

การจำลองการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนในเตาเผา

SIMULATION OF TURBULENT SWIRLING FLOWS IN A
COMBUSTOR



ปริญญา รวมภักดีกุล
PARINYA RUAMPAKDEEKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 35964

จัน, เดือน, ปี- 3 ก.ค. 2543

ISBN 974-622-780-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SIMULATION OF TURBULENT SWIRLING FLOWS IN A
COMBUSTOR**



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

2000

ISBN 974-622-780-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2000

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนในเตาเผา
นักศึกษา	นายปริญญา รวมภักดีกุล
รหัสประจำตัว	41062020
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

การประยุกต์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจำลองการไหลแบบหมุนวนในเตาเผา ได้ถูกแสดงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับการไหลแบบหมุนวนที่อัดตัว ไม่ได้ก็ได้นำเสนออย่างละเอียด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างความเข้าใจในพฤติกรรมของการไหลในเตาเผาให้ดีขึ้น โดยได้นำวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมมาใช้ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\varepsilon$ (standard $k-\varepsilon$ model) และ algebraic stress model (ASM) ในการคำนวณทั้งหมด รูปแบบผลต่างของอนุพันธ์ลำดับที่สอง คือ quadratic upstream interpolation for convective kinematics (QUICK) และ second order upwind (SOU) ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับรูปแบบผลต่างของอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งซึ่งคือ upwind และ hybrid เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแพร่กระจายเชิงตัวเลขต่อผลลัพธ์ที่คำนวณได้ ในการศึกษาการไหลนี้ได้กระทำภายในเตาเผา 3 รูปแบบ ผลลัพธ์ของการทำนายรูปร่างของความเร็วตามแนวแกน แนวรัศมี และแนวสัมผัสถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองที่ได้จากการวัดโดย laser doppler velocimeter (LDV) ผลจากการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการทำนายโดยแบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 2 แบบ มีความสอดคล้องค่อนข้างดีกับข้อมูลจากการทดลอง แต่ ASM ให้ผลการทำนายที่ดีกว่าแบบจำลอง $k-\varepsilon$ นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่า numerical schemes มีอิทธิพลอย่างมากเมื่อใช้ร่วมกับ ASM ต่อการไหลที่มี recirculation สุดท้ายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่า β บน ASM ซึ่งพบว่าค่า β นั้นมีอิทธิพลทำให้ผลที่ทำนายได้เปลี่ยนแปลงไปบ้างเล็กน้อย

Thesis Title	Simulation of Turbulent Swirling Flows in a Combustor
Student	Mr. Parinya Ruampakdeekul
Student ID.	41062020
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2000
Thesis Advisor	Asist.Prof.Dr. Pongjet Promvonge

ABSTRACT

The application of a mathematical model for the simulation of strongly swirling flows in combustors is presented in this thesis. The modelling of turbulence for incompressible, swirling flows used in the simulation is discussed. The work has been carried out in order to provide an understanding of the physical behaviour of the flow in combustors. A staggered Finite Volume approach with standard $k - \varepsilon$ model and an algebraic stress model (ASM), was used to carry out all the computations. To investigate the effects of numerical diffusion on the predicted results, second-order differencing schemes, namely, the quadratic upstream interpolation for convective kinematics (QUICK) and second order upwind (SOU) were used to compare with the first-order upwind and hybrid schemes. Three different flow types of combustors were used in the simulation. The results of predicted axial, radial and tangential velocity profiles are compared with available LDV experimental data. The computations showed that results predicted by both turbulence models generally are in good agreement with measurements but the ASM performs better agreement between the numerical results and experimental data. Besides, use of numerical schemes with the ASM leads to high influence on flows with recirculation. Finally, computation with different values of β of the ASM results in small effects on predicted solutions.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำตั้งสอน, คำแนะนำ, คำปรึกษา และความกรุณาของ ผศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์และที่ปรึกษา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร.จารุวัตร เจริญสุข สำหรับคำสอนและคำแนะนำที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงความรู้ที่อยู่นอกเหนือจากตำราเรียน และขอขอบพระคุณครุบาอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ลูกศิษย์คนนี้ ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กุลธร ศิลปบรรเลง ที่ได้สละเวลาอันมีค่าเดินทางมาเป็นกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงคำแนะนำอันมีค่าต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ประภาส อุคคกิมพันธ์ุ สำหรับความเมตตาช่วยเหลือในการสอบวิทยานิพนธ์ และคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ นายปัญญา แดงวิไลลักษณ์, นายรังสรรค์ พันธุ์เพชร, นายนิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล, นายกิตติพงษ์ จันทรมณี, นายสมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด, นายสมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์ และเพื่อนๆปริญญาโททุกคน รวมถึงปริญญาตรีที่ให้คำปรึกษา และช่วยทำให้มีกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอแสดงความขอบคุณต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (ส.ก.ว.) เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยแก่งานนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา และมารดาของผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่งที่เฝ้าเลี้ยงดู, อบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จสมความตั้งใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้แล้ว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเช่นนี้ ซึ่งคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้พระคุณทุกท่าน ขออำนาจของคุณพระศรีรัตนตรัยอวยพรความสุขสวัสดิ์แก่ทุกท่าน

ปริญญา รวมกัศิกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการสัญลักษณ์.....	X
รายการคำย่อ.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	8
3.1 บทนำ.....	8
3.2 สมการที่เกี่ยวข้อง	9
3.3 สมการการไหลแบบปั่นป่วน.....	10
3.4 Turbulence Models.....	10
3.4.1 Reynolds Stress Model (RSM).....	11
3.4.1.1 Model ของ The Pressure-Strain Rate Correlation Term	12
3.4.1.2 Model ของ The Turbulent Diffusion Term	12
3.4.1.3 Model ของ The Turbulent Dissipation Rate Term.....	12
3.4.2 The Standard $k - \epsilon$ Model	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4.2.1	สมการ Turbulent Kinetic Energy (k)	13
3.4.2.1.1	Model ของ The Turbulent Diffusion Term บนสมการ k	14
3.4.2.1.2	Model ของ The Isotropic Turbulent Dissipation Rate Term บนสมการ k	14
3.4.2.2	สมการ Dissipation Rate (ε)	14
3.4.2.2.1	Model ของเทอมต่างๆ บนสมการ ε	15
3.4.2.3	Boussinesq Approximation	15
3.4.3	Algebraic Stress Model (ASM)	16
3.5	สรุป	17
บทที่ 4	การประยุกต์ Finite Volume Method	18
4.1	บทนำ	18
4.2	การประยุกต์วิธี Finite Volume	18
4.3	Discretisation ของสมการ	19
4.3.1	Convection Term	19
4.3.1.1	Upwind Scheme	20
4.3.1.2	Hybrid Scheme	20
4.3.1.3	Second Order Upwind Scheme (SOU)	21
4.3.1.4	QUICK Scheme	21
4.3.2	Diffusion Term	22
4.3.3	Source Term	22
4.4	Final Form ของ Discretised Equations	22
4.5	Boundary Conditions	23
4.5.1	Inlet Boundary Conditions	24
4.5.2	Outlet Boundary Conditions	24
4.5.3	Axisymmetry Conditions	24
4.5.4	Wall Boundary Conditions	24
4.6	กระบวนการหาคำตอบ (Solution Procedure)	26
4.6.1	การหาคำตอบโดยใช้วิธี TDMA	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.2 The SIMPLE Algorithm.....	27
4.7 สรุป	29
บทที่ 5 การจำลองการไหลในเตาเผา.....	30
5.1 บทนำ.....	30
5.2 เตาเผาของ So <i>et. al.</i> (1984) กรณีที่ไม่มีกรณีการฉีดอากาศ	30
5.2.1 การจำลองการไหลโดย $k-\varepsilon$ model	32
5.2.2 การจำลองการไหลโดย Algebraic Stress Model (ASM).....	32
5.3 เตาเผาของ So <i>et. al.</i> (1984) กรณีที่มีการฉีดอากาศ.....	39
5.3.1 การจำลองการไหลโดย $k-\varepsilon$ model	39
5.3.2 การจำลองการไหลโดย Algebraic Stress Model (ASM).....	42
5.4 เตาเผาของ Ahmed (1997).....	48
5.4.1 การจำลองการไหลโดย $k-\varepsilon$ model	50
5.4.2 การจำลองการไหลโดย Algebraic Stress Model (ASM).....	56
5.5 สรุป	65
บทที่ 6 การศึกษาผลกระทบของตัวแปรค่า β ในการจำลองการไหล.....	66
6.1 บทนำ.....	66
6.2 เตาเผาของ So <i>et. al.</i> (1984) กรณีที่ไม่มีกรณีการฉีดอากาศ	66
6.3 เตาเผาของ So <i>et. al.</i> (1984) กรณีที่มีการฉีดอากาศ.....	67
6.4 เตาเผาของ Ahmed (1997).....	69
6.5 สรุป	71
บทที่ 7 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
7.1 สรุปผลงานวิจัย.....	73
7.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป.....	73
บรรณานุกรม.....	74
ภาคผนวก บทความที่ได้รับการตีพิมพ์	77

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์และสิ่งพิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 100 การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
3.1 สรุปสมการที่จำเป็นต้องใช้.....	17
4.1 Inlet Boundary Conditions	24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ลักษณะของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน.....	8
4.1 ลักษณะการวาง cell ใน staggered grid.....	19
5.1 ลักษณะเตาเผาของ So <i>et. al.</i> (1984) และ computational domain.....	30
5.2 ความเป็นอิสระของกริดต่อความเร็วที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส.....	31
5.3 กราฟการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model (ก) ความเร็วตามแนวแกน(ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส.....	33
5.4 Contour plot ของ stream function ทำนายโดย upwind scheme และ $k-\varepsilon$ model.....	34
5.5 Vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย upwind scheme และ $k-\varepsilon$ model.....	34
5.6 กราฟการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส.....	35
5.7 Contour plot ของ stream function ทำนายโดย upwind scheme และ ASM.....	37
5.8 Vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย upwind scheme และ ASM.....	37
5.9 กราฟเปรียบเทียบผลการทำนายระหว่าง $k-\varepsilon$ model กับ ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส.....	38
5.10 ความเป็นอิสระของกริดต่อความเร็วที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส.....	40
5.11 กราฟการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส.....	42
5.12 Contour plot ของ stream function ทำนายโดย upwind scheme และ $k-\varepsilon$ model.....	43
5.13 Vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย upwind scheme และ $k-\varepsilon$ model.....	43
5.14 กราฟการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส.....	45
5.15 Contour plot ของ stream function ทำนายโดย upwind scheme และ ASM.....	46
5.16 Vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย upwind scheme และ ASM.....	46
5.17 กราฟเปรียบเทียบผลการทำนายระหว่าง $k-\varepsilon$ model กับ ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส.....	47
5.18 ลักษณะเตาเผาของ Ahmed (1997) และ computational domain.....	49
5.19 ความเป็นอิสระของกริดต่อความเร็วตามแนวแกนที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.20 ความเป็นอิสระของกริดต่อความเร็วตามแนวรัศมีที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model.....	51
5.21 ความเป็นอิสระของกริดต่อความเร็วตามแนวสัมผัสที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model	52
5.22 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วตามแนวแกน ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model กับผลการทดลอง	53
5.23 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วตามแนวรัศมีทำนายโดย $k-\varepsilon$ model กับผลการทดลอง	54
5.24 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วตามแนวสัมผัสทำนายโดย $k-\varepsilon$ model กับผลการทดลอง .	55
5.25 Contour plot ของ stream function ทำนายโดย QUICK scheme และ $k-\varepsilon$ model	57
5.26 Vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย QUICK scheme และ $k-\varepsilon$ model	57
5.27 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วตามแนวแกน ทำนายโดย ASM กับผลการทดลอง	58
5.28 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วตามรัศมีทำนายโดย ASM กับผลการทดลอง.....	59
5.29 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วตามแนวสัมผัสทำนายโดย ASM กับผลการทดลอง	60
5.30 Contour plot ของ stream function ทำนายโดย upwind scheme และ ASM	61
5.31 Vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย upwind scheme และ ASM.....	61
5.32 กราฟเปรียบเทียบผลของความเร็วตามแนวแกนที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model และ ASM	62
5.33 กราฟเปรียบเทียบผลของความเร็วตามแนวรัศมีที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model และ ASM.....	63
5.34 กราฟเปรียบเทียบผลของความเร็วตามแนวสัมผัสที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model และ ASM.....	64
6.1 รูปกราฟการเปลี่ยนแปลงของ (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส กับผลการทดลอง.....	67
6.2 รูปกราฟการเปลี่ยนแปลงของ (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส กับผลการทดลอง.....	68
6.3 กราฟเปรียบเทียบผลของค่า β ของความเร็วตามแนวแกน กับผลการทดลอง	70
6.4 กราฟเปรียบเทียบผลของค่า β ของความเร็วตามแนวรัศมี กับผลการทดลอง.....	71
6.5 กราฟเปรียบเทียบผลของค่า β ของความเร็วตามแนวสัมผัส กับผลการทดลอง	72

รายการสัญลักษณ์

a	สัมประสิทธิ์ในสมการ discretization
A	พื้นที่ (area)
A_{ij}	convection quantity ที่เพิ่มขึ้นจาก Rodi's approximation
D	diffusion flux, เส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter)
\bar{D}'_j	the turbulent diffusion term ของสมการ k
\bar{D}'_ϵ	the turbulent diffusion term ของสมการ ϵ
\bar{D}'_{ijk}	the turbulent diffusion term
E	wall roughness parameter
F	convection flux
F/A	fuel-air ratio
k	turbulent kinetic energy (TKE)
ℓ	length scale
L	characteristic length
p	ความดัน (pressure)
Pe	Peclet number
\bar{P}	the turbulent production term ของสมการ k
\bar{P}'_ϵ	the production term ของสมการ ϵ
\bar{P}'_{ij}	the turbulent production term
r	radial co-ordinate, รัศมี (radius)
Re	Reynolds number
S	swirl number, source term
S_{ij}	strain tensor
t	เวลา (time)
T_i	turbulent intensity
u	ความเร็วตามแนวแกน (axial velocity)
u_τ	friction velocity
u_i	velocity vector
U	normalized velocity
v	ความเร็วตามแนวรัศมี (radial velocity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

V	ปริมาตร
w	ความเร็วตามแนวสัมผัส (tangential velocity)
x	axial co-ordinate
y_p	ระยะที่วัดจากผนัง
ϕ	ตัวแปรอิสระใดๆ
σ_{ij}	deviatoric part ของ viscous stress tensor
σ_ϕ	Schmidt or Prandtl numbers for the scalar ϕ
$\tau_{ij}, \overline{u_i u_j}$	second-moment, Reynolds Stress
δ_{ij}	kronecker delta tensor
Π_{ij}	the pressure-strain rate correlation term
Φ_ε	the destruction term ของสมการ ε
ρ	ความหนาแน่น (density)
μ	ความหนืด (viscosity)
ν	ความหนืดจลน์ (kinetic viscosity)
ε	isotropic dissipation rate
ε_{ij}	local dissipation rate term
κ	von Karman constant
β, λ	turbulence model constant
ψ	ค่าคงที่ใดๆระหว่าง 0 ถึง 1
\mathcal{S}	fluctuating momentum equation
Γ	diffusion coefficient

ตัวห้อย (Subscripts)

e, w, n, s	control volume face ระหว่าง P และ E, P และ W, P และ N และ P และ S
E, W, N, S	จุดที่อยู่ข้างเคียงบน east, west, north และ south
i, j, k	cartesian indices
j	หัวฉีด (jet)
nb	จุดต่อที่อยู่ข้างเคียง
ref, o	reference point

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

T turbulent

ตัวยก (Superscripts) และ Overbars

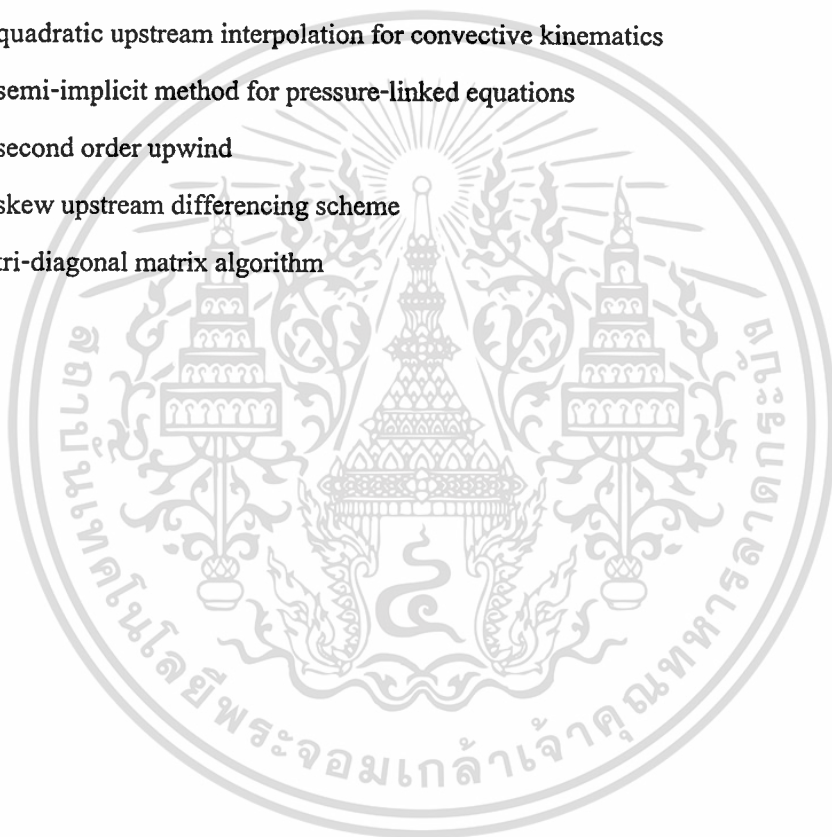
- ' ส่วนการสั่นที่ได้จาก Reynolds decomposition
- * current value of a variable during the iteration
- + ค่า normalized ใน wall function
- ส่วนค่าเฉลี่ยที่ได้จาก Reynolds decomposition



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อ

ASM	algebraic stress model
CRZ	center recirculation zone
DNS	direct numerical simulation
LDV	laser doppler velocimeter
LES	large-eddy simulation
RSM	Reynolds stress model
QUICK	quadratic upstream interpolation for convective kinematics
SIMPLE	semi-implicit method for pressure-linked equations
SOU	second order upwind
SUDS	skew upstream differencing scheme
TDMA	tri-diagonal matrix algorithm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

การไหลส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติและในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งได้มีการศึกษาในรูปแบบต่างๆตลอดศตวรรษที่ผ่านมา เพื่อที่จะสร้างความเข้าใจในพฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้น และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านต่างๆ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การไหลแบบหมุนวนความเร็วสูงได้ถูกนำมาใช้ในงานทางด้านอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก เช่น เตาเผา หัวเผา เครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน เครื่องยนต์กังหันก๊าซ และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ ในระบบการเผาไหม้นั้น การหมุนวนได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความเสถียรของเปลวไฟ เพิ่มการผสมคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงและอากาศ และช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน นอกเหนือจากช่วยเพิ่มเวลาอยู่ในเตาของเชื้อเพลิง (fuel residence time) และช่วยลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้นี้ เพราะว่าการหมุนวนช่วยเหนี่ยวรั้งให้เกิดการไหลวนไปมาในบริเวณกึ่งกลางของเตา (central recirculation zone) เป็นผลให้เกิดความปั่นป่วนอย่างรุนแรงขึ้นในแต่ละชั้นระหว่างการไหลวนไปมาและการไหลของชั้นภายนอกซึ่งช่วยทำให้เปลวไฟในเตาเสถียรยิ่งขึ้น โครงสร้างของความปั่นป่วนในการไหลแบบหมุนวนความเร็วสูงนี้โดยทั่วไปมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนมาก การไหลวนไปมา (recirculation) อันเป็นผลจากการหมุนวนสามารถนำไปสู่ผลต่อไปนี้

- ก. เพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้
- ข. ลดมลภาวะที่ปล่อยออก (NO_x , เขม่า, สารไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด)
- ค. ลดความยาวของเปลวเพลิงและเป็นผลให้เตาเผามีขนาดเล็กลง
- ง. เพิ่มความเสถียรของการเผาไหม้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ทำการจำลองการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนในเตาเผา โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
2. ทำการศึกษาเปรียบเทียบ numerical differencing schemes ที่มีผลต่อความแม่นยำในการทำนายการไหล
3. ทำการศึกษาความสามารถของ turbulence model ในการจำลองการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (incompressible flow)
2. เป็นการไหลหนืด (viscous flow)
3. เป็นการไหลแบบอุณหภูมิคงที่หรือสม่ำเสมอ (isothermal Flow)
4. เป็นการไหลแบบคงที่ (steady flow)
5. เป็นการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวน (turbulent swirling flow)

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

1. ค่าคุณสมบัติต่างๆ ในการไหลแบบปั่นป่วนนั้นสามารถแยกได้ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ย และส่วนที่แทนผลของการสั่น
2. เมื่อทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time averaging) แล้ว ส่วนที่แทนผลของการสั่นนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์
3. เทอม Reynolds stress ที่เพิ่มขึ้นมาจากการทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time averaging) จะถูกจำลองโดยใช้ turbulence model

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการจำลองการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนในเตาเผา 3 ชนิด โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขที่เรียกว่าวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume)
2. ทำการศึกษาเปรียบเทียบ numerical schemes ทั้งหมด 4 ชนิด คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU
3. ในการจำลองการไหลนี้จะใช้ แบบจำลองความปั่นป่วน (turbulence model) 2 แบบ คือ $k - \epsilon$ model และ algebraic stress model (ASM)
4. ผลที่ได้จากการจำลองจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองที่วัดโดย LDV เพื่อชี้ถึงความแม่นยำในการจำลองการไหล

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ทำการศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน รวมถึง แบบจำลองความปั่นป่วน (turbulence model)
2. ทำการศึกษาวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume) รวมถึงหลักการในการใช้
3. ทำการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงเลือกการทดลองที่เหมาะสม (เลือกเฉพาะที่ใช้ LDV ในการวัด) มาใช้เป็นแบบในการจำลองการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการคำนวณและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่เลือกไว้
5. สรุปผลการจำลองทั้งหมดที่ได้

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทำนายการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง เพื่อใช้ในการศึกษา
2. เป็นโปรแกรมพื้นฐานเพื่อพัฒนาต่อในการศึกษาการผสมผสาน mixing
3. เป็นโปรแกรมพื้นฐานในการพัฒนาต่อไปยังการจำลองการเผาไหม้ต่อไป



บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในหลายทศวรรษที่ผ่านมา เพราะเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรม โดยได้มีนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยหลายๆท่านที่ได้พยายามที่ศึกษาปัญหานี้ในหลายประเทศทั่วโลก

Lockwood *et. al.* (1974) ทำการจำลองการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผา โดยเปลี่ยนแปลงค่า F/A , รูปร่างของเตาเผา, ค่า Reynolds number และค่า swirl number พบว่าได้ผลสอดคล้องกับการทดลองและบริเวณที่เกิดการเผาไหม้อยู่ที่บริเวณ center recirculation zone (CRZ) ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับ Khalil *et. al.* (1975) ที่ทำการจำลองการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติในเตาเผา โดยทำการเปรียบเทียบ eddy-break up model 3 แบบ จากการทำนายมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง

El-Mahallawy and Habib (1977) ได้ศึกษาเชิงทดลองและจำลองการผสมในเตาเผา โดยทำการเปลี่ยนแปลงมุมของ swirler และสัดส่วนของของผสม โดยจากการจำลองนั้นมีความสอดคล้องกับผลจากการทดลองเมื่อมุมของ swirler มีค่าต่ำ เช่นเดียวกับ Serag-Eldin and Spalding (1979) ได้จำลองการเผาไหม้ก๊าซในห้องเผาไหม้ของกังหันก๊าซ 3 มิติ โดยใช้ $k-\epsilon$ model จากการคำนวณนั้นสามารถทำนายแนวโน้มได้ แต่ค่าไม่ใกล้เคียงผลการทดลองมากนัก เนื่องจากใช้ $k-\epsilon$ model และ Boysan *et. al.* (1982) ได้จำลองการไหลในไซโคลน โดยใช้ algebraic stress model (ASM) ร่วมกับ skew upstream differencing scheme (SUDES) สำหรับ convection term ให้ผลสอดคล้องกับการทดลองของเขา

Rhode *et. al.* (1983) ทำการศึกษาการไหลปั่นป่วนในเตาเผา โดยวิธี visualization พบว่าเกิด central recirculation ขึ้นเมื่อมี swirling flow และมีขนาดใหญ่ขึ้นตามมุมที่เพิ่มของ swirl vane angle ซึ่งส่งผลทำให้ corner recirculation มีขนาดเล็กลงตามลำดับ ในปีถัดมา So *et. al.* (1984) ได้ทุนจาก NASA เพื่อศึกษาเชิงทดลองการไหลปั่นป่วนในเตาจำลองอันหนึ่ง โดยได้ศึกษาพฤติกรรมของการฉีดและไม่ฉีดอากาศหรือฮีเลียมที่จุดกึ่งกลาง รวมถึงการไหลผสมระหว่างอากาศและฮีเลียม พบว่าการหมุนวนมีอิทธิพลต่อการผสมอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ค่า swirl number สูงๆ และ Halthore and Gouldin (1986) ทำการวัดคุณสมบัติต่างๆ ในเตาเผาไหม้ก๊าซ โดยใช้ laser doppler velocimeter (LDV) จากการทดลองมีลักษณะ reaction zone เป็นชั้นหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร เป็นรูป paraboloidal ที่บริเวณ central recirculation ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการผสมกันของเชื้อเพลิงกับอากาศอย่างรุนแรง

Kim and Chung (1988) ได้จำลองการไหลปั่นป่วนแบบ strong swirl ($S = 0.79$) ของหัวฉีด โดยใช้ algebraic stress model (ASM) และ $k-\epsilon$ model เปรียบเทียบกัน จากการจำลองพบว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นใบเซอร์เบียนขณการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

algebraic stress model (ASM) มีประสิทธิภาพดีกว่า $k - \varepsilon$ model และให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า เช่นเดียวกับ Hogg and Leschziner (1989) ซึ่งได้ทำการจำลองการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวน โดยใช้ Reynolds stress model (RSM) เปรียบเทียบกับ $k - \varepsilon$ model จากการวิจัยชี้ให้เห็นว่า Reynolds stress model (RSM) ทำนายได้ดีกว่า $k - \varepsilon$ model ซึ่งสอดคล้องกับ Jones and Pascau (1989) ที่จำลองการไหลในเตาอันเดียวกัน คือ เตาของ So *et. al.* (1984) โดยใช้ Reynolds stress model (RSM) และ $k - \varepsilon$ model เช่นเดียวกัน ได้สรุปว่าในการจำลองการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนนั้นควรใช้ Reynolds stress model (RSM) จะทำนายได้ดีที่สุด

Kitoh (1990) ได้ทำการวัดการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนในท่อตรง จากผลที่ได้การไหลในลักษณะนี้มีคุณสมบัติขึ้นกับทิศทาง (anisotropic) และพบว่าความเร็วตามแนวสัมผัส (tangential velocity) นั้นมีผลกระทบอย่างมากต่อลักษณะการไหล ต่อมา Ahmed and Nejad (1992) ได้วัดการไหลในเตาเผาทั้งกรณีที่มีการเผาไหม้และไม่มีการเผาไหม้ โดยใช้ laser doppler velocimeter (LDV) พบว่าการเผาไหม้มีอิทธิพลต่อความเร็วอย่างมาก โดยจากการทดลอง corner recirculation มีขนาดเล็กลงประมาณ 44% เมื่อมีการเผาไหม้

Hwang *et. al.* (1993) ทำการจำลองการไหลปั่นป่วนในเตาเผา โดยใช้ $k - \varepsilon$ model และ nonlinear $k - \varepsilon$ model เปรียบเทียบกันพบว่าทั้ง 2 models ทำนายได้ค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก Lin and Lu (1994) ได้จำลองการไหลใน gas turbine combustor 3 มิติ โดยใช้ Reynolds stress model (RSM) เปรียบเทียบกับ $k - \varepsilon$ model สรุปว่า Reynolds stress model (RSM) นั้นสามารถจับพฤติกรรมการไหลบางอย่างได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับผลการทดลอง ในขณะที่ $k - \varepsilon$ model จับไม่ได้

Ahmed (1997a) ได้ทำการวัดการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนในเตาเผาจำลอง โดยใช้ laser doppler velocimeter (LDV) วัดค่าความเร็วเฉลี่ยและค่า Reynolds stresses เพื่อศึกษาการไหล พบว่าการไหลปั่นป่วนนั้นมีลักษณะขึ้นกับทิศทางอย่างมาก (highly anisotropic) และในปีเดียวกัน Ahmed (1997b) ได้วัดการไหลปั่นป่วนเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีที่มีการหมุนวนและไม่มีการหมุนวน สรุปว่ากรณีที่ไม่มีการหมุนวนนั้น มีการเกิด corner recirculation เพียงอย่างเดียว ในขณะที่กรณีที่มีการหมุนวนเกิดทั้ง corner recirculation และ central recirculation รวมทั้งค่า Reynolds stress ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการหมุนวนมาก

Fraser *et. al.* (1997) ทำการวัดการไหลในไซโคลนโดยใช้ laser doppler velocimeter (LDV) และจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม PHOENICS code ร่วมกับ $k - \varepsilon$ model และ modified $k - \varepsilon$ model เพื่อเปรียบเทียบกัน จากการศึกษพบว่า modified $k - \varepsilon$ model สามารถทำนายการไหลในไซโคลนได้ดีกว่า $k - \varepsilon$ model แต่อย่างไรก็ตาม modified $k - \varepsilon$ model ก็ยังทำนายผลได้ไม่ดีเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นหลักในการออกแบบได้ ต่อมา Xia *et. al.* (1999) ได้ทำการทดลองวัดการไหลของน้ำในเตาเผาจำลอง โดยใช้ laser doppler velocimeter (LDV) และทำการจำลองการไหล

โดยใช้โปรแกรม CFX code คำนวณ Reynolds stress model (RSM) ร่วมกับ QUICK scheme ซึ่งมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี และพบว่าในการไหลที่มีความซับซ้อนจะไม่เกิด solid body rotation

Holzapfel *et. al.* (1999) ได้ทำการวัดการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนในเตาเผาจำลอง ใช้ hot-wire anemometer วัดค่าความเร็วเฉลี่ยและค่า Reynolds stress โดยได้ทำเปลี่ยนแปลงค่า swirl number ไป 2 ค่าสรุปว่า การเกิดความเร็วตามแนวสัมผัส (tangential velocity) ส่งผลให้ความเร็วตามแนวรัศมี (radial velocity) ลดลง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดได้ชี้ให้เห็นความสามารถของ Reynolds stress model (RSM) แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการจำลองการไหลของเตาของ So *et. al.* (1984) และ Ahmed (1997a) ซึ่งในเตาของ So *et. al.* (1984) นั้น Jones and Pascau (1989) ได้ทำการจำลองการไหลโดยใช้ Reynolds stress model (RSM) ไปแล้ว ในที่นี้จึงเลือกที่ใช้ algebraic stress model (ASM) เปรียบเทียบกับ $k - \epsilon$ model ในการจำลองการไหลในเตาเผาทั้ง 2 เตา

ตารางที่ 2.1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี	ผู้ทำการวิจัย	งานวิจัยที่ทำ
1974	Lockwood <i>et. al.</i>	ทำการจำลองการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผา โดยใช้ $k - \epsilon$ model
1975	Khalil <i>et. al.</i>	ทำการจำลองการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติในเตาเผา โดยทำการเปรียบเทียบ eddy-break up model 3 แบบ
1977	El-Mahallawy and Habib	ทำการศึกษาเชิงทดลองและจำลองการผสมในเตาเผา โดยทำการเปลี่ยนแปลงมุมของ swirler และสัดส่วนของของผสม
1979	Serag-Eldin and Spalding	ทำการจำลองการเผาไหม้ก๊าซในห้องเผาไหม้ของกังหันก๊าซ 3 มิติ
1982	Boysan <i>et. al.</i>	จำลองการไหลในไซโคลอน โดยใช้ algebraic stress model (ASM)
1983	Rhode <i>et. al.</i>	ทำการศึกษาการไหลปั่นป่วนในเตาเผา โดยวิธี visualization
1984	So <i>et. al.</i>	ทำการศึกษาการไหลปั่นป่วนในเตาจำลอง โดยได้ศึกษาผลของชนิดและโมดูลอากาศ รวมถึงการไหลผสมระหว่างอากาศและซีลียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

1986	Halthore and Gouldin	ทำการวัดคุณสมบัติต่างๆ ในเตาเผาไหม้ก๊าซ โดยใช้ laser doppler velocimeter (LDV)
1988	Kim and Chung	จำลองการไหลปั่นป่วนของหัวฉีด โดยใช้ algebraic stress model (ASM) และ $k - \varepsilon$ model เปรียบเทียบกัน
1989	Hogg and Leschziner	จำลองการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวน โดยใช้ Reynolds stress model (RSM) เปรียบเทียบกับ $k - \varepsilon$ model
1989	Jones and Pascau	จำลองการไหล โดยใช้ Reynolds stress model (RSM) และ $k - \varepsilon$ model เปรียบเทียบกัน
1990	Kitoh	ทำการวัดการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนในท่อตรง
1992	Ahmed and Najad	ทำการวัดคุณสมบัติต่างในเตาเผากรณีที่มีการเผาไหม้ และไม่มีเผาไหม้ เปรียบเทียบกัน
1993	Hwang <i>et. al.</i>	ทำการจำลองการไหลปั่นป่วนในเตาเผา โดยใช้ $k - \varepsilon$ model และ nonlinear $k - \varepsilon$ model เปรียบเทียบกัน
1994	Lin and Lu	จำลองการไหลใน gas turbine combustor 3 มิติ โดยใช้ Reynolds stress model (RSM) เปรียบเทียบกับ $k - \varepsilon$ model
1997a	Ahmed	ทำการวัดการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนในเตาเผาจำลอง โดยใช้ laser doppler velocimeter (LDV)
1997b	Ahmed	ทำการวัดการไหลปั่นป่วนเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีที่มีการหมุนวนและไม่มีการหมุนวน
1997	Fraser <i>et. al.</i>	ทำการวัดการไหลในไซโคลนโดยใช้ laser doppler velocimeter (LDV) และใช้โปรแกรม PHOENICS code คำนวณ $k - \varepsilon$ model และ modified $k - \varepsilon$ model เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง
1999	Xia <i>et. al.</i>	ทำการทดลองวัดการไหลในเตาเผาโดยใช้ laser doppler velocimeter (LDV) และใช้โปรแกรม CFX code คำนวณ Reynolds stress model (RSM) เปรียบเทียบกัน
1999	Holzapfel <i>et. al.</i>	วัดการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนในเตาเผาจำลอง ใช้ hot-wire anemometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

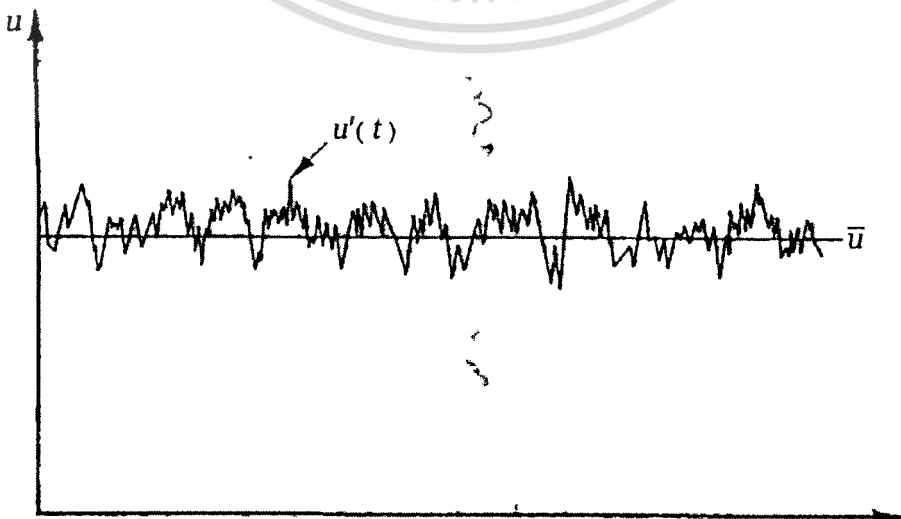
ทฤษฎี

3.1 บทนำ

ปัญหาส่วนใหญ่ในทางปฏิบัติของปัญหาอากาศพลศาสตร์และของไหลทั่วไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยตลอดศตวรรษที่ผ่านมาได้มีความพยายามศึกษาถึงลักษณะทางกายภาพของการไหลเพื่อทำนายและควบคุมการไหล ความพยายามเหล่านั้นรวมเรียกว่า “ ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วน (turbulence problem) ” ซึ่งการหาคำตอบที่ถูกต้องสมบูรณ์นั้นยังไม่อาจทำได้ ในช่วงต้นของศตวรรษที่ผ่านมา ทฤษฎีและการทดลองส่วนใหญ่ได้กระทำโดยนักวิทยาศาสตร์หลายท่าน อย่างไรก็ตามยังไม่อาจสร้างความเข้าใจถึงลักษณะปัญหาได้อย่างสมบูรณ์ และผลการวิเคราะห์ที่ได้ก็จำกัดเฉพาะบางกรณีเท่านั้น

ซูเปอร์คอมพิวเตอร์จึงเป็นความหวังของเหล่านักวิทยาศาสตร์เพื่อใช้ทำการคำนวณสมการ Navier-Stokes equations โดยตรงเพื่อแก้ปัญหการไหลแบบปั่นป่วน แต่โชคร้ายที่ว่าถึงแม้ใช้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ที่ดีที่สุดขณะนี้ การทำ direct numerical simulation (DNS) บนการไหลที่มีความซับซ้อนก็ยังเป็นไปได้ในอนาคคอันใกล้ เพราะไม่สามารถแก้ทุก scale ในการไหลได้ทั้งหมด การประมาณ small scale ด้วย model และทำการคำนวณ large scale โดยตรงที่เรียกว่า large-eddy simulation (LES) ก็ยังยากและไม่คุ้มในการทำ

โดยปรกติแล้วในการไหลปั่นป่วนนั้น มีผลทำให้คุณสมบัติต่างๆ ล้นแบบไม่แน่นอนและขึ้นกับเวลา (unsteady) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ทำให้ยากต่อการหาคำตอบ ฉะนั้นจึงคิดว่าคุณสมบัติต่างๆ ที่



สนใจนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (Reynolds decomposition) คือ ส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยที่ไม่ขึ้นกับเวลา \bar{u} กับส่วนที่แทนผลของการสั่นที่ขึ้นกับเวลา u' ซึ่งทั่วไปแล้วในการคำนวณทำได้โดยแบ่งค่าคุณสมบัติทั้งหมดที่สนใจออกเป็นค่าเฉลี่ย ($\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}, \text{etc.}$) และส่วนที่แทนผลของการสั่น ($u', v', w', p', \text{etc.}$)

3.2 สมการที่เกี่ยวข้อง

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบหมุนวนในเตาเผา โดยมีสมมุติฐานว่า การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้, มีความหนืด, มีอุณหภูมิคงที่สม่ำเสมอ และเป็นการไหลแบบคงที่ ซึ่งจากสมมุติฐานทั้งหมดมีสมการที่เกี่ยวข้อง คือ สมการอนุรักษ์มวล (continuity equation) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (momentum equation) ที่เขียนในรูป tensor เป็น

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.2)$$

เมื่อ σ_{ij} เป็น deviatoric part ของ viscous stress tensor ที่ได้จากความสัมพันธ์ของของไหลแบบ Newtonian fluid มีค่าเป็น

$$\sigma_{ij} = 2\mu S_{ij} \quad (3.2 \text{ ก})$$

โดยที่ ρ เป็นค่าความหนาแน่น, u_i เป็นความเร็วของของไหล, p เป็นค่าความดัน, μ เป็นค่าความหนืด และ $S_{ij} = \frac{1}{2}(\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)$ เป็นค่า strain tensor

จาก Reynolds decomposition ทุกค่าตัวแปรในการไหลสามารถแบ่งออกเป็น ส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยและส่วนที่แทนผลของการสั่น

$$f = \bar{f} + f' \quad (3.3)$$

จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaging) เป็น

$$\bar{f}(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^{t+T} f(x,t) dt \quad (3.3 \text{ ก})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ T- เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaging) แล้ว เป็นผลทำให้ส่วนที่แทนผลของการสั่นนั้นมีค่าเป็นศูนย์ ($\overline{f'} = 0$) แต่การทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaging) ของผลคูณสองตัวแปรมีค่าเป็น $\overline{fg} = \overline{f} \overline{g} + \overline{f'g'}$

3.3 สมการการไหลแบบปั่นป่วน

หากทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaging) กับสมการอนุรักษ์มวล (continuity equation) และสมการการอนุรักษ์โมเมนตัม (momentum equation) เป็น

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.4)$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (3.5)$$

สมการ (3.4) และ (3.5) เรียกว่า สมการ Reynolds-averaged Navier-Stokes equation (RANS) ซึ่งสมการที่ (3.5) นี้มีรูปสมการเหมือนกับในสมการ (3.2) ยกเว้นเพียงเทอม second-moment ($\tau_{ij} \equiv \overline{u'_i u'_j}$) ที่เพิ่มขึ้นมา ซึ่งเป็นเทอมที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการไหลเป็นแบบปั่นป่วนและสมการนี้ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากจำนวนของตัวแปรมากกว่าสมการ

3.4 Turbulence Models

ประวัติของ turbulence model นั้นสามารถหาดูรายละเอียดได้ใน Wilcox (1993) และ Launder *et. al.* (1975) turbulence model ที่ถูกใช้ในการจำลองการไหลแบบหมุนวนประกอบด้วย

- the standard $k - \varepsilon$ model, a modified $k - \varepsilon$ model (Sloan *et. al.*, 1986), a non-linear $k - \varepsilon$ model (Speziale, 1987), the $k - \omega$ model (Wilcox, 1993)
- an algebraic Reynolds stress model (Rodi, 1976), a simplified version of the algebraic Reynolds stress model of Zhang *et. al.* (1992), and
- the different Reynolds stress transport equation model (Launder *et. al.*; 1975 and Wilcox, 1993)

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ standard $k - \varepsilon$ model และ algebraic stress model (ASM) โดยได้กล่าวถึง turbulence model อย่างสรุป ซึ่งสำหรับรายละเอียดของ turbulence model สามารถหาได้จากในบรรณานุกรม (Sloan *et. al.*, 1986; Gatski, 1996 and Wilcox, 1993)

3.4.1 Reynolds Stress Model (RSM)

วิธีที่ใช้ในการหาค่า τ_{ij} คือ การสร้างสมการเพื่อหาของ τ_{ij} โดยตรง ซึ่งจุดเริ่มต้นในการสร้าง second moment หรือ Reynolds stress transport equation คือ fluctuating momentum equation ซึ่งหาได้จากการนำสมการ (3.2) ที่ทำ Reynolds decomposition (3.3) ลบกับสมการ (3.5) แล้วได้ fluctuating momentum equation ของ u'_i

$$\mathcal{S}u'_i = \bar{u}_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + u'_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + u'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (3.6)$$

และทำ second moment (Speziale, 1991; Wilcox, 1993)

$$\overline{u'_i \mathcal{S}u'_j} + \overline{u'_j \mathcal{S}u'_i} = 0 \quad (3.7)$$

