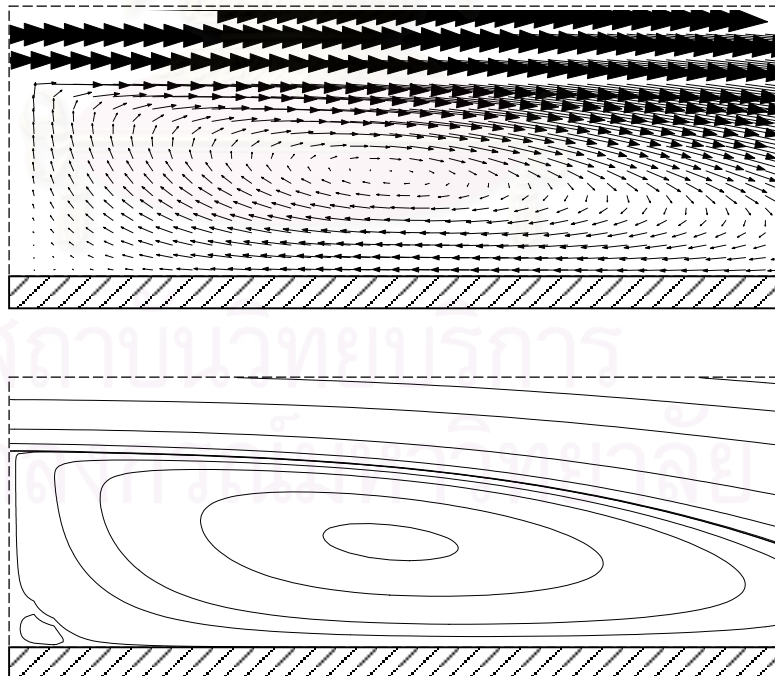
รูปที่ 4.13 ความเร็ว v/U_{ref} ที่ได้จากการจำลองการไหลผ่าน Backward-facing step
 เปรียบเทียบกับผลจากวิธี DNS สำหรับ $Re_h = 5540$ ที่ x/h ต่างๆ กัน
 (\circ DNS, — Standard $k-\varepsilon$, - - $k-\omega$)



รูปที่ 4.14 เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่าน Backward-facing step สำหรับ $Re_h = 5540$



รูปที่ 4.15 Streamline ของการไหลผ่าน Backward-facing step สำหรับ $Re_h = 5540$



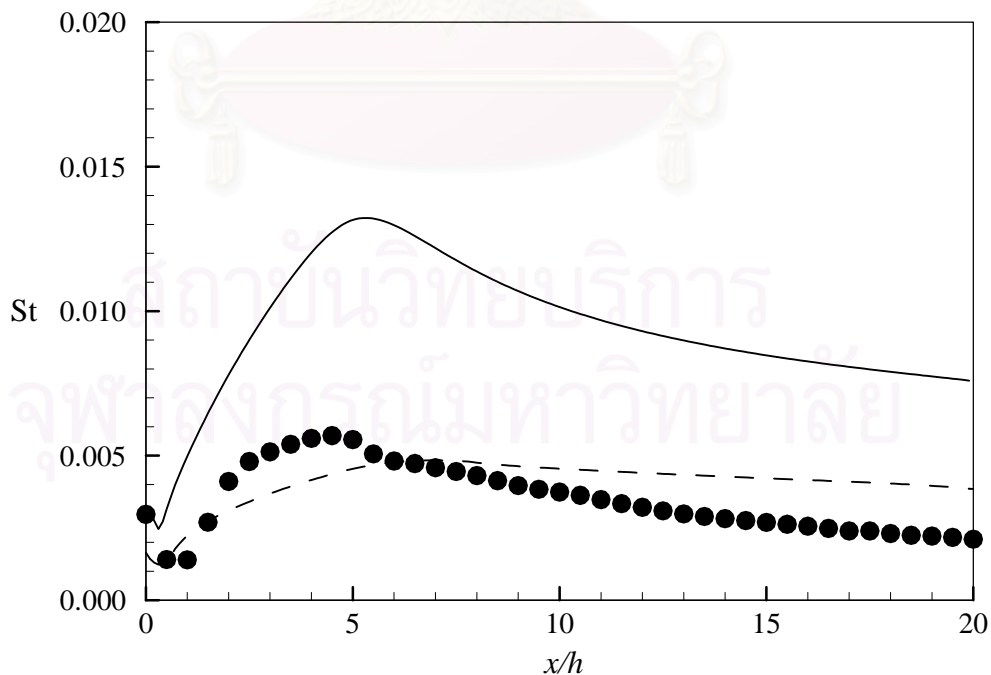
รูปที่ 4.16 รายละเอียดของเวกเตอร์ความเร็วและ Streamline บริเวณที่เกิดการหมุนวน
สำหรับ $Re_h = 5540$

จากรูปที่ 4.9 เมื่อของไหลไหลผ่านช่องทางไหลเข้ามาสู่ช่องทางไหลที่ขยายออกจะมีการกำหนดให้ผนังด้านล่างตลอดความยาวมีการให้ฟลักซ์ความร้อนคงที่ (q'') ปริมาณเท่ากับ 1000 W/m^2 โดยในตอนนี้เราสนใจพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนที่อาจจะสามารถอธิบายโดยใช้ตัวแปรไร้มิติสแตนต์นัมเบอร์ (St) ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนการพาความร้อนต่อฟลักซ์ความร้อน ซึ่งในที่นี้ค่าสแตนต์นัมเบอร์หาได้จาก

$$\text{St} = \frac{h}{\rho u C_p} = \frac{q''}{\rho U C_p [T_w(x) - T_b(x)]} \quad (4.4)$$

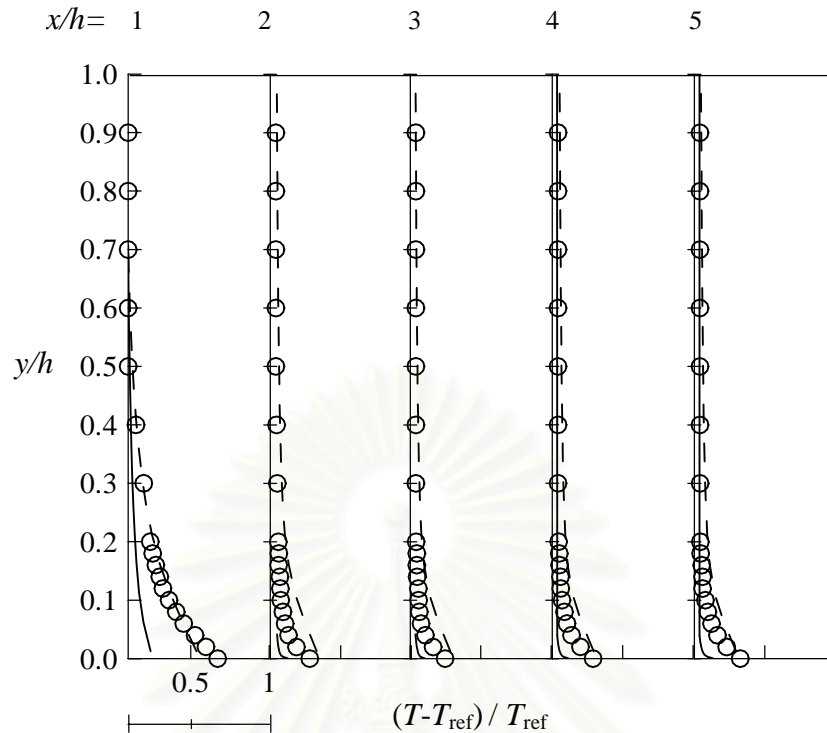
รูปที่ 4.17 แสดงค่าสแตนต์นัมเบอร์หลังการไหลผ่าน Backward-facing step ที่ x/h ต่างๆ กัน พบว่าผลการคำนวณจากแบบจำลอง $k-\omega$ มีความใกล้เคียงกับผลการคำนวณด้วยวิธี DNS มากกว่าโดยที่ผลจากแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ ให้ผลการทำนายค่า St ที่สูงกว่าผลจากวิธี DNS ค่อนข้างมาก ถึงแม้ว่าแนวโน้มของผลลัพธ์จะเป็นไปในทิศทางเดียวกันก็ตาม

รูปที่ 4.18 แสดงการกระจายอุณหภูมิไร้มิติ $((T-T_{\text{ref}})/T_{\text{ref}})$ ตลอดความสูงของช่องทางไหลที่ x/h ต่างๆ กัน สังเกตได้ว่าผลลัพธ์จากแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ มีค่าต่ำกว่าผลจากวิธี DNS ทุกตำแหน่ง x/h ในขณะที่ผลการจำลอง $k-\omega$ ให้ผลการทำนายที่สอดคล้องกับผลจากวิธี DNS มากกว่า



รูปที่ 4.17 ค่าสแตนต์นัมเบอร์หลังการไหลผ่าน Backward-facing step ที่ x/h ต่างๆ กัน

(● DNS, — Standard $k-\varepsilon$, - - $k-\omega$)



รูปที่ 4.18 การกระจายอุณหภูมิไร้มิติที่ x/h ต่างๆ กัน
(\circ DNS, — Standard $k-\varepsilon$, - - $k-\omega$)

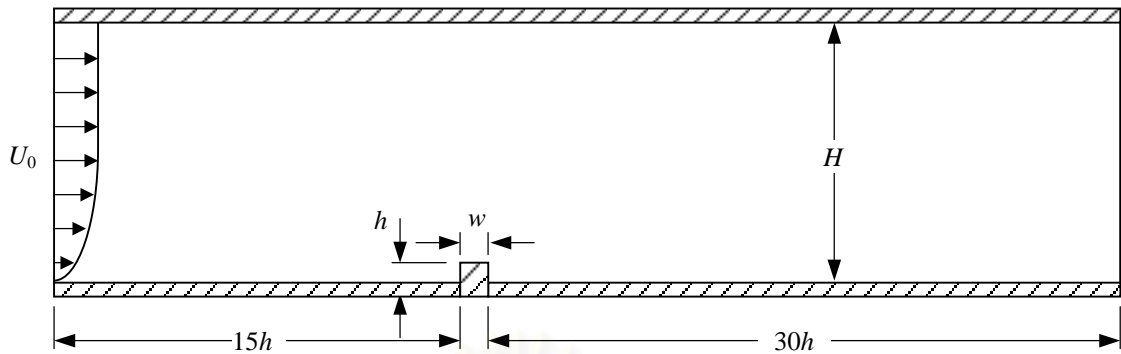
4.3 ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว

การติดตั้งสิ่งกีดขวางในช่องทางไหลนั้น จะช่วยเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อน (ผลของครีป) และยังรบกวน Laminar sublayer (ผลของความขรุขระ) ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงยกรูปแบบการไหลนี้มาเป็นตัวอย่างปัญหาในการตรวจสอบโปรแกรมโดยแบ่งปัญหาออกเป็น 2 ส่วน คือ

- 1) การไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว
- 2) การไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว

ส่วนที่ 1 การไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว

รูปแบบการไหลนี้เป็นการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว ซึ่งวางอยู่บนผนังด้านล่างของช่องทางไหลโดยที่สิ่งกีดขวางมีขนาดความกว้าง (w) เท่ากับ 6.35 mm ความสูง (h) เท่ากับ 6.35 mm วางห่างจากทางเข้าเป็นระยะ $15h$ และทางออกอยู่ห่างจากสิ่งกีดขวางเป็นระยะ $30h$ โดยช่องทางไหลมีความสูง (H) เท่ากับ 61 mm ลักษณะการไหลผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ลักษณะของปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว

จากรูปที่ 4.19 เส้นไขความเร็วที่ทางเข้า (Inlet) ถูกกำหนดจากผลการทดลองที่จัดอยู่ในรูปสมการ ดังนี้

$$\frac{u}{U_0} = \left(\frac{y}{\delta_u} \right)^{\frac{1}{5.6}} \quad ; \quad \frac{y}{\delta_u} < 1 \quad \text{และ} \quad \frac{y}{\delta_u} > \left(\frac{H}{\delta_u} - 1 \right)$$

และ
$$\frac{u}{U_0} = 1 \quad ; \quad 1 \leq \frac{y}{\delta_u} \leq \left(\frac{H}{\delta_u} - 1 \right)$$

เมื่อ δ_u คือ Boundary layer thickness ซึ่งมีค่าเท่ากับ $3.3h$

H คือ ความสูงของช่องทางไหล

U_0 คือ Free stream velocity กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 3.6 m/s

ผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Acharya et al. [6] เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยทำการคำนวณการไหลเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_H) เท่ากับ 14000 และกำหนดให้ของไหลมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.2 kg/m^3 ดังนั้นสามารถหาค่าความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลได้จาก

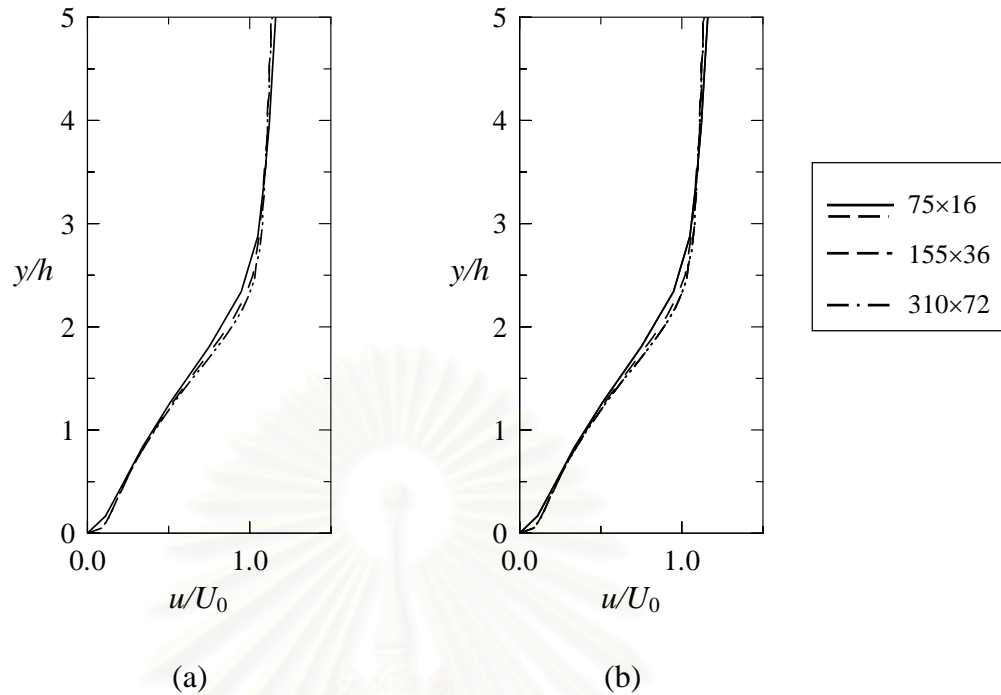
$$Re_H = \frac{\rho U_0 H}{\mu}$$

$$\therefore \mu = \frac{\rho U_0 H}{Re_H}$$

$$= \frac{1.2 \times 3.6 \times 0.061}{14000}$$

$$= 1.85 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$$

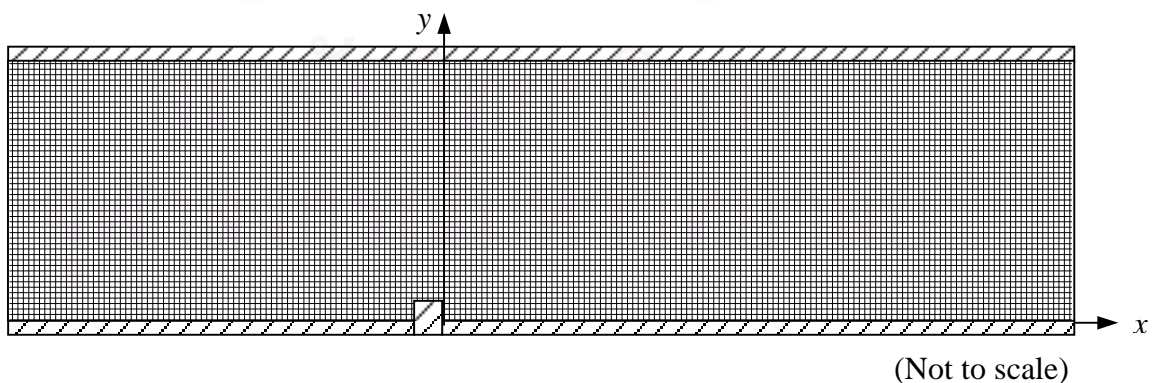
ตรวจสอบความเป็น Grid independent ของปัญหานี้ด้วยกริดขนาดต่างๆกัน 3 ขนาดคือ 75×16 , 155×36 และ 310×72 จากรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงความเร็ว u/U_0 ที่ $x/h = 7.1$ สังเกตได้ว่ากริดขนาด 155×36 และ 310×72 ให้ผลลัพธ์ที่มีความใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นในการคำนวณในส่วนนี้จึงเลือกใช้กริดขนาด 155×36 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.21



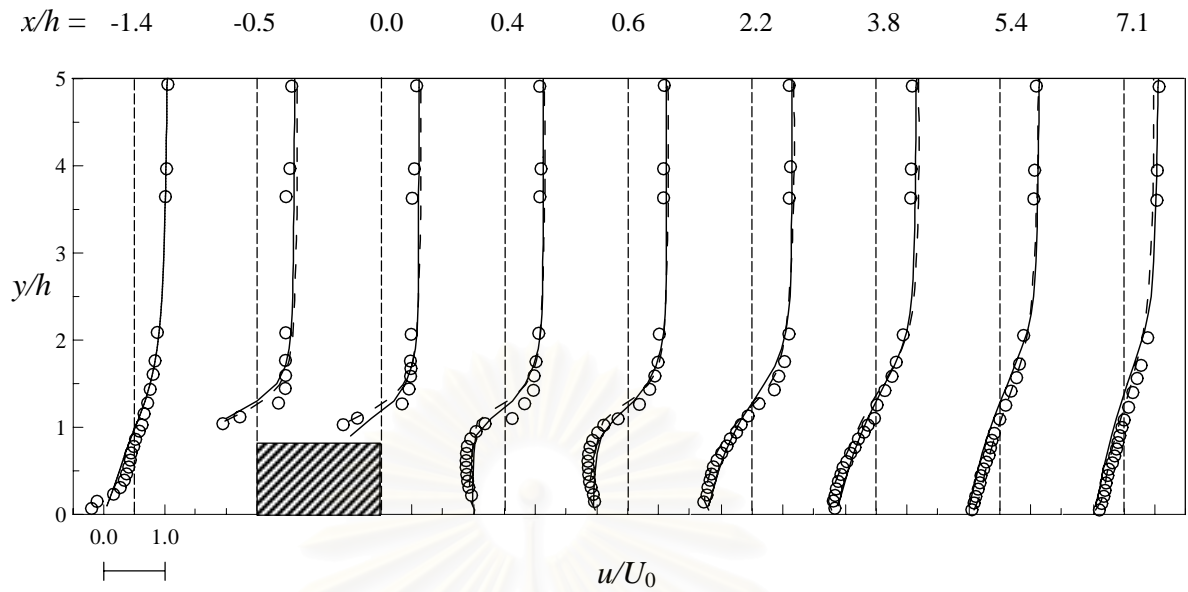
รูปที่ 4.20 ความเร็ว u/U_0 ที่ $x/h = 7.1$ สำหรับ $Re_H = 14000$

(a) Standard $k-\epsilon$ และ (b) $k-\omega$

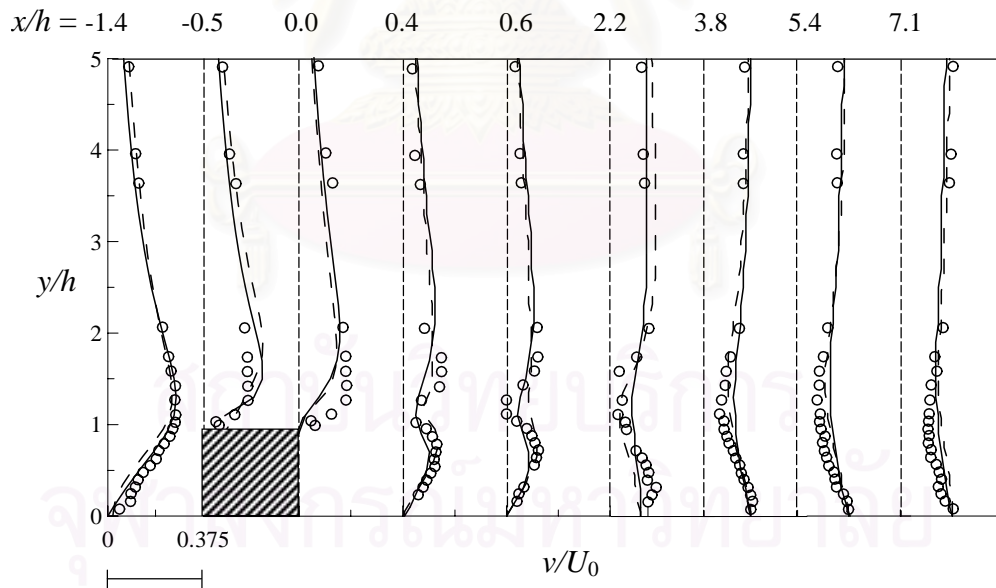
รูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดงความเร็ว u/U_0 และ v/U_0 ที่ได้จากการจำลองการไหล เปรียบเทียบกับผลการทดลองสำหรับ $Re_H = 14000$ ที่ x/h ต่างๆ กัน ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลอง $k-\omega$ ให้ผลที่มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ เล็กน้อย



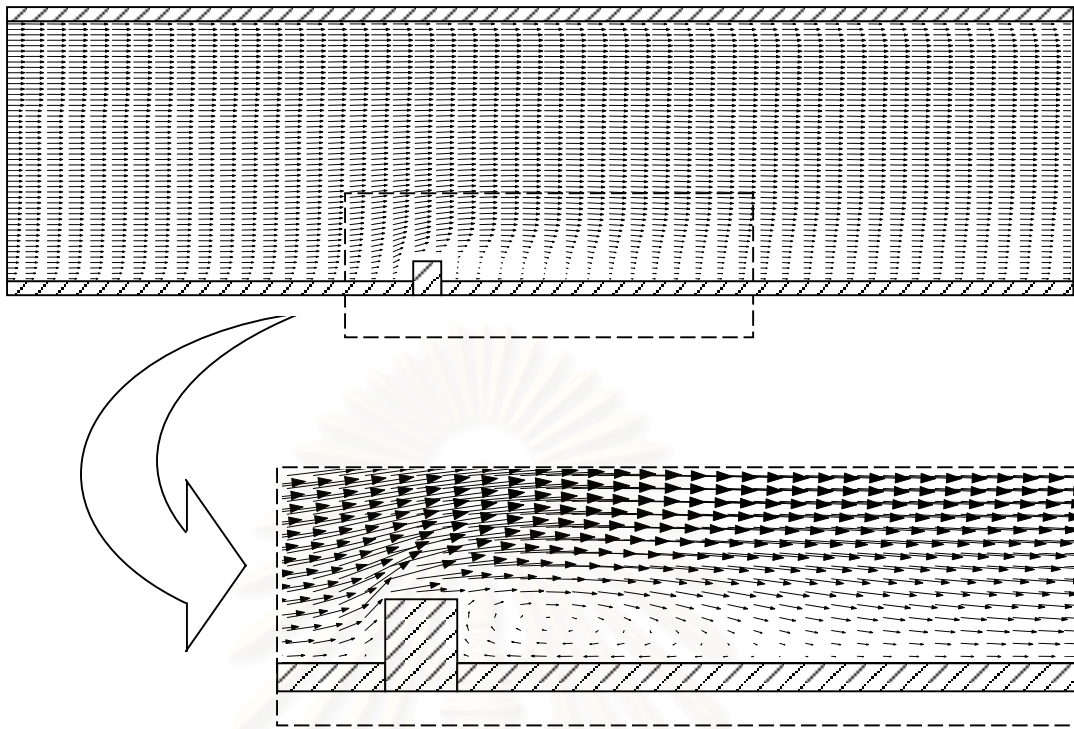
รูปที่ 4.21 กริดขนาด 155x36 สำหรับการจำลองการไหลผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว



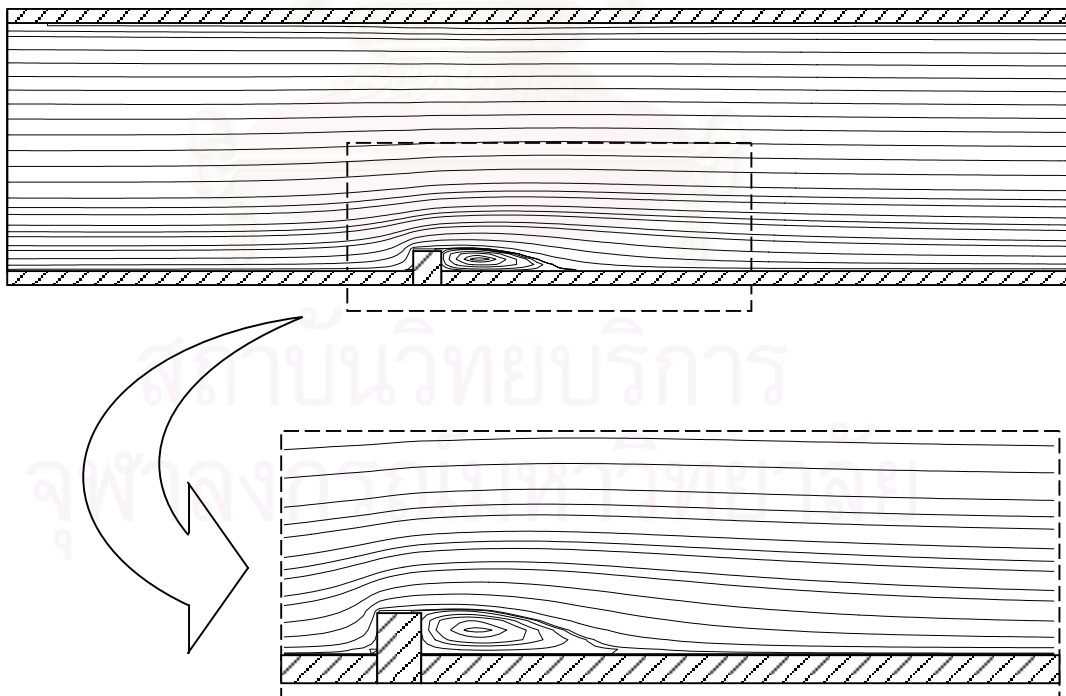
รูปที่ 4.22 ความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากการจำลองการไหลผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว
 เปรียบเทียบกับผลการทดลองสำหรับ $Re_H = 14000$ ที่ x/h ต่างๆ กัน
 (\circ DNS, — Standard $k-\varepsilon$, - - $k-\omega$)



รูปที่ 4.23 ความเร็ว v/U_0 ที่ได้จากการจำลองการไหลผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว
 เปรียบเทียบกับผลการทดลองสำหรับ $Re_H = 14000$ ที่ x/h ต่างๆ กัน
 (\circ DNS, — Standard $k-\varepsilon$, - - $k-\omega$)



รูปที่ 4.24 เวกเตอร์ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยวสำหรับ $Re_H = 14000$

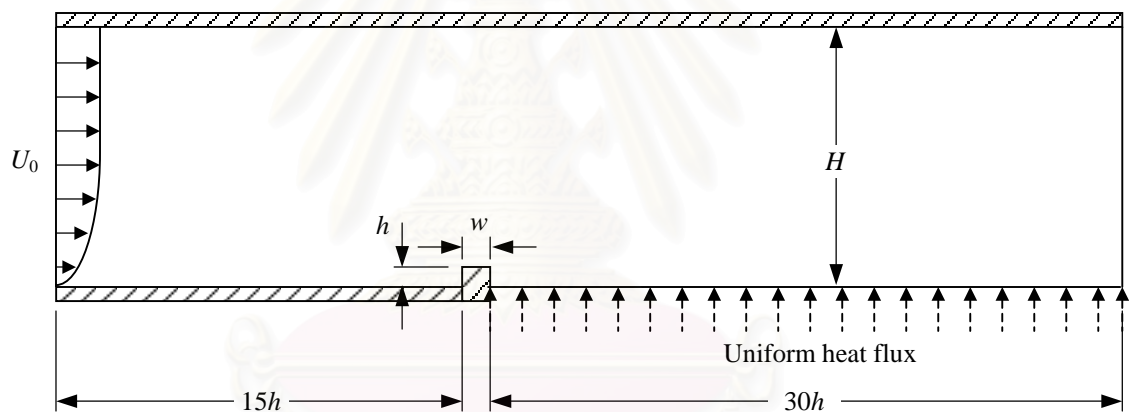


รูปที่ 4.25 Streamline ของการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยวสำหรับ $Re_H = 14000$

รูปที่ 4.24 และ 4.25 แสดงเวกเตอร์ความเร็วและ Streamline ของการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยวสำหรับ $Re_H = 14000$ รูปทั้งสองแสดงให้เห็นบริเวณการหมุนวนที่เกิดด้านหลังของสิ่งกีดขวางซึ่งสังเกตเห็นได้ชัดเจนขึ้นในรูปขยายของรูปที่ 4.25 โดยที่จะเห็นบริเวณการหมุนวนขนาดเล็กที่ด้านหน้าของสิ่งกีดขวางด้วย ซึ่งการที่เกิดบริเวณการหมุนวนขนาดเล็กนี้ย่อมหมายความว่าผิวด้านหน้าของสิ่งกีดขวางมีผลต่อบริเวณการหมุนวนด้วย

ส่วนที่ 2 การไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว

ในส่วนนี้เป็นการทำนายผลการถ่ายเทความร้อน โดยรูปร่างและเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้เหมือนกับส่วนที่ 1 แต่มีการกำหนดฟลักซ์ความร้อนคงที่ขนาด 280 W/m^2 ที่บริเวณผนังด้านล่างของช่องทางไหลหลังสิ่งกีดขวาง และผนังด้านที่เหลือซึ่งได้แก่ ผนังด้านบน ผนังด้านล่างบริเวณทางเข้าและผิวทุกด้านของสิ่งกีดขวาง ถูกกำหนดให้เป็นฉนวนโดยที่ลักษณะของปัญหาแสดงได้ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ลักษณะของปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว

การถ่ายเทความร้อนถูกแสดงในรูปของค่าตัวเลขนัมเบอร์ (Nu_D) ซึ่งค่า Nu_D นี้หาได้จาก