ได้ transport equation เป็น

$$\bar{u}_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} = \bar{P}_{ij} + \bar{\Pi}_{ij} + \frac{\partial \bar{D}'_{ijk}}{\partial x_k} - \varepsilon_{ij} + \nu \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_k \partial x_k} \quad (3.8)$$

ด้านขวามือของสมการ (3.8) แทนอัตราการเปลี่ยนแปลงของ τ_{ij} ซึ่งประกอบด้วยเทอม turbulent production \bar{P}_{ij} , เทอม pressure-strain rate correlation $\bar{\Pi}_{ij}$, เทอม turbulent diffusion \bar{D}'_{ijk} , เทอม turbulent dissipation rate ε_{ij} และเทอม molecular diffusion ตามลำดับ ซึ่งเทอมเหล่านี้มีค่าเป็น

$$\bar{P}_{ij} = -\tau_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} - \tau_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \quad (3.8 ก)$$

$$\bar{\Pi}_{ij} = \frac{p'}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.8 ข)$$

$$\bar{D}'_{ijk} = - \left[\overline{u'_i u'_j u'_k} + \frac{p'}{\rho} (u'_i \delta_{jk} + u'_j \delta_{ik}) \right] \quad (3.8 ค)$$

$$\varepsilon_{ij} = 2\nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}} \quad (3.8 ง)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (3.8) คือ Reynolds stress transport equation ของ Reynolds stress ทั้ง 6 ทิศทาง ซึ่งพบว่า $\Pi_{ij}, \overline{D'_{ijk}}$ และ ε_{ij} ไม่สามารถหาค่าได้โดยตรง จำเป็นต้อง model เทอมเหล่านี้

3.4.1.1 Model ของ The Pressure-Strain Rate Correlation Term

ในที่นี้ model ของ the pressure-strain rate correlation ได้เลือกใช้ของ Launder *et. al.* (1975) (ดู Sloan *et. al.*, 1986) โดยตัดเทอมที่เพิ่มขึ้นบริเวณใกล้ผนังทิ้ง เนื่องจากในที่นี้สนใจลักษณะการไหลที่บริเวณกลางเตามากกว่าที่บริเวณใกล้ผนัง (boundary layer)

$$\Pi_{ij} = \underbrace{-C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\tau_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right)}_{\text{slow term}} - \underbrace{C_2 \left(\overline{P}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \overline{P}_{kk} \right)}_{\text{fast term}} \quad (3.8 \text{ จ})$$

โดยที่ $C_1 = 2.5$ และ $C_2 = 0.55$

3.4.1.2 Model ของ The Turbulent Diffusion Term

The turbulent diffusion ซึ่งประกอบด้วย triple correlation ซึ่งถูกแทนด้วย model ของ Daly and Harlow (1970) (ดู Sloan *et. al.*, 1986; Wilcox, 1993)

$$\overline{D'_{ijk}} = C_s \frac{k}{\varepsilon} \tau_{ij} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \quad (3.8 \text{ ฉ})$$

โดยที่ $C_s = 0.22$

3.4.1.3 Model ของ The Turbulent Dissipation Rate Term

ใน incompressible flow เทอม turbulent dissipation rate ที่ใช้ model ของ Kolmogonov (1941) (ดู Sloan *et. al.*, 1986; Wilcox, 1993) ได้เป็น

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon \quad (3.8 \text{ ช})$$

ซึ่งค่า ε เป็น isotropic dissipation rate ซึ่งหาได้จากสมการ transport equation ของ dissipation rate (ε) ในหัวข้อ 3.4.2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 The Standard $k - \varepsilon$ Model

Two-equation turbulence model ที่ได้รับความนิยมใช้มากที่สุด คือ $k - \varepsilon$ model ซึ่งถูกคิดขึ้นโดย Chou and Davidov (1961) และ Harlow and Nakayama (1968) แต่ที่ได้รับความนิยมกลับเป็นของ Jones and Launder (1972) ซึ่งถูกเรียกว่าเป็น standard $k - \varepsilon$ model

3.4.2.1 สมการ Turbulent Kinetic Energy (k)

Turbulent kinetic energy (k) คือ พลังงานจลน์ต่อหน่วยมวลของ turbulent fluctuation ซึ่งหาได้จาก

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.9)$$

จากสมการ (3.8) สามารถนำมาใช้หา transport equation ของ turbulent kinetic energy (k) ได้ โดยกำหนดให้ $i = j$ ในสมการ (3.8) จากนั้นคูณด้วย $1/2$ ทำให้สอดคล้องกับสมการ (3.9) ได้ (Gaski, 1996)

$$\overline{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \overline{P} + \frac{\partial \overline{D}'_j}{\partial x_j} - \varepsilon + \nu \frac{\partial^2 k}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3.10)$$

เมื่อด้านขวามือของสมการ (3.10) แทนอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งใดๆของ k ซึ่งประกอบด้วยเทอม turbulent production term $\overline{P} \equiv \overline{P}_{ij} / 2$, เทอม turbulent diffusion $\overline{D}'_j \equiv \overline{D}'_{ijk} / 2$, เทอม isotropic turbulent dissipation rate $\varepsilon \equiv \varepsilon_{ij} / 2$ และ เทอม viscous diffusion ตามลำดับ ซึ่งเทอมเหล่านี้มีค่าเป็น

$$\overline{P} = -\tau_{ij} \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} \quad (3.10 ก)$$

$$\overline{D}'_j = -\left[\frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i u'_j} + \frac{p' u'}{\rho} \delta_{ij} \right] \quad (3.10 ข)$$

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} \quad (3.10 ค)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า \overline{D}'_j และ ε นั้นไม่สามารถหาค่าได้จำเป็นต้องใช้ model

3.4.2.1.1 Model ของ The Turbulent Diffusion Term บนสมการ k

จากสมการ (3.10 ข) the turbulent diffusion (\overline{D}'_j) ถูก model เป็น (Gaski, 1996)

$$\overline{D}'_j = \frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (3.10 ง)$$

เมื่อ ν = laminar kinematic viscosity, $v_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ = turbulent kinematic viscosity

โดยที่ $C_\mu = 0.09$ และ $\sigma_k = 1.0$

3.4.2.1.2 Model ของ The Isotropic Turbulent Dissipation Rate Term

บนสมการ k

ใน transport equation ของ turbulent kinetic energy นี้ เทอม the isotropic turbulent dissipation rate (ε) ถูกหาโดย transport equation ของ dissipation rate (ε) ซึ่งได้แสดงในหัวข้อถัดไป

3.4.2.2 สมการ Dissipation Rate (ε)

สมการ transport equation ของ dissipation rate (ε) นั้นสามารถหาได้จาก fluctuating momentum equation โดย (Speziale, 1991; Gaski, 1996)

$$\overline{2\nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial (\mathcal{N}u'_i)}{\partial x_j}} = 0 \quad (3.11)$$

ได้เป็น

$$\overline{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \overline{P}_\varepsilon - \Phi_\varepsilon + \overline{D}_\varepsilon + \nu \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_i \partial x_i} \quad (3.12)$$

เมื่อคำนวณมือของสมการ (3.12) เทอมอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ε โดยประกอบด้วย the production term \overline{P}_ε , destruction term Φ_ε , turbulent diffusion term \overline{D}_ε และ viscous diffusion term ตามลำดับ ซึ่งเทอมเหล่านี้มีค่าเป็น

$$\begin{aligned} \overline{P}_\varepsilon = & -2v \frac{\overline{\partial u'_k}}{\partial x_i} \frac{\overline{\partial u'_k}}{\partial x_j} \frac{\overline{\partial \bar{u}_i}}{\partial x_j} - 2v \frac{\overline{\partial u'_i}}{\partial x_k} \frac{\overline{\partial u'_i}}{\partial x_k} \frac{\overline{\partial \bar{u}_i}}{\partial x_j} \\ & - 2v \frac{\overline{\partial u'_k}}{\partial x_i} \frac{\overline{\partial u'_k}}{\partial x_j} \frac{\overline{\partial u'_i}}{\partial x_j} - 2v u'_k \frac{\overline{\partial u'_i}}{\partial x_j} \frac{\overline{\partial^2 \bar{u}_i}}{\partial x_j \partial x_k} \end{aligned} \quad (3.12 ก)$$

$$\Phi_\varepsilon = 2v^2 \frac{\overline{\partial^2 u'_i}}{\partial x_j \partial x_k} \frac{\overline{\partial^2 u'_i}}{\partial x_j \partial x_k} \quad (3.12 ข)$$

$$\overline{D}_\varepsilon = -2v \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\overline{\partial p'}}{\partial x_i} \frac{\overline{\partial u'_j}}{\partial x_i} \right) - v \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{u'_j} \frac{\overline{\partial u'_i}}{\partial x_k} \frac{\overline{\partial u'_i}}{\partial x_k} \right) \quad (3.12 ค)$$

โดยเทอม \overline{P}_ε , Φ_ε และ \overline{D}_ε นั้นไม่สามารถหาค่าได้โดยตรงจำเป็นต้องทำการ model

3.4.2.2.1 Model ของเทอมต่างๆ บนสมการ ε

จากแนวคิดของ isotropic dissipation rate สามารถ model เทอมต่างๆได้เป็น (Speziale, 1991; Gaski, 1996)

$$\overline{P}_\varepsilon = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\overline{\partial \bar{u}_i}}{\partial x_j} \quad (3.12 ง)$$

$$\Phi_\varepsilon = C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.12 จ)$$

$$\overline{D}_\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \quad (3.12 ฉ)$$

โดยที่ $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ และ $\sigma_\varepsilon = 1.3$

3.4.2.3 Boussinesq Approximation

โดยปรกติแล้วใน $k-\varepsilon$ model นั้นใช้ Boussinesq approximation ในการหาค่าของ Reynolds stress ซึ่ง Boussinesq approximation กำหนด Reynolds stress เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง turbulent stress และ mean strain rate tensor (\bar{S}_{ij}) ดังต่อไปนี้ (Speziale, 1991; Gaski, 1996; Wilcox, 1993)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - 2\nu_T \bar{S}_{ij} \quad (3.14)$$

เมื่อ $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} (\partial \bar{u}_i / \partial x_j + \partial \bar{u}_j / \partial x_i)$ และใน Boussinesq approximation นี้ ถ้า $i = j$ แล้ว $\tau_{ii} = 2k$ ซึ่งสอดคล้องสมการ (3.9)

3.4.3 Algebraic Stress Model (ASM)

Algebraic stress model (ASM) นั้น หาได้จากการใช้ Rodi's approximation (1976) โดยใช้สมการ (3.8) และ (3.10) เป็นผลให้ได้ (Gaski, 1996; Sloan *et. al.*, 1986; Promvonge, 1998)

$$\bar{u}_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} - \frac{\partial \bar{D}'_{ijk}}{\partial x_k} - \nu \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_k \partial x_k} = \frac{\tau_{ij}}{k} \left(\bar{u}_k \frac{\partial k}{\partial x_k} - \frac{\partial \bar{D}'_k}{\partial x_k} - \nu \frac{\partial^2 k}{\partial x_k \partial x_k} \right) \quad (3.15)$$

จัดเทอมใหม่ได้

$$\bar{P}_{ij} + \Pi_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon - \psi A_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{k} (\bar{P} - \varepsilon) \quad (3.16)$$

เมื่อ A_{ij} เป็น convection quantity ที่เพิ่มขึ้นจาก Rodi's approximation และ ψ เป็นค่าคงที่ใดๆ ระหว่าง 0 ถึง 1

$$A_{ij} = \begin{vmatrix} 0 & -\frac{\overline{u'w'}}{r} & \frac{\overline{u'v'w'}}{r} \\ -\frac{\overline{u'w'}}{r} & 2\frac{\overline{v'w'}}{r} & (\overline{v'v'w'} - \overline{w'w'}) \frac{\overline{w}}{r} \\ \frac{\overline{u'v'w'}}{r} & (\overline{v'v'w'} - \overline{w'w'}) \frac{\overline{w}}{r} & 2\frac{\overline{v'w'}}{r} \end{vmatrix} \quad (3.17)$$

ดังนั้น

$$\left(\frac{\tau_{ij} - (2/3) \delta_{ij} k}{k} \right) = \frac{\lambda}{\varepsilon} (\bar{P}_{ij} - (2/3) \delta_{ij} \bar{P} - \beta A_{ij}) \quad (3.18)$$

หรือ

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k + \frac{\lambda k}{\varepsilon} \left(\bar{P}_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{P} - \beta A_{ij} \right) \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ λ และ β ถูกกำหนดเป็น

$$\lambda = \frac{1 - C_2}{C_1 - 1 + \bar{P}/\varepsilon} \quad \text{และ} \quad \beta = \frac{\Psi}{1 - C_2}$$

เมื่อ $C_1 = 2.5$ และ $C_2 = 0.55$

3.5 สรุป

จากเนื้อหาทั้งหมดที่กล่าวไปแล้วในข้างต้นสามารถสรุปสมการที่จำเป็นต้องใช้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 สรุปสมการที่จำเป็นต้องใช้

Name	Equation
Continuity Equation	$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$
Momentum Equation	$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}'_i \bar{u}'_j}{\partial x_j}$
Turbulent Kinetic Energy Equation	$\bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \bar{P} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$
Dissipation Rate Equation	$\bar{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right]$
Boussinesq Approximation	$\tau_{ij} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - 2\nu_T \bar{S}_{ij}$
Algebraic Stress Model (ASM)	$\tau_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k + \frac{\lambda k}{\varepsilon} \left(\bar{P}_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{P} - \beta A_{ij} \right)$

เมื่อ $\bar{P} = -\tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$, $\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$,

$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$, $\bar{P}_{ij} = -\tau_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} - \tau_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k}$, $\lambda = \frac{1 - C_2}{C_1 - 1 + \bar{P}/\varepsilon}$, $\beta = \frac{\Psi}{1 - C_2}$, $C_1 = 2.5$,

$$C_2 = 0.55 \quad \text{และ} \quad A_{ij} = \begin{vmatrix} 0 & -\frac{\overline{u'w'}}{r} & \frac{\overline{u'v'w'}}{r} \\ -\frac{\overline{u'w'}}{r} & 2\frac{\overline{v'w'}}{r} & (\overline{v'v'} - \overline{w'w'}) \frac{\overline{w}}{r} \\ \frac{\overline{u'v'w'}}{r} & (\overline{v'v'} - \overline{w'w'}) \frac{\overline{w}}{r} & 2\frac{\overline{v'w'}}{r} \end{vmatrix}$$

บทที่ 4

การประยุกต์ Finite Volume Method

4.1 บทนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลแบบปั่นป่วนได้ถูกเสนอไปในบทที่แล้ว เห็นได้ว่าสมการทั้งหมดอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ผูกพันกันอยู่ และเป็นสมการไม่เชิงเส้น ซึ่งมีความซับซ้อนและไม่สามารถที่หาคำตอบได้โดยวิธีตรง วิธีวิเคราะห์ตัวเลขจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการหาคำตอบ วิธี finite volume เป็นวิธีการวิเคราะห์ตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องของไหล โดยวิธี finite volume ทำการจัดรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิตบนจุดต่างๆบนปริมาตรควบคุม (control volume) และทำการกำหนดค่าขอบเขต แล้วจึงใช้วิธีการทำซ้ำเพื่อหาคำตอบ

4.2 การประยุกต์วิธี Finite Volume

จากสมการที่แสดงในบทที่ 3 เป็นการพิจารณาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดในปริมาตรควบคุม (control volume) สมการที่นำมาใช้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยพิจารณาการแก้ปัญหาคำตอบด้วยวิธี finite volume ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical analysis) รูปทั่วไปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยทั้งหมดสามารถรวมเขียนได้ดังนี้

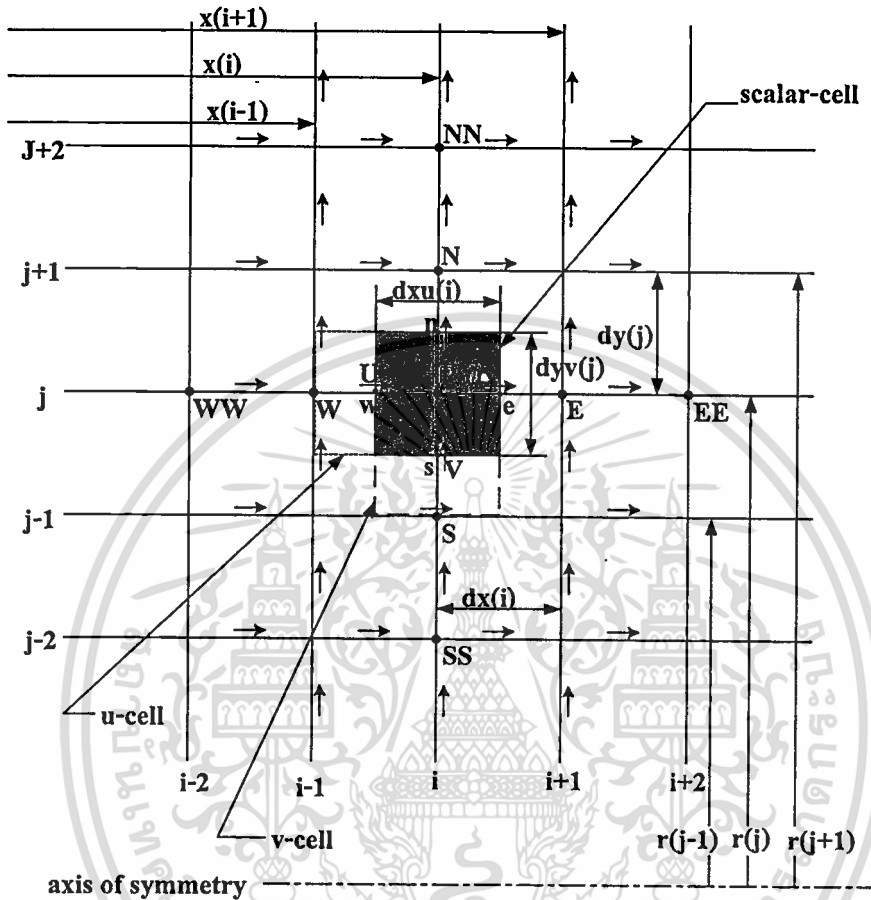
$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} [\rho \bar{u}_i \bar{\phi}]}_{\text{Convection Term}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} \right]}_{\text{Diffusion Term}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Source Term}} \quad (4.1)$$

ที่ Γ_ϕ เป็น diffusion coefficient ของตัวแปร ϕ

ในที่นี้การใช้วิธี finite volume นั้นเริ่มต้นด้วยการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ตลอดทั้งปริมาตรควบคุม แล้ว discretise ลงบนจุดต่อต่างๆบนปริมาตรควบคุมดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงภาพของปริมาตรควบคุมแบบ staggered grid

Staggered grid เป็นการแบ่งความเร็วออกมาคิดที่บริเวณจุดกลางระหว่างจุดต่อสเกลลาร์ เพื่อให้สอดคล้องกับ continuity equation ซึ่งถูกคิดขึ้นโดย Patankar (1980) โดยคิดขึ้นเพื่อแก้ปัญหาค่าเกิด checker-board อันจะก่อให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งการทำงานจากการ discretise สมการลงบนจุดต่อ(node)แล้ว เนื่องจากสมการในปัญหามีหลายสมการ ฉะนั้นในแก๊จ

ต้องทำโดยใช้ SIMPLE algorithm (Patankar, 1980) อันเป็นการจัดลำดับและวางความต่อเนื่องของการแก้สมการ



รูปที่ 4.1 ลักษณะการวาง cell ใน staggered Grid

4.3 Discretisation ของสมการ

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยทั่วไป (4.1) นั้นประกอบด้วย convection term, diffusion term, และ source term ซึ่งแต่ละเทอมสามารถทำ discretisation ได้ดังนี้

4.3.1 Convection Term

Discretisation ของ convection term ทำได้โดยการอินทิเกรตตลอดทั้งปริมาตรควบคุมสำหรับตัวแปร ϕ ได้เป็น

$$F = F_e \phi_e - F_w \phi_w + F_n \phi_n - F_s \phi_s \tag{4.2}$$

โดยที่ convection flux คือ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_e = \rho_e u_e A_e$$

$$F_w = \rho_w u_w A_w$$

$$F_n = \rho_n v_n A_n$$

$$F_s = \rho_s v_s A_s$$

และ ϕ_e, ϕ_w, ϕ_n และ ϕ_s เป็นค่าของ ϕ ที่ผนังของเซลล์ ซึ่งหาได้โดยการประมาณที่เหมาะสม การประมาณค่า ϕ ที่บริเวณผิวของปริมาตรควบคุมนั้นมีหลายวิธี แต่ที่นำเสนอในที่นี้มีเพียง 4 วิธีเท่านั้น คือ upwind scheme, hybrid scheme, second order upwind (SOU) scheme และ quadratic upstream interpolation for convective kinematics (QUICK) scheme โดยกล่าวเพียงสรุปของแต่ละวิธีเท่านั้นดังต่อไปนี้

4.3.1.1 Upwind Scheme

ทำโดยใช้การประมาณค่า ϕ ที่ตำแหน่งผิวของปริมาตรควบคุมใดๆ โดยใช้ค่าที่ตำแหน่ง upstream ที่อยู่ข้างเคียง โดยยกตัวอย่างเฉพาะที่ตำแหน่ง e เท่านั้น คือ

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P & \text{if } F_e > 0 \\ \phi_E & \text{if } F_e < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

ที่ตำแหน่งอื่นๆก็ทำในทำนองเดียวกัน

4.3.1.2 Hybrid Scheme

Hybrid scheme ของ Spalding (1972) มีความแม่นยำที่อนุพันธ์อันดับหนึ่ง เป็นวิธีที่ได้จากการรวมข้อดีของ upwind และ central differencing scheme โดยยกตัวอย่างเฉพาะที่ตำแหน่ง e เท่านั้นคือ

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P & Pe > 2 \\ \frac{\phi_E + \phi_P}{2} & -2 \leq Pe \leq 2 \\ \phi_E & Pe < -2 \end{cases} \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่า Pe เป็นค่า Peclet number ซึ่งเป็นสัดส่วนของ convection flux ต่อ diffusion flux ของ ϕ ในปริมาตรควบคุม

$$Pe = \frac{F}{D} = \frac{\rho u_i}{\Gamma} = \frac{\rho u_i dx_i}{\Gamma} \quad (4.5)$$

ซึ่ง dx_i เป็นระยะระหว่างจุดต่อที่ตำแหน่ง i กับ $i+1$ และ Γ เป็น diffusion coefficient

4.3.1.3 Second Order Upwind Scheme (SOU)

ค่า ϕ ในวิธีนี้หาได้จากการประมาณแบบเชิงเส้นที่ upstream โดยใช้ 2 จุด โดยขึ้นอยู่กับค่า F , ϕ_e สามารถประมาณได้เป็น

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P + \frac{(\phi_P - \phi_W)}{dx_{P-W}} dx_{e-P} & \text{if } F_e > 0 \\ \phi_E + \frac{(\phi_E - \phi_{EE})}{dx_{EE-E}} dx_{E-e} & \text{if } F_e < 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

โดยที่ dx_{e-P} เป็นระยะระหว่าง e กับจุด P และ dx_{P-W} เป็นระยะระหว่าง P กับ W

4.3.1.4 QUICK Scheme

QUICK scheme ใช้การประมาณกำลังสองกับจุดต่อที่ upstream 2 จุด และ downstream 1 จุดในการประมาณค่า ϕ ที่ตำแหน่งผิวของปริมาตรควบคุม โดยในการประมาณค่า ϕ ขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ F ว่าเป็นลบหรือบวก ยกตัวอย่างเช่น ϕ_e ประมาณได้เป็น

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P + \frac{1}{4} \left(\frac{2x_1 + x_2}{x_1 + x_2} \phi_E - \frac{2x_1 - x_2}{x_1} \phi_P - \frac{x_2 x_2}{x_1(x_1 + x_2)} \phi_W \right) & \text{if } F_e > 0 \\ \phi_E + \frac{1}{4} \left(\frac{2x_3 + x_2}{x_3 + x_2} \phi_P - \frac{2x_3 - x_2}{x_3} \phi_E - \frac{x_2 x_2}{x_3(x_3 + x_2)} \phi_{EE} \right) & \text{if } F_e < 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

ซึ่ง $x_1 = dx_{P-W}$, $x_2 = dx_{P-E}$ และ $x_3 = dx_{EE-E}$ เป็นระยะระหว่างจุดต่อ

4.3.2 Diffusion Term

Discretisation ของเทอม diffusion term ของตัวแปร ϕ ในปริมาตรควบคุมได้เป็น

$$D = -D_e(\phi_E - \phi_P) + D_w(\phi_P - \phi_W) - D_n(\phi_N - \phi_P) + D_s(\phi_P - \phi_S) \quad (4.8)$$

ที่ซึ่ง

$$D_e = \frac{\Gamma_P + \Gamma_E}{2} \frac{A_e}{dx_{P-E}}$$

$$D_w = \frac{\Gamma_P + \Gamma_W}{2} \frac{A_w}{dx_{P-W}}$$

$$D_n = \frac{\Gamma_P + \Gamma_N}{2} \frac{A_n}{dy_{P-N}}$$

$$D_s = \frac{\Gamma_P + \Gamma_S}{2} \frac{A_s}{dy_{P-S}}$$

และ dx, dy เป็นระยะระหว่างจุดโนดบนแกน x และ y ตามลำดับ

4.3.3 Source Term

ทำโดยอินทิเกรต source Term ในปริมาตรควบคุมได้เป็น

$$S = S_\phi V \quad (4.9)$$

เมื่อ V เป็นปริมาตรและ S_ϕ สามารถแยกเป็น 2 ส่วนได้เป็น

$$S_\phi = S_C + S_P \phi_P \quad (4.10)$$

ที่ซึ่ง S_P มีค่าเป็นลบ

4.4 Final Form ของ Discretised Equations

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (4.1) เมื่อ discretisation ของทุกๆเทอมทั้ง convection, diffusion และ source terms แล้วจัดรูปได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่ใช้ชี้ลักษณะของปัญหาและที่สำคัญที่สุด คือ ถ้าหากว่า boundary conditions ผิดจะทำให้คำตอบที่ได้ไม่น่าเชื่อถือ

4.5.1 Inlet Boundary Conditions

ในการศึกษานี้ ได้ใช้ข้อมูลจากผลการทดลอง ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.1 ข้างล่าง

ตารางที่ 4.1 Inlet Boundary Conditions

Variable	Expression	Note
u	-	ข้อมูลจากผลการทดลอง
v	-	ข้อมูลจากผลการทดลอง
w	-	ข้อมูลจากผลการทดลอง
k	$\frac{3}{2} (U_{ref} T_i)^2$	T_i : turbulence intensity
ε	$C_\mu^{3/2} \frac{k^{3/2}}{\ell}$	$\ell = 0.07L$ $L = \text{characteristic length } (\frac{d}{2})$

4.5.2 Outlet Boundary Conditions

เงื่อนไขที่ทางออกนั้น โดยปกติแล้วไม่ทราบค่า ซึ่งสำหรับตัวแปรทั่วไปได้ถูกกำหนดให้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง (zero gradient) ยกเว้นแต่ค่า u ที่ทางออกเท่านั้นที่ถูกนำไปปรับค่าเพื่อให้สอดคล้องกับกฎสมมูลมวล

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{exit} = 0 \quad (4.14)$$

4.5.3 Axisymmetric Conditions

สำหรับเงื่อนไขที่แกนสมมาตร ทุกๆตัวแปรได้ถูกกำหนดให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (zero gradient) หรือ กำหนดให้เป็นศูนย์

4.5.4 Wall Boundary Conditions

เงื่อนไขที่ขอบผนังนั้น กำหนดให้ u, v และ w นั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่บริเวณใกล้ผนังนั้นมีผลของชั้น boundary layer อยู่ทำให้ในการกำหนดค่าต้องมีการใช้ wall function (Versteeg and Malalasekera, 1995) โดยการใช้ wall function นั้นมีสมมุติฐานดังนี้

→ ค่า shear stress ของของไหลที่บริเวณใกล้ผนังมีค่าเท่ากับ shear stress ที่ผนัง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- convection และ diffusion ที่บริเวณใกล้ผนังถือว่ามีค่าน้อยมากทำให้ production term ของ k เท่ากับ dissipation term

ตัวแปรไร้มิติ y^+ นี้ใช้แทนการวัดระยะในชั้น boundary layer แสดงได้เป็น

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y_P}{\mu} \quad (4.15)$$

โดยที่ y_P เป็นระยะที่วัดจากผนัง และ u_τ คือ friction velocity เป็น

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (4.16)$$

ที่ซึ่ง τ_w เป็นค่า wall shear stress โดยในบริเวณ boundary layer ถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

- 1) $0 < y^+ < 11.63$: เป็น laminar sub-layer ซึ่ง molecular diffusion มีอิทธิพลสูง ($\mu \gg \mu_T$) และสมมติว่าเป็นการไหลแบบ Newtonian
- 2) $11.63 < y^+ < 300$: เป็น turbulent sub-layer ที่ซึ่ง turbulent diffusion มีอิทธิพลสูง ($\mu_T \gg \mu$)

จากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น เงื่อนไขที่ขอบผนังสำหรับสมการโมเมนตัมทำให้ได้ค่า τ_w ดังนี้

$$\tau_w = \begin{cases} \mu \frac{du}{dy} & 0 < y^+ \leq 11.63 \\ \rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} \frac{\kappa u_P}{\ln(Ey^+)} & 11.63 < y^+ \leq 300 \end{cases} \quad (4.17)$$

ที่ κ เป็น Von Karman constant เท่ากับ 0.4 และ E เป็นค่า friction ของความขรุขระของผิว (Wall) สำหรับผิวเรียบ (smooth wall) $E = 0.9$

สำหรับสมการ turbulent kinetic energy จากเนื้อหาที่กล่าวในข้างต้น สามารถแสดงในรูปของ source term ได้เป็น

$$S_k = \left(\tau_w - C_\mu \rho^2 \frac{k^2}{\tau_w} \right) \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4.18)$$

Turbulent Dissipation Rate ที่บริเวณ ใกล้ผนังมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_p = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\kappa y_p} \quad (4.19)$$

4.6 กระบวนการหาคำตอบ (Solution Procedure)

การแก้สมการพีชคณิต (4.11) เพื่อหาค่าตัวแปรที่สนใจนั้น ทำได้โดยใช้ tri-diagonal matrix algorithm (TDMA) แต่เนื่องจากในการหาความเร็วนั้นไม่ว่า u, v มีตัวแปรเกินขึ้นมา คือ ความดัน อันเป็นเทอมที่ติดอยู่ใน momentum equations ในที่นี้จึงเลือกใช้ SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) algorithm ที่เสนอโดย Patankar และ Spalding (1972) ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความดันเพื่อแก้ปัญหา

4.6.1 การหาคำตอบโดยใช้วิธี TDMA

พิจารณา computational domain พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นๆ ประกอบกัน และในแต่ละเส้นถูกแก้หาคำตอบโดยใช้วิธี TDMA โดยสมมุติว่าทราบค่าบริเวณจุดต่อข้างเคียง จากนั้นใช้วิธีการทำซ้ำจนกว่าคำตอบลู่เข้า

จากสมการพีชคณิต (4.11) ซึ่งเป็นจุดหนึ่งบนเส้นตัวอย่าง สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + (a_N \phi_N + a_S \phi_S + S_C) \quad (4.20)$$

เทอมที่อยู่ในวงเล็บสมมุติว่าเป็นค่าคงที่ จากสมการข้างต้นสามารถแสดงได้เป็น

$$D_i \phi_i = A_i \phi_{i+1} + B_i \phi_{i-1} + C_i \quad (4.21)$$

เมื่อ i เป็นตำแหน่งของจุดต่อ ในแนวแกน x หรือ r

ยกตัวอย่างในแนวแกน x

$$A_i = a_E$$

$$B_i = a_W$$

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกระบวนการทำซ้ำโดยแทนไปข้างหน้าแล้วจัดรูปได้

$$\phi_i = A'_i \phi_{i+1} + C'_i \quad (4.22)$$

ที่ซึ่ง A'_i และ C'_i ได้จากการจัดจากกระบวนการทำซ้ำโดยแทนไปข้างหน้า

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

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

ถ้าค่า $A'_i = 0, C'_i = \phi_i$ ซึ่งสอดคล้องกับ (4.22) ที่จุดเริ่มต้นของเส้น ค่า A'_i และ C'_i สามารถหาได้ตลอดที่ทุกๆ ตำแหน่ง i และค่า ϕ_i สามารถหาได้จากสมการ (4.22)

4.6.2 The SIMPLE Algorithm

รายละเอียดของ SIMPLE algorithm สามารถหาได้จาก Patankar (1980) และ Versteeg and Malalasekera (1995) SIMPLE algorithm เป็นวิธีการที่มีพื้นฐานจากการเริ่มเดาหรือสมมุติค่า p^* , u^* และ v^* จากนั้นแทนค่าที่สมมุติลงใน momentum equations และ continuity equation โดยคำตอบที่ได้ถูกนำมาปรับค่าที่เริ่มสมมุติ จนกว่าคำตอบจะเข้าสู่

จากการ discretise ของสมการ u -momentum ในปริมาตรควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 4.1 สามารถเขียนได้เป็น

$$a_w u_w = \sum a_{nb} u_{nb} + A_{ew} (p_w - p_p) + b_{u,w} \quad (4.23)$$

ค่า u^* นี้อยู่บนพื้นฐานของค่า p^* และควรสอดคล้องกับ momentum equations ได้เป็น

$$a_w u_w^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + A_{ew} (p_w^* - p_p^*) + b_{u,w} \quad (4.24)$$

จากนั้นลบสมการ (4.24) จาก (4.23) และตัดเทอม $\sum a_{nb} (u_{nb} - u_{nb}^*)$ เราได้สมการ velocity-correction เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $u_w = u_w^* + d_w (p_w^* - p_p^*)$ นั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ (4.25) การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ซึ่ง $d_w = \frac{A_w}{a_w}$ และ $p' = p - p^*$

ในการทำงานเดียวกันที่ผิวอื่นของปริมาตรควบคุมสามารถเขียนได้เป็น

$$u_e = u_e^* + d_e(p'_p - p'_e) \quad \text{ที่} \quad d_e = \frac{A_e}{a_e}$$

$$u_n = u_n^* + d_n(p'_p - p'_n) \quad \text{ที่} \quad d_n = \frac{A_n}{a_n}$$

$$u_s = u_s^* + d_s(p'_s - p'_p) \quad \text{ที่} \quad d_s = \frac{A_s}{a_s}$$

สำหรับ v -momentum นั้นสามารถหาได้เช่นเดียวกับ u -momentum

สมการ pressure-correction นั้นหาได้จาก continuity equation โดยการแทนสมการ velocity-correction ลงไป แล้วจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$a_p p'_p = a_e p'_e + a_w p'_w + a_n p'_n + a_s p'_s + b_m \quad (4.26)$$

โดยที่

$$a_e = \rho_e d_e A_e$$

$$a_w = \rho_w d_w A_w$$

$$a_n = \rho_n d_n A_n$$

$$a_s = \rho_s d_s A_s$$

$$a_p = a_e + a_w + a_n + a_s - S_p$$

และ

$$b_m = \rho_w u_w^* A_w - \rho_e u_e^* A_e + \rho_s v_s^* A_s - \rho_n v_n^* A_n + S_C$$

การปรับค่าของความดันนั้น บางครั้งมีการทำ under-relaxation ซึ่งได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (4.27)$$

ที่ α_p เป็น under-relaxation factor สำหรับความดัน

สรุปลำดับการทำงานของ SIMPLE algorithm เป็น

1. เค้าค่าเริ่มต้น p^*
2. ทำการแก้สมการ (4.24) ได้ค่า u^* และเช่นเดียวกันได้ค่า v^*
3. ทำการแก้สมการ (4.26) เพื่อหาค่า p'
4. ปรับค่า p โดยใช้สมการ (4.27) และค่า u, v ด้วยสมการ (4.25)
5. ทำการแก้สมการ tangential momentum (w)
6. จากนั้นทำการแก้สมการที่เหลือ คือ k และ ϵ
7. กำหนดให้ค่า p ในข้อ 3 เท่ากับค่า p^* แล้วจึงย้อนกลับไปทำข้อที่ 2 จนกว่าค่าตอบลู่เข้า

4.7 สรุป

กระบวนการประยุกต์วิธีเชิงตัวเลขที่เรียกว่า finite volume ในการแก้ปัญหาคาร์ไหลแบบปั่นป่วน โดยวิธี staggered grid ได้ถูกอธิบายในเนื้อหาของบทนี้ ไม่ว่าจะเป็นการ discretise สมการ, numerical differencing scheme สำหรับ convection term, boundary conditions ต่างๆ และเทคนิคในการหาค่าตอบที่มีพื้นฐานบน SIMPLE algorithm

ในบทถัดไปจะแสดงลักษณะของปัญหา และความสามารถของ turbulence models และ numerical differencing scheme ในปัญหาที่สนใจ

บทที่ 5

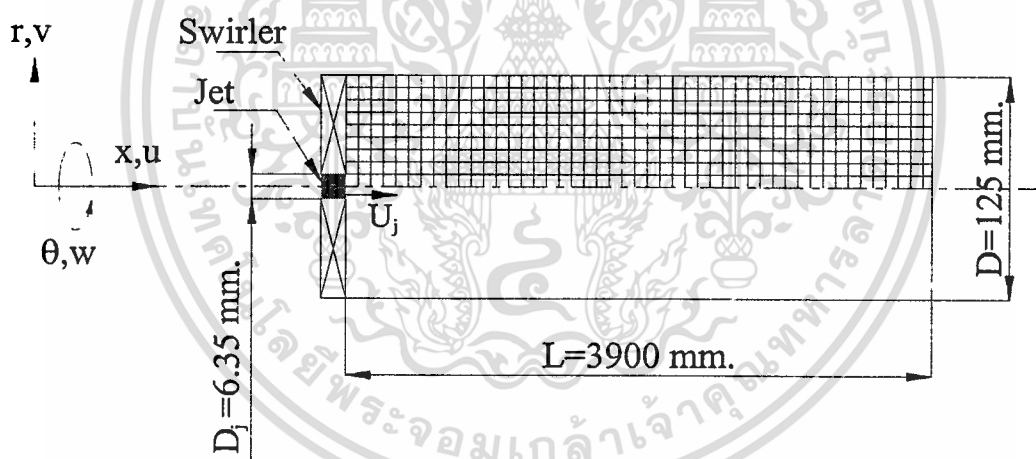
การจำลองการไหลในเตาเผา

5.1 บทนำ

ทฤษฎีและวิธีการเชิงตัวเลขนั้นได้ถูกแสดงในบทก่อนหน้า ในบทนี้นำเสนอผลการจำลองการไหลในเตาเผา โดยแบ่งเป็น 3 กรณี แสดงในหัวข้อตั้งแต่ 5.2-5.4 ตามลำดับ

5.2 เตาเผาของ So *et. al.* (1984) กรณีที่ไม่มีการฉีดอากาศ

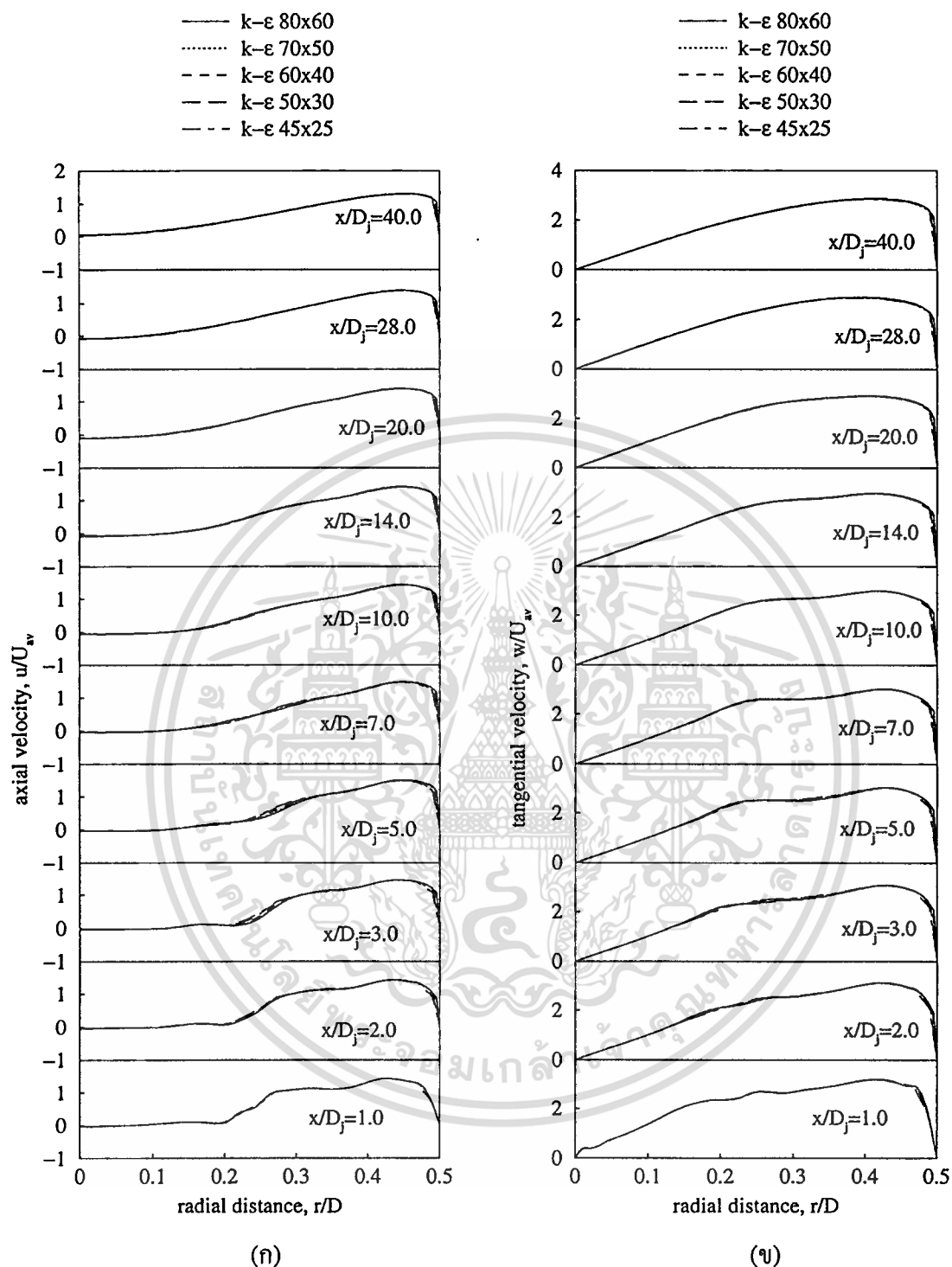
So *et. al.* (1984) ได้รับทุนจาก NASA ในการวัดการไหลในเตาเผาจำลองโดยใช้ LDV ซึ่งจากความละเอียดและความถูกต้องของผลที่ได้นี้ ถูกนำไปเพื่อเปรียบเทียบในการจำลองการไหลนี้ เตาเผามีลักษณะดังรูป 5.1 ซึ่งมี $Re_D = 54900$, swirl number (S)=2.25, $U_j = 0\text{ m/s}$ และ $U_{av} = 7.26\text{ m/s}$



รูปที่ 5.1 ลักษณะเตาเผาของ So *et. al.* (1984) และ computational domain

ในการจำลองการไหลนี้ได้ใช้เงื่อนไขของ axisymmetry ทำการคำนวณ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการใช้ $k - \epsilon$ model และ ASM โดยถูกทำร่วมกับ numerical differencing scheme 4 วิธี คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ก็นำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ So *et. al.* (1984) ที่ตำแหน่ง $x/D_j = 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0, 14.0, 20.0, 28.0$ และ 40.0

การศึกษาความเป็นอิสระของกริด (grid independent) ต่อผลการทำนาย ได้แสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งทำการคำนวณที่จำนวนกริดเท่ากับ $80 \times 60, 70 \times 50, 60 \times 40, 50 \times 30$ และ 45×25 โดยจากรูป 5.2 เป็นผลของความเร็วด้านแนวแกนและความเร็วด้านแนวสัมผัส ซึ่งการศึกษาพบว่าจำนวนกริดทั้งหมดที่ทำการคำนวณไม่มีผลต่อความแม่นยำของปัญหา โดยความแตกต่างจำนวนกริดที่แตกต่างกันการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ความเป็นอิสระของกริดต่อความเร็วที่ทำนายโดย $k-\epsilon$ model (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส

นี้สามารถพบได้ที่บริเวณ r/D เข้าใกล้ 0.5 ซึ่งจากรูปมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ทำให้สามารถสรุปได้ว่าจำนวนกริดที่ทำการคำนวณนี้ทุกค่าสามารถนำไปใช้ในการจำลองการไหลได้โดยไม่มีอิทธิพลเนื่องจากจำนวนกริดที่ใช้

การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 การทำนายการไหลโดย $k-\varepsilon$ model

จากการจำลองการไหลโดย $k-\varepsilon$ model ร่วมกับ scheme ต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงในรูปของความเร็วดตามแนวแกนและความเร็วดตามแนวสัมผัส รวมถึง contour plot และ vector plot

ผลของความเร็วดตามแนวแกนและความเร็วดตามแนวสัมผัส ได้แสดงในรูป 5.3 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วดจากระยะกึ่งกลางถึงผนัง รูป 5.3(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วดตามแนวแกน จากรูปพบว่าทั้ง 4 schemes ทำนายค่าได้ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยสามารถพบความแตกต่างได้ที่ตำแหน่ง $x/D_j = 3.0, 5.0$ และ 7.0 ที่บริเวณ r/D ประมาณ 2 ถึง 3 ซึ่งคำตอบที่ได้จาก upwind และ hybrid สามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลองมากกว่า

การเปลี่ยนแปลงของความเร็วดตามแนวสัมผัสแสดงในรูป 5.3(ข) จากรูปการทำนายของทั้ง 4 schemes นั้นแทบไม่พบความแตกต่างกันเลย ซึ่งหากสังเกตพบจุดที่แตกต่างที่ $x/D_j = 3.0$ และ 5.0 ที่บริเวณ r/D ประมาณ 2 ถึง 4 โดยผลลัพธ์ที่ได้จาก upwind และ hybrid ทำนายได้ดีกว่าเล็กน้อย ซึ่งจากภาพรวมทั้งหมดเห็นว่าทุก scheme ทำนายค่าได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลอง

Contour plot ของ stream function และ vector plot ที่ทำนายโดย upwind scheme ได้แสดงในรูป 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ จาก contour plot สังเกตว่าไม่มี recirculation เกิดขึ้นเลยและ stream function มีลักษณะเป็นเส้นที่ราบเรียบโดยมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

จาก vector plot สามารถสังเกตเห็น recirculation ที่ไม่พบใน contour plot โดยเกิดขึ้นที่บริเวณ $x/D = 0$ ถึง 1.8 และ $r/D = 0$ ถึง 0.2 นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของความเร็วดใน recirculation มีขนาดที่เล็กกว่าที่บริเวณด้านนอกของ recirculation มาก ทำให้ไม่พบ recirculation นี้บน contour plot

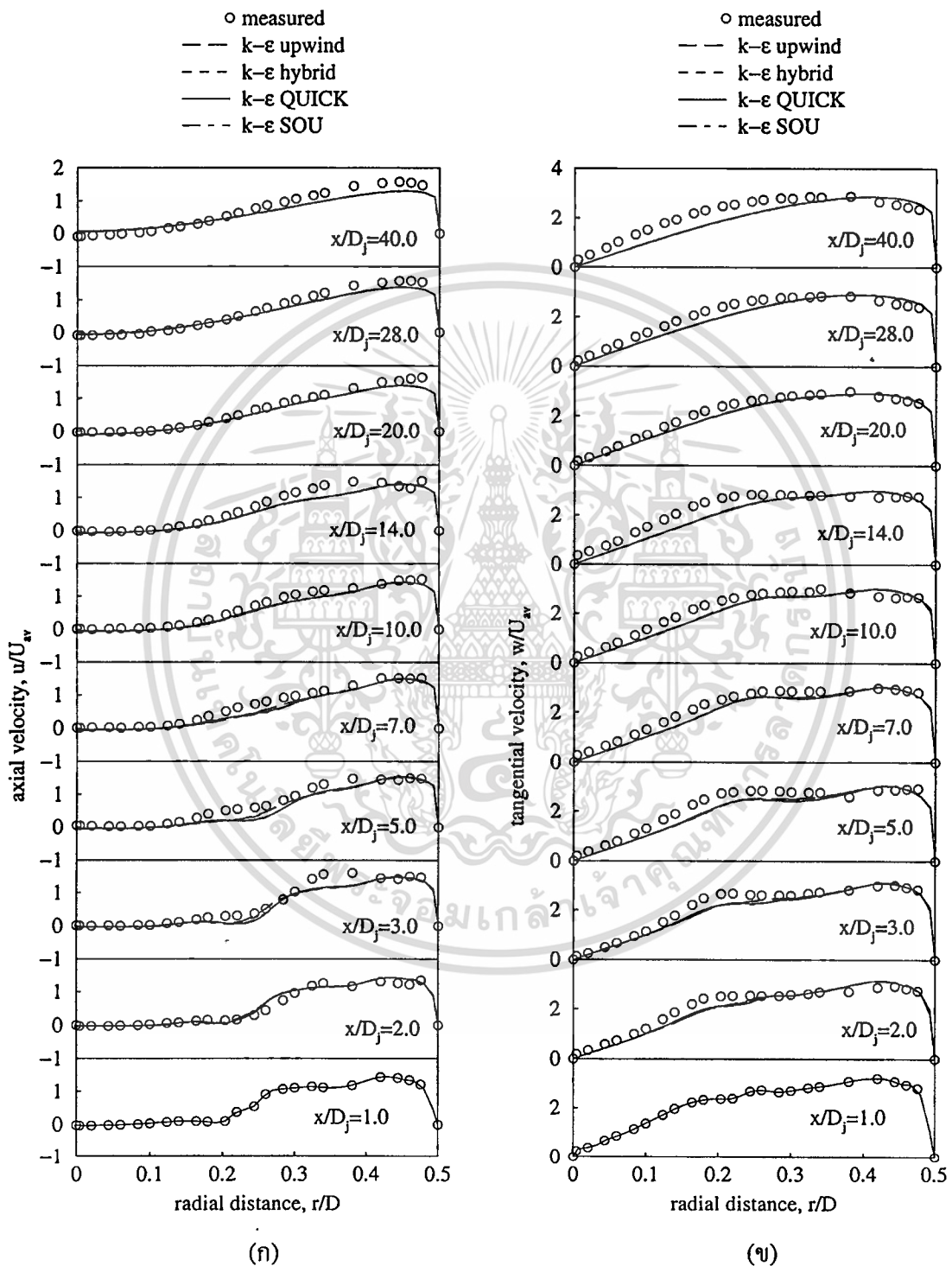
การจำลองการไหลโดย $k-\varepsilon$ model ซึ่งทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ scheme ต่างๆ คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU ไม่อาจสรุปได้ว่า scheme ใดทำนายได้ดีกว่าในการจำลองการไหลนี้ เนื่องจากผลการจำลองการไหลของแต่ละ scheme ที่ทำนายได้นี้มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และทุกๆ scheme ทำนายได้ค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลอง สาเหตุหลักอาจเป็นเพราะใช้กริดละเอียดมากอยู่แล้วก็เป็นได้

5.2.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress model (ASM)

การจำลองโดยใช้ ASM ร่วมกับ scheme ต่างๆ ได้นำมาแสดงในรูปของความเร็วดตามแนวแกน, ความเร็วดตามแนวสัมผัส, contour plot และ vector plot

รูปกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วดตามแนวแกนและความเร็วดตามแนวสัมผัสตามระยะรัศมี ได้ถูกแสดงในรูป 5.6(ก) และ 5.6(ข) ตามลำดับ จากรูป 5.6(ก) พบว่าผลลัพธ์ของ scheme ที่ต่างกันทำนายได้ค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อย เช่น ที่ตำแหน่ง $x/D_j = 3.0$ ถึง 5.0 และบริเวณ r/D ประมาณ 2 ถึง 3 โดยผลลัพธ์ที่ได้จาก upwind และ hybrid scheme นั้นใกล้เคียงกับข้อมูลจากการ

ทดลองมากกว่า ซึ่งเมื่อเลขตำแหน่ง $x/D_j = 5.0$ ออกไป ผลการทำนายที่ได้จากทุกๆ scheme ไม่แตกต่างกันมากนัก

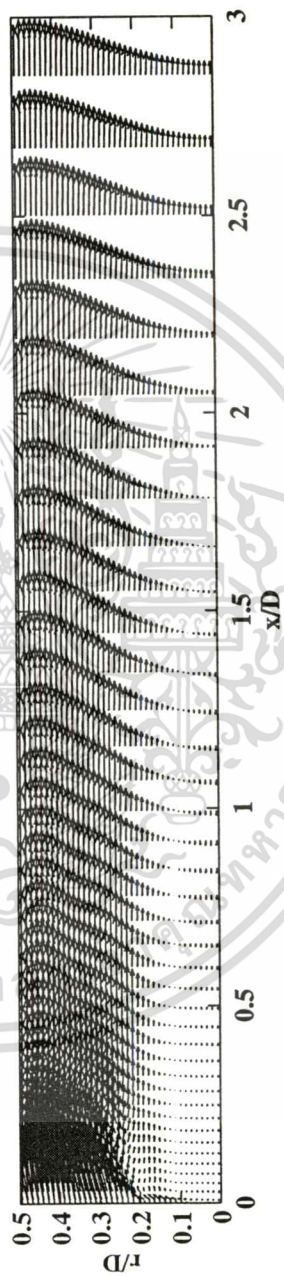


รูปที่ 5.3 กราฟการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย $k-\epsilon$ model (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

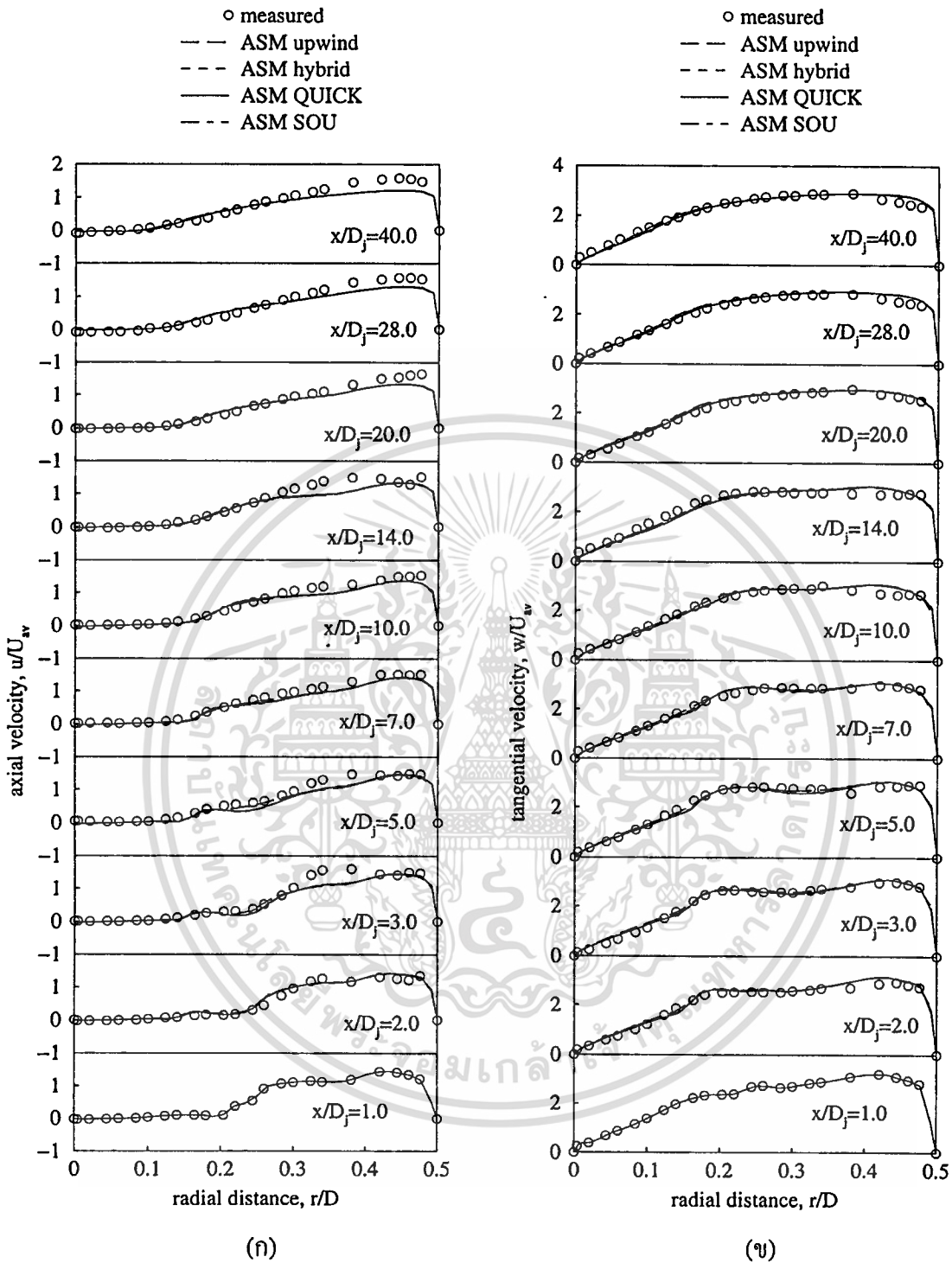


รูปที่ 5.4 Contour plot ของ stream function ทำนายโดย upwind scheme และ $k-\epsilon$ model



รูปที่ 5.5 Vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย upwind scheme และ $k-\epsilon$ model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 กราฟการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส

จากรูป 5.6(ข) ผลการทำนายโดย ASM นั้นสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับข้อมูลจากการทดลอง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากที่ทุกๆ scheme ทำนายค่าได้ไม่แตกต่างกันมากนัก และใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลองมาก แต่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของ scheme ได้ที่ตำแหน่ง $x/D_j =$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

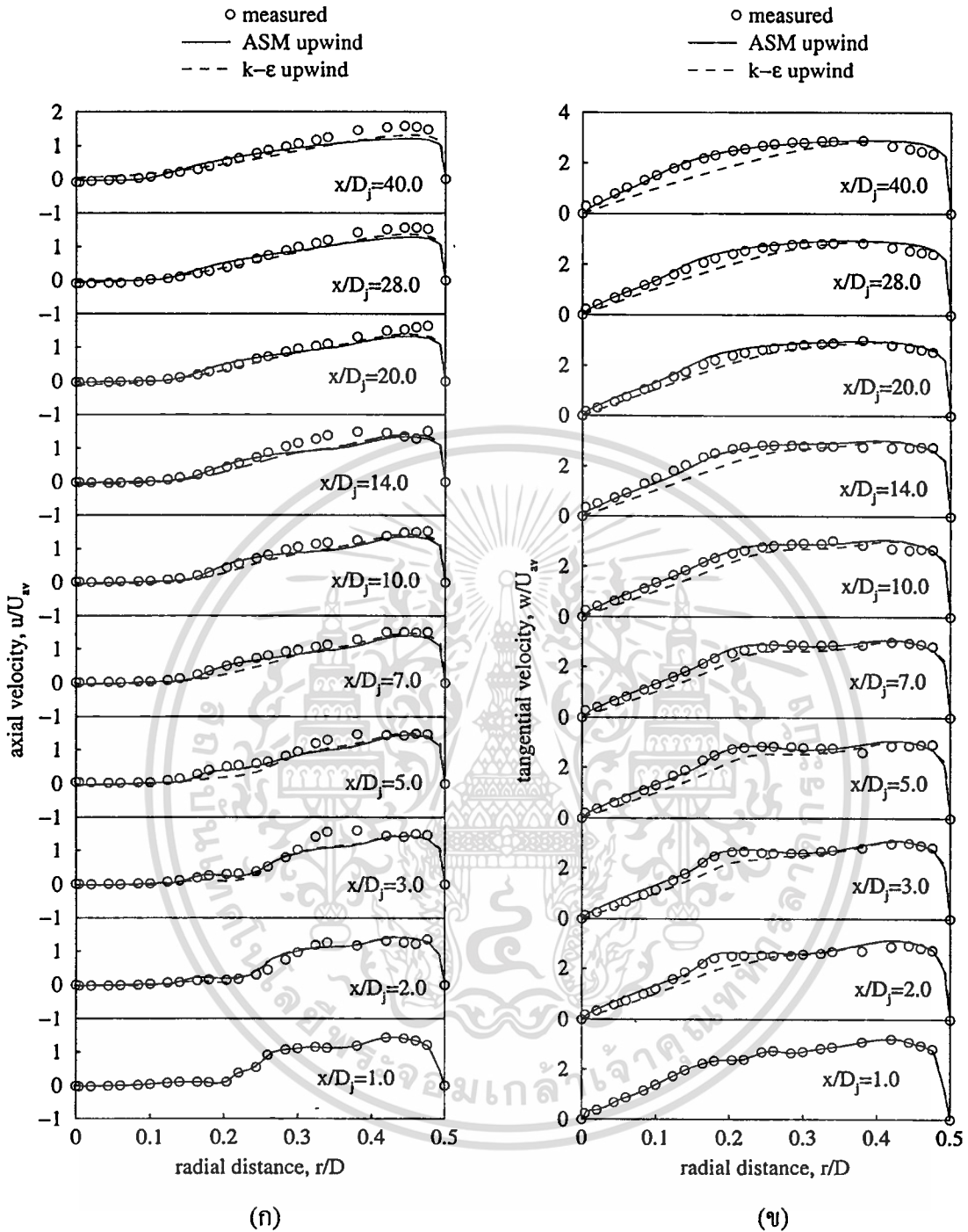
2.0 ถึง 40.0 โดยคำตอบของ upwind และ hybrid scheme นั้นมีความแตกต่างกับผลที่ได้จาก QUICK และ SOU scheme เล็กน้อย

Contour plot ของ stream function ได้แสดงในรูป 5.7 จากรูป contour plot สังเกตได้ว่าเส้น stream function มีลักษณะเป็นเส้นที่ราบเรียบมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และมีการเปลี่ยนแปลงเพียงช่วงต้นที่บริเวณการไหลที่ออกจาก swirler ซึ่งหากเปรียบเทียบกับ contour plot ของ $k-\epsilon$ model ในรูป 5.4 พบว่า ในรูป 5.7 มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าในรูป 5.4 อันสังเกตได้จากความชันของเส้น stream function ในรูป 5.4 มีความชันมากกว่าในรูป 5.7 อย่างเห็นได้ชัด และมีลักษณะที่เอียงไปตลอดทั้งช่วงตั้งแต่ $x/D = 0.5$ ถึง 3 ซึ่งมีสาเหตุมาจากการใช้ turbulence model ที่แตกต่างกันนั่นเอง

รูป 5.8 แสดง vector plot ของความเร็วที่ทำนายโดย ASM จากรูปมีผลในลักษณะเดียวกันกับที่พบใน contour plot คือ สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของจุดที่ความเร็วเป็นศูนย์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก แต่สามารถพบลักษณะพิเศษบางอย่างที่ไม่มีบน contour plot คือ ใน contour plot เส้น stream function นั้นดูเหมือนไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย แต่จาก vector plot มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงแต่มีขนาดที่น้อยมาก ทำให้มองไม่เห็นบน contour plot และหากทำการเปรียบเทียบรูป 5.8 กับรูป 5.5 ก็พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยในรูป 5.5 นั้นสามารถเห็นการเกิด recirculation ขึ้นที่บริเวณ $x/D = 0$ ถึง 1.8 กับ $r/D = 0$ ถึง 0.2 และหลังจากที่ x/D เลข 1.8 ออกไปแล้วความเร็วมีค่าเป็นบวก ในขณะที่รูป 5.8 นั้น ถึงแม้มีลักษณะเหมือนกับเกิด recirculation ขึ้นแต่ก็มีขนาดที่เล็กกว่าที่เกิดขึ้นในรูป 5.5 และเห็นได้ว่าในรูป 5.8 แม้ค่า $x/D = 3$ ค่าของความเร็วก็ยังไม่มีค่าเป็นค่าบวก จากความแตกต่างของรูป vector plot ทั้ง 2 รูปนี้เอง ทำให้สามารถชี้ให้เห็นถึงผลของการใช้ turbulence model ที่แตกต่างกันอย่างเด่นชัด

การจำลองการไหลในเตาเผาโดย ASM ซึ่งทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ numerical differencing scheme 4 วิธี คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU ชี้ให้เห็นว่ายังไม่สามารถสรุปได้ว่า scheme ใดมีประสิทธิภาพดีที่สุด เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้นั้นยังไม่ปรากฏความแตกต่างที่เด่นชัด ถึงแม้มีความแตกต่างในความเร็วตามแนวแกนที่ตำแหน่ง $x/D_j = 3.0$ และ 5.0 ที่บริเวณ r/D ประมาณ 2 ถึง 3 แต่ก็ยังไม่อาจชี้ชัดได้ เพราะความแตกต่างนี้นั้นแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นผลการทำนายโดย upwind และ hybrid ซึ่งเป็นการประมาณโดยสมการเชิงเส้น กับส่วนที่เป็นการทำนายโดย QUICK และ SOU ซึ่งเป็นการประมาณโดยสมการลำดับที่สอง ทำให้ไม่อาจสรุปเนื่องจากความแตกต่างอาจมาจากในการประมาณโดยสมการกำลังสองนั้นมีโอกาสที่เกิด over-shoot ขึ้นได้

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลระหว่าง ASM และ $k-\epsilon$ model ดังแสดงในรูปที่ 5.9(ก) เห็นได้ว่ามีความแตกต่างของความเร็วตามแนวแกนอย่างชัดเจนที่ตำแหน่ง $x/D_j = 2.0$ ถึง 40.0 และ $r/D = 0.14$ ถึง 0.27 โดยค่าที่ได้จาก ASM นั้นแม่นยำมากกว่าที่ได้จาก $k-\epsilon$ model



รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบผลการทำนายระหว่าง $k-\varepsilon$ model กับ ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส

แต่ในบางตำแหน่งนั้นก็สังเกตได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จาก $k-\varepsilon$ model นั้นดีกว่าที่ได้จาก ASM เล็กน้อย เช่น ที่ตำแหน่ง $x/D_j = 7.0$ ถึง 40.0 และ r/D ประมาณ 0.4 ถึง 0.5 แต่หากมองภาพรวมทั้งหมดสามารถกล่าวได้ว่า ASM ทำนายได้ดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 5.9(ข) พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายโดย ASM นั้นเข้าใกล้ข้อมูลจากการทดลองมากกว่าการทำนายโดย $k-\epsilon$ model อย่างชัดเจน ดังสังเกตได้ที่ตำแหน่ง $x/D_j = 2.0$ ถึง 40.0 ที่ $r/D = 0.0$ ถึง 0.35 ซึ่งค่าที่ได้จาก $k-\epsilon$ model นั้นต่ำกว่าผลที่ได้จาก ASM อย่างเห็นได้ชัด ทำให้สามารถกล่าวได้ว่า ASM ทำนายได้ดีกว่า

จากการจำลองการไหลทั้งหมดนั้นสามารถสรุปได้ว่า ASM นั้นสอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองมากกว่าการใช้ $k-\epsilon$ model ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ ASM อันเป็น model สูงกว่านั้นสามารถทำนายได้แม่นยำกว่า $k-\epsilon$ model ที่เป็น model ในลำดับที่ต่ำกว่า

5.3 เตาเผาของ So *et. al.* (1984) กรณีที่มีการฉีดอากาศ

จากหัวข้อ 5.2 ได้ทำการจำลองการไหลในเตาเผาของ So *et. al.* ที่กรณี $U_j = 0 \text{ m/s}$ ซึ่งจากการทำนายพบว่ามีผลสอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองเป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ASM ที่สามารถทำนายได้ค่าที่สอดคล้องเป็นอย่างมาก

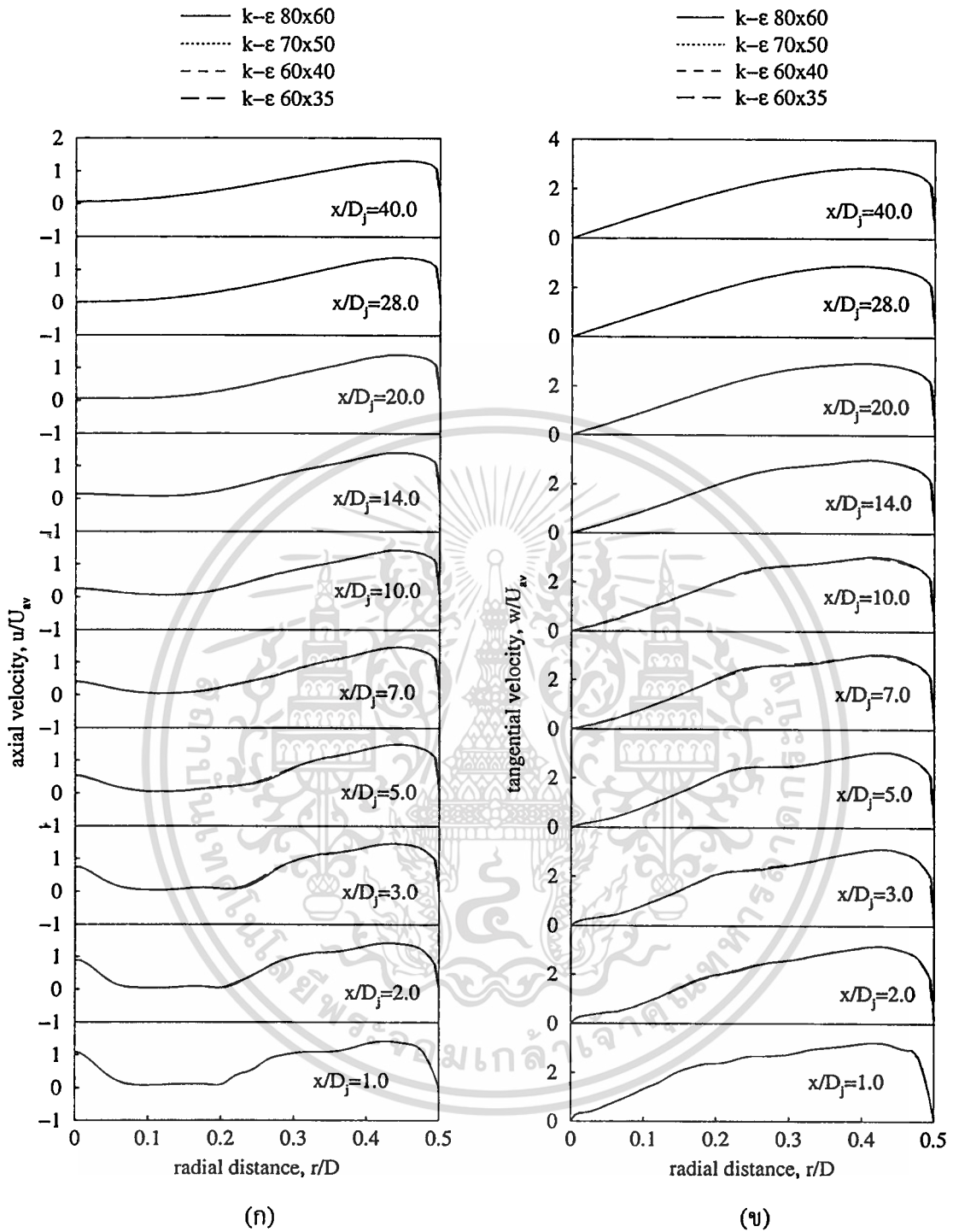
ในหัวข้อนี้ได้ทำการจำลองการไหลในเตาเผาของ So *et. al.* เช่นเดียวกับในหัวข้อ 5.2 เพียงแต่แตกต่างกันที่มีการฉีดอากาศ(เป็นการจำลองการฉีดเชื้อเพลิงในเตาเผา) $U_j = 25.4 \text{ m/s}$ ซึ่งทำให้ลักษณะการไหลมีความซับซ้อนมากขึ้น โดยในการจำลองนี้ยังคงใช้เงื่อนไขของ axisymmetric ทำการคำนวณ, มีการเปรียบเทียบ numerical differencing scheme ทั้ง 4 วิธี และยังคงทำการใช้ $k-\epsilon$ model กับ ASM เช่นเดิม โดยผลลัพธ์ได้นำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองของ So *et. al.* (1984) ที่ตำแหน่ง $x/D_j = 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0, 14.0, 20.0, 28.0$ และ 40.0

การหาจำนวนกริดที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการจำลองการไหลนี้แสดงในรูปที่ 5.10 โดยทำการคำนวณที่จำนวนกริดเท่ากับ $80 \times 60, 70 \times 50, 60 \times 40$ และ 60×35 ซึ่งในรูปที่ 5.10 นั้นได้แสดงทั้งความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัส จากรูป 5.10 สังเกตได้ว่ามีความแตกต่างของผลการคำนวณที่จำนวนกริดต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยบนความเร็วตามแนวแกนนั้นมีความแตกต่างอยู่ที่ $x/D_j = 2.0, 3.0$ และ 5.0 ที่บริเวณ $r/D = 0.2$ ถึง 0.3 และบนความเร็วตามแนวสัมผัสมีความแตกต่างที่ $x/D_j = 2.0$ ถึง 3.0 ที่บริเวณ $r/D = 0.15$ ถึง 0.35 ซึ่งทั้งความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัสมีความแตกต่างที่เหมือนกัน คือ ผลการทำนายที่ 60×35 มีลักษณะที่แตกต่างจาก $80 \times 60, 70 \times 50$ และ 60×40 แต่พบว่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีขนาดที่เล็กน้อยมาก ทำให้สามารถสรุปได้ว่าจำนวนกริดที่น้อยที่สุดที่สามารถเลือกใช้ในการจำลองการไหลนี้ คือ ที่ 60×35

5.3.1 การทำนายการไหลโดย $k-\epsilon$ model

การจำลองการไหลโดย $k-\epsilon$ model ทั้งหมดนั้น ได้แสดงในรูปของกราฟเปรียบเทียบผลของความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัส รวมถึง contour plot และ vector plot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ความเป็นอิสระของกริดต่อความเร็วที่ทำนายโดย $k-\epsilon$ model (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส

จากรูป 5.11 ได้แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัสกับข้อมูลจากการทดลอง ความเร็วตามแนวแกนตามที่แสดงในรูป 5.11(ก) พบว่าทุกๆ scheme สามารถทำนายได้ผลที่แทบไม่มีความแตกต่างกันเลย โดยค่าที่ได้จากการทำนายนั้นพบว่าไม่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะที่ต่ำกว่าข้อมูลจากการทดลองเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสังเกตได้ที่ตำแหน่ง $x/D_j = 3.0$ ถึง 14.0 ที่บริเวณ $r/D = 1.6$ ถึง 4.1 โดยจากรูป 5.11(ก) นั้นไม่ชี้ชัดได้ว่าผลการทำนายโดย scheme ใดมีความแม่นยำที่สุด เนื่องจากผลลัพธ์ของ scheme ต่างๆที่ได้จากการทำนายนั้นมีความแตกต่างกันเล็กน้อยมาก เฉพาะที่ตำแหน่ง $x/D_j = 3.0$ และ 5.0 ที่บริเวณ $r/D = 2.5$ เท่านั้น แต่พบว่าคำตอบที่ได้มีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับข้อมูลจากการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวสัมผัสแสดงในรูป 5.11(ข) พบว่าที่ตำแหน่ง $x/D_j = 2.0$ ถึง 40.0 กับที่บริเวณ $r/D = 0.07$ ถึง 3.4 นั้นค่าจากการทำนายทั้งหมดมีลักษณะที่ต่ำกว่าข้อมูลจากการทดลอง และที่ตำแหน่ง $x/D_j = 2.0$ ถึง 40.0 ที่บริเวณ $r/D = 3.7$ ถึง 5.0 นั้นผลที่ได้จากการทำนายทั้งหมดมีลักษณะที่สูงกว่าข้อมูลจากการทดลอง โดยพบว่าเมื่อเลขตำแหน่ง $x/D_j = 20.0$ ออกไป ลักษณะของคำตอบที่ได้การทำนายทั้งหมดเป็น rigid body rotation คือแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างกราฟเลย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการใช้ $k-\epsilon$ model เพราะโดยทั่วไปแล้ว $k-\epsilon$ model ทำนายการไหลแบบหมุนวนได้ไม่ดี และจากผลทั้งหมดในรูป 5.11(ข) พบว่าไม่มีความแตกต่างของคำตอบที่ได้จาก scheme เลข

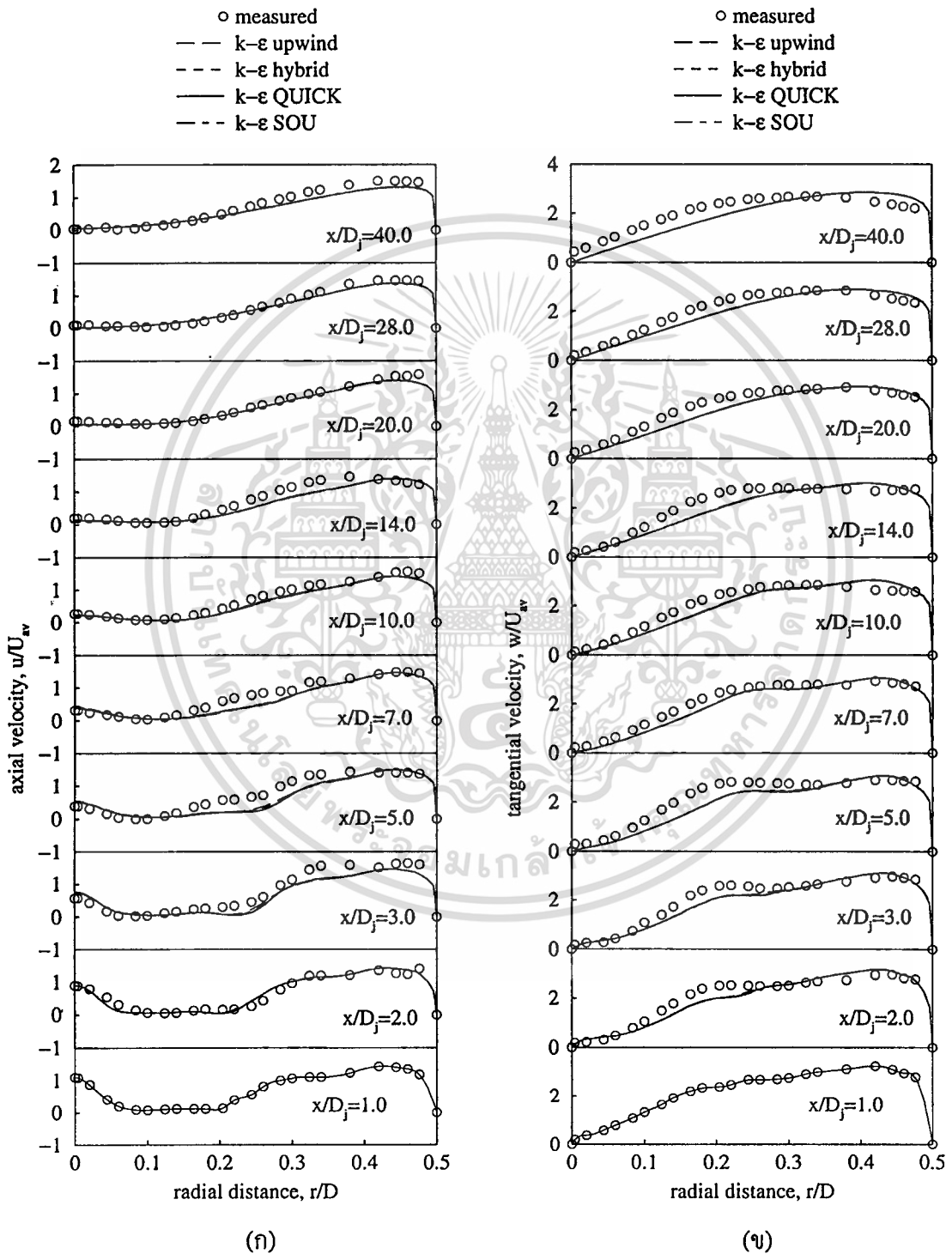
รูปที่ 5.12 แสดง contour plot ของ stream function จากรูปเห็นได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดมากนัก โดยลักษณะของเส้น stream function ราบเรียบโดยมีการลาดลงเล็กน้อยเมื่อระยะ x/D เพิ่มขึ้น

Vector plot ของความเร็วแสดงในรูปที่ 5.13 ซึ่งจากรูปสามารถสังเกตเห็นการบิดได้อย่างชัดเจนที่บริเวณ x/D และ r/D เข้าใกล้ศูนย์ และพบว่าความเร็วมีการขยายตัวโดยสังเกตได้ที่ $x/D = 1.0$ นั้นจุดที่ความเร็วเริ่มคงที่อยู่ที่ r/D ประมาณ 1.5 แต่ที่ x/D ประมาณ 2.5 นั้นจุดที่ความเร็วเริ่มคงที่อยู่ที่ r/D ประมาณ 1.0 และขนาดของความเร็วที่คงที่ก็มากกว่าที่ $x/D = 1.0$

จากการทำนายโดย $k-\epsilon$ model ทั้งหมด พบว่าผลการทำนายที่ได้มีความใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลอง ถึงแม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้ต่ำกว่าการทดลองบ้าง เช่น ในรูปที่ 5.11(ก) ที่ตำแหน่ง $x/D_j = 3.0$ ถึง 14.0 และที่บริเวณ $r/D = 1.6$ ถึง 4.1 และในรูปที่ 5.11(ข) ที่ตำแหน่ง $x/D_j = 2.0$ ถึง 40.0 และที่บริเวณ $r/D = 0.07$ ถึง 3.4 แต่จากผลทั้งหมดก็ยังสามารถกล่าวได้ว่า การจำลองการไหลโดย $k-\epsilon$ model นั้นมีความถูกต้องใกล้เคียงและสามารถทำนายแนวโน้มของการไหลที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง ในส่วนของการเปรียบเทียบ numerical differencing scheme ที่แตกต่างกันนั้น สรุปได้ว่าไม่อาจชี้ชัดได้ถึงประสิทธิภาพของ scheme โดยใช้การจำลองการไหลในครั้งนี้ เพราะจากค่าที่ได้พบว่าไม่มีความแตกต่างที่ชัดเจนเลย ไม่ว่าในส่วนของความเร็วตามแนวแกนที่มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยมาก ที่ตำแหน่ง $x/D_j = 3.0$ และ 5.0 กับที่บริเวณ $r/D = 2.5$ และในส่วนของความเร็วตามแนวสัมผัสที่จากรูป 5.12(ข) นั้นมองไม่เห็นความแตกต่างใดๆเลย ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากลักษณะการไหลทั้งหมดที่มีลักษณะที่ราบเรียบไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดนั่นเอง

5.3.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress Model (ASM)

จากการจำลองการไหลโดย ASM ร่วมกับ scheme ต่างๆ ได้แสดงในรูปของความเร็วตามแนวแกน, ความเร็วตามแนวสัมผัส, contour plot และ vector plot



รูปที่ 5.11 กราฟการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย $k-\epsilon$ model (ก) ความเร็วตามแนว

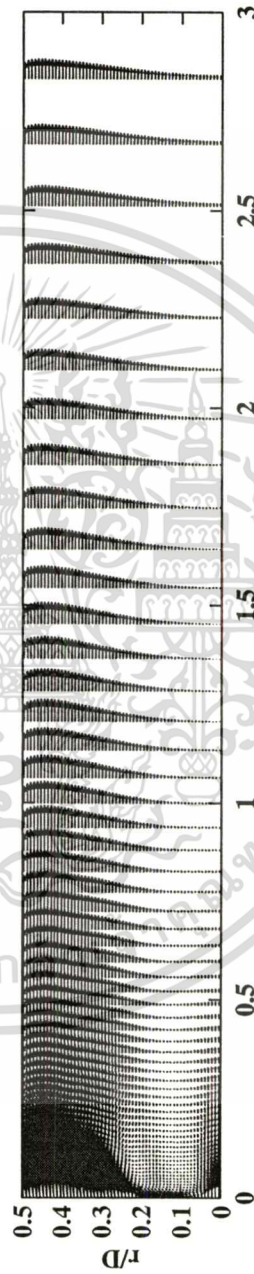
แกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 Contour plot ของ stream function ทำนายโดย upwind scheme และ $k-\epsilon$ model



รูปที่ 5.13 Vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย upwind scheme และ $k-\epsilon$ model

รูปกราฟการเปรียบเทียบของความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัส ได้แสดงในรูป 5.14(ก) และ 5.14(ข) ตามลำดับ จากรูป 5.14(ก) ผลการทำนายนั้นมีความใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลอง แต่สามารถสังเกตได้ว่าที่ตำแหน่ง $x/D_j = 3.0$ ถึง 14.0 นั้นผลที่จากการทำนายทุก scheme มีลักษณะที่ต่ำกว่าข้อมูลจากการทดลอง ซึ่งเหมือนกับที่ได้จากการทำนายโดย $k-\epsilon$ model และยังพบอีกว่าการจำลองการไหลโดย ASM นั้นทำนายการไหลที่บริเวณ r/D เข้าใกล้ศูนย์ได้สูงกว่าการทดลองอย่างเห็นได้ชัด ในส่วนของการใช้ scheme ที่แตกต่างกันนั้นสามารถสังเกตได้ที่ตำแหน่ง $x/D_j = 3.0$ และ 5.0 ที่บริเวณ r/D ประมาณ 2.3 จากรูป 5.14(ก) สรุปได้การทำนายโดย ASM นั้นมีความสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดีและไม่อาจชี้ชัดได้ว่า scheme ใดมีประสิทธิภาพที่สุดในการจำลองการไหล