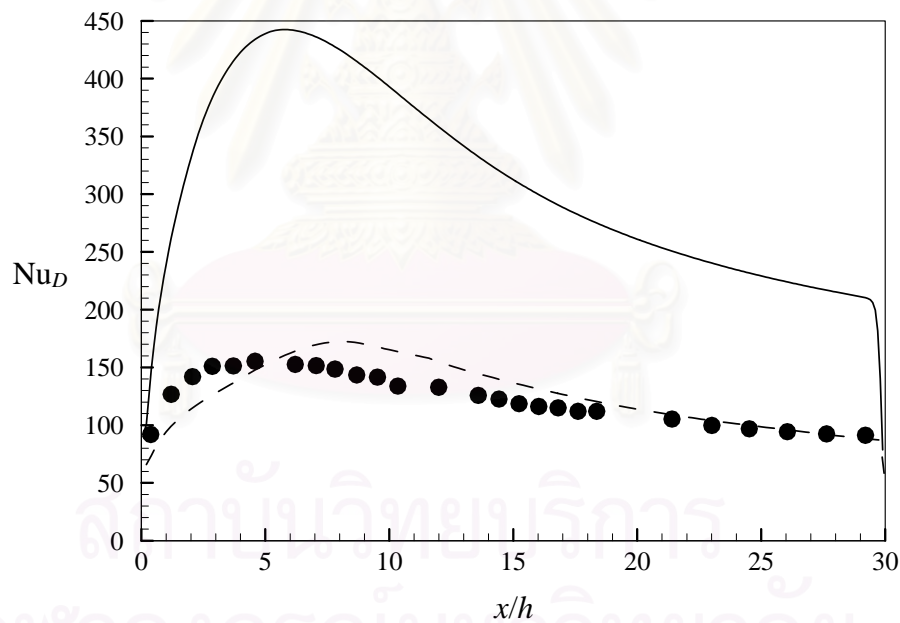
$$Nu_D = \frac{q'' D_h}{k[T_w(x) - T_b(x)]} \quad (4.5)$$

เมื่อ	q''	คือ	ฟลักซ์ความร้อนคงที่ เท่ากับ 280 W/m^2
	D_h	คือ	Hydraulic diameter เท่ากับ 101.6 mm
	k	คือ	ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของอากาศที่ 298 K มีค่าเท่ากับ 0.0259 W/m.K
	$T_w(x)$	คือ	อุณหภูมิที่ผนัง ณ ตำแหน่ง x ใดๆ

$T_b(x)$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ตำแหน่ง x ใดๆ

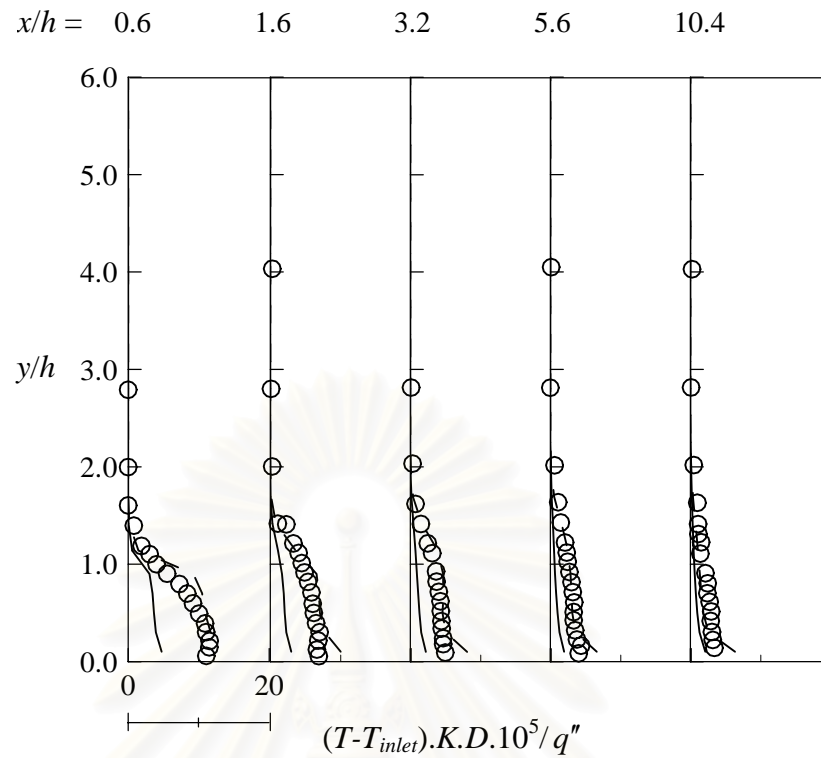
รูปที่ 4.27 แสดงค่า Nu_D ที่ตำแหน่ง x/h ต่างๆ กัน จะเห็นได้ว่าเมื่อนำผลการคำนวณที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าค่า Nu_D สูงสุดที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 442 (Standard $k-\varepsilon$) และ 171 ($k-\omega$) โดยที่ค่า Nu_D สูงสุดจากผลการทดลองเท่ากับ 155 และเมื่อพิจารณาที่ทุกๆ ตำแหน่ง x/h จะเห็นได้ว่าค่านี้สเซลนัมเบอร์ ซึ่งได้จากแบบจำลอง $k-\omega$ ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$

รูปที่ 4.28 แสดงการกระจายของอุณหภูมิในรูปของค่าอุณหภูมิเฉลี่ย $(T - T_{inlet}) \cdot K \cdot D \cdot 10^5 / q''$ ที่ตำแหน่ง x/h ต่างๆ กัน พบว่า การคำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยด้วยแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ ให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ควรจะเป็น (Under-predicted) ในทุกตำแหน่ง x/h แต่ผลการทำนายจากแบบจำลอง $k-\omega$ ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองในทุกๆ ตำแหน่งที่พิจารณา



รูปที่ 4.27 ค่า Nu_D หลังการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง x/h ต่างๆ กัน

(● DNS, — Standard $k-\varepsilon$, --- $k-\omega$)



รูปที่ 4.28 อุณหภูมิเฉลี่ยหลังการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง x/h ต่างๆ กัน
 (● DNS, — Standard $k-\varepsilon$, - - $k-\omega$)

4.4 สรุปผล

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มร่วมกับการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ ถูกตรวจสอบความถูกต้องกับปัญหาที่มีผลการทดลองหรือผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ ซึ่งปัญหาที่ยกขึ้นมาใช้ในการตรวจสอบมีด้วยกัน 3 ปัญหา พบว่าผลการคำนวณในส่วนของการไหลด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ ให้ผลที่ดีกว่า Standard $k-\varepsilon$ ไม่มากนัก แต่จากผลการคำนวณในส่วนของการถ่ายเทความร้อนพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าค่อนข้างมาก ดังนั้นเราจึงเลือกแบบจำลอง $k-\omega$ ในการประยุกต์ใช้กับปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์มินัลต่อไป (รายละเอียดอยู่ในบทที่ 6)

บทที่ 5

การทำนายการไหลและการถ่ายเทความร้อน ในใบพัดกังหันก๊าซ ที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง

การไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซจัดว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งการไหลในลักษณะนี้ทำให้ความสามารถในการแพร่ (Diffusivity) เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการผสมที่รวดเร็วขึ้น (Rapid mixing) และยังส่งผลถึงอัตราการขนถ่ายโมเมนตัม ความร้อนและมวล อีกทั้งถ้ามีการติดตั้งสิ่งกีดขวางเพิ่มเข้าไป จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความเร็วระหว่างผิวส่งผลต่อการเกิดความปั่นป่วนและส่งผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนโดยการพาทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย [8]

ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนที่เกี่ยวข้องกับการทำนายการไหลและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง ซึ่งประกอบด้วย

- 1) การพิจารณาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง
- 2) การคำนวณการพาความร้อนแบบบังคับ
- 3) รูปร่างของช่องทางไหลและการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์
- 4) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

5.1 การพิจารณาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง

เนื่องจากความหลากหลายของรูปร่างช่องทางไหลและการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์ที่มีผลกระทบต่อการระบายความร้อน เราจึงต้องเลือกพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาขึ้นมา ได้แก่ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re) , นัสเซลนัมเบอร์ที่ตำแหน่ง x ใดๆ (Nu_x) และนัสเซลนัมเบอร์เฉลี่ย (\overline{Nu}) ในที่นี้เราแสดงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนด้วยอัตราส่วนค่านัสเซลนัมเบอร์เฉลี่ยของช่องทางไหลที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง (\overline{Nu}) ต่อค่านัสเซลนัมเบอร์เฉลี่ยของช่องทางไหลผนังเรียบ, \overline{Nu}_s ซึ่งค่า \overline{Nu}_s นี้ถูกเสนอครั้งแรกโดย Dittus-Boelter ในปี 1930 (อ้างอิงใน [18]) โดยค่าอัตราส่วน $\overline{Nu}/\overline{Nu}_s$ เรียกว่าค่า Enhancement factor, EF จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าวัตถุประสงค์ของการใช้เทอร์บิวเลเตอร์ในช่องทางไหลก็เพื่อต้องการค่า EF ที่สูงขึ้นไปกว่าแบบเดิมนั่นเอง

5.2 การคำนวณการพาความร้อนแบบบังคับ

เมื่อพิจารณาของไหลไหลผ่านผิวของแข็งร้อน จะพบว่าที่บริเวณการไหลใกล้กับผิว การแพร่กระจายความร้อนจะมีอิทธิพลที่สูงกว่าการพาความร้อนมาก อย่างไรก็ตามเราอาจจะพิจารณาบริเวณการถ่ายเทความร้อนดังกล่าวเป็นการพาความร้อนได้โดยสมมติว่าอัตราการแพร่กระจายความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวของแข็งไปยังชั้นของไหลที่อยู่ติดกันมีค่าเท่ากับอัตราการพาความร้อนซึ่งถ่ายเทออกจากผิวของแข็งไปยังของไหล ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$q'' = k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = \bar{h}(T_s - T_\infty) \quad (5.1)$$

การพาความร้อนสามารถแบ่งออกเป็นการพาความร้อนแบบอิสระและแบบบังคับ ซึ่งทั้งสองแบบมีความแตกต่างที่สำคัญ คือ ความเร็วของของไหลสำหรับการพาความร้อนแบบบังคับเกิดจากแรงภายนอก (แรงจากปั๊ม, ลม, Blower ฯลฯ) ส่วนการพาความร้อนแบบอิสระนั้น เกิดจากแรงลอยตัวและเกรเดียนต์ของความหนาแน่น ในการวิเคราะห์การพาความร้อนว่าเป็นแบบใดสามารถตัดสินได้โดยใช้ตัวแปรไร้มิติกราชอฟนัมเบอร์ (Grashof number, Gr) ซึ่ง Gr นิยามจาก

$$\begin{aligned} \text{Gr} &= \text{แรงลอยตัว (Buoyancy force) / แรงจากความหนืด (Viscous force)} \\ &= \frac{g\beta\Delta T L_c^3}{\nu^2} \end{aligned} \quad (5.2)$$

เมื่อ g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก

β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of thermal expansion)

ν คือ ค่าความหนืดพลศาสตร์

และกราชอฟนัมเบอร์ สามารถหาได้จากสมการ

$$\text{Ra} = \text{Gr Pr} \quad (5.3)$$

เมื่อ Ra คือ เรย์เลห์นัมเบอร์ (Rayleigh number)

Pr คือ พรันด์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl number)

ดังนั้นการตัดสินใจว่าการพาความร้อนจะเป็นแบบใด สามารถพิจารณาได้จากเงื่อนไขต่อไปนี้

เมื่อ $Gr \gg Re^2$ จัดเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

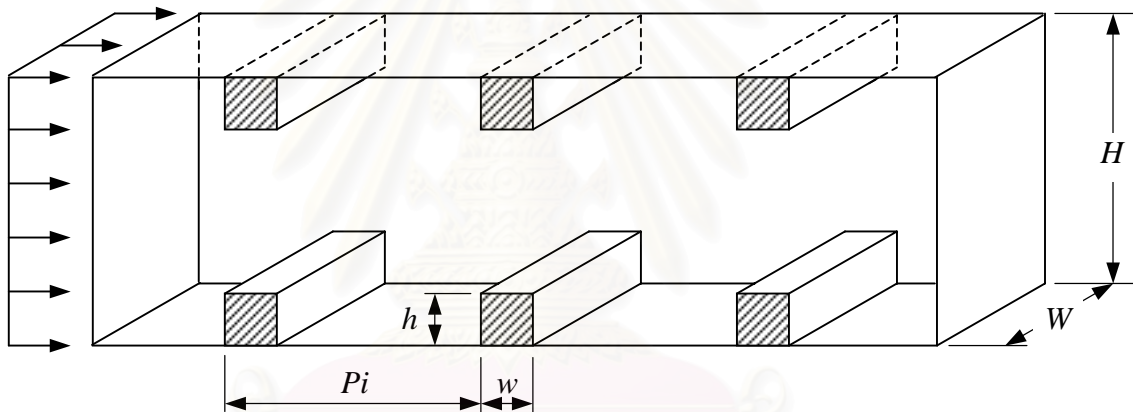
$Gr \ll Re^2$ จัดเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ

$Gr \approx Re^2$ จัดเป็นการพาความร้อนแบบผสม

5.3 รูปร่างของช่องทางไหลและการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์

ศัพท์เฉพาะต่างๆ ที่ใช้ในการอธิบายพารามิเตอร์ของรูปร่างที่หลากหลายในช่องทางไหลที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง ซึ่งใช้ในการถ่ายเทความร้อน มีดังต่อไปนี้

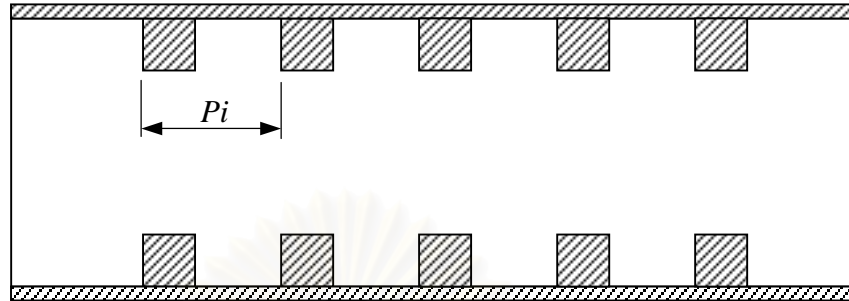
- 1) Channel aspect ratio, AR คือ อัตราส่วนความกว้างของช่องทางไหลต่อความสูงของช่องทางไหล, W/H (รูปที่ 5.1)



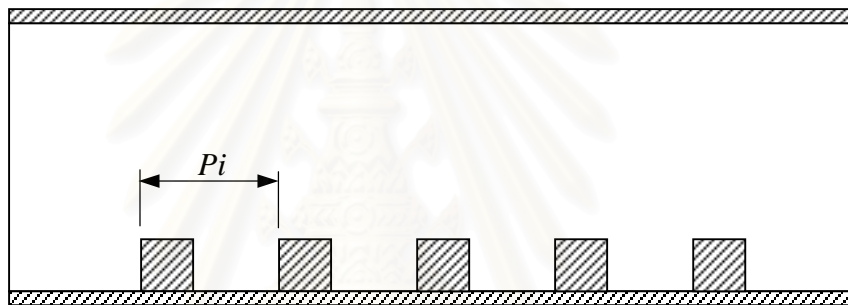
รูปที่ 5.1 ช่องทางไหลซึ่งมีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง

- 2) Block ratio คือ อัตราส่วนความสูงของสิ่งกีดขวาง (Rib height) ต่อ Hydraulic diameter ของช่องทางไหล, h/D_H
- 3) Pitch-to-height ratio คือ อัตราส่วนระยะห่างจากด้านหน้าสิ่งกีดขวางแรกถึงด้านหน้าของสิ่งกีดขวางถัดไปที่อยู่ติดกัน (Pitch) ต่อความสูงของสิ่งกีดขวาง, Pi/h
- 4) Rib-height-to-rib-width ratio คือ อัตราส่วนความสูงของสิ่งกีดขวางต่อความกว้างของสิ่งกีดขวาง (Rib width), h/w
- 5) ตำแหน่งการจัดวาง มีด้วยกัน 2 แบบใหญ่ๆ คือ การจัดวางแบบ In-lined เป็นการวางสิ่งกีดขวางด้านบนและด้านล่างตรงกันด้วยมุมการวางที่เท่ากัน หรืออาจจะวางบนผนังด้านบน

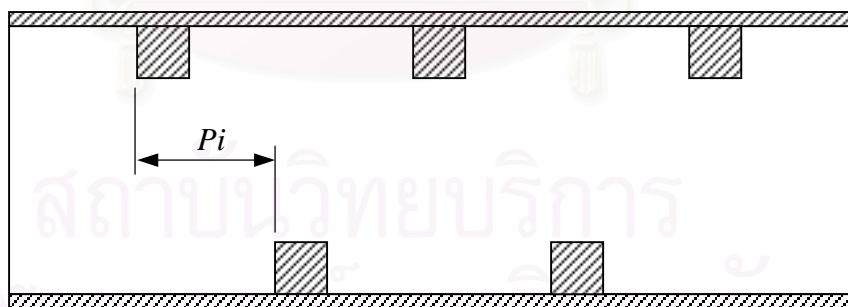
หรือด้านล่างเพียงด้านเดียวก็ได้ (รูปที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ) แต่ถ้าสิ่งกีดขวางวางเรียงกับสิ่งกีดขวางที่ติดตั้งอยู่ตรงกันข้าม เรียกว่า การจัดวางแบบ Staggered (รูปที่ 5.4)



รูปที่ 5.2 การจัดวางเทอร์ไบน์แบบ In-lined

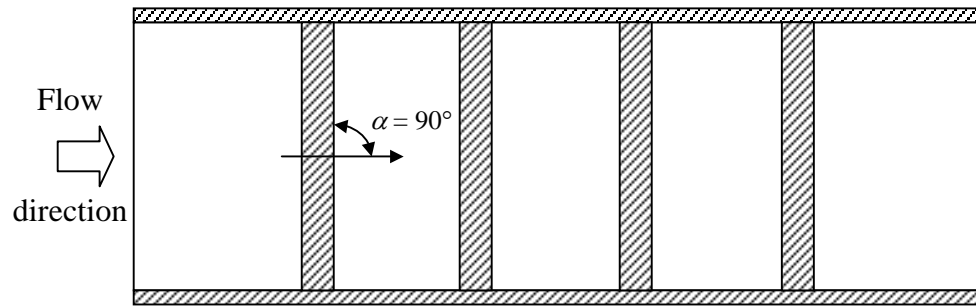


รูปที่ 5.3 การจัดวางเทอร์ไบน์บนผนังด้านล่างเพียงด้านเดียว

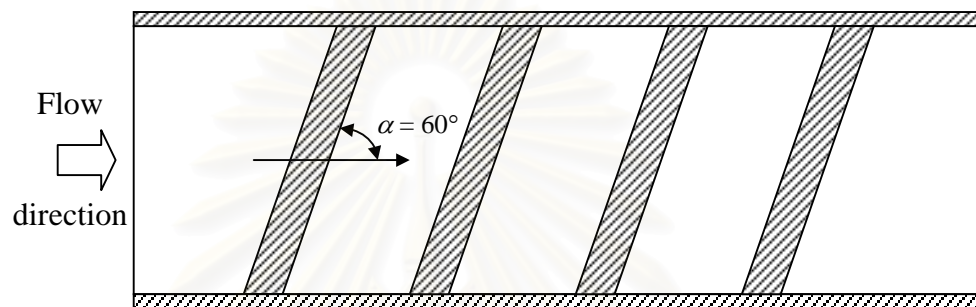


รูปที่ 5.4 การจัดวางเทอร์ไบน์แบบ Staggered

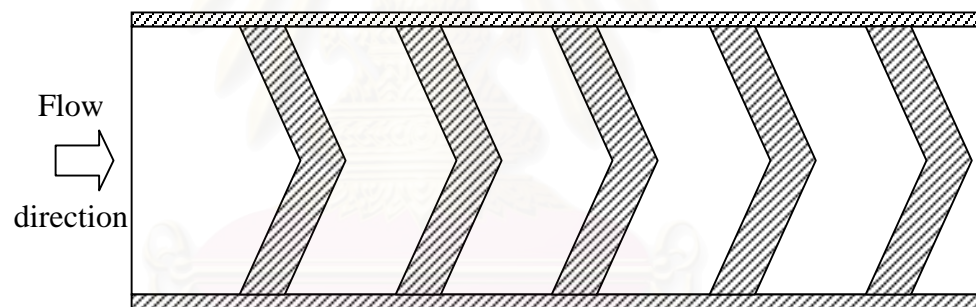
- 6) มุมปะทะ (Angle attack, α) คือ มุมการวางของเทอร์ไบน์ซึ่งวัดเทียบกับทิศทางการไหลเข้า เช่น 90° , 60° หรือ V-shape เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 5.5



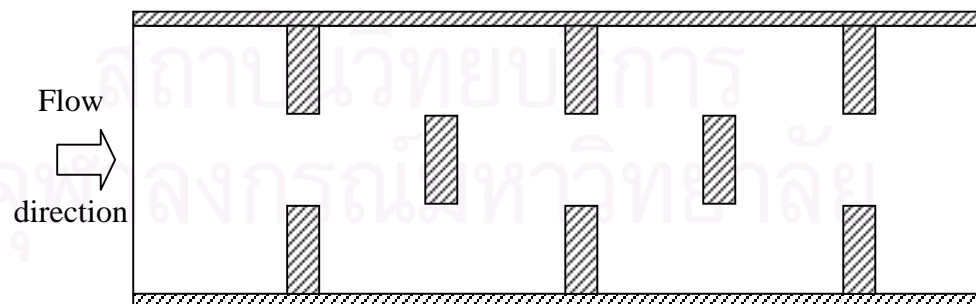
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 5.5 มุมการจัดวางของเทอร์ปีวเลเตอร์แบบต่างๆ

(a) มุมปะทะ $\alpha = 90^\circ$

(b) มุมปะทะ $\alpha = 60^\circ$

(c) V-shape

และ (d) Discrete

5.4 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ เราจะทำการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้ คือ รูปแบบการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์, เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์, อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของสิ่งกีดขวาง (h/w) (เราอาจจะพิจารณาว่าค่า h/w เป็นพารามิเตอร์เดียวกันกับ Block ratio และอัตราส่วนระยะ Pitch ต่อความสูงของสิ่งกีดขวาง (Pi/h) ก็ได้ เมื่อเรากำหนดให้ช่องทางไหลมีค่า Channel aspect ratio (AR) คงที่ค่าหนึ่ง) โดยในส่วนถัดไปจะขอยกตัวอย่างพารามิเตอร์บางตัวขึ้นมาศึกษา เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ต่อไป

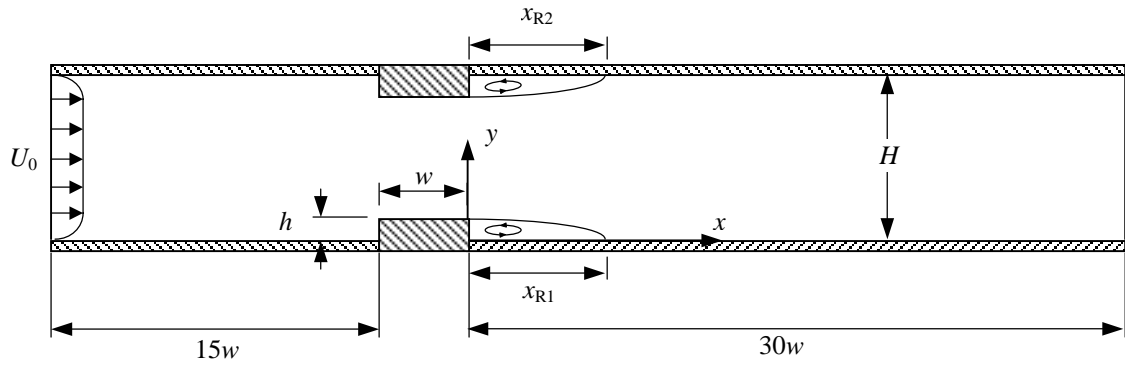
ตัวอย่างที่ 1 ผลกระทบของอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของสิ่งกีดขวาง (h/w) ที่มีต่อรูปแบบการไหล โดยปัญหาที่ยกขึ้นมาศึกษาพารามิเตอร์ตัวนี้ คือ ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 1 คู่ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล โดยการไหลในลักษณะนี้สามารถพบได้ในการระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอัตราการไหลและการระบายความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซ เป็นต้น

Liou and Kao [16] ได้ทำการทดลองโดยใช้ Laser-Doppler Velocimetry (LDV) ในการวัดค่าปริมาตรต่างๆ โดยกำหนดให้สิ่งกีดขวางมีขนาดความกว้างเท่ากับ w และความสูงเท่ากับ h ติดตั้งตรงข้ามกันบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล โดยที่ช่องทางไหลสูงเท่ากับ 30 mm และวางสิ่งกีดขวางห่างจากทางเข้าและทางออกเป็นระยะเท่ากับ $15w$ และ $30w$ ตามลำดับ (ลักษณะปัญหาแสดงดังรูปที่ 5.6) ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ขนาดและเงื่อนไขต่างๆ ของการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 1 คู่

	Re_D	h/H	U_0 (m/s)	w/h
กรณีที่ 1	39000	0.13	15.6	3.75
กรณีที่ 2	30000	0.33	11.5	1.5

เมื่อ Re_D คือ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ($Re = \frac{\rho D_h U_0}{\mu}$), $D_h = 0.04$ m



รูปที่ 5.6 ลักษณะของปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 1 คู่ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล

กรณีที่ 1 ปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 1 คู่ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล ($w/h = 3.75$)

ในการจำลองปัญหา กำหนดให้

ความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบ Uniform flow (U_0) เท่ากับ 15.6 m/s

ค่า h/H เท่ากับ 0.13

ค่า w/h เท่ากับ 3.75

และ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_D) เท่ากับ 39000

ดังนั้นสามารถสรุป ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ ได้ดังนี้

กำหนดให้ $h/H = 0.13$

เมื่อ $H = 0.03$ จะได้ $h = 0.03 \times 0.13 = 0.0039$ m (เลือกใช้ 0.004 m)

และ $w/h = 3.75$

เมื่อ $h = 0.004$ m จะได้ $w = 3.75 \times 0.004 = 0.015$ m

คุณสมบัติของของไหล

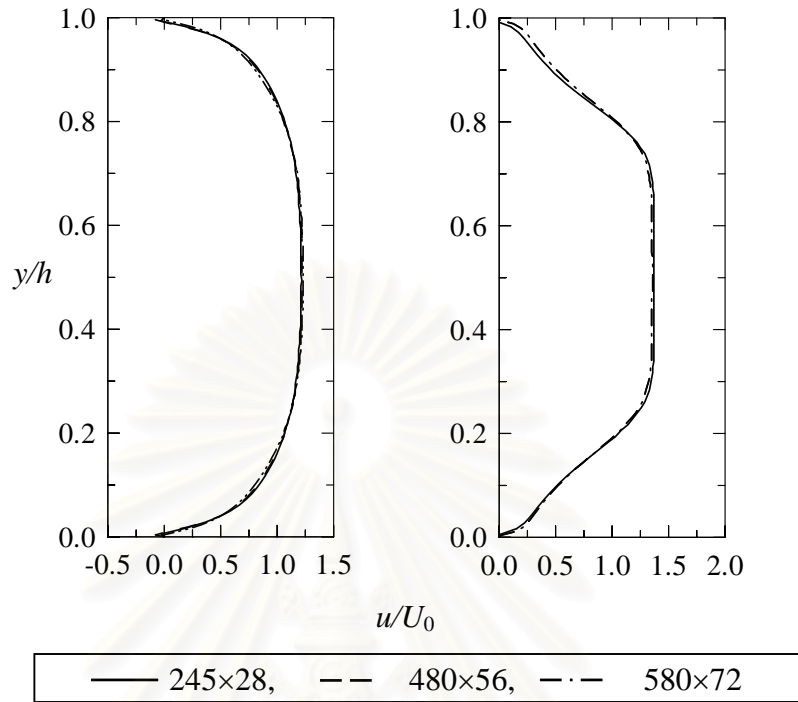
ความหนาแน่น (ρ) เท่ากับ 1.20 kg/m³

ความหนืดสัมบูรณ์ (μ) เท่ากับ 1.92×10^{-5} N.s/m²

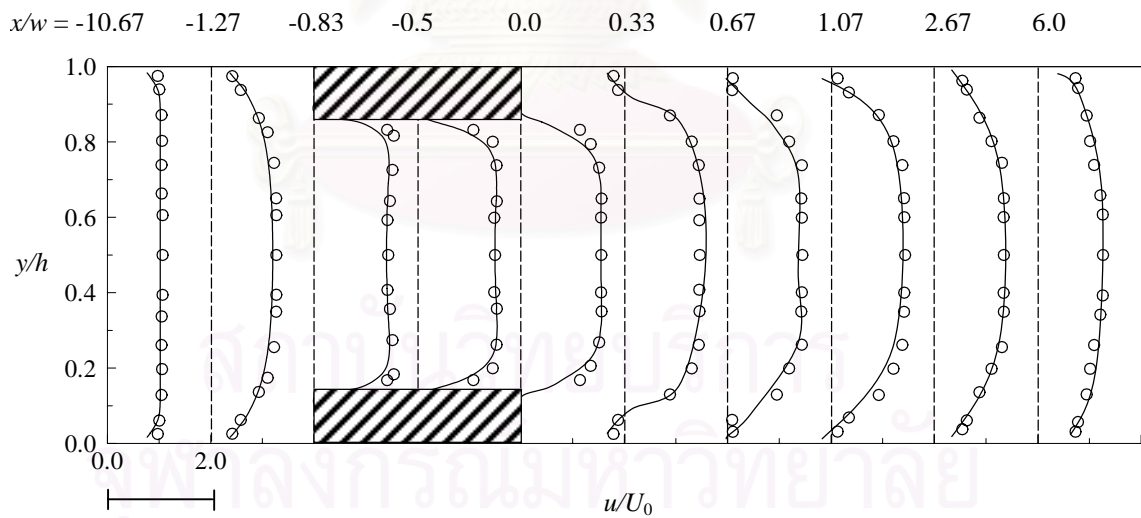
ในกรณีนี้เลือกใช้กริด 3 ขนาดด้วยกัน คือ 245×28, 480×56 และ 580×72 จากผลการคำนวณในรูปที่ 5.7 ซึ่งแสดงค่าความเร็ว u/U_0 ที่ตำแหน่ง $x/w = -1.27$ และ 2.67 พบว่ากริดขนาด 480×56 มีความละเอียดเพียงพอที่จะใช้ในการหาผลลัพธ์ของปัญหานี้

นำผลการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Liou and Kao เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง พบว่า ผลการคำนวณค่าความเร็ว u/U_0 (รูปที่ 5.8) ด้วย

แบบจำลอง $k-\omega$ สำหรับ $Re_D = 39000$ ที่ทุกตำแหน่ง x/w สามารถสังเกตได้ว่า ผลการคำนวณมีความสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง



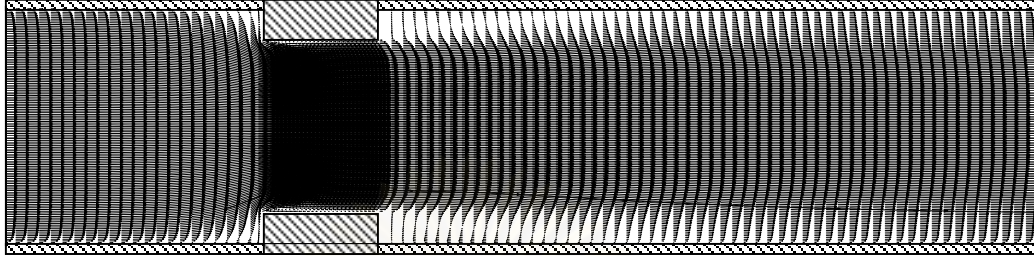
รูปที่ 5.7 ความเร็ว u/U_0 ที่ $x/w = -1.27$ และ 2.67 สำหรับ $Re_D = 39000$