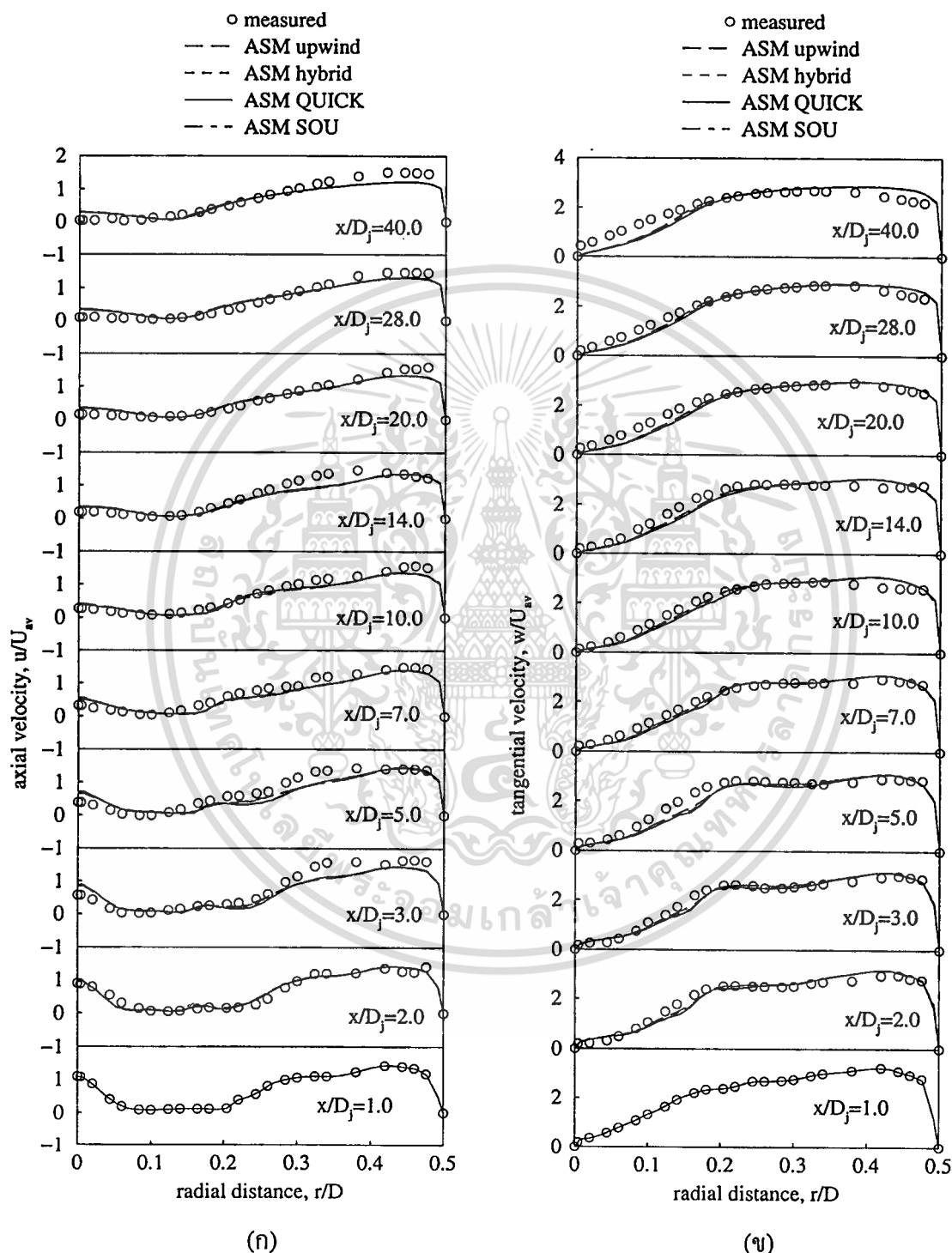
จากการเปรียบเทียบของความเร็วตามแนวสัมผัสที่แสดงในรูปที่ 5.14(ข) พบว่ามีความผิดพลาดที่ตำแหน่ง $x/D_j = 5.0$ ถึง 40.0 ที่บริเวณ $r/D = 0.0$ ถึง 0.2 ค่าที่ได้จากการทำนายของทุก scheme นั้นมีลักษณะที่ต่ำกว่าการทดลองอย่างเห็นได้ชัด และถึงแม้ว่าในรูป 5.14(ข) นี้พบความแตกต่างของการใช้ scheme ที่ต่างกันกระจายอยู่ตลอดทั้งกราฟ แต่ความแตกต่างที่เกิดขึ้นมีขนาดที่น้อยมาก และสามารถแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นการประมาณเชิงเส้นกับส่วนที่เป็นการประมาณกำลังสอง ทำให้ไม่อาจชี้ชัดได้ว่า scheme ใดดีกว่า

รูป 5.15 แสดง contour plot ของ stream function พบว่าลักษณะเป็นเส้นราบเรียบ โดยเส้น stream function นี้มีการลาดลงเล็กน้อยเมื่อระยะ x/D เพิ่มขึ้น แต่หากทำการเปรียบเทียบกับ contour plot ที่ทำนายโดย $k-\epsilon$ model แล้วเห็นได้ว่า ASM มีการลาดลงที่น้อยกว่า $k-\epsilon$ model

Vector plot ของความเร็วที่ทำนายโดย ASM แสดงในรูป 5.16 พบว่าที่บริเวณ r/D เข้าใกล้ศูนย์นั้นก็สามารถสังเกตเห็นการฉีดได้อย่างชัดเจนและต่อเนื่องจากที่ $x/D = 0.0$ ถึง 2.7 ซึ่งสอดคล้องผลที่แสดงในรูป 5.14(ก) ที่บริเวณนี้มีค่าสูงกว่าข้อมูลจากการทดลอง ซึ่งใน vector plot นั้นได้พบลักษณะของความเร็วที่ลาดเอียงสอดคล้องกับ contour plot และทำการเปรียบเทียบ vector plot ที่ทำนายโดย ASM กับ $k-\epsilon$ model พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ ลักษณะของความเร็วที่ทำนายโดย $k-\epsilon$ model ที่ค่อยๆลดลงไปเป็นศูนย์ซึ่งแตกต่างกับ ASM ที่ความเร็วลดลงแล้วเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเร็วของการฉีด ความแตกต่างนี้มีสาเหตุมาจากการใช้ turbulence model ที่แตกต่างกัน

จากการจำลองการไหลโดย ASM เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของ scheme ทั้ง 4 scheme คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU พบว่าไม่อาจสรุปได้ว่า scheme ใดมีประสิทธิภาพที่สุด เพราะไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนมากนัก นอกจากการแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นการประมาณเชิงเส้นกับส่วนที่เป็นการประมาณกำลังสอง และในส่วนของเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองนั้นสามารถกล่าวได้ว่าการจำลองการไหลโดย ASM มีความแม่นยำถูกต้อง รวมถึงสามารถนำไปใช้ในการทำนายแนวโน้มของการไหลได้เป็นอย่างดี

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลที่ทำนายโดย ASM กับ $k-\varepsilon$ model ดังที่แสดงในรูป 5.17(ก) พบว่าความเร็วตามแนวแกนนั้นมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดว่าการใช้ ASM ทำนายได้ดีกว่าการใช้ $k-\varepsilon$ model ซึ่งสังเกตได้ที่ตำแหน่ง $x/D_j = 2.0$ ถึง 40.0 ที่บริเวณ $r/D = 1.5$

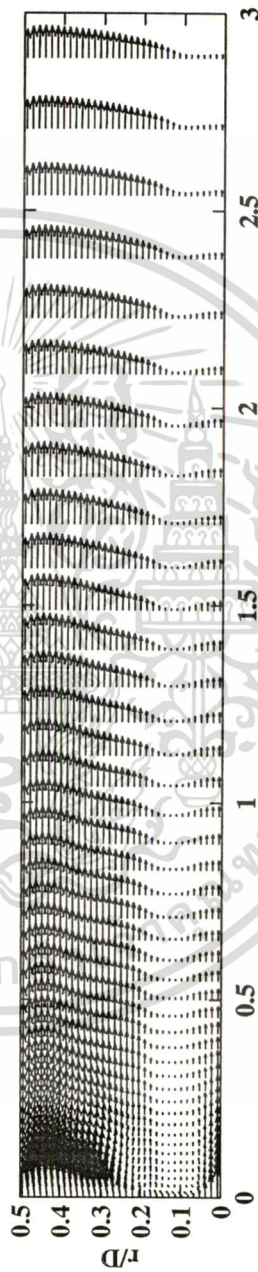


รูปที่ 5.14 กราฟการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



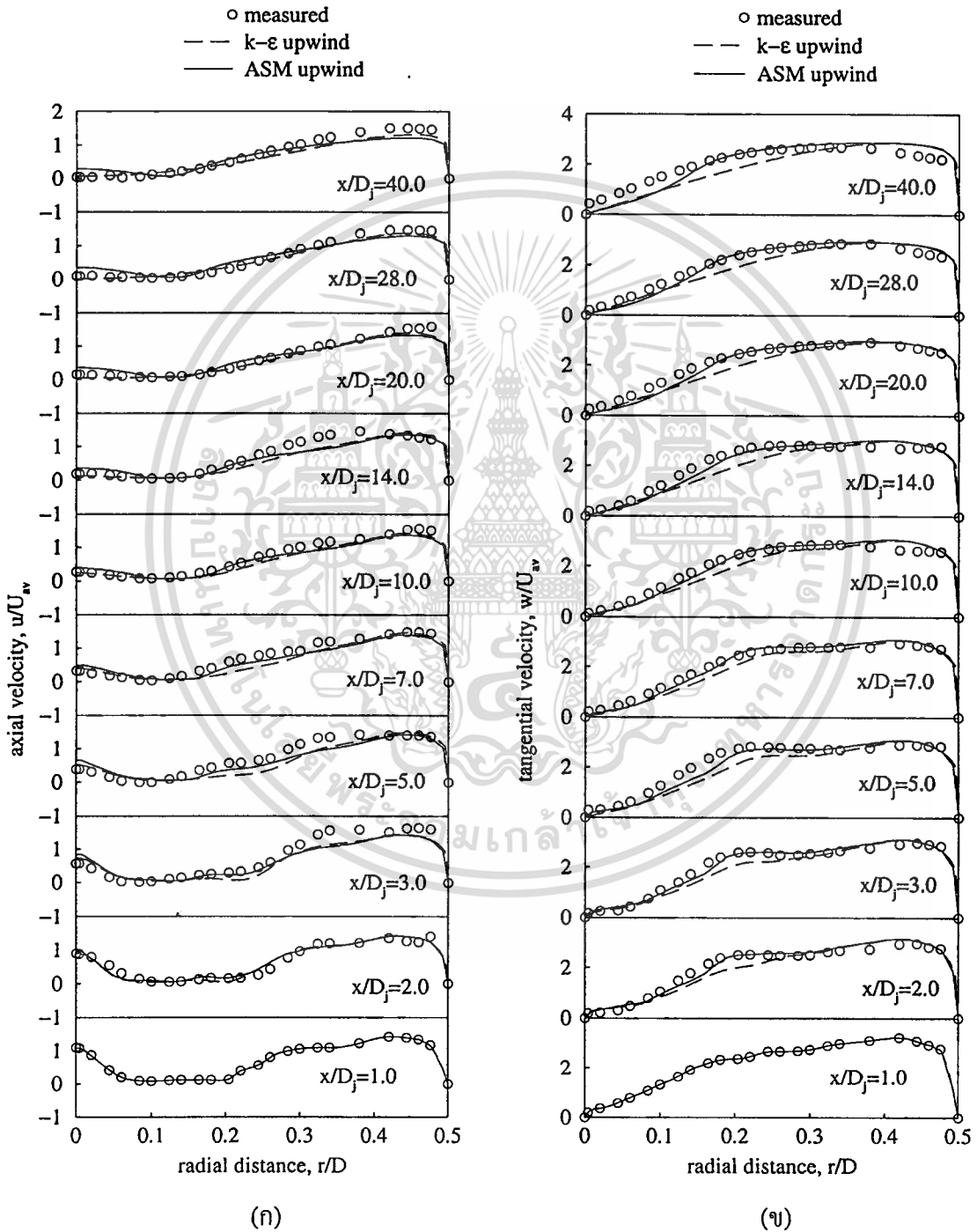
รูปที่ 5.15 Contour plot ของ stream function ทำนายโดย upwind scheme และ ASM



รูปที่ 5.16 Vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย upwind scheme และ ASM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึง 3.2 ซึ่งผลการทำนายของ ASM เข้าใกล้ข้อมูลจากการทดลองมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด และถึงแม้ว่าค่าของ $k-\epsilon$ model ในบางจุดดีกว่าของ ASM บ้างในบางตำแหน่ง เช่น ที่ r/D เข้าใกล้ศูนย์และที่ตำแหน่ง $x/D_j = 28.0$ และ 40.0 ที่บริเวณ $r/D = 0.37$ ถึง 0.5 ที่ $k-\epsilon$ model ทำนายได้ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่า แต่ทั้งหมดก็ยังเป็นเพียงจุดเล็กๆเมื่อเทียบกับภาพรวมแล้ว



รูปที่ 5.17 กราฟเปรียบเทียบผลการทำนายระหว่าง $k-\epsilon$ model กับ ASM (ก) ความเร็วตามแนว

แกน (ง) ความเร็วตามแนวสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 5.17(ข) พบว่าการทำนายโดย $k-\epsilon$ model นั้นผิดพลาดอย่างมากเมื่อเทียบกับการทำนายโดย ASM ซึ่งพบได้ที่ตำแหน่ง $x/D_j = 2.0$ ถึง 40.0 ที่บริเวณ $r/D = 0.1$ ถึง 0.37 ที่ ASM เข้าใกล้ข้อมูลจากการทดลองมากกว่า $k-\epsilon$ model และสังเกตได้ว่าถ้าในบริเวณใดที่ ASM ทำนายผิดพลาดแล้ว $k-\epsilon$ model ก็ทำนายผิดเช่นเดียวกัน เช่น ที่ตำแหน่ง $x/D_j = 2.0$ ถึง 40.0 ที่บริเวณ $r/D = 0.4$ ถึง 0.5 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายทั้ง 2 เส้นนั้นได้ทับกัน จากผลทั้งหมดในรูป 5.17(ข) ทำให้สามารถกล่าวได้ว่า ASM ทำนายได้ดีกว่า

จากผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองการไหลที่ทำนายโดย ASM กับ $k-\epsilon$ model สรุปได้ว่า ASM ทำนายได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลองมากกว่าการใช้ $k-\epsilon$ model ซึ่งเป็นไปตามการคาดคะเนที่ ASM อันเป็น model ในลำดับที่สูงกว่านั้นสามารถทำนายได้แม่นยำกว่า $k-\epsilon$ model ที่เป็น model ที่ต่ำกว่า

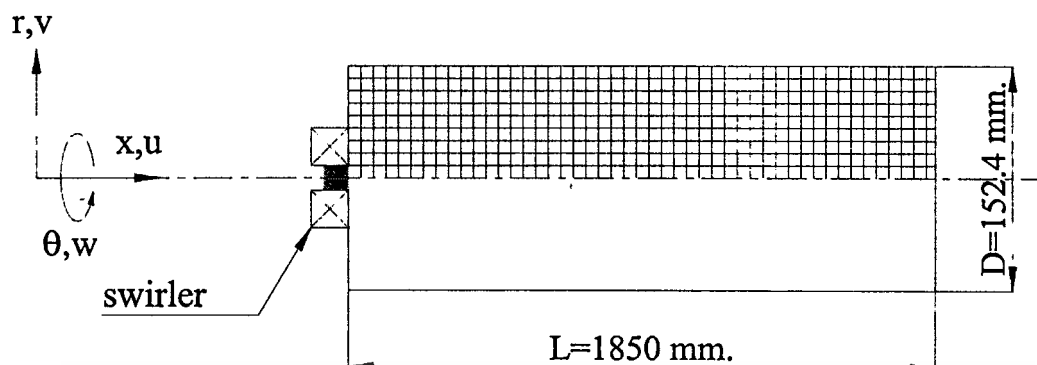
จากผลลัพธ์ทั้งหมดสามารถกล่าวได้ว่าการฉีดอากาศมีผลต่อลักษณะการไหลและการจำลองการไหล โดยสามารถสังเกตเห็นการฉีดอากาศนั้นมีผลต่อความเร็วตามแนวแกนในช่วงสั้นๆเท่านั้น แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงบนความเร็วตามแนวสัมผัสซึ่งพบว่าลักษณะของความเร็วตามแนวสัมผัสในกรณีที่มีการฉีดอากาศนั้น ไม่มีความแตกต่างกับกรณีที่ไม่มีการฉีดอากาศในหัวข้อ 5.1 เลย แต่การฉีดอากาศนี้ได้ส่งผลต่อการจำลองการไหลอย่างชัดเจน ซึ่งสังเกตได้จากการทำนายของความเร็วตามแนวสัมผัสที่ให้ค่าต่ำกว่าข้อมูลจากการทดลองในช่วง $r/D = 0.0$ ถึง 0.2 ส่วนในกรณีที่ไม่มีการฉีดอากาศนั้นค่าจากการทำนายมีลักษณะที่เหมือนกับข้อมูลจากการทดลอง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการฉีดอากาศนั้นทำให้ลักษณะการไหลมีความซับซ้อนขึ้น และการจำลองการไหลมีความยากขึ้นตามลำดับ

5.4 เตาเผาของ Ahmed (1997a)

จากการวัดการไหลในเตาเผาจำลอง โดยใช้ LDV ของ Ahmed (1997a) ซึ่งพบว่ามีความถูกต้องแม่นยำและเหมาะสมในกรณีเลือกจำลองการไหล เตาเผาที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.18 มี vane angle = 45° , $Re_D = 200,000$, swirl number (S) = 0.81 และความเร็วเฉลี่ย $U_0 = 30.4 \text{ m/s}$

การจำลองการไหลปั่นป่วนในเตาเผาที่ใช้เงื่อนไขของ axisymmetry ฉะนั้น computational domain จึงใช้เพียงครึ่งเดียวเท่านั้น โดยใช้ $k-\epsilon$ model และ ASM ร่วมกับ numerical differencing scheme 4 วิธี upwind, hybrid, QUICK และ SOU ซึ่งผลการทำนายได้นำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองของ Ahmed (1997a) ทั้งหมด 12 จุด ที่ตำแหน่ง $x/D = 0.0633, 0.167, 0.25, 0.333, 0.417, 0.5, 0.583, 0.669, 0.833, 1.0, 1.33$ และ 1.67

การจำลองการไหลนั้น เริ่มต้นจากการศึกษาความเป็นอิสระของกริด (grid independent) และทำการเปรียบเทียบความเร็วในทุกๆ แกน โดยใช้ upwind scheme เพื่อหาจำนวนกริดที่น้อยที่สุด ที่ไม่



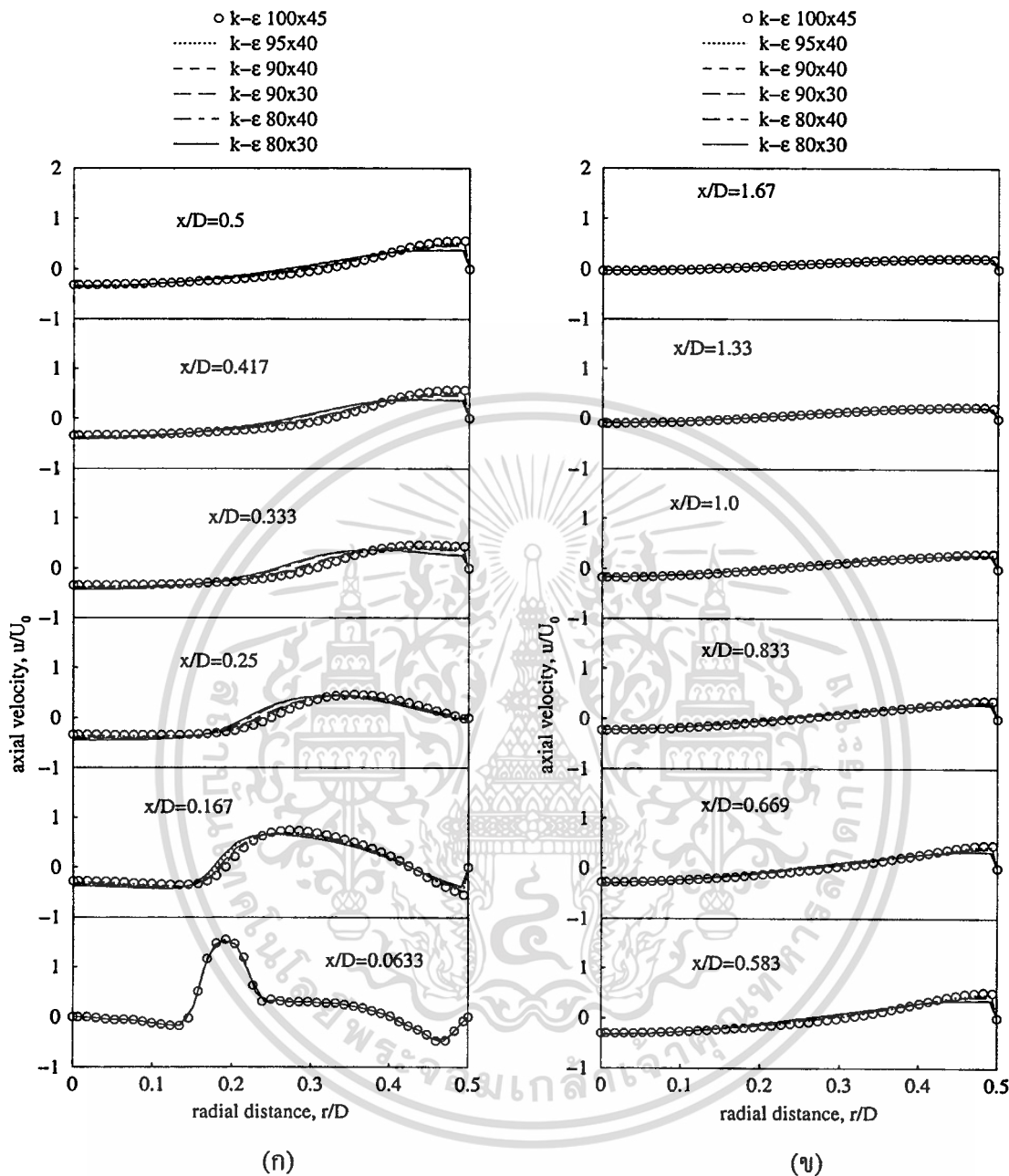
รูปที่ 5.18 ลักษณะเตาเผาของ Ahmed (1997a) และ computational domain

มีผลกระทบต่อความแม่นยำของคำตอบ โดยใช้จำนวนกริด คือ 100x45, 95x40, 90x40, 90x30, 80x40 และ 80x30

ผลของจำนวนกริดต่อความเร็วตามแนวแกน (axial velocity) แสดงในรูป 5.19 ซึ่งจากรูปพบว่าจำนวนกริดที่น้อยที่สุดที่ไม่มีผลต่อความแม่นยำของคำตอบคือ 90x30 โดยสังเกตได้อย่างชัดเจนที่ตำแหน่ง $r/D = 0.2 - 0.4$ และ $x/D = 0.25, 0.333, 0.417$ อันเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างสูงพบว่าเส้นของ 80x40 และ 80x30 ออกห่างอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อ x/D เลยตำแหน่ง 0.669 เป็นต้นไปเห็นได้ว่าคำตอบไม่มีความแตกต่างกันมากนักเนื่องจากที่บริเวณดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

รูป 5.20 แสดงความเป็นอิสระของกริดของความเร็วตามแนวรัศมี (radial velocity) พบว่าที่กริด 80x40 และ 80x30 มีความผิดพลาดตั้งแต่ $x/D = 0.0633$ เพราะเบนออกจากผลที่ได้จากที่กริดสูงกว่า อันส่งผลต่อไปถึงบริเวณถัดไปที่ $x/D = 0.167$ และ 0.25 ดังนั้นจากรูป 5.19 สามารถสรุปได้ว่าจำนวนที่น้อยที่สุดอยู่ที่ 95x40 เพราะเป็นเส้นที่ใกล้เคียงที่สุดซึ่งสามารถสังเกตได้ที่ตำแหน่ง $x/D = 0.25$ อันเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด

ความเป็นอิสระของกริดของความเร็วตามแนวสัมผัส (tangential velocity) ได้แสดงในรูปที่ 5.21 พบว่าลักษณะของความผิดพลาดแตกต่างจากความเร็วตามแนวแกนและความเร็วในแนวรัศมีคือที่จำนวนกริดน้อยค่าการทำนายสูงกว่าที่ใช้จำนวนกริดมาก (over-estimate) แต่พบลักษณะที่เหมือนกันในความเร็วทุกทิศทางเมื่อเลข $x/D = 0.25$ ไปแล้ว ผลของจำนวนกริดนั้นไม่มีความผิดพลาดมากนัก เพราะที่บริเวณดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเพียงเล็กน้อย จากรูป 5.21 นั้นเห็นได้ว่าจำนวนกริดที่น้อยที่สุดที่ไม่มีผลต่อความแม่นยำของคำตอบคือ 95x40 ซึ่งตรงกับความเร็วตามแนวรัศมี ทำให้สามารถสรุปได้ว่าในปัญหาการไหลในเตาเผาของ Ahmed (1997a) นี้ จำนวนกริดที่น้อยที่สุดที่ควรใช้ในการทำนายคือ 95x40



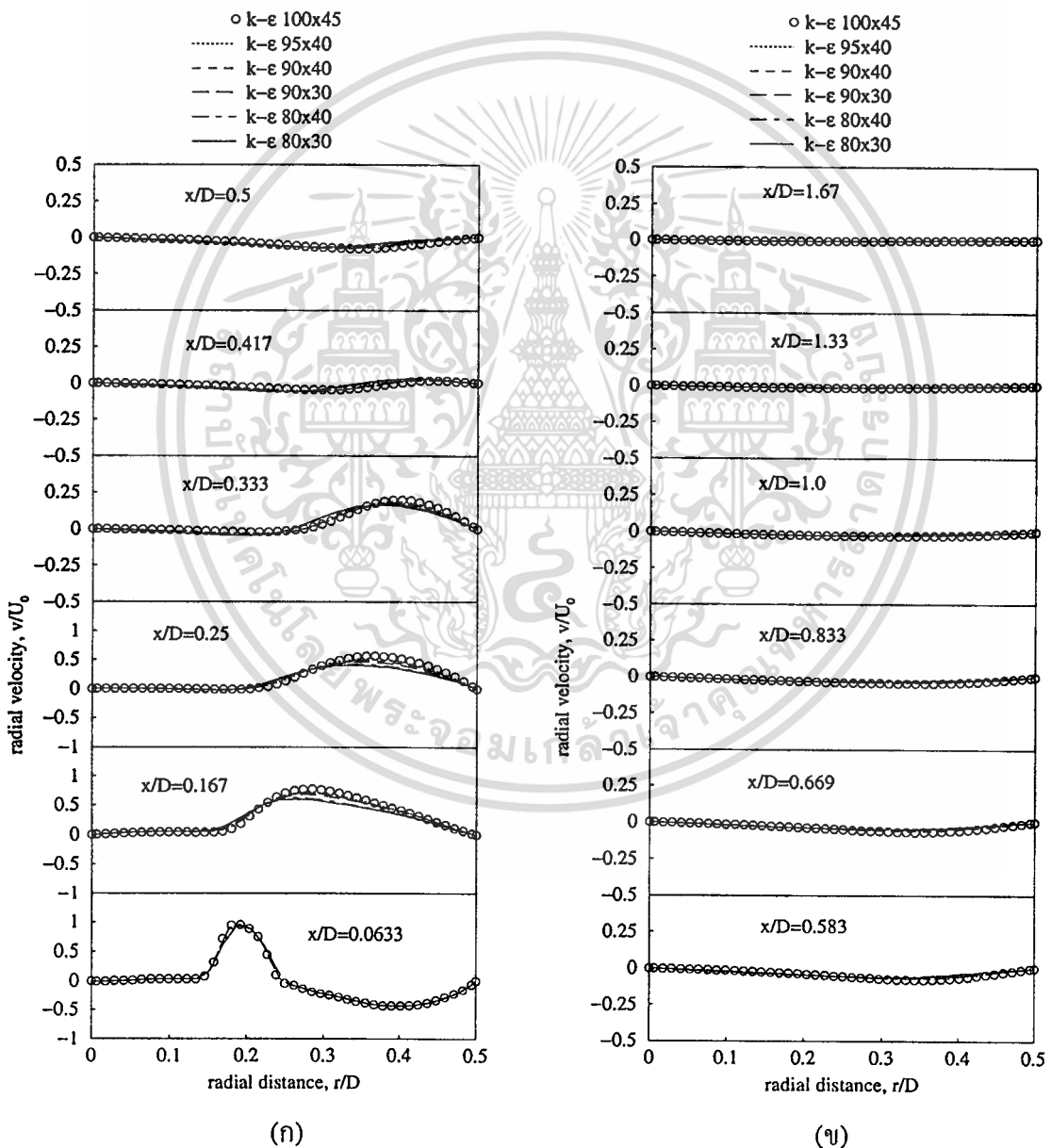
รูปที่ 5.19 ความเป็นอิสระของกริดต่อความเร็วตามแนวแกนที่ทำนายโดย $k - \epsilon$ model

5.4.1 การทำนายการไหลโดย $k - \epsilon$ model

จากการจำลองการไหลในเตาเผาโดยใช้สมการและ scheme ต่างๆที่กล่าวในข้างต้น ผลการคำนวณได้ถูกนำมาแสดงในรูปของความเร็วใน 3 ทิศทาง, contour plot ของ stream function และ vector plot

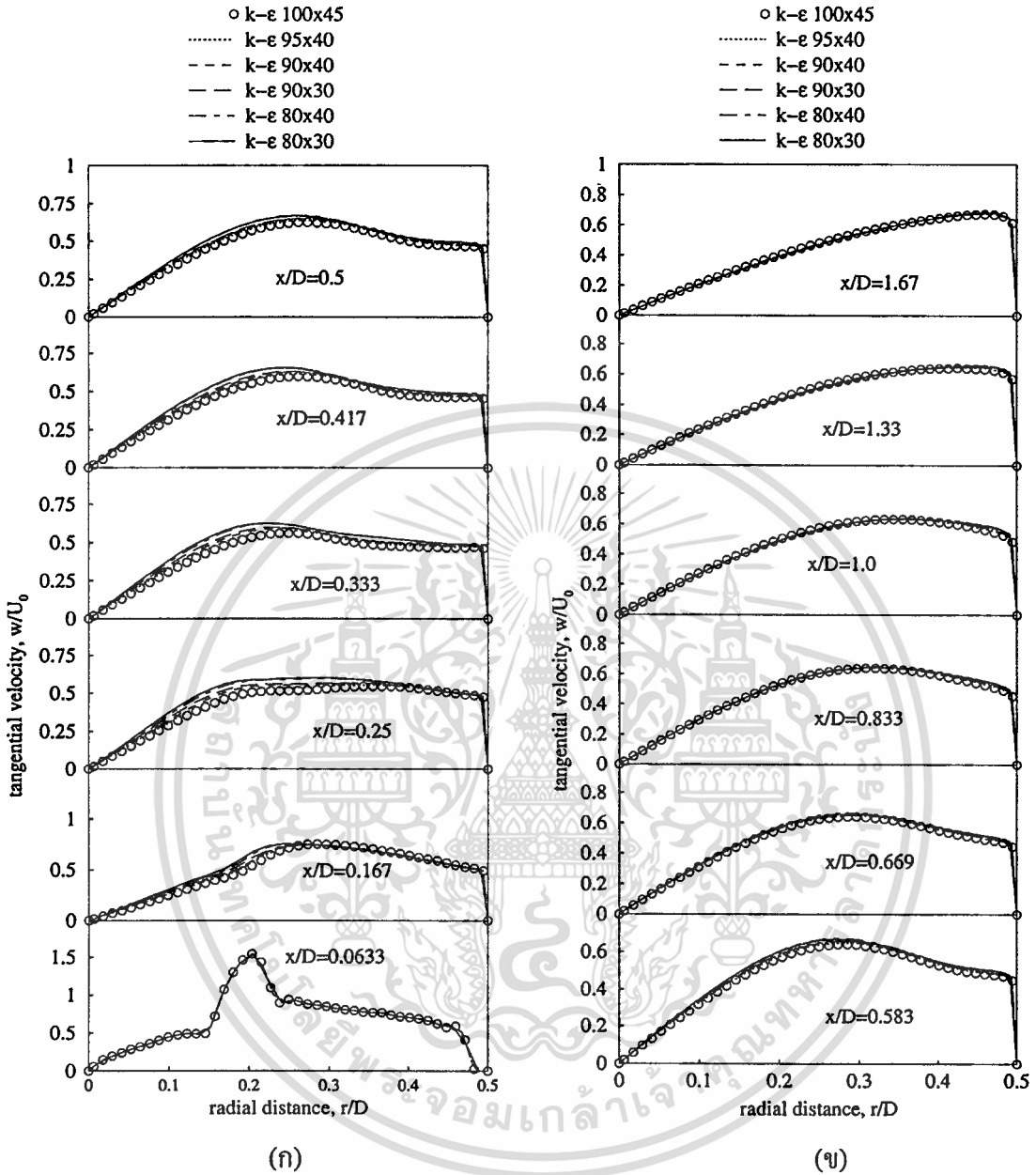
ผลของความเร็วตามแนวแกนซึ่งแสดงในรูป 5.22 เป็นการเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองกับผลลัพธ์ของ scheme ต่างๆ จากรูปที่ 4 scheme สามารถทำนายแนวโน้มของความเร็วได้ แต่จากเอกสารนี้เป็นเอกสาร ทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพรวมทั้งหมดแล้ว QUICK scheme สามารถทำนายผลได้แม่นยำที่สุด โดยสังเกตได้ที่ $x/D = 0.417, 0.5, 0.583$ และ 0.669 ที่บริเวณ $r/D = 0.25 - 0.5$ ซึ่ง QUICK scheme ทำนายค่าเข้าใกล้ผลการทดลองมากกว่า scheme อื่น ถึงแม้ว่ามีทำนายเกินไปบ้างในบางตำแหน่ง เช่น ที่ $x/D = 0.833$ และ 1.0 ที่บริเวณ r/D เข้าใกล้ 0.5 ในขณะที่ SOU ทำนายได้แม่นยำรองลงมา ส่วน hybrid และ upwind ทำนายได้ใกล้เคียงกันซึ่ง hybrid ดีกว่า upwind เล็กน้อย แต่ทั้ง 2 schemes นั้นมีความแม่นยำน้อยกว่า SOU จากรูปมีความผิดพลาดในการจำลองการไหลอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นเหมือนกันในทุกๆ scheme คือ ที่บริเวณ r/D เข้าใกล้ 0.0 (บริเวณกึ่งกลางเตา) ผลจากการจำลองการไหลเกิดการ



รูปที่ 5.20 ความเป็นอิสระของกริดต่อความเร็วตามแนวรัศมีที่ทำนายโดย $k-\epsilon$ model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 ความเป็นอิสระของกริดต่อความเร็วตามแนวสัมผัส ที่ทำนายโดย $k-\epsilon$ model

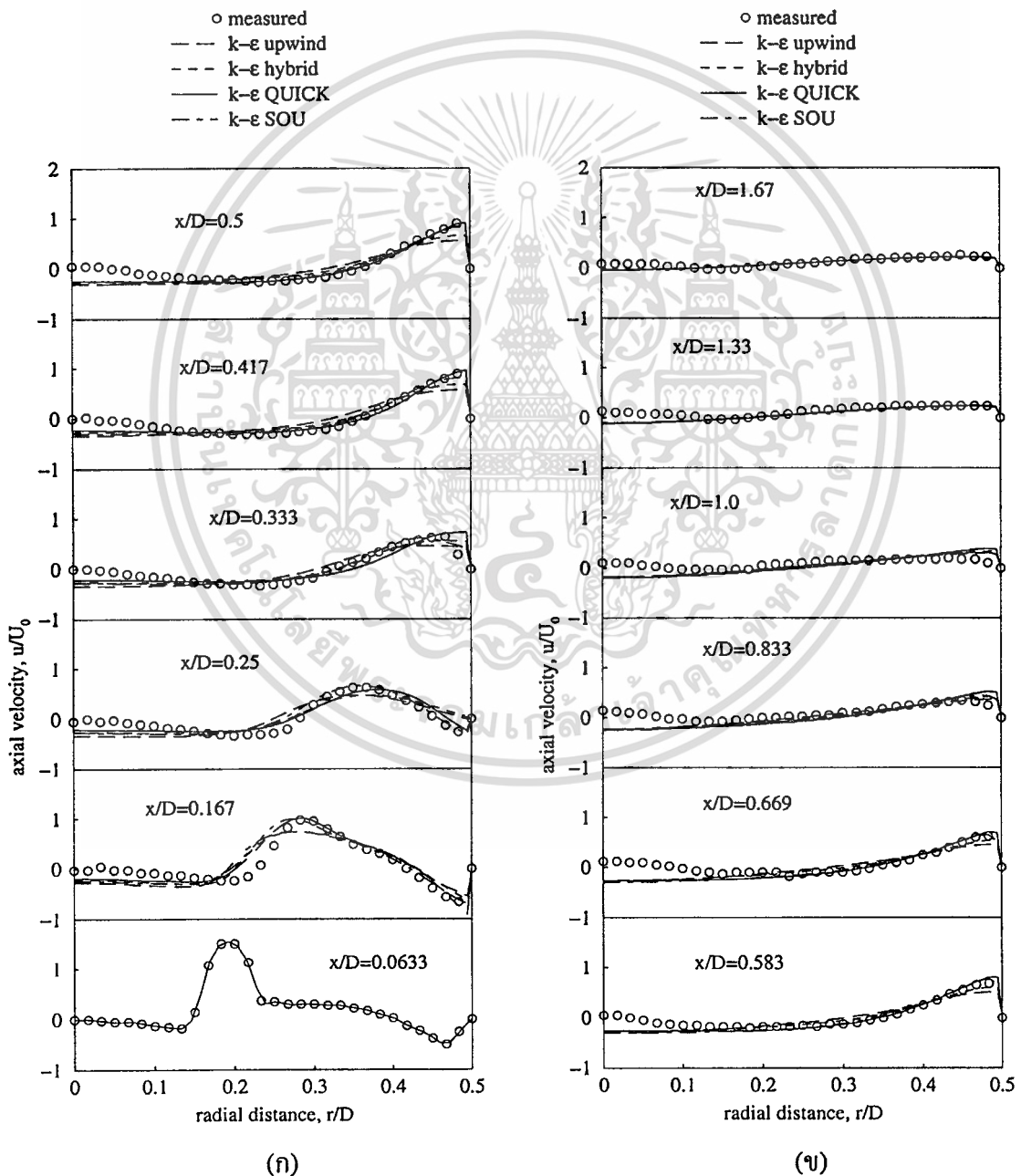
ไหลย้อนกลับ ($w/U_0 < 0.0$) ซึ่งแตกต่างจากข้อมูลจากการทดลอง และเกิดขึ้นในทุกๆตำแหน่งที่ทำ การจำลองการไหล โดยความผิดพลาดนี้อาจเกิดจากการใช้สมมติฐานบางอย่างในการทำนาย ในช่วงท้ายของการทำนายพบว่าทุก scheme นั้นทำนายได้ค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากที่ บริเวณดังกล่าวนี้มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

รูป 5.23 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วตามแนวรัศมีที่เป็นผลจากการทำนายกับข้อมูล จากการทดลอง โดยในรูปนี้พบว่า ความสามารถของ QUICK และ SOU ดีกว่า hybrid และ upwind

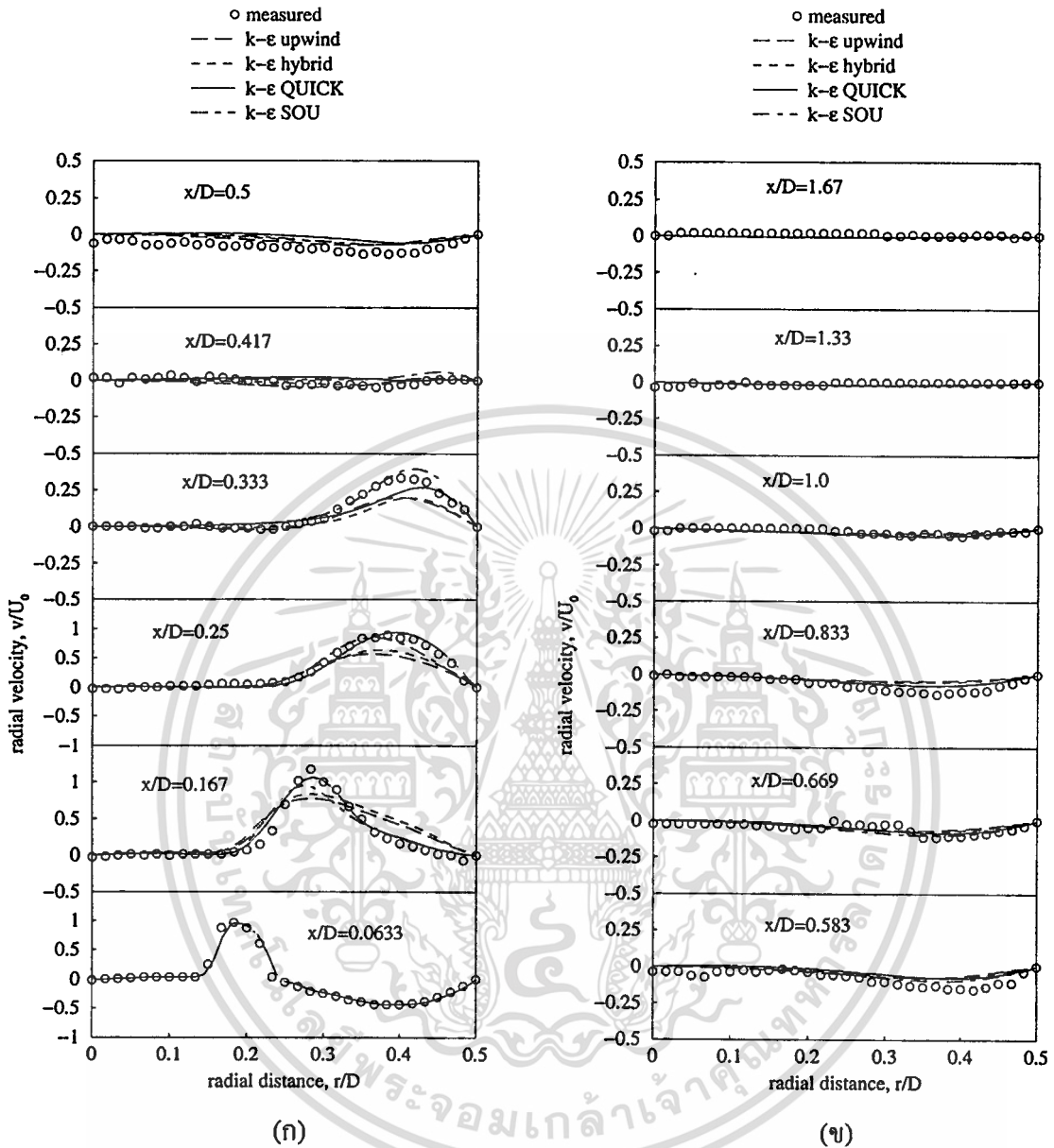
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณ $x/D = 0.167$ และ 0.25 ซึ่ง QUICK และ SOU ทำนายได้ดีกว่าอย่างชัดเจน แต่ QUICK ทำนายได้ใกล้เคียงกว่า SOU ในช่วงตั้งแต่ $x/D = 0.417$ เป็นต้นไป พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ทำให้ผลการทำนายของทุก scheme ไม่แตกต่างกัน

การทำนายความเร็วตามแนวสัมผัส ได้นำมาแสดงในรูป 5.24 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าสำหรับความเร็วในแนวนี้ นั้น ทุก scheme ทำนายค่าได้ผิดพลาดอย่างมากในแทบทุกๆตำแหน่ง แต่ upwind ให้ผลการทำนายที่ต่ำกว่า โดยสังเกตได้ว่าลักษณะของผลการทำนายโดย scheme อื่นๆนั้นค่อนข้างมีผิดพลาดมากขึ้น โดยเรียงไล่จาก upwind, hybrid, QUICK และ SOU ลงมาตามลำดับ ที่เป็นอย่างนี้มีสาเหตุมาจาก



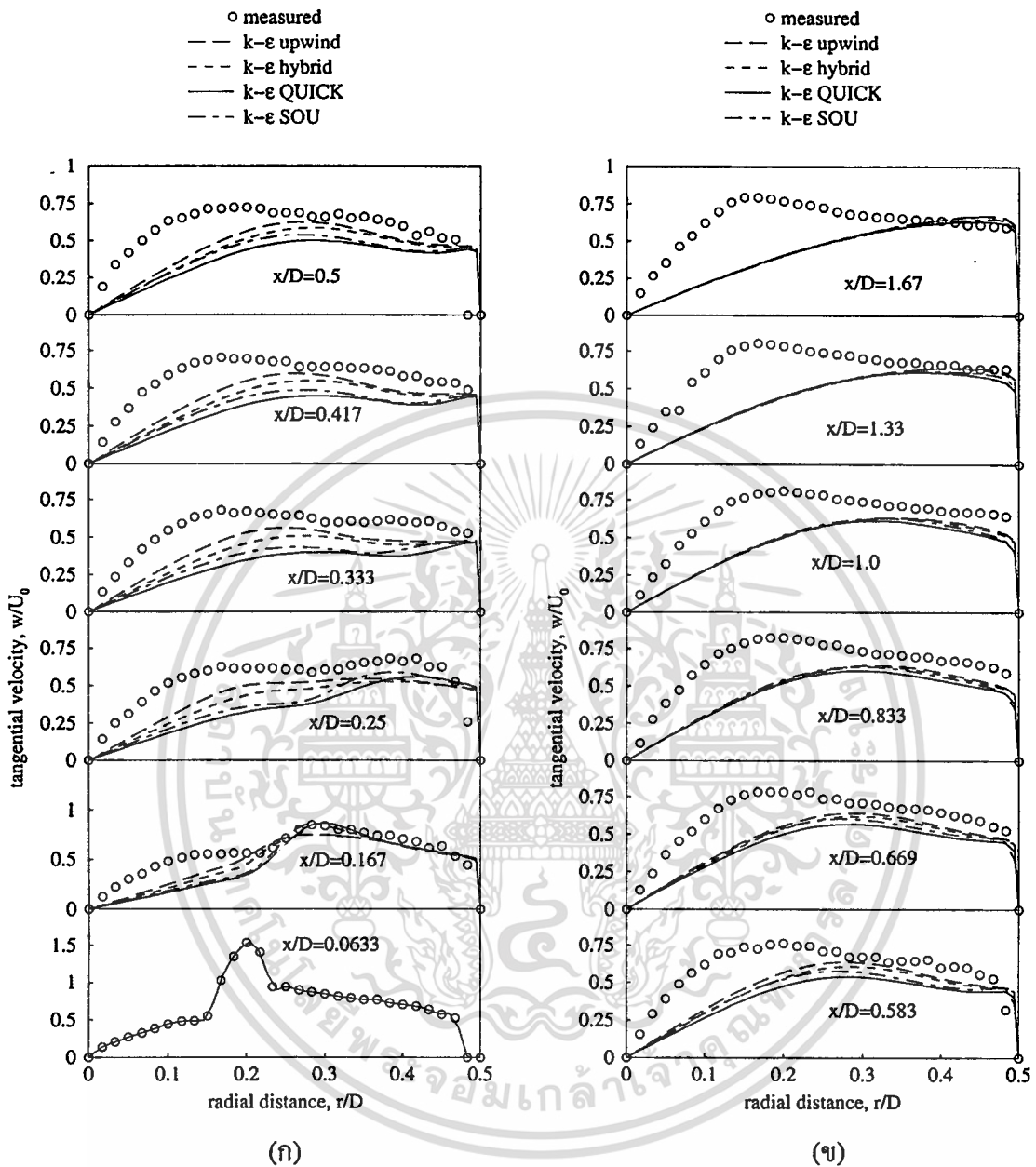
รูปที่ 5.22 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วตามแนวแกนที่ทำนายโดย $k - \epsilon$ model กับผลการทดลอง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วตามแนวรัศมีที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model กับผลการทดลอง

การใช้ $k-\varepsilon$ model ซึ่งไม่เหมาะกับปัญหาที่มีความเร็วในแนวสัมผัสสูงๆ โดยผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะเป็น rigid body rotation คือไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในแนวนี้ แต่มีลักษณะคล้ายของแข็งหมุนรอบแกน สามารถดูได้จากตำแหน่งที่ $x/D = 0.333$ เป็นต้นไปซึ่งพบว่าลักษณะของเส้นกราฟแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย ความผิดพลาดนี้เป็นความผิดพลาดเนื่องจากความสามารถของตัว $k-\varepsilon$ model เอง ซึ่งถูกแก้ไขได้โดยการใช้ $k-\varepsilon$ model ในรูปแบบที่มีการประยุกต์ หรือเลี่ยงไปใช้ model ที่มีความสามารถมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วตามแนวสัมผัสที่ทำนายโดย $k-\epsilon$ model กับผลการทดลอง

Contour plot ของ stream function และ vector plot ที่ทำนายโดย QUICK scheme ได้แสดงในรูป 5.25 และ 5.26 ตามลำดับ โดย contour plot นั้นอยู่ในช่วง $r/D = 0$ ถึง 0.5 และ $x/D = 0$ ถึง 3 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างสูงจนถึงช่วงที่เริ่มไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว จากรูป 5.8 พบว่าเกิด recirculation ขึ้น 2 ตำแหน่ง คือ ที่บริเวณตรงมุม (corner recirculation) และที่บริเวณกึ่งกลางใกล้กับทางออกมาจาก swirler เรียกว่า central toroidal recirculation ซึ่งมีขนาดที่ใหญ่กว่า corner เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

recirculation โดยที่ central toroidal recirculation นี้มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของเตาเผา เพราะที่บริเวณนี้เกิดการผสมกันของเชื้อเพลิงอย่างรุนแรงและรวดเร็ว ส่งผลทำให้เปลวไฟสั้น, เพิ่มเสถียรภาพแก่เปลวไฟ และช่วยในการลดก๊าซไอเสีย เนื่องจากกาเผาไหม้ของเตาเผานั้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณนี้ (Halthore and Gouldin, 1986)

จากรูป vector plot ของความเร็วซึ่งทำนายโดย QUICK scheme สามารถสังเกตเห็นจุดศูนย์กลางกลางของ recirculation ได้อย่างชัดเจนทั้ง corner recirculation และ central toroidal recirculation จาก vector plot ของความเร็วนี้พบว่าที่บริเวณ r/D เข้าใกล้ศูนย์กลางนั้นเกิดการไหลย้อนกลับขึ้น อันเป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในทุก scheme และพฤติกรรมเดียวกันนี้สามารถสังเกตได้บนความเร็วในแนวแกนที่แสดงในรูปที่ 5.22 ที่เกิดการไหลย้อนกลับขึ้น โดยการไหลย้อนกลับนี้เริ่มหายไปที่ตำแหน่ง $x/D = 1.9$

จากการจำลองการไหลโดย $k-\epsilon$ model ซึ่งทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ scheme ต่างๆ คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU สามารถสรุปได้ว่า QUICK scheme นั้นมีประสิทธิภาพดีกว่า scheme อื่นๆ ถึงแม้ว่ามีการทำนายเกินเลยไป (over-predict) บ้างในบางตำแหน่ง รวมถึงความผิดพลาดเนื่องจากการไหลย้อนกลับที่บริเวณค่า $x/D < 1.9$ และความไม่เหมาะสมของการใช้ $k-\epsilon$ model กับปัญหาที่มีลักษณะความเร็วในแนวสัมผัสสูง เนื่องจากข้อจำกัดของตัว $k-\epsilon$ model เอง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใช้ $k-\epsilon$ model ในรูปแบบที่มีการประยุกต์ หรือเลียงไปใช้ model ที่มีความสามารถสูงกว่า

5.4.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress Model (ASM)

การทำนายโดย ASM ร่วมกับ upwind, QUICK และ SOU scheme ได้นำมาแสดงในรูปของกราฟเปรียบเทียบผลของความเร็วในทุกๆ แกน, contour plot ของ stream function และ vector plot ดังต่อไปนี้

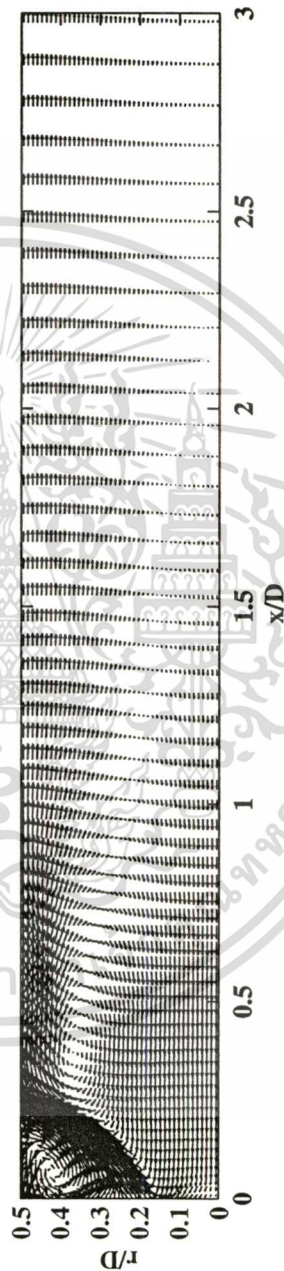
จากรูป 5.27 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกนพบว่า ผลที่ได้จากการใช้ QUICK และ SOU มีการทำนายสูงไป (over-predict) อย่างมากตั้งแต่ $x/D = 0.167$ ถึง 1.0 ที่บริเวณ $r/D = 0.3$ ถึง 0.5 โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ $x/D = 0.167$ ซึ่งการทำนายโดย QUICK และ SOU มีลักษณะของเส้นที่แปลกมาก แต่การใช้ QUICK และ SOU ทำนายการเกิดการไหลย้อนกลับที่เกิดขึ้นบริเวณ r/D เข้าใกล้ศูนย์กลางได้ดีกว่าที่ทำนายบน $k-\epsilon$ model ในขณะที่ upwind มีลักษณะที่ไม่แตกต่างจากที่ทำนายโดย $k-\epsilon$ model มากนัก โดยจากรูป 5.27 สามารถสรุปได้ว่าการทำนายโดย QUICK นั้นทำนายได้ดีที่สุด

กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวรัศมีได้แสดงในรูป 5.28 จากรูปพบว่าการทำนายของ QUICK และ SOU ทำนายผิดพลาดอย่างมากตั้งแต่ $x/D = 0.167$ ถึง 1.0 ที่บริเวณ $r/D = 0.17$ ถึง 0.48 โดย QUICK และ SOU มีลักษณะที่ต่างจากข้อมูลจากการทดลองที่ค่อนข้างมาก ใน

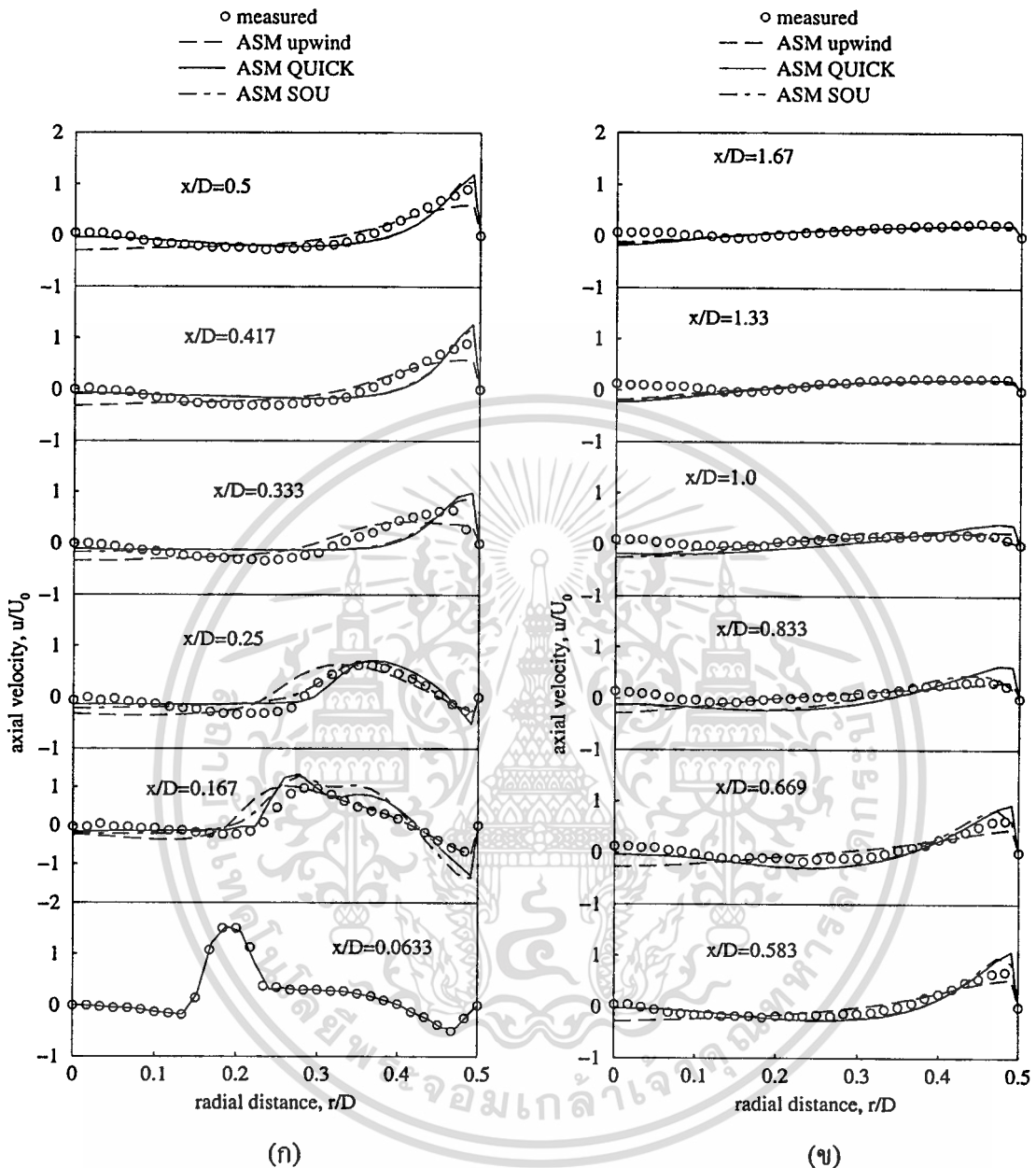
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 Contour plot ของ stream function ทำนายโดย QUICK scheme และ $k-\epsilon$ model



รูปที่ 5.26 Vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย QUICK scheme และ $k-\epsilon$ model

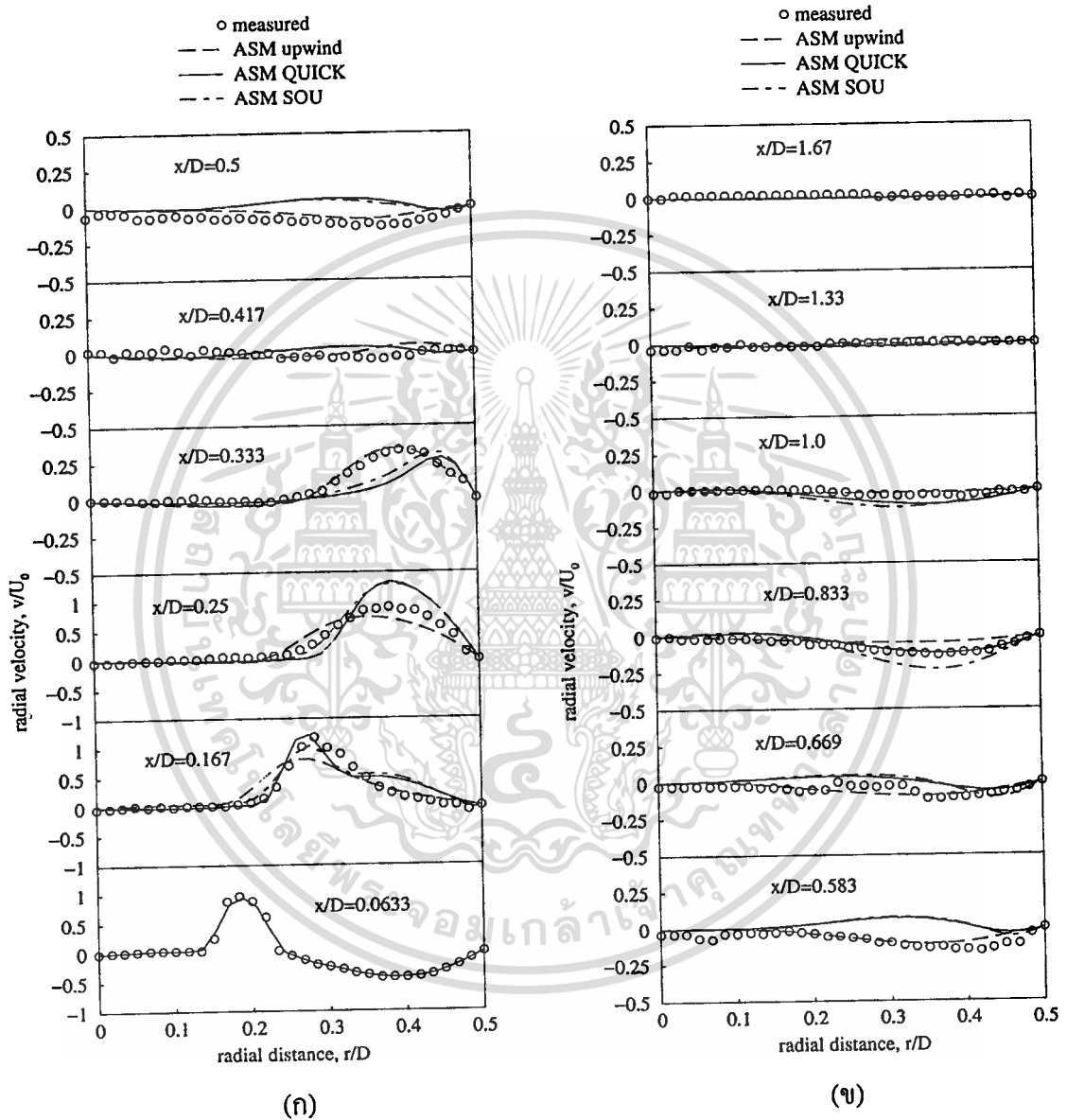


รูปที่ 5.27 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วตามแนวแกน ทำนายโดย ASM กับผลการทดลอง

ขณะที่ upwind ทำนายแนวโน้มได้ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัดถึงแม้ว่าในบางตำแหน่ง upwind ทำนายได้ค่าที่ต่ำกว่าข้อมูลจากการทดลอง แต่หากมองภาพทั้งหมดในรูป 5.28 สามารถสรุปได้ว่า upwind ทำนายได้ดีที่สุด

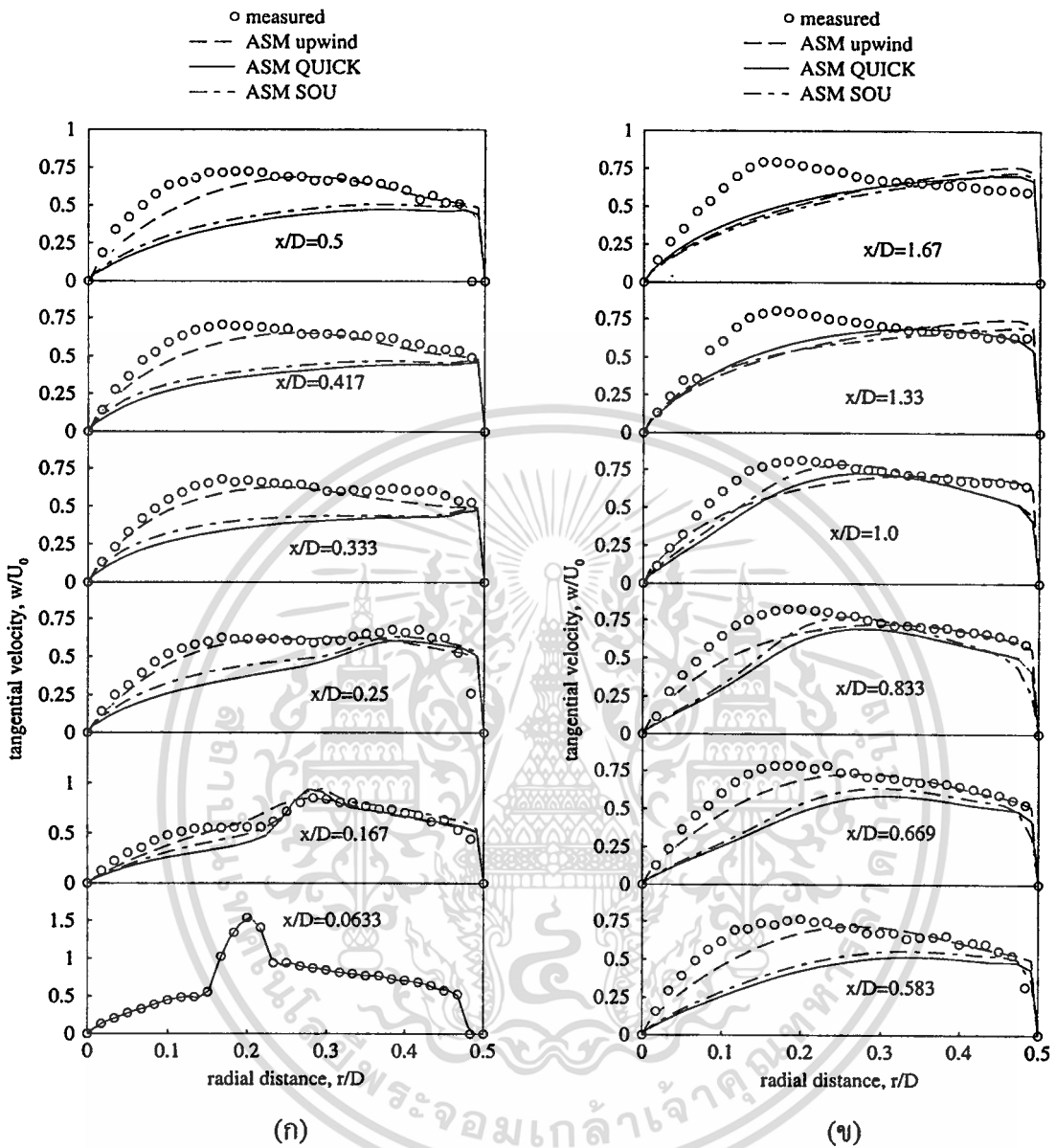
ในรูป 5.29 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวสัมผัสเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง โดยจากรูปพบว่า การทำนายโดย QUICK และ SOU มีลักษณะที่ต่ำกว่าผลจากการทดลองอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่ $x/D = 0.25$ ถึง 0.669 รวมถึงแนวโน้มที่ได้มีลักษณะที่แตกต่างจากการทดลอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างมาก ซึ่งผิดกับ upwind ที่มีลักษณะที่สอดคล้องกับการทดลองตลอดตั้งแต่ $x/D = 0.167$ ถึง 1.0 โดยที่ตำแหน่ง $x/D = 1.33$ และ 1.67 พบว่าการทำนายของทุก scheme มีความแตกต่างกันไม่มากนัก จากภาพรวมในรูป 5.29 สามารถสรุปได้ว่า upwind นั้นทำนายได้สอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองมากที่สุด



รูปที่ 5.28 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วตามรัศมี ทำนายโดย ASM กับผลการทดลอง

Contour plot ของ stream function และ vector plot ของความเร็วที่ทำนายโดย upwind scheme แสดงในรูป 5.30 และ 5.31 ตามลำดับ จากรูป contour plot มีการเกิด recirculation ขึ้น 2 ตำแหน่ง คือ ที่บริเวณมุมด้านบน (corner recirculation) และที่บริเวณกึ่งกลางใกล้กับทางออกมาจาก swirler



รูปที่ 5.29 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วตามแนวสัมผัสทำนายโดย ASM กับผลการทดลอง

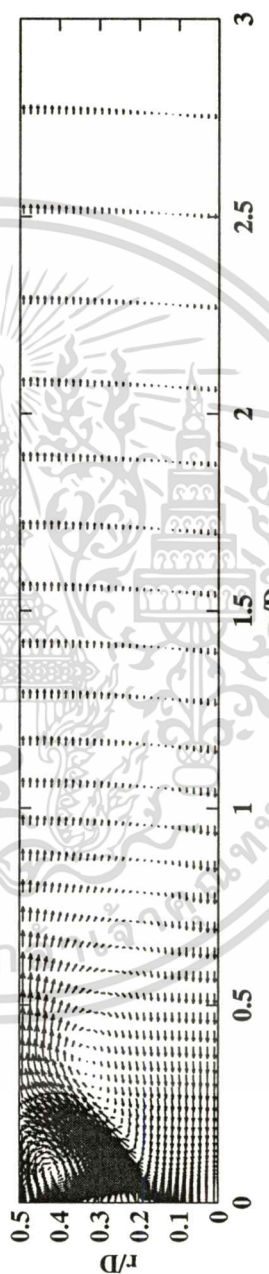
เรียกว่า central toroidal recirculation ซึ่งมีขนาดที่ใหญ่กว่า corner recirculation โดย central toroidal recirculation มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $x/D = 0.3$ กับ $r/D = 0.3$ และพบว่าบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงอยู่ในช่วง $x/D = 0.0$ ถึง 1.5 ซึ่งเมื่อเลย $x/D = 1.5$ ไปแล้วพบว่าเส้น stream function ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยซึ่งแตกต่างกับ contour plot ที่ทำนายโดย $k-\epsilon$ model ที่เริ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยที่ x/D ประมาณ 3.0 ไป

จากรูป vector plot ที่ทำนายโดย ASM สามารถสังเกตเห็นการเกิด recirculation ขึ้นทั้ง 2 ตำแหน่ง คือ conner recirculation และ central toroidal recirculation โดยเฉพาะอย่างยิ่งจุดศูนย์กลาง

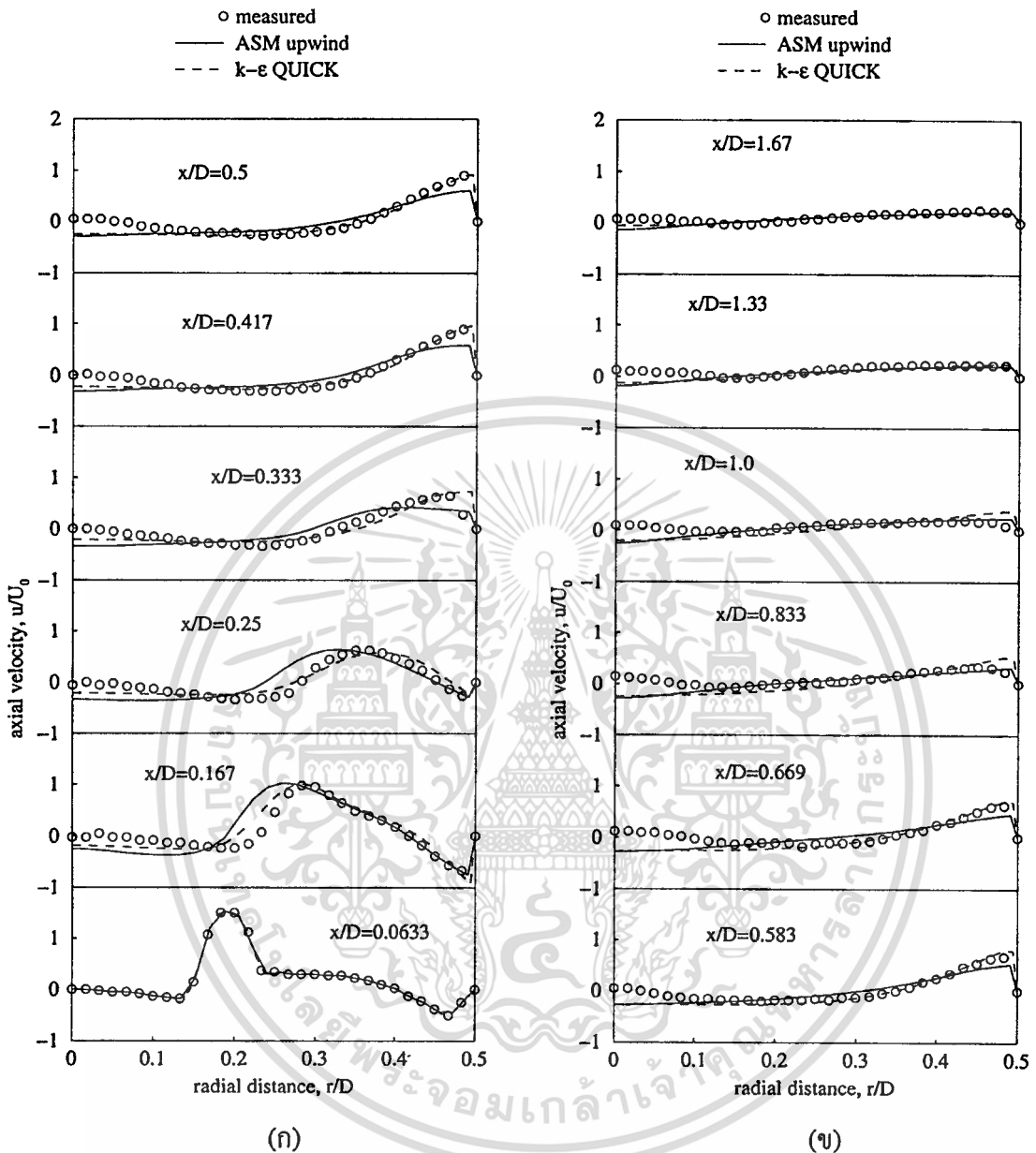
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 Contour plot ของ stream function ทำนายโดย upwind scheme และ ASM



รูปที่ 5.31 Vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย upwind scheme และ ASM

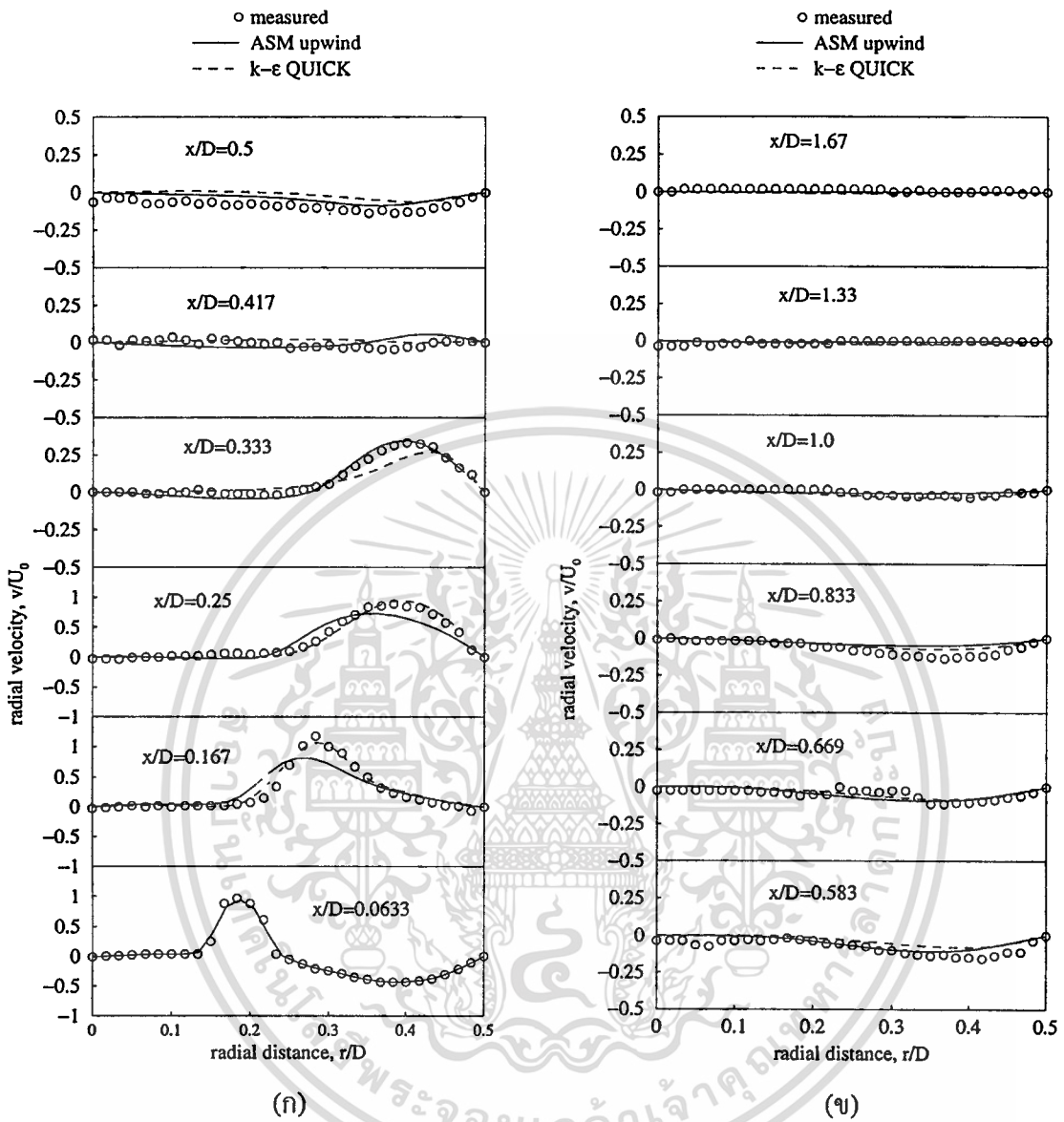


รูปที่ 5.32 กราฟเปรียบเทียบผลของความเร็วด้านแนวแกนที่ทำนายโดย $k-\epsilon$ model และ ASM

กลางของ central toroidal recirculation สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน รวมถึงลักษณะการเกิดการไหลย้อนกลับที่บริเวณ r/D เข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับที่แสดงในรูป 5.27

จากผลจำลองการไหลทั้งหมดที่ได้จากการทำนายโดย ASM เมื่อทำการเปรียบเทียบ scheme ทั้ง 3 scheme คือ upwind, QUICK และ SOU พบว่า upwind นั้นทำนายผลออกมาได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ถึงแม้ว่า QUICK ทำนายได้ดีในความเร็วตามแนวแกนก็ตาม แต่เมื่อมองภาพรวมแล้วพบว่า upwind สามารถทำนายได้ถูกต้องมากกว่าทั้งในความเร็วตามแนวรัศมี และความเร็วตามแนวสัมผัส รวมถึงแนวโน้มการทำนายของ upwind บนความเร็วตามแนวแกนนั้นก็ยังมีทิศทางที่ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

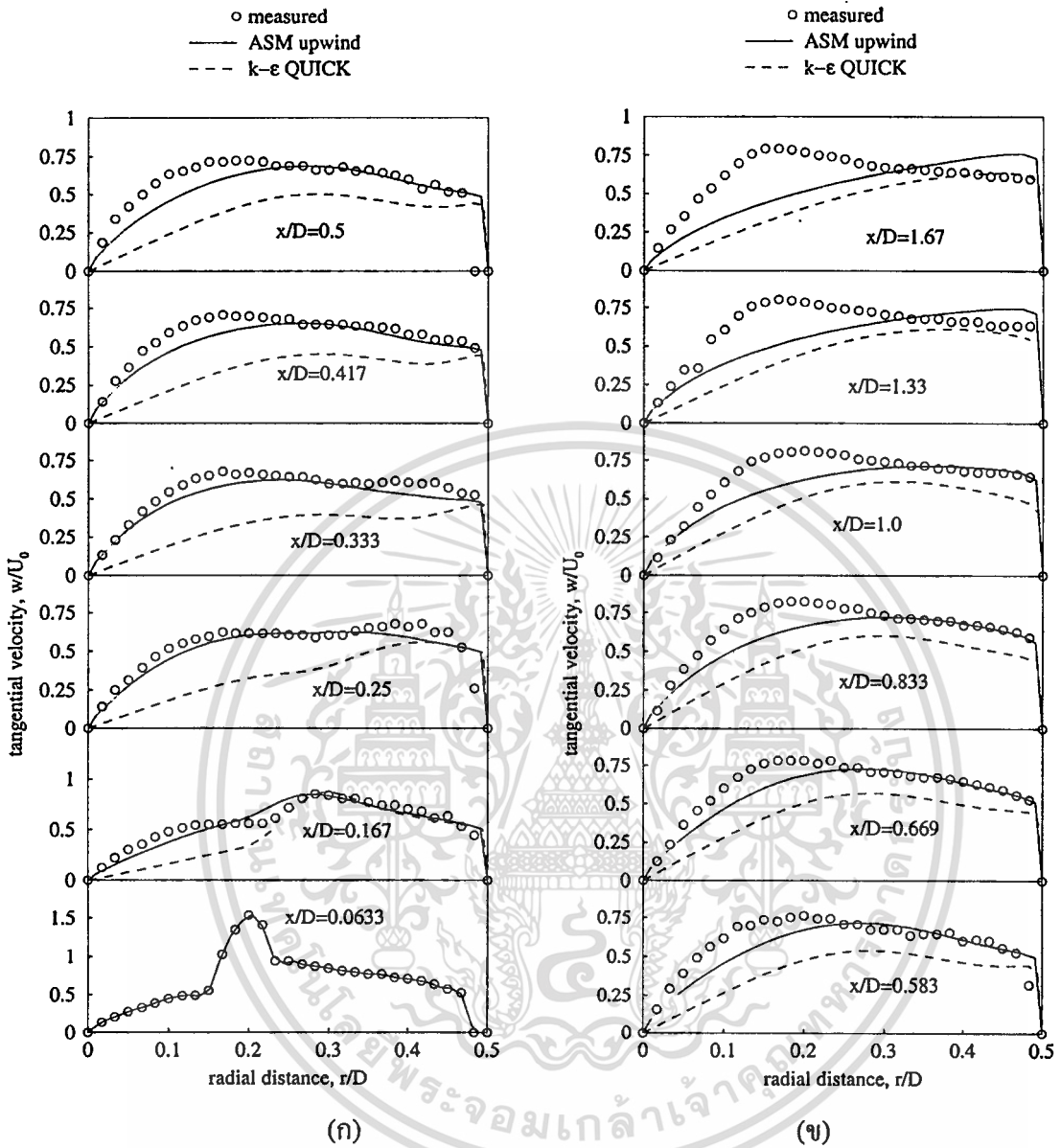


รูปที่ 5.33 กราฟเปรียบเทียบผลของความเร็วด้านแนวรัศมีที่ทำนายโดย $k-\epsilon$ model และ ASM

ต้องถึงแม้ว่าไม่ดีเท่ากับ QUICK ก็ตาม ซึ่งจากผลลัพธ์ทั้งหมดสามารถสรุปการทำนายในการจำลองการไหลในตาของ Ahmed (1997) โดย ASM นี้ ไม่เหมาะกับการใช้ numerical differencing scheme ที่ใช้การประมาณโดยสมการกำลังสอง ซึ่งสังเกตได้จากการทำนายของ QUICK และ SOU ที่ทำนายได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองน้อยกว่า upwind

การเปรียบเทียบการทำนายระหว่าง $k-\epsilon$ model และ ASM ได้แสดงในรูป 5.32 ถึง 5.34 ตามลำดับ รูป 5.32 เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน จากรูปเมื่อเทียบความสามารถของ $k-\epsilon$ model ที่ทำนายโดย QUICK scheme กับ ASM ที่ทำนายโดย upwind พบว่า $k-\epsilon$ model มีความสอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองมากกว่าการทำนายของ ASM อย่างชัดเจน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.34 กราฟเปรียบเทียบผลของความเร็วตามแนวสัมผัสที่ทำนายโดย $k-\epsilon$ model และ ASM

ซึ่งสังเกตได้ที่ตำแหน่ง $x/D = 0.167$ ถึง 0.669 ในขณะที่การทำนายของ ASM นั้นทำได้เพียงทำนายแนวโน้มได้ใกล้เคียงเท่านั้น

กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวรัศมีแสดงในรูป 5.33 จากรูปพบว่าผลการทำนายของ $k-\epsilon$ model ทำนายได้ดีในบางตำแหน่ง เช่น $x/D = 0.167$ และ 0.25 รวมถึง ASM ก็ทำนายได้แม่นยำในบางตำแหน่ง เช่น $x/D = 0.333$ และ 0.5 จากผลทั้งหมดในรูป 5.33 พบว่าการทำนายของ $k-\epsilon$ model ดีกว่า ASM เล็กน้อย

จากรูป 5.33 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวสัมผัส จากรูปพบว่าการทำนายของ $k-\varepsilon$ model แตกต่างจากการทดลองเป็นอย่างมาก ในขณะที่ ASM ทำนายได้ถูกต้องกว่าอย่างชัดเจนตั้งแต่ $x/D = 0.167$ ถึง 1.0 ทำให้สามารถชี้ชัดได้ว่าในรูป 5.33 นี้ ASM ทำนายได้ดีกว่า $k-\varepsilon$ model

จากการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองการไหลที่ทำนายโดย ASM กับผลที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model สรุปได้ว่า ASM สามารถทำนายค่าได้ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าการใช้ $k-\varepsilon$ model ถึงแม้ว่าบนความเร็วตามแนวแกนนั้น $k-\varepsilon$ model ทำนายได้ดีกว่า แต่ ASM ก็ยังสามารถทำนายแนวโน้มของการไหลได้อย่างใกล้เคียง ยิ่งเมื่อทำการเทียบผลของความเร็วตามแนวรัศมีและความเร็วตามแนวสัมผัส ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ASM สามารถทำนายได้ดีกว่า $k-\varepsilon$ model ซึ่งเป็นไปตามแนวความคิดที่ว่า model สูงกว่านั้นย่อมสามารถทำนายได้แม่นยำกว่า model ที่ต่ำกว่า

5.5 สรุป

ผลการจำลองการไหลในเตาเผาซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง $k-\varepsilon$ model กับ ASM ทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. Recirculation มีผลต่อจำนวนกริดที่น้อยที่สุดในการคำนวณอย่างมาก
2. ASM สามารถทำนายการไหลได้ดีกว่า $k-\varepsilon$ model โดยเห็นอย่างชัดเจนบนความเร็วตามแนวสัมผัส รวมถึงการใช้ ASM ทำให้ลักษณะรูปร่างของความเร็วตามแนวแกน และความเร็วตามแนวรัศมีที่ทำนายได้เปลี่ยนไปจาก $k-\varepsilon$ model เล็กน้อย
3. ลักษณะของการไหลนั้นขึ้นอยู่กับรูปร่างของเตาเป็นอย่างมากกว่าผลของ swirl number (S) หรือการฉีดอากาศ
4. ผลของ numerical differencing scheme ที่ใช้นั้นมีค่อนข้างสูงต่อการไหลที่มี recirculation รวมถึงการใช้ ASM ต่อการไหลที่มี recirculation ควรเลือกใช้ scheme ที่ใช้การประมาณเป็นเส้นตรง (first-order scheme)

ในบทหน้าจะทำการศึกษาผลกระทบของค่า β ต่อความแม่นยำในการจำลองการไหล ASM

บทที่ 6

การศึกษาผลกระทบของค่า β ในการจำลองการไหล

6.1 บทนำ

ผลการจำลองการไหลที่แสดงในบทที่ 5 การจำลองการไหลมีความผิดพลาดอยู่บ้าง ซึ่งความผิดพลาดเหล่านั้นอาจมาได้จากหลายสาเหตุ เนื้อหาในบทนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของตัวแปรค่า β ซึ่งอาจมีผลต่อความแม่นยำของการจำลองการไหล เพื่อเพิ่มความถูกต้องมากขึ้น