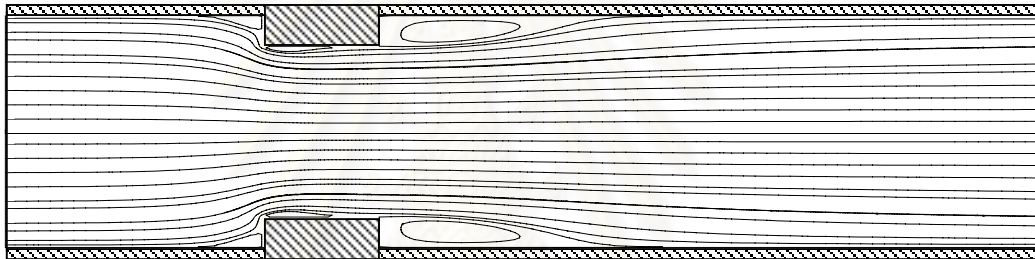
รูปที่ 5.8 ความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากการจำลองการไหลเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับ $Re_D = 39000$ ที่ x/w ต่างๆ กัน ($w/h = 3.75$)
(\circ ผลการทดลอง, — $k-\omega$)

เมื่อสังเกตบริเวณการหมุนวนที่เกิดขึ้นหลังการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในรูปที่ 5.9 และ 5.10 จะเห็นได้ว่า เกิดการหมุนวนขึ้นเล็กน้อยบริเวณด้านหน้าและเกิดการหมุนวนเป็นบริเวณกว้างด้าน

หลังของสิ่งกีดขวาง ถ้าเราพิจารณาการไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นทั้งผนังด้านบนและล่าง จะเห็นได้ว่ารูปแบบการไหลมีลักษณะที่เหมือนกัน (เกิดบริเวณการหมุนวนที่มีขนาดเท่ากันทั้งบนและล่าง) จึงสรุปได้ว่าการไหลในกรณีนี้เป็นการไหลแบบสมมาตร (Symmetric flow)



รูปที่ 5.9 เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง 1 คู่ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล ($w/h = 3.75$)



รูปที่ 5.10 Streamline ของการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง 1 คู่ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล ($w/h = 3.75$)

กรณีที่ 2 ปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 1 คู่ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล ($w/h = 1.50$)

ในการจำลองปัญหา กำหนดให้

ความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบ Uniform flow (U_0)	เท่ากับ	11.5 m/s
ค่า h/H	เท่ากับ	0.33
ค่า w/h	เท่ากับ	1.50
และ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_D)	เท่ากับ	30000

ดังนั้นสามารถสรุปค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ ได้ดังนี้

กำหนดให้ $h/H = 0.33$

เมื่อ $H = 0.03$ จะได้ $h = 0.03 \times 0.33 = 0.0099$ m (เลือกใช้ค่า 0.010 m)

และ $w/h = 1.50$

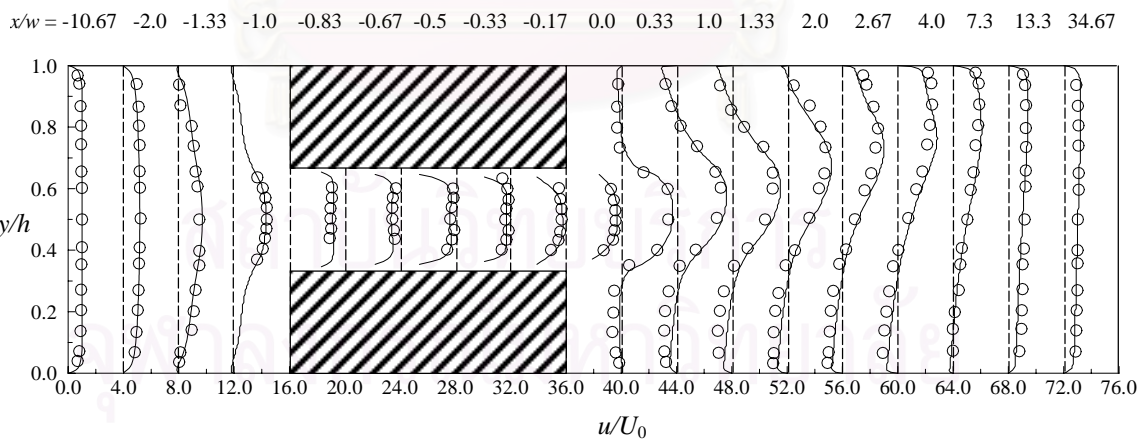
เมื่อ $h = 0.010 \text{ m}$ จะได้ $w = 3.75 \times 0.010 = 0.0375 \text{ m}$

คุณสมบัติของของไหล

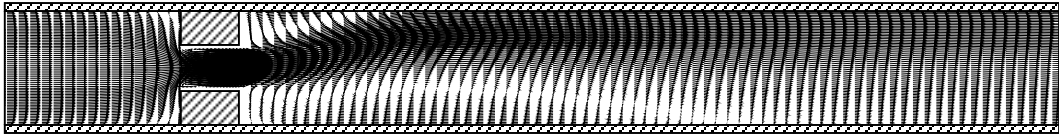
ความหนาแน่น (ρ) เท่ากับ 1.20 kg/m^3

ความหนืดสัมบูรณ์ (μ) เท่ากับ $1.84 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$

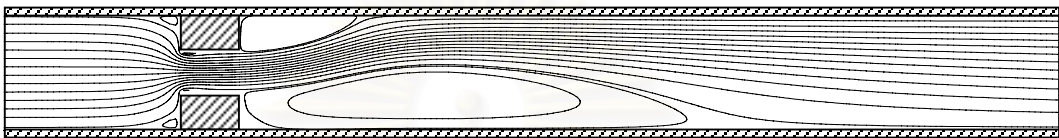
รูปที่ 5.11 แสดงความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับ $Re_D = 30000$ ที่ x/w ต่างๆ กัน สังเกตได้ว่าผลจากแบบจำลอง $k-\omega$ มีความสอดคล้องกันดีพอสมควรเมื่อเทียบกับผลการทดลอง และเมื่อเปรียบเทียบความเร็ว u/U_0 ตามแนวกึ่งกลางของช่องทางไหล จะเห็นได้ว่าสนามความเร็วเกิดความไม่สมมาตรขึ้น ข้อสังเกตนี้สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนมากขึ้นในรูปที่ 5.12 และ 5.13 ซึ่งแสดงเวกเตอร์ความเร็วและ Streamline ตามลำดับ โดยจะสังเกตเห็นว่าด้านหลังสิ่งกีดขวางเกิดบริเวณการหมุนวนที่ด้านบนมีขนาดความยาวน้อยกว่าความยาวบริเวณการหมุนวนที่เกิดหลังสิ่งกีดขวางที่ผนังด้านล่าง จึงสามารถสรุปได้ว่าการไหลในกรณีนี้ เป็นรูปแบบการไหลที่ไม่สมมาตร (Asymmetric flow) โดยที่ความไม่สมมาตรนี้ อาจอธิบายได้ด้วยรูปที่ 5.14 ซึ่งแสดงการกระจายของความดันด้านบนและล่างที่ไม่สมมาตรกัน จะเห็นได้ว่าที่บริเวณการไหลด้านหน้าก่อนถึงสิ่งกีดขวาง Contour ของความดันมีการกระจายที่สมมาตร จนกระทั่งของไหลไหลผ่านสิ่งกีดขวางจึงพบว่าเกิดความดันย้อนกลับทางด้านล่างที่สูงกว่าด้านบนเป็นผลทำให้เกิดบริเวณการหมุนวนทางด้านล่างที่มีขนาดใหญ่กว่าด้านบน



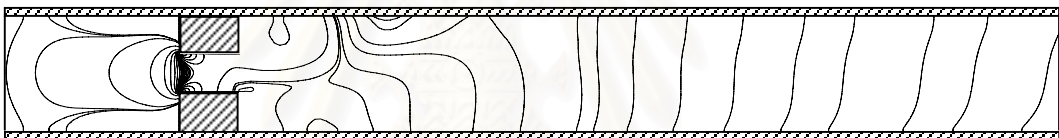
รูปที่ 5.11 ความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากการจำลองการไหลเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับ $Re_D = 30000$ ที่ x/w ต่างๆ กัน ($w/h = 1.50$)
 (\circ ผลการทดลอง, — $k-\omega$)



รูปที่ 5.12 เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง 1 คู่ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล ($w/h = 1.50$)



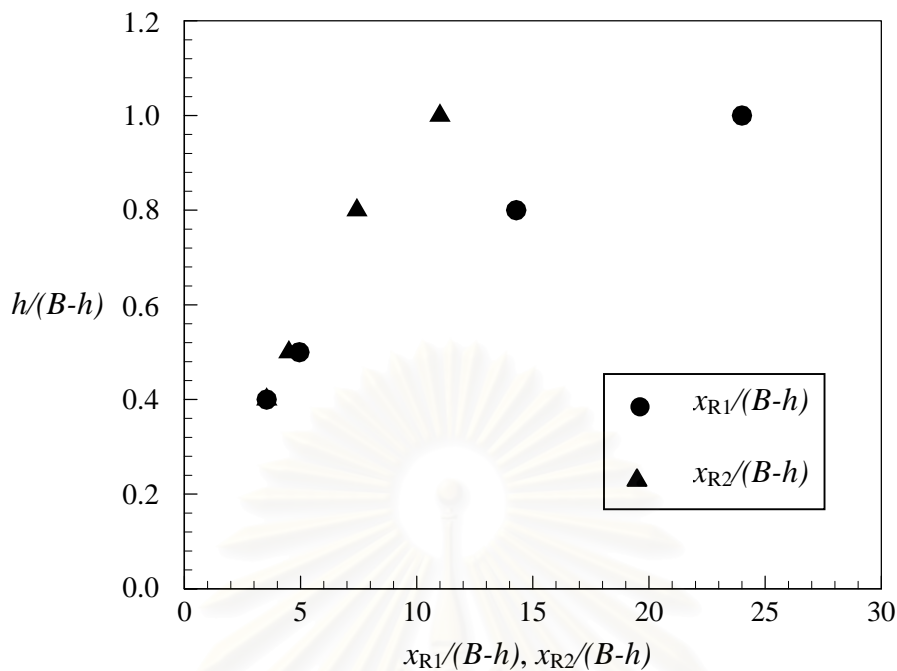
รูปที่ 5.13 Streamline ของการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง 1 คู่ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล ($w/h = 1.50$)



รูปที่ 5.14 Contour ของความดันของการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง 1 คู่ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล ($w/h = 1.50$)

จากผลลัพธ์ของทั้งสองกรณีข้างต้น ($w/h = 3.75$ และ $w/h = 1.50$) แสดงว่าจะต้องมีค่าความสูงค่าหนึ่งที่เป็นค่าตัดสินว่ารูปแบบการไหลจะเปลี่ยนจากแบบสมมาตรไปเป็นแบบไม่สมมาตรเมื่อใด เพราะฉะนั้นเราจะทำการศึกษาถึงผลของความสูงนี้ โดยทำการคำนวณด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าความสูง 4 ค่าด้วยกัน คือ h เท่ากับ 4, 6, 8 และ 10 ตามลำดับ

รูปที่ 5.15 แสดงค่าความยาว Reattachment ที่เกิดหลังสิ่งกีดขวางด้านบน (x_{R1}) และด้านล่าง (x_{R2}) ที่ Normalized rib height ($h/(B-h)$, B คือ ระยะครึ่งหนึ่งของความสูงช่องทางไหล - $B = H/2$) ต่างๆ กัน สังเกตได้ว่าที่ $h/(B-h) = 0.4$ ความยาว Reattachment ด้านบนและล่างของผนังมีค่าเท่ากัน แต่เมื่อ $h/(B-h)$ มีค่าตั้งแต่ 0.5 เป็นต้นไป บริเวณทั้งสองจะมีความยาวไม่เท่ากัน และเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อค่า $h/(B-h)$ มีค่าสูงขึ้น

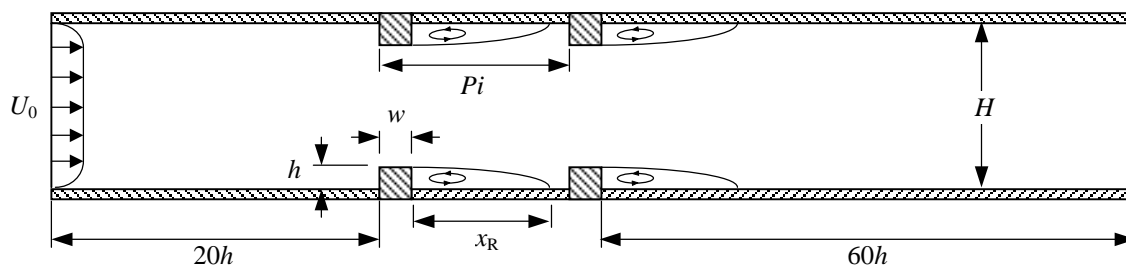


รูปที่ 5.15 ค่าความยาว Reattachment ที่เกิดหลังสิ่งกีดขวางด้านบน (x_{R1}) และล่าง (x_{R2}) ที่ Normalized rib height ต่างๆ กัน

สรุปผล

จากการศึกษาผลของความสูงของสิ่งกีดขวางที่มีต่อสนามการไหลด้วยการคำนวณสามารถสรุปได้ว่า ความสูงของสิ่งกีดขวางที่เปลี่ยนแปลงส่งผลกระทบต่อความสมมาตรของรูปแบบการไหล และยังทำให้เราทราบอีกว่าการคำนวณการไหลผ่านรูปร่างที่สมมาตรนั้น ผู้ทำการคำนวณส่วนใหญ่มักจะทำการคำนวณด้วยเงื่อนไขแบบสมมาตร แต่จากผลการศึกษานี้ แสดงให้เห็นว่าที่ความสูงวิกฤตค่าหนึ่งจะทำให้เกิดรูปแบบการไหลที่ไม่สมมาตรขึ้นได้

ตัวอย่างที่ 2 ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วน Pitch ต่อความสูงของสิ่งกีดขวาง (Pi/h) ที่มีต่อรูปแบบการไหลด้วยปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 2 คู่ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล โดยนำผลการทดลองมาจาก Liou et al. [4] ซึ่งพวกเขาทำการทดลองโดยวางสิ่งกีดขวางที่มีขนาดความกว้างและความสูงเท่ากับ w และ h ตามลำดับ บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลจำนวน 2 คู่ โดยกำหนดให้ช่องทางไหลสูงเป็นระยะ 30 mm และวางสิ่งกีดขวางห่างจากทางเข้าและทางออกเป็นระยะ 20 และ 60 เท่าของความสูงของสิ่งกีดขวาง ตามลำดับ ลักษณะของปัญหาแสดงดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 ลักษณะของปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 2 คู่
ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล

ในการศึกษาปัญหานี้ เราจะทำการเปลี่ยนแปลงค่า Pitch Ratio (PR) 3 ค่าด้วยกัน คือ PR เท่ากับ 5, 10 และ 15 โดยที่ค่า PR นี้ นิยามมาจาก

$$\text{Pitch Ratio (PR)} = \text{Pitch length (} Pi \text{)} / \text{Rib height (} h \text{)}$$

เมื่อค่า Pitch length (Pi) คือ ระยะจากสิ่งกีดขวางแรกถึงสิ่งกีดขวางที่สอง (แสดงในรูปที่ 5.16) และขนาดที่ใช้ในการจำลองปัญหาการไหลในส่วนนี้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ขนาดที่ใช้ในการจำลองปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 2 คู่ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล

กรณีที่	PR	w/h	h/H	D_h (m)	U_0 (m/s)	Re_D
1	5	1.0	0.13	0.04	16.4	42000
2	10	1.0	0.13	0.04	16.4	42000
3	15	1.0	0.13	0.04	16.4	42000

เมื่อกำหนดให้ $H = 0.03$ m จะได้

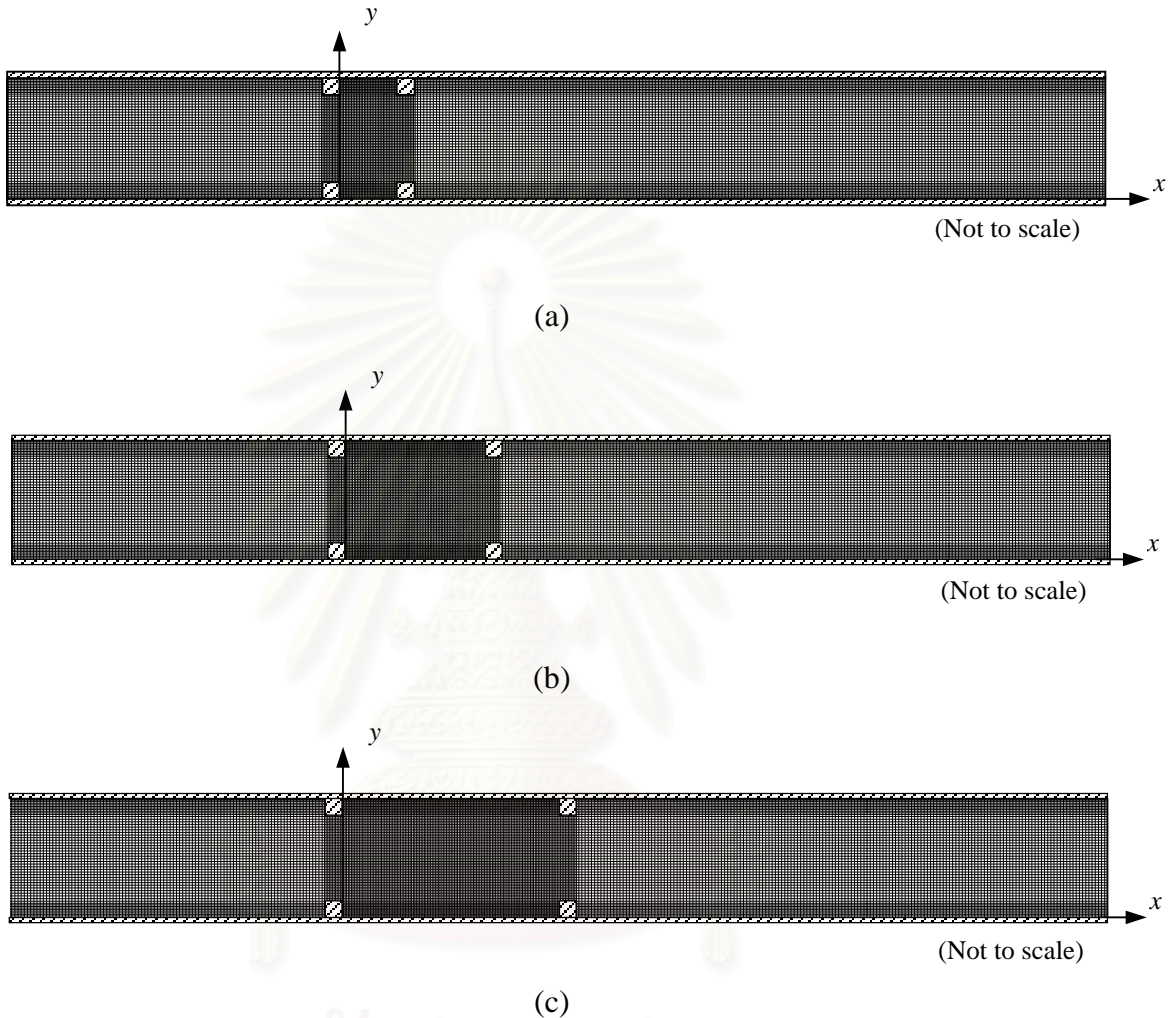
กรณีที่	w (m)	h (m)	Pi
1	0.004	0.004	$5h$
2	0.004	0.004	$10h$
3	0.004	0.004	$15h$

คุณสมบัติของของไหล

ความหนาแน่น (ρ) เท่ากับ 1.20 kg/m^3

ความหนืดสัมบูรณ์ (μ) เท่ากับ $1.87 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$

รูปที่ 5.17 แสดงรูปแบบของกริดที่ใช้ใน 3 กรณีศึกษาโดยใช้กริดแบบมีความละเอียดสูงในบริเวณระหว่างสิ่งกีดขวาง เนื่องจากมีการหมุนวนเกิดขึ้นในบริเวณนี้ (มีการเปลี่ยนแปลงของผลการคำนวณที่สูง) และใช้กริดที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ที่บริเวณทางเข้าและทางออก (การเปลี่ยนแปลงของผลการคำนวณมีไม่มาก)



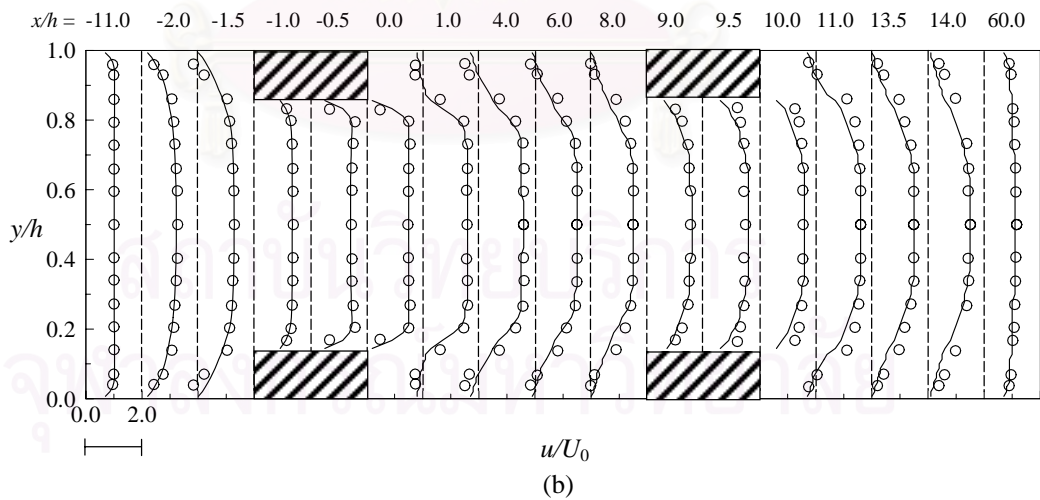
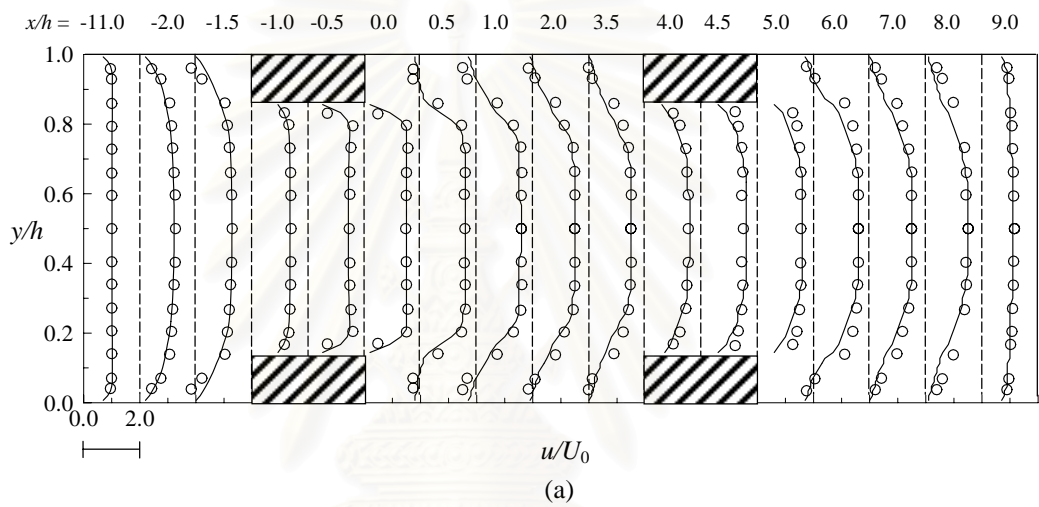
รูปที่ 5.17 รูปแบบของกริดที่ใช้ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 2 คู่

(a) $PR = 5$, (b) $PR = 10$ และ (c) $PR = 15$

ผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Liou and Kao [16] เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

รูปที่ 5.18 แสดงความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับผลการทดลองสำหรับ $Re_D = 42000$ ที่ x/h ต่าง ๆ กันของทั้งสามกรณี จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และ $k-\omega$ ค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยที่ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้แบบจำลองทั้งสองมีความใกล้เคียงกัน

ในส่วนของการพิจารณาบริเวณการหมุนวนที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 5.19 และ 5.20 ซึ่งแสดงเวกเตอร์ความเร็วและ Streamline ของการไหล จะเห็นได้ว่า การไหลเป็นแบบสมมาตรและเกิดบริเวณการหมุนวนที่ผนังด้านบนและล่างหลายตำแหน่งด้วยกัน ได้แก่ บริเวณด้านหน้าของสิ่งกีดขวางแรก, บริเวณช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวางและบริเวณด้านหลังของสิ่งกีดขวางที่สอง โดยในกรณีที่ 1 (รูปที่ 5.20 (a)) การไหลระหว่างสิ่งกีดขวางทั้งสองเกิดการหมุนวนเสมือนเป็นการไหลหมุนวนในช่องแคบ (Cavity flow) ส่วนกรณีที่ 2 และ 3 (รูปที่ 5.20 (b) และ (c)) บริเวณหลังสิ่งกีดขวางแรกและสิ่งกีดขวางที่สองเกิดบริเวณการหมุนวนที่มีลักษณะคล้ายกัน แต่มีความยาวของบริเวณดังกล่าวที่แตกต่างกันไป

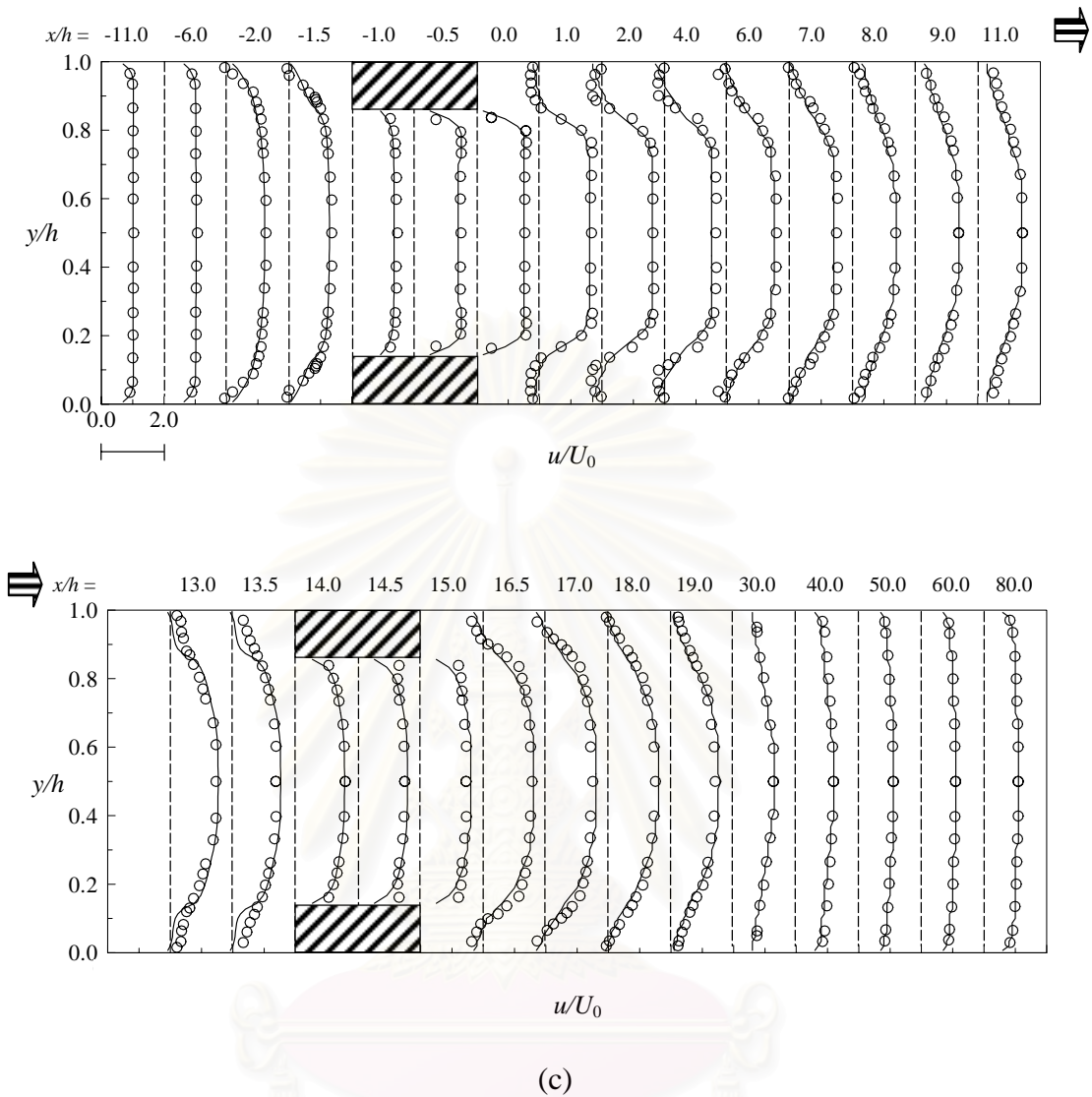


รูปที่ 5.18 ความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากการจำลองการไหลเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

สำหรับ $Re_D = 42000$ ที่ x/h ต่างๆ กัน

(a) PR = 5, (b) PR = 10 และ (c) PR = 15

(○ ผลการทดลอง, — $k-\omega$)

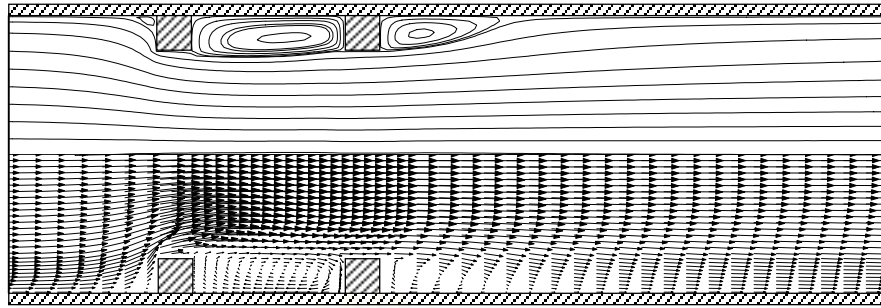


รูปที่ 5.18(ต่อ) ความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากการจำลองการไหลเปรียบเทียบกับ