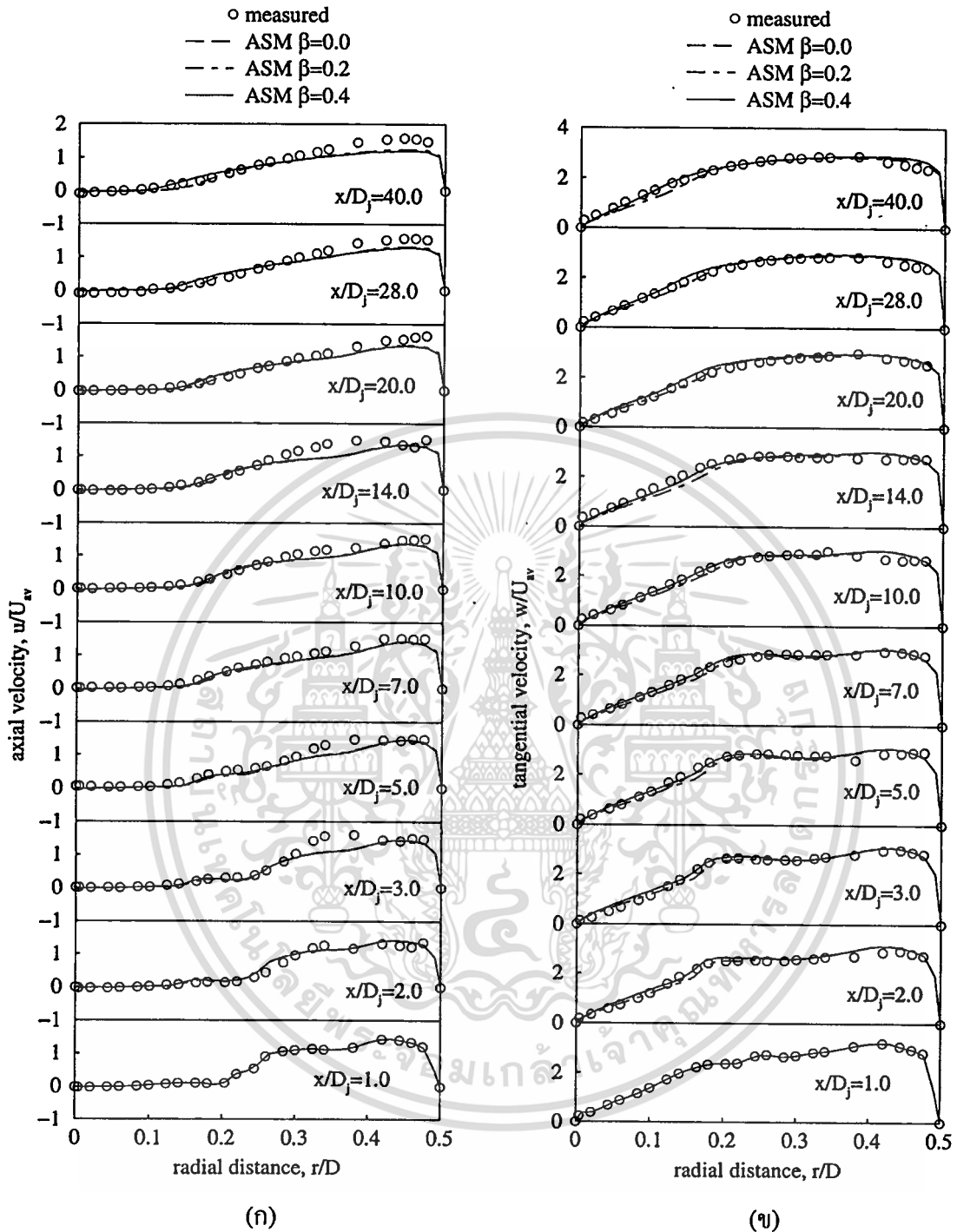
6.2 เตาเผาของ So *et. al.* (1984) กรณีที่ไม่มีการฉีดอากาศ

จากการจำลองการไหลในเตาเผาของ So *et. al.* (1984) กรณีที่ไม่มีการฉีดอากาศ ดังแสดงในหัวข้อ 5.2 พบว่าการจำลองการไหลโดย ASM สามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลอง เนื้อหาในหัวข้อนี้เพื่อการศึกษาผลกระทบของค่า β ใน ASM ว่ามีผลต่อความถูกต้องของการจำลองการไหลอย่างไร โดยได้ทำการทำนายที่ค่า $\beta = 0.0, 0.2$ และ 0.4 ซึ่งคำตอบที่ได้ถูกนำมาแสดงในรูปของกราฟการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกน และความเร็วตามแนวสัมผัส

รูปของกราฟการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัส แสดงในรูป 6.1(ก) และ 6.1(ข) ตามลำดับ จากรูป 6.1(ก) พบว่าผลที่ได้จากที่ $\beta = 0.0$ และ 0.4 นั้นได้ทับกันสนิทตลอดทั้งหมด ในขณะที่ $\beta = 0.2$ นั้นมีค่าที่ต่ำกว่า $\beta = 0.0$ และ 0.4 ซึ่งสังเกตได้จากตำแหน่ง $x/D_j = 3.0$ ถึง 40.0 ที่บริเวณ $r/D = 0.15$ ถึง 0.25

จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวสัมผัส พบว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกับที่เกิดขึ้นบนกราฟการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกน คือ ที่ $\beta = 0.0$ และ 0.4 นั้นทับกันสนิทตลอดทั้งหมด ในขณะที่ $\beta = 0.2$ นั้นมีค่าต่ำกว่า $\beta = 0.0$ และ 0.4 อย่างชัดเจน ซึ่งสังเกตได้จากตำแหน่ง $x/D_j = 2.0$ ถึง 40.0 ที่บริเวณ $r/D = 0.03$ ถึง 0.28

จากการศึกษาผลกระทบของค่า β ทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า ค่า β นั้นมีผลต่อความแม่นยำของการจำลองการไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และในการทำการจำลองการไหลนี้พบว่า $\beta = 0.0$ และ 0.4 นั้นเหมือนกัน ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากที่ปัญหานี้มีลักษณะการไหลที่ไม่ซับซ้อนมากนักและมีค่า swirl number (S) = 2.25 ซึ่งถือว่ามีค่าสูงมาก เพราะผลกระทบของค่า β นั้นมีค่าน้อยมากเมื่อค่า S สูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าที่นิยมใช้และถือว่ามีค่าสูง คือ $\beta = 0.4$

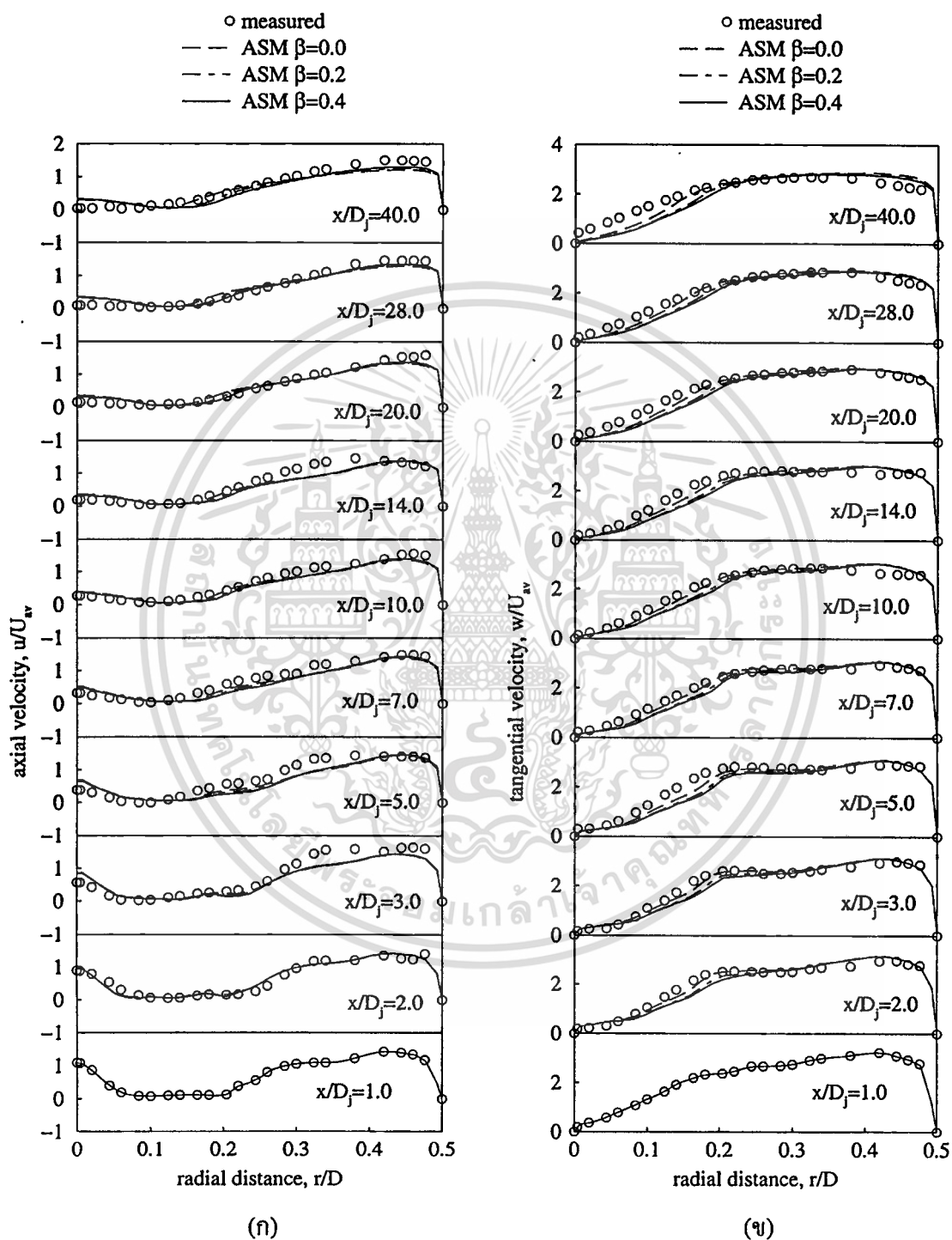


รูปที่ 6.1 กราฟการเปลี่ยนแปลงของ (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส กับผลการทดลอง

6.3 เตาเผาของ So *et. al.* (1984) กรณีที่มีการฉีดอากาศ

ในหัวข้อ 5.3 ได้เสนอจำลองการไหลในเตาเผาของ So *et. al.* (1984) กรณีที่มีการฉีดอากาศ พบว่ามีการจำลองการไหลโดย ASM ให้ความแม่นยำมากกว่าการใช้ $k-\epsilon$ model แต่กระนั้น ASM ก็เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวนงไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังมีความผิดพลาดอยู่บ้าง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า β นั้นอาจมีผลทำให้คำตอบมีความแม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 6.2 รูปกราฟการเปลี่ยนแปลงของ (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส กับ ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองการไหลโดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า $\beta = 0.0, 0.2$ และ 0.4 ตามลำดับ โดยผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปของกราฟการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกน และความเร็วตามแนวสัมผัส

กราฟการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกนได้แสดงในรูป 6.2(ก) จากรูปพบว่า เมื่อค่า β ลดลงทำให้แนวโน้มของผลที่ทำนายได้ต่ำลง โดยสังเกตได้จากตำแหน่ง $x/D_j = 3.0$ ถึง 40.0 ที่บริเวณ $r/D = 0.17$ ถึง 0.27 ที่ $\beta = 0.0$ นั้นอยู่ใกล้กับข้อมูลจากการทดลองมากกว่าของ $\beta = 0.2$ และ 0.4 ตามลำดับ

รูป 6.2(ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวสัมผัส จากรูปมีลักษณะเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นบนกราฟการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกน คือ เมื่อค่า β ลดลงทำให้แนวโน้มของค่าที่ทำนายได้ต่ำลง โดยที่ค่า $\beta = 0.0$ นั้นอยู่ใกล้กับข้อมูลจากการทดลองมากกว่าของ $\beta = 0.2$ และ 0.4 ตามลำดับ ซึ่งพบได้จากตำแหน่ง $x/D_j = 2.0$ ถึง 40.0 ที่บริเวณ $r/D = 0.05$ ถึง 0.3

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า β ทั้งหมดพบว่าค่า $\beta = 0.0$ นั้นให้การทำนายที่ดีที่สุด และค่า β นั้นมีผลต่อความแม่นยำเพียงเล็กน้อย ซึ่งสังเกตได้ว่าโดยทั่วไปแล้วค่าที่ได้ส่วนใหญ่ทับกัน แต่มีเพียงบางตำแหน่งเท่านั้นที่มีความแตกต่าง

6.4 เตาเผาของ Ahmed (1997a)

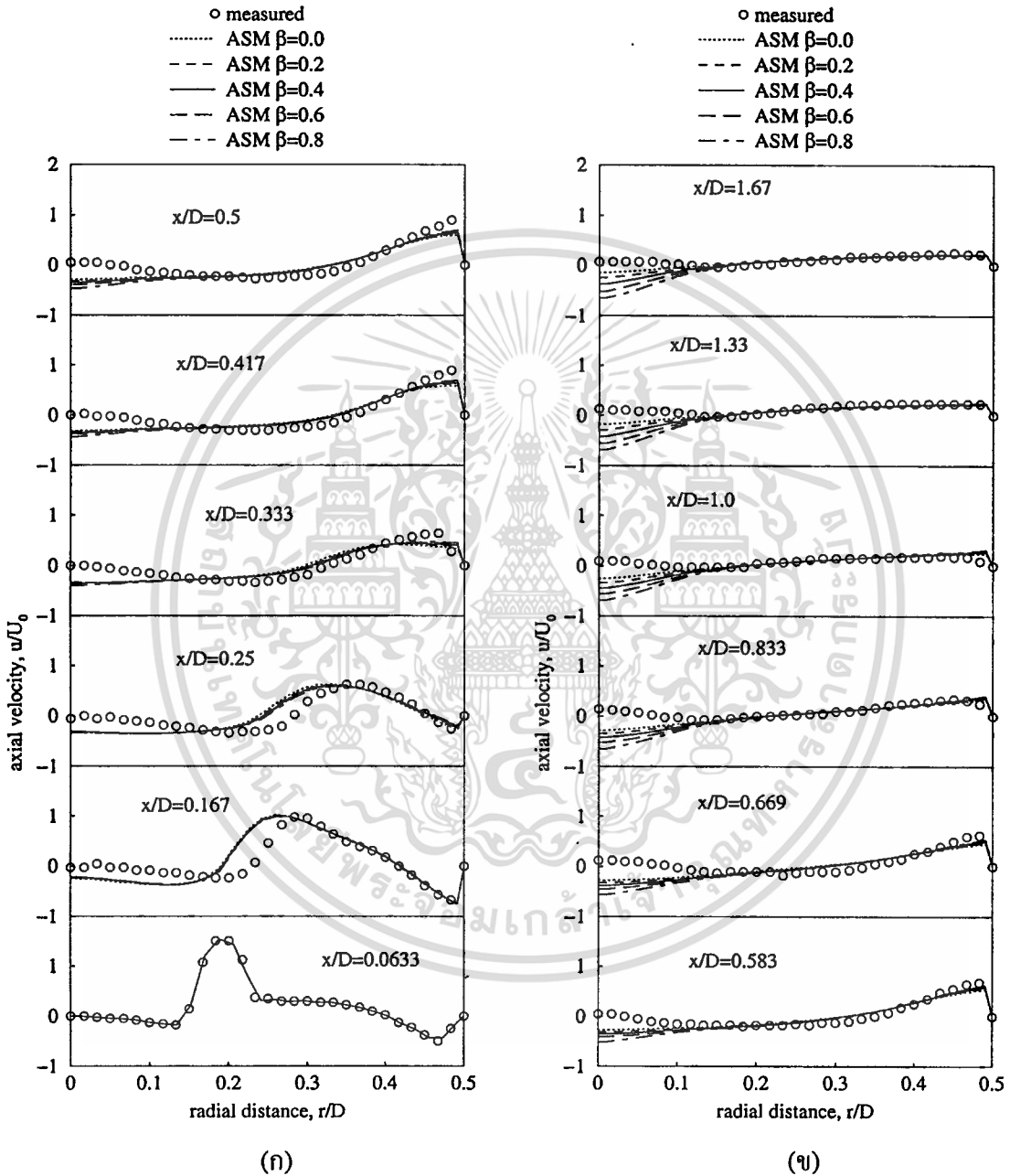
จากการจำลองการไหลของเตาของ Ahmed (1997) โดย ASM พบว่าการทำนายสามารถทำนายแนวโน้มส่วนใหญ่ได้ถูกต้อง แต่ในบางตำแหน่งยังมีความผิดพลาดอยู่ ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของค่า β โดยทำการคำนวณที่ค่า $\beta = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 ตามลำดับ ซึ่งผลการคำนวณได้แสดงในรูปของกราฟการเปลี่ยนของความเร็วในทิศต่างๆ

กราฟการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกนได้แสดงในรูป 6.3 จากรูปได้พบในช่วงต้นของการจำลองการไหลนั้นค่า β ไม่มีความแตกต่างที่ชัดเจน ซึ่งผลกระทบของค่า β เริ่มปรากฏที่ $x/D = 0.333$ เป็นต้นไปต่อเนื่องไปจนถึงที่ $x/D = 1.67$ โดยความแตกต่างเกิดขึ้นที่บริเวณ r/D เข้าใกล้ศูนย์ คือเมื่อค่า β เพิ่มขึ้นทำให้การไหลย้อนกลับเพิ่มขึ้นตามลำดับ จากรูป 6.3 ทั้งหมดกล่าวได้ว่าที่ $\beta = 0.0$ ทำนายได้สอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองมากที่สุด

รูป 6.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวรัศมี จากรูปพบว่าค่า β นั้นไม่มีผลต่อความเร็วตามแนวรัศมีเลย โดยสังเกตได้ว่าการทำนายของทุกค่า β ทับกันสนิทจนเหมือนกลายเป็นเส้นเดียวกัน ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเปลี่ยนค่า β ไม่สร้างความเปลี่ยนแปลงต่อความเร็วตามแนวรัศมี

การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวสัมผัสแสดงในรูป 6.5 จากรูปพบว่า ค่า β มีผลต่อความแม่นยำ โดยทั่วไปแล้วการทำนายที่ β ต่างกันมีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย คือ เมื่อค่า β เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการทำนายห่างจากข้อมูลจากการทดลองมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้ที่ตำแหน่ง $x/D = 0.25$ การคำนวณว่าการมีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

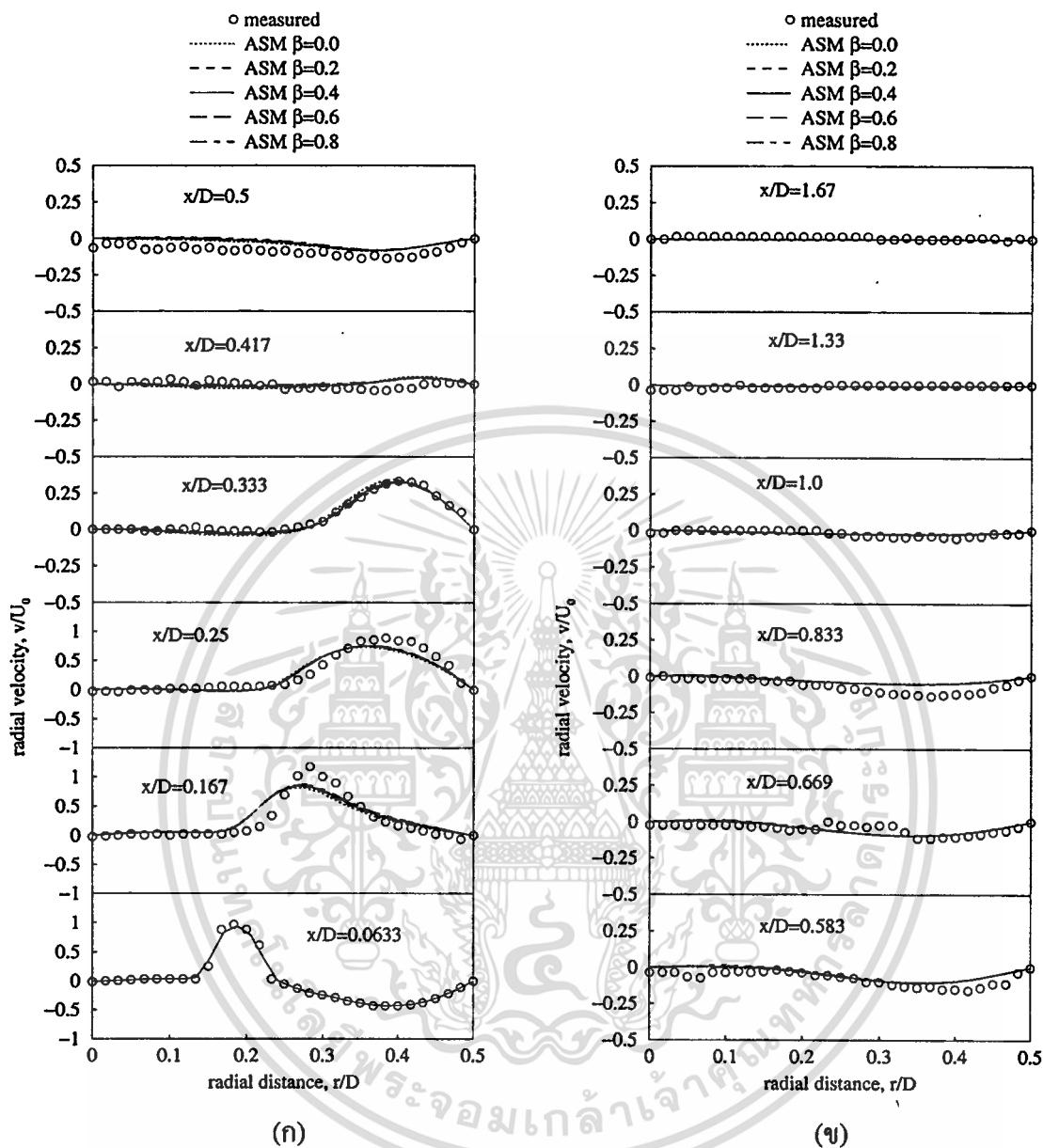
ถึง 0.669 แต่เมื่อเลข $x/D = 0.833$ ออกไปพบว่าที่บริเวณ $r/D = 0.0$ ถึง 0.25 นั้น การทำนายที่ค่า β สูงเข้าใกล้ข้อมูลจากการทดลองมากที่สุดค่า β ต่ำ จากรูป 6.5 ทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าค่า β ที่เหมาะสมในการทำนายคือ 0.4



รูปที่ 6.3 กราฟเปรียบเทียบผลของค่า β ของความเร็วตามแนวแกน กับผลการทดลอง

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า β ทั้งหมด พบว่าค่า β ที่เหมาะสมในการทำนายการไหลอยู่ในช่วงระหว่าง 0.0 ถึง 0.4 มีความแม่นยำดีที่สุด แต่อาจกล่าวได้ว่าค่า β นั้นมีผลไม่มากนักต่อแนวโน้มของคำตอบนอกจากรับค่าจากการทำนายไปเพียงเล็กน้อย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 กราฟเปรียบเทียบผลของค่า β ของความเร็วตามแนวรัศมี กับผลการทดลอง

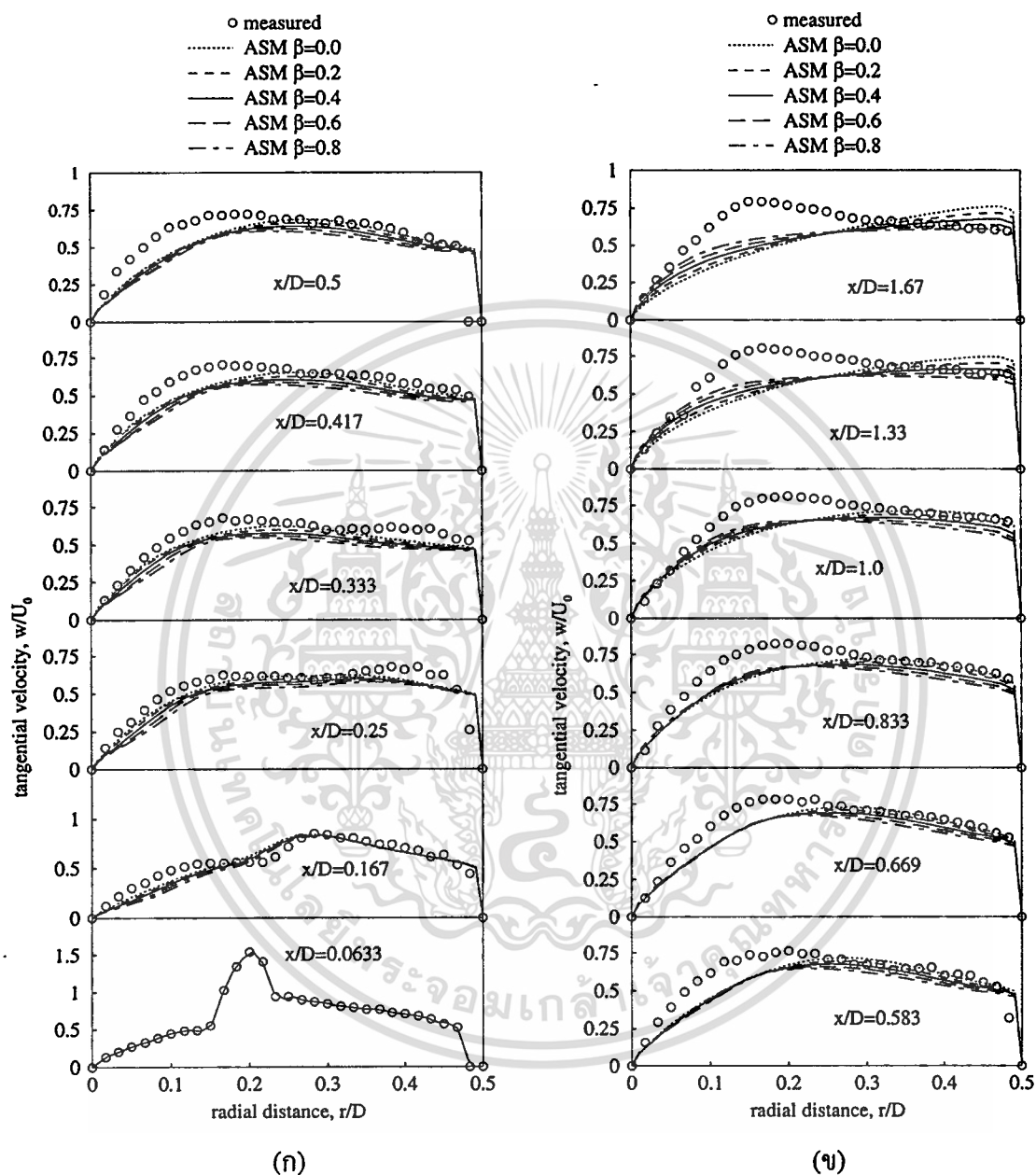
6.5 สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของตัวแปรค่า β ในการจำลองการไหลทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การเปลี่ยนแปลงค่า β นั้นมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อคำตอบ โดยปรับเปลี่ยนค่าความเร็วที่ได้จากการทำนายไปยังในบางตำแหน่งไม่ว่าการไหลมี recirculation หรือ ไม่ก็ตาม
2. การไหลที่มี recirculation นั้นมีการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วมากกว่าการไหลที่ไม่มี recirculation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค่า β ที่เหมาะสมในการเลือกใช้ในการจำลองการไหลนั้นอยู่ระหว่าง 0.0 ถึง 0.4 มีความแม่นยำที่สุด



รูปที่ 6.5 กราฟเปรียบเทียบผลของค่า β ของความเร็วตามแนวสัมผัส กับผลการทดลอง

ในการบทหน้าจะเป็นการสรุปผลการจำลองการไหลทั้งหมด รวมถึงข้อเสนอแนะต่างๆ ในการศึกษาวิจัยต่อไป

บทที่ 7

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการจำลองการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนในเตาเผาทั้งหมดโดยใช้ $k - \epsilon$ model และ ASM ร่วมกับ numerical differencing scheme ทั้งหมด 4 ชนิด คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU พบว่าการจำลองการไหลมีความสอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองเป็นอย่างดี โดย ASM นั้นสามารถทำนายได้ดีกว่า $k - \epsilon$ model อย่างเห็นได้ชัด แต่การใช้ ASM นั้นพบว่าจำเป็นจะต้องมีการเลือกใช้ numerical differencing scheme ให้เหมาะสมโดยเฉพาะบนการไหลที่มี recirculation ควรเลือกใช้ numerical differencing scheme ที่ใช้การประมาณแบบเส้นตรงจะมีความเหมาะสมที่สุด รวมถึงลักษณะของการไหลมีผลจากรูปร่างของเตามากกว่า swirl number (S) หรือการฉีดอากาศ

จากการศึกษาผลกระทบของค่า β ในการจำลองการไหลทั้งหมด พบว่าค่า β นั้นมีผลเพียงเล็กน้อยต่อคำตอบโดยจะปรับค่าคำตอบไปบ้างในบางตำแหน่งไม่ว่าการไหลจะมี recirculation หรือไม่ก็ตาม โดยบนการไหลที่มี recirculation นั้นจะมีการปรับค่ามากกว่าบนการที่ไม่มี recirculation และค่า β ที่เหมาะสมในการเลือกใช้ในการจำลองการไหลนั้นควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0 ถึง 0.4 ซึ่งให้ความแม่นยำดีที่สุด

7.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป

1. ควรทำการศึกษาเปรียบเทียบรูปร่างของเตาเผาแบบต่างๆต่อลักษณะการไหล
2. ควรมีลองการใช้ Reynolds stress model ทำนายการไหลในลักษณะเดียวกัน เพื่อทำการเปรียบเทียบรวมถึงถึงศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้น
3. ควรมีการพัฒนา model ของการเผาไหม้ต่อจากงานวิจัยนี้ต่อไป

บรรณานุกรม

- Ahmed, S.A. 1997a. "An Isothermal Experimental investigation of Turbulence Transport Through an Abrupt Axisymmetric Expansion." **Proc. Instn. Mech. Engrs.** Vol.212 Part G : 45-55.
- Ahmed, S.A. 1997b. "Three Component Velocity Measurements of an Isothermal Confined Swirling Flow." **Proc. Instn. Mech. Engrs.** Vol.211 Part G : 113-122.
- Ahmed, S.A. and Nejad, A.S. 1992. "Premixed, Turbulent Combustion of Axisymmetric Sudden Expansion Flows." **Int. J. Heat and Fluid Flow.** Vol.13 No.1 : 15-21.
- Boysan, F. *et. al.* 1982. "A Fundamental Mathematical Modelling Approach to Cyclone Design." **Trans. Inst. Chem. Eng.** Vol. 60 : 222-230.
- Chen, C.J. and Jaw, S.Y. 1997. **Fundamentals of Turbulence Modeling.** London. : Taylor&Francis.
- Ehalil, E.E. *et. al.* 1975. "The Calculation of Local Flow Properties in Two-Dimensional Furnaces." **Heat Mass Transfer.** Vol.18 : 775-791.
- El-Mahallawy, F.M. and Habib, M.A. 1978. "Study of Mixing of Two Coaxial Swirling Jets in a Cold Model Furnace." 35-47. in Khalil, K.H. *et. al.* **Flow, Mixing and Heat Transfer in Furnace.** London : Pergamon Press
- Fraser, S.M. *et. al.* 1997. "Computation and Experimental Investigations in a Cyclone Dust Sperator." **Proc. Instn. Mech. Engrs.** Vol.211 Part E : 247-257.
- Gaski, T.B. *et. al.* 1996. **Simulation and Modelling of Turbulent Flows.** New York. : Oxford University Press.
- Gaski, T.B. and Peyret, R. Editor. 1986. **Handbook of Computational Fluid Mechanics.** London. : Academic Press Ltd.
- Halthore, R.N. and Gouldin, F.C. July 1986. "Laser Scatter Measurement for Gas Densities in a Swirling Flow Combustor." **AIAA J.** Vol.24 No.7 : 1129-1136.
- Hogg, S. and LeschZiner, M.A. January 1989. "Computation of Highly Swirling Confined Flow with a Reynold Stress Turbulence Model." **AIAA J.** Vol.27 No.1 : 57-63.
- Holzapfel, F. *et. al.* September 1999. "Quintuple Hot-wire Measurements of the Turbulence Structure in Confined Swirling Flows." **Trans. ASME J. of Fluid Engineering.** Vol. 121 : 517-525.

- Hwang, C.C. *et. al.* March 1993. "A Comparison of the Linear and Nonlinear $k-l$ Turbulence Models in Combustors." **Trans. ASME J. of Fluid Engineering.** Vol.115 : 93-102.
- Jones, W.P. and Pascau, A. September 1989. "Calculation of Confined Swirling Flows with a Second Moment Closure." **Trans. ASME J. of Fluid Engineering.** Vol.111 : 248-255.
- Kim, K.Y. and Chung, M.K. March 1988. "Calculation of a Strongly Swirling Turbulent Round Jet with Recirculation by an Algebraic Stress Model." **Heat and Fluid Flow J.** Vol.9 No.1 : 62-68.
- Kitoh, O. 1990. "Experimental study of Turbulent Swirling Flow in a Straight Pipe." **Fluid Mechanic J.** Vol.25 : 445-479.
- Launder, B.E. *et. al.* 1975. "Progress in the Development of a Reynold Stress Turbulence Closure." **J. Fluid Mechanics.** Vol.68 : 537-566.
- Lin, C.A. and Lu, C.M. July 1994. "Modeling Three-Dimensional Gas Turbine Combustor Model Flow Using Second-Moment Closure." **AIAA J.** Vol.32 No.7 : 1416-1422.
- Lixing, Z. 1993. **Theory and Numerical Modeling of Turbulent Gas-Particle Flows and Combustion.** China. : Science Press and CRC Press.
- Lockwood, F.C. *et. al.* 1974. "An Experimental and Theoretical Investigation of Turbulent Mixing in a Cylindrical Furnace." **Combustion and Flame.** Vol.23 : 283-293.
- Patankar, S.V. 1980. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.** Washington D.C. : Hemisphere.
- Promvonge, P. and Vongsarnpigoon, L. March-June 1998. "A Simplified Algebraic Reynolds Stress Model for Calculating Confined Swirling Flows." **Eng. Trans. A Research Publication of Mahanakorn University of Technology.** Vol.1 No.2 :150-161.
- Rhode, D.L. *et. al.* April 1983. "Mean Flowfields in Axisymmetric Combustor Geometries with Swirl." **AIAA J.** Vol.21 No.4 : 593-600.
- Rodi, W.A. 1976. "New Algebraic Relations for Calculating the Reynolds Stresses." **Z. Angew. Math. Mech. (ZAMM).** Vol.56 : T219-T221.
- Ronald, M.C.S. *et. al.* 1984. **An Experimental Investigation of Gas Jets in Confined Swirling Air Flow.** NASA CR 3832.
- Serag-Eldin, M.A. and Spalding, D.B. July 1979. "Computations of Three-Dimensional Gas-turbine Combustion Chamber Flows." **Journal of Engineering for Power.** Vol.101 : 327-336.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Sloan, D.G. *et. al.* 1986. "Modeling of Swirl in Turbulent Flow System." **Progr. Energy Combust. Sci.** Vol.12 : 163-250.
- Speziale, C.G. 1987. "On Non-Linear $k-l$ and $k-\varepsilon$ models of Turbulence." **J. of Fluid Mechanics.** Vol.178 : 459-475.
- Speziale, C.G. 1991. "Annual Review of Fluid Mechanics." **Annual Review Inc.** Vol.23 : 107-157.
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. 1995. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method.** English. : Longman Scientific & Technical, Longman Group Limited.
- Willcox, C.D. 1993. **Turbulence Modelling for CFD.** California. : DCW Industries Inc.
- Xia, J.L. *et. al.* July 1999. "Study of Swirling Flow in a Combustion Chamber." **Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference.**
- Zhang, J. *et. al.* 1992. "A New Version of Algebraic Stress Model for Simulating Strongly Swirling Turbulent Flows." **J. Numerical Heat Transfer.** Vol.22 Part B : 49-62.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1. การคำนวณหาขนาดกระแสของสาย XLPE ที่ขนาดแรงดัน 12 kV. และ 24 kV. เมื่อติดตั้งใน Duct Bank
สุทัศน์ พิลา นิตศน์ กฤษณจินดา ศุภี บรรจงจิตร์ 1
2. การคำนวณหาพิคัดกระแสของสายเคเบิลโดยคำนึงถึงผลกระทบของอาร์โมนิค
สมชัย จิรรุ่งโรจน์กุล นิตศน์ กฤษณจินดา ศุภี บรรจงจิตร์ 7
3. การวิเคราะห์ข้อแตกต่างของหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มน้ำมันเมื่อออกแบบสร้างตามข้อกำหนดเดิม.เปรียบเทียบกับข้อกำหนดใหม่
ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 13
สิริวิษ ทัดสวน ปัญญา มกลีวัตร ศุภี บรรจงจิตร์ นิตศน์ กฤษณจินดา บุญเลิศ สื่อเฉย
4. การค้นหาโรเตอร์สล็อตอาร์โมนิคส์เพื่อวัดความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว
19
เฉลิมชาติ มานพ อมรรัตน์ สุโศตโร วิจิตร กิณเรศ
5. คำการสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำเนื่องจากแรงดันฮาร์โมนิคส์ เมื่อคิดผลของ Skin Effect และ Stray Load Loss
25
ธนิสดา รัตนะ วิจิตร กิณเรศ
6. การศึกษาเชิงตัวเลขของการผิดของไหลเข้ากระทบบแผ่นเรียบเชิงระนาบและเชิงสมมาตร
31
พงษ์เจต พรหมวงศ์ ปริญา รวมนักดีกุล
7. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดออกไซด์ของกำมะถันจากการเผาไหม้ของถ่านหินผง
37
จารุวัตร เจริญสุข ปัญญา แดงวิไลลักษณ์
8. การคำนวณและออกแบบสมรรถนะใบจักรเรือ
43
อัครเดช สินธุภักดิ์ จารุพันธ์ หนูสมตม
9. เทคนิคการเขียน G-code เครื่องจักร CNC ด้วยภาษาเบสิก
49
บุญชู สิลลจรรจิต ทวี เทศเจริญ อัครเดช สินธุภักดิ์
10. กังหันลมสำหรับพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย
55
มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ฉัตรชัย ยามโชคชัย
11. การคำนวณหาความเร็วลมที่หายไปของเครื่องม้อวัดลมเรดาร์โออีโอโตโลง์
61
สุทธิ พานิชการ สุวิพล สิริชัยภาค เกียรติกร วงศ์โรจนภรณ์
12. การศึกษาการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ELF จากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า
66
ชจิตพรพน มกระธัช ณรงค์ เหมภรณ์
13. การจัดสรรช่องสัญญาณดาวเทียมมีลำดับสิทธิการใช้ช่องสัญญาณไมดาวเทียมวงโคจรต่ำ
72
กิตติเจริญ ศุภชัยศิริกุล กัลยา จันทร์ชานา เอกพล ใจรักธรรม สุทธิ พานิชการ สุวิพล สิริชัยภาค
14. การถอดรหัสข้อมูล POCSAG ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และการประยุกต์ใช้งาน
78
กัญญ์ สิทธิประเสริฐ ไกรสิน สงวัฒนา
15. การเพิ่มประสิทธิภาพของการเรียกขานสายโทรศัพท์กับลูกข่ายของระบบวิทยุบริการเฉพาะกลุ่ม
84
กมล น้อยทองเล็ก กอบชัย เดชหาญ
16. A Monolithic Patch Antenna on a Semi-insulated Si Substrate for Active Integrated Antenna
90
Sathaporn Promwong Prakit Tangtisanon Jun-ichi Takada and Shigeo Kawasaki
17. เฮียวลิสติก อัลกอริทึม การจัดกลุ่มงานบนโปรแกรมแบบขนาน
95
ศักดิ์ชัย คันธะขจร บรรจง ปิยธำรง
18. เครื่องวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID แบบอัตโนมัติ
101
พิทยา ปานนิล ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์ ประภาส อุดคกิมพันธ์ กิตติ ตีระเศรษฐ์
19. การออกแบบตัวควบคุม PIDA ด้วยวิธีทางเดินของราก
107
อาจินต์ น่วมสำราญ ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์ ประภาส อุดคกิมพันธ์ วิริยะ กงรัตน์
20. วงจรดีมอดูเลตสัญญาณเอพเอ็มแบบควอดราเจอร์เฟสโดยใช้วงจรดีเอ็มเฟลบนดิเอเลกเตอร์
113
อธิภู มงคลขจิต วิชา แสงพิสิทธิ์ จริยา เลิศจรัสภรณ์ วัณย์ ทิลาธรรม
21. เครื่องเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานแบบมัลติแซนแนล
119
วันชัย ชินชูศักดิ์ วิชา ทิพย์สุวรรณพร วิริยะ กงรัตน์ เวทิน ปิยรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของไหลเข้ากระทบแผ่นเรียบเชิง ระนาบและเชิงสมมาตร

Numerical Study of Plane and Axisymmetric Impinging jet

พงษ์เจต พรหมวงศ์ ปริญา รวบรวมกติกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ เสนอการศึกษาเรื่องการไหลของไหลเข้ากระทบแผ่นเรียบ โดยอาศัยวิธีการเชิงตัวเลขที่เรียกว่า วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ในการหาค่าฟังก์ชันสายธาร ความเร็ว และความดันในแต่ละจุดในปริมาตรควบคุม จากนั้นนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับคำตอบทางทฤษฎีที่มีอยู่ ซึ่งปรากฏว่าผลที่ได้สอดคล้องกันดี

Abstract

This paper presents the case study of plane and axisymmetric stagnation flow. The numerical technique referred to as a finite volume method is utilized for determining the solution. The solution consists of stream function, velocity and pressure in each node of control volume. In comparison with theoretical solution, the results obtained are in good agreement.

1) บทนำ

บทความนี้จะเสนอเรื่องการศึกษาการไหลของของไหลโดยใช้คอมพิวเตอร์ ช่วยในการวิเคราะห์ โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่เรียกว่า วิธีการปริมาตรสี่เหลี่ยม มาประยุกต์ใช้ ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในหลายๆวิธีของการวิเคราะห์ตัวเลข แต่วิธีนี้เป็นวิธีที่เหมาะสมกับการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล การวิเคราะห์ในบทความนี้จะศึกษาการไหลของไหลเข้ากระทบแผ่นเรียบ โดยการวิเคราะห์ในบทความนี้จะอยู่ภายใต้ ข้อสมมุติฐานที่ว่าของไหลที่พิจารณาเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ และไม่มีความหนืด โดยการไหลเป็นแบบราบเรียบอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีการหมุนวน

สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการไหลของไหลเข้ากระทบแผ่นเรียบนี้จะพิจารณาสมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง แล้วจึงทำการประยุกต์วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมกับสมการที่

เกี่ยวข้องเหล่านั้น หลังจากนั้นหาผลลัพธ์ที่ต้องการ โดยอาศัยวิธีการ TDMA ที่เรียกว่า การทำ Line solve และการทำ Block solve ช่วยในการหาคำตอบ ผลลัพธ์ที่ได้คือ ฟังก์ชันสายธาร (stream function) ในแต่ละตำแหน่งที่ถูกแบ่งโดย กริด ต่อจากนั้นนำฟังก์ชันสายธาร (stream function) ที่หาได้มาหาความเร็วในทิศทางต่างๆรวมถึงค่าความดัน สุดท้ายนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

2) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมการพื้นฐานของปัญหา

สมการพื้นฐานโดยทั่วไปในการวิเคราะห์การไหลสำหรับการไหลของไหลเข้ากระทบแผ่นเรียบนี้ อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่เป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ทำให้ค่าความหนาแน่น (ρ) มีค่าคงที่และเป็นการไหลแบบไม่มีความหนืด ($\mu = 0$) คำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวข้างต้นทำให้สมการสามารถลดรูปลงเหลือสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา คือ

สมการอนุพันธ์มวล

$$\frac{\partial(ru)}{\partial x} + \frac{\partial(rv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

สมการอนุพันธ์โมเมนตัม

ในแนวแกน x

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2ก)$$

ในแนวแกน y

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (2ข)$$

โดยที่ u คือ ความเร็วในแนวแกน x

v คือ ความเร็วในแนวแกน y

จะพบว่าสมการที่ต้องแก้พร้อมกันถึง 3 สมการ ซึ่งมันจะเป็นการคิดมาก ถ้าเราสามารถรวมสมการทั้งหมดเข้าเป็นสมการเดียวเพื่อสะดวกในการแก้ปัญหา เราจะเริ่มจากการดิฟสมการ (2ก) เทียบ r และดิฟสมการ (2ข) เทียบ x เราจะได้รูปสมการเป็น

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(v \frac{\partial u}{\partial r} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 P}{\partial r \partial x} \quad (3ก)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial v}{\partial r} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial r} \quad (3ข)$$

จากนั้นนำ (3ก) ลบ (3ข) แล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{\partial(ru\omega)}{\partial x} + \frac{\partial(rv\omega)}{\partial r} = 0 \quad (4ก)$$

เมื่อค่า ω คือ

$$\omega = \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\partial v}{\partial x} \quad (4ข)$$

ซึ่งเป็นเทอมของ vorticity ของของไหล จากสมการ (4ก) vorticity จะเป็นค่าคงที่ตลอดการไหล พิจารณาในขณะที่เริ่มการไหล vorticity นั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ และ vorticity จะเป็นศูนย์ตลอดการไหล ถ้าค่าขอบเขตมี vorticity เป็นศูนย์ทุกๆที่ อันจะสอดคล้องกับสมการ (4ก)

การไหลแบบไม่มีความหนืดซึ่ง vorticity เป็นศูนย์ทุกๆที่นั้น เป็นการไหลแบบไม่มีการหมุน (Irrotational) จะได้สมการ คือ

$$\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

การแก้ปัญหาคณิตของไหลเข้ากระทบบนี้ จะพบว่า

ยังขาดสมการอนุพันธ์มวล (1) ซึ่งถ้าใช้เงื่อนไขของฟังก์ชัน

สายธาร (stream function) $\psi(x, y)$ [2,4,5,6] คือ

$$\frac{\partial \psi}{\partial r} = ru \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = -rv \quad (6)$$

แล้วจะทำให้สมการอนุพันธ์มวล (1) เป็นจริง จากนั้นนำ (6)

ไปแทนใน (5) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) = 0 \quad (7ก)$$

สำหรับกรณีเชิงระนาบให้ $r=1$ และเปลี่ยน ∂r เป็น ∂y จะได้

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (7ข)$$

ค่าความดัน P สามารถหาได้โดยคูณสมการ (2ก) ด้วย u แล้ว

บวกกับสมการ (2ข) ที่คูณด้วย v แล้วจัดรูปจะได้เป็น

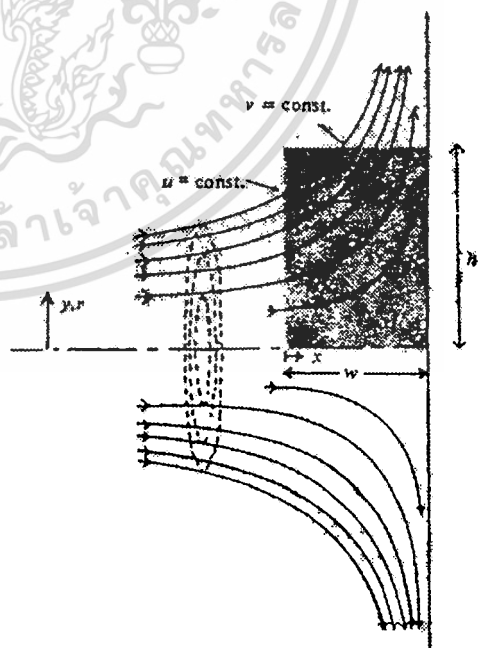
$$\frac{\partial(rup_r)}{\partial x} + \frac{\partial(rvp_r)}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

ที่ p_r คือความดันทั้งหมดของของไหล

$$p_r = p + \frac{\rho}{2}(u^2 + v^2) \quad (9)$$

ค่า p_r จะคงที่ตลอดทั้งฟังก์ชันสายธาร (stream function) ในการหา p หาได้โดยใช้สมการ (9)

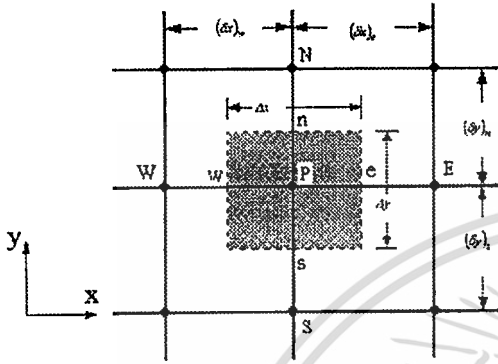
สมการข้างต้นนี้จะถูกประยุกต์กับพื้นที่ในปริมาตรควบคุมในบริเวณที่ติดเข้ากระทบบแผ่นเรียบซึ่งจะมีความกว้าง w และมีความสูง h ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การติดเข้ากระทบบแผ่นเรียบแบบเชิงสมมาตร

2.2 การประยุกต์วิธีการปริมาตรสืบเนื่อง

จะใช้วิธีการปริมาตรสืบเนื่อง [1] ประยุกต์ใช้กับสมการที่ (7) โดยทำการแบ่งปริมาตรควบคุมเป็นส่วนย่อย ๆ ซึ่งจะใช้ กริด ดังแสดงในรูปที่ 2 หลังจากนั้นทำการ discretised สมการที่ (7) ลงในจุดตัด (node) ของกริดที่จุด P และจุดข้างเคียง



รูปที่ 2 ลักษณะการแบ่งปริมาตรควบคุม

ในการ discretised จะพิจารณาจุด P ซึ่งเป็นจุดที่สนใจจากนั้น discretised สมการ (7) ลงในจุดที่จุด P และจุดข้างเคียงโดยอินทิเกรตสมการ (7) ตลอดทั้งปริมาตรควบคุมได้

$$\left(\frac{\Delta y}{r_w} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)_w - \frac{\Delta y}{r_e} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)_e \right) + \left(\frac{\Delta x}{r_n} \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)_n + \frac{\Delta x}{r_s} \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)_s \right) = 0 \tag{10}$$

จากสมการ (10) แทนค่า $\left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)_e$ และ $\left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)_w$ โดยใช้การประมาณเชิงเส้น ซึ่งจะได้ว่า

$$\left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)_e = \frac{(\psi)_E - (\psi)_P}{(\Delta x)_e}, \quad \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)_w = \frac{(\psi)_P - (\psi)_W}{(\Delta x)_w}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)_n = \frac{(\psi)_N - (\psi)_P}{(\Delta x)_n}, \quad \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)_s = \frac{(\psi)_P - (\psi)_S}{(\Delta x)_s}$$

ในที่สุดก็จะได้สมการ discretised โดยทั่วไปสำหรับ P

$$(A_P - S_P)(\psi)_P = A_N(\psi)_N + A_S(\psi)_S + A_E(\psi)_E + A_W(\psi)_W + S_U \tag{11}$$

โดยที่

$$A_N = \frac{(k_N + k_P)\mu_n}{2\delta r_{NP}}, \quad A_S = \frac{(k_P + k_S)\mu_s}{2\delta r_{PS}}$$

$$A_E = \frac{(k_E + k_P)\mu_e}{2\delta r_{EP}}, \quad A_W = \frac{(k_P + k_W)\mu_w}{2\delta r_{PW}}$$

$$S_P = C_P \quad S_U = B_P$$

$$A_P = A_N + A_S + A_E + A_W$$

$$C_P = \frac{k_{BP}\mu_n(\psi)_B}{\delta r_{BP}}, \quad B_P = \frac{-k_{BP}\mu_n}{\delta r_{BP}}$$

เมื่อ A_N, A_S, A_E และ A_W เป็นสัมประสิทธิ์ความเร็วที่จุด N,S,E,W ตามลำดับ

k_N, k_S, k_E และ k_W เป็นสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่จุด N,S,E,W ตามลำดับ

a_n, a_s, a_e และ a_w เป็นพื้นที่หน้าตัดของจุด n,s,e,w ตามลำดับ

C_P, B_P เป็น Source term เนื่องจาก Boundary condition

สำหรับกรณีแบบเชิงสมมาตรนั้นค่า k นั้นจะมีค่าเนื่องจากผลการนำในแนวแกน x (axial diffusivity) ซึ่งจะทำให้จากการอินทิเกรตตลอดทั้งบริเวณควบคุม

$$r_p k_{ax} \delta r_{ns} = \int_{r_s}^{r_n} r \frac{1}{r} dr \tag{12}$$

หรือ

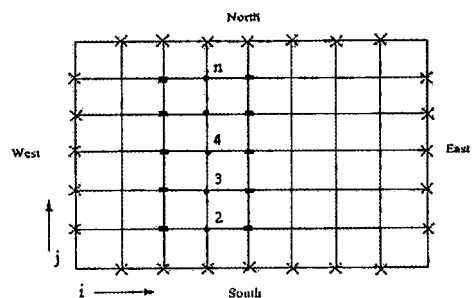
$$k_{ax} = \ln(r_n/r_s) / (r_p \delta r_{ns})$$

ค่า k_{ax} นี้จะมีค่าแบบนี้ในกรณีแบบเชิงสมมาตรเท่านั้น สำหรับกรณีเชิงระนาบนั้นค่า k_{ax} ทั้งหมดจะมีเท่ากับ 1 ค่า k_{ax} นี้ได้แสดงให้เห็นว่าค่า ψ ในแบบเชิงสมมาตรจะแปรผันตามค่า r^2

2.3 การแก้ปัญหาคด้วยวิธีการ TDMA แบบ Line solve และ Block solve

วิธีการ TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) สามารถแก้ปัญหาระบบสมการในสองมิติ โดยใช้แบบ Line solve และ Block solve

การทำ Line solve พิจารณากริดดังแสดงในรูปที่ 3 จากรูป เส้น north-south ใช้แก้สมการได้โดยจัดรูปสมการที่ (11) ใหม่จะได้



รูปที่ 3 การแก้ปัญหาคด้วย TDMA แบบ Line solve และ Block solve

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(A_p - S_p)(\psi)_p = A_N(\psi)_N + A_S(\psi)_S + S'_U \quad (13)$$

ที่

$$S'_U = S_U + A_E(\psi)_E^{N-1} + A_W(\psi)_W$$

ค่าตัวยก $N-1$ ที่ตัว $(\psi)_E$ คือ การใช้ค่าของ $(\psi)_E$ ที่ได้จากการทำครั้งที่ $N-1$ ในขณะที่ทำครั้งที่ N โดยค่า $(\psi)_S, (\psi)_W$ นั้นจะใช้ค่าจากการทำครั้งที่ N และค่า $(\psi)_N$ จะเป็นค่าที่สมมุติว่ารู้ ในครั้งแรก จากนั้นจะใช้ค่าครั้งที่ $N-1$

เมื่อไล่จุด P จนครบทั้งเส้น north-south แล้วจะเริ่มทำ Block solve ในเส้นเดียวกัน การทำ Block solve นั้นจะใช้สมการที่แตกต่างจากการทำ Line solve คือ

$$d_i \delta(\psi)_i = a_i \delta(\psi)_{i+1} + b_i \delta(\psi)_{i-1} + c_i$$

ที่

$$a_i = \sum_j A_{ij}^E \quad b_i = \sum_j A_{ij}^W$$

$$c_i = -\sum_j \left\{ (A_{ij}^P - S_{ij}^P)(\tilde{\psi})_{ij} - \sum_c A_{ij}^c(\tilde{\psi})^c - S_{ij}^U \right\} = -\sum_j R_{ij}^P$$

$$d_i = \sum_j (A_{ij}^E + A_{ij}^W - S_{ij}^P)$$

ที่

$\sum_c A_{ij}^c(\tilde{\psi})^c$ คือ รวมค่า $A_{ij}^c(\tilde{\psi})$ ที่จุด N,S,E,W ที่รอบจุด ij

$(\tilde{\psi})$ คือ ค่า (ψ) ที่ได้จากการทำ Line solve ครั้งที่ N หลังจากทำ Block solve เสร็จก็จะเริ่มทำ Line solve ในเส้นถัดไป ไล่ไปตามลำดับจนหมดทั้งบริเวณควบคุม

2.4 Exact solution

ปัญหาในบทความนี้สามารถหา Exact solution ได้

จากเอกสารอ้างอิง [3]

ค่า Exact solution สำหรับกรณีเชิงสมมาตรคือ

$$\psi = \rho r^2 (w-x)/(wh^2), \quad u = 2(w-x)/(wh^2), \quad v = r/(wh^2)$$

ค่า Exact solution สำหรับกรณีเชิงระนาบคือ

$$\psi = \rho y(w-x)/wh, \quad u = (w-h)/wh, \quad v = y/wh$$

สำหรับค่า p นั้นทั้ง 2 กรณีหาได้จาก

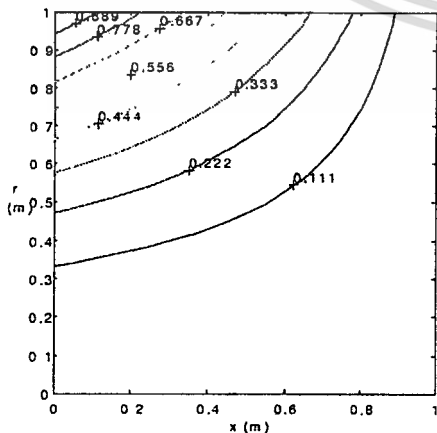
$$p = p_t - \frac{\rho}{2}(u^2 + v^2)$$

3) ลักษณะของโปรแกรม

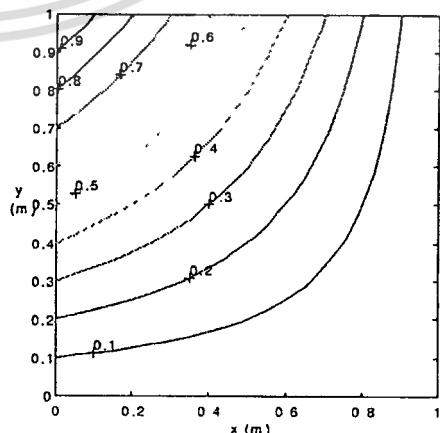
โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณการกระจายของความเร็ว (u,v) และความดัน (p) ในปัญหาการไหลเข้ากระทบบแผ่นเรียบ ในปัญหาแบบเชิงสมมาตรและเชิงระนาบ โดยอาศัยหลักการวิธีการปริมาตรสี่เหลี่ยมมาประยุกต์ใช้กับสมการพื้นฐานดังที่แสดงมาในข้างต้น มาสร้างระบบสมการ discretised โดย Central Differencing scheme และวิธีการ TDMA แบบ Line solve และ Block solve เพื่อหาคำตอบของระบบสมการ

4) ผลการคำนวณและวิเคราะห์ผล

ลักษณะของปัญหาที่นำมาคำนวณ เป็นการไหลของไหลเข้ากระทบบแผ่นเรียบ ซึ่งในบทความนี้จะทำการคำนวณใน 2 แบบเปรียบเทียบกัน คือ แบบเชิงสมมาตร (หัวฉีดเป็น



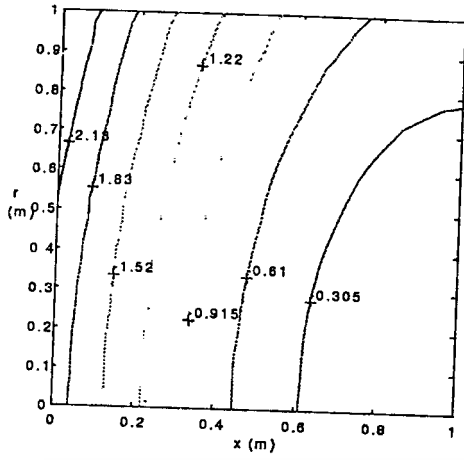
(a)



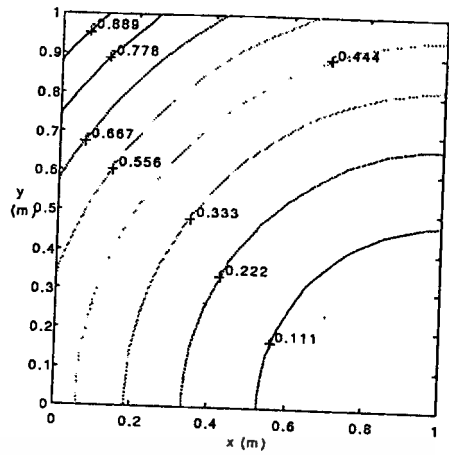
(b)

รูปที่ 4 contour ของค่า ψ (a) เชิงสมมาตร (b) เชิงระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 5 contour-ของค่า p (a) เจริงสมมาตร (b) เจริงระนาบ

วงกลม) และแบบเจริญระนาบ (หัวใจเป็นสี่เหลี่ยมมีความลึกมาก)

ในการคำนวณจะกำหนดค่าต่างๆที่ใช้ดังต่อไปนี้

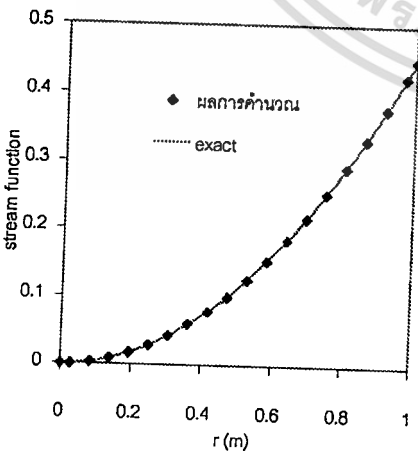
$w = 1 \text{ m}$

$h = 1 \text{ m}$

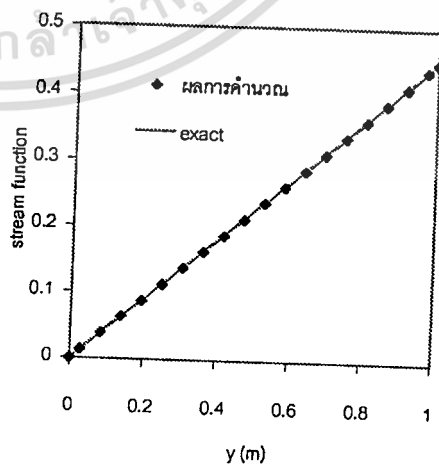
ใช้จำนวนกริดขนาด (12x20) ในการคำนวณ จากการคำนวณผลที่ได้ ค่า ψ เมื่อนำมาเขียน contour ดังแสดงในรูปที่ 4 จะพบว่าค่า ψ ในแบบเจริญสมมาตรนั้นไม่เหมือนกับแบบเจริญระนาบเพราะว่า ค่า ψ ของแบบเจริญสมมาตรนั้นจะแปรผันตาม r^2 ส่งผลให้ค่า ψ ของแบบเจริญสมมาตรนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยใน

บริเวณใกล้เจริญสมมาตร ($r=0$) แต่เมื่อถึงช่วงที่ $r=0.3$ เลขขึ้นไป การเปลี่ยนแปลงของค่า ψ จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่กรณีแบบเจริญระนาบนั้นจะพบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงสม่ำเสมอจากแกนกลางหัวใจ เนื่องจากค่า ψ ของระบบเจริญระนาบเปลี่ยนแปลงตามค่า x เท่านั้น

รูปที่ 5 แสดง contour ของค่า p (static pressure) จะพบว่ารูปทั้งสองมีความแตกต่างกันเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากระบบแกนทั้งสองนั้นแตกต่างกัน ทำให้ค่า ψ ต่างกัน เมื่อค่า ψ ต่างกันจะมีผลต่อค่า p โดยตรง จากรูปจะสามารถสังเกตได้ถึงความแตกต่าง ยกตัวอย่างเช่น ค่า $p = 0.3$ ถ้าในแบบเจริญสมมาตรจะอยู่ที่ $x=0.6$ แต่ในแบบเจริญ



(a)



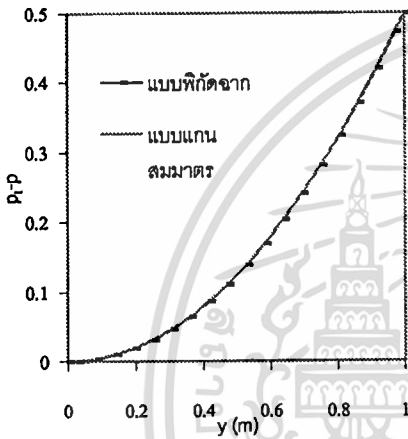
(b)

รูปที่ 6 ค่า ψ ที่คำนวณได้เทียบกับ Exact solution ที่ $x = 0.55 \text{ m}$ (a) แบบเจริญสมมาตร (b) แบบเจริญระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

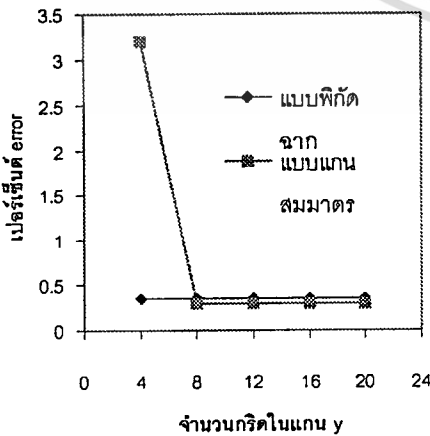
ระนาบจะอยู่ที่ $x=0.5$ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงค่า p ในแบบเชิงสมมาตรจะมีการเปลี่ยนแปลงสูงมากกว่าแบบระบบเชิงระนาบ

ค่า ψ ที่คำนวณได้เทียบกับ Exact solution [3] ที่ตำแหน่ง $x=0.55$ m จะถูกแสดงในรูปที่ 6 โดยจะพบว่าทั้งสองระบบแกนมีความถูกต้องเมื่อเทียบกับ Exact solution โดยในรูปที่ 6 นี้จะแสดงผลของค่า ψ ที่ขึ้นกับ r^2 ในระบบเชิงสมมาตรอย่างชัดเจนดังในรูป 6a จะเห็นว่าเส้นกราฟเป็นเส้นโค้ง ในขณะที่รูปที่ 6b จะเป็นเส้นตรงเนื่องจากค่า ψ ขึ้นกับค่า x เท่านั้น



รูปที่ 7 $p_t - p$ เปรียบเทียบระหว่างแบบเชิงสมมาตรกับเชิงระนาบ

ค่า $p_t - p$ (Dynamic pressure) บนผนังจะพบว่าในระบบเชิงระนาบจะมีค่าต่ำกว่าในระบบเชิงสมมาตร เพราะในระบบเชิงสมมาตรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่า p สูงกว่าในระบบเชิงระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 8 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ error เทียบกับ

รูปที่ 8 เป็นรูปแสดงเปอร์เซ็นต์ error เทียบกับจำนวนกริดในแกน y เป็นการเปรียบเทียบระหว่างแบบเชิงสมมาตรกับเชิงระนาบ จะพบว่าแบบเชิงสมมาตรโปรแกรมจะเสถียรไม่ขึ้นกับจำนวนกริด เมื่อกริดมากกว่า 8 ขึ้นไป และขณะที่แบบเชิงระนาบนั้นเพียงแค่ 4 กริด

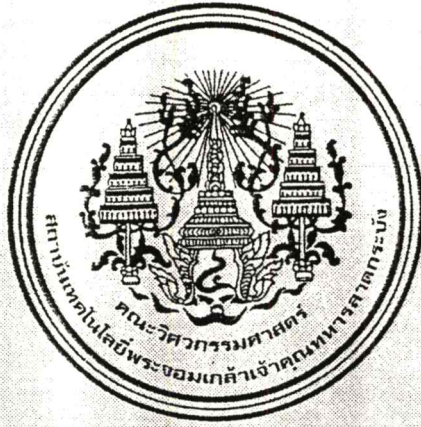
5) สรุปผลการคำนวณ

จากการใช้โปรแกรมคำนวณหาค่า ψ (stream function) ในปัญหาการไหลของไหลเข้ากระทบแผ่นเรียบ ปรากฏว่าค่า ψ (stream function) ที่คำนวณได้ทั้งในแบบเชิงสมมาตรและแบบเชิงระนาบ มีผลใกล้เคียงกับคำตอบทาง Exact solution โดยโปรแกรมนี้ควรจะใช้กริดอย่างน้อย 8 กริดขึ้นไป เพื่อให้เกิดเปอร์เซ็นต์ error น้อยที่สุด

6) เอกสารอ้างอิง

- [1] H.K. Versteeg and W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamic: The Finite Volume Method, Logman Scientific & Technical, Longman Group Limited, Essex, England 1995.
- [2] W.S. Janna, Introduction to Fluid Mechanical, ITP, U.S.A, 1993
- [3] A.D. Gosman , Computer-Aided Engineering Heat Transfer and Fluid flow , John Wiley & Sons , Chichester, England ,1985.
- [4] W. Fox Robert and T. McDonald Alan , Introduction to Fluid Mechanics , John Wiley & Sons , U.S.A , 1998
- [5] M.White Frank , Fluid Mechanics , McGraw-Hill , Singapore , 1986
- [6] H. Shames Irving , Mechanics of Fluids , McGraw-Hill , Singapore , 1992

เอกสารนี้เป็นจำนวนกริดในแกน y หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คัมภีร์วิชาการวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทยครั้งที่ ๑๓

VMEC13th
National Mechanical Engineering Conference

บทความทางวิชาการ เล่มที่ ๑/๒

จัดโดย

เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล

ดำเนินงานโดย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ ๒-๓ ธันวาคม ๒๕๕๒

(3)

16.15 16.45	A Study of Vibration Induced by Machine Unbalanced Force on A Building Structure (การศึกษาการสั่นสะเทือนจากแรงไม่สมดุลของเครื่องจักรต่อโครงสร้างอาคาร) วิทยา ขงเจริญ, สมนึก จรูญจิตเสถียร	1/104
16.45- 17.15	End Correction of Helmholtz Type Silencers Akradech Sindhuphak, Shuntaro Murakami, Yoshihiro Tsuchida, Makoto Hodozuka	1/111

วันที่ 2 ธันวาคม 2542 ห้อง 7, Computational Fluid Dynamics 1 (13.00 - 15.00 น.)

ประธาน : หัวหน้ากองวิชาการวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายเรืออากาศ

รองประธาน : รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

13.00- 13.30	A Comparative Study of Flux-Limiters in Unsteady and Steady Flows (การศึกษาเปรียบเทียบของฟลักซ์-ลิมิเตอร์ในการไหลแบบไม่คงที่และการไหลแบบคงที่) V. Suratanakavikut, A.J. Narguis	1/117
13.30- 14.00	MOYA : A Computer Program for Fluid Flow Analysis (โมย่า : โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์การไหล) ทวิช จิตรสมบูรณ์, สุวรรณ อรรฐามศรี	1/124
14.00- 14.30	Compressible Laminar Flow Towards a Numerical Wind Tunnel Eakchai Juntasaro, Boonlue Sawatmongkhon	1/132
14.30- 15.00	Numerical Solution to 1-D and 2-D PDEs Using Wavelet Collocation Technique (การหาค่าผลเฉลยเชิงตัวเลขของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยหนึ่งและสองมิติด้วยวิธีเวปเลทคอลโลเคชัน) Damrongsak Wirasaet, Pomyos Vallikul	1/138

วันที่ 2 ธันวาคม 2542 ห้อง 7, Computational Fluid Dynamics 2 (15.15 - 17.15 น.)

ประธาน : หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหิดล

รองประธาน : รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

15.15- 15.45	Numerical Study of Flow Field of a Confined Impinging Jet (การศึกษาสนามการไหลเชิงตัวเลขของการฉีดกระทบ) พงษ์เจต พรหมวงศ์, ปริญา รววมภักติกุล	1/146
15.45- 16.15	Computation of Strongly Swirling Turbulent Flows in a Combustor Pongjet Promvonge, Chinarak Thianpong	1/152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4)

16.15- 16.45	Simulation of Turbulent Swirling Flows in a Combustor (การจำลองการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนในเตาเผา) ปริญญา รวมภักดีกุล, พงษ์เจต พรหมวงค์	1/160
16.45- 17.15	Prediction of Turbulent Flow over a square Obstacle in a 2-D Channel (การทำนายลักษณะการไหลปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสในช่อง 2 มิติ) สมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์, พงษ์เจต พรหมวงค์	1/166

วันที่ 2 ธันวาคม 2542 ห้อง 8, Automotive Engineering 1 (13.00 - 15.00 น.)

ประธาน : หัวหน้ากองวิชาการวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายเรือ

รองประธาน : ผศ.จำลอง ปราบแก้ว

13.00- 13.30	A Study of Modification For Hydrogen Fuelled Vehicle (การศึกษาการดัดแปลงใช้เชื้อเพลิง ไฮโดรเจนกับยานพาหนะ) ฉัตรชัย หงษ์อุเทน	1/172
13.30- 14.00	Multiple Spark Plugs in Two-Stroke Engines (การจุดระเบิดโดยหลายหัวเทียนในเครื่องยนต์สองจังหวะ) ฉพร จินดาประเสริฐ, เทพพร จันดาดี, ชัยวัฒน์ เกียรติพรพานิช, วิศนุรักษ์ เวชสถล, สมชาย จันทร์ชาวนา	1/178
14.00- 14.30	A Study of Effect of Catalytic Converter on Engine Exhaust of Two Stroke Engines (การศึกษาผลกระทบของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่มีต่อความสามารถในการคายไอเสียของเครื่องยนต์สองจังหวะ) กฤษฎา วรรณทอง, บัณฑิต สุวรรณตระกูล, สมชาย จันทร์ชาวนา	1/184
14.30- 15.00	An Engine for the Efficiency and Emissions Study on Fuel Injection Timing : SI Engine Thongchai Satapronnanont	1/192

วันที่ 2 ธันวาคม 2542 ห้อง 8, Automotive Engineering 2 (15.15 - 17.15 น.)

ประธาน : หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยรังสิต

รองประธาน : ผศ.จำลอง ปราบแก้ว

15.15- 15.45	Control of Engine Intake Valve by Electromagnetic Actuator System (การควบคุมวาล์วไอดีด้วยระบบตัวกระตุ้นแม่เหล็กไฟฟ้า) ธวัชชัย นาคพิพัฒน์, พงษ์ศักดิ์ คำมูล, Akihiko Kusaka, Hisayuki Ennoji, Toshio Iijima	1/195
-----------------	--	-------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนในเตาเผา Simulation of Turbulent Swirling Flow in a Combustor

พงษ์เจต พรหมวงค์ ปริญญา รมภักดีกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 66(2)326-9987, โทรสาร66(2)326-9053, E-Mail: kppongje@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) เป็นการไหลที่มีความซับซ้อนและยากต่อการคำนวณ ในที่นี้จะเสนอการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ในเตาเผา ที่มีการหมุนวนสูง โดยใช้วิธีการเชิงตัวเลขที่เรียกว่า วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume) ร่วมกับ Turbulence models ($k-\epsilon$ model) ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหา เพื่อศึกษาความผิดพลาดเชิงตัวเลขของผลลัพธ์ที่ได้วิธี Hybrid scheme และ QUICK scheme ต่อเทอม Convection ของสมการที่ discretised โดยมีข้อสมมุติฐาน เป็นของไหลอัดไม่ได้ 2 มิติ และการไหลแบบสมมาตร ผลการคำนวณที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง เพื่อดูความสามารถของแต่ละ scheme

Abstract

Swirl flow is very complex in nature and difficult for prediction. In this, the simulation of swirling turbulent flow in a combustor is presented. A staggered finite volume approach with standard $k-\epsilon$ model for 2D incompressible, axisymmetrical flows was used to carry out all the computations. To investigate the effects of numerical diffusion on the predicted result, Hybrid and Quick schemes were used. The predicted results are compared with available experiment data.

1. บทนำ

การไหลปั่นป่วนแบบหมุนวน (Swirling Turbulent Flows) เป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจ และได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องมาตลอดทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากการไหลในลักษณะนี้เป็นรูปแบบที่พบมากและเกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นในเตาเผา, หัวเผา, หม้อไอน้ำ ฯลฯ เพราะการไหลแบบปั่นป่วนมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเตาเผา การไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนจะมีผลต่อการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ อันจะส่งผลกระทบต่อตรงต่อเปลวไฟ รวมถึงมีส่วนช่วยลดมลพิษด้วย

โดยทั่วไปการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวน (Swirling Turbulent Flows) จะมีลักษณะขึ้นกับทิศทางอย่างสูง (non-isotropic) และการไหลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลา ฉะนั้นในการวิเคราะห์ปัญหา จึงต้องเริ่มด้วยการทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (Time Average) เพื่อตัดผลของการสั่น ซึ่งค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย แต่ผลจากการทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (Time Average) นั้นทำให้เกิดเทอมใหม่เพิ่มขึ้นในสมการอนุรักษ์โมเมนตัมซึ่งถูกเรียกว่า Reynolds stress อันเป็นสิ่งที่แบ่งแยกระหว่างการไหลราบเรียบ (Laminar) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ซึ่งจากเทอม Reynolds stress นี้เอง ที่ทำให้ปัญหาไม่สามารถแก้สมการเหล่านี้ได้ เนื่องจากตัวไม่รู้นี้มากกว่าจำนวนสมการ จึงจำเป็นต้องนำ Turbulence models เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา

ในบทความนี้ จะทำการจำลองการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวน โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขที่เรียกว่า วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume) [3, 5] ร่วมกับ $k-\epsilon$ Turbulence models [2, 4] ในการหาคำตอบ โดยในการคำนวณจะใช้ scheme ต่างกัน 2 schemes คือ Hybrid และ QUICK [5] เปรียบเทียบกัน ซึ่งผลที่ได้จากทั้ง 2 schemes จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองวัดค่าจากเตาเผา

2. ทฤษฎี

2.1 สมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ในบทความนี้จะมีสมมุติฐานว่า เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้, ไม่มีความร้อน, เป็นการไหลแบบมีความหนืด สมการที่ใช้จะประกอบด้วยสมการการอนุรักษ์มวล และสมการการอนุรักษ์โมเมนตัม จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaged) [2, 4] ทั้งสองสมการ แล้วเขียนในรูป tensor จะได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij}) \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ mean viscous stress tensor คือ

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

โดย μ คือ laminar viscosity จากสมการข้างต้นจะพบว่าเมื่อเทอม Reynolds stress, $\tau_{ij} (= -\rho \overline{u_i' u_j'})$ ซึ่งยังไม่ทราบค่า ดังนั้นสมการของ $k-\epsilon$ model จึงต้องการ เพื่อเข้ามาช่วยแก้ปัญหา

ใน $k-\epsilon$ model เทอม Reynolds stress จะถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ mean strain rate โดย eddy-viscosity ที่ซึ่งค่า eddy-viscosity จะกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับ turbulent kinetic energy (k) และ dissipation rate (ϵ) โดยใช้ Boussinesq's approximation คือ

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho k) + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

ที่ $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$ คือ turbulent eddy-viscosity สมการของ turbulent kinetic energy (TKE) k จะอยู่ในรูป

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \epsilon \quad (5)$$

ในทำนองเดียวกัน สมการ dissipation rate ของ turbulent kinetic energy จะเป็น

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} G - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \quad (6)$$

ซึ่ง G แทน generation rate of turbulent kinetic energy ขณะที่ $\rho \epsilon$ เป็น destruction rate โดย G จะเป็น

$$G = \mu_e \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

ค่าขอบเขตสำหรับค่าต่างของ turbulent ที่ใกล้ผนังสามารถหาได้จาก wall function [2, 4] ค่า $C_\mu, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, \sigma_k$ และ σ_ϵ เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการสังเกตจากสมการ turbulent transport [6]

2.2 รูปทั่วไปของสมการควบคุม

จากสมการทั้งหมดในข้างต้น จะสามารถจัดให้อยู่ในรูปทั่วไป ที่ประกอบด้วย Convection, Diffusion, และ Source terms [3, 5] สำหรับปัญหา 2 มิติ แบบแกนสมมาตรได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{1}{r} (r \rho v \phi) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi x} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\phi r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = S_\phi \quad (8)$$

โดยที่ ϕ เป็นค่าตัวแปรใดๆตามแต่สมการ $\Gamma_{\phi x}$ และ $\Gamma_{\phi r}$ จะเปลี่ยนแปลงตามค่า ϕ และ S_ϕ เป็น source term

สำหรับรายละเอียดของค่า $\Gamma_{\phi x}, \Gamma_{\phi r}$ และ S_ϕ ที่ค่า ϕ ต่างๆ จะถูกแสดงในตารางที่ 1

สัญลักษณ์

$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$	constants in the dissipation rate equation
C_μ	ค่าคงที่ใน $k-\epsilon$ turbulence model
D	เส้นผ่าศูนย์กลางของเตาเผา
G	stress generation
k	turbulence kinetic energy
l	turbulence characteristic length scale
p	ความดันเฉลี่ย
r	radial co-ordinate
R	รัศมีของเตาเผา
Re_D	Reynolds number
S	general source term
τ_{ij}	viscous stress tensor
u_i'	fluctuating velocities in direction x_i
$\overline{\rho u_i' u_j'}$	Reynolds stresses
u	time-averaged velocity in x-direction
v	time-averaged velocity in r-direction
x	axial co-ordinate

Greek Symbols

δ_{ij}	Kronecker delta tensor
ϵ	dissipation
ϕ	generalised dependent variable
Γ_ϕ	exchange coefficient
μ, μ_t	dynamic viscosity, eddy-viscosity
μ_e	effective viscosity, ($= \mu_t + \mu$)
ρ	ความหนาแน่น
σ_ϕ	Schmidt หรือ Prandtl numbers ของค่า ϕ
τ_{ij}	Reynolds stress tensor

Subscripts

e	effective
t	turbulence
i, j, k	Cartesian indices

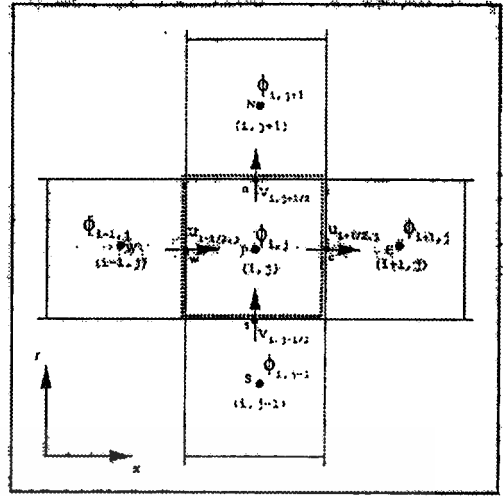
Superscripts and Overbars

'	fluctuating quantity in time-averaging
—	mean quantity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ค่าสรุปของสมการควบคุม

Conservation of	ϕ	$\Gamma_{\phi x}$	$\Gamma_{\phi r}$	S_{ϕ}
Mass	1	0	0	0
x-momentum	u	μ_e	μ_e	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right)$
r-Momentum	v	μ_e	μ_e	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right) - \frac{2\mu_e v}{r^2} + \frac{\rho w^2}{r}$
θ -momentum	w	μ_e	μ_e	$-\frac{\rho v w}{r} - \frac{w}{r^2} (\mu_e) - \frac{w}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\mu_e)$
Turbulent kinetic energy	k	μ_e / σ_k	μ_e / σ_k	$G - \rho \epsilon$
TKE dissipation Rate	ϵ	$\mu_e / \sigma_{\epsilon}$	$\mu_e / \sigma_{\epsilon}$	$(C_{\epsilon 1} G) \frac{\epsilon}{k} - (C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \frac{\epsilon}{k}$



รูปที่ 1 ลักษณะของปริมาตรควบคุม

2.4 Hybrid Scheme

Hybrid Scheme เป็นวิธีที่ได้จากการรวมข้อดีของ Central Scheme และ Upwind Scheme เพื่อแก้ปัญหาเรื่องค่า $Pe > 2$ โดยใช้การประมาณค่า Convection term เป็นรูปของสมการเชิงเส้นได้เป็น

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P & Pe > 2 \\ \frac{\phi_E + \phi_P}{2} & -2 \leq Pe \leq 2 \\ \phi_E & Pe < -2 \end{cases} \quad (10)$$

2.5 QUICK Scheme

เป็น Scheme ที่ใช้การประมาณเป็นรูปของสมการกำลังสอง ซึ่งจำเป็นต้องใช้ 3 จุดในการประมาณค่า เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจำลองการไหล โดยจะทำการประมาณค่า Convection term เป็น

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P + \frac{1}{8}(3\phi_E - 2\phi_P - \phi_W) & \rho u_e > 0 \\ \phi_E + \frac{1}{8}(3\phi_P - 2\phi_E - \phi_{EE}) & \rho u_e < 0 \end{cases} \quad (11)$$

โดยที่ $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_{\epsilon} = 1.3$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$, $\mu_e = \mu_t + \mu$

$$G = \mu_e \left[2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w}{r} \right) \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right]$$

2.3 Discretization ของสมการ

Discretization สมการจะทำโดยการอินทิเกรตสมการควบคุมตลอดทั้งปริมาตรควบคุม รอบๆ จุด P ดังแสดงในรูปที่ 1 แล้วรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิตอย่างง่ายได้เป็น

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + S \quad (9)$$

โดยในการจัดรูปของ (9) นั้น Diffusion term จะ discretise โดย Central differencing scheme ในขณะที่ Convection term ของสมการควบคุมนั้นจะไม่สามารถ discretise ได้โดยตรง ต้องอาศัย Scheme เข้าช่วย ซึ่งในบทความนี้จะใช้เพียง 2 Scheme คือ Hybrid และ QUICK Scheme เท่านั้น

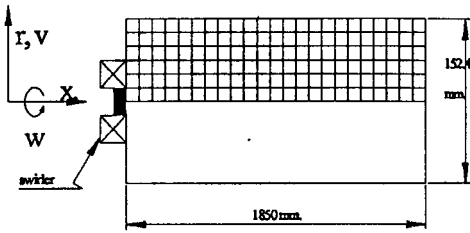
3. ลักษณะของปัญหา

ในบทความนี้จะจำลองการไหลบับวนแบบหมุนวนจากผลการทดลองของ Ahmed (1997) [1] จากรูปที่ 1 จะแสดงลักษณะรูปร่างของเตาเผาที่จะทำการจำลองการไหล ซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 mm มีความยาว 1850 mm และมีค่า $Re_0 = 200,000$

3.1 การจำลองการไหลโดยใช้ $k-\epsilon$ model

ในการจำลองการไหลในที่นี่จะใช้เงื่อนไขของ axisymmetric ฉะนั้น Computation domain จะใช้เพียงครึ่งเดียว โดยในการจำลองนี้จะสนใจจุดที่ $x/D = 0.0633, 0.167, 0.25, 0.333, 0.417, 0.5, 0.583, 0.669, 0.833$ และ 1.0 เพราะเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงสูง และมีผลจากการทดลองสำหรับเปรียบเทียบ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 ลักษณะของเตาเผาและ Computation domain