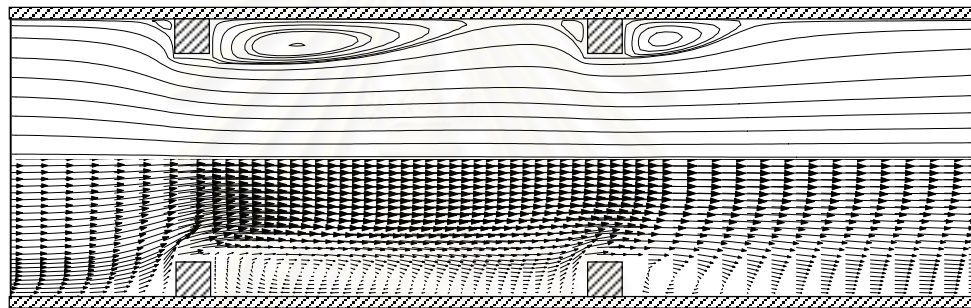
ผลการทดลองสำหรับ $Re_D = 42000$ ที่ x/h ต่างๆ กัน

(a) PR = 5, (b) PR = 10 และ (c) PR = 15

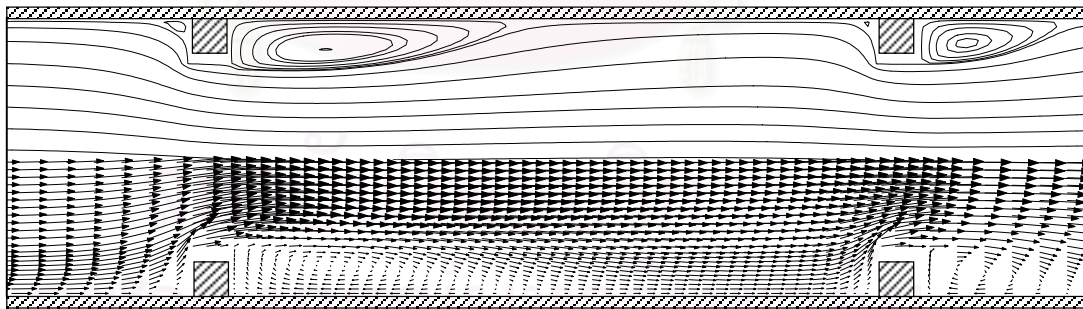
(○ ผลการทดลอง, — $k-\omega$)



(a)



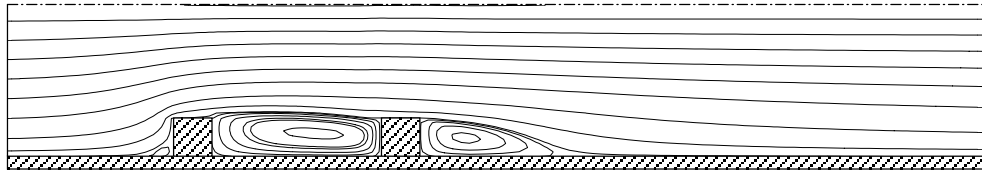
(b)



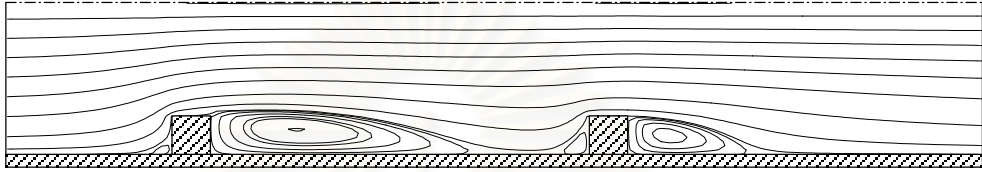
(c)

รูปที่ 5.19 เวกเตอร์ความเร็วและ Streamline ของการไหลผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 2 คู่
ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล

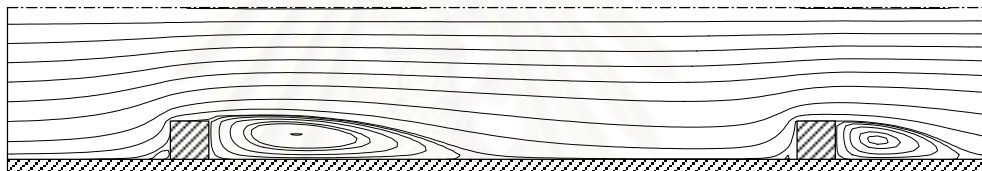
(a) $PR = 5$, (b) $PR = 10$ และ (c) $PR = 15$



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบบริเวณการหมุนวนที่เกิดขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวาง ทั้งสองสำหรับการไหลผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 2 คู่
(a) $PR = 5$, (b) $PR = 10$ และ (c) $PR = 15$

สรุปผล

จากผลการคำนวณผลกระทบของอัตราส่วน Pitch ต่อความสูงของสิ่งกีดขวาง (Pi/h) ที่มีต่อรูปแบบการไหลในส่วนนี้ พบว่าเมื่อ PR มีค่าน้อย ($PR = 5$) จะเกิดการหมุนวนเสมือนการไหลหมุนวนในช่องแคบ แสดงถึงผลของสิ่งกีดขวางด้านหลังที่มีต่อสิ่งกีดขวางด้านหน้า แต่ถ้า PR มีค่ามาก บริเวณการหมุนวนหลังสิ่งกีดขวางแรกจะมีลักษณะเสมือนบริเวณการหมุนวนหลังการไหลผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว ซึ่งแสดงว่าสิ่งกีดขวางที่วางด้านหลังไม่ส่งผลกระทบต่อด้านหน้า เราจึงสามารถสรุปได้ว่า การวิเคราะห์การไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่วางเรียงต่อกันนั้น เราอาจแยกพิจารณาออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ คือ เมื่อ PR มีค่ามาก จะสามารถพิจารณาเสมือนเป็นการไหลผ่านสิ่งกีดขวางเดี่ยว แต่เมื่อ PR มีค่าน้อย เราจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบของสิ่งกีดขวางด้านหลังที่มีต่อสิ่งกีดขวางด้านหน้าด้วย

บทที่ 6

การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการไหลและ การถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์

ในบทนี้ เราจะทำการศึกษารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อรูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเส้นทางการระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซ โดยที่พารามิเตอร์หลักที่ทำการศึกษาในงานวิทยานิพนธ์นี้ คือ การจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์ที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 3 แบบ ได้แก่ การจัดวางบนผนังด้านล่าง, การจัดวางบนผนังด้านบนและล่างแบบ In-lined และการจัดวางบนผนังด้านบนและล่างแบบ Staggered ของช่องทางไหล ตลอดจนผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ซึ่งประกอบด้วย Re , h/w และ Pi/h (หรือจำนวนของเทอร์บิวเลเตอร์ในช่องทางไหลที่จำกัดความยาว)

การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้กับปัญหาแบบนี้ สามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ

- 1) ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านล่างของช่องทางไหล
- 2) ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined
- 3) ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered

จากนั้นจึงนำผลที่ได้จากทั้งสามปัญหามาทำการเปรียบเทียบลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเส้นทางการระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ต่อไป

6.1 ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านล่างของช่องทางไหล

การจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหลเป็นรูปแบบการจัดวางแรกที่จะเลือกนำมาศึกษา ซึ่งรูปแบบการจัดวางแบบนี้มีความซับซ้อนไม่มากนัก โดยลักษณะของปัญหาจะจำลองมาจากผลการทดลองของ Acharya et al. [17] โดยพวกเขากำหนดให้สิ่งกีดขวางขนาด

6.35 mm × 6.35 mm ($h \times w$) จำนวน 8 แท่ง วางบนผนังด้านล่างของช่องทางไหล ซึ่งมีความสูง (H) เท่ากับ 61 mm โดยสิ่งกีดขวางอันแรกวางห่างจากทางเข้าและสิ่งกีดขวางสุดท้ายห่างจากทางออกเป็นระยะ $15h$ และ $30h$ ตามลำดับ สิ่งกีดขวางที่อยู่ติดกันถูกจัดวางให้วางห่างกันเป็นระยะ $19h$ และกำหนดให้ผนังช่องทางไหลด้านบน ผนังช่องทางไหลด้านล่างระหว่างทางเข้ากับสิ่งกีดขวางแท่งแรกและผนังที่ผิวของสิ่งกีดขวางเป็นฉนวน โดยที่ผนังด้านล่างส่วนที่เหลือถูกกำหนดให้มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (q'') เท่ากับ 280 W/m^2 เข้ามาที่ผนัง (รูปที่ 6.1)

สำหรับความเร็ว Free stream ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 3.6 m/s ที่ $Re_H = 14000$ (Re_H คำนวณจากความเร็ว Free stream และความสูงของช่องทางไหล) โดยความเร็วที่ทางเข้านั้นสามารถกำหนดได้จากข้อมูลผลการทดลอง [17] ซึ่งจัดอยู่ในรูปสมการดังนี้

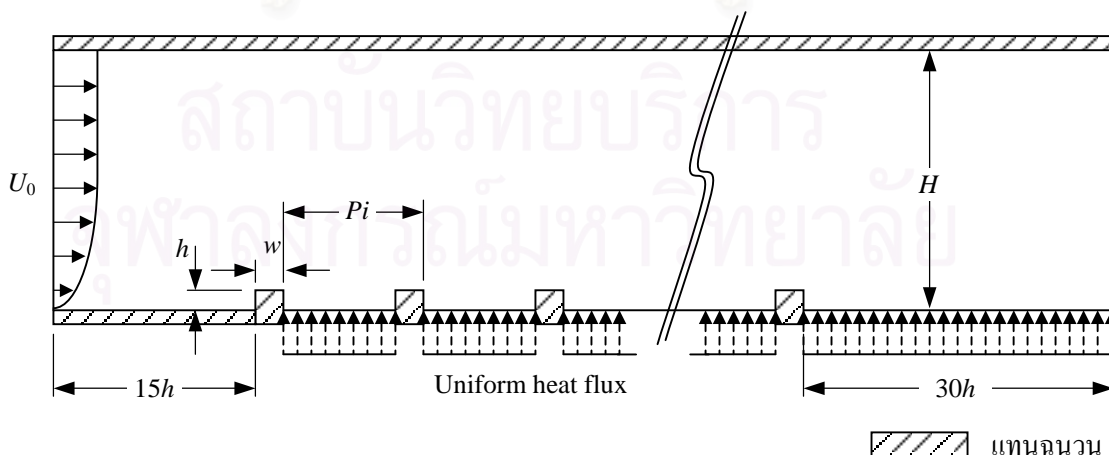
$$\frac{u}{U_0} = \left(\frac{y}{\delta_u} \right)^{5.6} \quad ; \quad \frac{y}{\delta_u} < 1 \quad \text{และ} \quad \frac{y}{\delta_u} > \left(\frac{H}{\delta_u} - 1 \right)$$

และ

$$\frac{u}{U_0} = 1 \quad ; \quad 1 \leq \frac{y}{\delta_u} \leq \left(\frac{H}{\delta_u} - 1 \right)$$

เมื่อ δ_u คือ Boundary layer thickness ซึ่งมีค่าเท่ากับ $3.3h$ และกำหนดให้คุณสมบัติของของไหล มีค่าดังนี้

อุณหภูมิทางเข้า (T_{inlet})	เท่ากับ	289 K
ความหนาแน่น (ρ)	เท่ากับ	1.20 kg/m^3
ความหนืดสัมบูรณ์ (μ)	เท่ากับ	$1.85 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$



รูปที่ 6.1 ลักษณะของปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 8 แท่ง ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านล่างของช่องทางไหล

ผลการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ผลลัพธ์ที่นำมาแสดงในส่วนนี้ได้จากบริเวณการไหลที่อยู่ระหว่างสิ่งกีดขวางแห่งที่ 7 และ 8 ซึ่งถือว่าเป็นบริเวณที่สนามการไหลเข้าสู่การไหลแบบ Periodic fully developed และในส่วนของการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนจัดได้ว่าเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (เนื่องจากในการทดลองนี้ พบว่าค่า Gr/Re^2 มีค่าน้อยกว่า 0.002 ดังนั้นเราจึงสามารถตัดผลกระทบจากแรงลอยตัวได้) ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง [17]

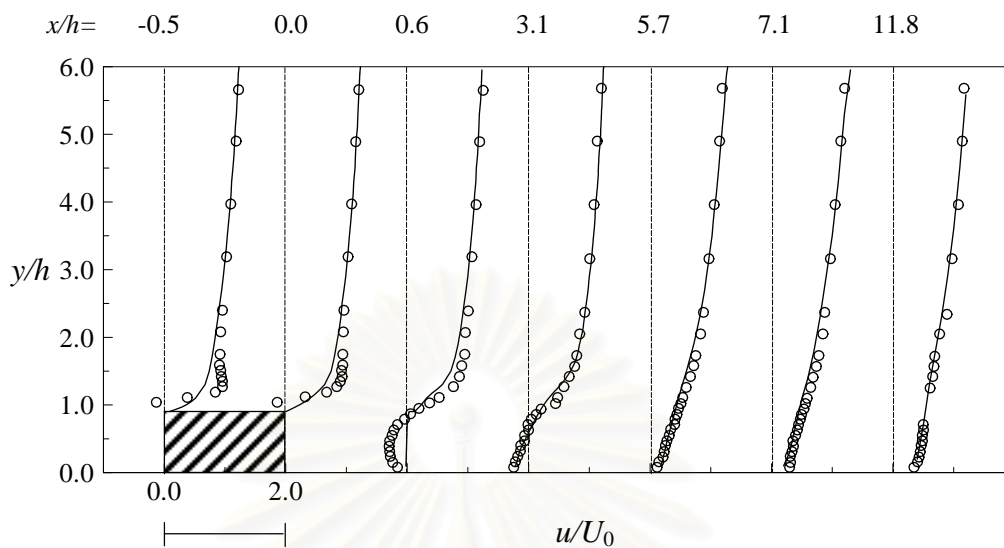
รูปที่ 6.2 และ 6.3 แสดงความเร็ว u/U_0 และ v/U_0 ที่ได้จากการคำนวณของการไหลผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 8 แห่ง เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ตำแหน่ง x/h ต่างๆ กัน ตามลำดับจะสังเกตเห็นว่า ผลการคำนวณด้วยแบบจำลอง $k-\omega$ มีความสอดคล้องกันดีพอสมควรกับผลการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในบริเวณที่เกิดการหมุนวนสำหรับความเร็วหลักในแนวแกน x (u/U_0)

ในส่วนของการถ่ายเทความร้อนนั้น เราจะแสดงในเทอมของค่าตัวเลขนัมเบอร์ (Nu_D) ซึ่งนิยามโดย

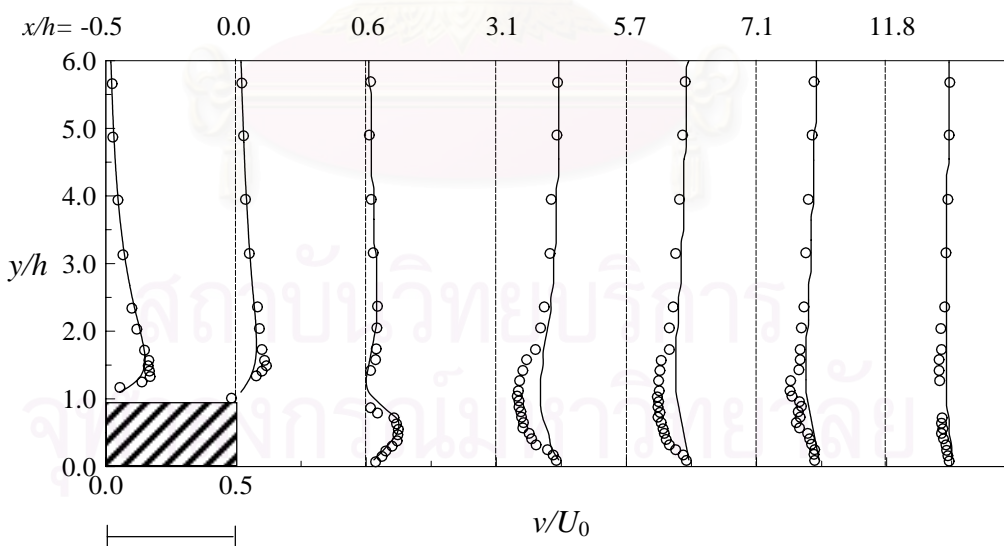
$$Nu_D = q''D/[K(T_w(x)-T_b(x))] \quad (6.1)$$

เมื่อ q''	คือ	ฟลักซ์ความร้อนคงที่ ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 280 W/m ²
D	คือ	Hydraulic diameter
K	คือ	ค่าการนำความร้อนของอากาศ
$T_w(x)$	คือ	อุณหภูมิของผนังที่ตำแหน่ง x ใดๆ
$T_b(x)$	คือ	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ตำแหน่ง x ใดๆ

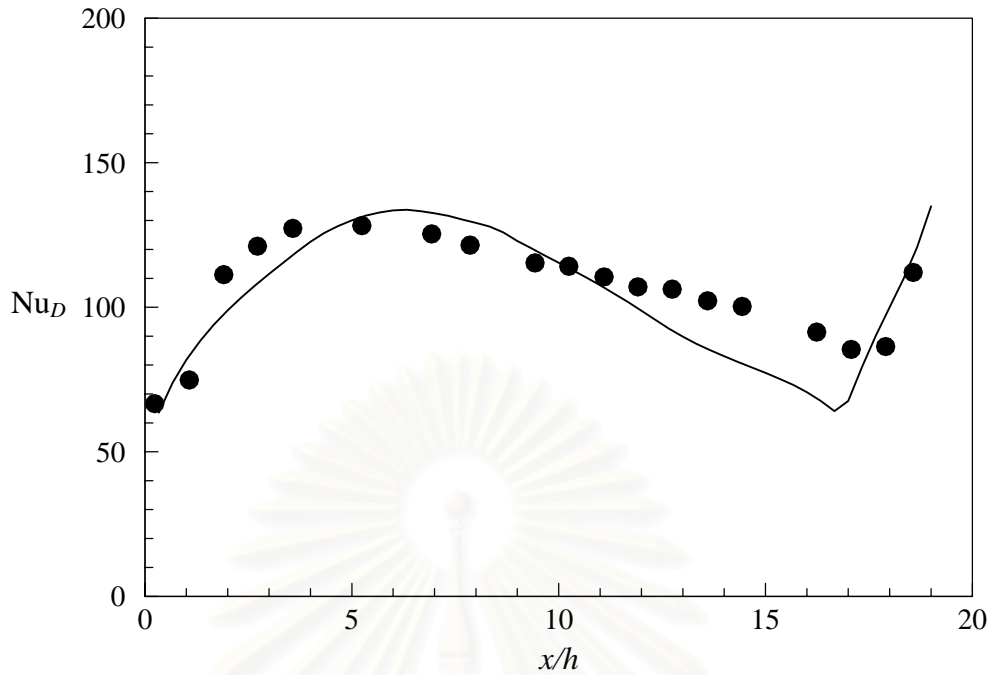
จากรูปที่ 6.4 จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณค่า Nu_D ในช่วง x/h ตั้งแต่ 1 ถึง 10 มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง สำหรับตำแหน่ง x/h มากกว่า 10 ผลการคำนวณที่ได้มีค่าต่ำกว่าผลการทดลองอยู่บ้าง อย่างไรก็ตาม เมื่อสังเกตตลอดทั้งช่วง x/h จะพบว่าผลการคำนวณมีแนวโน้มการกระจายค่า Nu_D ที่ค่อนข้างคล้ายกันกับผลการทดลอง หลังจากนั้นทำการพิจารณารูปที่ 6.5 ซึ่งแสดงการกระจายค่าอุณหภูมิไร้หน่วย $(T-T_{inlet}).K.D.10^5/q''$ ที่ตำแหน่ง $x/h = 0.1, 0.63$ และ 4.7 จะพบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าผลการทดลองเล็กน้อยในช่วงซึ่งเกิดการหมุนวนขึ้น ในขณะที่ตำแหน่ง $x/h = 17.4$ ผลการคำนวณที่ได้มีค่าสูงกว่าผลการทดลองเล็กน้อย เนื่องมาจากค่าความยาวบริเวณการหมุนวนที่ได้จากการคำนวณมีขนาดที่ยาวกว่า



รูปที่ 6.2 ความเร็ว u/U_0 ที่ได้จากการคำนวณปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 8 แห่ง เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ x/h ต่างๆ (\circ ผลการทดลอง, — $k-\omega$)

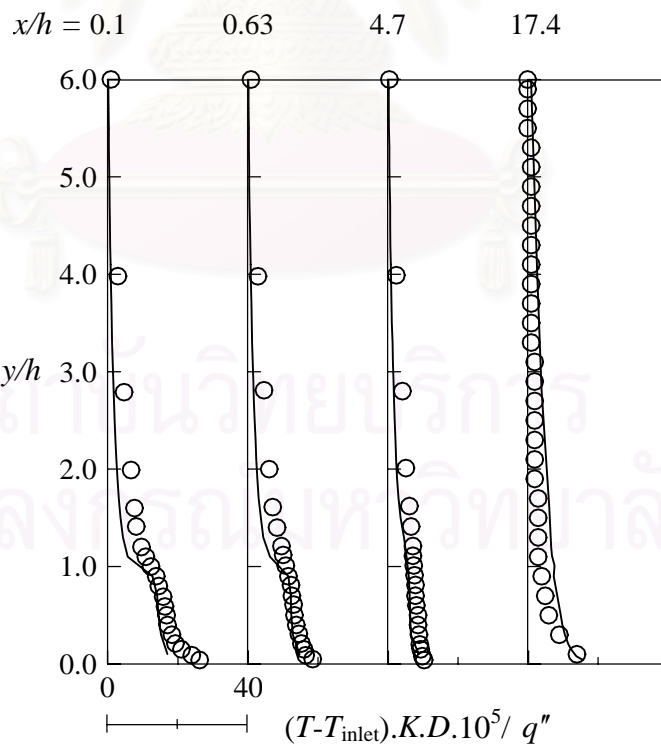


รูปที่ 6.3 ความเร็ว v/U_0 ที่ได้จากการคำนวณปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 8 แห่ง เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ x/h ต่างๆ (\circ ผลการทดลอง, — $k-\omega$)



รูปที่ 6.4 ค่า Nu_D หลังการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง x/h ต่างๆ กัน

(● ผลการทดลอง, — $k-\omega$)



รูปที่ 6.5 อุณหภูมิเฉลี่ยหลังการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง x/h ต่างๆ กัน

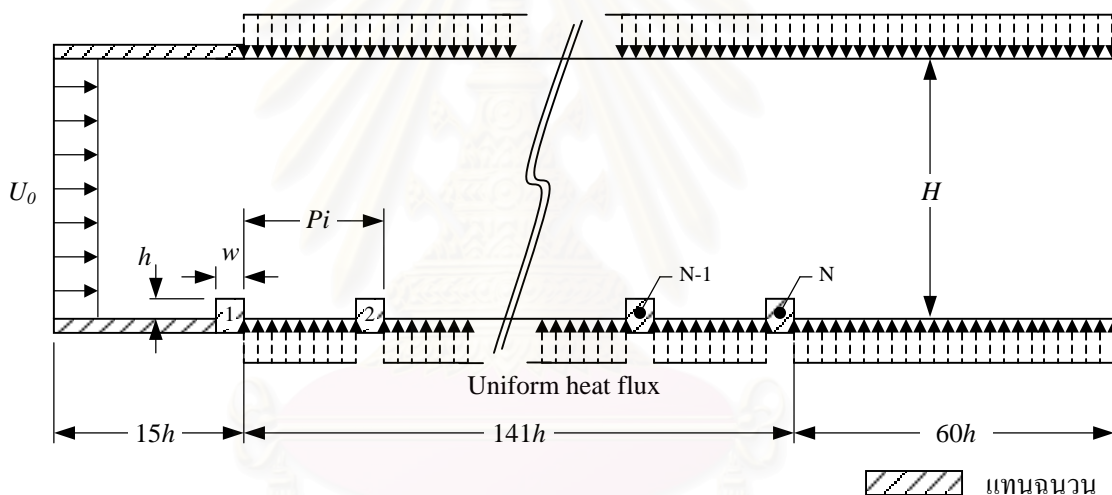
(○ ผลการทดลอง, — $k-\omega$)

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

การศึกษาผลกระทบที่มีต่อรูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์สำหรับรูปแบบการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล ประกอบไปด้วยการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่อไปนี้

- 1) เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re_H) ในช่วง 7000 ถึง 21000
- 2) ความสูงต่อความกว้างของสิ่งกีดขวาง (h/w) ตั้งแต่ 1 ถึง 5
- 3) ระยะ Pitch ต่อความสูงของสิ่งกีดขวาง (Rib spacing, Pi/h) ตั้งแต่ 7 ถึง 69 (จำนวนสิ่งกีดขวางเท่ากับ 18 ถึง 3 แถง)

รูปที่ 6.6 แสดงการกำหนดขนาดและตำแหน่งการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังของช่องทางไหล โดยกำหนดให้มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (q'') เท่ากับ 280 W/m^2 เข้ามาที่ผนัง ด้านบนและด้านล่างบริเวณระหว่างสิ่งกีดขวางและบริเวณทางออก ส่วนผนังด้านที่เหลือทั้งหมดถูกกำหนดให้เป็นฉนวน



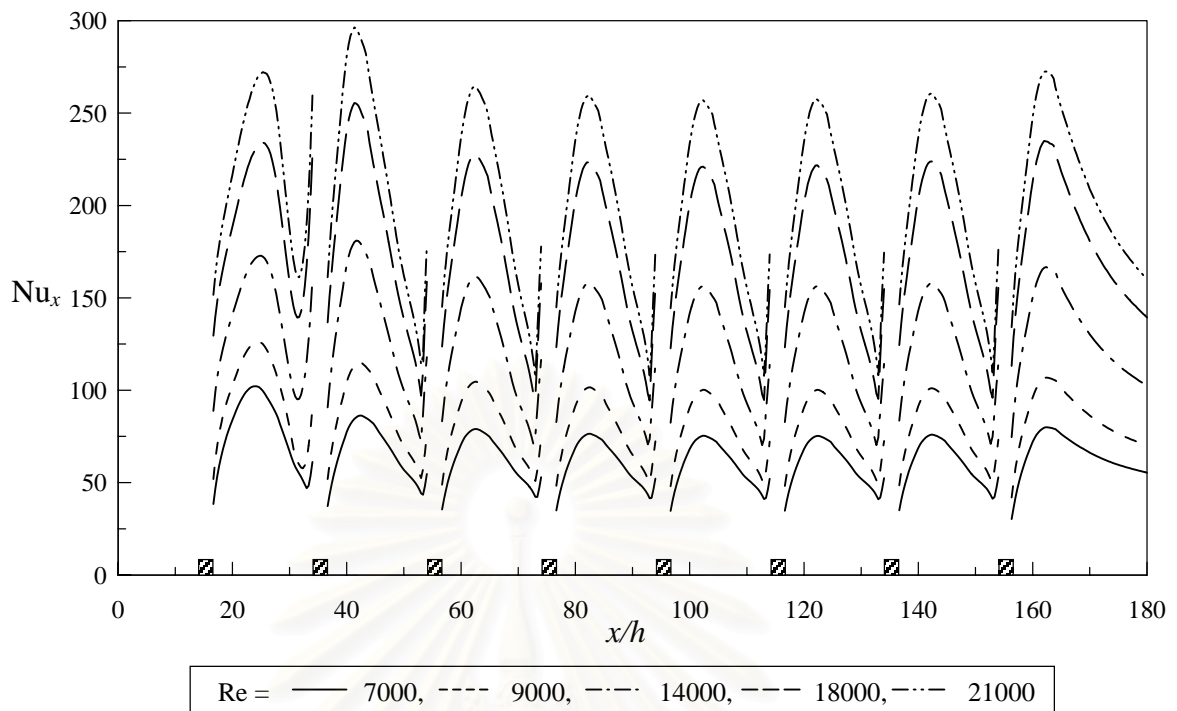
รูปที่ 6.6 ขนาดและตำแหน่งการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล

สำหรับการคำนวณในทุกๆกรณี จะกำหนดให้ความกว้างของสิ่งกีดขวาง (w) และความสูงของช่องทางไหล (H) มีขนาดเท่ากับ 6.35 mm และ 61 mm ตามลำดับ

1) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

ผลการคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์แบบติดตั้งบนผนังด้านล่างของช่องทางไหลเพียงด้านเดียว จะทำโดยเปลี่ยนแปลงค่า Re_H ในช่วงตั้งแต่ 7000 ถึง 21000 โดยมีเงื่อนไขอื่นๆ ในการจำลองการไหล ดังนี้

จำนวนเทอร์บิวเลเตอร์	h (mm)	Pi
8	6.35	$19h$



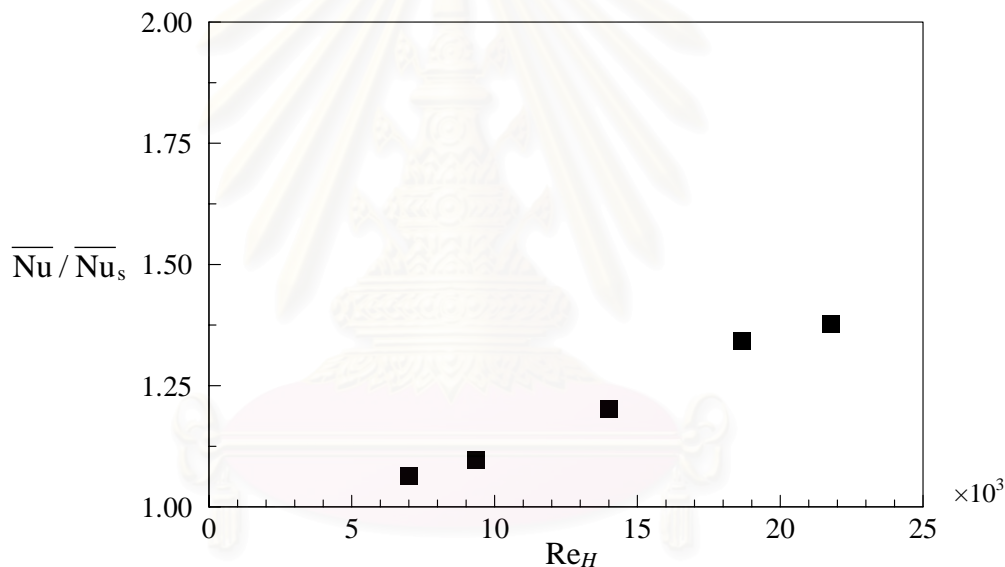
รูปที่ 6.7 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆกัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Re_H ตั้งแต่ 7000 ถึง 21000 สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล

จากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งแสดงการกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆกัน ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Re_H ตั้งแต่ 7000 ถึง 21000 สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล (รูปที่ 6.7) สามารถสังเกตได้ว่าค่า Nu_x ที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณช่องว่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ กันมีลักษณะที่คล้ายกัน (โดยจะสังเกตได้ชัดเจนตั้งแต่บริเวณหลังสิ่งกีดขวางแห่งที่ 3 เป็นต้นไป) โดยที่ค่า Nu_x มีค่าเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในบริเวณใกล้กับสิ่งกีดขวางแรกและจะมีค่าลดลงในบริเวณซึ่งของไหลไหลมาชนกับสิ่งกีดขวางที่อยู่ติดกันถัดไป ซึ่งผลที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Han [18] และเมื่อ Re_H มีค่าสูงจะส่งผลทำให้ค่า Nu_x ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงตามไปด้วยในทุกๆ ตำแหน่ง และยังสามารถเห็นว่า Nu_x มีค่าสูงสุดใกล้กับสิ่งกีดขวางด้านหน้า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าสูง จะทำให้ Reattachment point มีค่าสั้นกว่าเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าต่ำ ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น

หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของผนังที่มีการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์เพิ่มเข้าไป โดยตัวแปรที่จะใช้ในการอธิบาย คือ อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ โดยที่ \overline{Nu} คือค่าเฉลี่ยของผนังที่มีการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์และ \overline{Nu}_s คือค่าเฉลี่ยของผนังที่ไม่มีเทอร์บิวเลเตอร์

เฉลี่ยของผนังเรียบ (ค่านี้สเซลันัมเบอร์หาได้จากสมการ(4.2)) ซึ่งอัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ หมายถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังช่องทางไหลที่มีการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์เพิ่มเข้าไปต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของช่องทางไหลผนังเรียบ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ ที่ Re_H ต่างๆ กัน (รูปที่ 6.8) จะสังเกตได้ว่าเมื่อเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งแสดงว่าการถ่ายเทความร้อนที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์สูงๆ ดีกว่าที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่ำ อย่างไรก็ตาม ในแง่ของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ประสิทธิภาพจะมีค่าลดลงเมื่อเรย์โนลด์์นัมเบอร์เพิ่มมากขึ้นโดยสังเกตได้จากอัตราการเพิ่มค่า $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ ที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์สูงๆ จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ที่เป็นเช่นนี้อาจอธิบายได้ว่าที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์สูงๆ ของไหลมีความเร็วสูงส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่ดี แต่เมื่อของไหลมีความเร็วสูงมาก ของไหลในบริเวณการหมุนวนอาจจะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ทันกับของไหลด้านบนที่ไหลผ่านด้วยความเร็วสูง



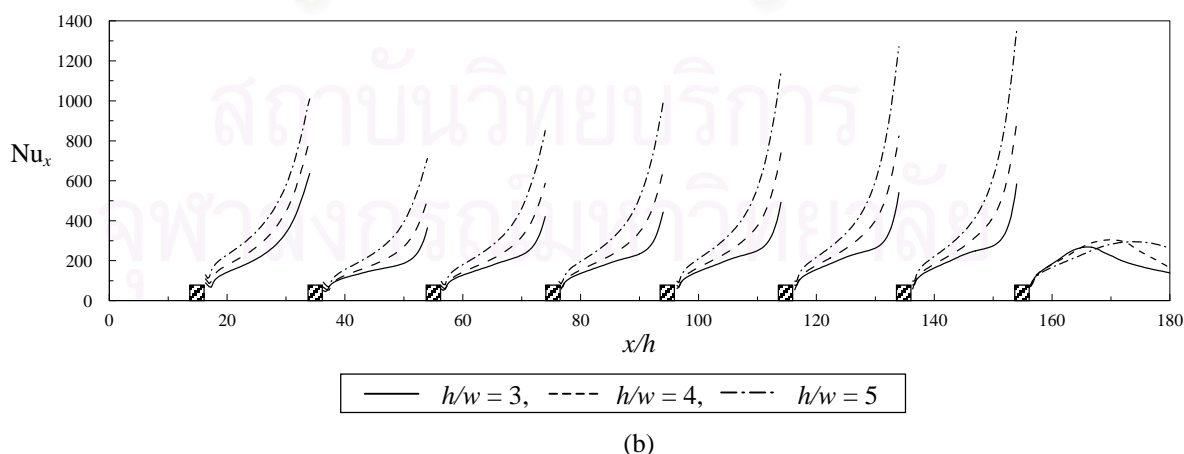
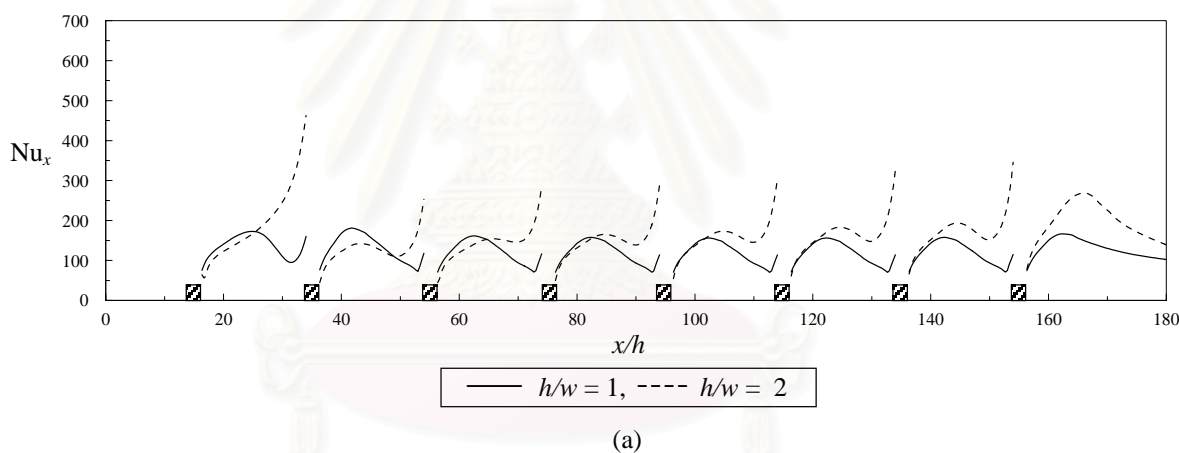
รูปที่ 6.8 อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ ที่ Re_H ต่างๆ กัน สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล

2) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงต่อความกว้างของสิ่งกีดขวาง (h/w)

ในการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของสิ่งกีดขวางนั้น ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของสิ่งกีดขวางซึ่งแสดงอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ h/w ในช่วงตั้งแต่ 1 ถึง 5 โดยกำหนดเงื่อนไขอื่นๆ ดังนี้

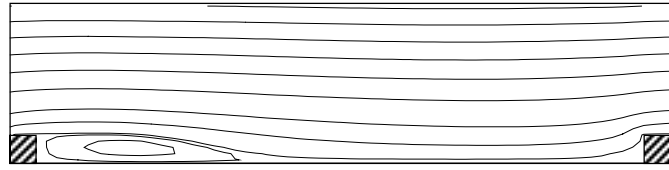
จำนวนเทอร์บิวเลเตอร์	Pi	Re_H
8	$19h$	14000

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า h/w ตั้งแต่ 1 ถึง 5 สำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหลทำให้เกิดการกระจายค่า Nu_x ที่แตกต่างกันดังรูปที่ 6.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อ $h/w = 1$ และ 2 (รูปที่ 6.9 (a)) ในบริเวณช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวางแต่ละแท่ง (สังเกตได้ชัดเจนหลังสิ่งกีดขวางแท่งที่ 2 เป็นต้นไป) จะเกิดการกระจายค่า Nu_x แบบซ้ำๆ กัน คือ ค่า Nu_x จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดแล้วลดลงจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเป็นช่วงสั้นๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการสังเกตบริเวณการหมุนวนที่เกิดขึ้นในระหว่างสิ่งกีดขวางดังรูปที่ 6.10 (a) และ 6.10 (b) ซึ่งเกิดบริเวณการหมุนวนแยกออกเป็น 2 บริเวณ โดยมีบริเวณแรกอยู่ที่ด้านหลังของสิ่งกีดขวางแรกและบริเวณที่สองอยู่ที่ด้านหน้าของสิ่งกีดขวางถัดไป แต่เมื่อค่า h/w มากกว่า 2 ขึ้นไป (รูปที่ 6.9 (b)) จะเกิดรูปแบบการกระจายค่า Nu_x ที่ต่างไปจากเดิม คือค่า Nu_x จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นหลังการไหลผ่านสิ่งกีดขวางแรกจนกระทั่งมีค่าสูงสุดเมื่อไหลไปชนกับสิ่งกีดขวางถัดไป ที่เป็นเช่นนี้อาจอธิบายได้ด้วยรูปที่ 6.10(c)-(e) ซึ่งจะเห็นได้ว่า บริเวณการหมุนวนที่เกิดขึ้นในแต่ละช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวาง จากเดิมเมื่อ h/w มีค่าน้อยจะเกิดแยกเป็น 2 บริเวณ แต่เมื่อค่า h/w มากขึ้น บริเวณการหมุนวนทั้งสองจะเริ่มเชื่อมรวมเป็นบริเวณเดียวกัน

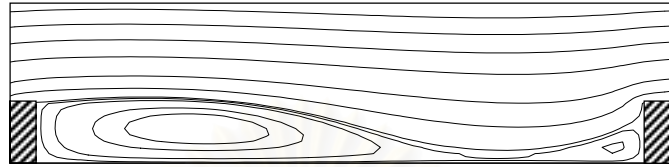


รูปที่ 6.9 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า h/w ตั้งแต่ 1 ถึง 5 สำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล

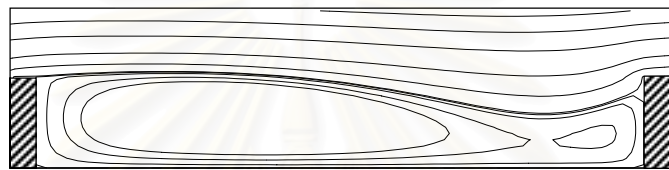
(a) $h/w = 1, 2$ (b) $h/w = 3, 4$ และ 5



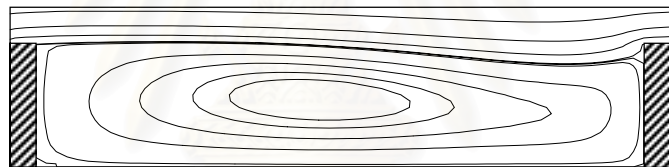
(a)



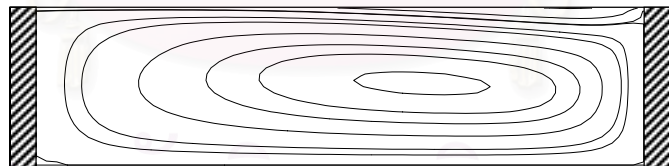
(b)



(c)



(d)



(e)

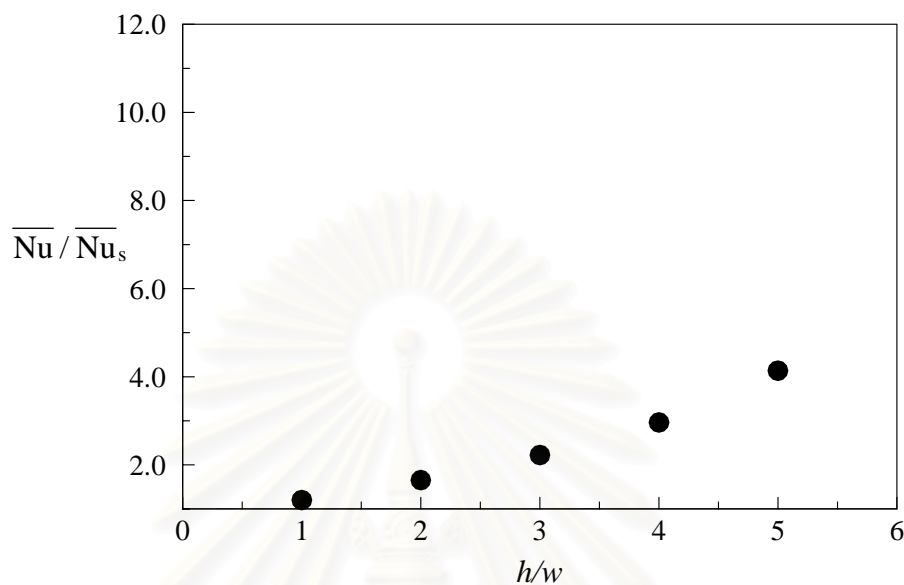
รูปที่ 6.10 การหมุนวนที่เกิดขึ้นบริเวณระหว่างสิ่งกีดขวางที่ h/w ต่างๆ กัน

สำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านล่าง

(a) $h/w = 1$, (b) $h/w = 2$, (c) $h/w = 3$, (d) $h/w = 4$, (e) $h/w = 5$

หลังจากนั้น ทำการพิจารณาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า h/w ของผนังที่มีเทอร์มิสเตอร์ติดตั้งแบบนี้ โดยใช้ค่าอัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ (รูปที่ 6.11) จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า h/w เพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นโดยสังเกตได้ว่าเมื่อ $h/w = 5$ ค่าอัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ มีค่าประมาณ 4 ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการถ่ายเท

ความร้อนของผนังช่องทางไหลที่ติดตั้งเทอร์มิสเตอร์ซึ่งสูงกว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของช่องทางไหลผนังเรียบถึง 4 เท่า

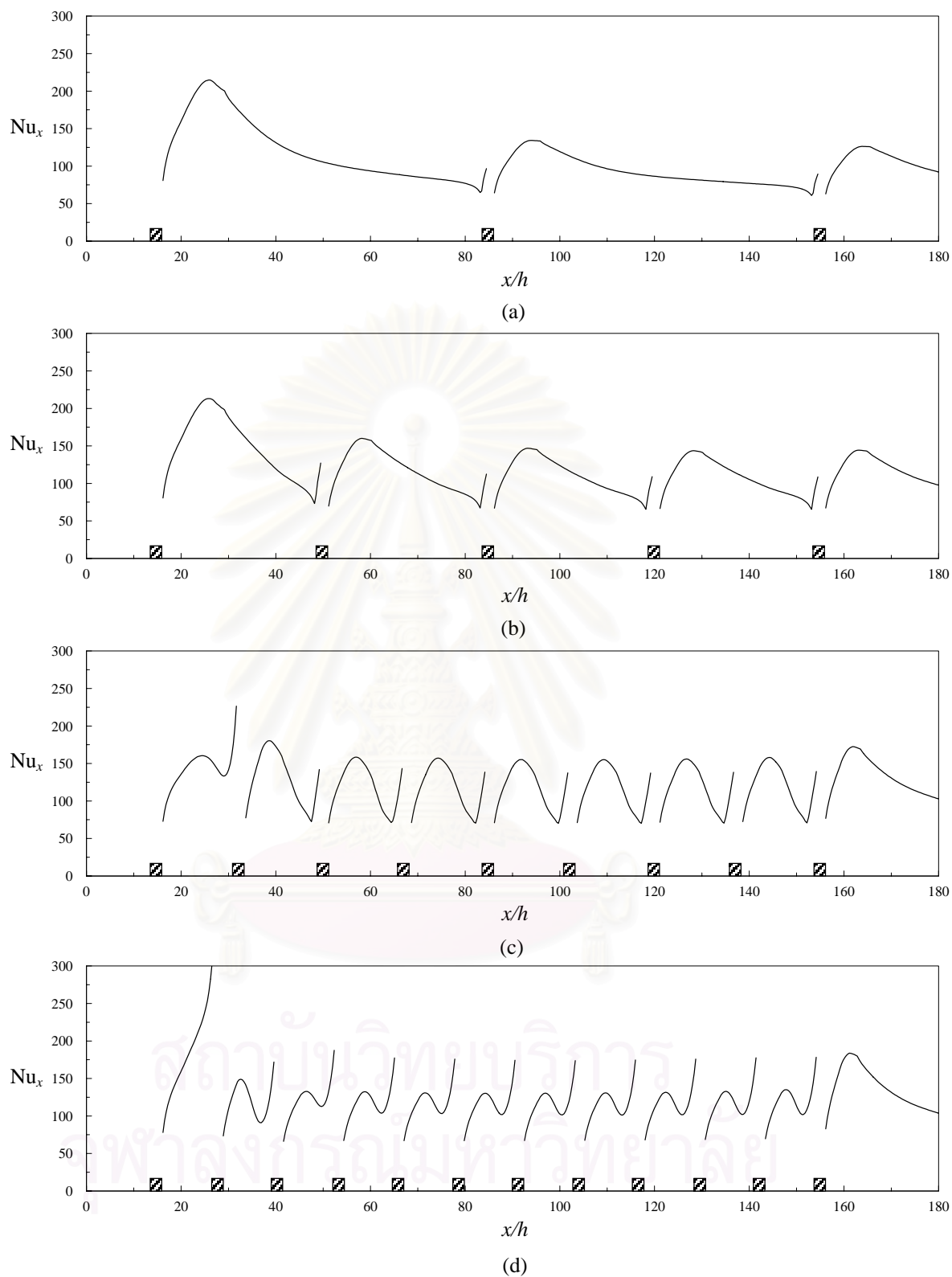


รูปที่ 6.11 อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ ที่ h/w ต่างๆ กัน สำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล

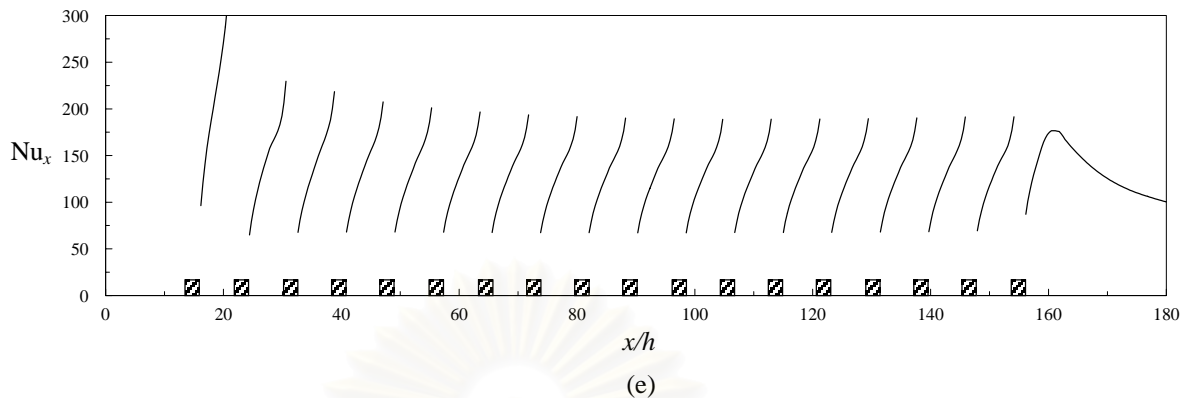
3) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing

พารามิเตอร์ตัวถัดมาที่จะทำการศึกษา คือ ค่า Rib spacing (ระยะ Pitch ต่อความสูงของสิ่งกีดขวาง, Pi/h) ซึ่งอาจจะแสดงอยู่ในรูปของจำนวนสิ่งกีดขวาง (Number of Ribs) โดยแปรผันค่า Rib spacing ในช่วงตั้งแต่ 7 ถึง 69 (จำนวนสิ่งกีดขวางเท่ากับ 18 ถึง 3 แห่ง) โดยกำหนดเงื่อนไขอื่นๆ ในการจำลองการไหล ดังนี้

Re_H	h (mm)	w (mm)
14000	6.35	6.35



รูปที่ 6.12 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing ตั้งแต่ 7 ถึง 69 (18 ถึง 3 แห่ง) สำหรับการจัดวางเทอร์โมอิเล็กโตรบัพบนผนังด้านล่างของช่องทางไหล (a) $Pi/h = 69$ (3 แห่ง), (b) $Pi/h = 34$ (5 แห่ง), (c) $Pi/h = 16.5$ (9 แห่ง), (d) $Pi/h = 11.73$ (12 แห่ง), (e) $Pi/h = 7$ (18 แห่ง)

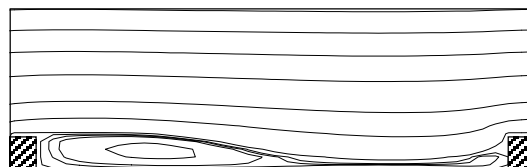


รูปที่ 6.12(ต่อ) การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing ตั้งแต่ 7 ถึง 69 (18 ถึง 3 แถง) สำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล (a) $Pi/h = 69$ (3 แถง), (b) $Pi/h = 34$ (5 แถง), (c) $Pi/h = 16.5$ (9 แถง), (d) $Pi/h = 11.73$ (12 แถง), (e) $Pi/h = 7$ (18 แถง)

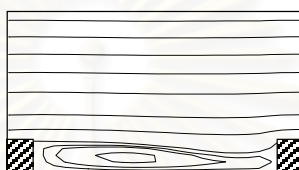
เมื่อพิจารณารูปที่ 6.12 ซึ่งแสดงการกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กันสำหรับการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing ตั้งแต่ 7 ถึง 69 (จำนวนสิ่งกีดขวางเท่ากับ 18 ถึง 3 แถง) พบว่า เมื่อ Rib spacing มีค่าตั้งแต่ 16.5 ถึง 69 (จำนวนสิ่งกีดขวางเท่ากับ 9 ถึง 3 แถง) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6.12 (a)-(c) รูปแบบการกระจายค่า Nu_x จะมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยค่านัสเซลน์มเบอร์จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดและลดลง จากนั้นเพิ่มขึ้นอีกครั้งเป็นช่วงสั้นๆ แต่เมื่อ Rib spacing มีค่าน้อยกว่า 16.5 (จำนวนสิ่งกีดขวางมากกว่า 9 แถงในรูปที่ 6.12 (d)-(e)) รูปแบบการกระจายค่า Nu_x จะเปลี่ยนเป็นอีกรูปแบบ คือ การกระจายค่า Nu_x ตั้งแต่หลังสิ่งกีดขวางด้านหน้าจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งไหลมาชนกับสิ่งกีดขวางด้านหลังที่อยู่ถัดไป ซึ่งอาจจะมีบางช่วงลดลงหรือค่อนข้างคงที่ เราสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้นโดยพิจารณารูปร่างการไหลที่เกิดขึ้นระหว่างสิ่งกีดขวางนั้นๆ ดังต่อไปนี้ นั่นคือเมื่อ Rib spacing มีค่ามากจะเกิดการหมุนวนขึ้น 2 บริเวณคือทางด้านหลังสิ่งกีดขวางแรกและด้านหน้าสิ่งกีดขวางถัดไป แต่เมื่อ Rib spacing มีค่าน้อยจะทำให้บริเวณการหมุนวนกลายเป็นการไหลแบบ Cavity ซึ่งส่งผลต่อการผสมของของไหลที่ดีขึ้น นำไปสู่การถ่ายเทความร้อนที่รวดเร็วขึ้นด้วย โดยรูปร่างการไหลแสดงดังรูปที่ 6.13

เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน โดยเลือกใช้ค่าอัตราส่วน $\overline{Nu}/\overline{Nu}_s$ เป็นตัวบ่งชี้ จากรูปที่ 6.14 จะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่า $\overline{Nu}/\overline{Nu}_s$ เพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อจำนวนสิ่งกีดขวางเพิ่มไปเรื่อยๆ จะสังเกต

เห็นได้ว่าค่า $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ จะค่อนข้างคงที่ นั่นหมายความว่าจำนวนสิ่งกีดขวางที่เพิ่มเข้าไปไม่ช่วยส่งเสริมให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น



(a)

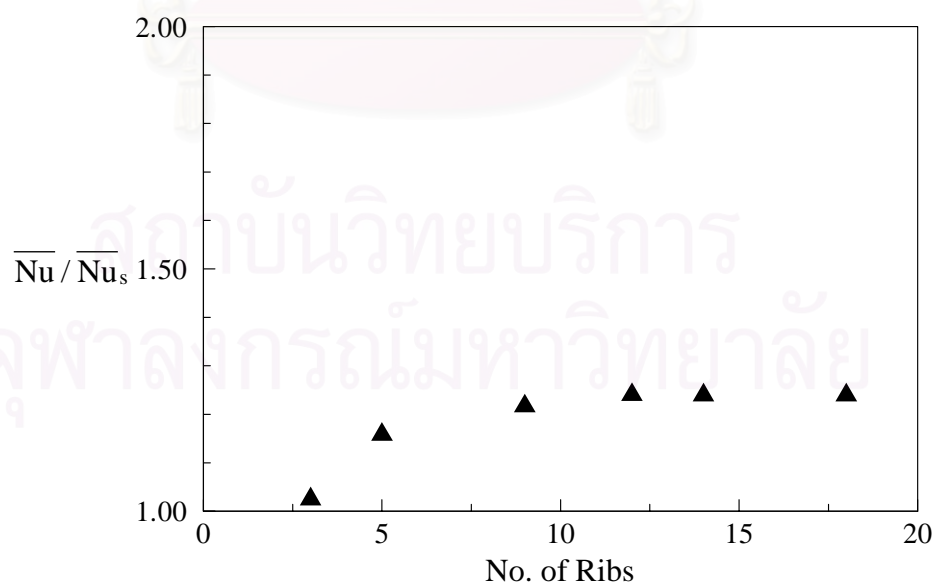


(b)

รูปที่ 6.13 การไหลหมุนวนที่เกิดบริเวณระหว่างสิ่งกีดขวาง

(a) เมื่อ Rib spacing มีค่ามาก

(b) เมื่อ Rib spacing มีค่าน้อย



รูปที่ 6.14 อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ ที่จำนวนสิ่งกีดขวางต่างๆ กัน สำหรับการจัดวางเทอร์ปีวเลเตอร์บนผนังด้านล่างของช่องทางไหล

สรุปผล

จากผลการคำนวณที่ได้สำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้ พบว่าเกิดการไหลแบบ Periodic fully developed (บริเวณหลังสิ่งกีดขวางแห่งที่ 3 เป็นต้นไป) ซึ่งส่งผลทำให้เกิดลักษณะการกระจายค่าไนส์เซิลนัมเบอร์ที่คล้ายกันในแต่ละบริเวณช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวาง โดยที่สามารถสรุปผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

1. เมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้การไหลมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น แต่ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์สูงๆ ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนจะต่ำกว่าที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ (สังเกตได้จากอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำจะมีค่าสูงกว่าที่เรย์โนลด์นัมเบอร์สูงดังแสดงในรูปที่ 6.8)
2. ความสูงของสิ่งกีดขวางที่เพิ่มขึ้น ($h/w = 1$ ถึง 5) จะช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้น
3. ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing (แสดงอยู่ในรูปของจำนวนสิ่งกีดขวาง) เมื่อจำนวนสิ่งกีดขวางเพิ่มจาก 3 จนถึง 9 แห่ง จะทำให้การถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่เมื่อสิ่งกีดขวางมีจำนวนมากกว่า 9 แห่งขึ้นไป การถ่ายเทความร้อนจะค่อนข้างคงที่ จากข้อสังเกตนี้เราอาจจะสรุปได้ว่าระยะห่างระหว่างสิ่งกีดขวางที่ไม่น้อยเกินไปจะช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนแต่ถ้าระยะนั้นมีค่าน้อยมากจะไม่ทำให้การถ่ายเทความร้อนมีการเปลี่ยนแปลง

6.2 ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined

หลังจากที่เราได้ศึกษารูปแบบการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลเพียงด้านเดียวในหัวข้อ 6.1 แล้ว เราคาดว่า การเพิ่มเทอร์บิวเลเตอร์จะช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนให้ดีขึ้นได้ ดังนั้นจึงเลือกรูปแบบการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined (ซึ่งเป็นการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนของช่องทางไหลเพิ่มเข้าไป) มาศึกษาต่อไป

Liou and Hwang [35] ได้ทำการทดลองสำหรับการไหลที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านช่องทางไหลที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างแบบ In-lined โดยใช้ Laser holographic interferometry ในการวัดค่า ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดลองนี้เป็นค่าที่มาจากบริเวณการไหลที่เป็นแบบ Periodic fully developed แล้ว

ในการทดลอง Liou and Hwang ได้กำหนดให้บริเวณทดลองถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งบริเวณทางเข้าและบริเวณที่มีเทอร์มิสเตอร์ติดตั้งซึ่งผนังทุกด้านเป็นฉนวนหมด และส่วนที่สองคือบริเวณที่มีเทอร์มิสเตอร์ติดตั้งและบริเวณทางออกที่มีการให้ฟลักซ์ความร้อนเข้ามาที่ผนังทั้งด้านบนและล่าง โดยรูปที่ 6.15 แสดงตำแหน่งการจัดวางเทอร์มิสเตอร์แบบ In-lined จำนวน 23 คู่ ตลอดขนาดของช่องทางไหลในการจำลองปัญหา นี้ ซึ่งในการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้กำหนดเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

Re_D	w/h	h/D	Pi/h
10200	1	0.081	10

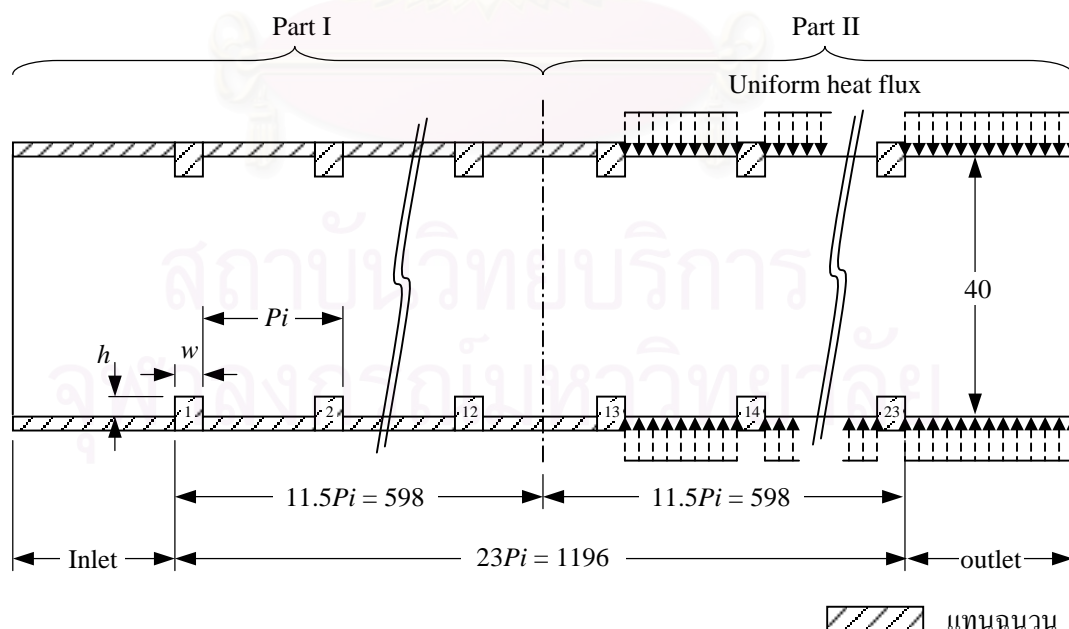
เมื่อกำหนดให้ $w = h = 5.2 \text{ mm}$

จาก $h/D = 0.081$ จะได้ $D = h/0.081 = 64.1975 \text{ mm}$

และ $Pi/h = 10$ จะได้ $Pi = 10 h = 52 \text{ mm}$

โดยมีคุณสมบัติของของไหลแสดงดังตารางข้างล่าง

ความหนาแน่น (ρ)	ความหนืดสัมบูรณ์ (μ)	อุณหภูมิทางเข้า (T_{inlet})
1.20 kg/m^3	$1.85 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$	298 K