4. ผลและการวิจารณ์

จากการทำนายการไหลในเตาเผาโดยใช้สมการ และ scheme ต่างๆข้างต้นผลที่ได้จะถูกแสดงในรูปของความเร็วในทุกๆทิศทาง รวมถึง contour plot และ vector plot ในแต่ละ scheme เพื่อเปรียบเทียบความสามารถ ความแม่นยำ รวมถึงข้อจำกัดของ model

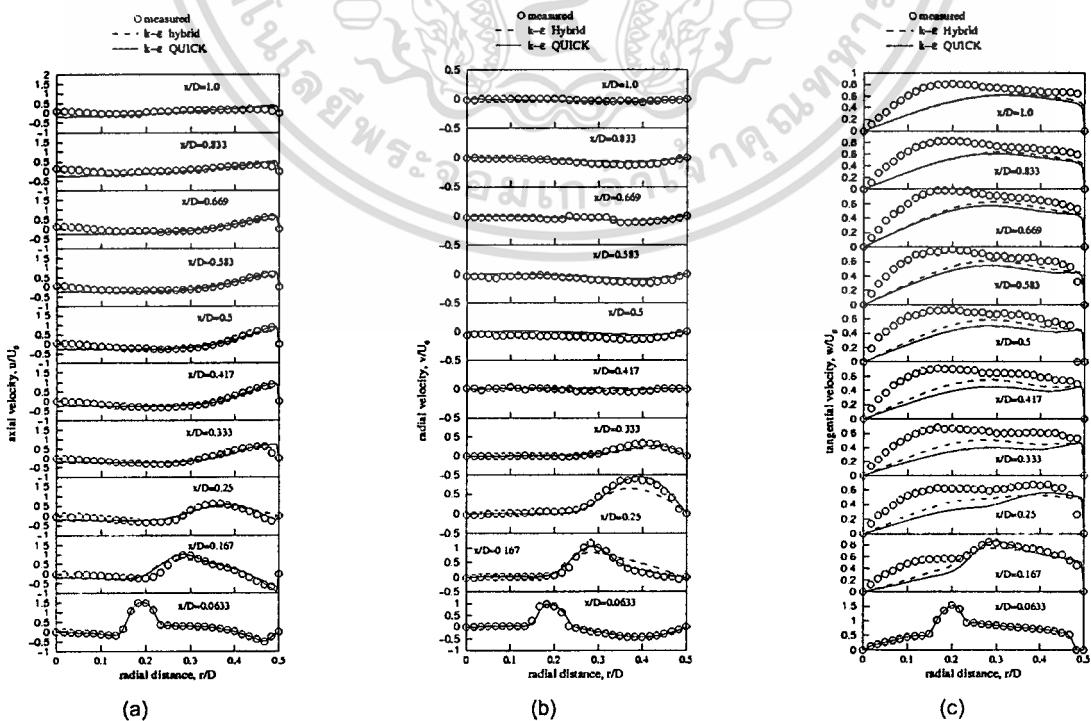
ผลของความเร็วในทิศทางต่างๆ นั้นจะถูกแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจากรูปจะแสดงให้เห็นความเปลี่ยนแปลงของความเร็ว รูป 3(a) เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนของความเร็วในแนวแกน (axial velocity) จากรูปจะพบว่าทั้ง 2 scheme ให้ผลการทำนาย ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ QUICK scheme จะมีประสิทธิภาพดีกว่าในบางตำแหน่ง อันเนื่องมาจาก QUICK scheme ให้ความแม่นยำที่ลำดับสอง แต่ในบางตำแหน่งผลของการใช้สมการกำลังสองก็ทำให้เกิดการ over shoot ได้ อันจะสังเกตได้จากที่ตำแหน่ง r/D เข้าใกล้ 0.5 และ $x/D = 0.833$ และ 1.0

ในการทำนายความเร็วในแนวแกนนี้จะพบว่ามีความผิดพลาดขึ้นที่ตำแหน่ง r/D เข้าใกล้ศูนย์หรือแกนกลางเตาเผา จะพบว่าการไหลย้อนกลับ ($w/U_0 < 0$) ขึ้น ซึ่งจะคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง จากรูปจะพบว่าทั้ง QUICK และ Hybrid ทำนายได้ผลที่ผิดพลาดเหมือนกันและมีค่าใกล้เคียงกัน โดยความผิดพลาดนั้นจะมีที่มาจากการใช้ข้อสมมุติฐานบางอย่างในการจำลองการไหล

จากภาพรวมจะเห็นว่า QUICK scheme มีความสามารถในการจำลองการไหลได้ดีกว่า hybrid และสำหรับการทำนายความเร็วในแนวแกนจะพบว่าถึงจะเกิดความผิดพลาดในบางจุดแต่ลักษณะของเส้นกราฟนั้นยังคงไปในแนวโน้มที่ถูกต้อง

ในรูป 3(b) แสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วในแนวรัศมีที่เป็นผลจากการทำนายกับผลการทดลอง โดยในรูปนี้จะพบว่าความสามารถของ QUICK scheme นั้นสามารถทำนายได้ดีกว่า Hybrid scheme อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ $x/D = 0.167$ และ 0.25 ซึ่งผลที่ได้จาก Hybrid scheme จะคลาดเคลื่อนผลการทดลองออกไปมาก ในขณะที่ผลที่ได้จาก QUICK scheme กลับมีลักษณะเดียวกับผลที่ได้จากการทดลอง สำหรับโดยภาพรวมจะพบว่าที่ตำแหน่งห่างออกไป ($x/D > 0.25$) ผลของทั้ง 2 scheme นั้นไม่มีความแตกต่างกันมากนักและผลที่ได้ก็มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง

การทำนายของความเร็วในแนวสัมผัส จะถูกแสดงในรูป 3(c) ซึ่ง จะพบว่าสำหรับความเร็วในแนวนี้ ทั้ง QUICK และ hybrid scheme ทำนายผลที่ได้มีความผิดพลาดอย่างมากในแทบทุกๆตำแหน่ง ที่เป็นอยู่เช่นนี้เพราะเป็นผลมาจากการใช้ $k-\epsilon$ model ซึ่งไม่เหมาะกับปัญหาที่มีความเร็วในแนวสัมผัสสูงๆ โดยผลที่ได้จะมีลักษณะเป็น rigid body rotation คือไม่แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในแนวนี้ แต่จะมีลักษณะคล้ายของแข็งหมุนรอบแกน อันจะดูได้จากตำแหน่งที่ $x/D = 0.333$ เป็นต้นไปจะพบว่าลักษณะของเส้นกราฟที่เทียบ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย ความผิดพลาดนี้เป็นความผิดพลาดเนื่อง จากความสามารถของตัว $k-\epsilon$ model เอง ซึ่งจะถูกแก้ไขได้โดยการ ใช้ $k-\epsilon$ model ในรูปแบบที่มีการประยุกต์ หรือเสียไปใช้ model ที่มีความสามารถมากขึ้น เช่น Reynold stress model หรือ Algebraic stress model



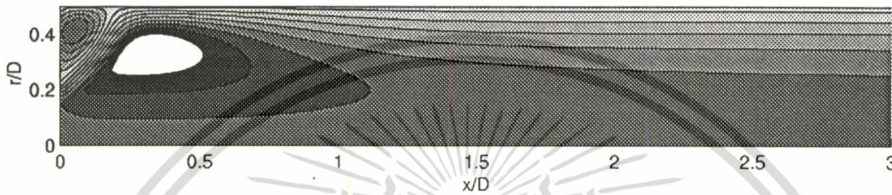
เอกสาร รูปที่ 3 รูปกราฟความเร็วตามแนวรัศมี (a) ความเร็วในแนวแกน (b) ความเร็วในแนวรัศมี (c) ความเร็วในแนวสัมผัส

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

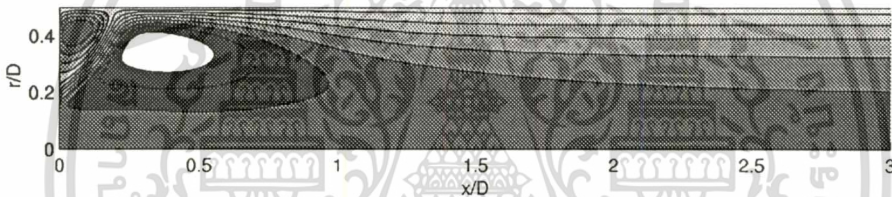
contour plot ของ stream function ซึ่งทำนายโดย Hybrid และ QUICK schemes จะถูกแสดงในรูปที่ 4a และ b ตามลำดับ โดย contour plot นั้นจะอยู่ในช่วง $r/D = 0$ ถึง 0.5 และ $x/D = 0$ ถึง 3 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างสูงจนถึงช่วงที่ไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว อันจะสังเกตเห็นว่าจุดที่เริ่มจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแล้วของ Hybrid scheme นั้นจะอยู่ที่จุด $x/D = 2$ ซึ่งจะแตกต่างกับผลของ QUICK scheme ที่มีจุดที่เริ่มจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ $x/D = 2.5$ และจากรูปจะพบว่าใน contour plot ของ stream function ทั้ง 2 รูปนั้นจะเกิด recirculation ขึ้น 2 ตำแหน่ง คือ ที่บริเวณมุมด้านบน (Conner recirculation) และที่บริเวณกึ่งกลางใกล้กับทางเข้ามาจาก Swirler เรียกว่า Central Toroidal recirculation อันจะมีขนาดที่ใหญ่กว่า Corner recirculation โดย Central Toroidal recirculation นี้เองจะมี

ส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของเตาเผา เพราะที่บริเวณนี้จะเกิด จะการผสมกันของเชื้อเพลิงกับอากาศอย่างรุนแรงและรวดเร็ว ส่งผลทำให้เปลวไฟสั้นนั่นเอง

จากผลของ QUICK scheme จะทำนายได้บริเวณที่เกิด Central Toroidal recirculation เล็กกว่าและมีลักษณะที่แตกต่างกันบ้างเล็กน้อยกับผลของ Hybrid scheme ซึ่งเป็นเพราะว่าทั้ง 2 schemes ให้ผลการทำนายความเร็วในแนวรัศมีที่แตกต่างกันในช่วงต้น ($x/D = 0.167 - 0.25$) ดังแสดงในรูปที่ 3(b) อันจะส่งผลให้ Hybrid scheme นั้นจะมีจุดศูนย์กลางของ Central Toroidal recirculation อยู่ที่ $x/D = 0.3$ และ $r/D = 0.32$ แต่ของ QUICK scheme นั้นจะมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $x/D = 0.36$ และ $r/D = 0.35$



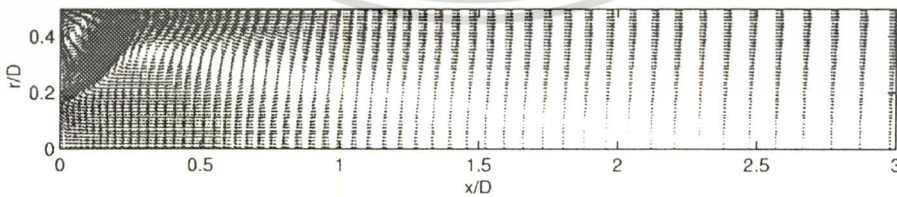
รูปที่ 4a Contour plot ของ stream function ทำนายโดย Hybrid scheme



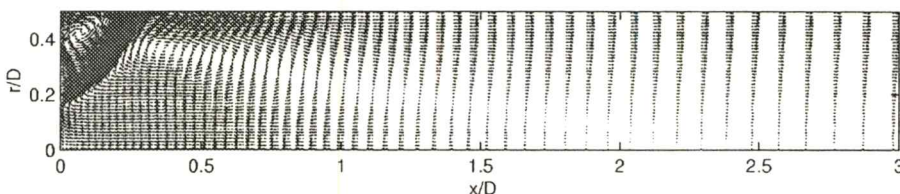
รูปที่ 4b Contour plot ของ stream function ทำนายโดย QUICK scheme

ในรูปที่ 5 จะแสดง vector plot ของความเร็วซึ่งทำนายโดย Hybrid และ QUICK schemes โดยจะอยู่ในช่วง $r/D = 0$ ถึง 0.5 และ $x/D = 0$ ถึง 3 เช่นเดียวกับ contour plot ของ stream function ซึ่งใน vector plot ของความเร็วนี้จะสามารถสังเกตเห็นถึงจุดศูนย์กลางของ recirculation ได้อย่างชัดเจนทั้ง Corner recirculation และ Central Toroidal recirculation จาก vector plot ของความเร็วนี้จะพบว่าที่บริเวณ r/D เข้าใกล้ศูนย์นั้นจะเกิดการไหลย้อนกลับขึ้น อันเป็นความ

ผิดพลาดที่เกิดขึ้นใน Hybrid และ QUICK schemes และผลเดียวกันนี้ จะสามารถสังเกตได้จากผลของความเร็วในแนวแกนที่แสดงในรูปที่ 3(a) ที่เกิดการไหลย้อนกลับขึ้น โดยการไหลย้อนกลับนี้จะเริ่มหายไปที่ ตำแหน่ง $x/D = 1.9$ จากผลการจำลองที่ได้ชี้ให้เห็นถึงความไม่เหมาะสมของการใช้ $k-\epsilon$ model ในการทำนายพฤติกรรมการณ์ไหลที่มีลักษณะที่มีความเร็วในแนวสัมผัสสูง อันเป็นข้อจำกัดของ $k-\epsilon$ model



รูปที่ 5a Vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย Hybrid scheme



รูปที่ 5b Vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย QUICK scheme

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งหากท่านใดต้องการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สรุป

จากทฤษฎีและวิธีเชิงตัวเลขที่เสนอในตอนต้น ที่ชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของ 2 schemes คือ Hybrid และ QUICK รวมถึงจากผลการจำลองการไหลเองได้แสดงถึงผลของประสิทธิภาพของ scheme ว่า QUICK scheme นั้นมีความสามารถกว่า Hybrid scheme ถึงแม้ว่าจะมีการเกิด over shoot บ้างในบางตำแหน่ง รวมถึงความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการไหลย้อนที่บริเวณที่ค่า $x/D < 1.9$ และความไม่เหมาะสมของการใช้ $k-\epsilon$ turbulence model กับปัญหาที่มีลักษณะมีความเร็วในแนวสัมผัสสูงมาก เนื่องจากข้อจำกัดของตัว $k-\epsilon$ model เอง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (ส.ก.ว.) เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยแก่ท่านภายใต้สัญญา Pdf42/39

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ahmed S A, "Three Component Velocity Measurements of an Isothermal Confined Swirling Flow", Proc. Instn Mech. Engrs, Part G, J. of Aerospace Engineering, 211(G2), pp. 113-122.
- [2] Wilcox C.D., "Turbulent Modelling for CFD", DCW Industries, Inc., (1993), California
- [3] Patankar S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, (1980), Washington, D.C.
- [4] Gatski T.B., "Turbulent Flows: Model Equations and Solution Methodology", in Handbook of Computational Fluid Mechanics, Edited by Roger Peyret, Academic Press Ltd, (1986), London
- [5] Versteeg H.K. and Malalasekera W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method", Longman Scientific & Technical, Longman Group Limited, (1995), English
- [6] Sloan D.G., Smith P.J., and Smoot L.D., "Model of Swirling in Turbulent Flow System", Progr. Energy Combust. Sci., vol. 12, (1986), pp. 163-250
- [7] Dong M. and Lilly D.G., "Inlet Velocity Profile Effects on Turbulent Swirling Flow Predictions", J. Propul. Power, 10(2), (1994), pp. 155-160
- [8] Hogg S. and Leschziner M.A., "Computation of Highly Swirling Confined Flow with a Reynolds Stress Turbulence Model", AIAA J., Vol. 27, (1989), pp. 57-63
- [9] Jones W.P. and Pascau A., "Calculation of Confined Swirling Flows with Second Moment Closure", Trans. ASME J., Vol.111, Sept (1989), 248-255

การศึกษานามการไหลเชิงตัวเลขของการฉีดกระทบ Numerical Study of Flow Field of a Confined Impinging Jet

พงษ์เจต พรหมวงศ์ ปริญญา รวมภักติกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 66(2)326-9987, โทรสาร66(2)326-9053, E-Mail: kppongje@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการจำลองการไหลแบบ Turbulent ในปัญหาการฉีดของไหลเข้ากระทบบนพื้นที่จำกัด (Confined Impinging Jet) โดยใช้วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume) ร่วมกับ $k-\varepsilon$ model เพื่อหาค่าสนามของความเร็วในพื้นที่นั้น ซึ่งจะมีสมมุติฐานว่าเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้, เป็นปัญหา 2 มิติ แบบแกนสมมาตร ผลที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองที่มีอยู่แล้ว

Abstract

The paper presents the simulation of turbulent flow in a confined impinging jet. A finite volume approach together with the $k-\varepsilon$ turbulence model was used in predict of the velocity field in the flow. The steady, incompressible, 2D axisymmetric and turbulent flows are assumed throughout the calculation. The predicted results are compared with experiment data.

1. บทนำ

การฉีดไอกระทบ (Impinging jets) ในช่องปิด (confined channels) ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นจำนวนมาก เช่น การหล่อเย็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ การอบชุบแข็งกระจก (Tempering of glass) การอบชุบแข็งโลหะและการหล่อเย็นใบพัดกังหัน รวมทั้งการอบแห้งของกระดาษและเส้นใย ทั้งนี้เพราะว่าการไหลดังกล่าวทำให้เกิดการถ่ายเทมวลและความร้อนสูงมากทั่วทั้งผิวที่ฉีดไอกระทบ การศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของไอฉีดกระทบจึงเป็นหัวข้อวิจัยที่น่าสนใจมากในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา (ดู Polat ,1993) [2]

Polat และ Douglass (1990) [3] ได้รายงานผลของการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับไอพ่นกระทบบนพื้นป้อนโดยการไหลผ่านผิวที่ฉีดไอกระทบ การทำนายของการกระจายการถ่ายเทความร้อนภายใต้ไอฉีดกระทบหลายชั้น (multiple jets) อยู่ภายใน 30% ของค่าได้จากการทดลอง Ichimiya และ Hosaka (1989) [4] และ Ichiyama (1992) [5] ก็ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการไหลนี้โดยการทดลองใน

ช่วงไอฉีดราบเรียบ (Laminar jets) เร็ว ๆ นี้ Janice และ V. Suresh (1997) [1] ได้ศึกษาเชิงทดลองของสนามการไหลของไอฉีดกระทบบนพื้นป้อนในช่องปิดแบบสมมาตร

ในบทความนี้จะทำการศึกษาคำการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) แบบไม่มีความร้อน โดยจะใช้วิธีเชิงตัวเลขที่เรียกว่า วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume method) ร่วมกับ $k-\varepsilon$ Turbulence model ในการหาค่าตอบ โดยในการทำนายจะใช้ 2 schemes ที่ต่างกัน คือ Hybrid และ QUICK เพื่อเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลที่ได้จากทั้ง 2 schemes จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

2. ทฤษฎี

2.1 สมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ในบทความนี้จะมีสมมุติฐานว่า เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้, ไม่มีความร้อน, เป็นการไหลแบบมีความหนืด สมการที่จะประกอบด้วยสมการการอนุรักษ์มวล และสมการการอนุรักษ์โมเมนตัม จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaged) ทั้งสองสมการ แล้วเขียนในรูป tensor จะได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij}) \quad (2)$$

โดยที่ mean viscous stress tensor คือ

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

โดย μ คือ laminar viscosity จากสมการข้างต้นจะพบว่าเมื่อ Reynolds stress, $\tau_{ij} (= -\rho \overline{u'_i u'_j})$ ซึ่งยังไม่ทราบค่า ดังนั้นสมการของ $k-\varepsilon$ turbulence model จึงถูกต้องการ เพื่อเข้ามาช่วยแก้ปัญหานี้

ใน $k-\varepsilon$ model เทอม Reynolds stresses จะถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ mean strain rate โดย eddy-viscosity ที่ซึ่งค่า eddy-viscosity จะกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับ turbulent kinetic energy, TKE (k) และ TKE dissipation rate (ε) โดยใช้ Boussinesq's approximation [8,9] คือ

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3}\delta_{ij}(\rho k) + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

ที่ $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ คือ turbulent eddy-viscosity

สมการของ turbulent kinetic energy (TKE) k จะอยู่ในรูป [8,9]

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (5)$$

ในทำนองเดียวกัน สมการ dissipation rate ของ turbulent kinetic energy [8,9] จะเป็น

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (6)$$

ซึ่ง G แทน generation rate of turbulent kinetic energy ขณะที่ $\rho \varepsilon$ เป็น destruction rate โดย G จะเป็น

$$G = \mu_e \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

ค่าขอบเขตสำหรับค่าต่างๆของ turbulent ที่ใกล้ผนังสามารถหาได้จาก wall function [8,9] ค่า $C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k$ และ σ_ε เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองจากสมการ turbulent transport [6]

2.2 รูปทั่วไปของสมการควบคุม

จากสมการทั้งหมดในข้างต้น จะสามารถจัดให้อยู่ในรูปทั่วไป ที่ประกอบด้วย Convection, Diffusion, และ Source terms [6,7] สำหรับปัญหา 2 มิติ แบบแกนสมมาตรได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{1}{r} (r \rho v \phi) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi x} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\phi r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = S_\phi \quad (8)$$

โดยที่ ϕ เป็นค่าตัวแปรใดๆตามแต่สมการ $\Gamma_{\phi x}$ และ $\Gamma_{\phi r}$ จะเปลี่ยนแปลงตามค่า ϕ และ S_ϕ เป็น source term

สำหรับรายละเอียดของค่า $\Gamma_{\phi x}, \Gamma_{\phi r}$ และ S_ϕ ที่ค่า ϕ ต่างๆ จะถูกแสดงในตารางที่ 1

สัญลักษณ์

$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$	constants in the dissipation rate equation
C_μ	ค่าคงที่ใน $k-\varepsilon$ turbulence model
d	เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด
G	stress generation
H	ระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกับผนัง
k	turbulence kinetic energy
p	ความดันเฉลี่ย
Pe	Peclet number ($\rho u \delta x / \Gamma_\phi$)
r	radial co-ordinate
Re_D	Reynolds number
S	general source term
t_{ij}	viscous stress tensor
u'	fluctuating velocities in direction r
v'	fluctuating velocities in direction x
$\overline{\rho u_i u_j}$	Reynolds stresses
u	time-averaged velocity in r -direction
v	time-averaged velocity in x -direction
x	axial co-ordinate

Greek Symbols

δ_{ij}	Kronecker delta tensor
ε	dissipation
ϕ	generalized dependent variable
Γ_ϕ	exchange coefficient
μ, μ_t	dynamic viscosity, eddy-viscosity
μ_e	effective viscosity, ($= \mu_t + \mu$)
ρ	ความหนาแน่น
σ_ϕ	Schmidt หรือ Prandtl numbers ของค่า ϕ
τ_{ij}	Reynolds stress tensor

Subscripts

e	effective
t	turbulence
i, j, k	Cartesian indices

Superscripts and Overbars

'	fluctuating quantity in time-averaging
—	mean quantity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ค่าสรุปของสมการควบคุม

Conservation of	ϕ	$\Gamma_{\phi r}$	$\Gamma_{\phi \theta}$	S_{ϕ}
Mass	1	0	0	0
r-momentum	u	μ_e	μ_e	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right)$ $+ \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right)$ $- \frac{\partial}{\partial r} \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right)$ $- \frac{2\mu_e u}{r^2}$
x-Momentum	v	μ_e	μ_e	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right)$ $+ \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right)$ $- \frac{\partial}{\partial x} \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right)$
Turbulent kinetic energy	k	μ_e / σ_k	μ_e / σ_k	$G - \rho \epsilon$
TKE dissipation Rate	ϵ	$\mu_e / \sigma_{\epsilon}$	$\mu_e / \sigma_{\epsilon}$	$(C_{\epsilon 1} G) \frac{\epsilon}{k}$ $- (C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \frac{\epsilon}{k}$

โดยที่ $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_{\epsilon} = 1.3$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$, $\mu_e = \mu_t + \mu$

$$G = \mu_e \left(2 \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 \right)$$

2.3 Discretization ของสมการ

Discretization ของสมการจะทำการอินทิเกรตสมการควบคุมตลอดทั้งปริมาตรควบคุม รอบๆ จุด P ดังแสดงในรูปที่ 1 แล้วรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิตอย่างง่ายได้เป็น

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + S \tag{9}$$

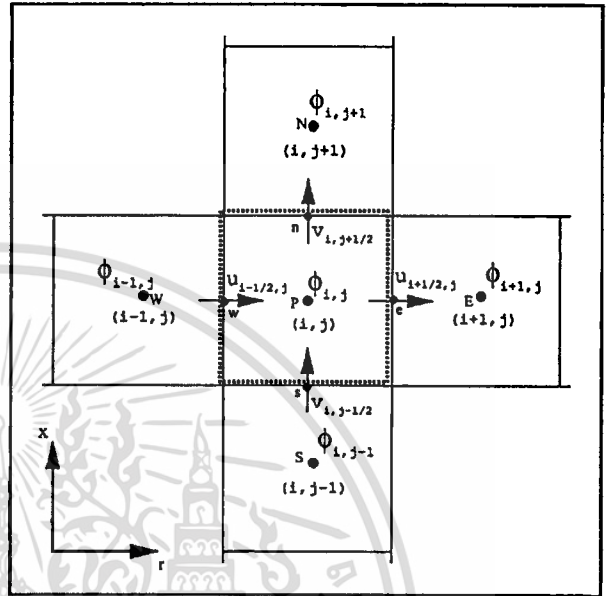
โดยในการจัดรูปของ (9) นั้น Diffusion term จะ discretise โดย Central differencing scheme ซึ่งเป็น 2nd order accurate ในขณะที่ Convection term ของสมการควบคุมนั้นจะไม่สามารถ discretise โดย scheme ข้างบนได้โดยตรง ต้องอาศัย Scheme เข้าช่วย ซึ่งในบทความนี้จะใช้เพียง 2 Scheme คือ Hybrid และ QUICK Scheme เท่านั้น

2.3.1 Hybrid Scheme

Hybrid Scheme [6,7] เป็นวิธีที่ได้จากการรวมข้อดีของ Central Scheme และ Upwind Scheme เพื่อแก้ปัญหาเรื่องค่า $Pe > 2$ โดยใช้การประมาณค่า Convection term เป็นรูปของสมการเชิงเส้นได้เป็น (สำหรับ east face)

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P & Pe > 2 \\ \frac{\phi_E + \phi_P}{2} & -2 \leq Pe \leq 2 \\ \phi_E & Pe < -2 \end{cases} \tag{10}$$

(สำหรับ face อื่นๆ ก็ทำนองเดียวกัน)



รูปที่ 1 ลักษณะของปริมาตรควบคุม

2.3.2 QUICK Scheme

เป็น Scheme [6,7] ที่ใช้การประมาณเป็นรูปของสมการกำลังสองซึ่งจำเป็นต้องใช้ 3 จุดในการประมาณค่า เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจำลองการไหล โดยจะทำการประมาณค่า Convection term สำหรับ east face เป็น

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P + \frac{1}{8} (3\phi_E - 2\phi_P - \phi_W) & \rho u_e > 0 \\ \phi_E + \frac{1}{8} (3\phi_P - 2\phi_E - \phi_{EE}) & \rho u_e < 0 \end{cases} \tag{11}$$

สำหรับ face อื่นๆ ก็ทำนองเดียวกัน

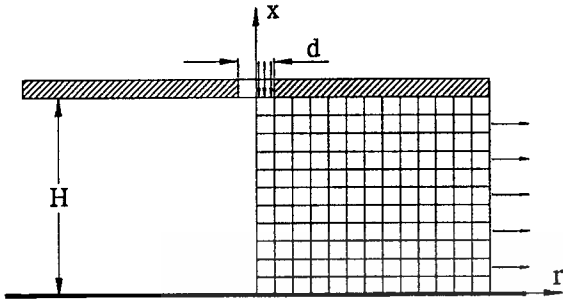
3. ลักษณะของปัญหา

ในบทความนี้จะศึกษาการไหลแบบบับปวนในปัญหาการฉีดกระทบจากผลการทดลองของ A. Janice และ V. Suresh (1997) [1] ซึ่งจะมีค่า $H/d = 3$ และ $d = 6.35$ mm. ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยของไหลที่ฉีดคือ perfluorinated dielectric liquid (FC 77) ($\rho = 1789 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0.86 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) ที่ $Re_D = 13,000$

3.1 การจำลองการไหลโดยใช้ $k-\epsilon$ model

ในการจำลองการไหลในที่นี้จะใช้เงื่อนไขของ axisymmetric ฉะนั้น Computational domain จะใช้เพียงครึ่งเดียว โดยจะทำการ

เปรียบเทียบผลในช่วง $r/d = 0$ ถึง 3.5 และ $x/d = 0$ ถึง 0.5 เพราะเป็นค่าที่มีผลจากการทดลองสำหรับเปรียบเทียบ และผล contour plot ของ stream function ที่ทำนายได้ จะถูกเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง ในช่วง $r/d = 0$ ถึง 11 และ $x/d = 0$ ถึง 3



รูปที่ 2 ลักษณะของการจัดกระโทบ และ Computational domain

4. ผลและการวิจารณ์

จากการทำนายการจืดกระโทบโดยใช้สมการ และ scheme ต่างๆ ข้างต้นผลที่ได้จะถูกแสดงในรูปของความเร็ว รวมถึง contour plot และ vector plot ในแต่ละ scheme เพื่อเปรียบเทียบความสามารถ ความแม่นยำ รวมถึงข้อจำกัดของ model

ในรูปที่ 3 เป็นกราฟของความเร็วในแนวรัศมีเปรียบเทียบกับผล การทดลองที่ตำแหน่งในช่วง $r/d = 0$ ถึง 3.5 และ $x/d = 0$ ถึง 0.5 โดย ในรูป 3(a) นั้นจะอยู่ที่ $r/d = 0$ ถึง 1.5 และรูป 3(b) อยู่ที่ $r/d = 1.75$ ถึง 3.5 จากภาพรวมทั้งหมดจะพบว่า QUICK scheme นั้นจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า Hybrid scheme อันจะสังเกตได้จากเส้นกราฟของ QUICK scheme ที่จะเข้าใกล้ผลการทดลองมากกว่า Hybrid scheme

ซึ่งจากผลการทำนายความเร็วในแนวรัศมี จะพบว่ามีความผิดพลาดมากในตอนต้นที่ตำแหน่ง $r/d = 0, 0.25$ และ 0.5 ดังที่แสดงในรูป 3(a) ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้น เกิดขึ้นจากการใช้ข้อสมมุติฐานว่า ไม่มีความเร็วในแนวรัศมีที่ตำแหน่ง $r/d = 0$ อันเป็นจุดที่ใช้เป็นแกน สมมาตร จึงส่งผลต่อลักษณะของเส้นกราฟทั้ง 3 ตำแหน่ง ในขณะที่

ค่าที่ได้จากการทดลอง แสดงความไม่สมมาตรเพราะว่าค่าวัดได้ไม่เป็น ศูนย์

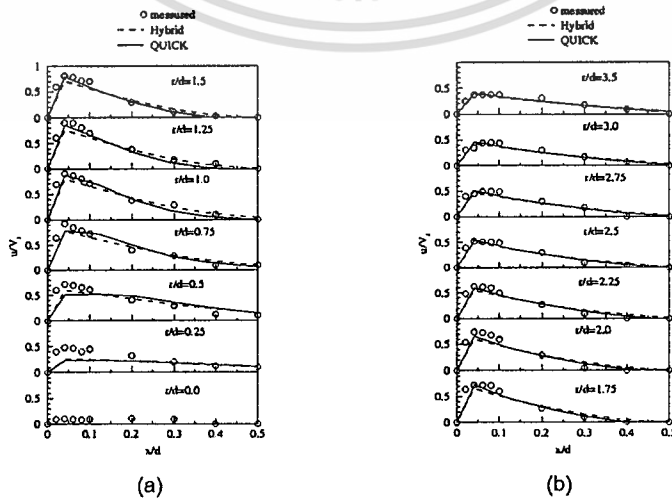
จากการใช้ QUICK scheme ที่เป็นการประมาณโดยใช้สมการ กำลังสองนั้น จะพบว่ามีการทำนายต่ำกว่าค่าจากการทดลองอยู่บ้างในการ ทำนายนี้ อันจะสังเกตได้ที่ตำแหน่ง $x/d = 0.2$ ถึง 0.5 ของ $r/d = 1$ และ 1.25 จะพบว่ามัลักษณะจะเป็นเส้นโค้ง ที่โค้งออกจากผลที่ได้จากการทดลอง แต่จะพบว่าที่ตอนท้ายไกลออกไปนั้น ทั้ง 2 schemes จะให้ผลการทำนายที่ไม่แตกต่างกันอันจะสังเกตที่ตำแหน่ง $r/d = 3$ และ 3.5 ที่แสดงในรูป 3(b)

จะพบว่าทั้ง 2 schemes นั้นให้ผลการทำนายไปในทิศทางที่สอดคล้องกับผลการทดลอง อันจะสังเกตได้ที่ตำแหน่ง $r/d = 1$ เป็นต้นไป แต่จะพบว่า QUICK scheme นั้นจะเข้าใกล้ผลการทดลองมากกว่า Hybrid

ผลของ Contour plot ของ stream function ซึ่งทำนายโดย Hybrid, QUICK schemes และผลจากการทดลอง จะถูกแสดงในรูปที่ 4a, 4b และ 4c ตามลำดับ โดย contour plot จะอยู่ในช่วง $r/d = 0$ ถึง 11 และ $x/d = 0$ ถึง 3 ยกเว้นแต่ contour plot ของผลการทดลองที่จะอยู่ในช่วงของ $r/d = -0.5$ ถึง 11 และ x/d อยู่ระหว่าง 1 และ 2 เท่านั้น

จากรูปที่ 4a ซึ่งทำนายโดยวิธี Hybrid scheme นั้น จะพบว่าเกิดการ recirculation ขึ้น โดยมีตำแหน่งศูนย์กลางการเกิดอยู่ที่ $x/d \approx 1.25$ และ $r/d \approx 8.75$ ส่วนผลของ QUICK scheme ที่แสดงในรูป 4b ซึ่งจะมีตำแหน่งจุดศูนย์กลางของ recirculation อยู่ที่ $x/d = 1.25$ และ $r/d = 9$ อันจะเป็นผลของ scheme ที่ใช้มีความแตกต่างกัน

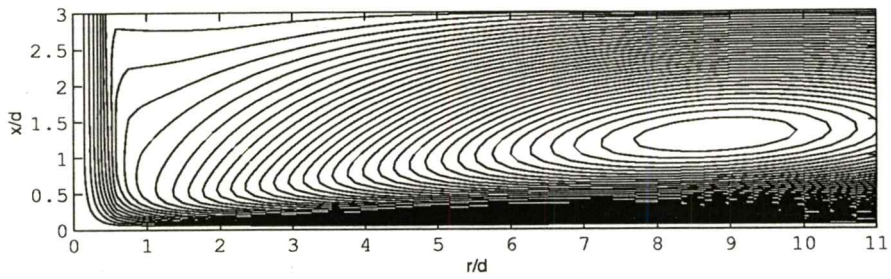
จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4c จะพบว่าได้เกิด recirculation ที่มีตำแหน่งจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $x/d = 1.25$ และ $r/d \approx 9.3$ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความผิดพลาดของทั้ง 2 schemes ที่เกิดขึ้น อันเป็นผลมาจากการใช้ข้อสมมุติที่ไม่ถูกต้องนักที่ตำแหน่ง $r/d = 0$ และผลของความแม่นยำของตัว scheme เอง แต่จากผลจะพบว่า QUICK scheme นั้นมีความผิดพลาดน้อยกว่า Hybrid scheme ซึ่งจะตรงกับผลทางทฤษฎีที่ว่า QUICK scheme นั้นมีระดับความผิดพลาดอยู่ที่อนุพันธ์อันดับที่สอง



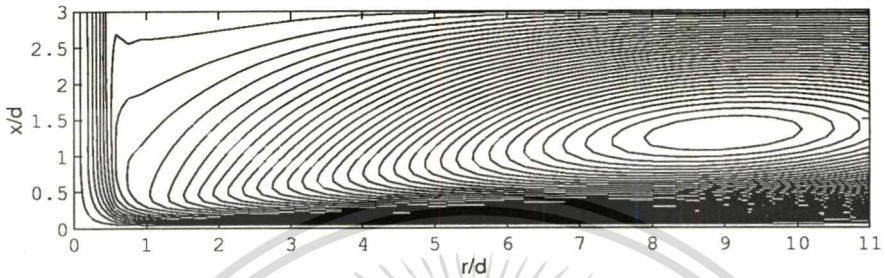
รูปที่ 3 รูปกราฟความเร็วเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง (a)ช่วง $r/d = 0 - 1.5$ (b)ช่วง $r/d = 1.75 - 3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

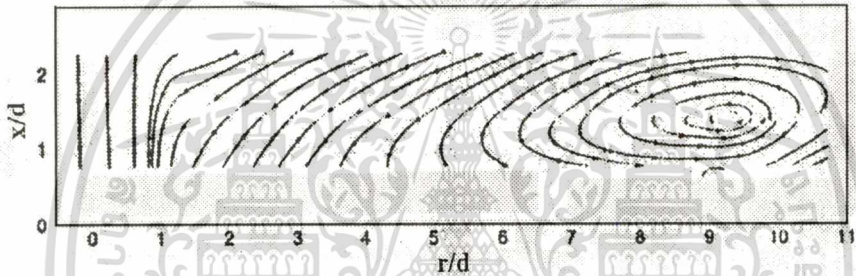
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4a contour plot ของ stream function ทำนายโดย Hybrid scheme



รูป 4b contour plot ของ stream function ทำนายโดย QUICK scheme



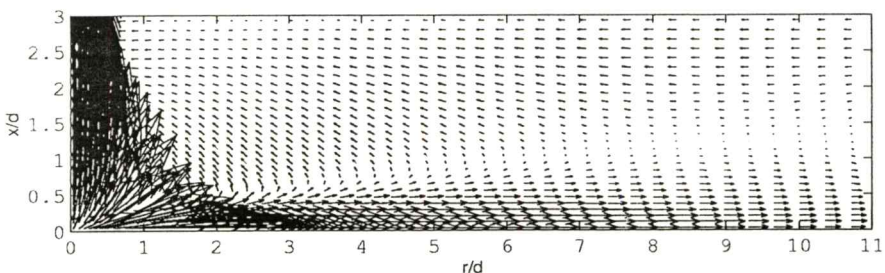
รูป 4c contour plot ของ stream function จากผลการทดลอง [1]

รูปที่ 5a และ 5b เป็น vector plot ของความเร็วที่ทำนายโดย Hybrid และ QUICK schemes ตามลำดับ โดยผลจากทั้ง 2 schemes จะแสดงผลที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะสังเกตเห็นที่ตำแหน่ง $r/d = 0$ ถึง 2 จะเห็นทิศทางการไหลที่ออกจากหัวฉีดเข้ากระทบบนผนังมีความเร็วสูงมาก จากนั้นความเร็วจะกระจายออกในทุกๆทาง รวมถึงบริเวณที่เกิด recirculation ซึ่งสังเกตได้จากการไหลย้อนกลับที่บริเวณ x/d มากกว่า 1 และ r/d มากกว่า 2 อันจะพบได้ในผลที่ได้จากทั้ง 2 schemes

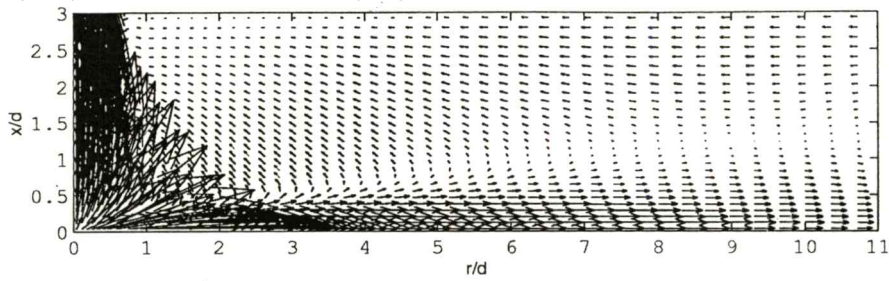
จากผลที่ได้ทั้งหมดได้แสดงถึงความสามารถของ QUICK scheme ที่มีประสิทธิภาพมากกว่า Hybrid scheme ถึงแม้จะเกิดความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองบ้าง แต่ลักษณะของเส้นกราฟก็ยังไปในแนวทางที่ถูกต้องทั้ง 2 schemes

5. สรุป

การศึกษาการไหลในปัญหาการฉีดกระทบบ โดยใช้ทฤษฎีและวิธีเชิงตัวเลขที่ได้กล่าวในข้างต้น ได้ชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของ Hybrid และ QUICK schemes รวมถึงจากผลการจำลองการไหลเองได้แสดงถึงผลของประสิทธิภาพของ scheme ว่า QUICK scheme นั้นมีความสามารถกว่า Hybrid scheme และถึงแม้ว่าทั้ง 2 schemes นั้นจะทำนายได้ผลที่มีความผิดพลาดไปบ้างเล็กน้อย อันจะเนื่องจากการใช้ข้อมูลมาตรฐานที่ผิดหรือข้อจำกัดทางด้านความแม่นยำของ scheme เองก็ตาม แต่ผลที่ได้รับก็ยังถือได้ว่ามีมีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ในการใช้ทำนายลักษณะการไหลของของไหลแบบนี้



รูปที่ 5a vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย Hybrid scheme



รูปที่ 5b vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย QUICK scheme

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Janice A. and Suresh V., "A Study of the flow field of a confined and submerged impinging jet", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 41, (1997), pp. 1025-1034.
- [2] Polat S., "Heat and Mass Transfer in Impingement Drying", *Drying Technol. Int. J.*, Vol 11, no. 5, (1993), pp. 1147-1176.
- [3] Polat S. and Douglas W. J. , "Heat Transfer Under Multiple Slot Impinging on a Permeable Moving Surface", *AIChE J.*, vol. 36, (1990), pp.1370-1378.
- [4] Ichimiya K. and Hosaka N., "Experimental Study of Heat Transfer Characteristic Due to Confined Impinging Two-Dimensional Jets (Heat Transfer Experiment for Three Slot Jets)", *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Part B*, vol. 55, (1990), pp. 3210-3215.
- [5] Ichimiya K. , "Numerical Estimation on Impingement Heat Transfer Caused by Confined Three Slot Jets", in J. A. Reizes (ed.), *Transport Phenomena in Heat Transfer and Mass Transfer*, pp. 456-467, (1992), Elsevier Science, New York.
- [6] Patankar S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, (1980), Washington, D.C.
- [7] Versteeg H.K. and Malalasekera W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method", Longman Scientific & Technical, Longman Group Limited, (1995), English
- [8] Wilcox C.D., "Turbulent Modelling for CFD", DCW Industries, Inc., (1993), California
- [9] Gatski T.B., "Turbulent Flows: Model Equations and Solution Methodology", in *Handbook of Computational Fluid Mechanics*, Edited by Roger Peyret, Academic Press Ltd, (1986), London

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายปริญญา รวมภักดีกุล เกิดเมื่อวันที่ 10 มกราคม 2519 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยสยาม ปีการศึกษา 2540 และในปีการศึกษา 2541 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโททางวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้