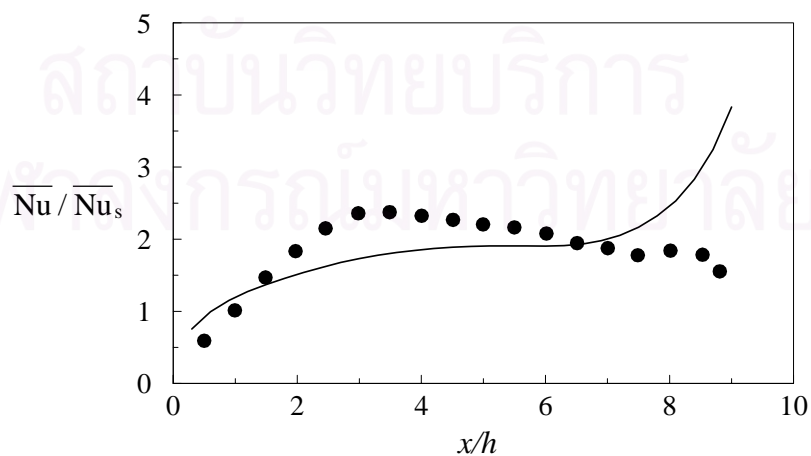
รูปที่ 6.15 ลักษณะของปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์มิสเตอร์ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างแบบ In-lined

ผลการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อน

ผลลัพธ์ที่ได้จากผลการคำนวณถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งบริเวณที่ใช้ในการเปรียบเทียบ คือ บริเวณที่อยู่ระหว่างสิ่งกีดขวางคู่ที่ 21 กับ 22 และ 22 กับ 23 (จากผลการศึกษาของ Han [18] พบว่า หลังจากบริเวณความยาว 5 เท่าของ Hydraulic diameter (D_h) การไหลจะเข้าสู่บริเวณ Periodic thermal fully developed) โดยที่ Liou and Hwang นำเสนอผลการทดลองของพวกเขาแต่เพียงส่วนของการถ่ายเทความร้อนเท่านั้น (ผลลัพธ์ในส่วนของการไหลไม่ได้แสดงไว้)

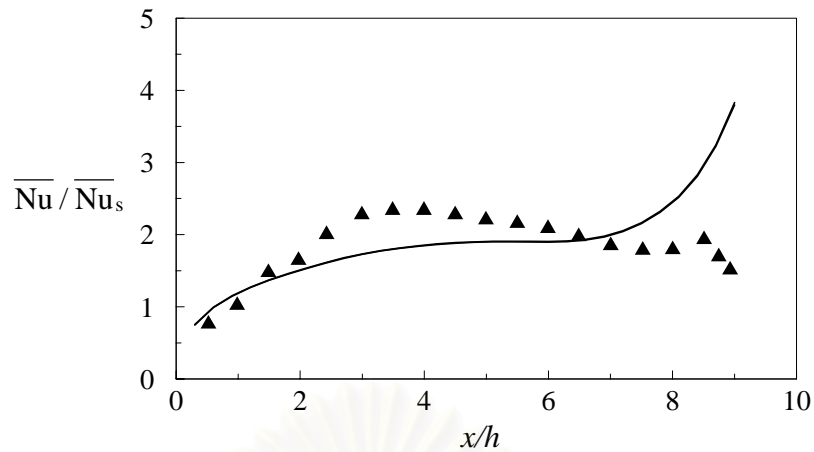
รูปที่ 6.16 และรูปที่ 6.17 แสดงอัตราส่วนค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสำหรับการไหลผ่านเทอร์มินัลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสำหรับการไหลผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ ($\overline{Nu}/\overline{Nu}_s$) บริเวณระหว่างสิ่งกีดขวางคู่ที่ 21 กับ 22 และคู่ที่ 22 กับ 23 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ ให้ผลการทำนายที่มีแนวโน้มเดียวกับผลการทดลองในช่วง x/h ตั้งแต่ 1 ถึง 7 และเกิดผลการทำนายสูงกว่าที่ควรจะเป็น (Over-prediction) ตั้งแต่ x/h มากกว่า 7 เป็นต้นไป ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากในการคำนวณเกิดบริเวณการหมุนวนรวมเป็นบริเวณเดียวกันในบริเวณช่องว่างระหว่างเทอร์มินัลเตอร์ ซึ่งแตกต่างกับผลการทดลองซึ่งเกิดบริเวณการหมุนวนแยกเป็น 2 บริเวณ

รูปที่ 6.18 แสดงค่าอัตราส่วน $\overline{Nu}/\overline{Nu}_s$ บริเวณระหว่างสิ่งกีดขวางคู่ที่ 21 กับ 22 และ 22 กับ 23 จะเห็นได้ว่า $\overline{Nu}/\overline{Nu}_s$ ในบริเวณทั้งสองมีค่าเกือบเท่ากันที่ทุกๆ ตำแหน่ง x/h แสดงว่าการไหลในบริเวณทั้งสองเข้าสู่บริเวณ Periodic thermal fully developed แล้ว



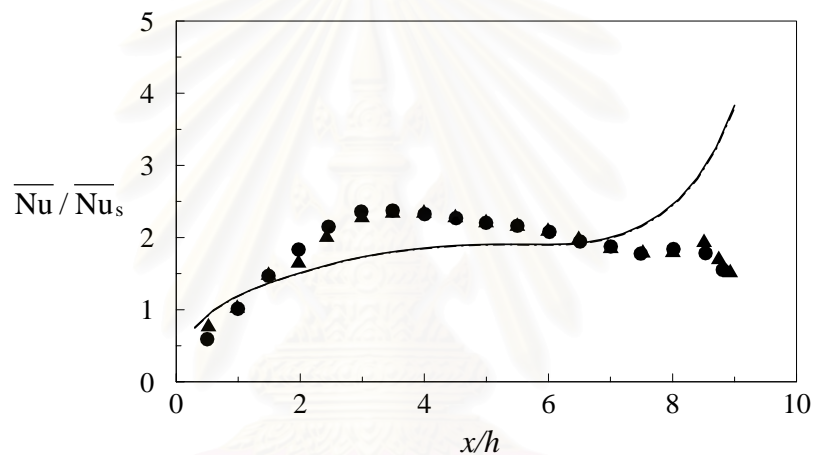
รูปที่ 6.16 อัตราส่วน $\overline{Nu}/\overline{Nu}_s$ บริเวณระหว่างสิ่งกีดขวางคู่ที่ 21 กับ 22

(● ผลการทดลอง, — $k-\omega$)



รูปที่ 6.17 อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ บริเวณระหว่างสิ่งกีดขวางคู่ที่ 22 กับ 23

(▲ ผลการทดลอง, — $k-\omega$)



รูปที่ 6.18 อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ บริเวณระหว่างสิ่งกีดขวางคู่ที่ 21 กับ 22

และ 22 กับ 23

(— Exp , ● Num ที่บริเวณระหว่างคู่ที่ 21 กับ 22 และ
 ---- Exp , ▲ Num ที่บริเวณระหว่างคู่ที่ 22 กับ 23)

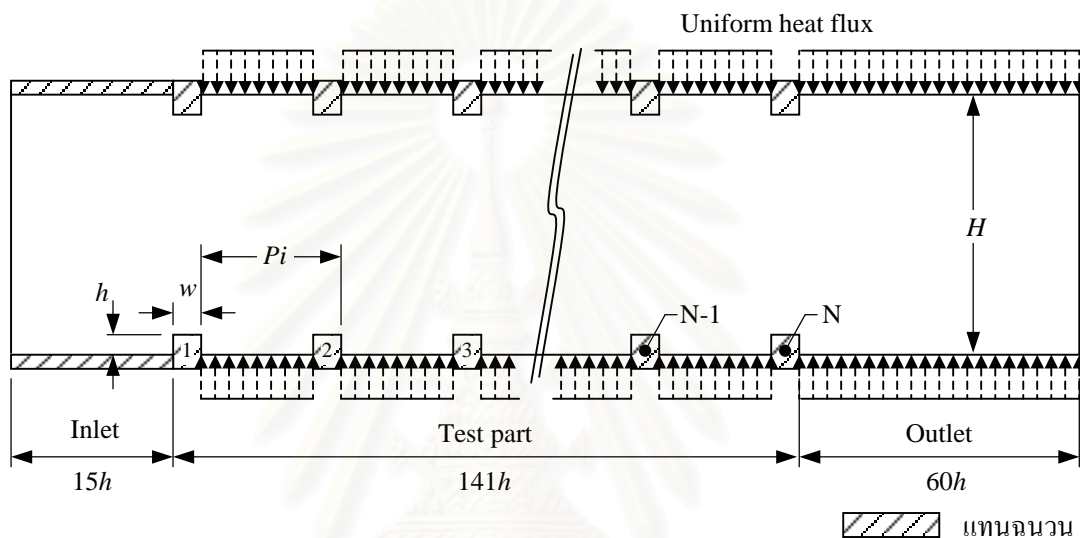
ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

หลังจากเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างแบบ In-lined แล้ว จะทำการศึกษาผลกระทบต่อรูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ โดยในตอนนี้จะกำหนดให้ช่องทางไหลแบ่งออกเป็น 3 บริเวณใหญ่ๆ คือ บริเวณทางเข้าและทางออกซึ่งไม่มีการติดตั้งสิ่งกีดขวาง และบริเวณทดสอบที่มีการติดตั้งสิ่งกีดขวางและมีการให้ความร้อนที่บริเวณผนังระหว่างสิ่งกีดขวางแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ โดยที่กำหนดให้ขนาดและการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังช่องทางไหลแสดงดังรูปที่ 6.19 และในส่วนของการถ่ายเท

ความร้อนกำหนดให้ผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลบริเวณทางเข้าและผิวทุกด้านของเทอร์มิสเตอร์เป็นฉนวน

การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ในกรณีนี้ประกอบไปด้วย

- 1) เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re_H) ในช่วง 7000 ถึง 21000
- 2) ความสูงต่อความกว้างของสิ่งกีดขวาง (h/w) ตั้งแต่ 1 ถึง 3
- 3) ระยะ Pitch ต่อความสูงของสิ่งกีดขวาง (Rib spacing, Pi/h) ตั้งแต่ 45 ถึง 7 (จำนวนสิ่งกีดขวางเท่ากับ 4 ถึง 18 คู่)



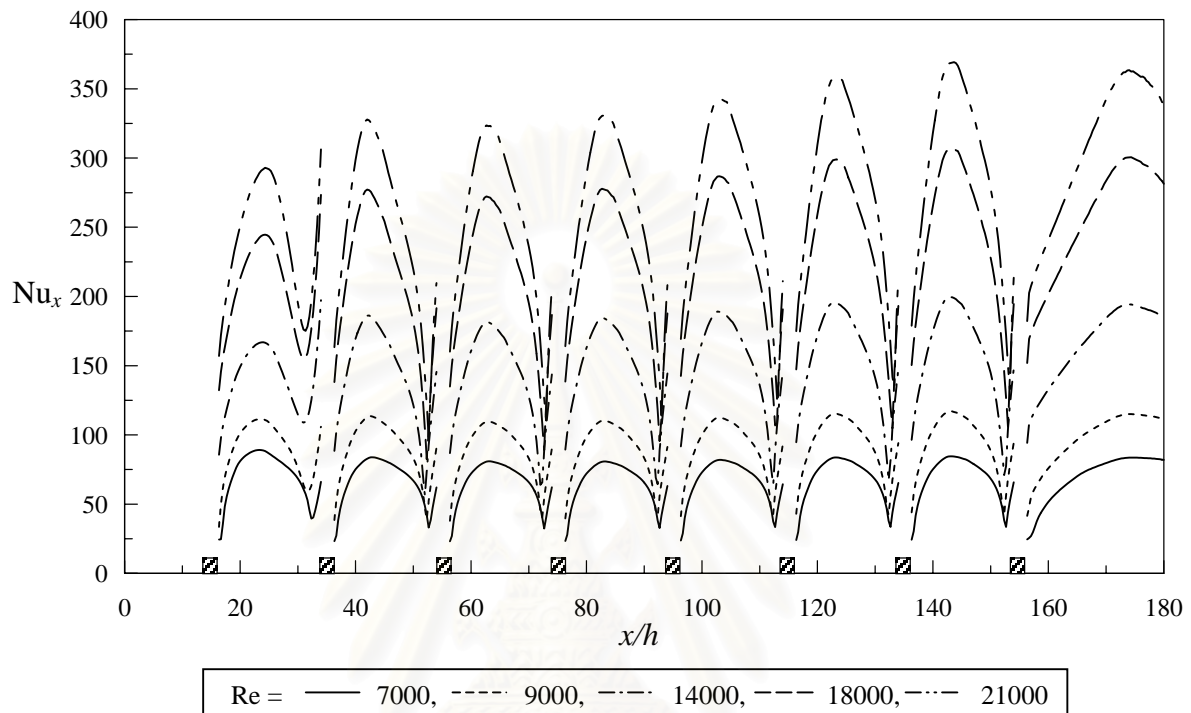
รูปที่ 6.19 ขนาดและการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined

1) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

สำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์มิสเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างแบบ In-lined เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re_H) ตั้งแต่ 7000 ถึง 21000 จะทำให้เกิดรูปแบบการกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ดังรูปที่ 6.20

จากการสังเกตรูปที่ 6.20 ซึ่งแสดงการกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน เมื่อของไหลผ่านเทอร์มิสเตอร์ซึ่งติดตั้งทั้งด้านบนและล่างของผนังช่องทางไหลแบบ In-lined สำหรับ Re_H ตั้งแต่ 7000 ถึง 21000 เปรียบเทียบกับกรณีการจัดวางบนผนังด้านล่างเพียงด้านเดียว (รูปที่ 6.7) จะเห็นว่าที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์มีค่าต่ำ การกระจายค่า Nu_x จะมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งแสดงว่าเทอร์มิสเตอร์ทางด้านบนที่เพิ่มเข้าไปไม่ช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนให้ดีขึ้น แต่เมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์มีค่าสูง จะเห็นได้ว่าการกระจายค่า Nu_x ในกรณีนี้จะสูงกว่ากรณีการจัดวางบนผนังด้านล่างเพียงด้าน

เดียวในทุกตำแหน่ง x/h นั้นหมายความว่า การที่เราเพิ่มสิ่งกีดขวางที่ผนังด้านบนเข้าไปจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นเมื่อของไหลมีความเร็วสูงในระดับหนึ่ง และยังพบว่าในบริเวณระหว่างสิ่งกีดขวางคู่ใดๆ ถ้าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่า Nusselt นัมเบอร์เพิ่มขึ้นตลอดความยาวช่องทางไหล



รูปที่ 6.20 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆกัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Re_H ตั้งแต่ 7000 ถึง 21000 สำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined

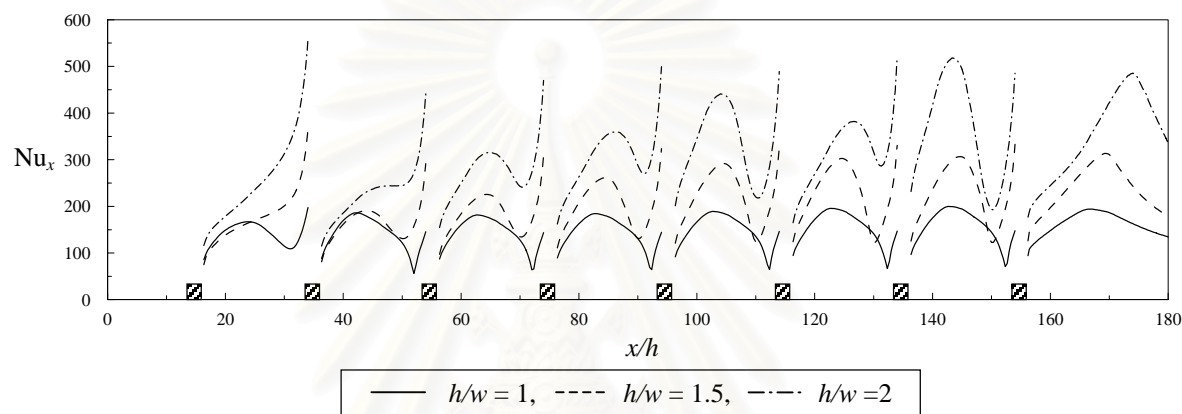
2) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงต่อความกว้างของสิ่งกีดขวาง (h/w)

ค่า h/w สำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์แบบนี้จะแปรผันตั้งแต่ 1 ถึง 3 โดยจะแสดงการกระจายค่า Nu_x แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ดังรูปที่ 6.21(a)-(b)

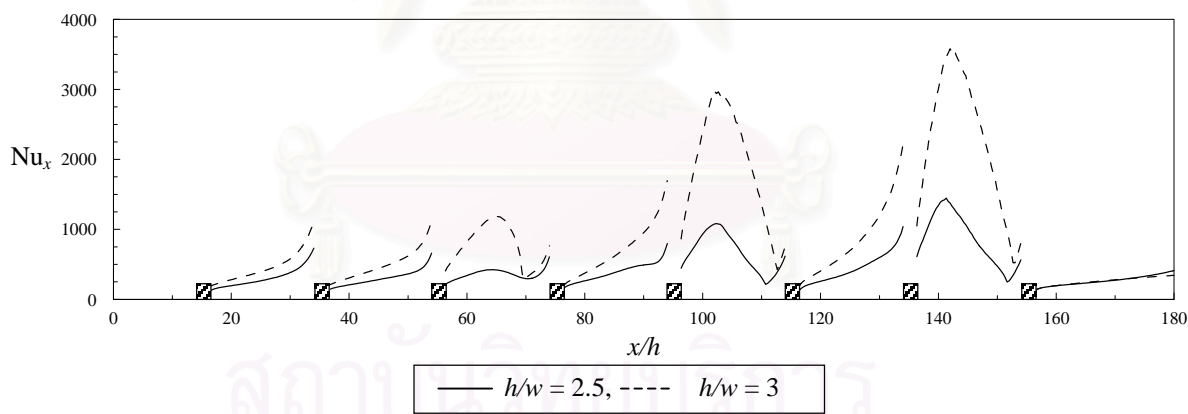
รูปที่ 6.21 แสดงการกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆกัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า h/w ตั้งแต่ 1 ถึง 3 จะเห็นได้ว่า เมื่อ $h/w = 1, 1.5$ และ 2 (รูปที่ 6.21(a)) การกระจายค่า Nu_x มีลักษณะที่คล้ายกัน โดยที่ค่า Nu_x จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดแล้วลดลง หลังจากนั้นจะเพิ่มอีกครั้งเป็นช่วงสั้นๆ ซึ่งเหมือนกับกรณีการแปรผันความสูงของสิ่งกีดขวางสำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านล่างเพียงด้านเดียว แต่เมื่อค่า $h/w = 2.5$ และ 3 (รูปที่ 6.21(b)) จะเห็นได้ว่าการกระจายค่า Nu_x มีลักษณะที่คล้ายกัน นั่นคือ เมื่อเราสังเกตการกระจายค่า Nu_x ในบริเวณระหว่าง

สิ่งกีดขวางคู่ที่ 3 กับ 4, 5 กับ 6 และ 7 กับ 8 จะพบว่าการกระจายค่า Nu_x มีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดและลดต่ำลงเหมือนกับกรณีที่เทอร์มิสเตอร์มีความสูงไม่มากนัก ($h/w = 1$ ถึง 2) แต่ที่บริเวณระหว่างสิ่งกีดขวางที่ 2 กับ 3, 4 กับ 5 และ 6 กับ 7 จะมีการกระจายค่า Nu_x แบบเพิ่มสูงขึ้นไปเรื่อยๆ ในแต่ละบริเวณช่องว่าง ที่เป็นเช่นนี้อาจจะอธิบายได้ด้วยรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น ดังนี้

เมื่อ h/w มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 2 จะเกิดรูปแบบการไหลแบบสมมาตร (รูปที่ 6.22(a)) แต่เมื่อ h/w มีค่าตั้งแต่ 2.5 ขึ้นไป (รูปที่ 6.22(b)) จะส่งผลต่อรูปแบบการไหลที่ไม่สมมาตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในบทที่ 5



(a)



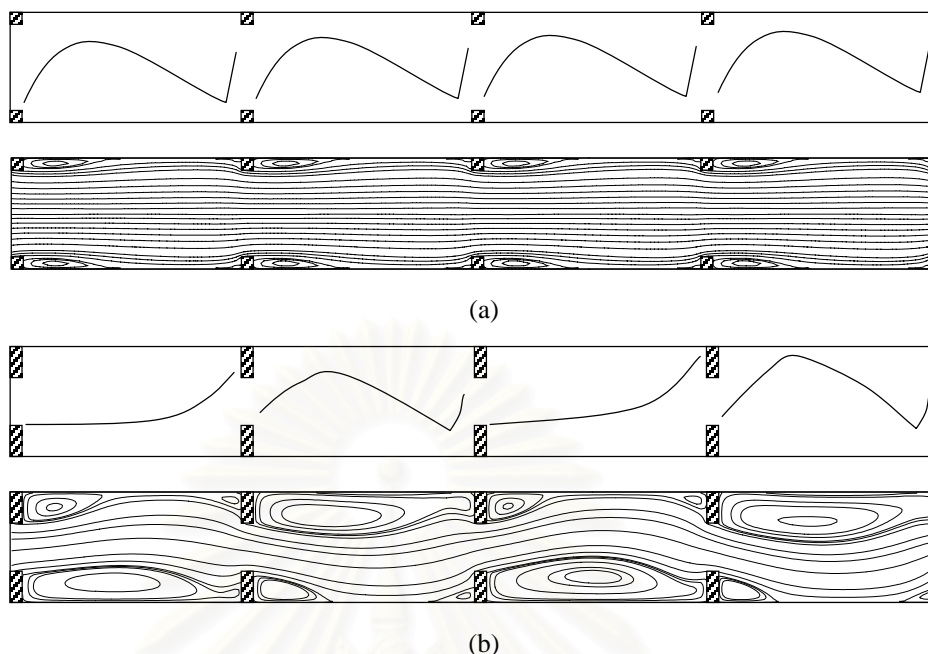
(b)

รูปที่ 6.21 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า h/w ตั้งแต่

1 ถึง 3 สำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของ

ช่องทางไหลแบบ In-lined (a) $h/w = 1, 1.5$ และ 2 (b) $h/w = 2.5$ และ 3

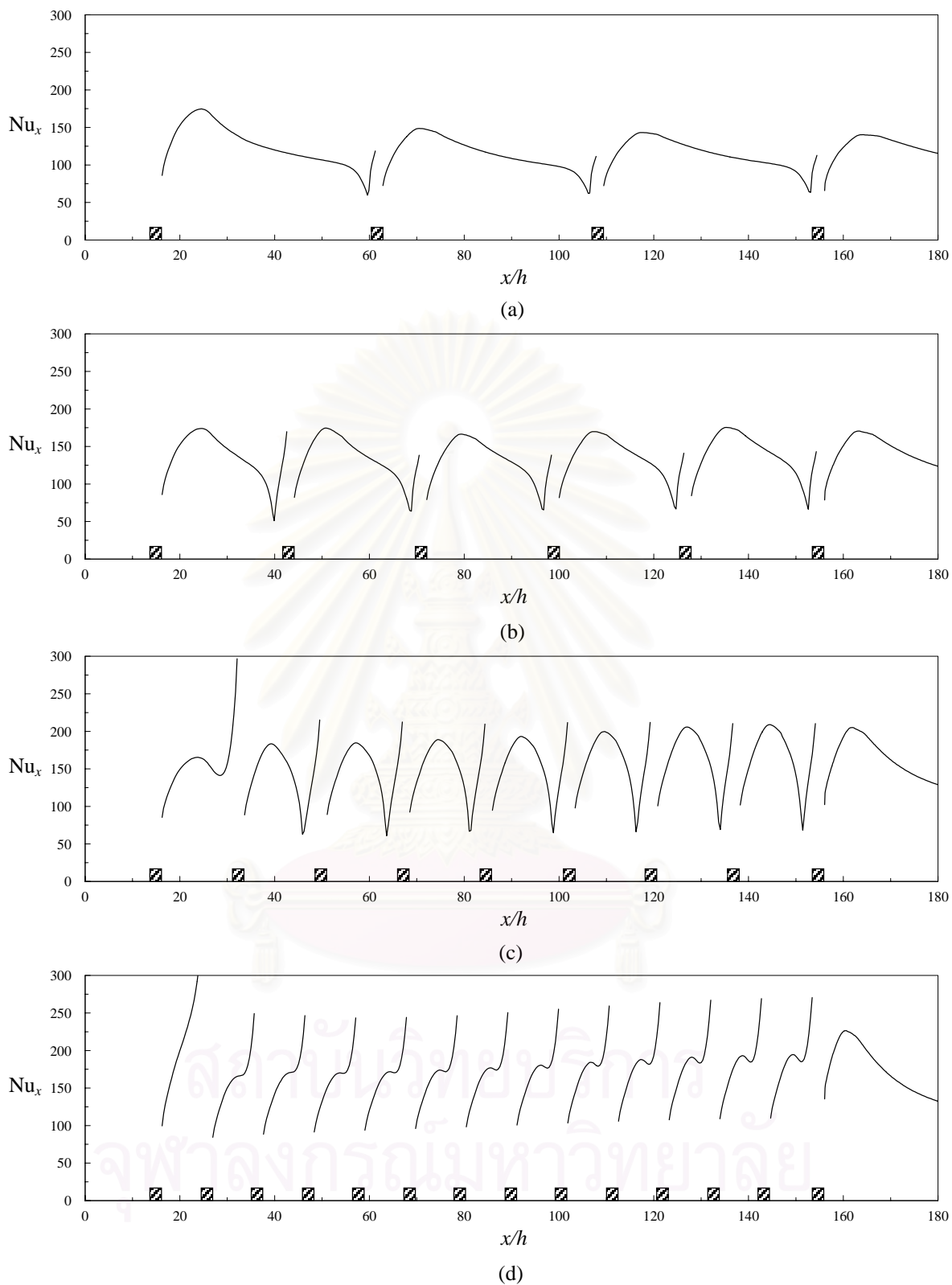
รูปแบบการกระจายค่า Nu_x เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.22



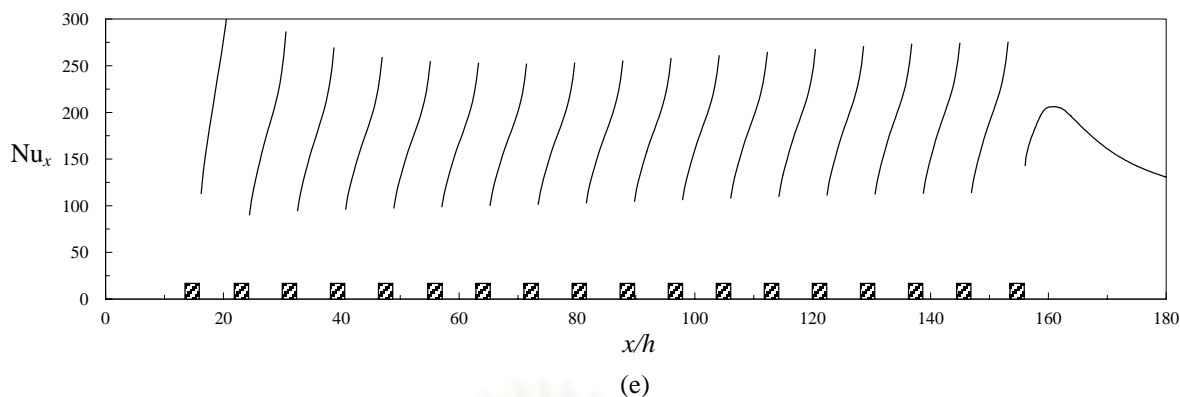
รูปที่ 6.22 รูปแบบการกระจายค่า Nu_x เทียบกับรูปแบบการไหลซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า h/w สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined
(a) การไหลแบบสมมาตร (b) การไหลแบบไม่สมมาตร

3) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing

จากการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ ซึ่งจัดวางบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหล โดยแปรผันค่า Rib spacing ในช่วงตั้งแต่ 45 ถึง 7 (จำนวนสิ่งกีดขวาง 4 ถึง 18 คู่) จะสังเกตได้ว่า เมื่อเราพิจารณาการไหลเป็นแบบสมมาตรก็จะเสมือนเป็นการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านล่างด้านเดียว ดังนั้นเราน่าจะสามารถสรุปได้ว่า การไหลและการถ่ายเทความร้อนจะให้ผลที่คล้ายคลึงกันมาก แต่ผลการคำนวณในครั้งนี้พบว่า รูปแบบการกระจายค่า Nu_x ของการจัดวางกรณีนี้ (รูปที่ 6.23) เหมือนกับกรณีการจัดวางบนผนังด้านล่างด้านเดียว (รูปที่ 6.12) แต่การกระจายค่า Nu_x ของการจัดวางกรณีนี้มีค่าสูงกว่า (โดยสังเกตได้จากรูปที่ 6.12 (c) เทียบกับรูปที่ 6.22 (c) ซึ่งจำนวนสิ่งกีดขวางเท่ากัน) เนื่องจากการเพิ่มเทอร์บิวเลเตอร์ที่ติดตั้งด้านบนของผนังช่องทางไหล จะทำให้เพิ่มความปั่นป่วนให้กับการไหลซึ่งจะส่งผลต่อการผสมกันที่ดีขึ้นของของไหลและเป็นผลให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นด้วย



รูปที่ 6.23 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing ตั้งแต่ 45 ถึง 7 (จำนวนสิ่งกีดขวาง 4 ถึง 18 คู่) สำหรับการจัดวางเทอร์โมอิเล็กโตรอินบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined
 (a) $Pi/h = 45$ (4คู่), (b) $Pi/h = 27$ (6คู่), (c) $Pi/h = 16.5$ (9คู่),
 (d) $Pi/h = 9.7$ (14คู่), (e) $Pi/h = 7$ (18คู่)

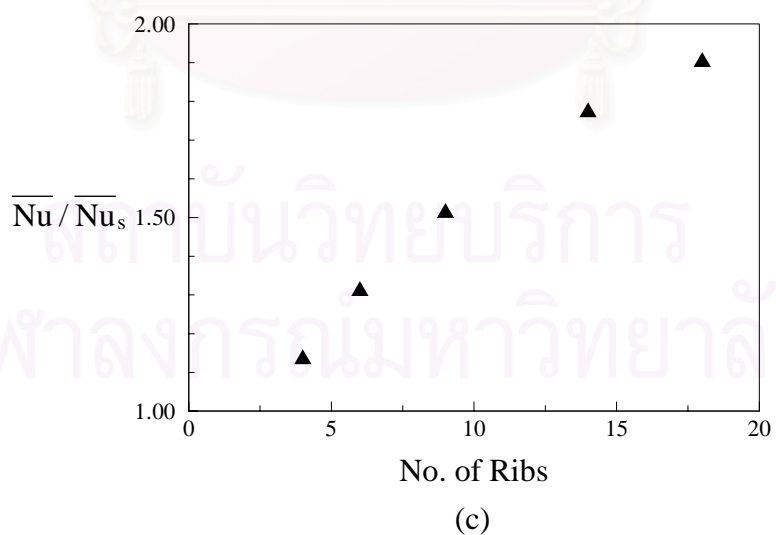
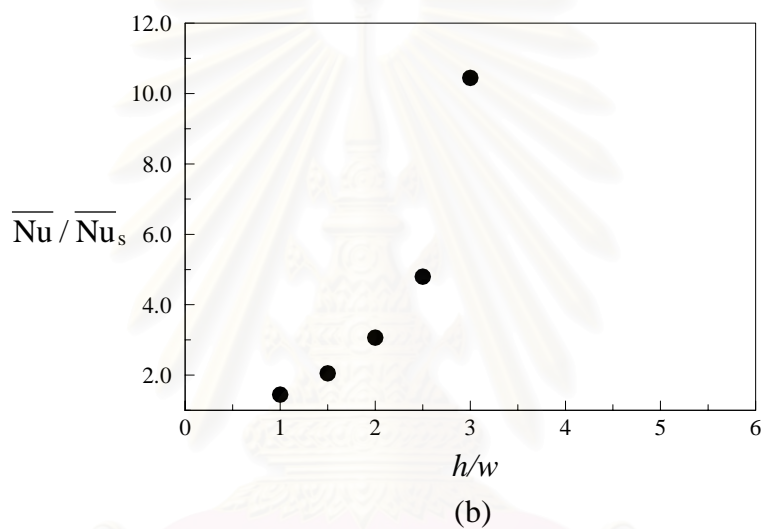
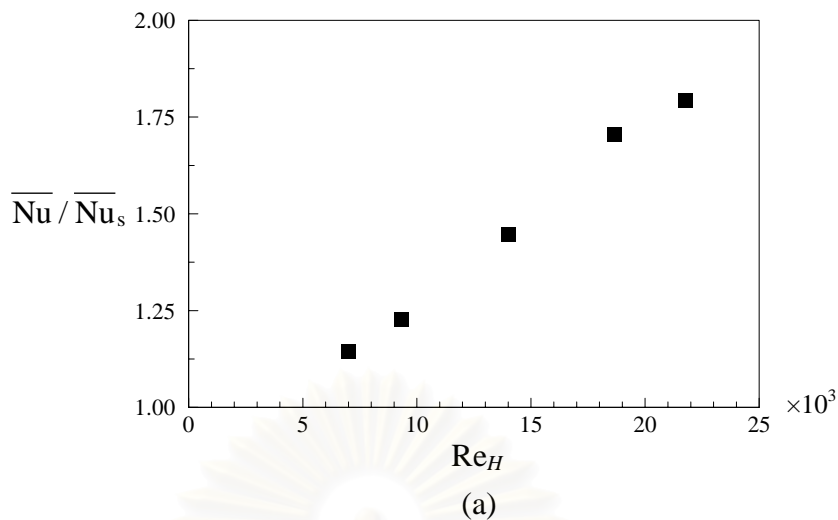


- รูปที่ 6.23 (ต่อ) การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing ตั้งแต่ 45 ถึง 7 (จำนวนสิ่งกีดขวาง 4 ถึง 18 คู่) สำหรับการจัดวางเทอร์โมอิเล็กโตรบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined
- (a) $Pi/h = 45$ (4คู่), (b) $Pi/h = 27$ (6คู่), (c) $Pi/h = 16.5$ (9คู่),
 (d) $Pi/h = 9.7$ (14คู่), (e) $Pi/h = 7$ (18คู่)

4) สรุปผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์สำหรับการจัดวางเทอร์โมอิเล็กโตรบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined

รูปแบบการจัดวางแบบนี้ให้ผลการถ่ายเทความร้อนเป็นไปตามที่เราคาดไว้คือ การติดตั้งเทอร์โมอิเล็กโตรเพิ่มบนผนังด้านบนของช่องทางไหลจะช่วยส่งเสริมให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น เนื่องจากการเพิ่มเทอร์โมอิเล็กโตรก็คือ การเพิ่มความปั่นป่วนให้กับการไหลนั่นเองและสำหรับผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนของการจัดวางเทอร์โมอิเล็กโตรแบบนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูงขึ้น จะส่งผลต่อการไหลให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 6.24(a))
2. เมื่อความสูงของสิ่งกีดขวาง (h/w) เพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น แต่เมื่อสิ่งกีดขวางสูงขึ้นมากๆ เรายังสรุปผลได้ไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากเกิดการกระจายค่านัสเซลันัมเบอร์แบบไม่ซ้ำ (ผลกระทบจากการไหลแบบไม่สมมาตร)
3. เมื่อจำนวนสิ่งกีดขวางแปรผันจาก 4 ถึง 18 คู่ จำนวนสิ่งกีดขวางที่เพิ่มขึ้นจะส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนให้ดีขึ้น แต่เมื่อจำนวนสิ่งกีดขวางมากกว่า 18 คู่ พบว่าการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าค่อนข้างคงที่



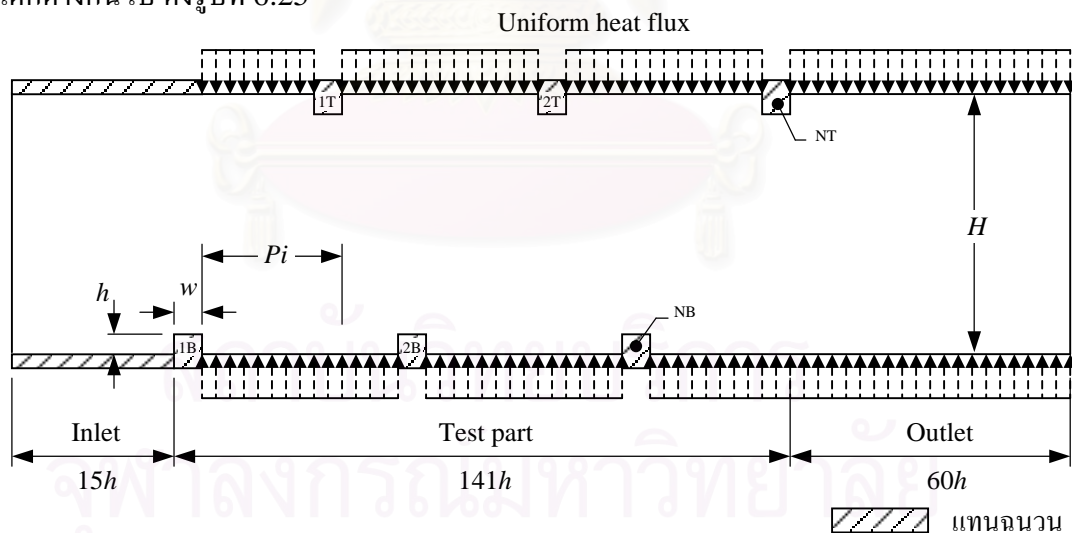
รูปที่ 6.24 อัตราส่วน \overline{Nu} / Nu_s สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ In-lined ที่พารามิเตอร์ต่างๆกัน
(a) Re_H , (b) h/w และ (c) No. of Ribs

6.3 ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์มิสเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered

รูปแบบการจัดวางแบบ Staggered นี้เป็นรูปแบบสุดท้ายที่เลือกนำมาศึกษา โดยลักษณะการวางเช่นนี้จะมีความแตกต่างกับการจัดวางสองแบบแรก คือ การพัฒนาตัวของการไหลผ่านผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลจะมีความแตกต่างในทุกบริเวณช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวางใดๆ ซึ่งในกรณีเช่นนี้ อาจจะส่งผลกระทบต่อผลการถ่ายเทความร้อนได้ โดยที่รายละเอียดของผลการศึกษา มีดังนี้

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

ถึงแม้ว่าในการศึกษารูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนรูปแบบนี้ เราจะไม่มีผลการทดลองนำมาเปรียบเทียบ แต่จากผลการคำนวณในส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (บทที่ 4) และผลการเปรียบเทียบสำหรับการจัดวาง 2 แบบแรก (หัวข้อ 6.1 และ 6.2) ทำให้เรามีความเชื่อมั่นในความถูกต้องของโปรแกรมในระดับหนึ่ง เราจึงสามารถนำโปรแกรมมาประยุกต์ใช้กับรูปแบบการไหลนี้ได้อย่างค่อนข้างมั่นใจ ดังนั้นเราจะกำหนดให้ขนาดของการจำลองการไหลและคุณสมบัติของของไหลเหมือนกับที่กำหนดใน 2 กรณีแรก แต่มีรูปแบบการจัดวางที่แตกต่างกันไป ดังรูปที่ 6.25



รูปที่ 6.25 ลักษณะของปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์มิสเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังด้านบนและล่างแบบ Staggered

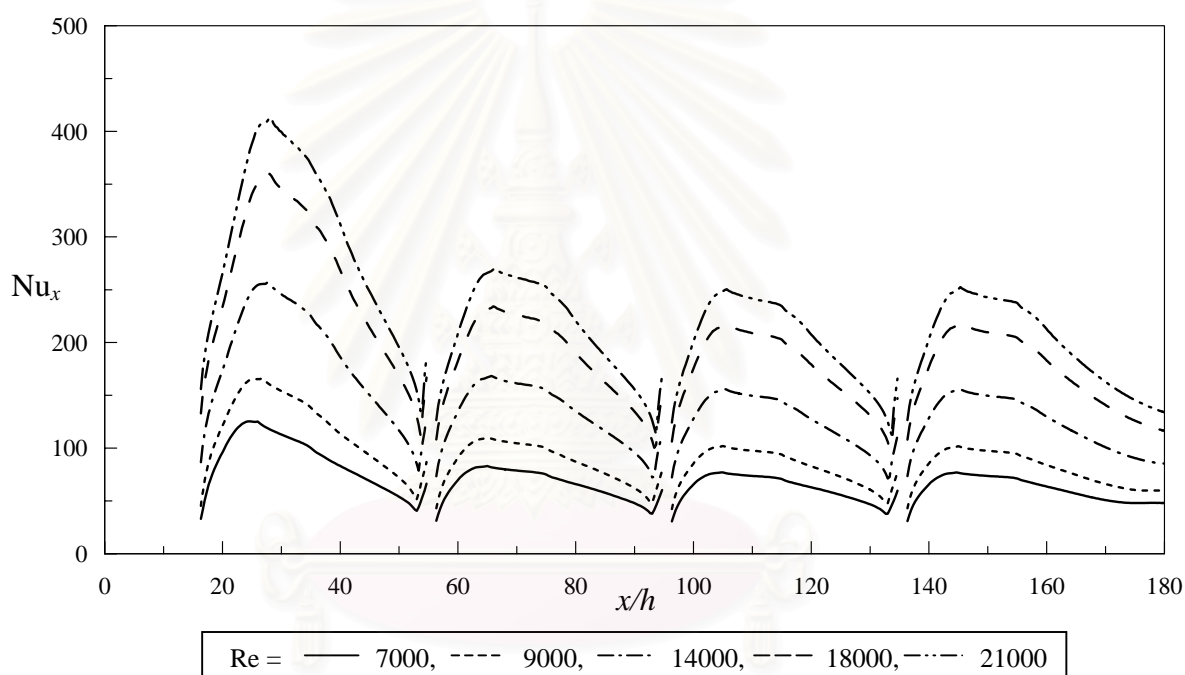
พารามิเตอร์ที่ทำการเปลี่ยนแปลงในกรณีนี้ ประกอบไปด้วย

- 1) เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_H) ในช่วง 7000 ถึง 21000
- 2) ความสูงต่อความกว้างของสิ่งกีดขวาง (h/w) ตั้งแต่ 1 ถึง 3

3) ระยะ Pitch ต่อความสูงของสิ่งกีดขวาง (Rib spacing, Pi/h) ตั้งแต่ 7 ถึง 27 (จำนวนสิ่งกีดขวางเท่ากับ 9 ถึง 3 คู่)

1) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

เมื่อเราแปรผันค่า Re_H ในช่วงตั้งแต่ 7000 ถึง 21000 สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered โดยที่กำหนดให้ความกว้างของสิ่งกีดขวาง ความยาวและความสูงของช่องทางไหลมีขนาดคงที่ เราจะสามารถแสดงผลการทำนายการถ่ายเทความร้อนในรูปของการกระจายค่า Nu_x ดังแสดงในรูปที่ 6.26

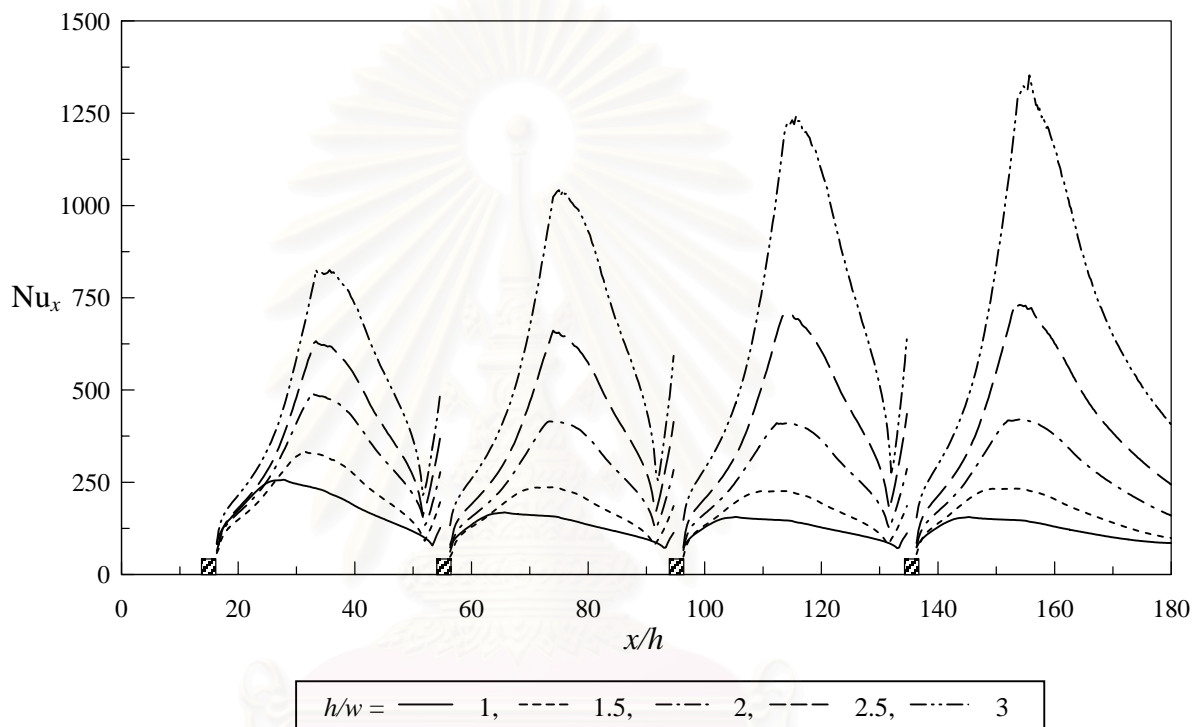


รูปที่ 6.26 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Re_H ตั้งแต่ 7000 ถึง 21000 สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered

สำหรับรูปแบบการถ่ายเทความร้อนของการจัดวางแบบนี้ ที่ Re_H ต่างๆ กัน พบว่า เมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่รูปแบบการกระจายของ Nu_x ที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกันในทุกๆ บริเวณช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวางและในทุกๆ เรย์โนลด์นัมเบอร์ด้วย นั่นแสดงว่า รูปแบบการจัดวางแบบนี้ให้ผลที่คล้ายกับการจัดวาง 2 รูปแบบแรกที่กล่าวไปแล้ว สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ กัน

2) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงต่อความกว้างของสิ่งกีดขวาง (h/w)

เงื่อนไขการจำลองแบบในส่วนของพารามิเตอร์ตัวนี้ ทำภายใต้เงื่อนไขที่คล้ายกับกรณีแรก แต่จะทำการคำนวณภายใต้เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์คงที่และแปรผันค่า h/w ตั้งแต่ 1 ถึง 3 ผลลัพธ์จากการคำนวณเพื่อแสดงถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนสำหรับการจัดวางรูปแบบนี้ ถูกแสดงในรูปที่ 6.27

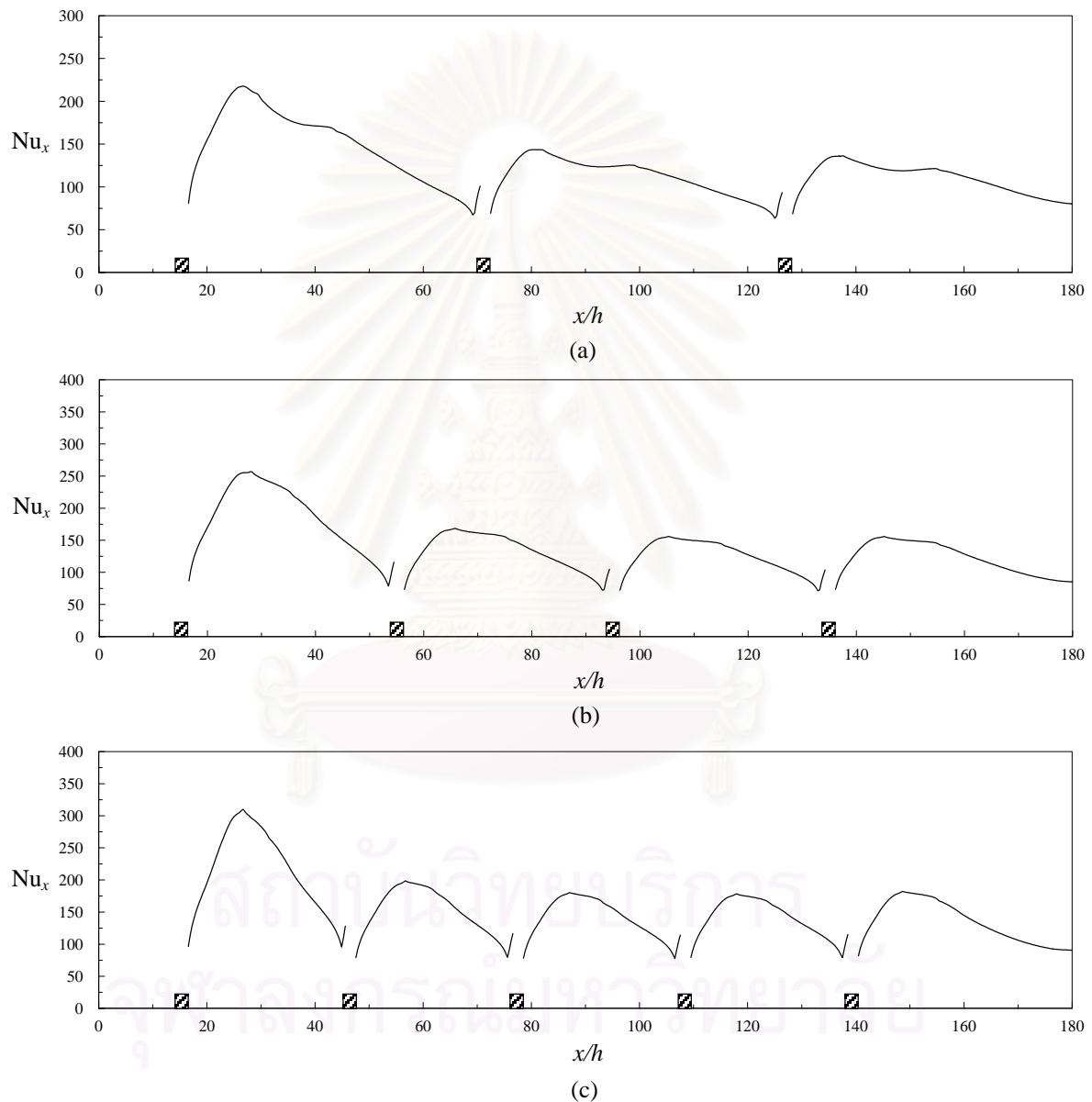


รูปที่ 6.27 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า h/w ตั้งแต่ 1 ถึง 3 สำหรับการจัดวางเทอร์มิสเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered

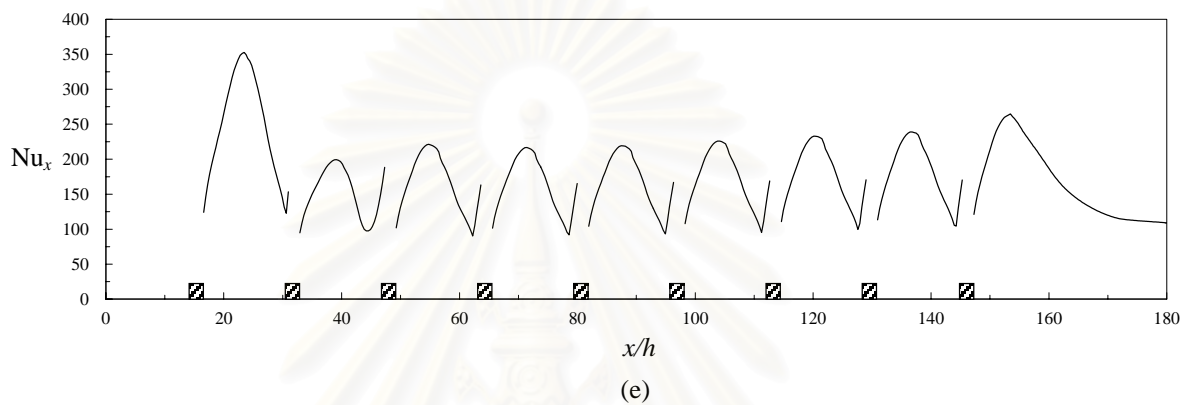
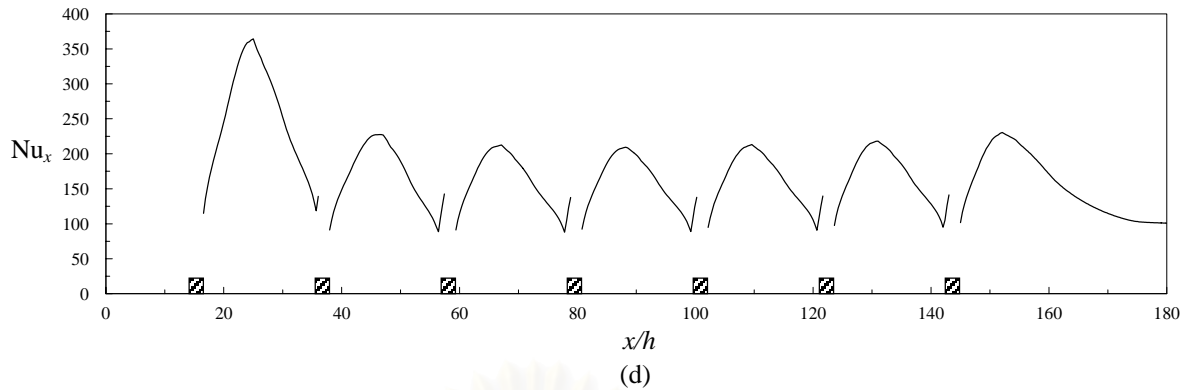
รูปที่ 6.27 แสดงการกระจายค่า Nu_x ตลอดช่วงความยาวของช่องทางไหลสำหรับการแปรผันค่า h/w ตั้งแต่ 1 ถึง 3 สังเกตได้ว่า เมื่อ h/w เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น (ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น) และเมื่อพิจารณาการกระจายค่า Nu_x ในแต่ละบริเวณช่องว่างจะเห็นได้ว่า เมื่อสิ่งกีดขวางมีความสูงน้อย ตำแหน่งการเกิดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดจะเกิดใกล้กับสิ่งกีดขวางด้านหน้า แต่เมื่อสิ่งกีดขวางมีความสูงมากขึ้น ตำแหน่งนี้จะเลื่อนออกไปทางสิ่งกีดขวางด้านหลังซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนตำแหน่งของ Reattachment point

3) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing

สำหรับการศึกษาผลของช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวางที่มีต่อคุณลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing เราคาดว่าเมื่อค่า Rib spacing มีค่าน้อย (สิ่งกีดขวางอยู่ชิดกันมากขึ้น) ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้น เนื่องจากเกิดบริเวณการหมุนวนสูง โดยที่เราสามารถยืนยันความถูกต้องของการคาดเดาข้างต้นจากผลการคำนวณของการถ่ายเทความร้อน ซึ่งแสดงอยู่ในรูปการกระจายค่า Nu_x ในรูปที่ 6.28



รูปที่ 6.28 การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing ตั้งแต่ 7 ถึง 27 (จำนวนสิ่งกีดขวางตั้งแต่ 9 ถึง 3 คู่) สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered (a) $Pi/h = 27$ (3คู่), (b) $Pi/h = 19$ (4คู่), (c) $Pi/h = 14.5$ (5คู่), (d) $Pi/h = 9.7$ (7คู่), (e) $Pi/h = 7$ (9คู่)



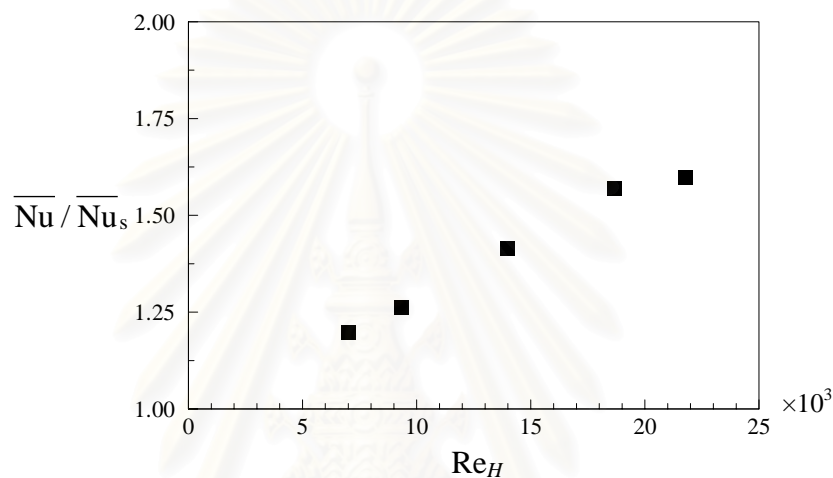
รูปที่ 6.28 (ต่อ) การกระจายค่า Nu_x ที่ x/h ต่างๆ กัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing ตั้งแต่ 7 ถึง 27 (จำนวนสิ่งกีดขวางตั้งแต่ 9 ถึง 3 คู่) สำหรับการจัดวางเทอร์โมอิเล็กโตรบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered (a) $Pi/h = 27$ (3 คู่), (b) $Pi/h = 19$ (4 คู่), (c) $Pi/h = 14.5$ (5 คู่), (d) $Pi/h = 9.7$ (7 คู่), (e) $Pi/h = 7$ (9 คู่)

จากรูปที่ 6.28 ซึ่งแสดงการกระจายค่า Nu_x สำหรับการจัดวางเทอร์โมอิเล็กโตรแบบ Staggered จะเห็นได้ว่ารูปแบบการกระจายค่า Nu_x ตลอดความยาวของบริเวณทดสอบในทุกช่วง มีลักษณะการกระจายแบบโค้งระฆังคว่ำ ซึ่งเมื่อค่า Rib spacing เพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วในบริเวณระหว่างสิ่งกีดขวางคู่ใดๆ โดยสังเกตจากเส้นโค้งของค่านี้สเซลันัมเบอร์ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

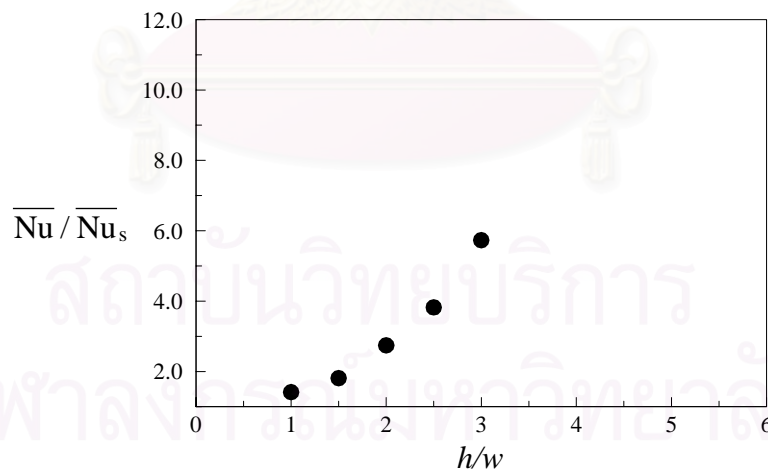
4) สรุปผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ สำหรับการจัดวางเทอร์โมอิเล็กโตรบนผนังด้านบนและล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered

สำหรับการเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ทั้งสามที่มีต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อน สามารถแสดงในรูปของอัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ ของแต่ละกรณีได้ดังนี้

- 1) เมื่อของไหลมีความเร็วสูงขึ้น (เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูงขึ้น) จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น (รูปที่ 6.29(a))
- 2) ความสูงของสิ่งกีดขวางที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น (รูปที่ 6.29(b))
- 3) ในช่วงที่จำนวนสิ่งกีดขวางน้อยกว่า 7 คู่ (เทียบเท่ากับจำนวนสิ่งกีดขวาง 14 คู่ในกรณีการจัดวางแบบ In-lined) ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนดีขึ้นเมื่อจำนวนสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีจำนวนสิ่งกีดขวางมากกว่า 7 คู่เป็นต้นไป ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างคงที่ (รูปที่ 6.29(c))



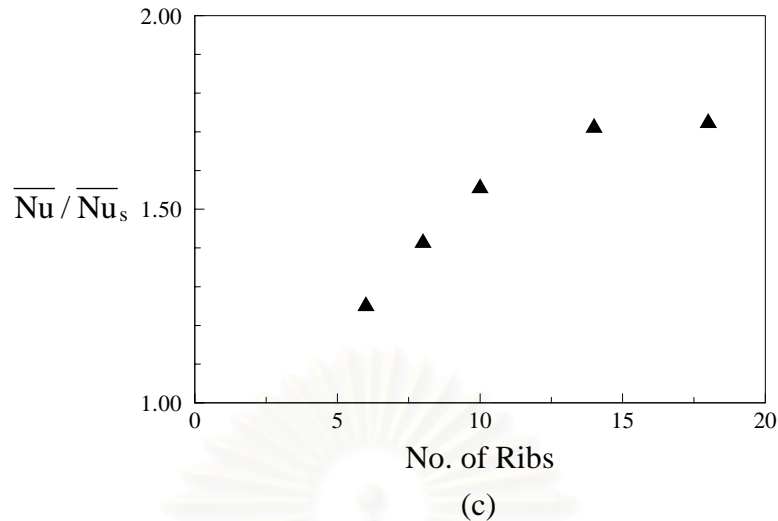
(a)



(b)

รูปที่ 6.29 อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ สำหรับการจัดวางเทอร์ปีวเลเตอร์บนผนังด้านบน และล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered ที่พารามิเตอร์ต่างๆ

(a) Re , (b) h/w และ (c) No. of Ribs



รูปที่ 6.29 (ต่อ) อัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ สำหรับการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังด้านบน และล่างของช่องทางไหลแบบ Staggered ที่พารามิเตอร์ต่างๆ
(a) Re, (b) h/w และ (c) No. of Ribs

6.4 การเปรียบเทียบการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ ซึ่งติดตั้งบนผนังช่องทางไหลแบบต่างๆ

จากผลการคำนวณและข้อสรุปผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งแสดงในหัวข้อ 6.1-6.3 สำหรับการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังช่องทางไหลแต่ละแบบ ทำให้เราทราบถึงคุณลักษณะของการจัดวางแต่ละแบบ ซึ่งสามารถสรุปผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 6.30(a) ซึ่งแสดงค่าอัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์และรูปแบบการจัดวางที่แตกต่างกัน จะสังเกตได้ว่าตลอดช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ตั้งแต่ 7000 ถึง 21000 ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสำหรับรูปแบบการจัดวางที่แตกต่างกันสามารถเรียงจากค่าสูงไปต่ำได้ดังนี้ คือ การจัดวางแบบ In-lined, การจัดวางแบบ Staggered และการจัดวางบนผนังด้านล่างเพียงด้านเดียว ตามลำดับ แสดงว่าในการออกแบบช่องทางไหลซึ่งใช้ประโยชน์ในการถ่ายเทความร้อน ควรจะให้ของไหลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงๆ แต่การที่จะทำเช่นนั้นได้จะต้องคำนึงถึงกำลังงานที่จะต้องใช้ในการผลักดันให้ของไหลเคลื่อนที่ โดยในที่นี้จะพิจารณาโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction coefficient, f) ซึ่งนิยามจาก

$$f = \frac{\Delta p}{G^2/2\rho g} \cdot \frac{D_h}{4\Delta L} \quad (6.2)$$

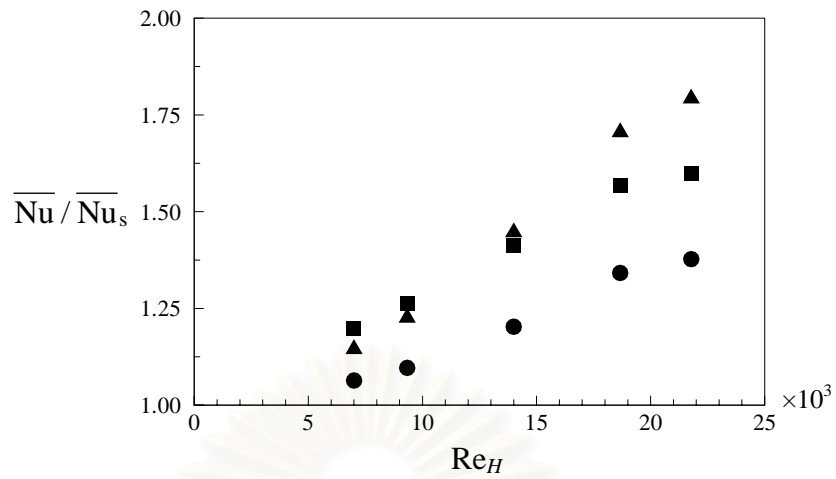
เมื่อ Δp คือ ความดันตกคร่อม (Pressure drop) ที่สูญเสียในบริเวณที่พิจารณา

- D_h คือ Hydraulic diameter
 ΔL คือ ความยาวของช่องทางไหลที่พิจารณา
 ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล
 g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงโลก
 G คือ Mass flux ซึ่งหาได้จาก $G = \rho \bar{u}$

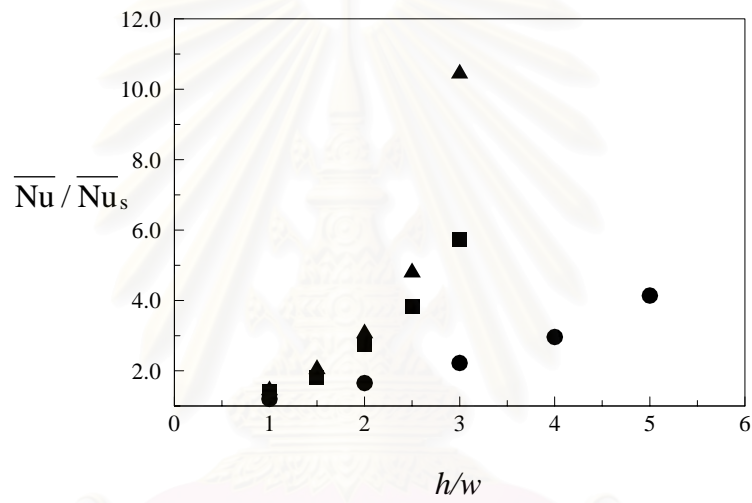
ในงานวิทยานิพนธ์นี้ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานถูกแสดงในรูปอัตราส่วน f/f_s โดยที่ f_s คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยของช่องทางไหลผนังเรียบ (ซึ่งหาไว้โดย Rohsenow and Choi [36], $f_s = 0.127 \text{ Re}^{-0.3}$) จากรูปที่ 6.31(a) ซึ่งแสดงค่าอัตราส่วน f/f_s สำหรับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์และการจัดวางที่แตกต่างกัน พบว่าการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์แบบ In-lined มีค่า f/f_s สูงที่สุด ตามด้วยการจัดวางแบบ Staggered และการจัดวางบนผนังด้านล่าง ตามลำดับ จากข้อสังเกตนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อค่าไนส์เชิลนัมเบอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สูงตามไปด้วยสำหรับทุกรูปแบบการจัดวาง อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่า การจัดวางแบบ Staggered มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่สูงพอๆ กับการจัดวางแบบ In-lined แต่มีการสูญเสียความดันค่อนข้างต่ำ (f/f_s ต่ำ) โดยมีค่าใกล้เคียงกับการจัดวางสิ่งกีดขวางบนผนังด้านล่างเพียงด้านเดียว

รูปที่ 6.30 (b) และ 6.31 (b) แสดงค่าอัตราส่วน $\overline{\text{Nu}}/\overline{\text{Nu}}_s$ และ f/f_s สำหรับการจัดวางและค่า h/w ที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าค่า $\overline{\text{Nu}}/\overline{\text{Nu}}_s$ และ f/f_s มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันดังนี้ เมื่อ h/w มีค่ามากขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันเพิ่มขึ้นเนื่องจากความสูงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อความปั่นป่วนในการไหลที่สูงขึ้นด้วย และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับกรณีการแปรผันค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ จะเห็นได้ว่า การจัดวางแบบ Staggered ให้ผลการถ่ายเทความร้อนที่สูงพอสมควร แต่มีการสูญเสียความดันไม่มากนักเมื่อเทียบกับการจัดวางทั้งสองแบบที่เหลือ

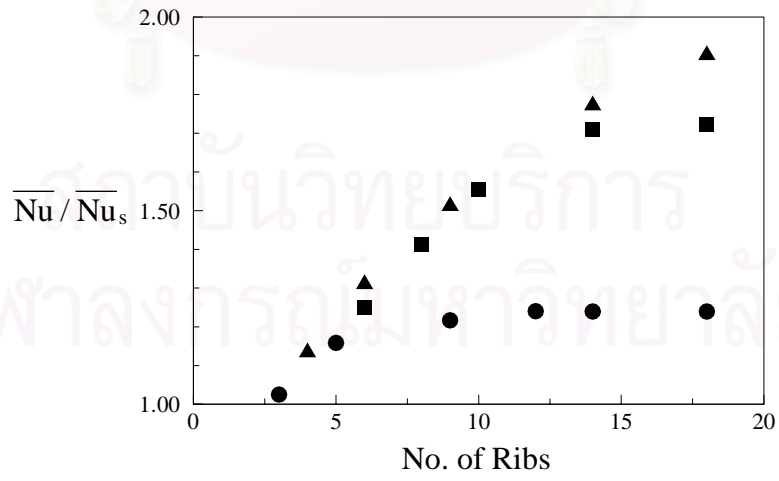
ในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง Rib spacing ซึ่งในที่นี้แสดงอยู่ในรูปของจำนวนสิ่งกีดขวาง (No. of Ribs) เมื่อพิจารณารูปที่ 6.30(c) และ 6.31(c) จะเห็นว่า ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของการจัดวางแบบ Staggered มีค่าสูงใกล้เคียงกับการจัดวางแบบ In-lined แต่มีการสูญเสียความดันที่น้อยกว่า (ผลสรุปมีแนวโน้มเดียวกับการแปรผันค่าพารามิเตอร์ Re และ h/w)



(a)



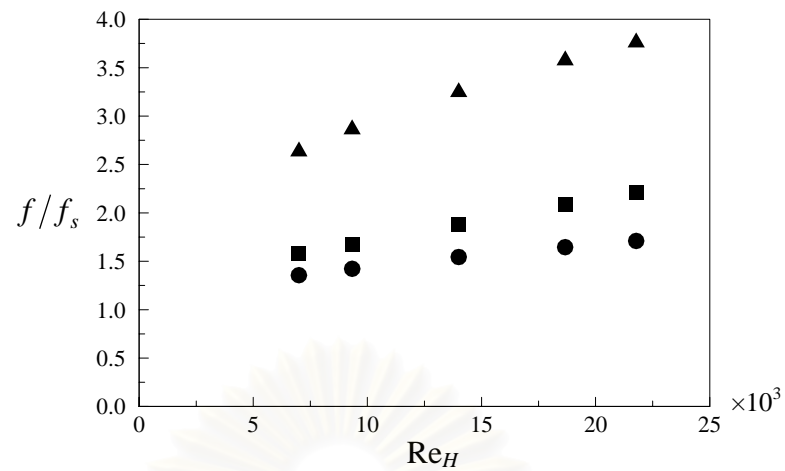
(b)



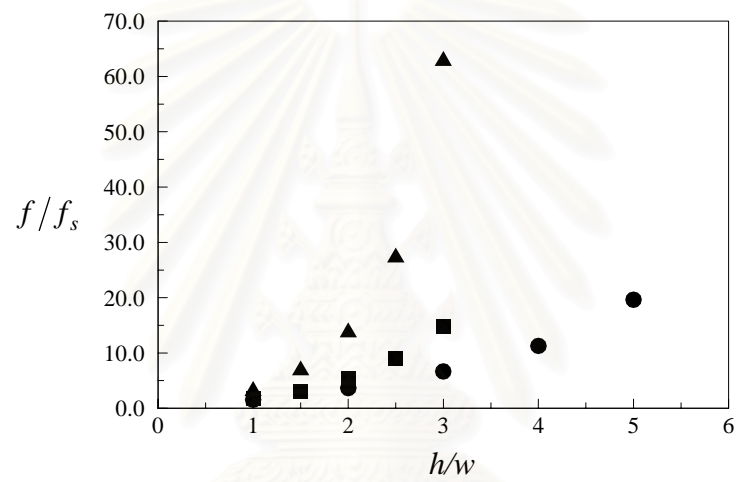
(c)



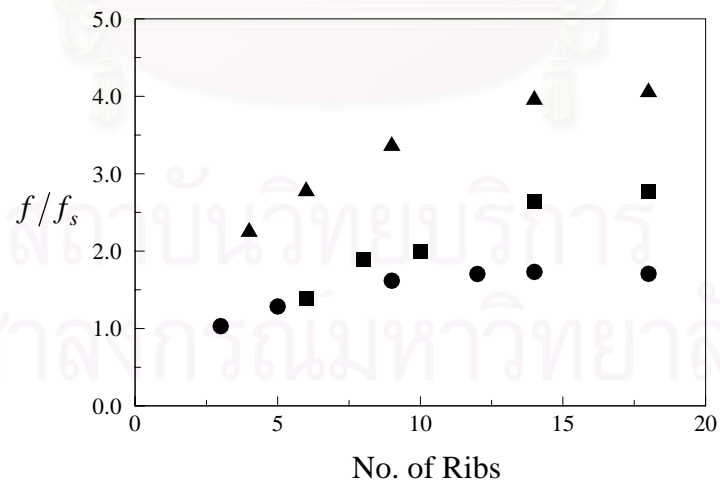
รูปที่ 6.30 ค่าอัตราส่วน $\overline{Nu} / \overline{Nu}_s$ สำหรับการจัดวางและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กัน



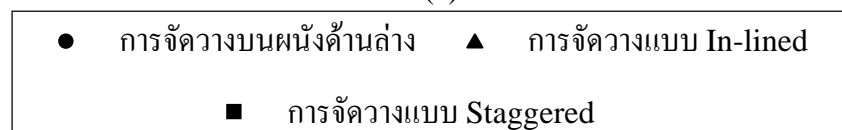
(a)



(b)



(c)

รูปที่ 6.31 ค่าอัตราส่วน f/f_s สำหรับการจัดวางและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กัน

สรุปผล

สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง สามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้งได้ดีพอสมควร โดยสังเกตได้จากผลการคำนวณที่ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองสำหรับการจัดวางทั้งแบบจัดวางบนผนังด้านล่างเพียงด้านเดียวและการจัดวางบนผนังด้านบนและล่างแบบ In-lined ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง
2. รูปแบบการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังของช่องทางไหลทั้งสามแบบ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบชั่วเป็นช่วง (สังเกตได้จากการกระจายค่า Nu_x แบบชั่วๆ กัน) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Han [18]
3. การเพิ่มเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สำหรับการจัดวางทุกแบบส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันที่สูงขึ้นไปพร้อมๆ กัน
4. ความสูงของเทอร์บิวเลเตอร์ (แสดงอยู่ในรูปของ h/w) เป็นตัวแปรที่ทำให้เกิดรูปแบบการไหลที่สมมาตรและไม่สมมาตรสำหรับการจัดวางแบบ In-lined ซึ่งรูปแบบการไหลที่สมมาตรจะส่งผลทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบเป็นคาบและยังทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มเทอร์บิวเลเตอร์เข้าไปที่ด้านบนของผนัง (เปรียบเทียบกับการจัดวางบนผนังด้านล่างเพียงด้านเดียว) ช่วยส่งเสริมให้การถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น แต่เมื่อความสูงของเทอร์บิวเลเตอร์เพิ่มขึ้นจนส่งผลให้เกิดรูปแบบการไหลที่ไม่สมมาตรขึ้น จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบเป็นคาบในทุกๆ บริเวณช่องว่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์เปลี่ยนเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบชั่วช่วงเว้นช่วงขึ้น (อย่างไรก็ตามเรายังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนในกรณีที่เกิดการไหลแบบไม่สมมาตร เนื่องจากการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะทำให้ผลเฉลยที่มีความสมมาตรในกรณีของปัญหาที่มีการกำหนดเงื่อนไขขอบแบบสมมาตร ดังนั้นเราสามารถกล่าวได้ว่า ผลลัพธ์แบบไม่สมมาตรที่ได้นั้นแม้ว่าจะเป็นผลลัพธ์ที่คำนวณจนลู่เข้าแล้วจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ก็อาจจะไม่ใช่ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง) ส่วนผลการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของเทอร์บิวเลเตอร์ต่อการถ่ายเทความร้อนของรูปแบบที่เหลือทั้งสองแบบนี้ให้ผลที่คล้ายคลึงกัน คือ เมื่อความสูงเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันที่เพิ่มขึ้นด้วย

5. การศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง Rib spacing เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงระยะช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวาง (ในที่นี้แสดงอยู่ในรูปของจำนวนสิ่งกีดขวาง) เราพบว่าการจัดวางทั้งสามแบบให้ผลที่คล้ายกัน คือ เมื่อเพิ่มจำนวนสิ่งกีดขวางขึ้นจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันที่เพิ่มขึ้น (แสดงว่าในช่วงนี้การเพิ่มจำนวนสิ่งกีดขวางหรือการลดความห่างของสิ่งกีดขวางแต่ละคู่ จะช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนให้ดีขึ้น) จนกระทั่งเมื่อสิ่งกีดขวางมีจำนวนมากเกินค่าๆ หนึ่งการถ่ายเทความร้อนจะค่อนข้างคงที่ (การเพิ่มสิ่งกีดขวางในช่วงนี้มีผลค่อนข้างน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการถ่ายเทความร้อน)
6. ในการเลือกออกแบบเส้นทางการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง เมื่อเปรียบเทียบการจัดวางบนผนังด้าน, การจัดวางแบบ In-lined และ การจัดวางแบบ Staggered พบว่าเราควรเลือกจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์แบบ Staggered เหมาะสมที่สุดเนื่องจากการจัดวางแบบนี้จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างสูงและมีการสูญเสียความดันไม่สูงมากนัก สำหรับการแปรผันค่าพารามิเตอร์ทุกๆ ค่า

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 บทสรุป

งานวิทยานิพนธ์นี้แสดงการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน จะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้วิธีนี้กับการวิเคราะห์ปัญหาของงานวิทยานิพนธ์ให้ผลเป็นที่น่าพอใจในระดับหนึ่ง

ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มสำหรับการแก้ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วน จำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจถึงลักษณะทางกายภาพของปัญหา ซึ่งปัญหาแบบนี้สามารถอธิบายอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ (ในบทที่ 2) โดยสมการที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ประกอบไปด้วย สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัมในแนวแกน x สมการโมเมนตัมในแนวแกน y และสมการอนุรักษ์พลังงาน แต่เนื่องจากปัญหาที่กำลังวิเคราะห์อยู่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน จึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ช่วยในการอธิบายตัวแปรบางตัว เพื่อให้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ข้างต้นสามารถหาผลเฉลยได้ ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน 2 แบบจำลองด้วยกัน คือ แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ และ $k - \omega$ (แสดงรายละเอียดในบทที่ 3) แล้วจึงประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มเพื่อหาผลเฉลยต่อไป

ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (บทที่ 3) มีวิธีการดำเนินการเป็นขั้นตอนที่เริ่มต้นด้วยการแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาเป็นปริมาตรควบคุมย่อยๆ โดยในที่นี้ใช้กริดแบบเอียง ต่อจากนั้นทำการจัดรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ในรูปทั่วไปและทำการดิสครีไทซ์สมการดังกล่าวเพื่อเปลี่ยนให้เป็นสมการพีชคณิต พร้อมทั้งใช้ Numerical scheme ประมาณค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆที่บริเวณ Interface หลังจากนั้นทำการหาผลเฉลยด้วยวิธี Tri-diagonal Matrix Algorithm (TDMA) ซึ่งสมมติว่าทราบค่าบริเวณจุดต่อข้างเคียงและใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (Iteration method) จนได้ผลลัพธ์ที่คู่เข้าของสมการดิสครีไทซ์ร่วมกับการใช้ด้วย SIMPLE algorithm เพื่อทำให้ผลเฉลยที่ได้จากสมการความต่อเนื่องและสมการอนุรักษ์โมเมนตัมมีความสอดคล้องกัน

จากขั้นตอนและวิธีการของระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม ทำให้เราสามารถประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับปัญหาที่สนใจ หลังจากนั้นจึงทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

(แสดงรายละเอียดในบทที่ 4) ซึ่งปัญหาที่เลือกนำมาใช้ในการตรวจสอบ ได้แก่ ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องทางไหลผนังเรียบ ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่าน Backward-facing step และปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนสิ่งกีดขวางเดี่ยว จากผลการคำนวณพบว่า แบบจำลองทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มเดียวกันกับค่าที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง แต่แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ ให้ผลลัพธ์ในส่วนของ การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$

บทที่ 5 แสดงการทำนายการไหลและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง ซึ่งประกอบไปด้วย การพิจารณาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซ การคำนวณการพาความร้อนแบบบังคับ รูปร่างของช่องทางไหลและการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์ ตลอดจนผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์เพื่อให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์การไหลและการเลือกใช้ตัวชี้วัดที่เหมาะสม

จากนั้นเมื่อมีความรู้ ความเข้าใจและเชื่อมั่นในความถูกต้องของโปรแกรมแล้ว เราจึงนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ต่อไป ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้อาจแบ่งการจัดวางที่แตกต่างกันออกเป็น 3 รูปแบบ คือ การจัดวางบนผนังด้านล่างเพียงด้านเดียว การจัดวางบนผนังด้านบนและล่างแบบ In-lined และการจัดวางบนผนังด้านบนและล่างแบบ Staggered โดยที่การศึกษาจะรวมถึงการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์อื่นๆ เช่น Re , h/w และ Pi/h ด้วย

กล่าวโดยสรุปว่าวิธานิพนธ์นี้สามารถนำระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มร่วมกับการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองสำหรับการจัดวางสองรูปแบบ (การจัดวางบนผนังด้านล่างและการจัดวางแบบ In-lined) พบว่าผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบมีความสอดคล้องกันดี หลังจากนั้นทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์สำหรับการจัดวางทั้งสามแบบ สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. รูปแบบการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์บนผนังของช่องทางไหลทั้งสามแบบ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบซ้่าเป็นคาบ (สังเกตได้จากการกระจายค่า Nu_x แบบซ้่าๆกัน) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Han [18]
2. การเพิ่มเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สำหรับการจัดวางทุกแบบส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันที่สูงขึ้นไปพร้อมๆกัน

3. ความสูงของเทอร์บิวเลเตอร์เป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรูปแบบการไหลแบบสมมาตร (การจัดวางบนผนังด้านล่างและการจัดวางแบบ Staggered) ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันที่เพิ่มขึ้น และการเกิดรูปแบบการไหลแบบไม่สมมาตร (การจัดวางแบบ In-lined) ซึ่งทำให้เกิดลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบซ้ำเป็นช่วงเว้นช่วงขึ้น ขึ้น (อย่างไรก็ตามเรายังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนในกรณีที่เกิดการไหลแบบไม่สมมาตร เนื่องจากการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะทำให้ผลเฉลยที่มีความสมมาตรในกรณีของปัญหาที่มีการกำหนดเงื่อนไขขอบแบบสมมาตร ดังนั้นเราสามารถกล่าวได้ว่า ผลลัพธ์แบบไม่สมมาตรที่ได้นั้นแม้ว่าจะจะเป็นผลลัพธ์ที่คำนวณจนลู่เข้าแล้วจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ก็อาจจะไม่ใช่ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง)
4. ในการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง Rib spacing ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงระยะช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวาง (ในที่นี้แสดงอยู่ในรูปของจำนวนสิ่งกีดขวาง) พบว่าการจัดวางทั้งสามแบบให้ผลที่คล้ายคลึงกัน ดังนี้ เมื่อเพิ่มจำนวนสิ่งกีดขวางขึ้นจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันที่เพิ่มจนกระทั่งเมื่อสิ่งกีดขวางมีจำนวนมากเกินค่าหนึ่งๆ การถ่ายเทความร้อนจะค่อนข้างคงที่
5. ในการเลือกออกแบบเส้นทางการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซ เราควรเลือกจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์แบบ Staggered เนื่องจากมีความเหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 2 แบบ ทั้งนี้เพราะการจัดวางแบบนี้มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างสูงและมีการสูญเสียความดันไม่สูงมากนักในทุกกรณีของการแปรผันค่าพารามิเตอร์

7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

เราสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้จากงานวิทยานิพนธ์นี้ไปใช้ในการศึกษาพฤติกรรมและปรากฏการณ์การไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านรูปร่างที่มีลักษณะคล้ายกับปัญหาในงานวิจัยนี้หรือมีรูปร่างที่ซับซ้อนกว่า โดยอาจจะทำการพัฒนาเพิ่มเติมแยกออกเป็น 2 แนวทางใหญ่ๆ ดังนี้

1. ทำการพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้กับการออกแบบเส้นทางการไหลภายในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้งให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น โดย
 - 1.1 ขยายโปรแกรมให้คำนวณ 3 มิติได้ เพื่อจะได้จำลองรูปร่างช่องทางไหลได้เหมือนจริงและยังศึกษาถึงพารามิเตอร์ได้หลากหลายขึ้น เช่น อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่องทางไหล หรือ รูปร่างของช่องทางไหลแบบอื่นๆ ที่ซับซ้อนมากขึ้น เป็นต้น

- 1.2 เพิ่มการคำนวณในส่วนของการตัดตัวได้ของของไหล เพื่อให้สามารถคำนวณของไหลซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงได้
- 1.3 เพิ่มการคำนวณในส่วนของการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต (Conjugate heat transfer) เพื่อให้ได้ลักษณะของปัญหาที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง
2. ทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้สามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาอื่นๆ ทางวิศวกรรมให้มีประสิทธิภาพและความถูกต้องเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะทำได้ดังนี้
 - 2.1 ปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ใช้คำนวณปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในสภาวะชั่วขณะ (Transient problem) ได้
 - 2.2 พัฒนาโปรแกรมให้สามารถใช้ได้กับรูปร่างที่ซับซ้อนซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานจริง เช่น ใช้พิกัดแบบกระชับขอบเขต (Body-fitted coordinates) ในการคำนวณ
 - 2.3 เพิ่มเติมแบบจำลองความปั่นป่วนที่สามารถทำนายพฤติกรรมบริเวณใกล้ผนังได้ดี เช่น แบบจำลอง Low Re $k-\omega$, $k-\bar{f}-v^2$ เป็นต้น เพื่อให้การคำนวณมีความเที่ยงตรงยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

1. Bergeles, G. and Athanassiadis, N. The flow past a surface-mounted obstacle. Journal of Fluids Engineering 105 (1983) : 461-463.
2. Tropea, C.D. and Gackstatter, R. The flow over two-dimensional surface-mounted obstacles at low Reynolds numbers. Journal of Fluids Engineering 107 (1985) : 489-494.
3. Antoniou, J. and Bergeles, G. Development of the reattached flow behind surface-mounted two-dimensional prisms. Journal of Fluids Engineering 110 (1988) : 127-133.
4. Liou, T. M., Chang, Y. and Hwang, D.W. Experimental and computational study of turbulent flows in a channel with two pairs of turbulence promoters in tandem. Journal of Fluids Engineering 112 (1990) : 302-310.
5. Durst, F., Founti, M. and Obi, S. Experimental and computational investigation of the two-dimensional channel flow over two fences in tandem. Journal of Fluids Engineering 110, (1988) : 48-54.
6. Acharya, S., Dutta, S., Myrum, T.A. and Baker, R.S. Turbulent flow past a surface-mounted two-dimensional rib. Journal of Fluids Engineering 116 (1994) : 238-246.
7. Panyarattana, K. and Putivisutisak, S. Numerical analysis of channel flow over two blocks in tandem arrangement. The 17th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, Phuket, Thailand (2002) : 172-177.
8. Aliaga, D.A., Lamb, J.P. and Klein, D.E. Convection heat transfer distributions over plates with square ribs from infrared thermography measurements. International Journal of Heat and Mass Transfer 37 (1994) : 363-374.

9. Acharya, S., Dutta, S. and Myrum, T.A. Heat transfer in turbulent flow past a surface-mounted two-dimensional rib. Journal of Heat Transfer 120 (1998) : 724-734.
10. Speziale, C.G. On nonlinear $k-l$ and $k-\varepsilon$ models of turbulence. Journal of Fluid Mechanics 178 (1987) : 459-475.
11. Launder, B.E. and Spalding, D.B. The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3 (1974) : 269-289.
12. Chieng, C.C. and Launder, B.E. On the calculation of turbulent heat transfer downstream from an abrupt pipe expansion. Numerical Heat Transfer 3 (1980) : 189-207.
13. Johnson, R.W. and Launder, B.E. Discussion of 'On the calculation of turbulent heat transfer downstream from an abrupt pipe expansion'. Numerical Heat Transfer 5 (1982) : 493-496.
14. Meinders, E.R., Hanjalic, K. and Martinuzzi, R.J. Experimental study of the local convection heat from a wall-mounted cube in turbulent channel flow. Journal of Heat Transfer 121 (1999) : 564-573.
15. Meinders, E.R. and Hanjalic, K. Vortex structure and heat transfer in turbulent flow over a wall-mounted matrix of cubes. International Journal of Heat and Fluid Flow 20 (2000) : 255-267.
16. Liou, T. M. and Kao, C.F. Symmetric and asymmetric turbulent flows in a rectangular duct with a pair of ribs. Journal of Fluids Engineering 110 (1988) : 373-379.
17. Acharya, S., Dutta, S., Myrum, T.A. and Baker, R.S. Periodically developed flow and heat transfer in a ribbed duct. International Journal of Heat and Mass Transfer 36 (1993) : 2069-2082.

18. Han, J.C. Heat transfer and friction characteristics in rectangular channels with rib turbulators. Journal of Heat Transfer 110 (1988) : 321-328.
19. Sloan, D.G. Smith, P.G. and Smoot, L.D. Modelling of swirl in turbulent flow system. Progress in Energy Combustion Science 12 (1986) : 163-250.
20. Wilcox, D. C. Turbulence Modeling for CFD. California : DCW Industries Inc., 1993.
21. Bredberg, B., Peng, S.H. and Davison, L. An improved $k - \omega$ turbulence model applied to recirculating flow. International Journal of Heat and Fluid Flow 23 (2003) : 731-743.
22. Mansour, N.N., Kim, J. and Moin, P. Reynolds stress and dissipation rate budgets in turbulent channel flow. Journal of Fluid Mechanics 194 (1988) : 15-44.
23. Durbin, P.A. and Reif, B.A.P. Statistical theory and modeling for turbulent flows Chichester : John wiley & Sons, 2001.
24. Peng, S.H., Davidson, L. and Holmberg, S. A modified low-Reynolds-number $k - \omega$ model for recirculating flow. Journal of Fluids Engineering 119 (1996) : 867-875.
25. Zheng, X., Liao, C., Sung, C.H. and Huang, T.T. Multigrid computation of incompressible flows using two-equation turbulence models : Part I - numerical method. Journal of Fluids Engineering 119 (1997) : 893-899.
26. Wilcox, D.C. Multiscale model for turbulent flows. AIAA Journal 26 (1988) : 1311-1320.
27. Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method. London : Longman Scientific & Technical, 1995.

28. Courant, R., Isaacson, E. and Rees, M. On the solution of non-linear hyperbolic differential equations by finite differences. Communications on Pure and Applied Mathematics 5 (1952) : 243.
29. Patankar, S.V. and Spalding, D.B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. International Journal of Heat and Mass Transfer 15 (1972) : 1987.
30. Patankar, S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences. New York : Hemisphere, 1980.
31. Davidson, L. and Farhanieh, B. A Finite-volume Code Employing Collocated Variable Arrangement and Cartesian Velocity Components for Computation of Fluid Flow and Heat Transfer in Complex Three-Dimensional Geometries. Sweden : Chalmers University of Technology, Department of Applied Thermodynamics and Fluid Mechanics, 1995.
32. Sparrow, E.M., Lloyd, J.P. and Hixon, C.W. Experiments on turbulent heat transfer in an asymmetrically heated rectangular duct. Journal of Heat Transfer 88 (1966) : 170-174.
33. Harnett, J.P., Koh J.C.Y. and McComas, S.T. A comparison of predicted and measured friction factors for turbulent flow through rectangular ducts. Journal of Heat Transfer 85 (1962) : 82-88.
34. Avancha, R.V.R. and Pletcher, R.H. Large eddy simulation of the turbulent flow past a backward-facing step with heat transfer and property variations. International Journal of Heat and Fluid Flow 23 (2002) : 601-614.

35. Liou, T.M. and Hwang, J.J. Turbulent heat transfer augmentation and friction in periodic fully developed channel flows. Journal of Heat Transfer 114 (1992) : 56-64.
36. Rohsenow, W.M. and Choi, H.Y. Heat Mass and Momentum Transfer, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice- Hall, 1969.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตติศักดิ์ คู่วรัญญู เกิดเมื่อวันที่ 7 เดือนกรกฎาคม พุทธศักราช 2522 จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย