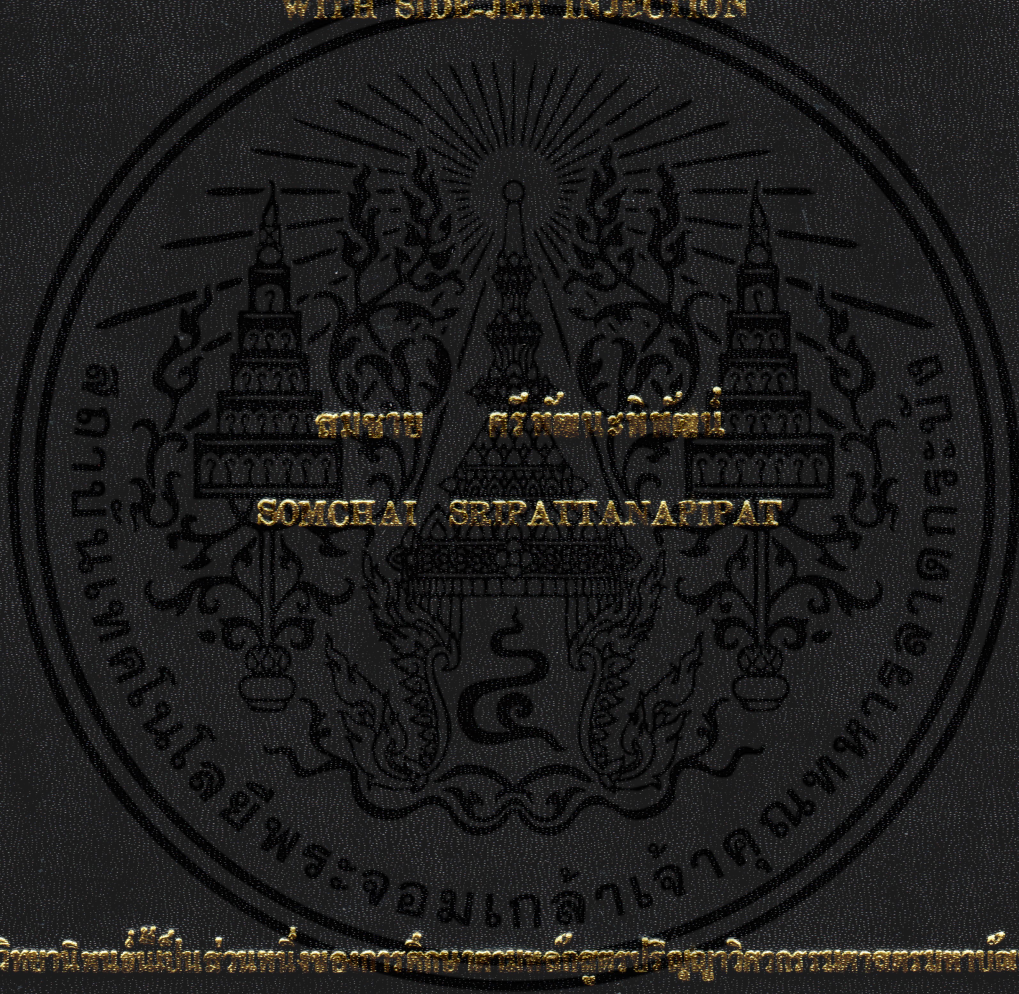


การทำนายการไหลแบบปั่นป่วนในช่องที่มีการฉีดข้าง

PREDICTION OF TURBULENT CHANNEL FLOW  
WITH SIDE-JET INJECTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-191-6

การทำนายการไหลแบบปั่นป่วนในช่องที่มีการฉีดด้านข้าง

PREDICTION OF TURBULENT CHANNEL FLOW  
WITH SIDE - JET INJECTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-191-6

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 39767  
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ย. 2544

b.....

ขอสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้พิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2001**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การทำนายการไหลแบบปั่นป่วนในช่องที่มีการฉีดด้านข้าง  
PREDICTION OF TURBULENT CHANNEL FLOW WITH SIDE-JET  
INJECTION

ชื่อนักศึกษา      นายสมชาย      ศรีพัฒนะพิพัฒน์

รหัสประจำตัว      42062028

ปริญญา      วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา      วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์      รศ.ดร.พงษ์เจต      พรหมวงศ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
ดร.ชินรักษ์	เชียรพงษ์	
รศ.อัครเดช	สินธุศักดิ์	
ผศ.มิ่ง	โลกิจแสงทอง	
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	

วัน/เดือนปี ที่สอบ 25 เมษายน 2544 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว  
  
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัครชู)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....18.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายการไหลแบบปั่นป่วนในช่องที่มีการฉีดด้านข้าง
นักศึกษา	นายสมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์
รหัสประจำตัว	42062028
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

### บทคัดย่อ

การประยุกต์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจำลองการไหลในช่องการไหลที่มีการฉีดด้านข้างได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับการไหลที่อัดตัวไม่ได้ได้นำเสนออย่างละเอียด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างความเข้าใจอย่างลึกซึ้งในพฤติกรรมของการไหลในช่องการไหลที่มีการฉีดด้านข้าง โดยได้นำวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมมาใช้ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\epsilon$  model และ algebraic stress model (ASM) ในการคำนวณผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้รูปแบบผลต่างของอนุพันธ์ลำดับที่สอง คือ quadratic upstream interpolation for convective kinematics (QUICK) และ second order upwind (SOU) ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการใช้รูปแบบผลต่างของอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งซึ่งคือ upwind และ hybrid เพื่อที่จะศึกษาอิทธิพลของการแพร่กระจายหรือความผิดพลาดเชิงตัวเลขต่อผลลัพธ์ที่คำนวณได้ ในการศึกษาการไหลที่มีการฉีดด้านข้างนี้ ได้พิจารณาการฉีดที่แตกต่างกันถึง 3 กรณี โดยใน 2 กรณีแรกเป็นการฉีดของไหลในแนวตั้งฉากและทำมุมกับกระแสการไหลตามลำดับ กรณีสุดท้ายเป็นการฉีดของไหลในแนวสัมผัสกับแนวการไหลในท่อ ผลลัพธ์ของการทำนายรูปร่างของความเร็วได้นำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองที่ทำมาก่อนหน้านี้ ผลจากการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการทำนายการไหลในกรณีฉีดของไหลในแนวตั้งฉากกับกระแสการไหลนั้น แบบจำลอง  $k-\epsilon$  กับ ASM ให้ผลการทำนายที่ไม่แตกต่างกันมากและการใช้ first order scheme ทำนายได้ดีกว่า second order scheme สำหรับในกรณีฉีดของไหลทำมุมกับกระแสการไหลการใช้ ASM ให้ผลการทำนายที่ดีกว่า  $k-\epsilon$  model และการคำนวณที่ใช้ second order scheme ให้ผลการทำนายที่ดีกว่า first order scheme ส่วนการทำนายการไหลในกรณีฉีดของไหลในแนวสัมผัสกับกระแสการไหลซึ่งมองโดยภาพรวมแล้วผลการทำนายของแบบจำลอง  $k-\epsilon$  กับ ASM ร่วมกับ scheme ต่างๆ ทำนายแนวโน้มของการไหลได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองพอสมควร

<b>Thesis Title</b>	Prediction of Turbulent Channel Flow with Side - Jet Injection
<b>Student</b>	Mr. Somchai Sripattanapipat
<b>Student ID.</b>	42062028
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2001
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge

### ABSTRACT

The application of a mathematical model for the prediction of turbulent duct flow with side-jet injection is presented in this thesis. The modelling of turbulence for incompressible, duct 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 channel flow with side-jet injection. 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 injection types of duct flow with side-jet injection were used in the simulation. The first two types are injections normal and inclined to the flow, respectively while the last injection type is a tangential jet. The results of predicted velocity profiles are compared with available experimental data. The computations showed that for the first injection type, results predicted by both turbulence models generally are in good agreement with measurements. However, the first-order scheme performs better than the second order scheme. For the second injection type, results predicted by ASM are in better agreement with measurements than those by the  $k-\varepsilon$  model and the second order scheme shows better results than the first order scheme. For the final injection type, predictions using both turbulence models with the various schemes lead to fairly well agreement with experimental data.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำสั่งสอน, คำแนะนำ, คำปรึกษา และความกรุณาของ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์และที่ปรึกษา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ลูกศิษย์คนนี้ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ นายปัญญา แดงวิไลลักษณ์, นายสมิทธิ์ เอี่ยมสอาด, นายปริญญา รวมภักดีกุล, นายยุทธนา พลอยฉาย, นายสมศักดิ์ โพธิ์ถวิลเกียรติ, นายศุภชัย เลื่อนลอย, และเพื่อนๆปริญญาโททุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอแสดงความขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนสำหรับวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดาของผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่งที่เฝ้าเลี้ยงดู, อบรมสั่งสอนและเป็นที่กำลังใจตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จสมความตั้งใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้แล้ว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเช่นนี้ ซึ่งคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านและขออำนาจพระศรีรัตนตรัยอวยพรความสุขสวัสดิ์แก่ทุกท่าน

สมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VIII
สารบัญรูป .....	IX
รายการสัญลักษณ์.....	XIII
รายการคำย่อ.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฉีดของไหลในแนวตั้งฉากกับกระแสการไหล .....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฉีดของไหลทำมุมเอียงกับกระแสการไหล .....	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฉีดของไหลในแนวสัมผัสด้านข้างกับกระแสการไหล .....	6
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	8
3.1 บทนำ.....	8
3.2 สมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....	9
3.3 สมการการไหลแบบปั่นป่วน .....	10
3.4 แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Models).....	10
3.4.1 Reynolds Stress Model (RSM).....	10
3.4.2 The Standard $k - \epsilon$ Model .....	12

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4.2.1	Boussinesq Approximation .....	12
3.4.2.2	สมการ Turbulent Kinetic Energy ( $k$ ) .....	12
3.4.2.2.1	แบบจำลองของ The Turbulent Diffusion Term บนสมการ $k$ .....	13
3.4.2.2.2	แบบจำลองของ The Isotropic Turbulent Dissipation Rate Term บนสมการ $k$ .....	13
3.4.2.3	สมการ Dissipation Rate ( $\varepsilon$ ) .....	14
3.4.2.3.1	แบบจำลองของเทอมต่างๆ บนสมการ $\varepsilon$ .....	14
3.4.3	Algebraic Stress Model (ASM) .....	15
3.5	สรุป .....	16
บทที่ 4	การประยุกต์วิธีการปริมาตรสี่บเนื้อ (Finite Volume Method) .....	17
4.1	บทนำ .....	17
4.2	วิธีการปริมาตรสี่บเนื้อ (Finite Volume Method) .....	17
4.3	Discretisation ของสมการ .....	18
4.3.1	Convection Term .....	18
4.3.1.1	Upwind Scheme .....	19
4.3.1.2	Hybrid Scheme .....	19
4.3.1.3	Second Order Upwind Scheme (SOU) .....	20
4.3.1.4	QUICK Scheme .....	20
4.3.2	Diffusion Term .....	21
4.3.3	Source Term .....	21
4.4	รูปแบบมาตรฐานของสมการที่ discretised แล้ว .....	22
4.5	เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) .....	23
4.5.1	เงื่อนไขที่ทางเข้า (Inlet Boundary Conditions) .....	23
4.5.2	เงื่อนไขที่ทางออก (Outlet Boundary Conditions) .....	23
4.5.3	เงื่อนไขที่แกนสมมาตร (Axisymmetric Conditions) .....	23
4.5.4	เงื่อนไขที่ผนัง (Wall Boundary Conditions) .....	24
4.6	กระบวนการหาคำตอบ (Solution Procedure) .....	25

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.1 การหาคำตอบโดยใช้วิธี TDMA .....	25
4.6.2 The SIMPLE Algorithm.....	26
4.7 สรุป .....	28
<b>บทที่ 5 การจำลองการไหลของการฉีดด้านข้าง .....</b>	<b>29</b>
5.1 บทนำ.....	29
5.2 การฉีดของไหลในแนวตั้งฉากกับช่องการไหลของ Sano (1999).....	29
5.2.1 ช่องการไหลที่มีการฉีดด้านข้าง กรณีช่องฉีดเท่ากับ 10 mm.....	31
5.2.1.1 การทำนายการไหลโดย $k - \epsilon$ model.....	31
5.2.1.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress Model (ASM) .....	33
5.2.2 ช่องการไหลที่มีการฉีดด้านข้าง กรณีช่องฉีดเท่ากับ 20 mm.....	37
5.2.2.1 การทำนายการไหลโดย $k - \epsilon$ model.....	37
5.2.2.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress Model (ASM) .....	37
5.2.3 สัมประสิทธิ์ความดันสถิตที่ผนังภายในช่องการไหลที่มีการฉีดด้านข้าง.....	39
5.2.3.1 การทำนายการไหลโดย $k - \epsilon$ model.....	39
5.2.3.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress Model (ASM) .....	40
5.3 การฉีดของไหลทำมุมกับช่องการไหล .....	43
5.3.1 การฉีดทำมุม 30 องศา .....	44
5.3.1.1 การทำนายการไหลโดย $k - \epsilon$ model.....	44
5.3.1.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress Model (ASM) .....	44
5.3.2 การฉีดทำมุม 45 องศา .....	48
5.3.2.1 การทำนายการไหลโดย $k - \epsilon$ model.....	48
5.3.2.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress Model (ASM) .....	48
5.3.3 การฉีดทำมุม 60 องศา .....	52
5.3.3.1 การทำนายการไหลโดย $k - \epsilon$ model.....	52
5.3.3.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress Model (ASM) .....	52
5.4 สรุป.....	56

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 การทำนายการไหลในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีคอากาศหุติยภูมิแนวสัมผัสด้านข้าง .....	57
6.1 บทนำ.....	57
6.2 เตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีคอากาศหุติยภูมิด้านข้างของ Lin <i>et. al.</i> (1998).....	57
6.3 เตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีคอากาศหุติยภูมิด้านข้าง กรณี $Q_r = 2, D_s/D = 0.5$ .....	60
6.3.1 การทำนายการไหลโดย $k - \varepsilon$ model.....	60
6.3.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress Model (ASM) .....	63
6.4 เตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีคอากาศหุติยภูมิด้านข้าง กรณี $Q_r = 1, D_s/D = 0.5$ .....	67
6.4.1 การทำนายการไหลโดย $k - \varepsilon$ model.....	67
6.4.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress Model (ASM) .....	70
6.5 เตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีคอากาศหุติยภูมิด้านข้าง กรณี $Q_r = 2, D_s/D = 1.0$ .....	74
6.5.1 การทำนายการไหลโดย $k - \varepsilon$ model.....	74
6.5.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress Model (ASM) .....	77
6.6 สรุป .....	81
บทที่ 7 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	82
7.1 สรุปผลงานวิจัย.....	82
7.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป.....	82
บรรณานุกรม .....	83
ภาคผนวก บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	85
ประวัติผู้เขียน .....	93

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สรุปสมการที่จำเป็นต้องใช้.....	16
4.1 Inlet Boundary Conditions .....	23
5.1 เงื่อนไขในการคำนวณตามการทดลองของ Sano (1999).....	30
5.2 แสดงขนาดของช่องการไหลและมุมที่ใช้ในการทดลอง (Liou <i>et. al</i> , 1999) .....	43



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ลักษณะของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน.....	8
4.1 ลักษณะการวาง cell ใน staggered grid.....	18
5.1 ลักษณะช่องการไหลของ Sano (1999) และ computational domain .....	29
5.2 ความเป็นอิสระของกริดต่อความเร็วตามแนวแกนที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model .....	30
5.3 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี $Q_r = 0.067$ ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model .....	32
5.4 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี $Q_r = 0.133$ ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model .....	32
5.5 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี $Q_r = 0.200$ ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model .....	32
5.6 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี $Q_r = 0.067$ ทำนายโดย ASM.....	34
5.7 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี $Q_r = 0.133$ ทำนายโดย ASM.....	34
5.8 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี $Q_r = 0.200$ ทำนายโดย ASM.....	34
5.9 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวแกนกรณี $Q_r = 0.067$ ระหว่าง $k-\varepsilon$ model กับ ASM .....	35
5.10 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวแกนกรณี $Q_r = 0.133$ ระหว่าง $k-\varepsilon$ model กับ ASM .....	36
5.11 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวแกนกรณี $Q_r = 0.200$ ระหว่าง $k-\varepsilon$ model กับ ASM .....	36
5.12 การเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างความเร็วที่แต่ละอัตราส่วนการฉีด .....	36
5.13 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี $Q=0.133$ ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model.....	37
5.14 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี $Q=0.133$ ทำนายโดย ASM.....	38
5.15 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวแกนกรณี $Q_r = 0.133$ ระหว่าง $k-\varepsilon$ model กับ ASM .....	38
5.16 ค่า $C_p$ ที่ผนังด้านบน ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model .....	40
5.17 ค่า $C_p$ ที่ผนังด้านล่าง ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model.....	40
5.18 ค่า $C_p$ ที่ผนังด้านบน ทำนายโดย ASM.....	41
5.19 ค่า $C_p$ ที่ผนังด้านล่าง ทำนายโดย ASM.....	41
5.20 การเปรียบเทียบค่า $C_p$ ที่ผนังด้านบน ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model กับ ASM .....	42
5.21 การเปรียบเทียบค่า $C_p$ ที่ผนังด้านล่าง ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model กับ ASM.....	42
5.22 ลักษณะช่องการไหลของ Liou <i>et. al.</i> (1999) และ computational domain.....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.23 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 30 องศา ทำนายโดย $k - \epsilon$ model .....	44
5.24 Contour plot ของ stream function กรณีฉีดทำมุม 30 องศา ทำนายโดย $k - \epsilon$ model ร่วมกับ SOU scheme .....	45
5.25 Vector plot ของความเร็ว กรณีฉีดทำมุม 30 องศา ทำนายโดย $k - \epsilon$ model ร่วมกับ SOU scheme .....	45
5.26 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 30 องศา ทำนายโดย ASM.....	46
5.27 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 30 องศา ระหว่าง $k - \epsilon$ model กับ ASM.....	46
5.28 Contour plot ของ stream function กรณีฉีดทำมุม 30 องศา ทำนายโดย ASM ร่วมกับ SOU scheme .....	47
5.29 Vector plot ของความเร็ว กรณีฉีดทำมุม 30 องศา ทำนายโดย ASM ร่วมกับ SOU scheme...	47
5.30 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 45 องศา ทำนายโดย $k - \epsilon$ model .....	48
5.31 Contour plot ของ stream function กรณีฉีดทำมุม 45 องศา ทำนายโดย $k - \epsilon$ model ร่วมกับ SOU scheme .....	49
5.32 Vector plot ของความเร็ว กรณีฉีดทำมุม 45 องศา ทำนายโดย $k - \epsilon$ model ร่วมกับ SOU scheme .....	49
5.33 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 45 องศา ทำนายโดย ASM.....	50
5.34 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 45 องศา ระหว่าง $k - \epsilon$ model กับ ASM.....	50
5.35 Contour plot ของ stream function กรณีฉีดทำมุม 45 องศา ทำนายโดย ASM ร่วมกับ SOU scheme .....	51
5.36 Vector plot ของความเร็ว กรณีฉีดทำมุม 45 องศา ทำนายโดย ASM ร่วมกับ SOU scheme...	51
5.37 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 60 องศา ทำนายโดย $k - \epsilon$ model .....	52
5.38 Contour plot ของ stream function กรณีฉีดทำมุม 60 องศา ทำนายโดย $k - \epsilon$ model ร่วมกับ SOU scheme .....	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.39 Vector plot ของความเร็ว กรณีฉีดทำมุม 60 องศา ทำนายโดย $k - \epsilon$ model ร่วมกับ SOU scheme .....	53
5.40 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 60 องศา ทำนายโดย ASM.....	54
5.41 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 60 องศา ระหว่าง $k - \epsilon$ model กับ ASM.....	54
5.42 Contour plot ของ stream function กรณีฉีดทำมุม 60 องศา ทำนายโดย ASM ร่วมกับ SOU scheme .....	55
5.43 Vector plot ของความเร็ว กรณีฉีดทำมุม 60 องศา ทำนายโดย ASM ร่วมกับ SOU scheme... 55	55
6.1 ลักษณะเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีดอากาศทุติยภูมิด้านข้าง (VFBC) ของ Lin <i>et. al.</i> (1998) และ computational domain .....	57
6.2 Imaginary circle และ การจัดวาง secondary air injection nozzles .....	58
6.3 ความเป็นอิสระของกริดต่อความเร็วตามแนวแกนและแนวสัมผัส ที่ทำนายโดย $k - \epsilon$ model .....	59
6.4 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย $k - \epsilon$ model (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส.....	61
6.5 Contour plot ของ stream function กับ vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย $k - \epsilon$ model ที่ใช้ (ก) upwind scheme และ (ข) SOU scheme .....	62
6.6 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตาม แนวสัมผัส.....	64
6.7 Contour plot ของ stream function กับ vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย ASM ที่ใช้ (ก) upwind scheme และ (ข) SOU scheme .....	65
6.8 การเปรียบเทียบการทำนายระหว่าง $k - \epsilon$ model กับ ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส.....	66
6.9 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย $k - \epsilon$ model (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส.....	68
6.10 Contour plot ของ stream function กับ vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย $k - \epsilon$ model ที่ใช้ (ก) upwind scheme และ (ข) SOU scheme .....	69
6.11 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตาม แนวสัมผัส.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XI ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.12 Contour plot ของ stream function กับ vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย ASM ที่ใช้ (ก) upwind scheme และ (ข) SOU scheme .....	72
6.13 การเปรียบเทียบการทำนายระหว่าง $k - \epsilon$ model กับ ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส .....	73
6.14 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย $k - \epsilon$ model (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส .....	75
6.15 Contour plot ของ stream function กับ vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย $k - \epsilon$ model ที่ใช้ (ก) upwind scheme และ (ข) SOU scheme .....	76
6.16 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตาม แนวสัมผัส .....	78
6.17 Contour plot ของ stream function กับ vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย ASM ที่ใช้ (ก) upwind scheme และ (ข) SOU scheme .....	79
6.18 การเปรียบเทียบการทำนายระหว่าง $k - \epsilon$ model กับ ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส .....	80

## รายการสัญลักษณ์

$a$	สัมประสิทธิ์ในสมการ discretization
$A$	พื้นที่ (area)
$A_{ij}$	convection quantity ที่เพิ่มขึ้นจาก Rodi's approximation
$D$	diffusion flux, เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง (diameter)
$\bar{D}'_j$	the turbulent diffusion term ของสมการ $k$
$\bar{D}'_\varepsilon$	the turbulent diffusion term ของสมการ $\varepsilon$
$\bar{D}'_{ijk}$	the turbulent diffusion term
$E$	wall roughness parameter
$C$	convection flux
$h, H$	ความสูงของช่องการไหล
$k$	turbulent kinetic energy (TKE)
$\ell$	length scale
$L$	characteristic length
$p$	ความดัน (pressure)
$Pe$	Peclet number
$\bar{P}$	the turbulent production term ของสมการ $k$
$\bar{P}_\varepsilon$	the production term ของสมการ $\varepsilon$
$\bar{P}_{ij}$	the turbulent production term
$Q_j$	อัตราการไหลของการฉีด
$Q_m$	อัตราการไหลรวม
$Q_r$	อัตราส่วนการไหล
$r$	radial co-ordinate, รัศมี (radius)
$Re$	Reynolds number
$S$	source term
$S_{ij}$	strain tensor
$t$	เวลา (time)
$T_i$	turbulent intensity
$u$	ความเร็วตามแนวแกน (axial mean velocity)
$u_r$	friction velocity

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$u_i$	velocity vector
$U$	normalized velocity
$v$	ความเร็วตามแนวขวาง (transverse mean velocity), ความเร็วตามแนวรัศมี (radial mean velocity)
$V$	ปริมาตร
$w$	ความเร็วตามแนวสัมผัส (tangential velocity)
$x$	axial co-ordinate
$y$	transverse co-ordinate
$y_p$	ระยะที่วัดจากผนัง
$\phi$	ตัวแปรอิสระใดๆ
$\sigma_{ij}$	deviatoric part ของ viscous stress tensor
$\sigma_\phi$	Schmidt or Prandtl numbers for the scalar $\phi$
$\tau_{ij}, \overline{u'_i u'_j}$	second-moment, Reynolds Stress
$\delta_{ij}$	kronecker delta tensor
$\Pi_{ij}$	the pressure-strain rate correlation term
$\Phi_\varepsilon$	the destruction term ของสมการ $\varepsilon$
$\rho$	ความหนาแน่น (density)
$\mu$	ความหนืด (viscosity)
$\nu$	ความหนืดจลน์ (kinetic viscosity)
$\varepsilon$	isotropic dissipation rate
$\varepsilon_{ij}$	local dissipation rate term
$\kappa$	von Karman constant
$\theta$	มุมของแนวการพีด (side jet angle)
$\beta, \lambda$	turbulence model constant ค่าคงที่ใดๆระหว่าง 0 ถึง 1
$\tilde{\tau}$	fluctuating momentum equation
$\Gamma$	diffusion coefficient

# รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

## ตัวห้อย (Subscripts)

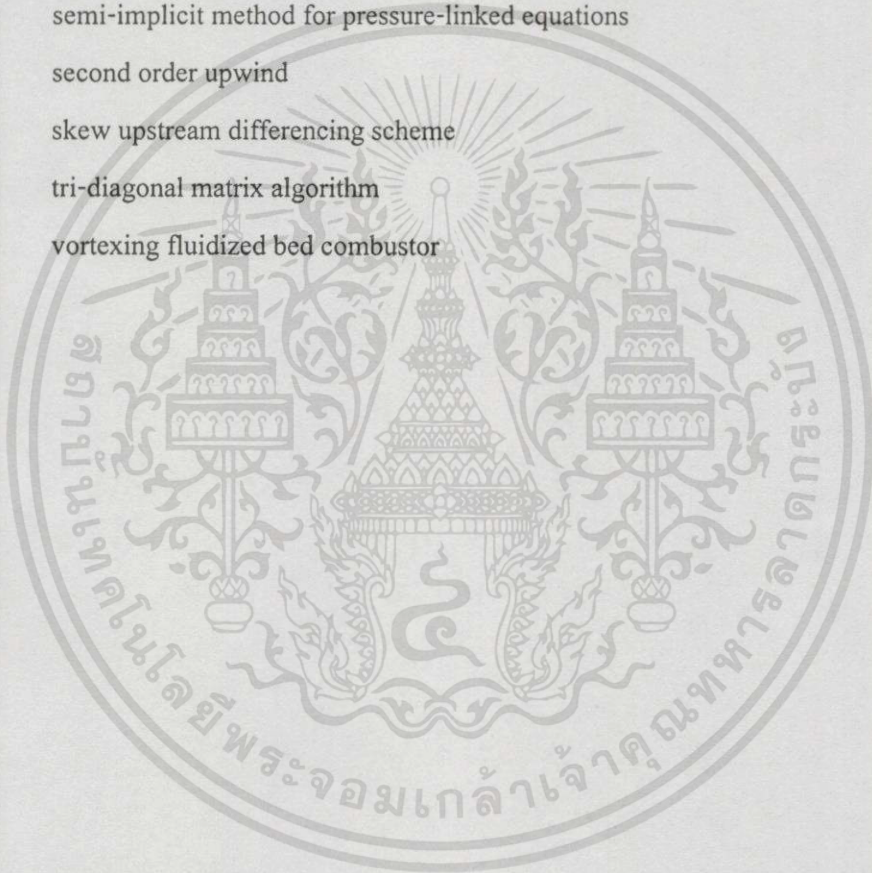
$e, w, n, s$	control volume face ระหว่าง P กับ E, P กับ W, P กับ N และ P กับ S
$E, W, N, S$	จุดที่อยู่ข้างเคียงบน east, west, north และ south
$i, j, k$	cartesian indices
$j$	หัวฉีด (jet)
$m$	mean value
$nb$	จุดต่อที่อยู่ข้างเคียง
$ref, o$	reference point
$T$	turbulent

## ตัวยก (Superscripts) และ Overbars

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

# รายการคำย่อ

ASM	algebraic stress model
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
VFBC	vortexing fluidized bed combustor



# บทที่ 1

## บทนำ

การศึกษาลักษณะการไหลของของไหลซึ่งเกิดขึ้นในธรรมชาติและที่เกิดจากมนุษย์สร้างขึ้นในระยะเริ่มแรกนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรจะต้องสร้างแบบจำลองที่ใกล้เคียงกับลักษณะปัญหาที่ทำการศึกษาแล้วทำการทดลองกับแบบจำลองดังกล่าวเพื่อวิเคราะห์การไหลที่เกิดขึ้น ต่อมาเมื่อวิวัฒนาการด้านคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วมาก เทคโนโลยีด้านการคำนวณโดยวิธีการเชิงตัวเลขจึงเป็นไปได้และในปัจจุบันความรู้ในการจำลองปัญหาโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กำลังพัฒนาอย่างต่อเนื่องและกำลังได้รับความสนใจ จึงเป็นแรงจูงใจในการศึกษาการจำลองการไหลโดยวิธีการเชิงตัวเลขในวิทยานิพนธ์นี้

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคนิคการควบคุมการไหลที่มีแรงเฉือนมีความสำคัญอย่างสูงสำหรับงานประยุกต์ด้านวิศวกรรม ในจำนวนเทคนิคดังกล่าวการฉีดของไหลจากผนังไปยังกระแสการไหลเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมความปั่นป่วนที่ผนัง ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเช่น

- การระบายความร้อนโดยการซึมผ่านของไหลของใบพัดเทอร์โบ
- การลดแรงต้านบริเวณผนัง
- การเผาไหม้ของก๊าซที่ระเหยจากเชื้อเพลิงแข็ง

เทคนิคการฉีดอีกอย่างหนึ่งซึ่งใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed combustor) เรียกว่า vortexing fluidized bed combustor (VFBC) โดยการฉีดอากาศทุติยภูมิ (secondary air) ผ่านช่องฉีดเข้าไปในเตาในแนวสัมผัส เทคนิคดังกล่าวได้ช่วยเพิ่ม residence time ของอนุภาคเชื้อเพลิงในเตาและลดการสูญเสียของอนุภาคละเอียดที่หลุดลอยออกไปจากเตา

ในการประยุกต์เทคนิคดังกล่าวข้างต้นจำเป็นต้องมีความเข้าใจอย่างแจ่มชัดว่าพฤติกรรมของกระแสการไหลเฉื่อยและลักษณะของความปั่นป่วนได้รับผลกระทบจากของไหลที่ฉีดอย่างไร

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ทำการทำนายพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนในท่อการไหลที่มีการฉีดของไหลผสมด้านข้าง
2. ทำการศึกษาความสามารถของแบบจำลองความปั่นป่วน (turbulence model) ในการทำนายการไหลแบบปั่นป่วนในช่องการไหลที่มีการฉีดของไหลผสมด้านข้าง

3. ทำการศึกษาเปรียบเทียบ numerical differencing schemes ที่มีผลต่อความแม่นยำในการทำนายการไหล

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (incompressible flow)
2. เป็นการไหลหนืด (viscous flow)
3. เป็นการไหลแบบคงที่ (steady flow)
4. เป็นการไหลแบบสองมิติหรือแบบสมมาตรในแนวแกน (2-dimensional or axisymmetric 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. ทำการทำนายการไหลแบบปั่นป่วนในท่อที่มีการฉีดด้านข้างโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขที่เรียกว่าวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume method)
2. ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของ numerical schemes 4 ชนิด คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU
3. ในการทำนายการไหลนี้จะใช้แบบจำลองความปั่นป่วน (turbulence model) 2 แบบ คือ  $k - \epsilon$  model และ algebraic stress model (ASM)
4. ผลที่ได้จากการทำนายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ทำมาก่อนหน้านี้ เพื่อแสดงความแม่นยำในการทำนายการไหล

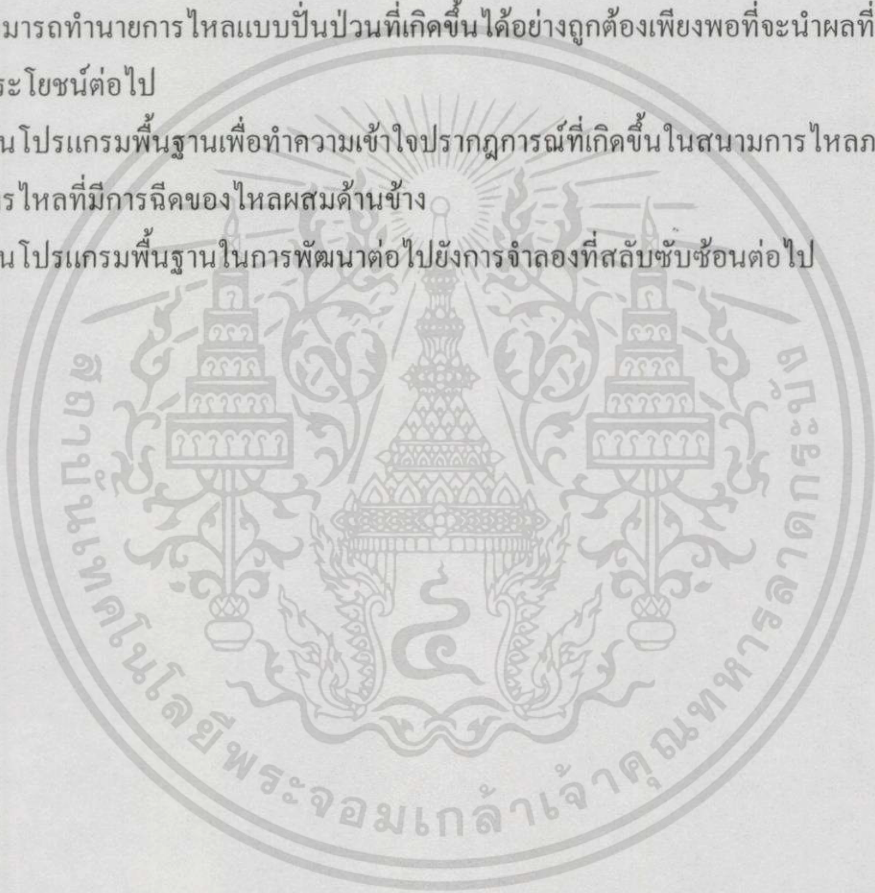
### 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ทำการศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนรวมทั้งแบบจำลองความปั่นป่วน (turbulence model)

2. ทำการศึกษาวีธีปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume) และหลักการในการนำไปใช้
3. ทำการรวบรวมงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องและเลือกการทดลองที่มีเหมาะสมมาใช้เป็นแบบในการจำลองการไหล
4. ทำการคำนวณและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่เลือกไว้
5. สรุปผลการทำนายการไหลทั้งหมดที่ได้

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทำนายการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องเพียงพอที่จะนำผลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป
2. เป็น โปรแกรมพื้นฐานเพื่อทำความเข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสนามการไหลภายในช่องการไหลที่มีการฉีดของไหลผสมด้านข้าง
3. เป็น โปรแกรมพื้นฐานในการพัฒนาต่อไปยังการจำลองที่สลับซับซ้อนต่อไป



## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประยุกต์ความรู้เกี่ยวกับปรากฏการณ์ของการไหลภายในกระแสการไหลที่มีการบิดของไหลด้านข้างเข้าไปผสมเกิดขึ้นมานานแล้วหลายสิบปี ตัวอย่างการนำความรู้ไปใช้ประโยชน์เช่น การออกแบบช่องระบายความร้อนของใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์, เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับ V/STOL, การควบคุมแรงเหวี่ยง และ ความดันบริเวณผนัง เป็นต้น จึงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบิดของไหลในลักษณะดังกล่าวมากมาย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเอางานวิจัยที่น่าสนใจมาทำการศึกษา 3 ลักษณะด้วยกัน ดังจะได้กล่าวถึงในหัวข้อย่อยถัดไป

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบิดของไหลในแนวตั้งฉากกับกระแสการไหล

Kamonati และ Greber (1972) ทำการวัดความเร็วเฉลี่ย, ความปั่นป่วน และ การกระจายของอุณหภูมิสำหรับการบิดของไหลจากท่อกลมไปยังกระแสการไหล พบว่าปริมาณของค่าต่างๆที่วัดได้ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโมเมนต์ของของไหลที่บิดต่อกระแสการไหล และยังพบ pair of counterrotating vortices เกิดขึ้นด้วย Stoy และ Ben-Haim (1973) ทำการศึกษาการเบี่ยงเบนและการกระทบของของไหลที่บิดในช่องการไหลที่จำกัดแน่นอน (confined crossflow) โดยทำการทดลองและการวิเคราะห์ที่อาศัยสมการอนุรักษ์พื้นฐาน (basic conservation equation), entrainment function model และ ความสัมพันธ์จากการทดลองสำหรับความยาวของ potential core จากการผลการวิเคราะห์พบว่าสามารถทำนายการเบี่ยงเบนและตำแหน่งการกระทบของของไหลที่บิดได้ดีพอสมควร

Bergeles *et. al.* (1976) ศึกษาลักษณะการไหลที่อัตราส่วนความเร็วต่างๆโดยอาศัย visualization และการวัดความดันสถิต (static pressure) ที่ผนังใกล้ทางออกของช่องบิด พบว่าที่อัตราส่วนความเร็วของการบิดต่อกระแสการไหลต่ำ รูปร่างความเร็วที่ระนาบทางออกของช่องบิดมีลักษณะไม่สม่ำเสมอเป็นอย่างมาก Crabb *et. al.* (1981) ทำการวัดลักษณะความเร็วในกระแสการไหลที่การบิดของไหลเข้าไปผสมโดยใช้ Laser-Doppler anemometry (LDA) วัดที่บริเวณ upstream ซึ่งมีความเข้มขึ้นของความปั่นป่วนมากและใช้ hot-wire anemometry วัดที่บริเวณ downstream โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วของการบิดของไหลต่อกระแสการไหลเท่ากับ 2.3 และ 1.15 พบว่าความเร็วที่ทางออกของช่องบิดมีความไม่สมมาตรเป็นอย่างมาก

Andreopoulos และ Rodi (1984) ศึกษาสนามการไหลโดยใช้ three-sensor hot-wire probe ตรวจสอบการไหลที่เกิดขึ้นจากการบิดของไหลจากท่อกลมเดี่ยวทำมุมตั้งฉากกับกระแสการไหลหลัก ที่

อัตราส่วนความเร็วต่ำ  $R = 0.5, 1.0$  และ  $2.0$  พบว่าลักษณะหลายอย่างที่สังเกตเห็นในกรณีนี้คือท่อเดียวกันนี้เกิดขึ้นในการฉีดหลายท่อที่เป็นแถวเรียงกัน

Andreopoulos (1982) นำเสนอผลการวัดความเร็วสั้นที่เกิดจากการฉีดของไหลเข้าไปในกระแสการไหล ในแต่ละค่าของอัตราส่วนความเร็วของการฉีด พบว่าลักษณะรูปร่างความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอภายในท่อฉีดพบห่างจากปากทางออกถึง 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อสำหรับอัตราส่วนความเร็วของการฉีดน้อย และเป็น 2.5 เท่า สำหรับอัตราส่วนความเร็วของการฉีดสูง Sano (1992) ทำการจำลองการไหลในบริเวณชั้นขีดผิว (boundary layer) ที่มีการฉีดและการดูดผ่านช่อง (slit) โดยใช้ turbulent models ที่แตกต่างกัน 5 models โดย 3 models แรกคือ zero-, one-, และ two equation model ที่เหลือเป็น Reynolds stress model ผลที่คำนวณได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งเป็นค่าของ skin friction factor, รูปร่างความเร็วเฉลี่ย และ Reynolds stress พบว่าสำหรับการไหลที่มีการฉีด Reynolds stress model ทำนายค่าได้ใกล้เคียงผลการทดลองที่สุด ส่วน zero-equation model ให้ผลการทำนายที่ถูกต้องสำหรับการไหลที่มีการดูด

Jones และ Wille (1996) ทำการจำลองการฉีดของไหลเข้าไปในกระแสการไหล โดยใช้ large-eddy simulation (LES) ร่วมกับ artificial inflow และเงื่อนไขขอบเขตบริเวณผนัง และมีการใช้ mesh adapted เพื่อเพิ่มการกระจายชั้นแรงเฉือนของลำของไหล ผลจากการจำลองมีการเปรียบเทียบกับระหว่าง standard Smagorinsky-Lilly model, a one-equation model และ a dynamic model พบว่ามีความสอดคล้องเป็นอย่างดีระหว่างผลการทำนายกับผลการทำนายที่ทำมาก่อนโดย Chen และ Hwang (1991) Sano (1999) ทำการทดลองเพื่อศึกษาการไหลภายในช่องที่มีการฉีดของไหลผ่านช่องฉีดด้านข้างของช่องการไหล การศึกษากระทำโดยวัดค่าความดันสถิตย์ที่ผนัง (wall static pressure), รูปร่างความเร็วเฉลี่ย, ความเข้มข้นของความปั่นป่วน (turbulent intensities) และ Reynolds stresses จากผลการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยการไหลและความปั่นป่วนในช่องการไหลถูกควบคุมโดยอัตราการฉีด (อัตราการไหลของการฉีดต่ออัตราการไหลเข้าที่ช่องการไหล) และยังพบว่าไม่ขึ้นกับความเร็วของการฉีด

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฉีดของไหลทำมุมเอียงกับกระแสการไหล

Platten และ Keffer (1971) ทำการทดลองโดยการฉีดของไหลทำมุมเอียงกับกระแสการไหล ที่ใช้ค่า  $\theta$  จาก 45 ถึง 135 องศา โดยมีการเพิ่มมุมทีละ 15 องศา ค่า  $\theta$  เป็นมุมระหว่างแนวการฉีดของไหลกับกระแสการไหล ต่อมา Sucec และ Bowley (1976) ได้นำเสนอการทำนายแนววิถีของของไหลที่ฉีดเข้าในกระแสการไหลในมุมต่างๆโดยวิธีกึ่งวิเคราะห์ (semianalytical) ซึ่งผลที่ได้ก็สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง ที่อยู่ในช่วงของอัตราส่วนความเร็วของของไหลที่ฉีดต่อปริมาณการไหลหลักตั้งแต่ 2 ถึง 8

Lee *et. al.* (1994) ได้ทำการทดลองโดยการฉีดของไหลทำมุม 35 องศากับกระแสการไหลแบบปั่นป่วนที่ไหลบนแผ่นราบ โดยใช้ five-hole directional probe ในการวัดค่าสนามการไหลสำหรับอัตราส่วนความเร็ว 1.0 และ 2.0 จากการใช้ visualization แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนมุมฉีดที่ผลต่อลักษณะการไหลอย่างเห็นได้ชัด

Kohli และ Bogard (1997) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของการระบายความร้อนและสนามความเร็วในการฉีดของไหลผ่านช่องที่เรียงเป็นแถวโดยทำมุม 55 องศากับกระแสการไหลอิสระ (free stream) โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความหนาแน่นของของไหลที่ฉีดต่อกระแสการไหลอิสระเท่ากับ 1.6 ผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับกรณีฉีดทำมุม 35 องศา พบว่าถ้าฉีดด้วยอัตราส่วนโมเมนต์ดัมพ์ที่ต่ำ การลดลงของ effectiveness ที่บริเวณกึ่งกลางมีเพียงเล็กน้อย ขณะที่การลดลงของ effectiveness จะมาก ในกรณีฉีดด้วยอัตราส่วนโมเมนต์ดัมพ์ที่สูง นอกจากนี้ยังวัดค่าสนามความร้อนและความเร็วเฉลี่ยและความปั่นป่วนอีกด้วย

Berger และ Liburdy (1998) ทำการวิเคราะห์ผลของรูปร่างช่องฉีดและมุมของการฉีดสำหรับแถวของช่องฉีดที่เรียงทำมุม 35 องศา ความเร็วในแนวด้านข้างและแนวตั้งวัดโดย Particle Image Velocimety (PIV) และแสดงการแทรกซึมและการกระจายของการฉีดของไหลโดยการกระจายของอนุภาค seed ที่ป้อนเข้าไปในกระแสการไหล จากการศึกษาแสดงให้เห็นการลดโครงสร้างจาก counter-rotating vortex pair ไปเป็น single vortex เมื่อมุมการฉีดเพิ่มขึ้น

Liou *et. al.* (1999) ทำการศึกษาผลของมุมและอัตราการไหลของการฉีดของไหลต่ออัตราการไหลที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced) ที่ปลายทางเข้าของช่องการไหล โดยที่ของไหลในช่องการไหลในตอนเริ่มต้นไม่ได้ไหลอยู่ก่อน มุมที่ใช้ในการทดลองมี 3 มุมด้วยกันคือ 30, 45 และ 60 องศา ส่วนอัตราการไหลของการฉีดอยู่ในช่วง 1000 ถึง 5000 L/min โดยทำการวัดค่าต่างๆด้วย Laser Doppler velocimety (LDV) จากผลการทดลองพบว่า อัตราการไหลเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของการฉีดและอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเหนี่ยวนำต่ออัตราการไหลฉีดลดลงเมื่อเพิ่มมุมการฉีด นอกจากนี้ยังมีการทำ visualization และการทำนายเชิงตัวเลขโดยใช้ algebraic Reynolds stress model (ASM) ซึ่งค่าที่ได้จากการทำนายจะน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฉีดของไหลในแนวสัมผัสด้านข้างกับกระแสการไหล

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการปรับปรุงเตาฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed combustor) เรียกว่า vortexing fluidized bed combustor (VFBC) สำหรับใช้เป็นหม้อผลิตไอน้ำ (boiler) ขนาดเล็กหรือขนาดกลางและเตาเผาขยะ หลักการของ VFBC นำเสนอโดย Sowards (1978) ซึ่งประกอบไปด้วยระบบที่สร้าง vortex โดยการฉีดอากาศทุติยภูมิ (secondary air) ในแนวสัมผัสกับตัวเตาไปยัง freeboard เทคนิคดังกล่าวได้ช่วยเพิ่ม residence time ของอนุภาคเชื้อเพลิงใน freeboard และลดการสูญเสียของอนุภาคละเอียดที่หลุดลอยออกไปจากเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nieh และ Yang (1986) นำเสนอ vortex combustor (VC) โดยใช้ระนาบของหัวฉีด 1 ถึง 3 ระนาบ ซึ่งในแต่ละระนาบมีหัวฉีด 4 ตัว สำหรับฉีดอากาศทุติยภูมิ นอกจากนี้ยังใช้ new version of algebraic Reynold stress model (ASM) ในการจำลองลักษณะความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในเตา ผลการคำนวณแสดงให้เห็นถึงลักษณะทางพลศาสตร์ของ VC ในแง่ของการหมุนวนอย่างแรง (strong swirling), developing, recirculating และการไหลปั่นป่วนแบบ nonisotropic

ผลของอากาศทุติยภูมิ (secondary air) ที่ฉีดเข้าด้านข้างต่อ swirling intensity และอัตราการหลุดลอย (elutriation rate) จากเตาของอนุภาค ได้ถูกพิจารณาด้วย cold model โดย Chyang และ Hsu (1990) ในการศึกษาพบว่าอัตราการหลุดลอยลดลงเมื่อความเร็วของ secondary air เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ชั้นของกลุ่มก้อนอนุภาคเสถียรที่สร้างโดยการไหลแบบหมุนวน (swirling flow) จะพบได้ในบริเวณ freeboard การเกิดขึ้นของชั้นเหล่านี้สามารถช่วยยืด residence time ของเชื้อเพลิงและอนุภาคหินปูน (limestone) สำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นและลดการหลุดลอยของอนุภาค ดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้นและการปล่อยมลพิษที่ลดต่ำลงสามารถมีได้ภายใต้การออกแบบเตาที่เหมาะสม

ลักษณะ โครงสร้างของการไหลแบบหมุนวนที่สร้างโดยเทคนิค VFBC แสดงโดยความเร็วของ gas-solid slip ที่สูง, strong turbulence intensity และ การหมุนวนของวัตถุภายในเตา ซึ่งในลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น, ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูง, ประสิทธิภาพของ desulfurization ที่สูง และการปล่อยมลพิษที่ลดต่ำลง

Lin *et. al.* (1998) ทำการศึกษาสนามการไหลภายใน vortexing fluidized bed combustor (VFBC) โดยวัดค่าความเร็วต่างๆที่กระจายภายในเตาด้วย 5-hole Pitot tube เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของอัตราการไหลอากาศปฐมภูมิต่ออากาศทุติยภูมิ, ความเร็วของของไหลที่ฉีดในแนวสัมผัส และ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ imaginary circle และยังทำการจำลองการไหลแบบ 3 มิติ โดยใช้  $k - \epsilon$  model พบว่าค่าที่ได้จากการทำนายสอดคล้องกับผลการทดลองได้อย่างน่าพอใจ

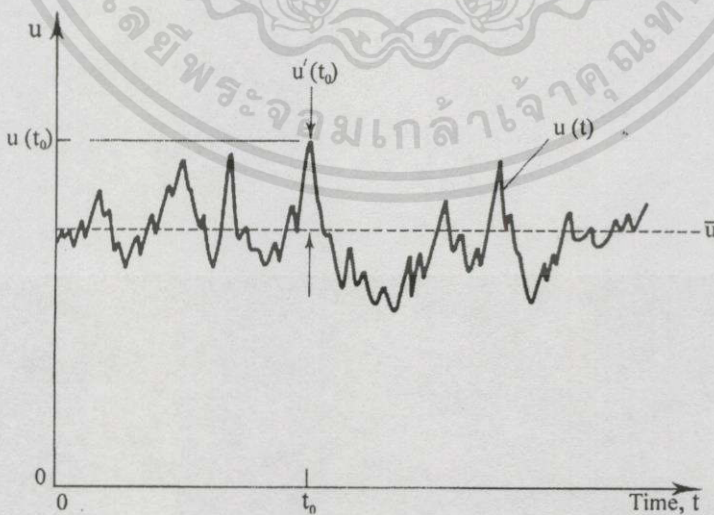
# บทที่ 3

## ทฤษฎี

### 3.1 บทนำ

การไหลที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flows) มากกว่าที่จะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flows) ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรจึงมีความสนใจที่จะศึกษาลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนตลอดมา การศึกษาในระยะเริ่มแรกอาศัยการสร้างแบบจำลองแล้วทำการทดสอบ หรือไม่ก็อาศัยการวิเคราะห์ทางทฤษฎีซึ่งใช้ได้กับปัญหาย่อยๆ เท่านั้น ต่อมาจึงได้มีความพยายามทำการวิเคราะห์การไหลดังกล่าวโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแต่ในอดีตมีข้อจำกัดของเครื่องมือในการคำนวณจึงไม่ค่อยได้รับความสนใจ ในช่วงหลายสิบกว่าปีที่ผ่านมามีการพัฒนาของคอมพิวเตอร์เป็นไปอย่างรวดเร็วทำให้การคำนวณเชิงตัวเลขมีความเป็นไปได้ นักวิทยาศาสตร์จึงเริ่มใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขมากขึ้น

โดยปรกติแล้วในการไหลปั่นป่วนนั้น มีผลทำให้คุณสมบัติต่างๆ สั่นแบบไม่แน่นอนและขึ้นกับเวลา (unsteady) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ทำให้ยากต่อการหาคำตอบ ฉะนั้นจึงคิดว่าคุณสมบัติต่างๆ ที่สนใจนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (Reynolds decomposition) คือ ส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยที่ไม่ขึ้นกับเวลา  $\bar{u}$  กับส่วนที่แทนผลของการสั่นที่ขึ้นกับเวลา  $u'$  ซึ่งทั่วไปแล้วในการคำนวณทำได้โดยแบ่งค่าคุณสมบัติทั้งหมดที่สนใจออกเป็นค่าเฉลี่ย ( $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}, \text{etc.}$ ) และส่วนที่แทนผลของการสั่น ( $u', v', w', p', \text{etc.}$ )



รูปที่ 3.1 ลักษณะของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน

### 3.2 สมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ในวิชานี้ได้ทำการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน โดยมีสมมุติฐานว่า การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้, มีความหนืด และเป็นกรไหลแบบคงที่ ซึ่งจากสมมุติฐานทั้งหมดมีสมการที่เกี่ยวข้องคือ 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  $\sigma_{ij}$  เป็น deviatoric part ของ viscous stress tensor และหาได้จากความสัมพันธ์ของของไหลแบบ newtonian ซึ่งมีค่าเป็น

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

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

จาก Reynolds decomposition ทุกค่าตัวแปรในการไหลสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยและส่วนที่แทนผลของการสั่น

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

จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaging) เป็น

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

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaging) ส่วนที่แทนผลของการสั่นนั้นมีค่าเป็นศูนย์ ( $\overline{f'} = 0$ ) และการทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaging) ของผลคูณสองตัวแปรมีค่าเป็น

$$\overline{fg} = \overline{f} \overline{g} + \overline{f'g'}$$

### 3.3 สมการการไหลแบบปั่นป่วน

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

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

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

สมการ (3.4) และ (3.5) เรียกว่า สมการ Reynolds-averaged Navier-Stokes equation (RANS) ซึ่งสมการที่ (3.5) นี้มีรูปสมการเหมือนกับสมการที่ (3.2) ยกเว้นเพียงเทอม second-moment หรือ correlation tensor ( $\tau_{ij} \equiv \overline{u'_i u'_j}$ ) ที่เพิ่มขึ้นมาเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนทำให้สมการนี้ไม่สามารถหาคำตอบได้เมื่อ  $\tau_{ij}$  ยังไม่ทราบค่า

### 3.4 แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Models)

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

- 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)
- 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  $\tau_{ij}$  คือ การสร้างสมการเพื่อหาของ  $\tau_{ij}$  โดยตรง ซึ่งจุดเริ่มต้นในการสร้าง second moment หรือ Reynolds stress transport equation คือ fluctuating momentum equation ซึ่ง

หาได้จาก การนำสมการ (3.2) ที่ทำ Reynolds decomposition (3.3) ลงกับสมการ (3.5) แล้วได้ fluctuating momentum equation ของ  $u'_i$

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

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

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

จะได้ transport equation เป็น

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

โดยที่เทอมด้านขวามือของสมการ (3.8) แทนอัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $\tau_{ij}$  ที่เกิดจาก turbulent production  $\bar{P}_{ij}$ , pressure-strain rate correlation  $\Pi_{ij}$ , turbulent diffusion  $\bar{D}'_{ijk}$ , turbulent dissipation rate  $\varepsilon_{ij}$  และ molecular diffusion ซึ่งเทอมเหล่านี้มีค่าเป็น

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

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

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

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

สมการเหล่านี้แทนส่วนประกอบ tensor ที่เป็นอิสระต่อกันใน 6 ทิศทาง ซึ่งอยู่ใน Reynolds stress transport equation และพบว่า  $\Pi_{ij}$ ,  $\bar{D}'_{ijk}$  และ  $\varepsilon_{ij}$  ไม่สามารถหาค่าได้โดยตรง จำเป็นต้อง model เทอมเหล่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 The Standard $k - \varepsilon$ Model

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

#### 3.4.2.1 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)

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - 2\nu_T \bar{S}_{ij} \quad (3.9)$$

เมื่อ  $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} (\partial \bar{u}_i / \partial x_j + \partial \bar{u}_j / \partial x_i)$ ,  $\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$  = turbulent kinematic viscosity โดยที่  $C_\mu = 0.09$

#### 3.4.2.2 สมการ Turbulent Kinetic Energy ( $k$ )

Turbulent kinetic energy ( $k$ ) คือ พลังงานจลน์ต่อหน่วยมวลของ turbulent fluctuation ซึ่งหาได้จาก

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.10)$$

จากสมการ (3.8) สามารถใช้หา transport equation ของ turbulent kinetic energy ( $k$ ) ได้ โดยกำหนดให้  $i = j$  ในสมการ (3.8) จากนั้นคูณด้วย  $1/2$  ทำให้สอดคล้องกับสมการ (3.10) ได้ (Gaski, 1996)

$$\bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \bar{P} + \frac{\partial \bar{D}_j'}{\partial x_j} - \varepsilon + \nu \frac{\partial^2 k}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3.11)$$

เมื่อด้านขวามือของสมการ (3.11) แทนอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งใดๆของ  $k$  ซึ่งประกอบด้วยเทอม turbulent production term  $\bar{P} \equiv \bar{P}_{ii} / 2$ , เทอม turbulent diffusion  $\bar{D}_j' \equiv \bar{D}'_{jk} / 2$ , เทอมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

isotropic turbulent dissipation rate  $\varepsilon \equiv \varepsilon_{ij} / 2$  และ เทอม viscous diffusion ตามลำดับ ซึ่งเทอมเหล่านี้มีค่าเป็น

$$\bar{P} = -\tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (3.12 ก)$$

$$\bar{D}'_j = -\left[ \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i u'_j} + \frac{p' u'_i}{\rho} \delta_{ij} \right] \quad (3.12 ข)$$

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \quad (3.12 ค)$$

โดยค่า  $\bar{D}'_j$  และ  $\varepsilon$  นั้นไม่สามารถหาค่าได้จำเป็นต้องใช้แบบจำลอง

3.4.2.2.1 แบบจำลองของ The Turbulent Diffusion Term บนสมการ  $k$  จากสมการ (3.12 ข) the turbulent diffusion ( $\bar{D}'_j$ ) ถูกจำลองเป็น (Gaski, 1996)

$$\bar{D}'_j = \frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (3.12 ง)$$

เมื่อ  $\sigma_k = 1.0$

3.4.2.2.2 แบบจำลองของ The Isotropic Turbulent Dissipation Rate Term บนสมการ  $k$

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

### 3.4.2.3 สมการ Dissipation Rate ( $\varepsilon$ )

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

$$\overline{2\nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial (\nabla u'_i)}{\partial x_j}} = 0 \quad (3.13)$$

ได้เป็น

$$\bar{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \bar{P}_\varepsilon - \Phi_\varepsilon + \bar{D}_\varepsilon + \nu \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_i \partial x_i} \quad (3.14)$$

เมื่อด้านขวามือของสมการ (3.14) แทนอัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $\varepsilon$  โดยประกอบด้วย the production term  $\bar{P}_\varepsilon$ , destruction term  $\Phi_\varepsilon$ , turbulent diffusion term  $\bar{D}_\varepsilon$  และ viscous diffusion term ตามลำดับ ซึ่งเทอมเหล่านี้มีค่าเป็น

$$\bar{P}_\varepsilon = -2\nu \frac{\partial u'_k}{\partial x_i} \frac{\partial u'_k}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - 2\nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (3.15 ก)$$

$$-2\nu \frac{\partial u'_k}{\partial x_i} \frac{\partial u'_k}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} - 2\nu u'_k \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_k}$$

$$\Phi_\varepsilon = 2\nu^2 \frac{\partial^2 u'_i}{\partial x_j \partial x_k} \frac{\partial^2 u'_i}{\partial x_j \partial x_k} \quad (3.15 ข)$$

$$\bar{D}_\varepsilon = -2\nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial p'}{\partial x_i} \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) - \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( u'_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \quad (3.15 ค)$$

โดยเทอม  $\bar{P}_\varepsilon$ ,  $\Phi_\varepsilon$  และ  $\bar{D}_\varepsilon$  นั้นไม่สามารถหาค่าได้โดยตรงจำเป็นต้องทำการจำลอง

### 3.4.2.3.1 แบบจำลองของเทอมต่างๆ บนสมการ $\varepsilon$

จากแนวคิดของ isotropic dissipation rate สามารถจำลองเทอมต่างๆ ได้เป็น (Speziale, 1991; Gaski, 1996)

$$\bar{P}_\varepsilon = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (3.15 ง)$$

$$\Phi_\varepsilon = C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.15 จ)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{D}_\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \quad (3.15 \text{ ก})$$

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

### 3.4.3 Algebraic Stress Model (ASM)

Algebraic stress model (ASM) นั้น หาได้จากการใช้ Rodi's approximation (1976) โดยจะใช้สมการ (3.8) และ (3.11) เป็นผลให้ได้ (Gaski, 1996; Sloan *et al.*, 1986; Promvongse, 1998)

$$\bar{u}_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} - \frac{\partial \bar{D}'_{ijk}}{\partial x_k} - \nu \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_k \partial x_k} = \frac{\tau_{ij}}{k} \left( \bar{u}_k \frac{\partial k}{\partial x_k} - \frac{\partial \bar{D}'_k}{\partial x_k} - \nu \frac{\partial^2 k}{\partial x_k \partial x_k} \right) \quad (3.16)$$

จัดเทอมใหม่ได้

$$\bar{P}_{ij} + \Pi_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon - \psi A_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{k} (\bar{P} - \varepsilon) \quad (3.17)$$

เมื่อ  $A_{ij}$  เป็น convection quantity ที่เพิ่มขึ้นจาก Rodi's approximation และ  $\psi$  เป็นค่าคงที่ใดๆ ระหว่าง 0 ถึง 1 ในกรณีที่พิจารณาการไหลบนพิกัดฉากจะตัดเทอม  $A_{ij}$  ที่

$$A_{ij} = \begin{vmatrix} 0 & -\frac{u'w'}{r} \frac{\bar{w}}{r} & \frac{u'v'}{r} \frac{\bar{w}}{r} \\ -\frac{u'w'}{r} \frac{\bar{w}}{r} & -2\frac{v'w'}{r} \frac{\bar{w}}{r} & (v'v' - w'w') \frac{\bar{w}}{r} \\ \frac{u'v'}{r} \frac{\bar{w}}{r} & (v'v' - w'w') \frac{\bar{w}}{r} & 2\frac{v'w'}{r} \frac{\bar{w}}{r} \end{vmatrix} \quad (3.18)$$

ดังนั้น

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

หรือ

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k + \frac{\lambda k}{\varepsilon} \left( \bar{P}_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{P} - \beta A_{ij} \right) \quad (3.20)$$

โดยที่  $\lambda$  และ  $\beta$  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	$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j}$
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  $\bar{P} = -\tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ ,  $\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,

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

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

## บทที่ 4

# การประยุกต์วิธีการปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method)

### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการหาคำตอบของระบบสมการที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลแบบปั่นป่วนที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 3 โดยสมการทั้งหมดอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง (second order), ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) และมีสัมพันธ์กัน (coupled) อย่างสลับซับซ้อนโดยที่ไม่สามารถหาคำตอบได้โดยวิธีตรง วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการหาคำตอบ วิธีการปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume method) เป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้รับความนิยมในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับของไหล โดยวิธีการปริมาตรสืบเนื่อง จะทำการจัดรูปสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิตบนจุดต่างๆบนปริมาตรควบคุม (control volume) และทำการกำหนดค่าขอบเขต แล้วจึงใช้วิธีการทำซ้ำเพื่อหาคำตอบ

### 4.2 วิธีการปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method)

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

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

โดยที่  $\Gamma_\phi$  เป็น diffusion coefficient ของตัวแปร  $\phi$

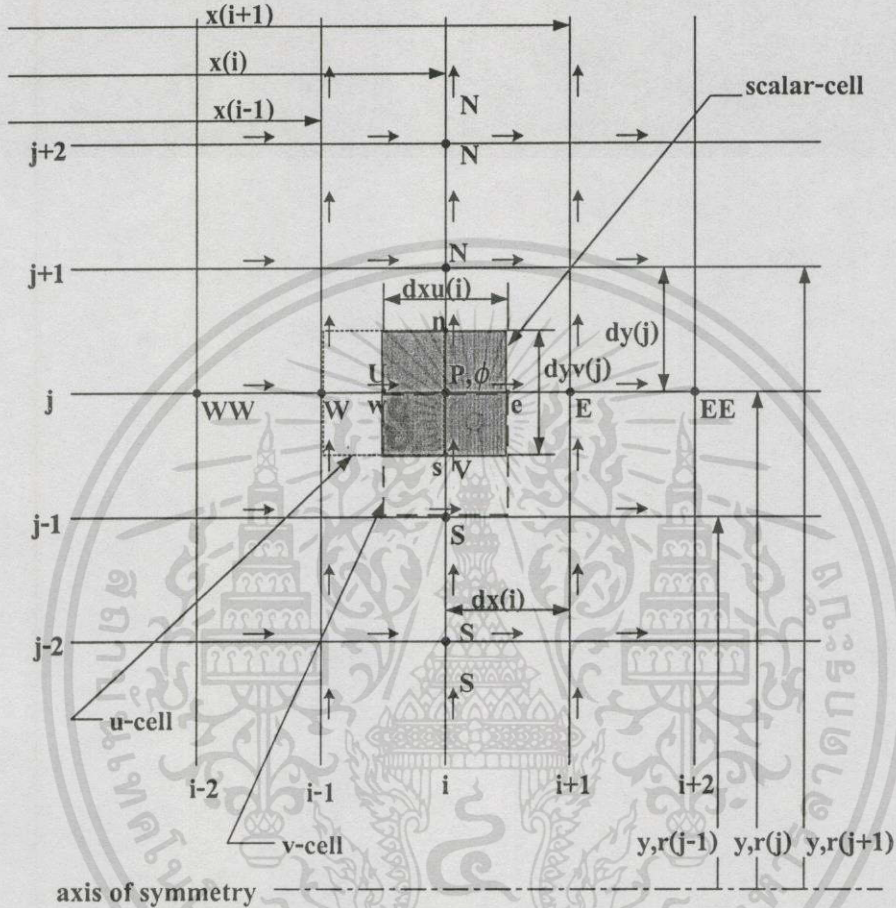
ในที่นี้การใช้วิธีการปริมาตรสืบเนื่อง นั้นเริ่มต้นด้วยการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ตลอดทั้งปริมาตรควบคุม แล้วทำการ discretise ลงบนจุดต่อต่างๆบนปริมาตรควบคุมดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงภาพของปริมาตรควบคุมแบบ staggered grid

Staggered grid เป็นลักษณะการวางตำแหน่งของจุดต่อ (node) ของความเร็วให้อยู่กึ่งกลางระหว่างจุดต่อสเกลลาร์ เพื่อให้สอดคล้องกับสมการต่อเนื่อง (continuity equation) ซึ่งถูกคิดขึ้นโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Patankar (1980) โดยคิดขึ้นเพื่อแก้ปัญหาการเกิด checker-board ซึ่งจะก่อให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณเชิงตัวเลข นอกจากการ discretise สมการลงบนจุดต่อแล้ว เนื่องจากสมการในปัญหามีหลายสมการ ฉะนั้นในแก้งจึงต้องทำโดยใช้ Semi-Implicit-Method for Pressure-Linked Equation (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  $\phi$  ได้เป็น

$$C = C_e \phi_e - C_w \phi_w + C_n \phi_n - C_s \phi_s \tag{4.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ convection flux คือ

$$C_e = \rho_e u_e A_e$$

$$C_w = \rho_w u_w A_w$$

$$C_n = \rho_n v_n A_n$$

$$C_s = \rho_s v_s A_s$$

และ  $\phi_e, \phi_w, \phi_n$  และ  $\phi_s$  เป็นค่าของ  $\phi$  ที่ผนังของเซลล์ ซึ่งหาได้โดยการประมาณที่เหมาะสม การประมาณค่า  $\phi$  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  $\phi$  ที่ตำแหน่งผิวของปริมาตรควบคุมใดๆ โดยใช้ค่าที่ตำแหน่ง upstream ที่อยู่ข้างเคียง โดยยกตัวอย่างเฉพาะที่ตำแหน่ง e เท่านั้น คือ

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

ที่ตำแหน่งอื่นๆก็ทำในทำนองเดียวกัน

#### 4.3.1.2 Hybrid Scheme

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่า  $Pe$  เป็นค่า Peclet number ซึ่งเป็นสัดส่วนของ convection flux ต่อ diffusion flux ของ  $\phi$  ในปริมาตรควบคุม

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

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

#### 4.3.1.3 Second Order Upwind Scheme (SOU)

ค่า  $\phi$  ในวิธีนี้หาได้จากการประมาณแบบเชิงเส้นที่ upstream โดยใช้ 2 จุด โดยขึ้นอยู่กับค่า  $C_e$ ,  $\phi_e$  สามารถประมาณได้เป็น

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

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 จุด ในการประมาณค่า  $\phi$  ที่ตำแหน่งผิวของปริมาตรควบคุม โดยในการประมาณค่า  $\phi$  ขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ  $C_e$  ว่าเป็นลบหรือบวก ยกตัวอย่างเช่น  $\phi_e$  ประมาณได้เป็น

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

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  $\phi$  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  $dx, dy$  เป็นระยะระหว่างจุดต่อ บนแกน  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ

### 4.3.3 Source Term

ทำโดยอินทิเกรต source term ในปริมาตรควบคุมได้เป็น

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

เมื่อ  $V$  เป็นปริมาตรและ  $S_\phi$  สามารถแยกเป็น 2 ส่วนได้เป็น

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

ที่ซึ่ง  $S_P$  มีค่าเป็นลบ

#### 4.4 รูปแบบมาตรฐานของสมการที่ discretised แล้ว

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (4.1) เมื่อทำ discretised ทุกๆเทอม ทั้ง convection, diffusion และ source terms แล้วจัดรูปได้เป็น

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + S_C \quad (4.11 \text{ ก})$$

โดยที่

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S - S_P \quad (4.11 \text{ ข})$$

และ  $a$  เป็นสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการรวมผล convection และ diffusion fluxes ที่ผิวของปริมาตรควบคุม

สัมประสิทธิ์  $a$  ของ upwind scheme มีค่าเป็น

$$a_E = \max(-C_e, 0) + D_e \quad (4.12 \text{ ก})$$

$$a_W = \max(C_w, 0) + D_w \quad (4.12 \text{ ข})$$

$$a_N = \max(-C_n, 0) + D_n \quad (4.12 \text{ ค})$$

$$a_S = \max(C_s, 0) + D_s \quad (4.12 \text{ ง})$$

สัมประสิทธิ์  $a$  ของ hybrid scheme คือ

$$a_E = \max[-C_e, (D_e - C_e/2), 0] \quad (4.13 \text{ ก})$$

$$a_W = \max[C_w, (D_w + C_w/2), 0] \quad (4.13 \text{ ข})$$

$$a_N = \max[-C_n, (D_n - C_n/2), 0] \quad (4.13 \text{ ค})$$

$$a_S = \max[C_s, (D_s + C_s/2), 0] \quad (4.13 \text{ ง})$$

สำหรับ QUICK และ SOU scheme นั้น มีสัมประสิทธิ์  $a$  เหมือนกับ upwind scheme แต่เทอมที่

เหลือได้ถูกรวมไว้ใน source term

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

จากเนื้อหาที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นได้กล่าวถึง วิธีการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ไปแล้ว แต่สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการแก้ปัญหาของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ คือ boundary conditions ซึ่งเป็นสิ่งที่ใช้ชี้ลักษณะของปัญหาและที่สำคัญที่สุด คือ ถ้าหากว่า boundary conditions ผิดจะทำให้คำตอบที่ได้นั้นผิดไปด้วย

### 4.5.1 เงื่อนไขที่ทางเข้า (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
$\varepsilon$	$C_\mu^{3/2} \frac{k^{3/2}}{\ell}$	$\ell = 0.03L$ $L = \text{characteristic length } (\frac{d}{2})$

### 4.5.2 เงื่อนไขที่ทางออก (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 เงื่อนไขที่แกนสมมาตร (Axisymmetry conditions)

สำหรับเงื่อนไขที่แกนสมมาตร ทุกๆตัวแปรได้ถูกกำหนดให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (zero gradient) หรือ กำหนดให้เป็นศูนย์

#### 4.5.4 เงื่อนไขที่ผนัง (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
- 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  $u_\tau$  คือ friction velocity เป็น

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

ที่ซึ่ง  $\tau_w$  เป็นค่า wall shear stress โดยในบริเวณ boundary layer ถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

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

จากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น เงื่อนไขที่ขอบผนังสำหรับสมการโมเมนตัมทำให้ได้ค่า  $\tau_w$  ดังนี้

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

โดยที่  $\kappa$  เป็น Von Karman constant เท่ากับ 0.4 และ  $E$  เป็นค่า friction ของความขรุขระของผิว 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 ที่บริเวณใกล้ผนังมีค่าเท่ากับ

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

#### 4.6 กระบวนการหาคำตอบ (Solution Procedure)

การแก้สมการพีชคณิต (4.11) เพื่อหาค่าตัวแปรที่สนใจนั้น ทำได้โดยใช้ tri-diagonal matrix algorithm (TDMA) แต่เนื่องจากการหาความเร็วในนั้นไม่ว่า  $u, v$  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 จากนั้นใช้วิธีการทำซ้ำจนกว่าคำตอบจะเข้า

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  $x$

$$A_i = a_E$$

$$B_i = a_w$$

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

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

จากกระบวนการทำซ้ำโดยแทนไปข้างหน้าแล้วจัดรูปได้

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

ที่ซึ่ง  $A'_i$  และ  $C'_i$  ได้จากการจัดจากระบวนการทำซ้ำโดยแทนไปข้างหน้า

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

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

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

#### 4.6.2 The SIMPLE Algorithm

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

จากการ discretise สมการโมเมนตัมของ  $u$  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

$$u_w = u_w^* + d_w (p'_w - p'_p) \quad (4.25)$$

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

ในทำนองเดียวกันที่ผิวอื่นของปริมาตรควบคุมสามารถเขียนได้เป็น

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

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

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

สำหรับสมการโมเมนต์ของ  $v$  นั้นสามารถหาได้เช่นเดียวกับสมการโมเมนต์ของ  $u$

สมการ pressure-correction นั้นหาได้จากสมการอนุรักษ์มวล (continuity equation) โดยการแทนสมการ velocity-correction ลงไปแล้วจัดรูปใหม่ได้เป็น

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

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 ในบางครั้งมีการทำ under-relaxation ซึ่งได้เป็น

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

โดยที่  $\alpha_p$  เป็นค่า under-relaxation 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  $\epsilon$
7. กำหนดให้ค่า  $p$  ในข้อ 3 เท่ากับค่า  $p^*$  แล้วจึงย้อนกลับไปทำข้อที่ 2 จนกว่าค่าตอบลู่เข้า

#### 4.7 สรุป

กระบวนการประยุกต์วิธีเชิงตัวเลขที่เรียกว่าวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) ในการแก้ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้การแบ่งปริมาตรควบคุมแบบ staggered grid ได้ถูกอธิบายในเนื้อหาของบทนี้ รวมทั้งการ discretise สมการควบคุม, numerical differencing scheme สำหรับ convection term, boundary conditions ต่างๆ และเทคนิคในการหาคำตอบที่มีพื้นฐานบน SIMPLE algorithm

ในบทถัดไปจะแสดงลักษณะของปัญหาและความสามารถของ turbulence models และ numerical differencing scheme ในการทำนายการไหลของปัญหาที่นำมาวิเคราะห์

## บทที่ 5

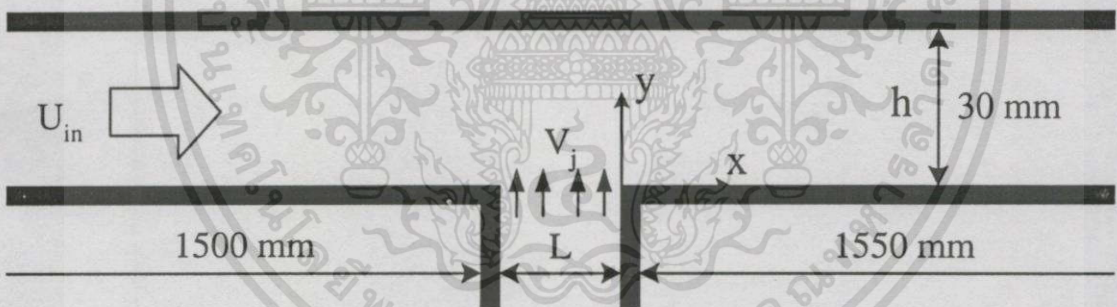
# การทำนายการไหลในช่องที่มีการฉีดด้านข้าง

### 5.1 บทนำ

ทฤษฎีและวิธีการเชิงตัวเลขนั้นได้ถูกแสดงในบทก่อนหน้า ในบทนี้นำเสนอผลการทำนายการไหลในช่องการไหลที่มีการฉีดของไหลด้านข้างของ Sano (1999) และ Liou *et. al.* (1999) โดยแสดงในหัวข้อตั้งแต่ 5.2-5.3 ตามลำดับ

### 5.2 การฉีดของไหลในแนวตั้งฉากกับช่องการไหลของ Sano (1999)

ปัญหาที่นำมาทำนายนี้ได้มาจากการทดลองของ Sano (1999) ซึ่งเป็นการทดลองโดยการฉีดของไหล (jet) ผ่านช่องฉีดไปยังช่องการไหล (channel flow) ที่มีกระแสการไหลแบบปั่นป่วนอย่างเต็มตัว (fully developed turbulent flow) ดังแสดงในรูปที่ 5.1 จากรูปความสูงของช่องการไหล ( $h$ ) เท่ากับ 30 mm โดยมีความยาวของผนังช่องการไหลจากปากทางเข้าไปยังช่องฉีดเท่ากับ 1500 mm และความยาวของผนังช่องการไหลจากช่องฉีดไปยังทางออกเท่ากับ 1550 mm



รูปที่ 5.1 ลักษณะช่องการไหลของ Sano (1999) และ computational domain

Sano (1999) ได้ทำการวัดการกระจายความเร็วภายในช่องการไหลและการกระจายความดันที่ผนังของช่องการไหลโดยใช้ hot-wire ในการวัด ซึ่งจากความละเอียดและความถูกต้องของผลที่ได้นี้ ถูกนำไปใช้เพื่อเปรียบเทียบในการทำนายการไหลนี้

ในการวิเคราะห์การไหลจะมีการเปลี่ยนอัตราการฉีด ( $Q_r$ ) (อัตราการไหลของการฉีดต่ออัตราการไหลของช่องการไหลที่ตำแหน่งทางเข้า) ในแต่ละความกว้างของช่องฉีด ( $L$ ) ดังแสดงในตารางที่ 5.1 โดยความเร็วของการฉีด ( $V_j$ ) หาได้จากความสัมพันธ์ของ  $Q_r$  ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$Q_r = \frac{V_j L}{U_{in} h}$$

ซึ่งค่า  $U_m$  ในการคำนวณจะกำหนดไว้คงที่เท่ากับ 10 m/s และมีเงื่อนไขในการคำนวณดังต่อไปนี้

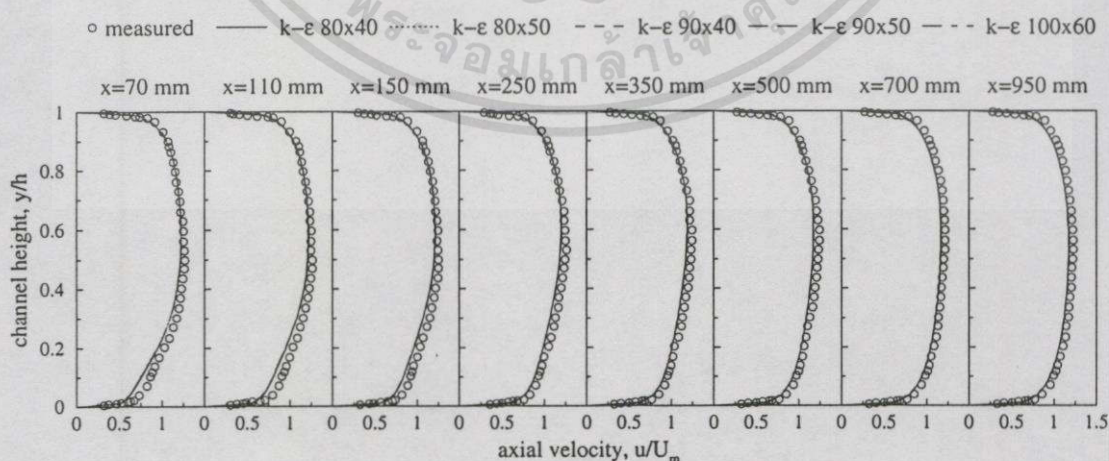
- ความเร็ว  $u$  และ  $v$  ตามผนังทั้งสองด้านมีค่าเป็นศูนย์และใช้ wall function ในการประมาณค่าตำแหน่งที่ใกล้กับผนัง
- ของไหลที่พิจารณาเป็นอากาศที่ 25 °C ซึ่งมีค่า  $\mu = 1.85 \times 10^{-5}$  Ns/m<sup>2</sup> และ  $\rho = 1.2$  kg/m<sup>3</sup>

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขในการคำนวณตามการทดลองของ Sano (1999)

L (mm)	$Q_r$
10	0.067, 0.133, 0.200
20	0.133

ในการทำนายการไหลนี้ได้เปรียบเทียบการใช้  $k-\epsilon$  model และ ASM รวมทั้งการใช้ numerical differencing scheme 4 แบบ คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ก็นำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ Sano (1999) ที่ตำแหน่ง  $x = 70, 110, 150, 250, 350, 500, 700$  และ 950 mm.

จากการศึกษาความเป็นอิสระของกริด (grid independent) ต่อผลการทำนาย ได้แสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นการกระจายของความเร็วตามแนวแกน ที่ทำการคำนวณโดย  $k-\epsilon$  model ซึ่งใช้จำนวนกริดเท่ากับ 80x40, 80x50, 90x40, 90x50 และ 100x60 โดยจากรูปที่ 5.2 นี้ สังเกตพบว่าจำนวนกริดทั้งหมดที่ทำการคำนวณไม่มีผลต่อความแม่นยำของปัญหา ทำให้สามารถสรุปได้ว่าจำนวนกริดที่ทำการคำนวณนี้ทุกๆค่าสามารถนำไปใช้ในการจำลองการไหลได้โดยไม่มีอิทธิพลเนื่องจากจำนวนกริดที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 5.2 ความเป็นอิสระของกริดต่อความเร็วตามแนวแกนที่ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model

## 5.2.1 ช่องการไหลที่มีการฉีดด้านข้าง กรณีช่องฉีดเท่ากับ 10 mm

### 5.2.1.1 การทำนายการไหลโดย $k-\epsilon$ model

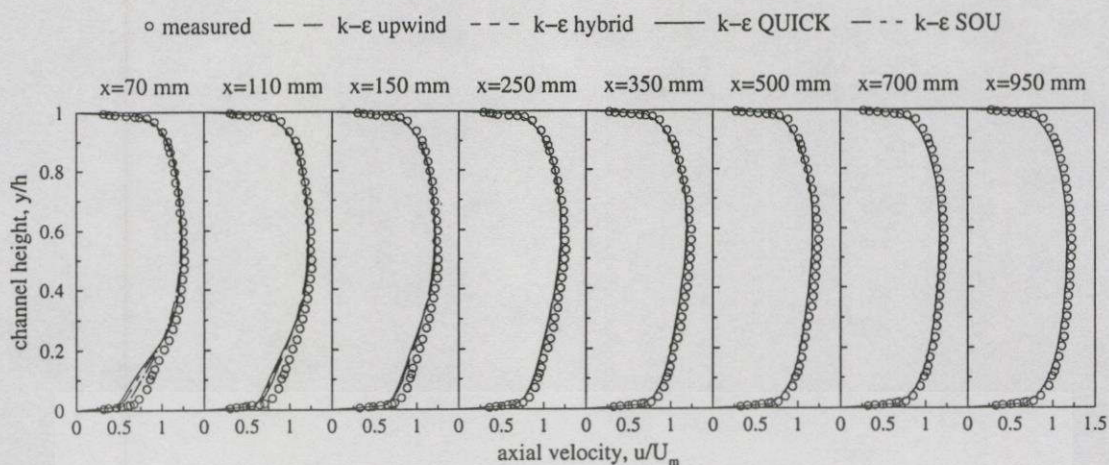
จากการจำลองการไหลโดย  $k-\epsilon$  model ร่วมกับ scheme ต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงในรูปของความเร็วตามแนวแกนที่เขียนในรูปตัวแปรไร้มิติ  $u/U_m$  ( $U_m$  เป็นความเร็วเฉลี่ยรวมในตำแหน่งหลังช่องฉีด) ที่ตำแหน่ง  $x = 70, 110, 150, 250, 350, 500, 700$  และ  $950$  mm ตามลำดับ

รูปที่ 5.3 เป็นรูปที่แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  ซึ่งทำการฉีดที่  $Q_r = 0.067$  จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ที่ตำแหน่ง  $x = 70$  mm ของทั้ง 4 schemes มีค่าที่ใกล้เคียงกันในช่วง  $y/h$  ประมาณ 0.25 ถึง 1.0 และพบความแตกต่างเล็กน้อยในช่วง  $y/h$  ประมาณ 0 ถึง 0.25 โดยที่ upwind และ hybrid schemes จะทำนายได้ดีกว่า QUICK และ SOU schemes ในช่วงดังกล่าว สรุปแล้วค่าที่คำนวณได้ที่ทั้ง 4 schemes มีความแตกต่างจากผลการทดลองบ้างเล็กน้อยในช่วงที่อยู่บริเวณใกล้กับผนังด้านล่าง ลักษณะดังกล่าวนี้ยังคงปรากฏต่อไปยังตำแหน่ง  $x = 110$  และ  $150$  mm เมื่อเลขตำแหน่งนี้ไป ค่าความเร็วเฉลี่ยทั้ง 4 schemes แทบจะไม่เห็นความแตกต่างกัน

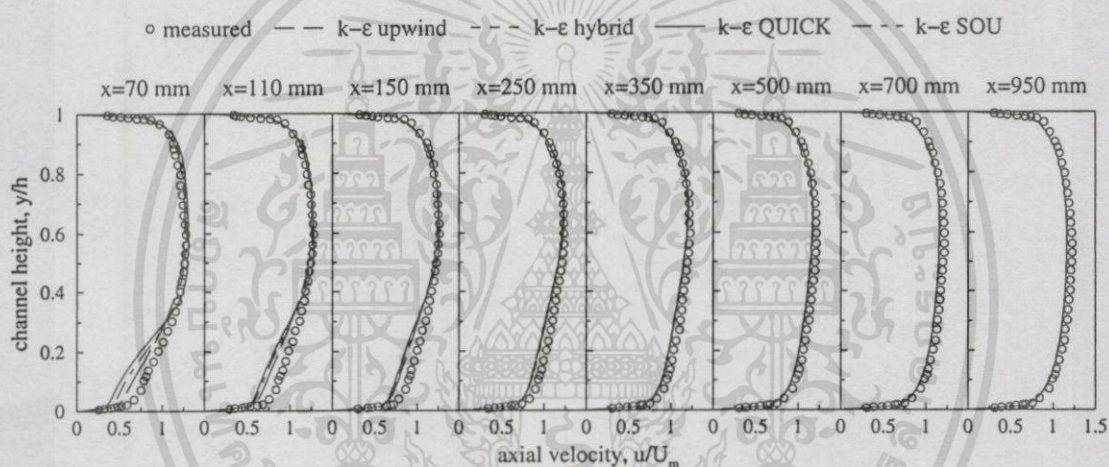
การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  ที่  $Q_r = 0.133$  แสดงในรูปที่ 5.4 จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ที่ตำแหน่ง  $x = 70$  mm ผลการคำนวณ โดย ทั้ง 4 schemes มีค่าที่ใกล้เคียงกว่าในช่วง  $y/h$  ประมาณ 0.3 ถึง 1.0 ส่วนที่ตำแหน่ง  $y/h$  ประมาณ 0 ถึง 0.3 upwind และ hybrid schemes มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า QUICK และ SOU schemes โดยค่าที่คำนวณได้ที่ทั้ง 4 schemes มีความแตกต่างจากผลการทดลองบ้าง ในช่วงที่อยู่บริเวณใกล้กับผนังด้านล่าง โดยเฉพาะบริเวณ  $x = 110$  และ  $150$  mm ซึ่งใกล้ช่องฉีด ส่วนตำแหน่งที่เหลือค่าไม่แตกต่างกันและมีค่าใกล้กับผลการทดลองอีกด้วย

รูปที่ 5.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  จากการฉีดที่  $Q_r = 0.2$  จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ที่ตำแหน่ง  $x = 70, 110$  และ  $150$  mm จะพบว่าค่าที่ได้จาก upwind และ hybrid schemes มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า QUICK และ SOU schemes โดยสังเกตได้อย่างชัดเจนในช่วง  $y/h$  ประมาณ 0 ถึง 0.3 โดยค่าทั้ง 4 schemes มีความแตกต่างจากผลการทดลองบ้างในบริเวณใกล้กับผนังด้านล่าง ลักษณะดังกล่าวนี้ยังแสดงให้เห็นในตำแหน่ง  $x = 110$  และ  $150$  mm เมื่อเลขตำแหน่งนี้ไปค่าความเร็วเฉลี่ยของทั้ง 4 schemes แทบจะไม่เห็นความแตกต่างกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลจากการทำนายของ  $Q_r$  ทั้ง 3 ค่า พบว่าเมื่อเพิ่มค่า  $Q_r$  ผลการคำนวณจะทำนายผิดพลาดมากขึ้น โดยเฉพาะในตำแหน่งใกล้กับช่องฉีด

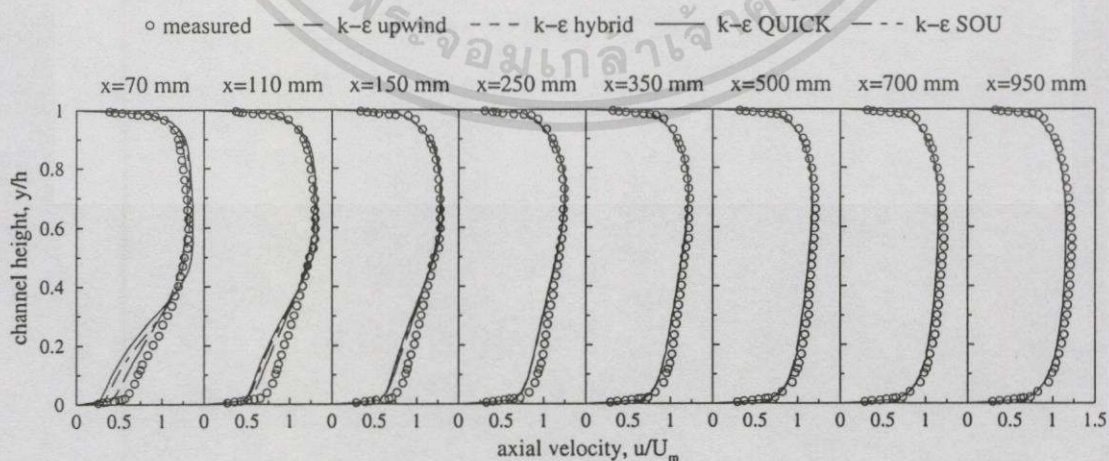
หลังจากการจำลองการไหลโดย  $k-\epsilon$  model ซึ่งทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ scheme ต่างๆ คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU schemes สรุปได้ว่า upwind และ hybrid schemes ที่เป็น first-order scheme ทำนายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า QUICK และ SOU schemes ซึ่งเป็น second-order scheme



รูปที่ 5.3 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี  $Q_r = 0.067$  ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model



รูปที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี  $Q_r = 0.133$  ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model



รูปที่ 5.5 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี  $Q_r = 0.200$  ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model

### 5.2.1.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress model (ASM)

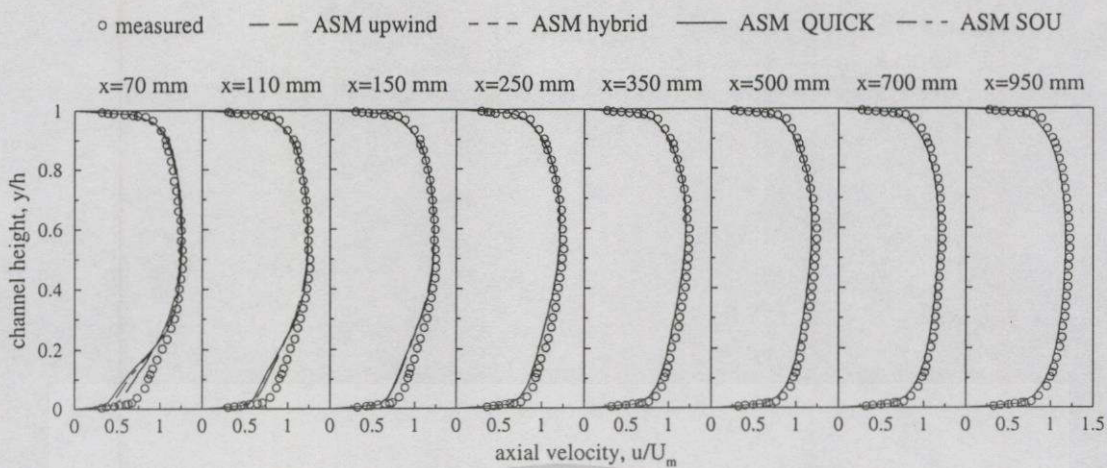
จากการจำลองการไหลโดย ASM ร่วมกับ upwind, hybrid, QUICK และ SOU schemes ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงในรูปของความเร็วตามแนวแกนที่เขียนในรูปตัวแปรไร้มิติ  $u/U_m$  ( $U_m$  เป็นความเร็วเฉลี่ยรวมในตำแหน่งหลังช่องฉีด) ที่ตำแหน่ง  $x = 70, 110, 150, 250, 350, 500, 700$  และ  $950$  mm ตามลำดับ

รูปที่ 5.6 เป็นรูปที่แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  ซึ่งทำการฉีดที่  $Q_r = 0.067$  จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ในตำแหน่ง  $x = 70$  mm ของทั้ง 4 schemes มีค่าที่ใกล้เคียงกันในช่วง  $y/h$  ประมาณ 0.2 ถึง 1.0 และพบความแตกต่างเล็กน้อยในช่วง  $y/h$  ประมาณ 0 ถึง 0.2 โดยที่ upwind และ hybrid schemes จะทำนายได้ดีกว่า QUICK และ SOU schemes ในช่วงดังกล่าว สรุปแล้วค่าที่คำนวณได้ทั้ง 4 schemes มีค่าแตกต่างจากผลการทดลองบ้างเล็กน้อยในช่วงที่อยู่บริเวณใกล้กับผนังด้านล่าง ลักษณะเช่นนี้ยังแสดงให้เห็นในตำแหน่ง  $x = 110$  และ  $150$  mm เมื่อเลยตำแหน่งนี้ไป ค่าความเร็วเฉลี่ยทั้ง 4 schemes แทบจะไม่เห็นความแตกต่างกัน

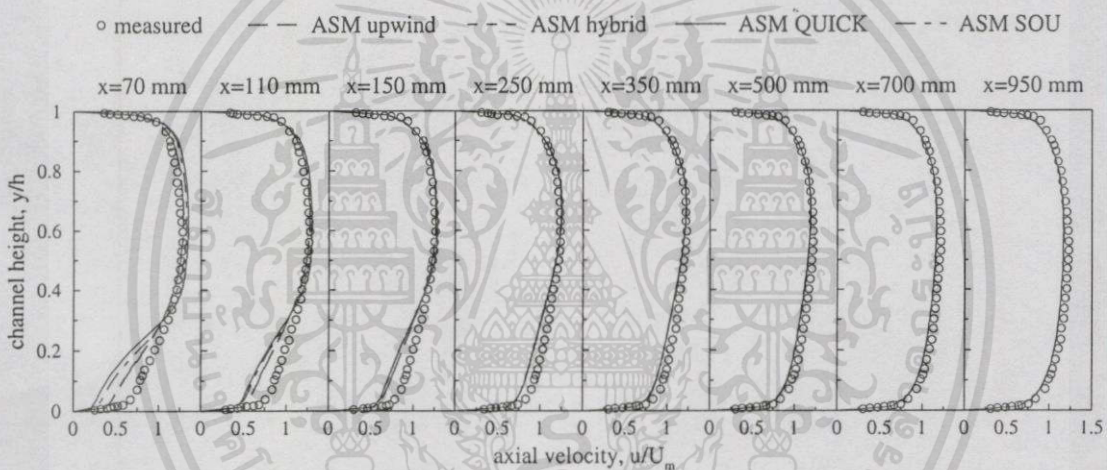
รูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  ที่  $Q_r = 0.133$  แสดงในรูปที่ 5.7 จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ในตำแหน่ง  $x = 70$  mm ผลการคำนวณโดย upwind และ hybrid schemes มีค่าที่ใกล้เคียงกันในช่วง  $y/h$  ประมาณ 0.3 ถึง 1.0 ส่วนที่ตำแหน่ง  $y/h$  ประมาณ 0 ถึง 0.3 upwind และ hybrid schemes มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า QUICK และ SOU schemes โดยค่าทั้งสี่ schemes มีความแตกต่างจากผลการทดลองบ้างในช่วงที่อยู่บริเวณใกล้กับผนังด้านล่างโดยเฉพาะบริเวณที่ใกล้ช่องฉีด

ในรูปที่ 5.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  ซึ่งได้จากการฉีดที่  $Q_r = 0.2$  จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ในตำแหน่ง  $x = 70, 110$  และ  $150$  mm นั้นค่าที่ได้จาก upwind และ hybrid schemes มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า QUICK และ SOU schemes โดยสังเกตได้อย่างชัดเจนในช่วง  $y/h$  ประมาณ 0.3 ถึง 1.0 ซึ่งค่าที่ได้จาก QUICK และ SOU schemes ทำนายเกิน (over predict) กว่าค่าจากผลการทดลอง และคำนวณได้ต่ำกว่า (under predict) ในช่วง  $y/h$  ประมาณ 0 ถึง 0.3 โดยค่าทั้ง 4 schemes มีความแตกต่างจากผลการทดลองบ้างในบริเวณใกล้กับผนังด้านล่าง ลักษณะเช่นนี้ยังแสดงให้เห็นในตำแหน่ง  $x = 110$  และ  $150$  mm เมื่อเลยตำแหน่งนี้ไปค่าความเร็วเฉลี่ยของทั้ง 4 schemes แทบจะไม่เห็นความแตกต่างกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลจากการทำนายของ  $Q_r$  ทั้ง 3 ค่า พบว่าเมื่อเพิ่มค่า  $Q_r$  ผลการคำนวณจะทำนายผิดพลาดมากขึ้น โดยเฉพาะในตำแหน่งใกล้กับช่องฉีด

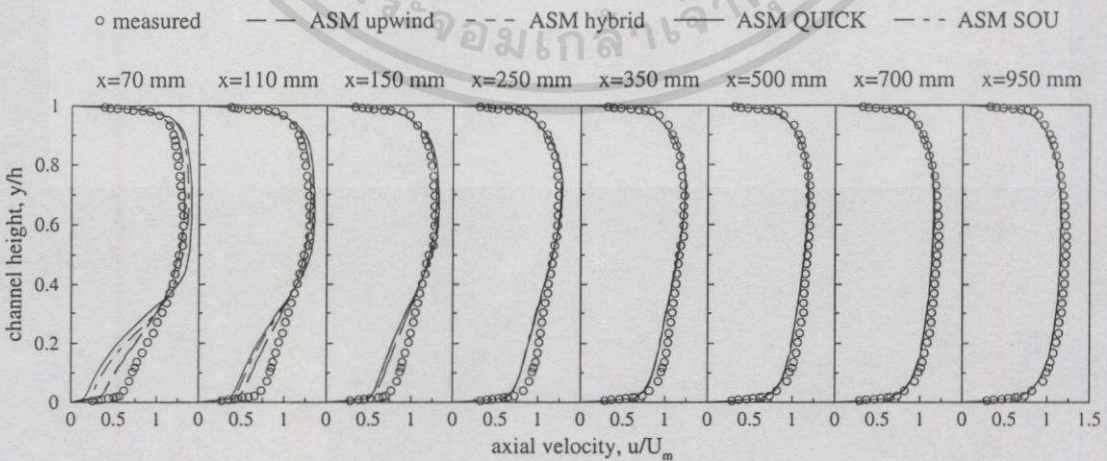
จากการจำลองการไหลโดย ASM ซึ่งทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ 4 schemes คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU schemes สรุปได้ว่า upwind และ hybrid schemes ทำนายได้ดีกว่า QUICK และ SOU schemes ซึ่งเหมือนกับผลการคำนวณที่ใช้  $k-\epsilon$  model



รูปที่ 5.6 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี  $Q_r = 0.067$  ทำนายโดย ASM



รูปที่ 5.7 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี  $Q_r = 0.133$  ทำนายโดย ASM



รูปที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี  $Q_r = 0.200$  ทำนายโดย ASM

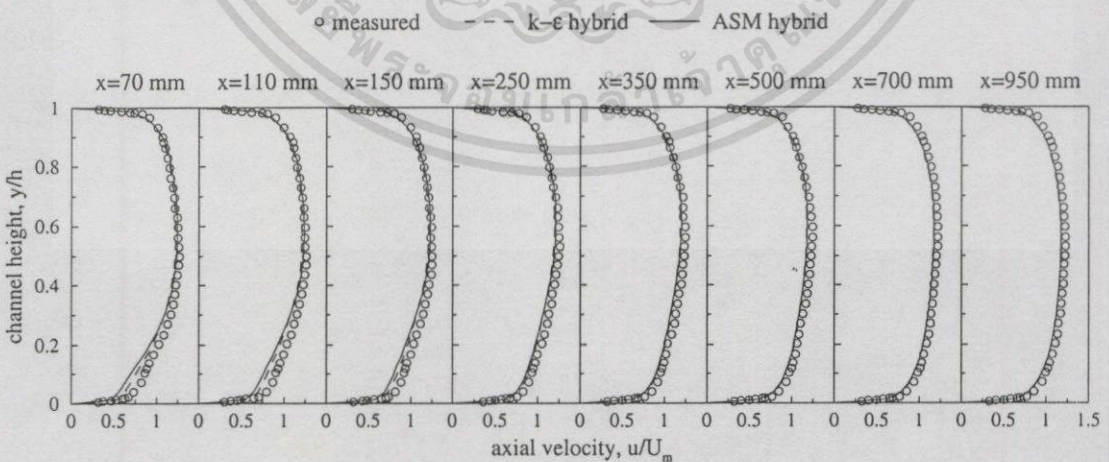
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.9 ถึง 5.11 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายระหว่าง  $k-\varepsilon$  model และ ASM ที่ใช้ hybrid scheme ของค่า  $Q_r = 0.067, 0.133$  และ  $0.2$  ตามลำดับ จากรูปที่ 5.9 จะเห็นว่า  $k-\varepsilon$  model ทำนายได้ใกล้เคียงกว่า ASM โดยเฉพาะตำแหน่ง  $x = 70, 110$  และ  $150$  mm ในบริเวณ  $y/h$  ประมาณ  $0$  ถึง  $0.25$  ส่วนในตำแหน่งที่เหลือค่าที่ทำนายได้จากทั้ง 2 models ไม่มีความแตกต่างกันและมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง รูปที่ 5.10 ก็มีลักษณะเดียวกับรูปที่ 5.9 แต่จะเห็นว่า model ทั้งสองทำนายค่าได้แตกต่างอย่างเด่นชัดอีกหนึ่งตำแหน่งคือ  $x = 250$  mm ในบริเวณ  $y/h$  ประมาณ  $0$  ถึง  $0.3$

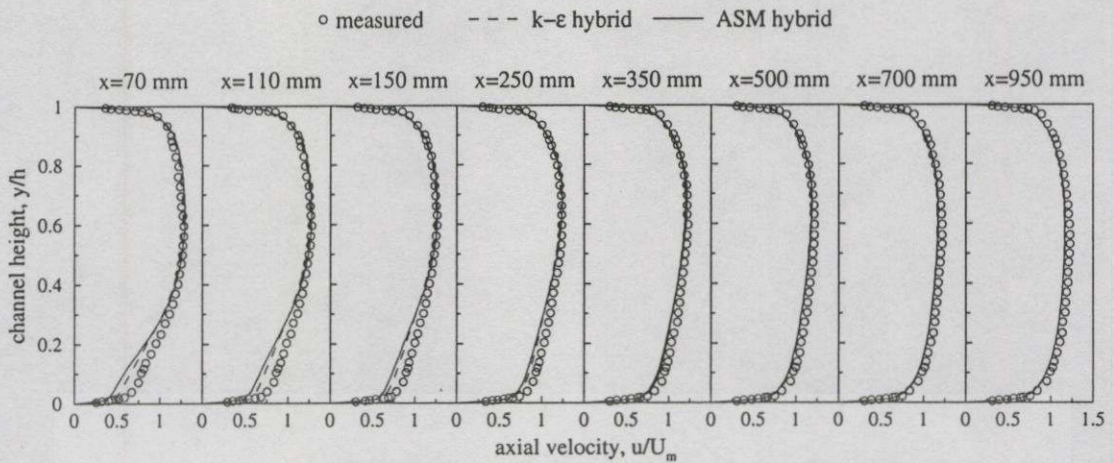
ในรูปที่ 5.11 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายระหว่าง  $k-\varepsilon$  model และ ASM ที่ใช้ hybrid scheme ของค่า  $Q_r = 0.2$  จากรูปที่ 5.11 จะเห็นว่า  $k-\varepsilon$  model ทำนายได้ใกล้เคียงกว่า ASM โดยเฉพาะตำแหน่ง  $x = 70, 110$  และ  $150$  mm ในบริเวณ  $y/h$  ประมาณ  $0$  ถึง  $0.25$  ส่วนในตำแหน่งที่เหลือค่าที่ทำนายได้จากทั้ง 2 models ไม่มีความแตกต่างกันและมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง

ภายหลังจากการเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลระหว่าง  $k-\varepsilon$  model กับ ASM ที่ใช้ hybrid scheme เหมือนกัน สรุปได้ว่า ASM ทำนายได้ไม่แตกต่างกับ  $k-\varepsilon$  model ทั้งที่ ASM เป็น model ที่สูงกว่าแต่กลับทำนายได้ถูกต้องน้อยกว่า  $k-\varepsilon$  model โดยเฉพาะในบริเวณช่องฉีด ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดมาจากการไหลที่มีความสลับซับซ้อนในบริเวณดังกล่าวและการใช้เงื่อนไขขอบเขตบริเวณผนังที่ยังไม่ได้คิดผลการไหลในชั้นขีดผิว (boundary layer)

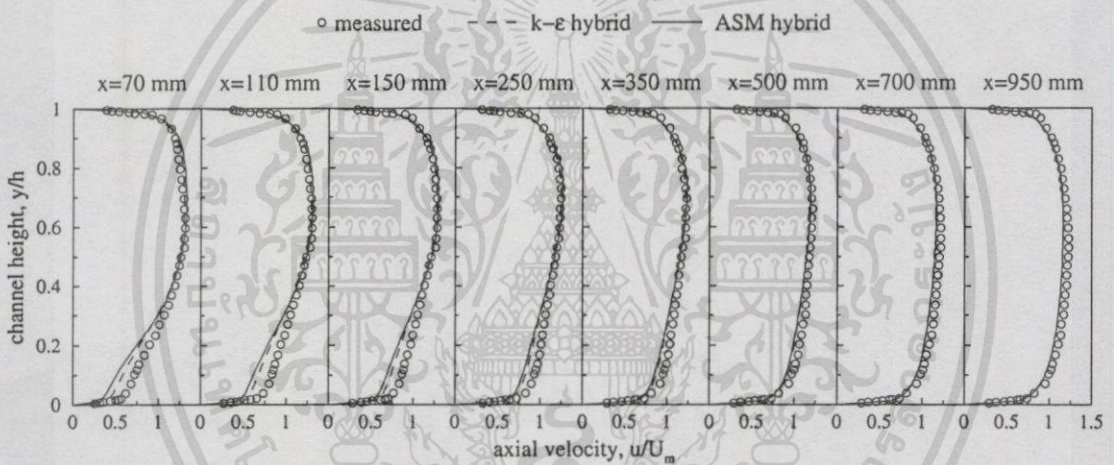
รูปที่ 5.12 เป็นการแสดงลักษณะรูปร่างของความเร็วที่คำนวณจากค่า  $Q_r = 0.067, 0.133$  และ  $0.2$  โดย  $k-\varepsilon$  model ที่ใช้ hybrid scheme พบว่าเมื่อค่า  $Q_r$  เพิ่มขึ้นความเร็วบริเวณผนังด้านล่างจะถูกหน่วงขณะที่บริเวณด้านบนจะถูกเร่งมากขึ้นและตำแหน่งความเร็วสูงสุดจะเลื่อนขึ้นไปทางผนังด้านบน แต่เมื่อห่างออกไปจากช่องฉีดรูปร่างความเร็วจะปรับตัวเข้าสู่ลักษณะสมมาตรอีกครั้ง



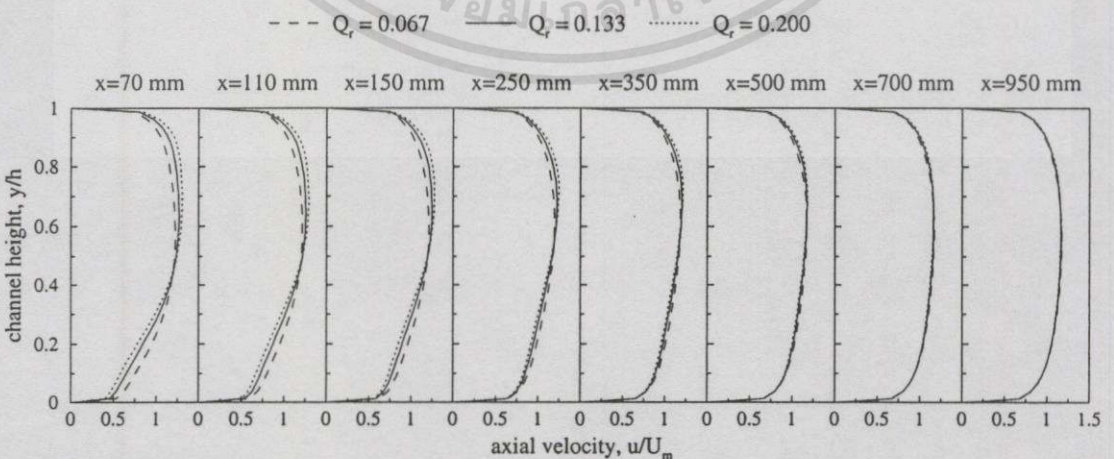
รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวแกน กรณี  $Q_r = 0.067$  ระหว่าง  $k-\varepsilon$  model กับ ASM



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวแกน กรณี  $Q_r = 0.133$  ระหว่าง  $k-\epsilon$  model กับ ASM



รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวแกน กรณี  $Q_r = 0.200$  ระหว่าง  $k-\epsilon$  model กับ ASM



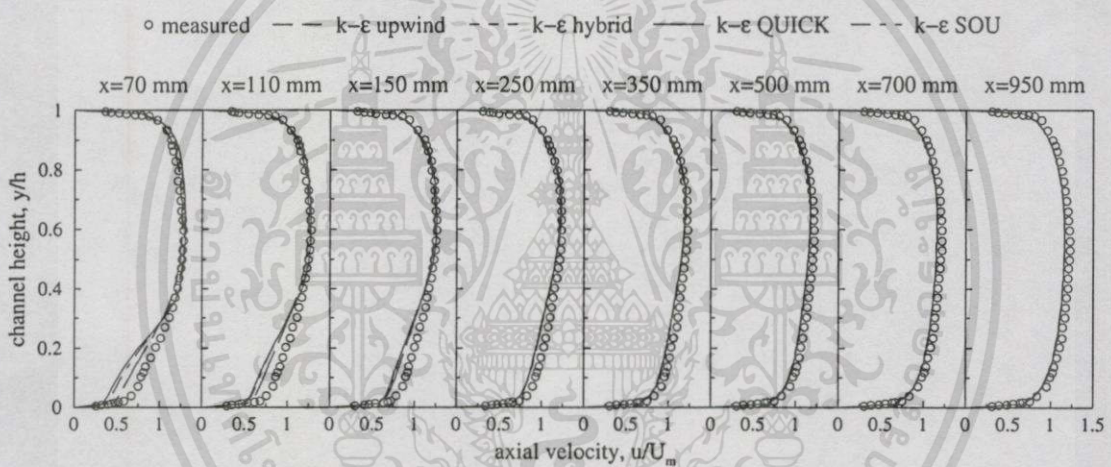
รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างความเร็วที่แต่ละอัตราส่วนการฉีด

## 5.2.2 ช่องการไหลที่มีการฉีดด้านข้าง กรณีช่องฉีดเท่ากับ 20 mm

### 5.2.2.1 การทำนายการไหลโดย $k-\varepsilon$ model

จากการจำลองการไหลโดย  $k-\varepsilon$  model ร่วมกับ scheme ต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงในรูปของความเร็วตามแนวแกนที่เขียนในรูปตัวแปรไร้มิติ  $u/U_m$  ( $U_m$  เป็นความเร็วเฉลี่ยรวมในตำแหน่งที่เลื่อยออกไปจากช่องฉีด) ในตำแหน่ง  $x = 70, 110, 150, 250, 350, 500, 700$  และ  $950$  mm ตามลำดับ

รูปที่ 5.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  ที่มีค่า  $Q_r = 0.133$  จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ที่ตำแหน่ง  $x = 70$  mm ของทั้ง 4 schemes นั้น ค่าที่ได้จาก upwind และ hybrid schemes มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า QUICK และ SOU schemes โดยค่าทั้ง 4 schemes มีความแตกต่างจากผลการทดลองบ้างในช่วงที่อยู่บริเวณใกล้กับผนังด้านล่าง ลักษณะเช่นนี้ยังปรากฏต่อไปยังตำแหน่ง  $x = 110$  และ  $150$  mm

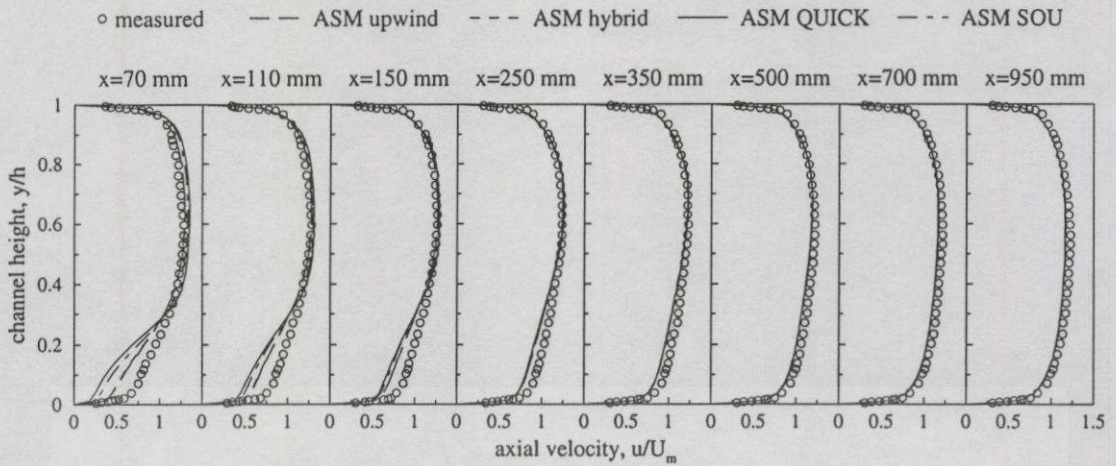


รูปที่ 5.13 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี  $Q_r = 0.133$  ทำนายโดย  $k-\varepsilon$  model

### 5.2.2.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress model (ASM)

จากการจำลองการไหลโดย ASM ร่วมกับ upwind, hybrid, QUICK และ SOU schemes ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงในรูปของความเร็วตามแนวแกนที่เขียนในรูปตัวแปรไร้มิติ  $u/U_m$  ที่ตำแหน่งที่เดียวกันกับรูปที่ 5.13

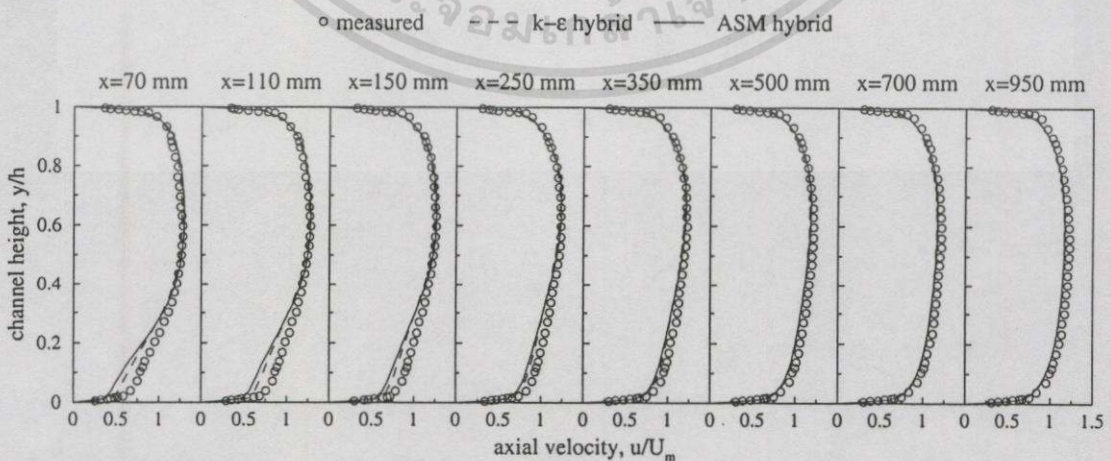
ในรูปที่ 5.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  ที่ค่า  $Q_r = 0.133$  จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ที่ตำแหน่ง  $x = 70, 110, 150$  และ  $250$  mm ของทั้งสี่ schemes นั้น ค่าที่ได้จาก upwind และ hybrid schemes มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า QUICK และ SOU schemes โดยค่าทั้ง 4 schemes ไม่มีความแตกต่างจากผลการทดลองในช่วงที่อยู่เหนือและมีค่าที่สอดคล้องกับผลการทดลอง



รูปที่ 5.14 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณี  $Q_r = 0.133$  ทำนายโดย ASM

รูปที่ 5.15 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายระหว่าง  $k-\epsilon$  model และ ASM ที่ใช้ hybrid scheme ของค่า  $Q_r = 0.133$  จากรูปจะเห็นว่า  $k-\epsilon$  model ทำนายได้ใกล้เคียงกว่า ASM โดยเฉพาะตำแหน่ง  $x = 70, 110$  และ  $150$  mm ในบริเวณ  $y/h$  ประมาณ 0 ถึง 0.25 ส่วนในตำแหน่งที่เหลือค่าที่ทำนายได้จากทั้ง 2 แบบจำลองไม่มีความแตกต่างกันและมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลระหว่าง  $k-\epsilon$  model กับ ASM ที่ใช้ hybrid scheme ในกรณีช่องฉีดขนาด 20 mm ผลของการเปรียบเทียบมีความคล้ายคลึงกับกรณีช่องฉีดเท่ากับ 10 mm แต่จะมีความผิดพลาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยเฉพาะที่ตำแหน่ง  $x = 70, 110$  และ  $150$  mm ส่วนในตำแหน่งอื่นๆ ค่าที่คำนวณได้ของทั้ง 2 แบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง เมื่อมองโดยรวมแล้วพอที่จะสรุปได้ว่า  $k-\epsilon$  model ทำนายได้ดีกว่า ASM โดยเฉพาะบริเวณช่องฉีด ทั้งที่ ASM เป็นแบบจำลองที่สูงกว่า



รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวแกน กรณี  $Q_r = 0.133$  ระหว่าง  $k-\epsilon$  model กับ ASM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.3 สัมประสิทธิ์ความดันสถิตที่ผนังภายในช่องกรไหลที่มีการฉีดด้านข้าง

ผลของการทำนายการกระจายความดันภายในช่องกรไหลที่มีการฉีดด้านข้างจากการทำนายโดย  $k-\varepsilon$  model และ ASM ที่ได้อธิบายมาข้างต้น นำมาแสดงผลในรูปค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิตที่ผนัง (wall static pressure coefficient,  $C_p$ ) ที่ผนังด้านบนและผนังด้านล่างของช่องกรไหล ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิตที่ผนังดังกล่าวสามารถเขียนได้ในรูปสมการดังนี้

$$C_p = (p - p_0) / \left(\frac{1}{2} \rho U_{in}^2\right)$$

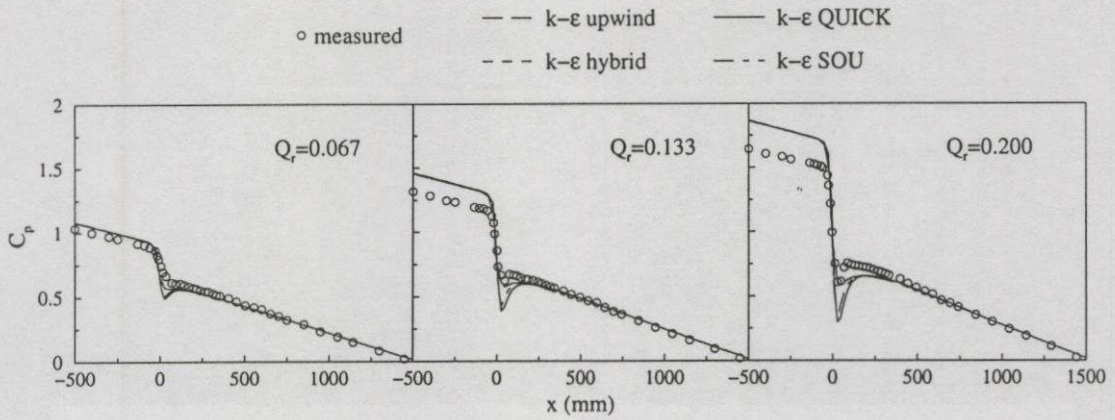
ซึ่งที่ค่า  $p$  และ  $p_0$  เป็นความดันที่ตำแหน่งต่างๆบนผนังและที่ตำแหน่งทางออกของช่องกรไหลตามลำดับ

#### 5.2.3.1 การทำนายสัมประสิทธิ์ความดันสถิตโดย $k-\varepsilon$ model

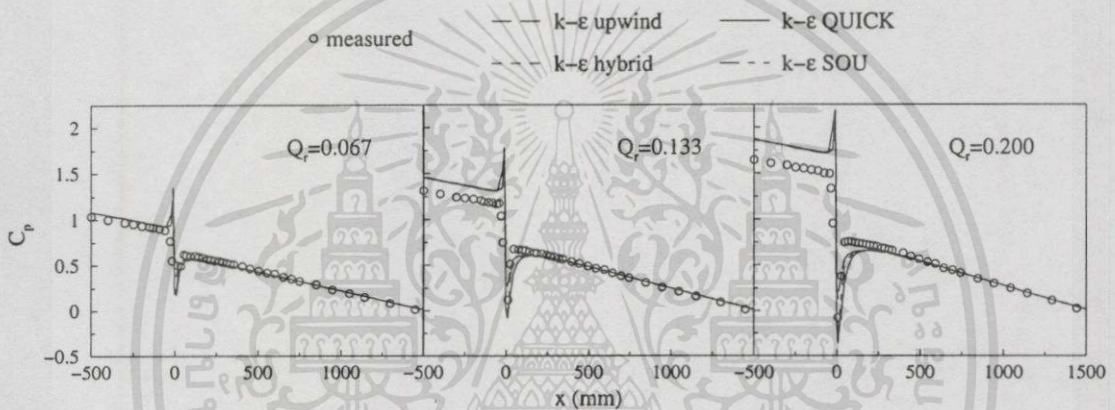
ผลการทำนายค่า  $C_p$  ที่ผนังด้านบนและด้านล่างของค่า  $Q_r$  เท่ากับ 0.067, 0.133 และ 0.2 ทำนายโดย  $k-\varepsilon$  model ที่ใช้ upwind, hybrid, QUICK และ SOU schemes นำมาแสดงในรูปที่ 5.16 และ 5.17

ค่า  $C_p$  ที่ผนังด้านบนแสดงในรูปที่ 5.16 ซึ่งอยู่ในบริเวณตั้งแต่  $x = -500$  ถึง 1500 ของช่องกรไหล โดยการฉีดที่ใช้ค่า  $Q_r$  แยกต่างกัน 3 ค่าคือ 0.067, 0.133 และ 0.2 ที่คำนวณโดย  $k-\varepsilon$  model โดยใช้ upwind, hybrid, QUICK และ SOU schemes จากรูปจะพบว่า  $C_p$  ก่อนและหลังช่องฉีดมีค่าที่เหมือนกันทั้ง 4 schemes และเมื่อเพิ่มค่า  $Q_r$  ผลการทำนายจะมีค่าความแตกต่างจากผลการทดลองมากขึ้นในบริเวณก่อนถึงช่องฉีด ในบริเวณหลังจากช่องฉีดค่าที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ส่วนบริเวณช่องฉีดพบว่า upwind และ hybrid schemes ทำนายผลได้ใกล้เคียงกว่า QUICK และ SOU schemes

รูปที่ 5.17 แสดงค่า  $C_p$  ที่ผนังด้านล่างในบริเวณเดียวกันกับรูปที่ 5.16 ของการฉีดที่ใช้ค่า  $Q_r$  เท่ากับ 0.067, 0.133 และ 0.2 คำนวณโดย  $k-\varepsilon$  model ที่ใช้ upwind, hybrid, QUICK และ SOU schemes จากรูปจะเห็นว่า  $C_p$  ก่อนและหลังช่องฉีดมีค่าที่เหมือนกันทั้ง 4 schemes ซึ่งมีลักษณะการกระจายความดันเหมือนกันกับผนังด้านบน เมื่อทำการเพิ่มค่า  $Q_r$  ผลการทำนายจะมีค่าแตกต่างจากผลการทดลองมากขึ้นในบริเวณก่อนถึงช่องฉีด ส่วนบริเวณหลังจากช่องฉีดค่าที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ส่วนที่บริเวณช่องฉีดพบว่าค่าที่คำนวณโดยใช้ upwind และ hybrid schemes ทำนายผลได้ใกล้เคียงกว่า QUICK และ SOU schemes ซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับผลการคำนวณที่ผนังด้านบน



รูปที่ 5.16 ค่า  $C_p$  ที่ผนังด้านบน ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model



รูปที่ 5.17 ค่า  $C_p$  ที่ผนังด้านล่าง ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model

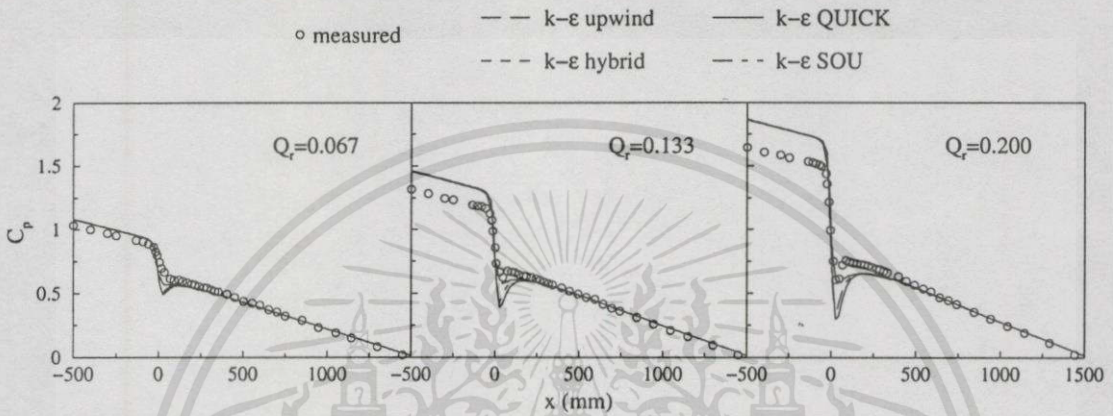
### 5.2.3.2 การทำนายสัมประสิทธิ์ความดันสถิตโดย Algebraic Stress model (ASM)

ผลการทำนายค่า  $C_p$  ที่ผนังด้านบนและด้านล่างของค่า  $Q_r$  เท่ากับ 0.067, 0.133 และ 0.2 ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model ที่ใช้ 4 schemes คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU schemes นำมาแสดงในรูปที่ 5.18 และ 5.19

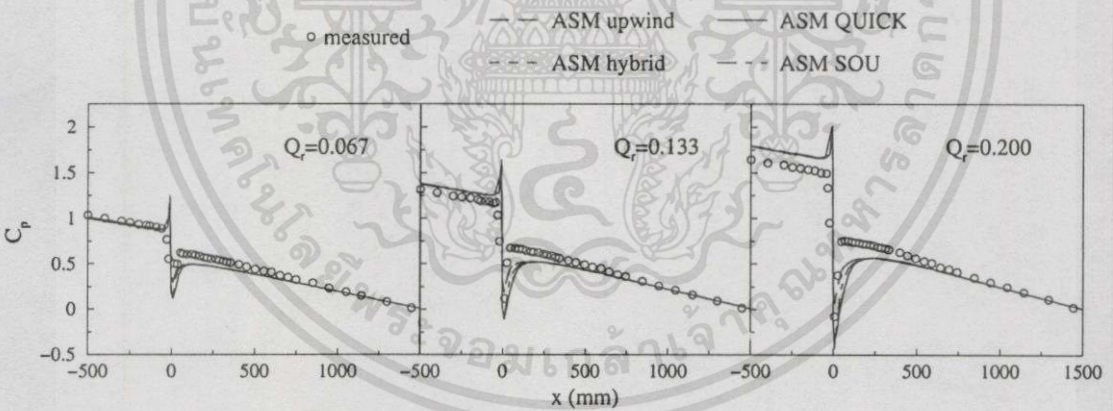
รูปที่ 5.18 แสดงค่า  $C_p$  ที่ผนังด้านบนในบริเวณตั้งแต่  $x = -500$  ถึง 1500 ของการฉีดที่ค่า  $Q_r$  ต่างกัน 3 ค่าคือ 0.067, 0.133 และ 0.2 ที่คำนวณโดย  $k-\epsilon$  model ที่ใช้ upwind, hybrid, QUICK และ SOU schemes จากรูปจะพบว่า  $C_p$  ก่อนและหลังช่องฉีดมีค่าที่เหมือนกันทั้ง 4 schemes และเมื่อเพิ่มค่า  $Q_r$  ผลการทำนายจะมีค่าความแตกต่างจากผลการทดลองมากขึ้นในบริเวณก่อนถึงช่องฉีด ในบริเวณหลังจากช่องฉีดค่าที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ส่วนบริเวณช่องฉีดพบว่า upwind และ hybrid schemes ทำนายผลได้ใกล้เคียงกว่า QUICK และ SOU schemes

รูปที่ 5.19 เป็นรูปที่แสดงค่า  $C_p$  ที่ผนังด้านล่างในบริเวณตั้งแต่  $x = -500$  ถึง 1500 ของการฉีดที่ค่า  $Q_r$  ต่างกัน 3 ค่าคือ 0.067, 0.133 และ 0.2 ที่คำนวณโดย  $k-\epsilon$  model โดยใช้ scheme 4 ชนิด

คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU schemes จากรูปจะเห็นว่า  $C_p$  ก่อนและหลังช่องฉีดยามีค่าที่เหมือนกันทั้ง 4 schemes เมื่อเพิ่มค่า  $Q_r$  ผลการทำนายจะมีค่าแตกต่างจากผลการทดลองมากขึ้นในบริเวณก่อนถึงช่องฉีด ส่วนบริเวณหลังจากช่องฉีดค่าที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่บริเวณช่องฉีดพบว่าค่าที่คำนวณโดยใช้ upwind และ hybrid schemes ทำนายผลได้ใกล้เคียงกว่า QUICK และ SOU schemes



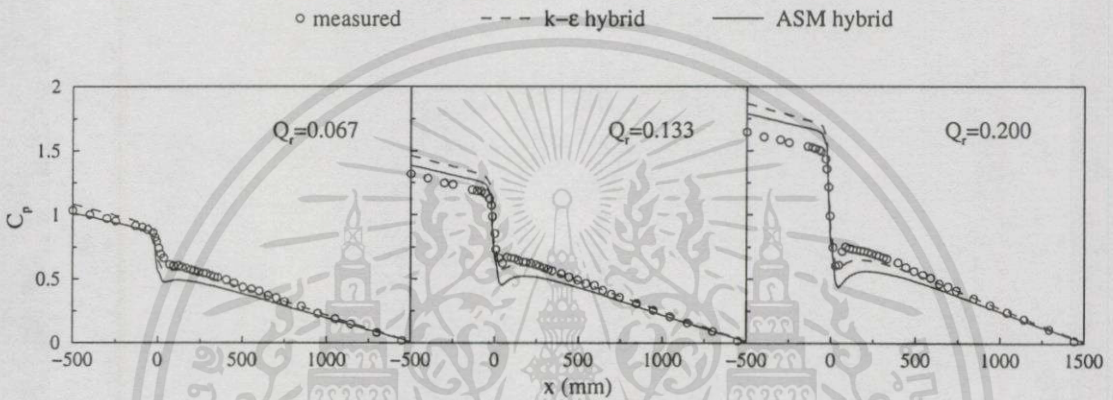
รูปที่ 5.18 ค่า  $C_p$  ที่ผนังด้านบน ทำนายโดย ASM



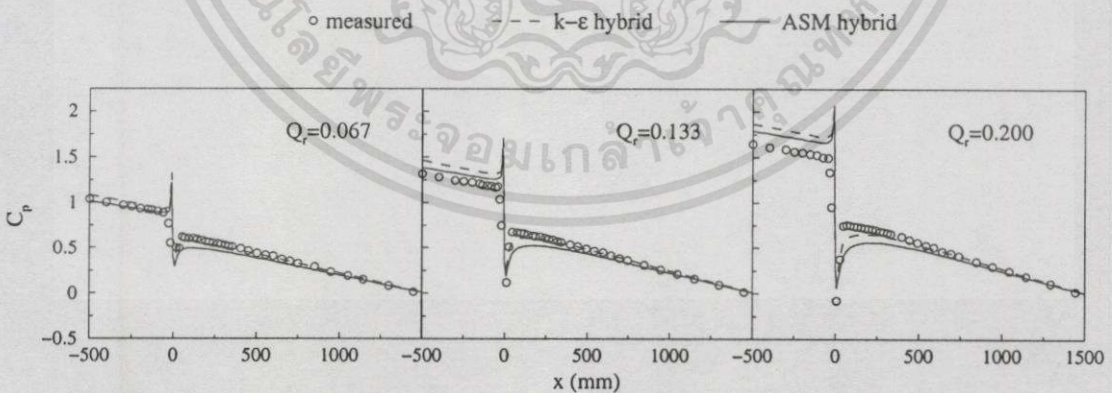
รูปที่ 5.19 ค่า  $C_p$  ที่ผนังด้านล่าง ทำนายโดย ASM

ในรูปที่ 5.20 เป็นรูปในลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 5.18 แต่คำนวณโดย  $k-\epsilon$  model และ ASM ที่ใช้ hybrid scheme พบว่าในบริเวณก่อนช่องฉีดผลการคำนวณโดย ASM มีค่าใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่า  $k-\epsilon$  model ในแต่ละค่าของ  $Q_r$  ส่วนในบริเวณหลังช่องฉีดผลการคำนวณของ  $k-\epsilon$  model กลับมีค่าที่ใกล้เคียงกว่า ASM ส่วนบริเวณช่องฉีด ASM มีค่าใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่า  $k-\epsilon$  model

ในรูปที่ 5.21 เป็นรูปในลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 5.19 แต่คำนวณโดย  $k-\varepsilon$  model และ ASM ที่ใช้ hybrid scheme พบว่าในบริเวณก่อนช่องฉีดผลการคำนวณโดย ASM มีค่าใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่า  $k-\varepsilon$  model ในแต่ละค่าของ  $Q_r$  ส่วนในบริเวณหลังช่องฉีดผลการคำนวณของ  $k-\varepsilon$  model กลับมีค่าที่ใกล้เคียงกว่า ASM ส่วนบริเวณช่องฉีด ASM มีค่าใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่า  $k-\varepsilon$  model



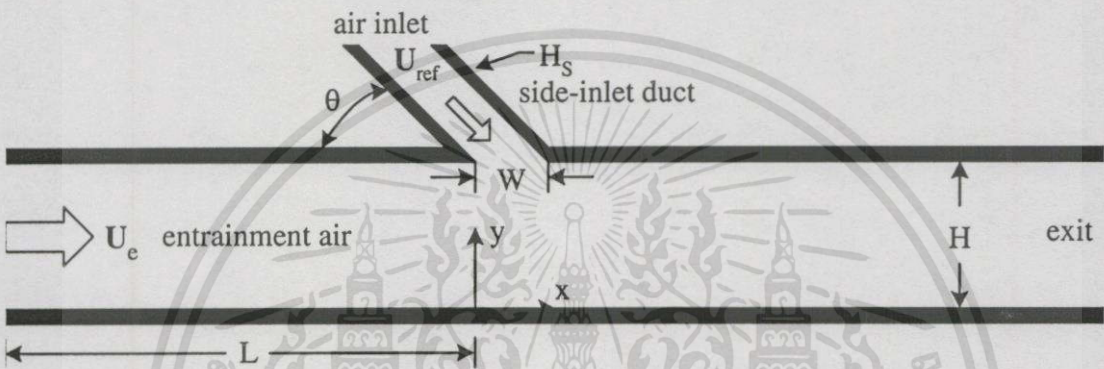
รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบค่า  $C_p$  ที่ผนังด้านบน ทำนายโดย  $k-\varepsilon$  model กับ ASM



รูปที่ 5.21 การเปรียบเทียบค่า  $C_p$  ที่ผนังด้านล่าง ทำนายโดย  $k-\varepsilon$  model กับ ASM

### 5.3 การฉีดของไหลทำมุมกับช่องการไหล

Liou *et. al.* (1999) ได้ทำการศึกษาการไหลในช่องการไหลที่มีการฉีดของไหลผ่านช่องฉีดที่ทำมุมต่างๆกันโดยวิธีการทดลอง ซึ่งช่องการไหลนี้จะไม่มีการไหลไหลอยู่ก่อนแต่จะอาศัยแรงเฉือนจากการฉีดของไหลในการเหนี่ยวนำให้ของไหลวิ่งเข้ามาในช่องการไหล ในการวัดความเร็วและความปั่นป่วนจะใช้ laser Doppler velocimetry (LDV) ในการวัดค่าต่างๆ ซึ่งจากความละเอียดและความถูกต้องของผลที่ได้นี้ ถูกนำไปเพื่อเปรียบเทียบในการจำลองการไหลนี้ ช่องการไหลมีลักษณะดังรูปที่ 5.22 ค่าต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณได้กำหนดไว้ตามตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.22 ลักษณะช่องการไหลของ Liou *et. al.* (1999) และ computational domain

ในการจำลองการไหลนี้จะใช้ความเร็วของการฉีด ( $U_{ref}$ ) เท่ากับ 44.5 m/s โดยของไหลที่พิจารณาเป็นอากาศซึ่งมีค่า  $\mu = 1.85 \times 10^{-5}$  Ns/m<sup>2</sup> และ  $\rho = 1.2$  kg/m<sup>3</sup> และเงื่อนไขทางเข้าและทางออกของช่องการไหลกำหนดเงื่อนไขแบบ zero gradient ส่วนที่ผนังจะกำหนดให้ความเร็ว  $u$  และ  $v$  ตามผนังทั้งสองด้านมีค่าเป็นศูนย์และใช้ wall function ในการประมาณค่าในตำแหน่งที่ใกล้กับผนัง

ในการคำนวณเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการใช้  $k-\epsilon$  model และ ASM โดยถูกทำร่วมกับ numerical differencing scheme 4 วิธี คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ก็นำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ Liou *et. al.* (1999) ในบางตำแหน่งของ  $x/H$

ตารางที่ 5.2 แสดงขนาดของช่องการไหลและมุมที่ใช้ในการทดลอง(Liou *et. al.*, 1999)

H (mm)	$H_s$ (mm)	$\theta$	W (mm)	L (mm)
40	10	30°	20.0	320
		45°	14.1	
		60°	11.5	

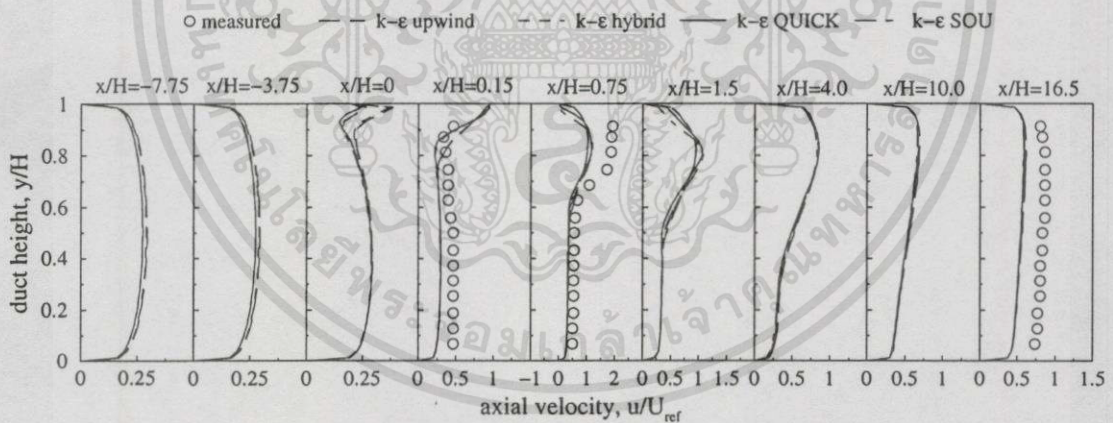
### 5.3.1 การฉีดทำมุม 30 องศา

#### 5.3.1.1 การทำนายการไหลโดย $k-\epsilon$ model

จากการจำลองการไหลโดย  $k-\epsilon$  model ร่วมกับ scheme ต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงในรูปของความเร็วตามแนวแกนที่เขียนในรูปของตัวแปรไร้มิติ  $u/U_{ref}$  ที่ตำแหน่ง  $x/H = -7.75, -3.75, 0.0, 0.125, 0.75, 1.5, 4.0, 10.0$  และ  $16.5$  ตามลำดับ โดยที่  $U_{ref}$  เป็นความเร็วเฉลี่ยของการไหลภายในช่องฉีด นอกจากนี้ยังแสดงผลโดย vector plot และ contour plot อีกด้วย

รูปที่ 5.23 เป็นรูปที่แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  เมื่อทำการฉีดที่มุม 30 องศา จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ที่ตำแหน่ง  $x/H = 0.15, 0.75$  และ  $16.5$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีผลการทดลองเปรียบเทียบ ปรากฏว่าทุก scheme ทำนายได้ใกล้เคียงกันแต่จะค่าที่ผิดพลาดจากผลการทดลองพอสมควร โดยในตำแหน่งสุดท้ายค่าที่คำนวณได้น้อยกว่าผลการทดลองมากสืบเนื่องจากการทำนายค่าความเร็วเหนี่ยวนำในช่วงต้นต่ำกว่าผลการทดลองนั่นเอง

Contour plot และ vector plot ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ SOU scheme แสดงในรูปที่ 5.24 และ 5.25 ตามลำดับ จากรูปที่ 5.24 แสดง contour plot ของ stream function จากรูปสังเกตว่าไม่พบ recirculation ที่ตำแหน่งถัดไปจากช่องฉีด เมื่อพิจารณาจาก vector plot ของความเร็วดังแสดงในรูปที่ 5.25 ก็ไม่พบ vector ของความเร็วที่ไหลย้อนกลับที่บริเวณใต้ผนังด้านบนของช่องถัดจากช่องฉีด

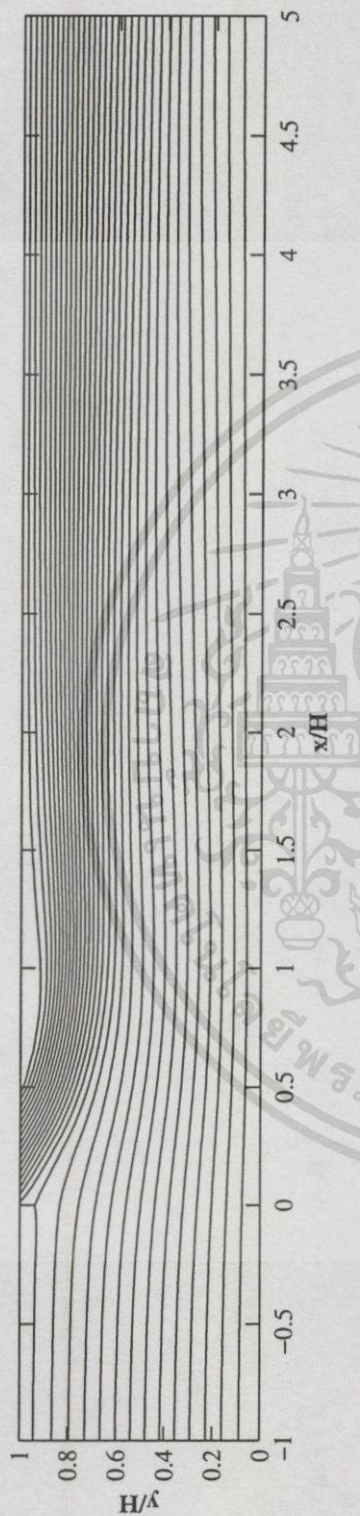


รูปที่ 5.23 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 30 องศา ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model

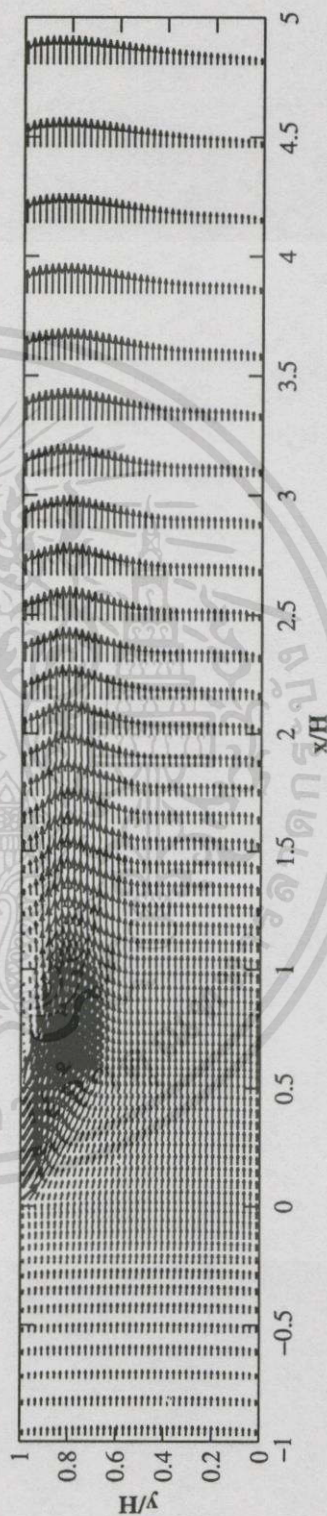
#### 5.3.1.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress model (ASM)

จากการทำนายการไหลโดย ASM ที่ใช้ 4 schemes คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU schemes แสดงในรูปที่ 5.26 ซึ่งมีตำแหน่งที่แสดงเช่นเดียวกับรูปที่ 5.23

รูปที่ 5.26 เป็นรูปที่แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  เมื่อทำการฉีดที่มุม 30 องศา จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ที่ตำแหน่ง  $x/H = 0.15, 0.75$  และ



รูปที่ 5.24 Contour plot ของ stream function กรณีที่คำนวณ 30 องศา ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model ร่วมกับ SOU scheme

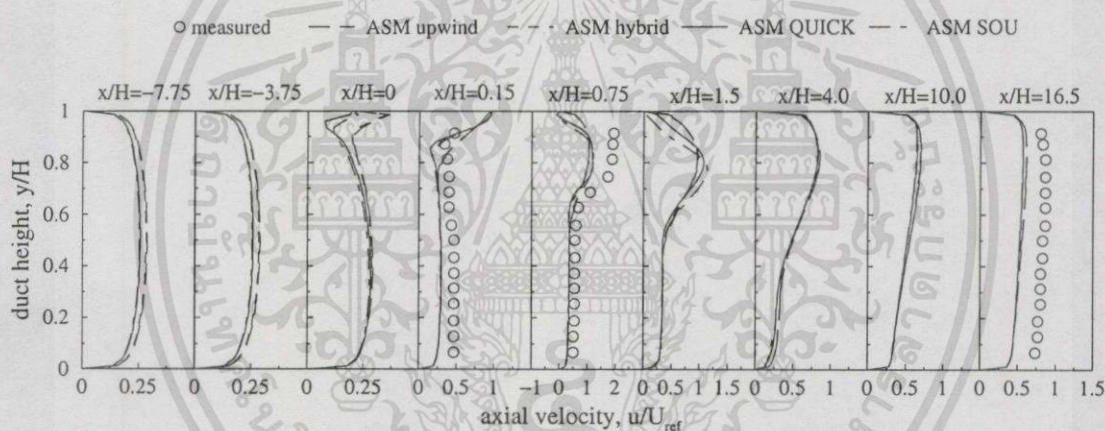


รูปที่ 5.25 Vector plot ของความเร็ว กรณีที่คำนวณ 30 องศา ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model ร่วมกับ SOU scheme

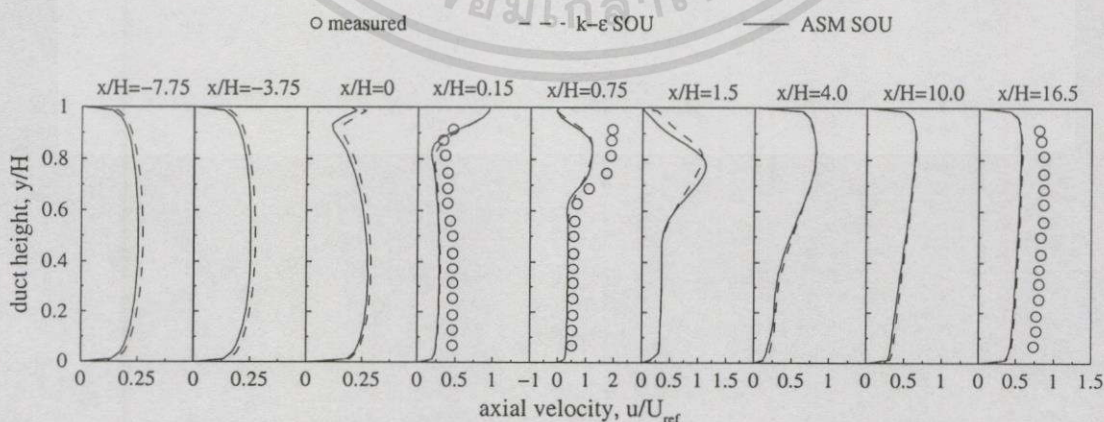
16.5 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำการวัดค่า ปรากฏว่า QUICK และ SOU scheme ทำนายได้ใกล้เคียงกว่า upwind และ hybrid schemes

การเปรียบเทียบผลการคำนวณโดย  $k-\epsilon$  model กับ ASM ที่ใช้ SOU scheme แสดงในรูปที่ 5.27 พบว่าความเร็วที่คำนวณของทั้ง 2 models ไม่แตกต่างกัน และค่าที่คำนวณได้ยังพบว่าน้อยกว่าผลการทดลองเกือบครึ่งหนึ่งที่ตำแหน่ง  $x/H = 16.5$

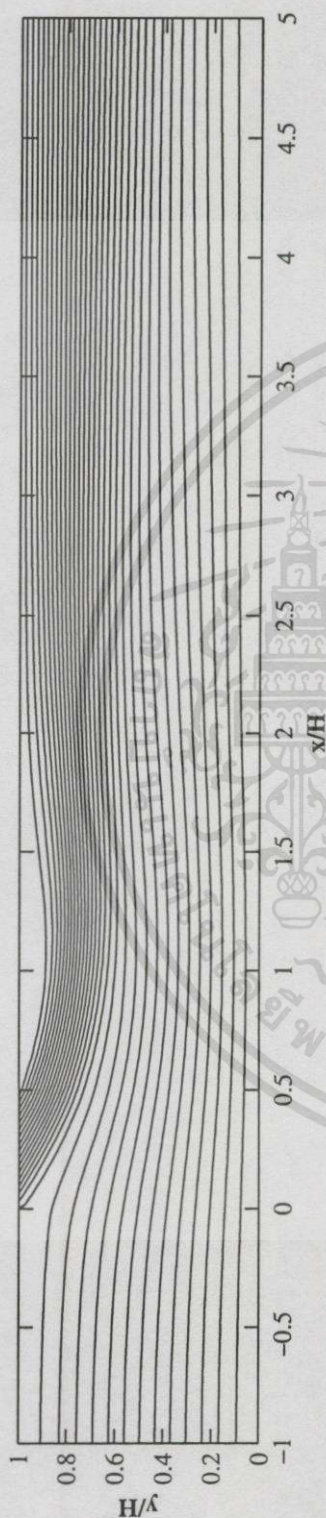
Contour plot และ vector plot ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ SOU scheme แสดงในรูปที่ 5.28 และ 5.29 ตามลำดับ จากรูปที่ 5.28 แสดง contour plot ของ stream function จากรูปสังเกตว่าไม่พบ recirculation ที่ตำแหน่งถัดไปจากช่องฉีดเช่นเดียวกับรูปที่ 5.24 เมื่อพิจารณาจาก vector plot ของความเร็วดังในรูปที่ 5.29 ก็ไม่พบ vector ของความเร็วที่ไหลย้อนกลับที่บริเวณใต้ผนังด้านบนของช่องการไหลถัดจากช่องฉีด เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ contour plot ที่ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model แล้ว เห็นได้ว่าคล้ายกันมาก



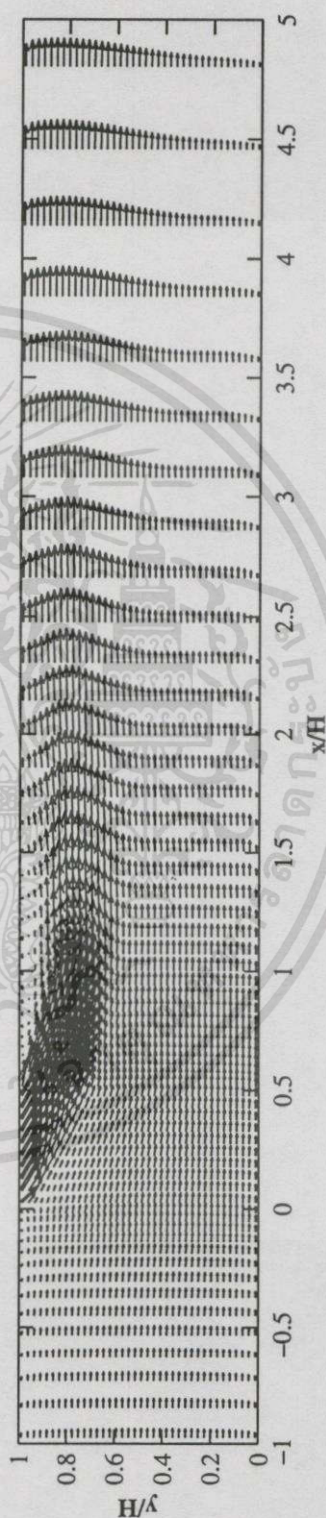
รูปที่ 5.26 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 30 องศา ทำนายโดย ASM



รูปที่ 5.27 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 30 องศา ระหว่าง  $k-\epsilon$  model กับ ASM



รูปที่ 5.28 Contour plot ของ stream function กรณีนี้จัดทำม 30 องศา ทำนายโดย ASM ร่วมกับ SOU scheme



รูปที่ 5.29 Vector plot ของความเร็ว กรณีนี้จัดทำม 30 องศา ทำนายโดย ASM ร่วมกับ SOU scheme

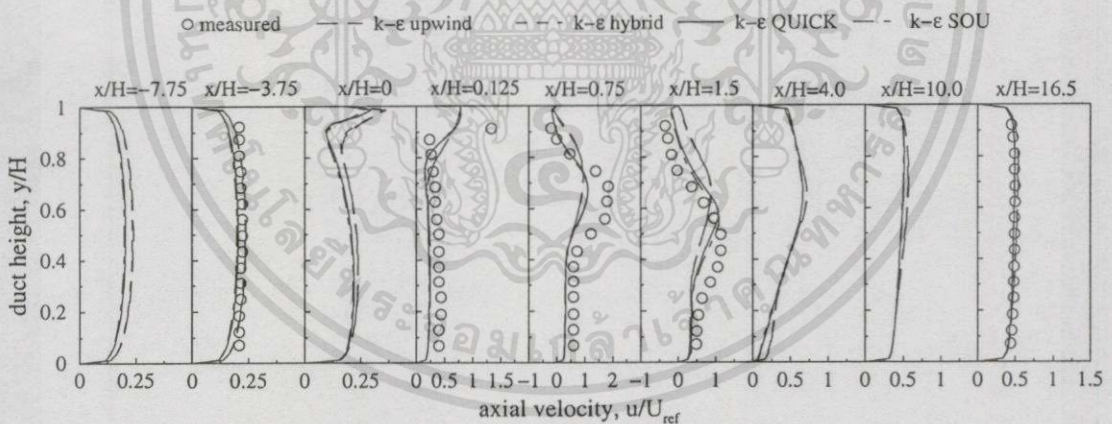
### 5.3.2 การฉีดทำมุม 45 องศา

#### 5.3.2.1 การทำนายการไหลโดย $k-\varepsilon$ model

จากการจำลองการไหลโดย  $k-\varepsilon$  model ร่วมกับ scheme ต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงในรูปของความเร็วตามแนวแกนที่เขียนในรูปของตัวแปรไร้มิติ  $u/U_{ref}$  ที่ตำแหน่ง  $x/H = -7.75, -3.75, 0.0, 0.125, 0.75, 1.5, 4.0, 10.0$  และ  $16.5$  ตามลำดับ โดยที่  $U_{ref}$  เป็นความเร็วเฉลี่ยของการไหลภายในช่องฉีด นอกจากนี้ยังแสดงผล โดย vector plot และ contour plot อีกด้วย

รูปที่ 5.30 เป็นรูปที่แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  เมื่อทำการฉีดที่มุม 45 องศา จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ที่ตำแหน่ง  $x/H = -3.75, 0.125, 0.75, 1.5$  และ  $16.5$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีผลการทดลองเปรียบเทียบ ปรากฏว่า SOU scheme ทำนายได้ใกล้เคียงที่สุด

Contour plot และ vector plot ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ SOU scheme แสดงในรูปที่ 5.31 และ 5.32 ตามลำดับ จากรูปที่ 5.31 แสดง contour plot ของ stream function จากรูปสังเกตเห็นว่ามี recirculation เกิดขึ้นที่ตำแหน่งถัดไปจากช่องฉีด เมื่อพิจารณาจาก vector plot ของความเร็วดังแสดงในรูปที่ 5.32 ก็พบ vector ของความเร็วที่ไหลย้อนกลับที่บริเวณใต้ผนังด้านบนของช่องถัดจากช่องฉีด โดยจุด reattachment ที่  $x/H$  ประมาณ 2.2



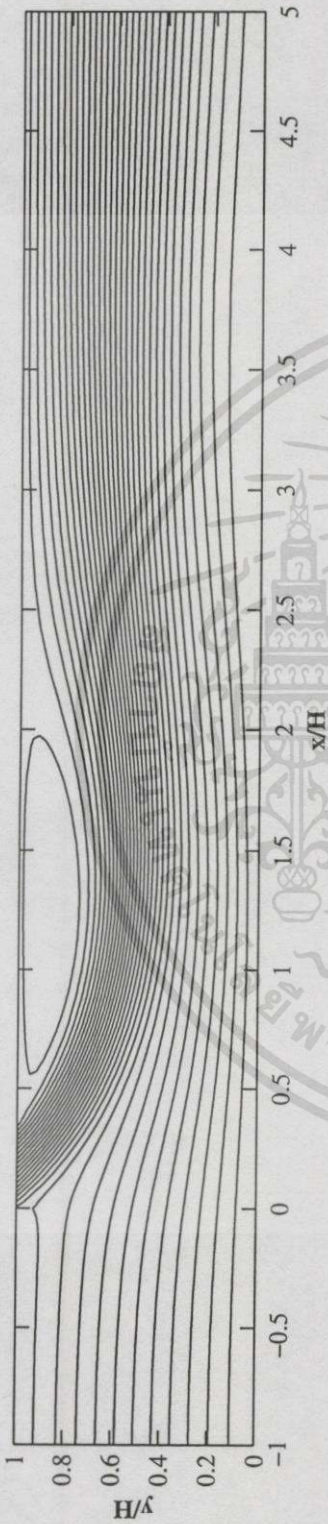
รูปที่ 5.30 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 45 องศา ทำนายโดย  $k-\varepsilon$  model

#### 5.3.2.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress model (ASM)

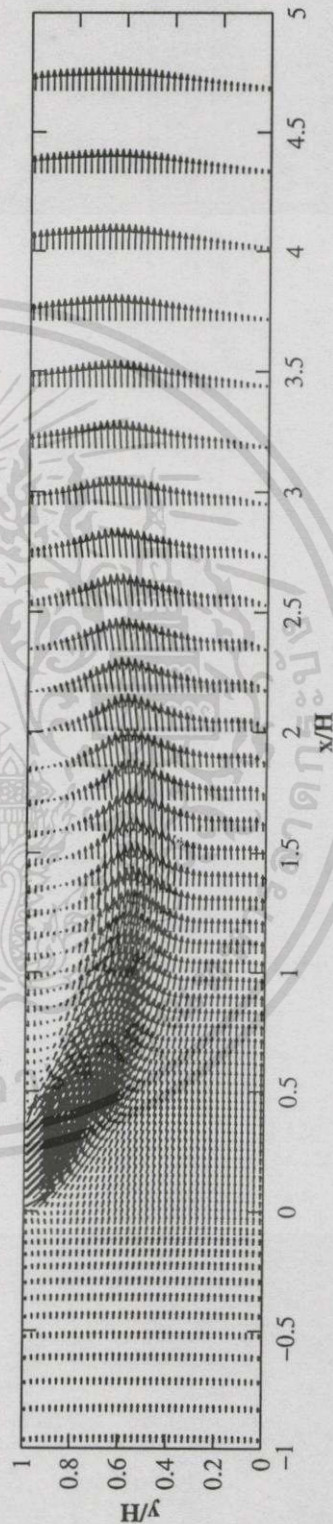
จากการทำนายการไหลโดย ASM ที่ใช้ 4 schemes คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU schemes แสดงในรูปที่ 5.33 ซึ่งมีตำแหน่งที่แสดงเช่นเดียวกับรูปที่ 5.30

รูปที่ 5.33 เป็นรูปที่แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  เมื่อทำการฉีดที่มุม 45 องศา จากรูปสังเกตเห็นว่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณในตำแหน่ง  $x/H = -3.75, 0.125, 0.75,$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.31 Contour plot ของ stream function กรณีศึกษาที่ 45 องศา ทำนายโดย  $k - \epsilon$  model ร่วมกับ SOU scheme

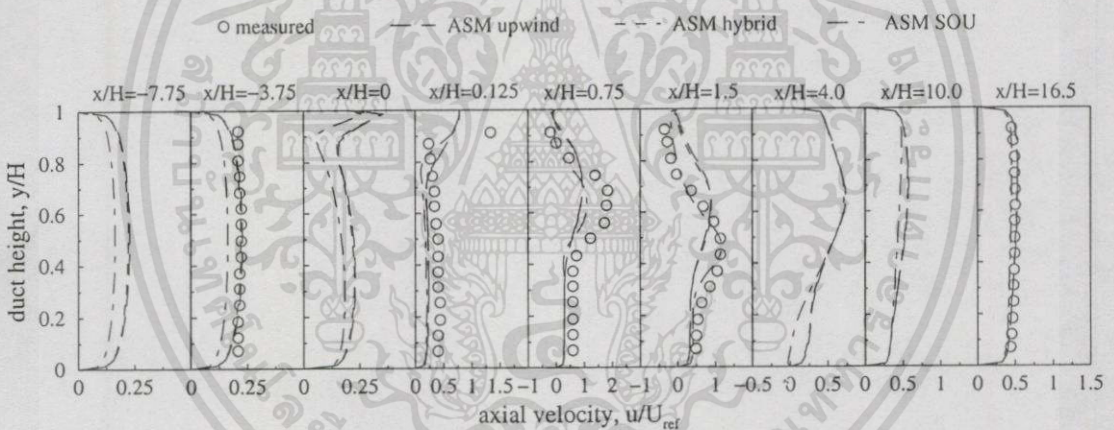


รูปที่ 5.32 Vector plot ของความเร็ว กรณีศึกษาที่ 45 องศา ทำนายโดย  $k - \epsilon$  model ร่วมกับ SOU scheme

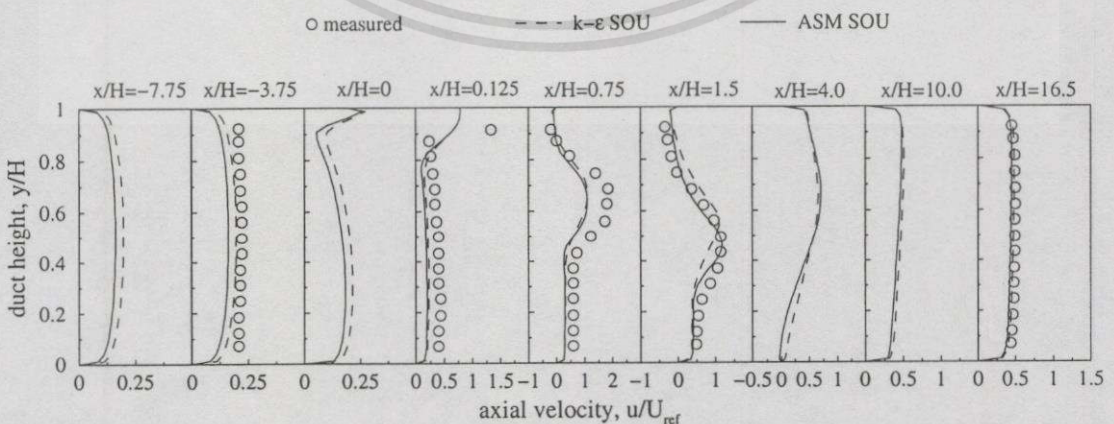
1.5 และ 16.50 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีผลการทดลองเปรียบเทียบ ปรากฏว่า QUICK และ SOU scheme ทำนายได้ใกล้เคียงที่สุด

รูปที่ 5.34 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณโดย  $k-\varepsilon$  model กับ ASM ที่ใช้ SOU scheme จากรูปพบว่า ความเร็วในช่วงก่อนถึงช่องฉีด  $k-\varepsilon$  model ได้ค่าที่มากกว่า ASM เล็กน้อย ส่วนในช่วงหลังจากช่องฉีดค่าความเร็วจากทั้ง 2 model ไม่แตกต่างกัน และพิจารณาในตำแหน่งที่มีการวัดพบว่า ASM ทำนายได้ดีกว่า  $k-\varepsilon$  model เล็กน้อย

Contour plot และ vector plot ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ SOU scheme แสดงในรูปที่ 5.35 และ 5.36 ตามลำดับ จากรูปที่ 5.35 สังเกตว่าพบ recirculation ที่ตำแหน่งถัดไปจากช่องฉีด เมื่อพิจารณาจาก vector plot ของความเร็วดังแสดงในรูปที่ 5.36 ก็พบ vector ของความเร็วที่ไหลย้อนกลับที่บริเวณใต้ผนังด้านบนของช่องถัดจากช่องฉีดโดยจุด reattachment ที่  $x/H$  ประมาณ 2.9 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ contour plot ซึ่งทำนายโดย  $k-\varepsilon$  model แล้วจะเห็นได้ว่าขนาดของ recirculation มีขนาดที่โตกว่า



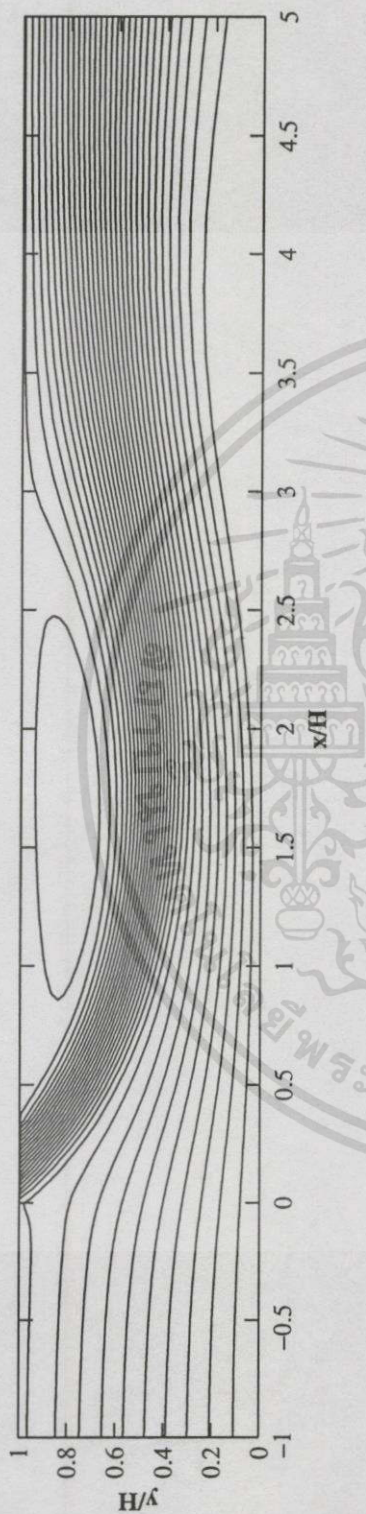
รูปที่ 5.33 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 45 องศา ทำนายโดย ASM



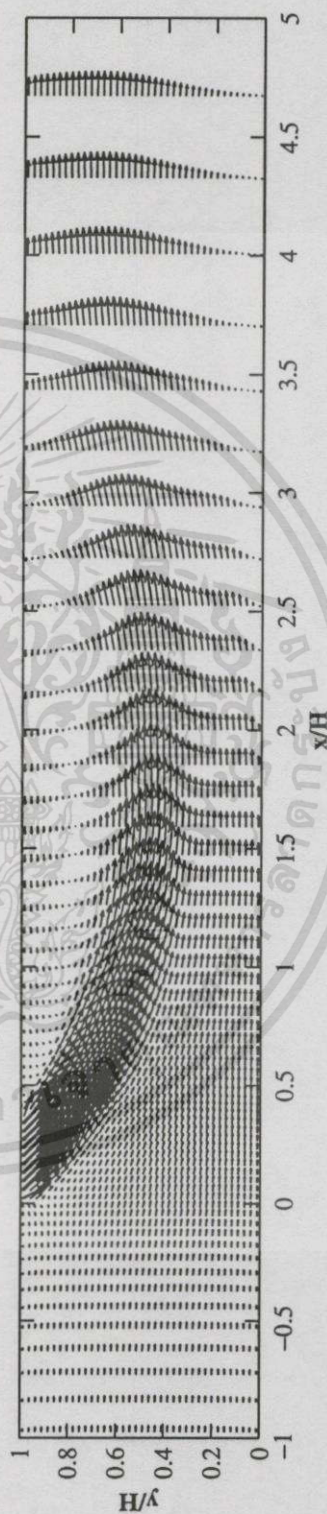
รูปที่ 5.34 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 45 องศา ระหว่าง

$k-\varepsilon$  model กับ ASM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.35 Contour plot ของ stream function กรณีใช้ทำมุม 45 องศา ทำนายโดย ASM ร่วมกับ SOU scheme



รูปที่ 5.36 Vector plot ของความเร็ว กรณีใช้ทำมุม 45 องศา ทำนายโดย ASM ร่วมกับ SOU scheme

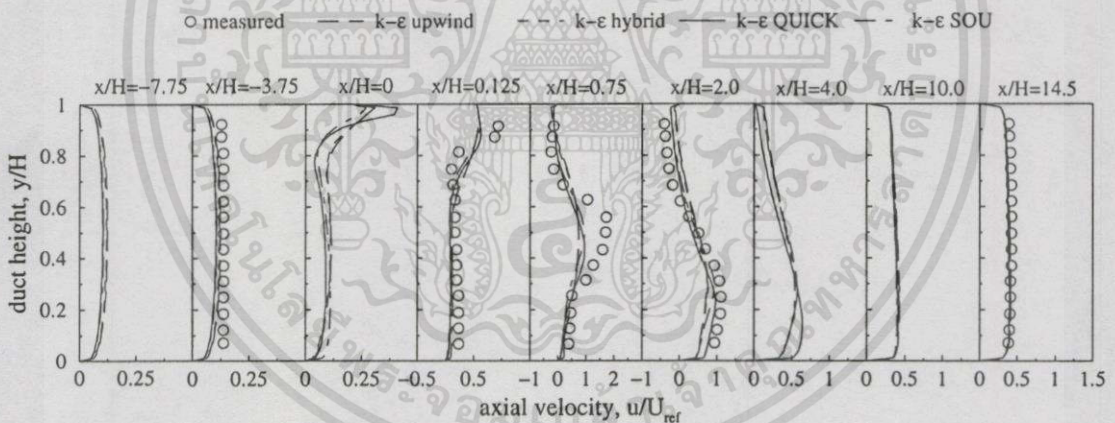
### 5.3.3 การฉีดทำมุม 60 องศา

#### 5.3.3.1 การทำนายการไหลโดย $k-\epsilon$ model

จากการจำลองการไหลโดย  $k-\epsilon$  model ร่วมกับ scheme ต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงในรูปของความเร็วตามแนวแกนที่เขียนในรูปของตัวแปรไร้มิติ  $u/U_{ref}$  ที่ตำแหน่ง  $x/H = -7.75, -3.75, 0.0, 0.125, 0.75, 2.0, 4.0, 10.0$  และ  $14.5$  ตามลำดับ โดยที่  $U_{ref}$  เป็นความเร็วเฉลี่ยของการไหลภายในช่องฉีด นอกจากนี้ยังแสดงผลโดย vector plot และ contour plot

รูปที่ 5.37 เป็นรูปที่แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  เมื่อทำการฉีดที่มุม 60 องศา จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ที่ตำแหน่ง  $x/H = -3.75, 0.125, 0.75, 2.0$  และ  $14.5$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีผลการทดลองเปรียบเทียบ เมื่อมองโดยรวมแล้วพบว่าค่าที่คำนวณได้จากทุก QUICK และ SOU schemes ทำนายได้ใกล้เคียงกว่า upwind และ hybrid schemes

Contour plot และ vector plot ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ SOU scheme แสดงในรูปที่ 5.38 และ 5.39 ตามลำดับ จากรูปที่ 5.38 สังเกตว่ามี recirculation ขนาดใหญ่ที่ตำแหน่งถัดไปจากช่องฉีด เมื่อพิจารณาจาก vector plot ของความเร็วดังแสดงในรูปที่ 5.39 ก็จะพบ vector ของความเร็วที่ไหลย้อนกลับที่บริเวณใต้ผนังด้านบนของช่องถัดจากช่องฉีดโดยจุด reattachment ที่  $x/H$  ประมาณ 3.4

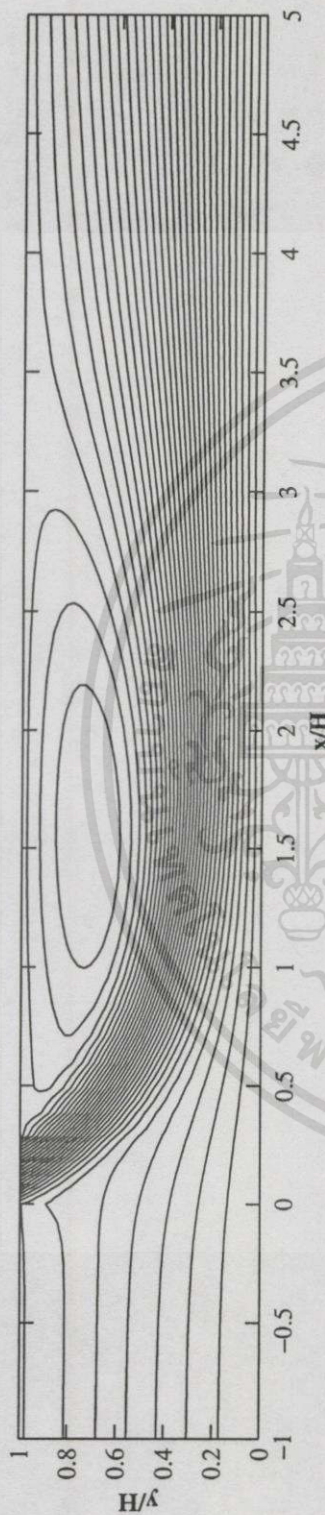


รูปที่ 5.37 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 60 องศา ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model

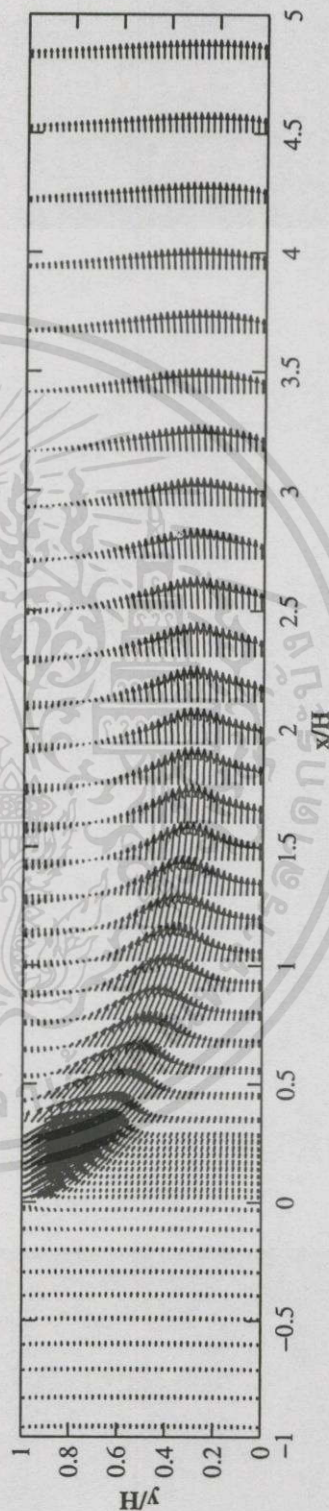
#### 5.3.3.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress model (ASM)

จากการทำนายการไหลโดย ASM ที่ใช้ 4 schemes คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU schemes แสดงในรูปที่ 5.40 ซึ่งมีตำแหน่งที่แสดงเช่นเดียวกับรูปที่ 5.37

รูปที่ 5.40 เป็นรูปที่แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  เมื่อทำการฉีดที่มุม 60 องศา จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ที่ตำแหน่ง  $x/H = 0.15, 0.75$  และ  $16.5$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีผลการทดลองเปรียบเทียบ ปรากฏว่า SOU scheme ทำนายได้ใกล้เคียงที่สุด



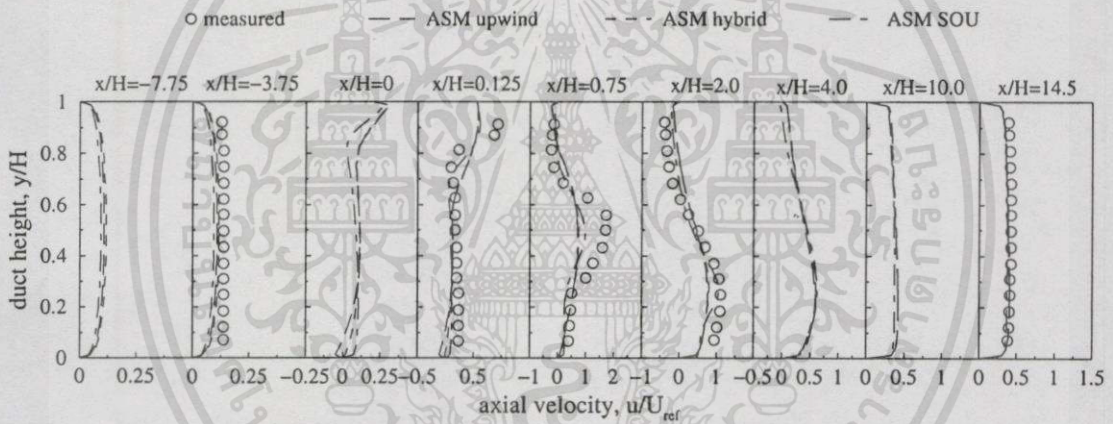
รูปที่ 5.38 Contour plot ของ stream function กรณีที่คำนวณ 60 องศา ทำนายโดย  $k - \epsilon$  model ร่วมกับ SOU scheme



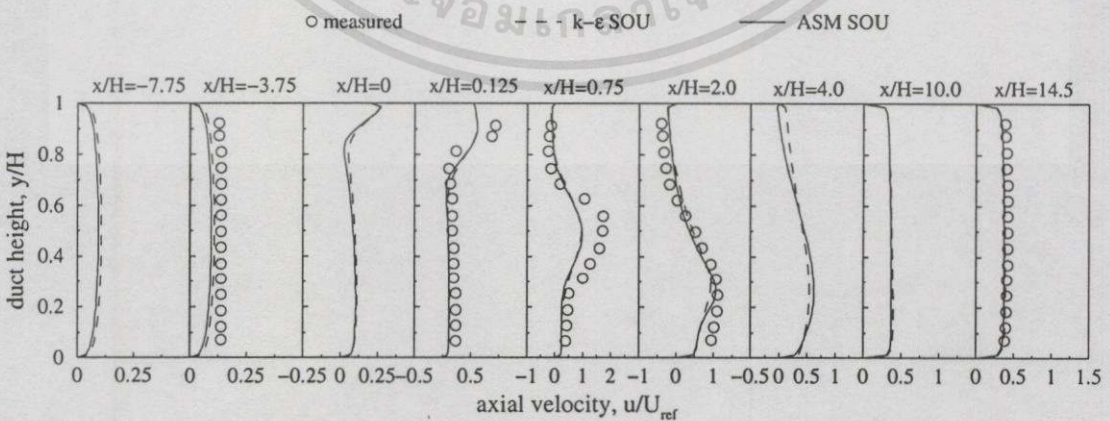
รูปที่ 5.39 Vector plot ของความเร็ว กรณีที่คำนวณ 60 องศา ทำนายโดย  $k - \epsilon$  model ร่วมกับ SOU scheme

รูปที่ 5.41 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณโดย  $k-\epsilon$  model กับ ASM ที่ใช้ SOU scheme จากรูปพบว่า ความเร็วที่คำนวณในช่วงก่อนถึงช่องฉีดของ  $k-\epsilon$  model มีค่ามากกว่า ASM เล็กน้อย ส่วนในช่วงหลังจากช่องฉีดค่าความเร็วจากทั้ง 2 model ไม่แตกต่างกัน และพิจารณาในตำแหน่งที่มีการวัดพบว่า ASM ทำนายได้ดีกว่า  $k-\epsilon$  model เล็กน้อย

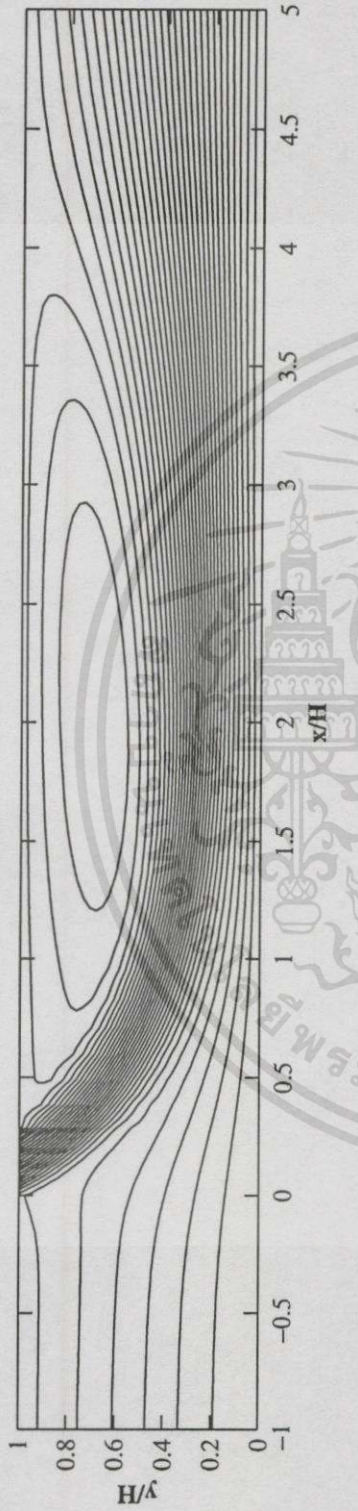
Contour plot และ vector plot ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ SOU scheme แสดงในรูปที่ 5.42 และ 5.43 ตามลำดับ จากรูปที่ 5.42 แสดง contour plot ของ stream function จากรูปสังเกตว่าพบ recirculation ที่ตำแหน่งถัดไปจากช่องฉีด เมื่อพิจารณาจาก vector plot ของความเร็วดังแสดงในรูปที่ 5.43 ก็พบ vector ของความเร็วที่ไหลย้อนกลับที่บริเวณใต้ผนังด้านบนของช่องถัดจากช่องฉีด ของความเร็วที่ไหลย้อนกลับที่บริเวณใต้ผนังด้านบนของช่องถัดจากช่องฉีดโดยจุด reattachment ที่  $x/H$  ประมาณ 4.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ contour plot ที่ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model แล้วเห็นได้ว่าขนาดของ recirculation มีขนาดที่โตกว่า



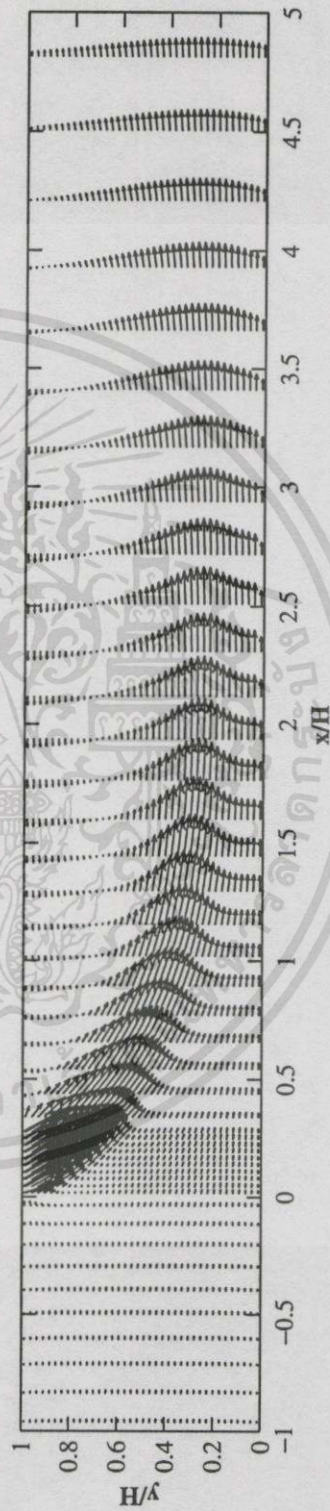
รูปที่ 5.40 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 60 องศา ทำนายโดย ASM



รูปที่ 5.41 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวแกน กรณีฉีดทำมุม 60 องศา ระหว่าง  $k-\epsilon$  model กับ ASM



รูปที่ 5.42 Contour plot ของ stream function กรณีนี้จัดทำม 60 องศา ทำนายโดย ASM ร่วมกับ SOU scheme



รูปที่ 5.43 Vector plot ของความเร็ว กรณีนี้จัดทำม 60 องศา ทำนายโดย ASM ร่วมกับ SOU scheme

## 5.4 สรุป

ผลการทำนายการไหลภายในช่องการไหลที่มีการฉีดด้านข้างโดยเปรียบเทียบระหว่าง  $k-\varepsilon$  model กับ ASM ของทั้งกรณีฉีดของไหลแนวตั้งฉากและฉีดของไหลทำมุมกับช่องการไหลสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

**การฉีดของไหลในกรณีช่องฉีดวางอยู่ในแนวตั้งฉากกับช่องการไหล**

1. การทำนายการไหลโดย  $k-\varepsilon$  model ดีกว่าการทำนายโดย ASM เล็กน้อยในบริเวณช่องฉีด
2. ผลของ numerical differencing scheme ต่างๆ ที่ใช้พบว่า upwind และ hybrid schemes ซึ่งเป็น first order scheme ประมวลค่าได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า QUICK และ SOU schemes
3. ความผิดพลาดของการทำนายที่เกิดขึ้นบริเวณช่องฉีด น่าจะมีสาเหตุมาจากการใช้แบบจำลองที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง (modified) สำหรับผลของการไหลในชั้นซิดผิว (boundary layer)

**การฉีดของไหลในกรณีช่องฉีดทำมุมกับช่องการไหล**

1. ผลการทำนายการไหลที่ทำนายโดย ASM เมื่อมองโดยรวมแล้วทำนายได้ดีกว่า  $k-\varepsilon$  model
2. การทำนายที่ใช้ SOU scheme ในการคำนวณพบว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าการใช้ upwind และ hybrid schemes
3. การเพิ่มมุมของการฉีดจะก่อให้เกิด recirculation ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังที่ได้แสดงในรูปของ contour plot และ vector plot ของการฉีดในมุม 45 และ 60 องศา ส่วนมุมที่มีขนาด 30 องศา จะไม่เห็น recirculation

ในบทถัดไปจะทำการศึกษาการฉีดของไหลในแนวสัมผัสกับช่องการไหล

## บทที่ 6

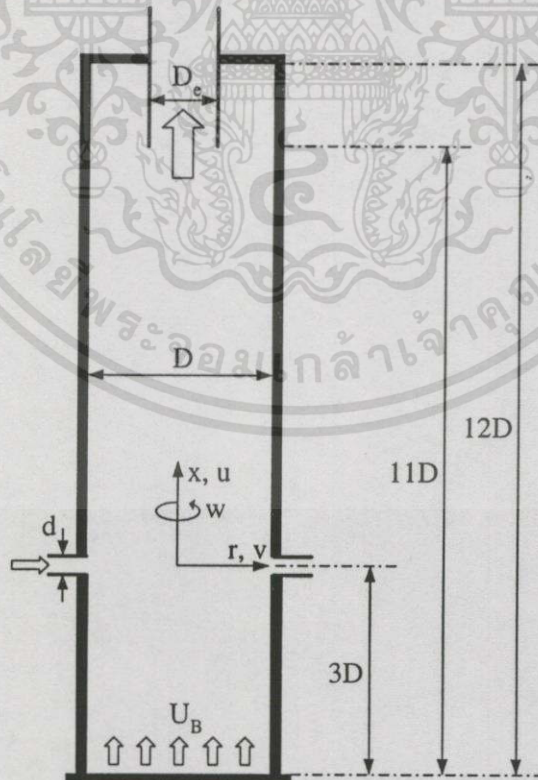
# การทำนายการไหลในเตาฟลูอิดไดซ์เบด แบบฉีดอากาศทุติยภูมิแนวสัมผัสด้านข้าง

### 6.1 บทนำ

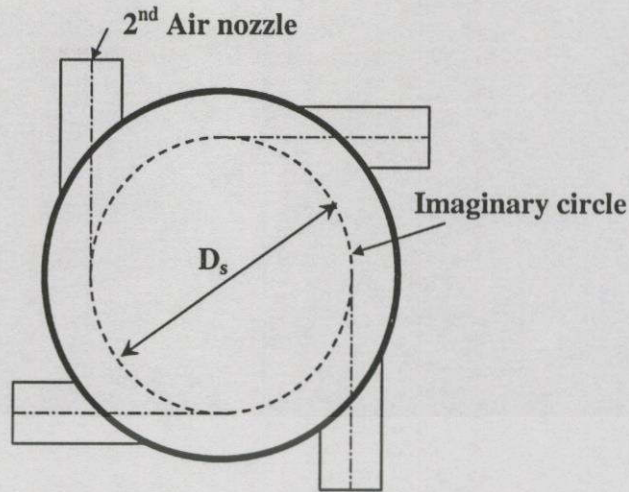
ในบทก่อนหน้านี้นี้เป็นการศึกษาการฉีดของไหลในช่องการไหล 2 มิติบนพิกัดฉาก ในบทนี้นำเสนอผลการทำนายการไหลในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีดอากาศทุติยภูมิด้านข้าง ซึ่งมองเป็นการไหลใน 2 มิติบนพิกัดทรงกระบอก โดยแบ่งเป็น 3 กรณี ดังแสดงในหัวข้อตั้งแต่ 6.3-6.6 ตามลำดับ

### 6.2 เตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีดอากาศทุติยภูมิแนวสัมผัสด้านข้าง

Lin *et. al.* (1998) ได้รับทุนจาก NSC (National science council, Republic of China) ในการวัดการไหลในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีดอากาศทุติยภูมิด้านข้าง (vortexing fluidized bed combustor, VFBC) โดยใช้ 5-hole Pitot tube ซึ่งจากความละเอียดและความถูกต้องของผลที่ได้นี้ ถูกนำไปใช้เพื่อเปรียบเทียบในการจำลองการไหลนี้ เตามีลักษณะดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ลักษณะเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีดอากาศทุติยภูมิด้านข้าง (VFBC) ของ Lin *et. al.* (1998)  
และ computational domain



รูปที่ 6.2 Imaginary circle และ การจัดวาง secondary air injection nozzles

ในรูปที่ 6.2 แสดงการจัดวางหัวฉีด (nozzle) ที่ใช้ในการทดลองโดยมีแนวของการฉีดของอากาศทุติยภูมิสัมผัสกับ imaginary circle ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ  $D_s$

การทดลองของ Lin *et al.* (1998) ไม่ได้บอกค่าความเร็วอากาศปฐมภูมิกับอากาศทุติยภูมิที่ทางเข้าทั้งสอง ดังนั้นเงื่อนไขทางเข้าสำหรับความเร็วในแนวสัมผัส ( $w$ ) หาได้โดยการประมาณนอกช่วง (extrapolated) จากค่าความเร็วของผลการทดลอง ส่วนความเร็วในแนวแกน ( $U_B$ ) และความเร็วในแนวรัศมี ( $V_j$ ) หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิกับอากาศทุติยภูมิซึ่งหาได้จากสมการดังนี้

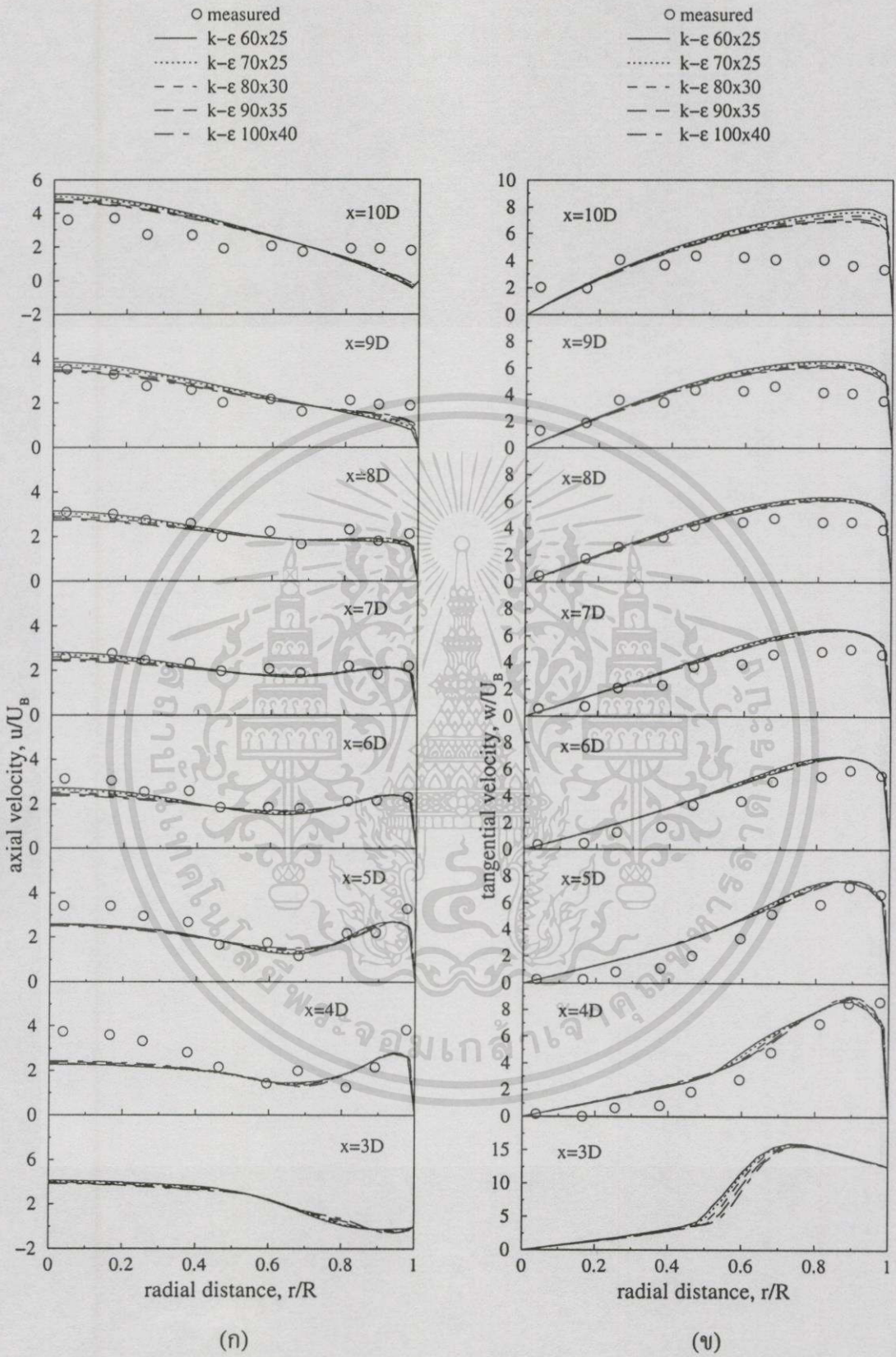
$$U_B = Q_r \times \frac{4w}{D_s} \times \frac{d_0^2}{D}$$

$$V_j = w \frac{\sqrt{D_s^2 + D^2}}{D_s}$$

$$l = \frac{d_0^2}{\sqrt{D_s^2 + D^2}}$$

โดยที่  $Q_r$  เป็นอัตราส่วนการฉีด ( $Q_r = Q_B/Q_j$ ,  $Q_B$  และ  $Q_j$  เป็นอัตราการไหลอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิตามลำดับ),  $U_B$  เป็นความเร็วในแนวแกน,  $V_j$  ความเร็วในแนวรัศมี,  $l$  เป็นขนาดของช่องฉีดที่ใช้ในการคำนวณ ในการทำนายจะกำหนดให้  $D = 190$  mm,  $d_0 = 19$  mm,  $D_c = 0.095$  mm

ในการจำลองการไหลนี้ได้ใช้เงื่อนไขของ axisymmetry ในการคำนวณ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการใช้  $k-\epsilon$  model และ ASM ที่ใช้ numerical differencing scheme 4 แบบ คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU schemes ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ Lin *et al.* (1998) ที่ตำแหน่ง  $x = 4D, 5D, 6D, 7D, 8D, 9D$  และ  $10D$



รูปที่ 6.3 ความเป็นอิสระของกริดต่อความเร็วตามแนวแกนและแนวสัมผัสที่ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาความเป็นอิสระของกริด (grid independent) ต่อผลการทำนายความเร็วตามแนวแกน และตามแนวสัมผัส ได้แสดงในรูปที่ 6.3 ซึ่งทำการคำนวณที่จำนวนกริดเท่ากับ  $60 \times 25$ ,  $70 \times 25$ ,  $80 \times 30$ ,  $90 \times 35$  และ  $100 \times 40$  จากการวิเคราะห์พบว่าจำนวนกริดมีผลต่อการทำนายการไหลพอสมควร แต่ค่าที่ได้ก็ไม่แตกต่างกันมากดังนั้นในการคำนวณจะเลือกใช้กริดขนาด  $80 \times 30$  ก็เพียงพอ

### 6.3 เตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีดอากาศทุติยภูมิด้านข้างในแนวสัมผัส กรณี $Q_r = 2$ และ $D_s/D = 0.5$

การทำนายการไหลในกรณีนี้เมื่อทำการประมาณนอกช่วงความเร็วฉีดในแนวสัมผัสจากการทดลองจะได้  $w = 9 \text{ m/s}$  และคำนวณความเร็วที่ทางเข้าของอากาศปฐมภูมิ,  $U_b = 1.44 \text{ m/s}$  และความเร็วฉีดในแนวรัศมี,  $V_j = 15.59 \text{ m/s}$  ส่วนขนาดของช่องฉีด,  $l = 2.194 \text{ mm}$

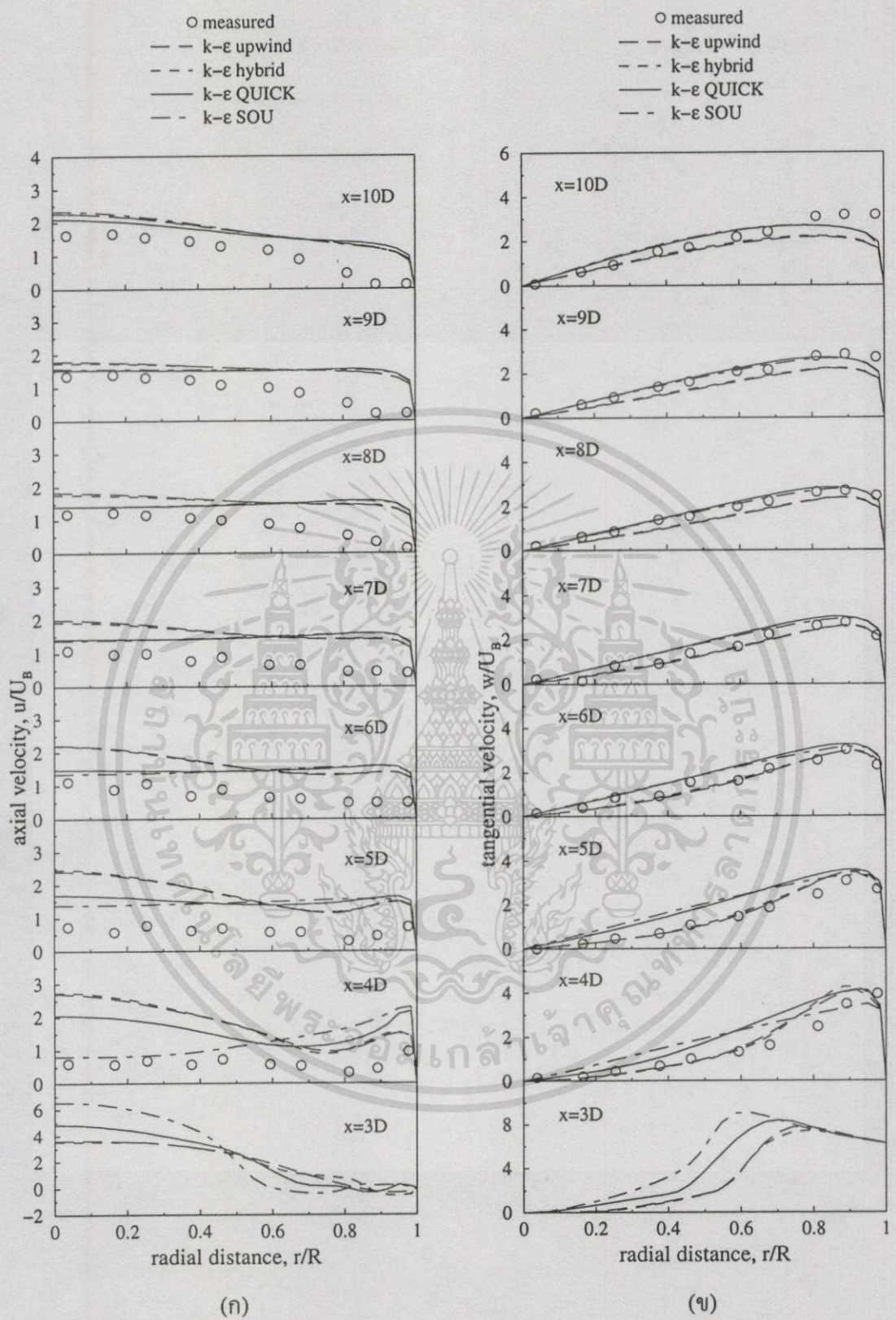
#### 6.3.1 การทำนายการไหลโดย $k-\epsilon$ model

จากการจำลองการไหลโดย  $k-\epsilon$  model ร่วมกับ scheme ต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงในรูปของความเร็วมตามแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 6.4(ก) และ 6.4(ข) ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วจากระยะกึ่งกลางถึงผนัง รูปที่ 6.4(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน จากรูปพบว่าในตำแหน่ง  $x = 3D$  ค่าที่คำนวณจาก SOU scheme ทำนายได้ดีกว่าเนื่องจากมีความสอดคล้องกับการกระจายของความเร็วในบริเวณดังกล่าว ส่วนในตำแหน่งที่เหลือค่าที่คำนวณได้ทั้ง 4 schemes มีค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อยโดยจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ได้จาก upwind และ hybrid schemes กับ QUICK และ SOU schemes ซึ่งคำตอบที่ได้จาก QUICK และ SOU schemes สามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลองมากกว่า

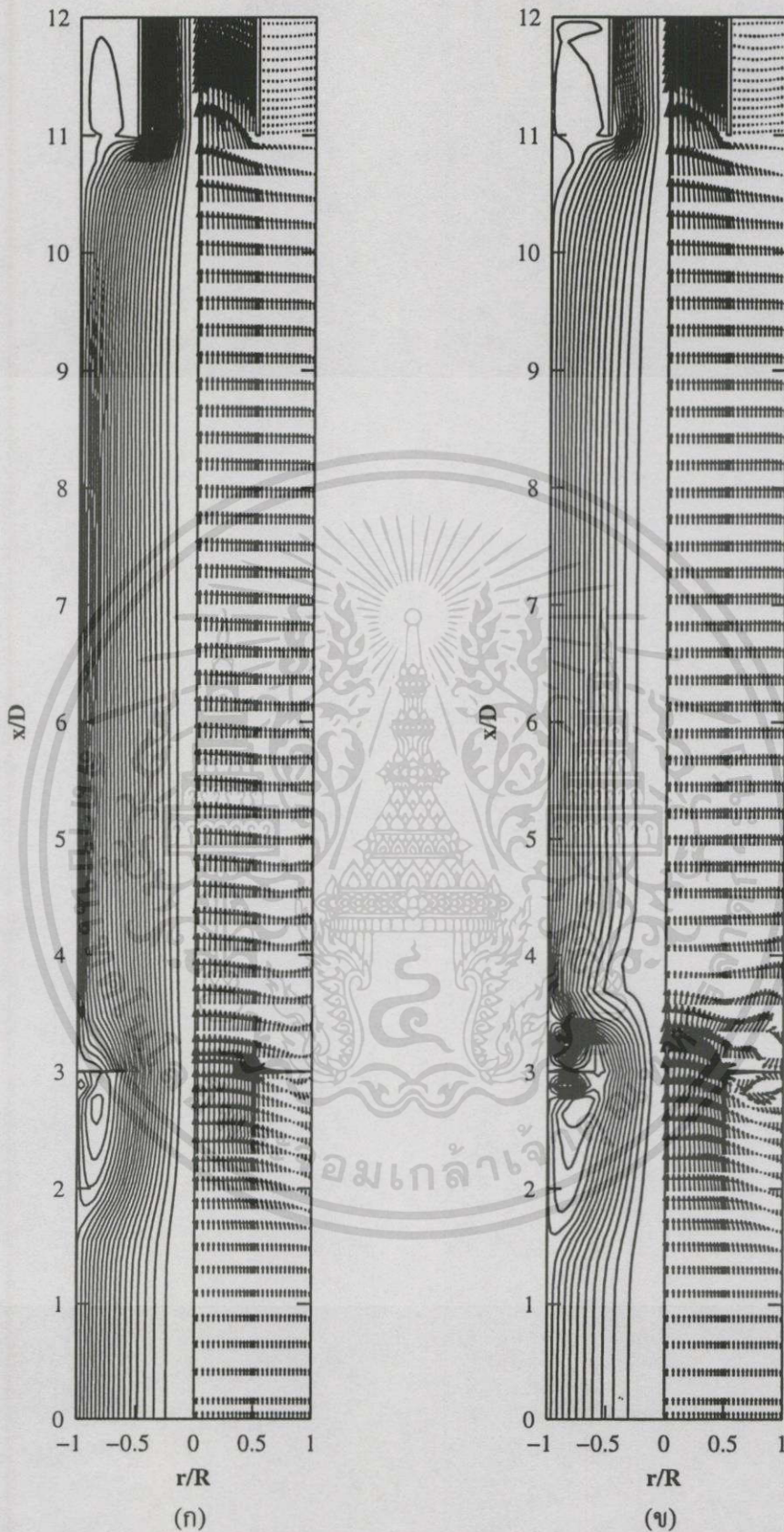
การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวสัมผัสแสดงในรูป 6.4(ข) จากรูปการทำนายของทั้ง 4 schemes มีลักษณะเดียวกับการทำนายในแนวแกน แต่ค่าที่ได้จาก upwind และ hybrid schemes จะทำนายได้ดีในตำแหน่ง  $x = 4D$  ถึง  $7D$  ส่วนตำแหน่งที่เหลือ QUICK และ SOU schemes ทำนายได้ดีกว่า โดยภาพรวมแล้วจะเห็นว่า upwind scheme ทำนายค่าได้ใกล้เคียงกว่า scheme อื่นๆ

Contour plot ของ stream function และ vector plot ที่ทำนายโดย upwind และ SOU schemes ได้แสดงในรูปที่ 6.5(ก) และ 6.5(ข) ตามลำดับ จาก contour plot ของรูปที่ 6.5(ก) และ 6.5(ข) สังเกตว่า การทำนายโดย SOU scheme จะเกิด recirculation ที่เห็นเด่นชัดกว่า upwind scheme

จาก vector plot รูปที่ 6.5(ก) สามารถสังเกตเห็น recirculation วงใหญ่ด้านล่างของช่องฉีดที่พบใน contour plot ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยเกิดขึ้นที่บริเวณ  $x/D = 1.8$  ถึง  $3$  และ  $r/R = 0.7$  ถึง  $1.0$  นอกจากนี้ยังพบ recirculation วงเล็กที่ตำแหน่ง  $x/D = 2.9$  และ  $r/R = 0.95$  ส่วน vector plot ที่ด้านปลายทางออกบริเวณปล่องกับผนังเตามีขนาดเล็กมาก ส่วนใน vector plot ของรูปที่ 6.5(ข) ก็สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางของความเร็วได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 6.4 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย  $k - \epsilon$  model (ก) ความเร็วตามแนวแกน(ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส



รูปที่ 6.5 Contour plot ของ stream function กับ vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย  $k-\varepsilon$  model ที่ใช้ (ก) upwind scheme และ (ข) SOU scheme

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress model (ASM)

การจำลองโดยใช้ ASM ร่วมกับ scheme ต่างๆ ได้นำมาแสดงในรูปของความเร็วตามแนวแกน, ความเร็วตามแนวสัมผัส, contour plot และ vector plot

รูปที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วจากระยะกึ่งกลางถึงผนังของความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัสในรูปที่ 6.6(ก) และ 6.6(ข) ตามลำดับ รูปที่ 6.6(ก) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน พบว่าในตำแหน่ง  $x = 3D$  ถึง  $8D$  ค่าที่คำนวณได้จาก SOU scheme มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าโดยเฉพาะในตำแหน่งที่ใกล้กับช่องฉีด ในบริเวณ  $r/R$  ประมาณ 0 ถึง 0.5 ส่วนความเร็วในแนวแกนสัมผัสในรูปที่ 6.6(ข) พบว่า upwind และ hybrid schemes ทำนายได้ใกล้เคียงกว่า SOU scheme อย่างชัดเจนในช่วง  $r/R$  ประมาณ 0 ถึง 0.6 ย่อมแสดงถึงการกระจายความเร็วในบริเวณดังกล่าวเป็นลักษณะเชิงเส้น

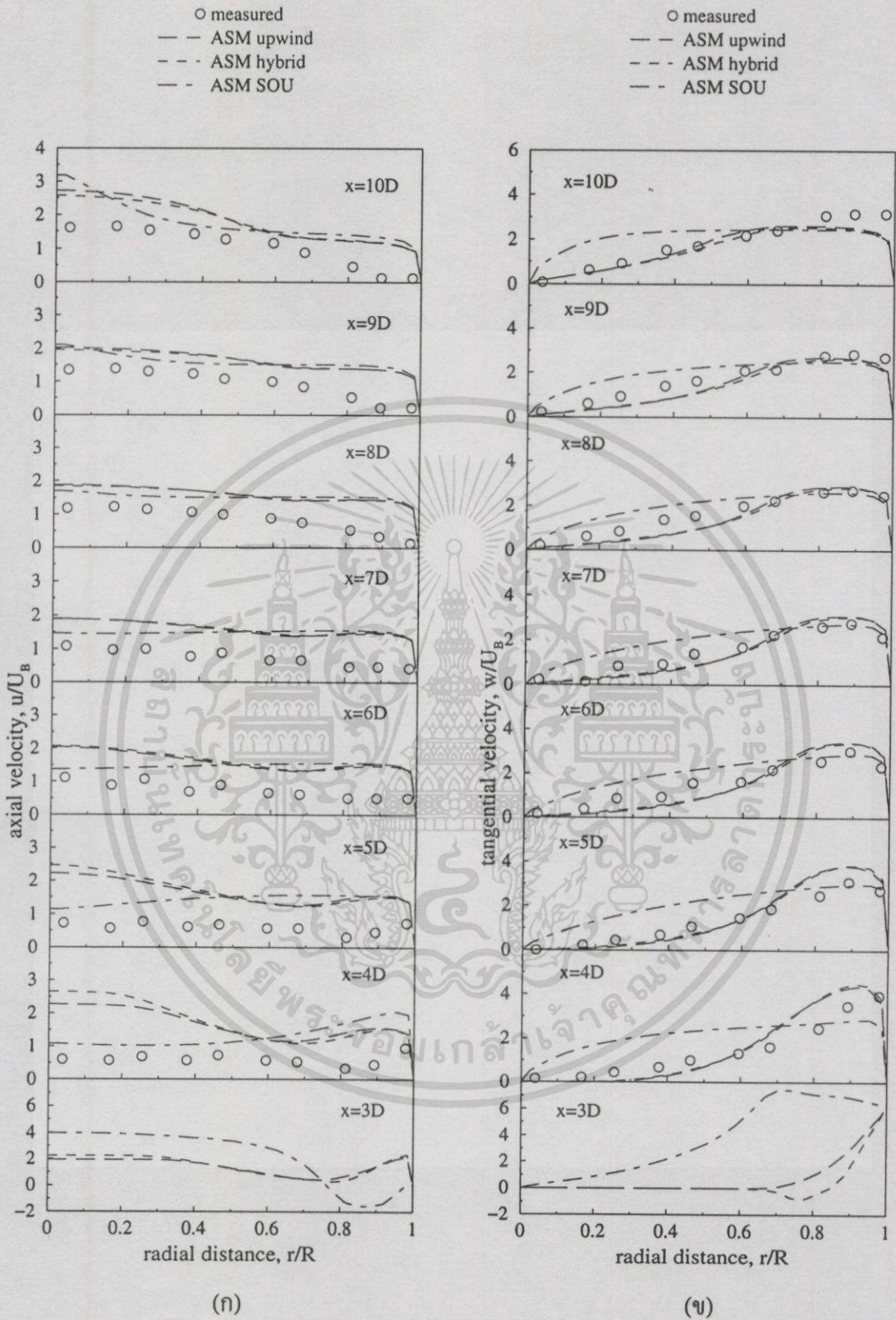
Contour plot และ vector plot ที่ทำนายโดย upwind และ SOU schemes ได้แสดงในรูปที่ 6.7 (ก) และ 6.7(ข) ตามลำดับ จาก contour plot ของรูปทั้งสอง สันเกตว่า การทำนายโดย SOU scheme จะเกิด recirculation ที่ตำแหน่งใต้และเหนือช่องฉีด ในขณะที่ผลจาก upwind กลับไม่แสดงให้เห็น recirculation ที่ตำแหน่งดังกล่าว แสดงว่าความสามารถของ SOU scheme ในการแทนลักษณะการกระจายความเร็วได้เป็นอย่างดี

จาก vector plot รูปที่ 6.7(ก) สามารถเห็นได้ว่าไม่มีการไหลย้อนกลับซึ่งก็ยืนยัน ผลที่พบใน contour plot ชัดเจนยิ่งขึ้น ส่วนใน vector plot ของรูปที่ 6.5(ข) จะสังเกตเห็นการไหลย้อนกลับของ vector ความเร็วได้อย่างชัดเจนที่ตำแหน่งใต้ช่องฉีด

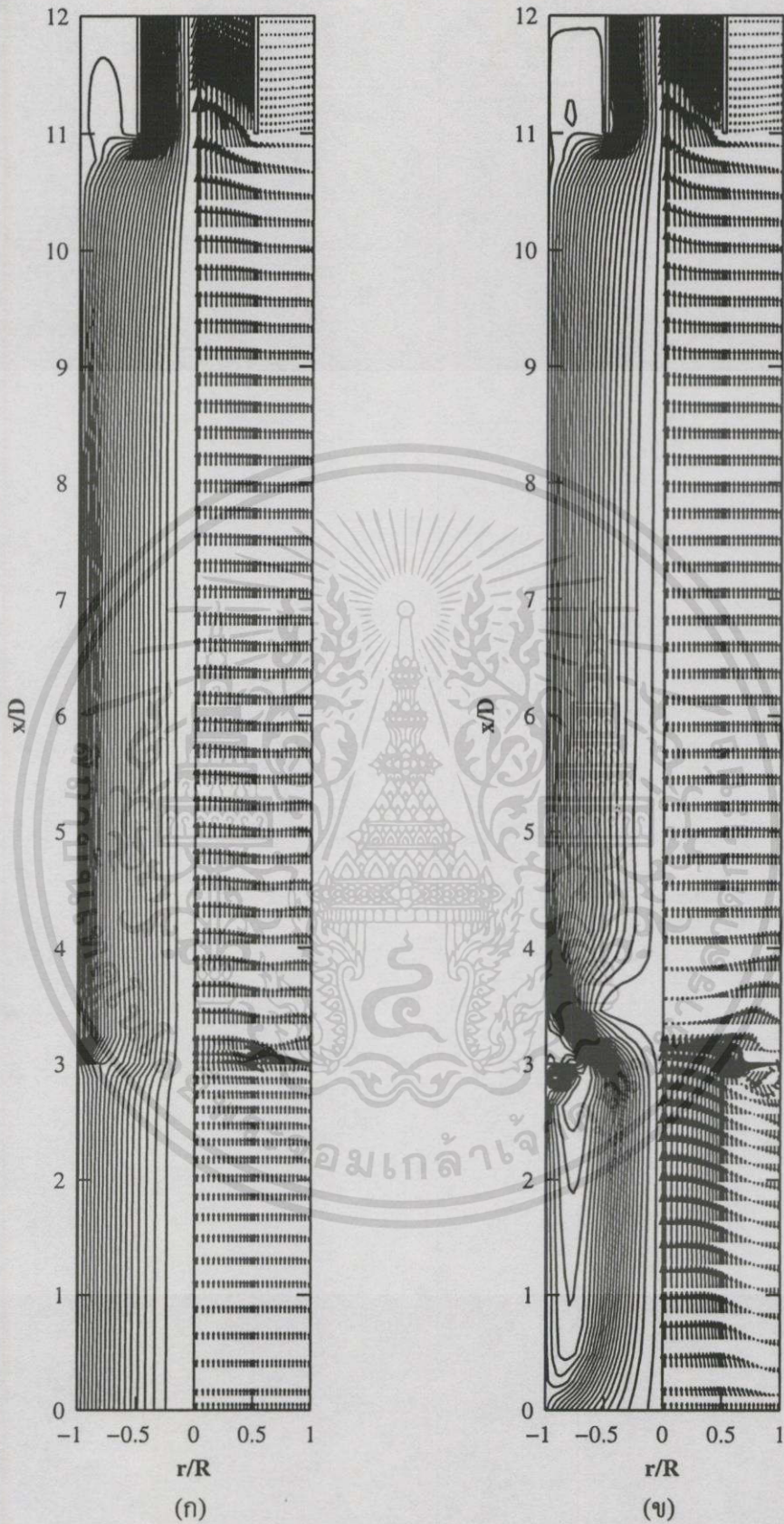
การจำลองการไหลโดย ASM ซึ่งทำการเปรียบเทียบความสามารถของ scheme ต่างๆ คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU อาจสรุปได้ว่า SOU scheme ทำนายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่สลับบนความเร็วในแนวแกน ในขณะที่ upwind และ hybrid scheme ทำนายความเร็วในแนวสัมผัสได้ใกล้เคียงดีกับผลการทดลอง

รูป 6.8(ก) และ 6.8(ข) เป็นรูปที่เปรียบเทียบผลการทำนายโดย  $k-\epsilon$  model กับ ASM ของความเร็วในแนวแกนและความเร็วในแนวสัมผัสตามลำดับ จากรูปที่ 6.8(ก) ซึ่งเป็นความเร็วในแนวแกนที่ใช้ SOU scheme ในการคำนวณของทั้ง 2 แบบจำลองพบว่า ค่าที่ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model นั้นใกล้เคียงกับผลการการทดลองมากกว่า ASM ส่วนการเปรียบเทียบแบบจำลองในการทำนายความเร็วในแนวสัมผัสซึ่งใช้ upwind scheme ในรูปที่ 6.8(ข) สันเกตว่าผลการเปรียบเทียบเหมือนกับในแนวแกนคือ  $k-\epsilon$  model ทำนายได้ใกล้เคียงกว่า ASM สรุปแล้วความสามารถของทั้ง 2 แบบจำลองไม่มีแตกต่างกันและความผิดพลาดส่วนใหญ่น่าจะมีสาเหตุจากการไหลแบบสามมิติ

จากผลการทำนายการไหลในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีดอากาศทุติยภูมิด้านข้าง กรณี  $Q_r = 2$ ,  $D_s/D = 0.5$  จะพบ recirculation ใต้ช่องฉีดซึ่ง recirculation นี้จะช่วยทำให้การผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศได้ดียิ่งขึ้นและยังเพิ่ม resident time ของเชื้อเพลิงในเตาอีกด้วย

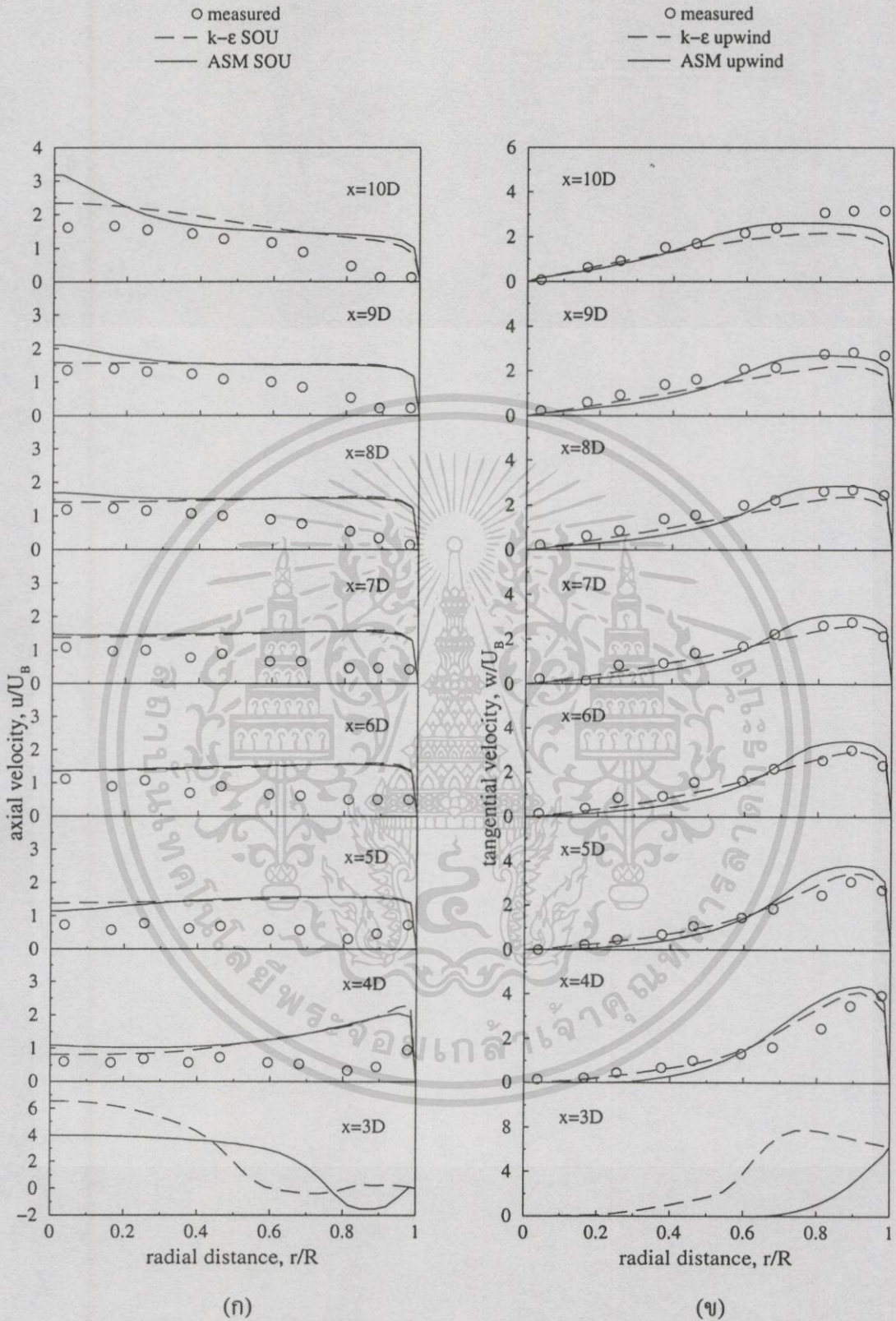


รูปที่ 6.6 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส



รูปที่ 6.7 Contour plot ของ stream function กับ vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย ASM ที่ใช้  
(ก) upwind scheme และ (ข) SOU scheme

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 กราฟเปรียบเทียบการทำนายระหว่าง  $k-\epsilon$  model กับ ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส

## 6.4 เตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีดอากาศทุติยภูมิด้านข้างในแนวสัมผัส กรณี $Q_r = 1$ และ $D_s/D = 0.5$

การทำนายการไหลในกรณีนี้เมื่อทำการประมาณนอกช่วงความเร็วฉีดในแนวสัมผัสจากผลการทดลองจะได้  $w = 15$  m/s และคำนวณความเร็วที่ทางเข้าของอากาศปฐมภูมิ,  $U_b = 1.2$  m/s และความเร็วการฉีดอากาศทุติยภูมิในแนวรัศมี,  $V_j = 25.98$  m/s ส่วนขนาดของช่องฉีด,  $l = 2.194$  mm

### 6.4.1 การทำนายการไหลโดย $k - \epsilon$ model

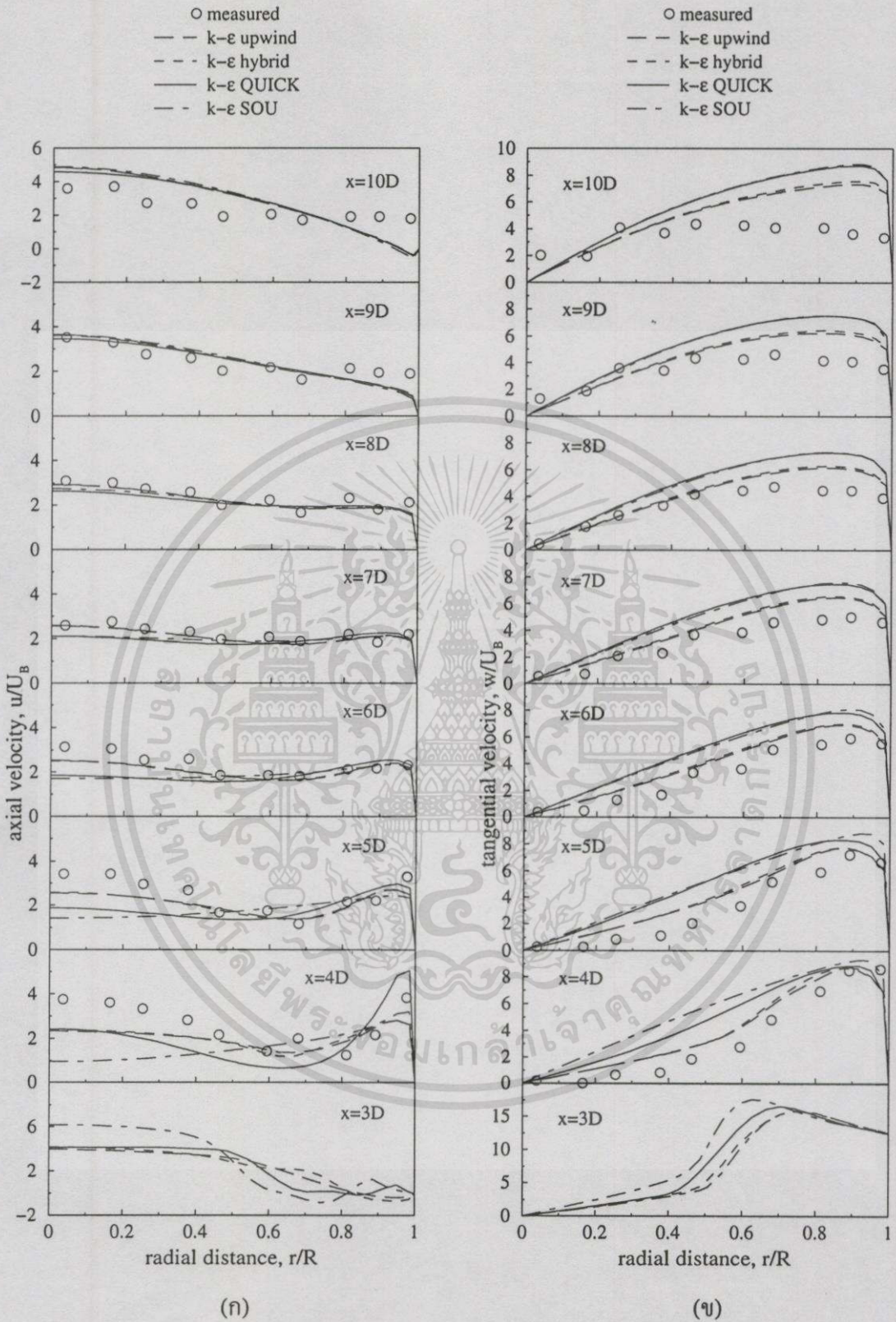
จากการจำลองการไหลโดย  $k - \epsilon$  model ร่วมกับ scheme ต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงในรูปของความเร็วด้านแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 6.9(ก) และ 6.9(ข) ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วจากระยะกึ่งกลางถึงผนัง รูปที่ 6.9(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วด้านแนวแกน จากรูปพบว่าในตำแหน่ง  $x = 8D$  ถึง  $10D$  ซึ่งเป็นตำแหน่งส่วนปลายของเตาค่าที่คำนวณได้ทั้ง 4 schemes มีค่าที่ไม่แตกต่าง ในขณะที่ตำแหน่งบริเวณช่องฉีดพบว่าการคำนวณโดยใช้ upwind และ hybrid schemes ซึ่งเป็น first order accurate ทำนายได้ดีใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าการคำนวณโดย QUICK และ SOU schemes ซึ่งเป็น second order accurate

การเปลี่ยนแปลงของความเร็วด้านแนวสัมผัสแสดงในรูป 6.9(ข) จากรูปการทำนายของทั้ง 4 schemes มีลักษณะเดียวกับการทำนายในแนวแกน ค่าที่ได้จาก upwind และ hybrid schemes จะทำนายได้ดีใกล้เคียงกับผลการทดลองกว่าได้ดีกว่า QUICK และ SOU schemes ในทุกตำแหน่งของ  $x = 4D$  ถึง  $10D$  โดยจะเห็นว่าลักษณะการไหลจะเป็น force vortex ในบริเวณส่วนปลายของท่อ

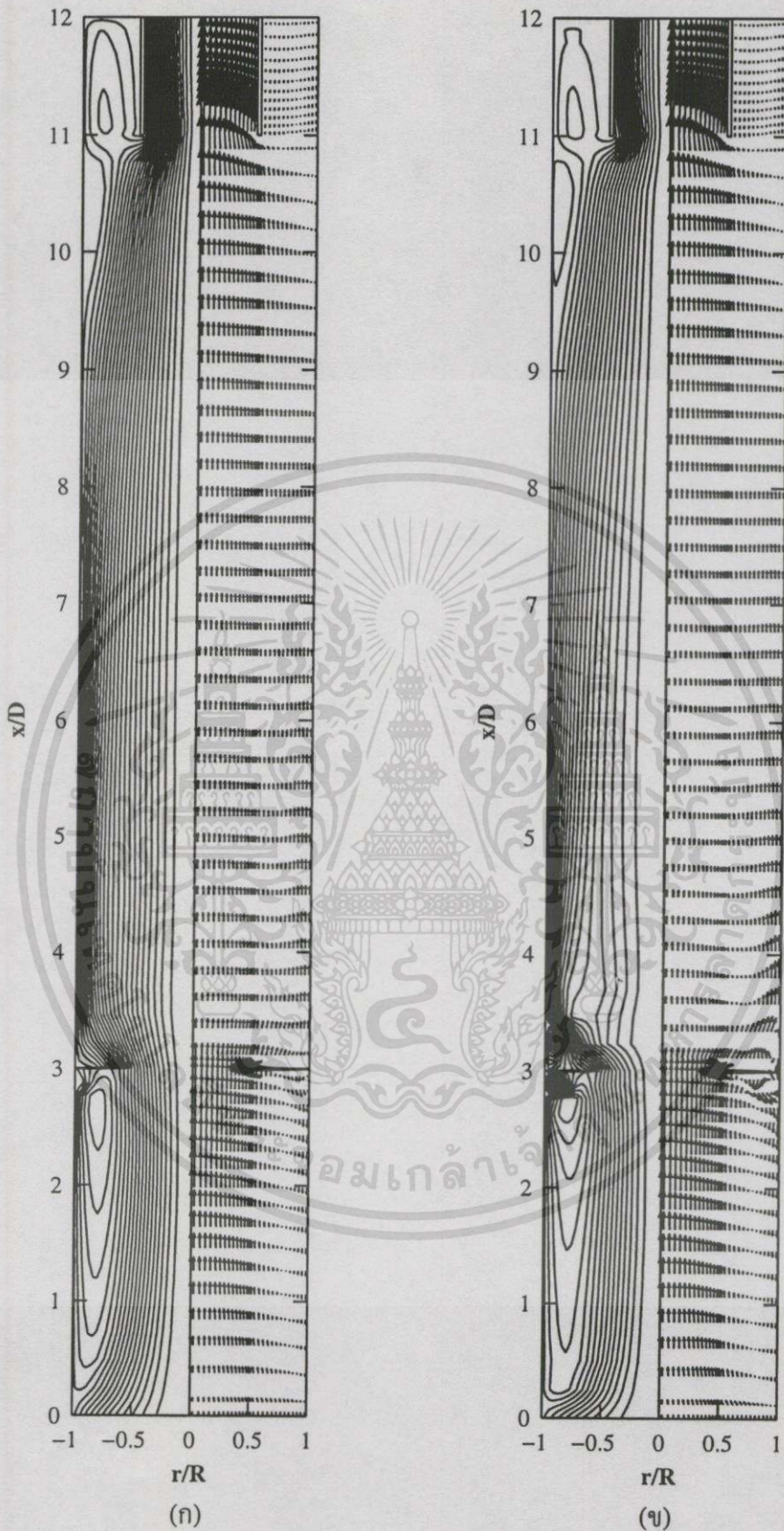
Contour plot ของ stream function และ vector plot ที่ทำนายโดย upwind และ SOU schemes ได้แสดงในรูปที่ 6.10(ก) และ 6.10(ข) ตามลำดับ จาก contour plot ของรูปที่ 6.10(ก) สังเกตว่ามี recirculation เกิดขึ้น 4 ตำแหน่งด้วยกัน ที่บริเวณด้านล่างช่องฉีด 2 ตำแหน่ง และที่ปลายทางออกที่อยู่ระหว่างปล่องกับผนังอีก 2 ตำแหน่ง ขณะที่ contour plot ของรูปที่ 6.10(ข) จะสังเกตเห็น recirculation ได้ถึง 6 ตำแหน่งด้วยกัน

จาก vector plot ในรูปที่ 6.10(ก) สามารถสังเกตเห็น recirculation วงใหญ่ด้านล่างของช่องฉีดที่พบใน contour plot ชัดเจนยิ่งขึ้นโดยเกิดขึ้นที่บริเวณ  $x/D = 0$  ถึง 3 และ  $r/R = 0.5$  ถึง 1.0 และ recirculation วงเล็กที่ตำแหน่งใกล้กับช่องฉีด ส่วนที่ด้านปลายทางออกบริเวณปล่องกับผนังเตามีขนาดของ vector ความเร็วขนาดเล็กมาก ใน vector plot ของรูปที่ 6.10(ข) สังเกตจะเห็นการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางของความเร็วที่บริเวณช่องฉีดได้อย่างชัดเจน

การจำลองการไหลโดย  $k - \epsilon$  model ซึ่งทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ scheme ต่างๆ คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU อาจสรุปได้ว่า upwind และ hybrid schemes ทำนายได้ดีใกล้เคียงกับผลการทดลองที่สุดบนความเร็วทั้งในแนวแกนและแนวสัมผัส



รูปที่ 6.9 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model (ก) ความเร็วตามแนวแกน  
(ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส



รูปที่ 6.10 Contour plot ของ stream function กับ vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย  $k - \epsilon$  model ที่ใช้ (ก) upwind scheme และ (ข) SOU scheme

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 6.4.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress model (ASM)

การจำลองโดยใช้ ASM ร่วมกับ scheme ต่างๆ ได้นำมาแสดงในรูปของความเร็วตามแนวแกน, ความเร็วตามแนวสัมผัส, contour plot และ vector plot

รูปที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วจากระยะกึ่งกลางถึงผนังของความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัสในรูปที่ 6.11(ก) และ 6.11(ข) ตามลำดับ รูปที่ 6.11(ก) ซึ่งแสดง

การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกน พบว่าในตำแหน่ง  $x = 4D$  และ  $5D$  ค่าที่คำนวณได้จาก upwind และ hybrid schemes มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า QUICK และ SOU schemes ส่วนความเร็วในแนวแกนสัมผัสในรูปที่ 6.11(ข) พบว่า ทำนายการไหลมีความผิดพลาดจากผลการทดลองแต่แนวโน้มของการทำนายของ upwind และ hybrid schemes จะดีกว่า SOU scheme โดยเฉพาะช่วงต้นของเตา

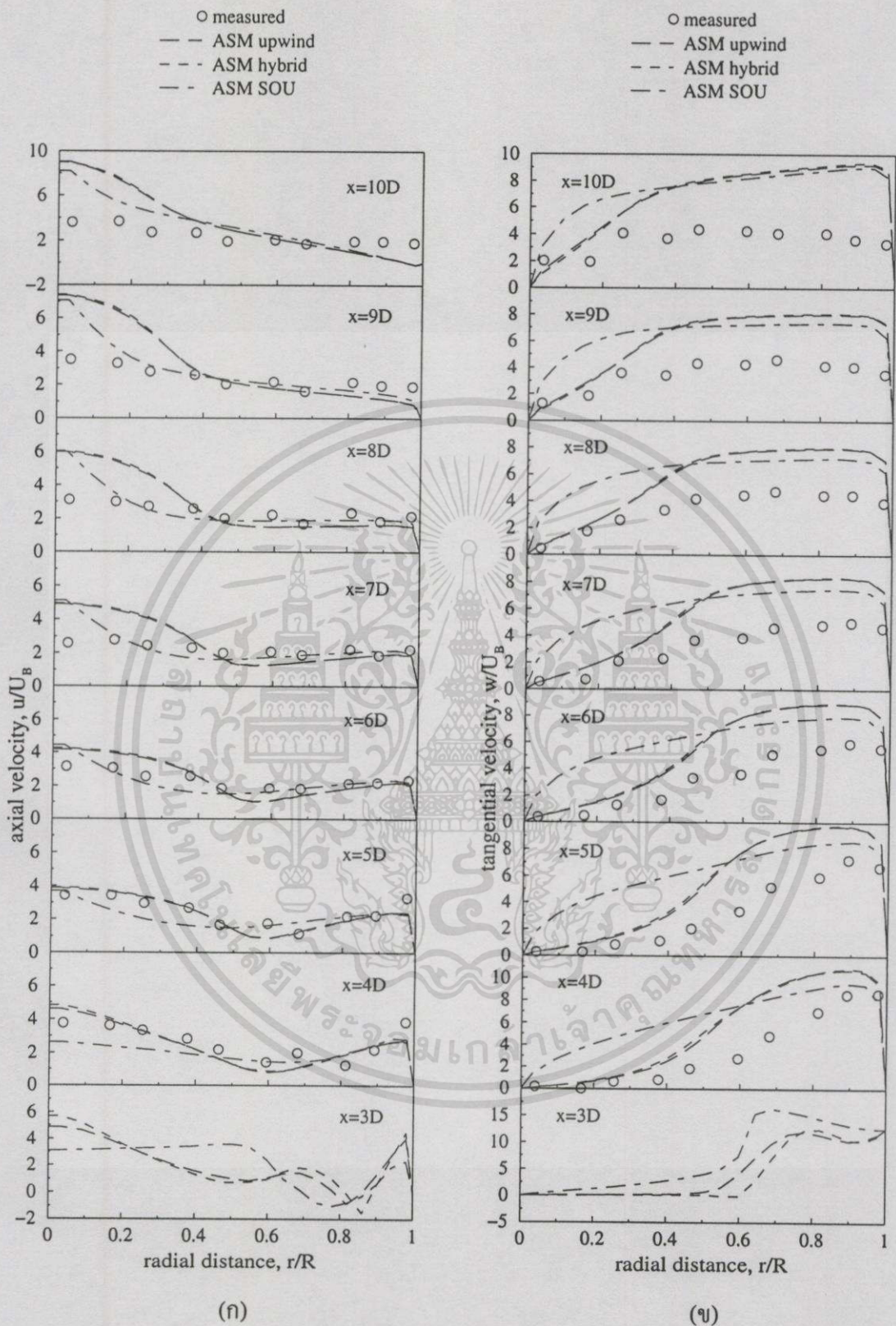
Contour plot และ vector plot ที่ทำนายโดย upwind และ SOU schemes ได้แสดงในรูปที่ 6.12 (ก) และ 6.12(ข) ตามลำดับ จาก contour plot ของรูปทั้งสอง สังเกตว่า การทำนายโดย SOU scheme ในรูปที่ 6.12(ข) จะเกิด recirculation ที่ตำแหน่งใต้และเหนือช่องฉีดยุติ ในขณะที่ผลจาก upwind กลับแสดงให้เห็น recirculation ในบริเวณช่องฉีดยุติเพียงตำแหน่งเดียวและมีขนาดเล็กมาก

จาก vector plot รูปที่ 6.12(ก) ไม่สามารถเห็นการไหลย้อนกลับซึ่งก็ยืนยัน ผลที่พบใน contour plot ชัดเจนยิ่งขึ้น ส่วนใน vector plot ของรูปที่ 6.12(ข) จะสังเกตเห็นการไหลย้อนกลับของ vector ความเร็วได้อย่างชัดเจนที่ตำแหน่งใต้ช่องฉีดยุติ

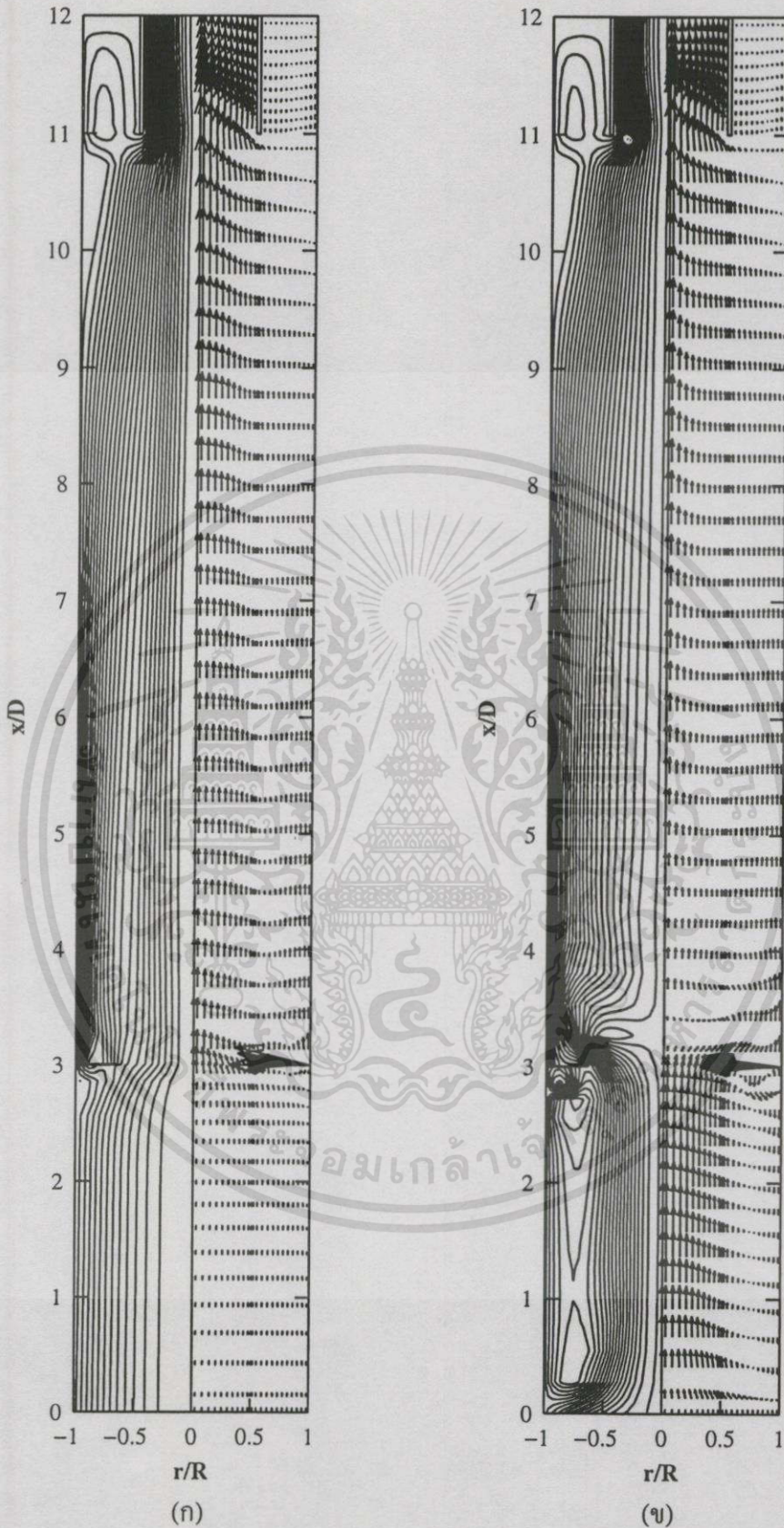
การจำลองการไหลโดย ASM ซึ่งทำการเปรียบเทียบความสามารถของ scheme ต่างๆ คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU อาจสรุปได้ว่า upwind และ hybrid schemes ทำนายความเร็วในแนวแกนได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า SOU scheme ในทำนองเดียวกัน upwind และ hybrid scheme ก็ทำนายความเร็วในแนวสัมผัสได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า

รูปที่ 6.13(ก) และ 6.13(ข) เป็นรูปที่เปรียบเทียบผลการทำนายโดย  $k-\epsilon$  model กับ ASM ของความเร็วในแนวแกนและความเร็วในแนวสัมผัสตามลำดับ จากรูปที่ 6.13(ก) ซึ่งเป็นความเร็วในแนวแกนที่ใช้ SOU scheme ในการคำนวณของทั้ง 2 แบบจำลองพบว่า ค่าที่ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model นั้นใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า ASM และเมื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองในการทำนายความเร็วในแนวสัมผัสในรูปที่ 6.13(ข) ซึ่งใช้ upwind scheme มีผลการเปรียบเทียบเหมือนกับในแนวแกนคือ  $k-\epsilon$  model ทำนายใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า ASM

ถ้าลองเปรียบเทียบกับในกรณี  $Q_r = 2$  และ  $D_r/D = 0.5$  ซึ่งมีการจัดวางแนวการฉีดที่เหมือนกัน แต่ในกรณีนี้ ( $Q_r = 1$ ) ได้เพิ่มความเร็วของการฉีดอากาศทุติยภูมิในแนวสัมผัสจากเดิม  $w = 9$  m/s เป็น  $w = 15$  m/s และความเร็วในแนวรัศมีจากเดิม  $V_j = 15.59$  m/s เป็น  $V_j = 25.98$  m/s พบว่าความสามารถของแบบจำลองในการทำนายมีความผิดพลาดมากขึ้นสาเหตุหลักน่าจะเกิดจากการไหลที่สลับซับซ้อนมากขึ้นในสามมิติ

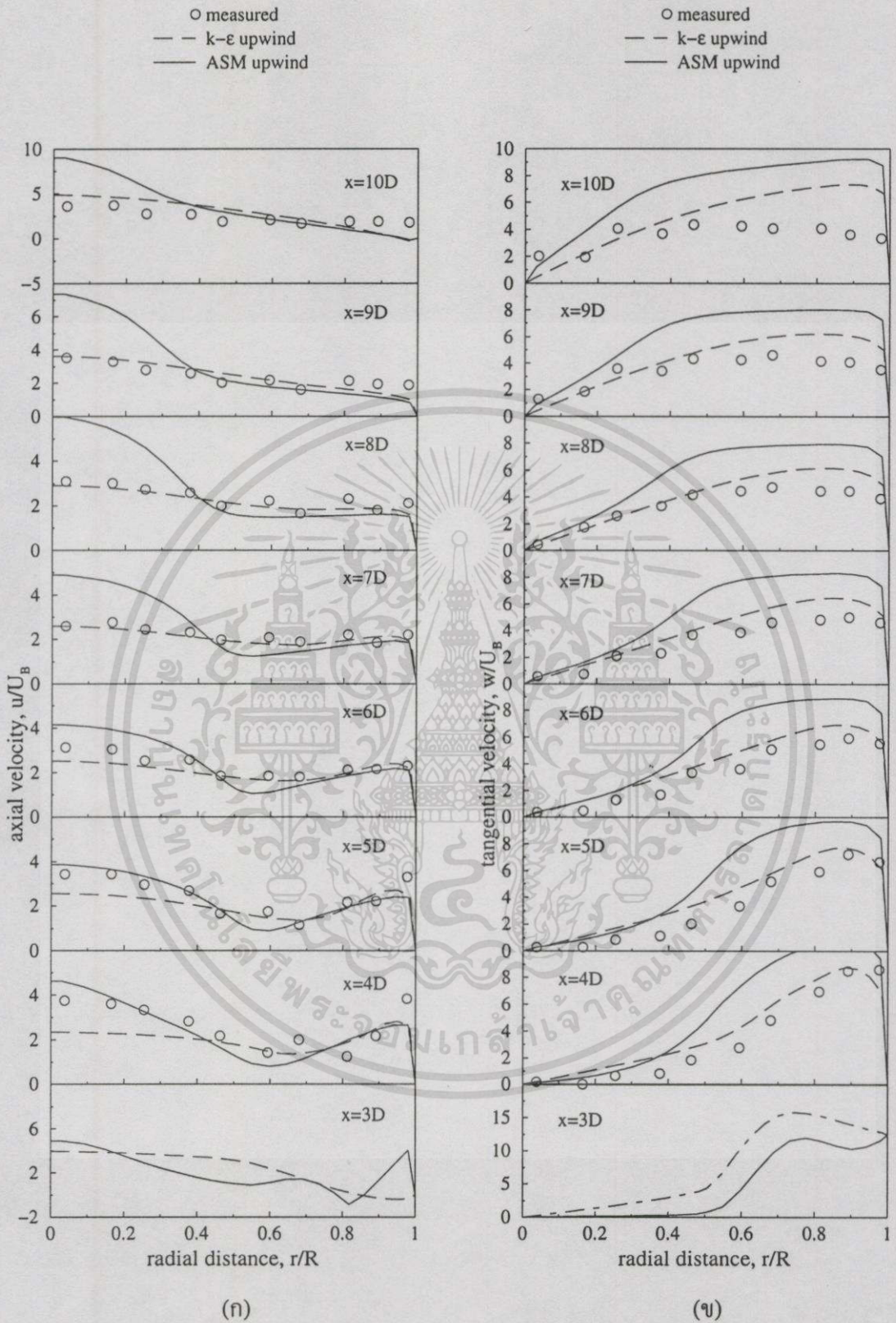


รูปที่ 6.11 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส



รูปที่ 6.12 Contour plot ของ stream function กับ vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย ASM ที่ใช้  
(ก) upwind scheme และ (ข) SOU scheme

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 กราฟเปรียบเทียบการทำนายระหว่าง  $k-\epsilon$  model กับ ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน  
 (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส

## 6.5 เตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีดอากาศทุติยภูมิด้านข้างในแนวสัมผัส กรณี $Q_r = 2$ และ $D_s/D = 1.0$

การทำนายการไหลในกรณีนี้เมื่อทำการประมาณนอกช่วงความเร็วฉีดในแนวสัมผัสจากผลการทดลองจะได้  $w = 9$  m/s และคำนวณความเร็วที่ทางเข้าของอากาศปฐมภูมิ,  $U_b = 0.8$  m/s และความเร็วการฉีดอากาศทุติยภูมิในแนวรัศมี,  $V_j = 4.3587$  m/s ส่วนขนาดของช่องฉีด,  $l = 4.359$  mm

### 6.5.1 การทำนายการไหลโดย $k-\epsilon$ model

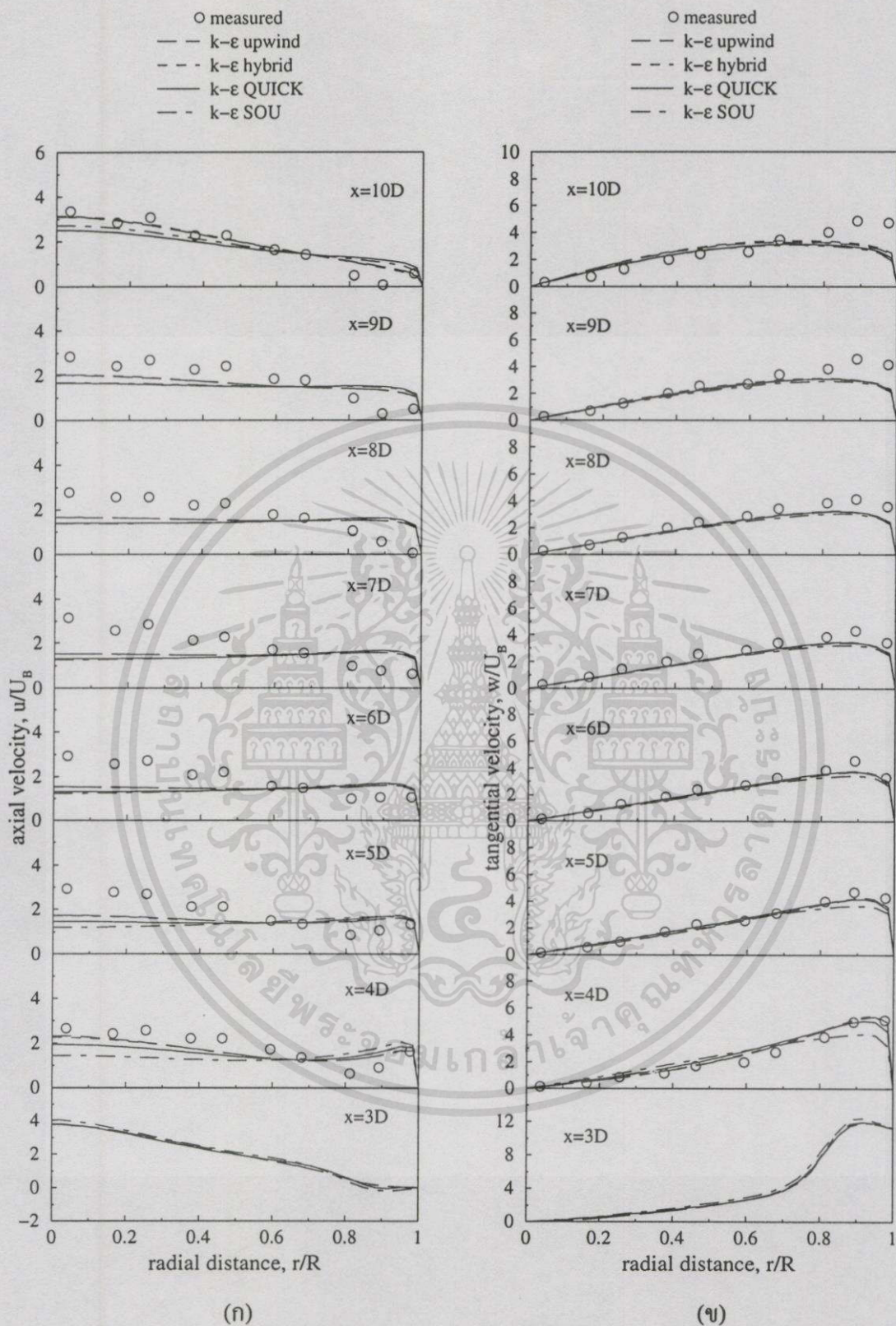
จากการจำลองการไหลโดย  $k-\epsilon$  model ร่วมกับ scheme ต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงในรูปของความเร็วด้านแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัส รวมถึง contour plot และ vector plot

ผลของความเร็วด้านแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัส ได้แสดงในรูปที่ 6.14(ก) และ 6.14(ข) ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วจากระยะกึ่งกลางถึงผนัง รูปที่ 6.14(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วด้านแนวแกน จากรูปพบว่าในตำแหน่ง  $x = 3D$  ถึง  $8D$  ค่าที่คำนวณได้ทั้ง 4 schemes พบว่าคำตอบที่ได้จาก upwind และ hybrid schemes สามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลองมากกว่า QUICK และ SOU schemes โดยเฉพาะในช่วง  $r/R$  ตั้งแต่ 0 ถึง 0.6

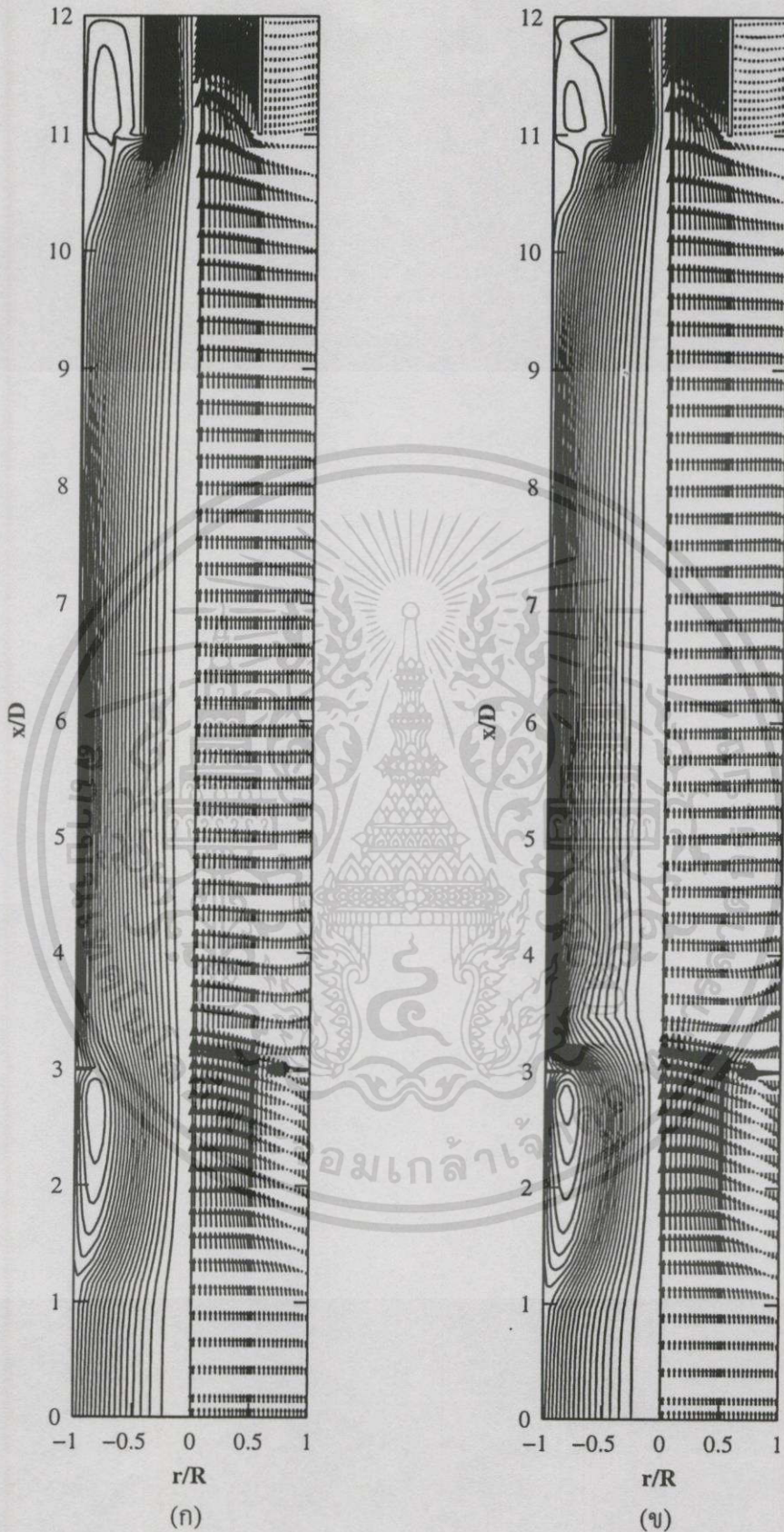
การเปลี่ยนแปลงของความเร็วด้านแนวสัมผัสแสดงในรูป 6.14(ข) จากรูปการทำนายของทั้ง 4 schemes มีลักษณะเดียวกับการทำนายในแนวแกน แต่ค่าที่ได้จาก upwind และ hybrid schemes จะทำนายได้ดีในตำแหน่ง  $x = 4D$  ถึง  $7D$  ส่วนตำแหน่งที่เหลือ QUICK และ SOU schemes ทำนายได้ต่ำกว่า ซึ่งจากภาพรวมทั้งหมดเห็นว่าทุก scheme ทำนายค่าได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลอง

Contour plot ของ stream function และ vector plot ที่ทำนายโดย upwind และ SOU schemes ได้แสดงในรูปที่ 6.15(ก) และ 6.15(ข) ตามลำดับ จาก contour plot ของรูปที่ 6.15(ก) สังเกตว่ามี recirculation เกิดขึ้นเลข 3 ตำแหน่งด้วยกัน ที่บริเวณด้านล่างช่องฉีด 2 ตำแหน่ง และปลายทางออกที่อยู่ระหว่างปล่องกับผนังอีก 1 ตำแหน่ง ขณะที่ contour plot ของรูปที่ 6.15(ข) จะสังเกตเห็น recirculation ได้ถึง 6 ตำแหน่งด้วยกัน

จาก vector plot รูปที่ 6.15(ก) สามารถสังเกตเห็น recirculation วงใหญ่ด้านล่างของช่องฉีดที่พบใน contour plot ชัดเจนยิ่งขึ้นโดยเกิดขึ้นที่บริเวณ  $x/D = 1.8$  ถึง 3 และ  $r/R = 0.7$  ถึง 1.0 และ recirculation วงเล็กที่ตำแหน่ง  $x/D = 2.9$  และ  $r/R = 0.95$  ส่วน vector plot ที่ด้านปลายทางออกบริเวณปล่องกับผนังตามมีขนาดเล็กมาก ใน vector plot ของรูปที่ 6.15(ข) สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางของความเร็วได้อย่างชัดเจนการจำลองการไหลโดย  $k-\epsilon$  model ซึ่งทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ scheme ต่างๆ อาจสรุปได้ว่า upwind และ hybrid schemes ทำนายได้ดีใกล้เคียงกับผลการทดลองที่สุดบนความเร็วทั้งในแนวแกนและแนวสัมผัส



รูปที่ 6.14 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย  $k-\epsilon$  model (ก) ความเร็วตามแนวแกน  
(ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส



รูปที่ 6.15 Contour plot ของ stream function กับ vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย  $k - \epsilon$  model ที่ใช้ (ก) upwind scheme และ (ข) SOU scheme

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.5.2 การทำนายการไหลโดย Algebraic Stress model (ASM)

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

รูปที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วจากระยะกึ่งกลางถึงผนังของความเร็วดตามแนวแกนและความเร็วดตามแนวสัมผัสในรูปที่ 6.16(ก) และ 6.16(ข) ตามลำดับ รูปที่ 6.16(ก) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วดตามแนวแกน พบว่าในตำแหน่ง  $x = 3D$  ถึง  $8D$  ค่าที่คำนวณได้จาก SOU scheme มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าโดยเฉพาะในตำแหน่งที่ใกล้กับช่องฉีด ในบริเวณ  $r/R$  ประมาณ 0 ถึง 0.5 ส่วนความเร็วในแนวแกนสัมผัสในรูปที่ 6.16(ข) พบว่า upwind และ hybrid schemes ทำนายได้ใกล้เคียงกว่า SOU scheme อย่างชัดเจนในช่วง  $r/R$  ประมาณ 0 ถึง 0.6

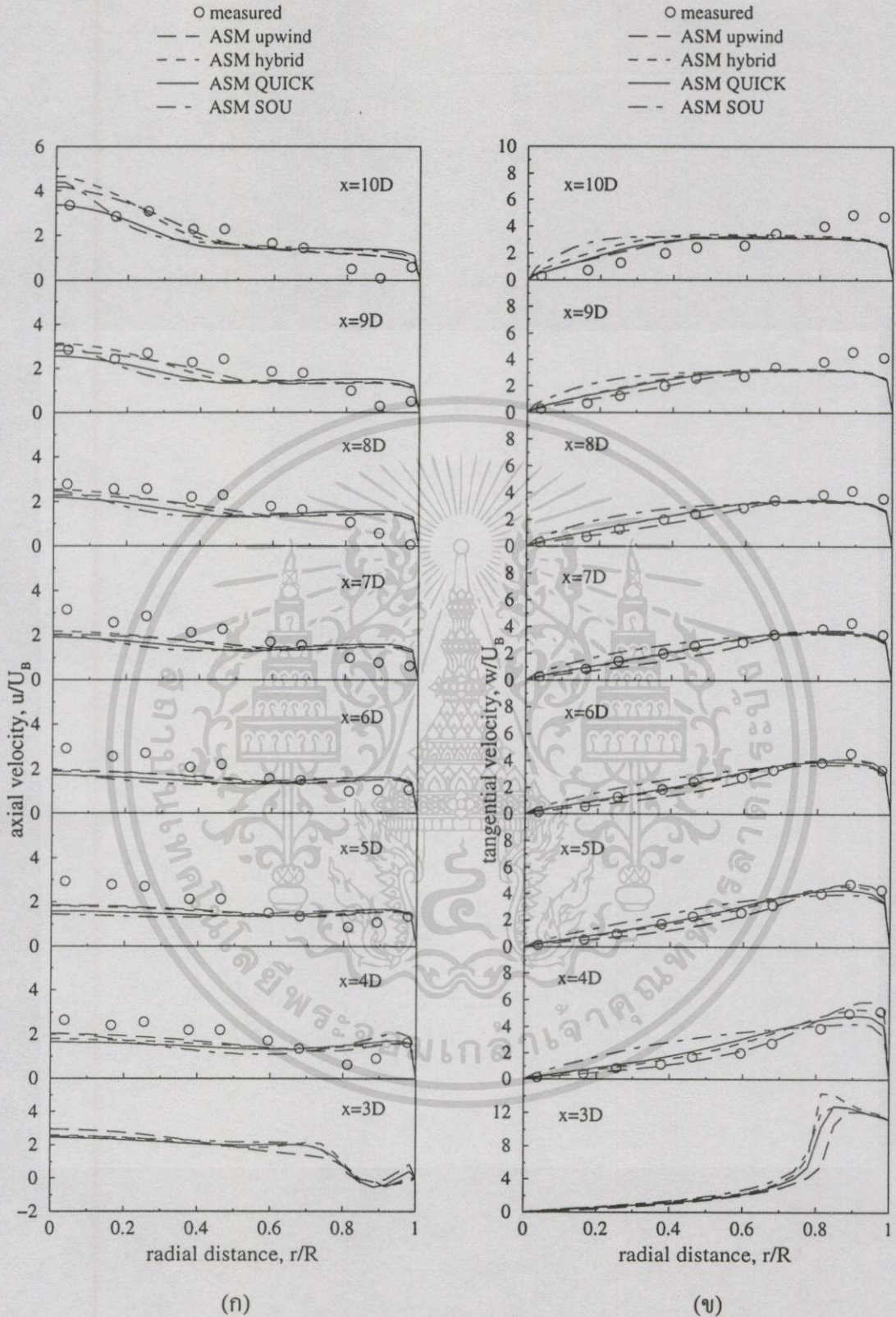
Contour plot และ vector plot ที่ทำนายโดย upwind และ SOU schemes ได้แสดงในรูปที่ 6.17 (ก) และ 6.17(ข) ตามลำดับ จาก contour plot ของรูปทั้งสอง สังเกตว่า การทำนายโดย SOU scheme จะเกิด recirculation ที่ตำแหน่งใต้และเหนือช่องฉีด ในขณะที่ผลจาก upwind กลับไม่แสดงให้เห็น recirculation ที่ตำแหน่งดังกล่าว

จาก vector plot รูปที่ 6.17(ก) ไม่สามารถเห็นการไหลย้อนกลับซึ่งก็ยืนยัน ผลที่พบใน contour plot ชัดเจนยิ่งขึ้น ส่วนใน vector plot ของรูปที่ 6.17(ข) จะสังเกตเห็นการไหลย้อนกลับของ vector ความเร็วได้อย่างชัดเจนที่ตำแหน่งใต้ช่องฉีด

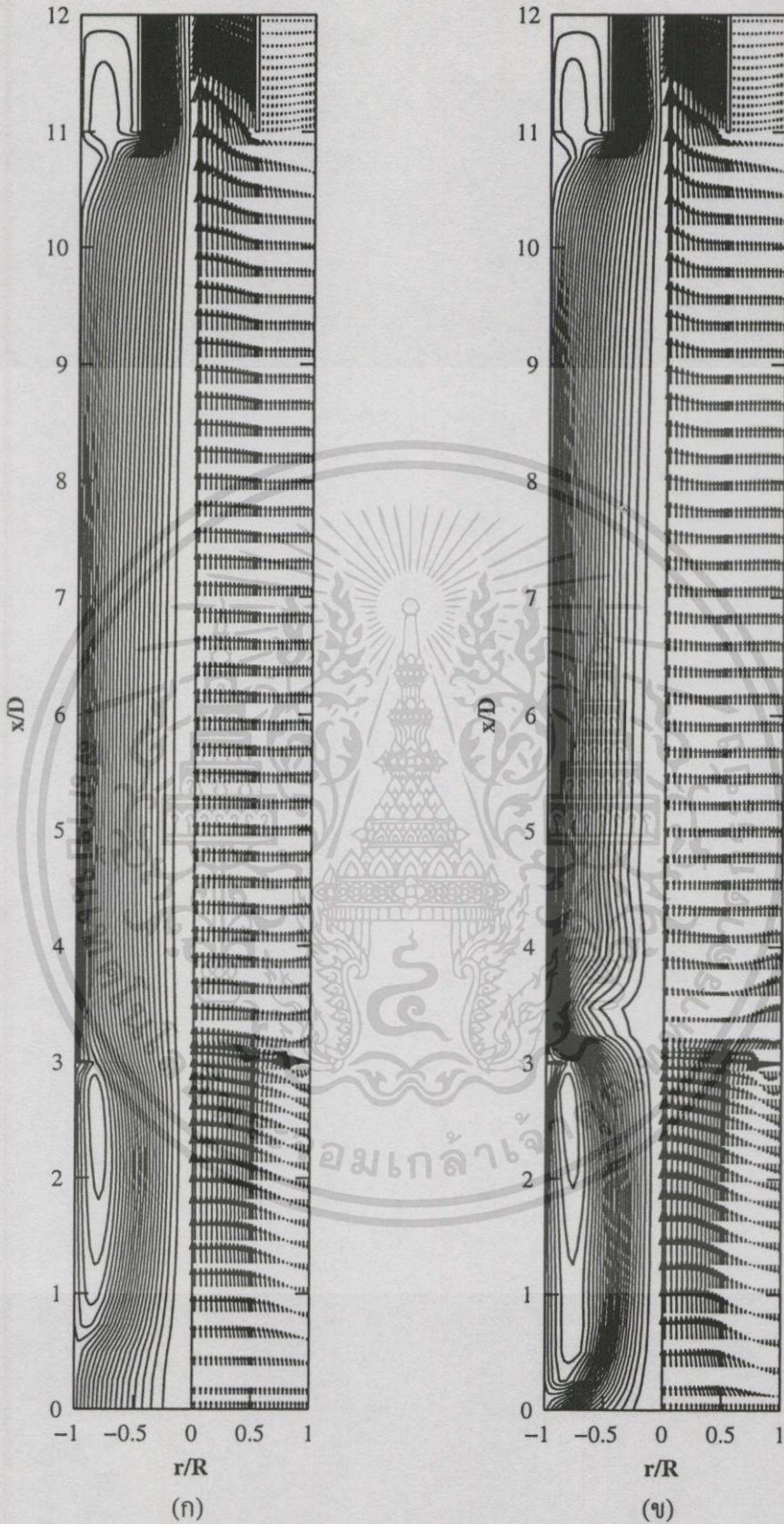
การจำลองการไหลโดย ASM ซึ่งทำการเปรียบเทียบความสามารถของ scheme ต่างๆ คือ upwind, hybrid, QUICK และ SOU สรุปได้ว่า upwind และ hybrid scheme ให้ผลการทำนายความเร็วทั้งในแนวแกนและแนวสัมผัสได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง

รูป 6.18(ก) และ 6.18(ข) เป็นรูปที่เปรียบเทียบผลการทำนายโดย  $k-\epsilon$  model กับ ASM ของความเร็วในแนวแกนและความเร็วในแนวสัมผัสตามลำดับ จากรูปที่ 6.18(ก) ซึ่งเป็นความเร็วในแนวแกนที่ใช้ upwind scheme ในการคำนวณของทั้ง 2 models พบว่า ค่าที่ทำนายโดย ASM นั้นใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า  $k-\epsilon$  model ส่วนการเปรียบเทียบ model ในการทำนายความเร็วในแนวสัมผัสในรูปที่ 6.18(ข) ซึ่งใช้ upwind scheme มีผลการเปรียบเทียบเหมือนกับในแนวแกนคือ ASM ทำนายใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า  $k-\epsilon$  model

เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีแรก  $Q_r = 2$  และ  $D_r/D = 0.5$  พบว่าใช้อัตราส่วนการฉีดเดียวกันแต่มีแนวการฉีดที่แตกต่างกัน ในกรณีนี้ ( $D_r/D = 1.0$ ) ได้วางแนวการฉีดอากาศทุติยภูมิสัมผัสกับผนังเตาอย่างแท้จริง (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ imaginary circle เท่ากับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตา) พบว่าความสามารถของแบบจำลองในการทำนายมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองเพิ่มขึ้นโดยมีสาเหตุมาจากการไหลที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับการไหลแบบสมมาตรในแนวแกน ทำให้อิทธิพลของการไหลแบบสามมิติน้อยกว่าในสองกรณีแรก



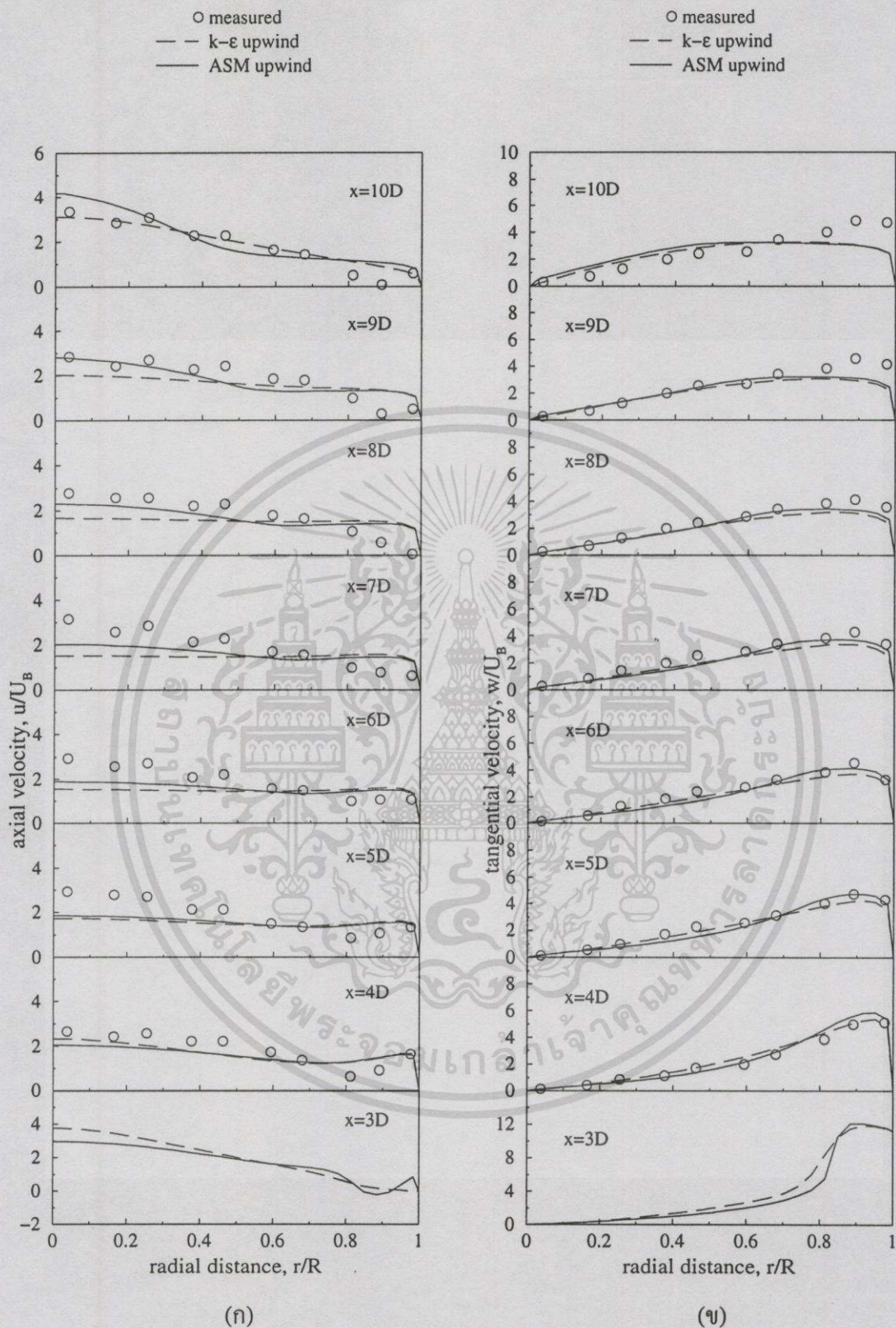
รูปที่ 6.16 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ทำนายโดย ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส



รูปที่ 6.17 Contour plot ของ stream function กับ vector plot ของความเร็ว ทำนายโดย ASM ที่ใช้

(ก) upwind scheme และ (ข) SOU scheme

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.18 กราฟเปรียบเทียบการทำนายระหว่าง  $k-\epsilon$  model กับ ASM (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส

## 6.6 สรุป

ผลการทำนายการไหลภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีดอากาศศุขติภูมิด้านข้าง โดยเปรียบเทียบระหว่าง  $k-\epsilon$  model กับ ASM ของทั้ง 3 กรณี สรุปได้ดังนี้

ในกรณี  $Q_r = 2$  และ  $D_r/D = 0.5$

- 1 การทำนายโดย  $k-\epsilon$  model ทำนายได้ดีกว่า ASM
- 2 ผลของ numerical differencing scheme ต่างๆ ที่ใช้พบว่า SOU scheme ทำนายความเร็วในแนวแกนได้ดีกว่า upwind และ hybrid schemes ส่วนความเร็วในแนวสัมผัสการทำนายโดยใช้ upwind และ hybrid schemes ดีกว่าการใช้ QUICK และ SOU schemes

ในกรณี  $Q_r = 1$  และ  $D_r/D = 0.5$

- 1 การทำนายโดย  $k-\epsilon$  model ทำนายได้ดีกว่า ASM
- 2 จากการทำนายของการใช้ numerical differencing scheme ต่างๆ พบว่า upwind และ hybrid schemes ซึ่งเป็น first order scheme ประเมินค่าได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า QUICK และ SOU schemes ทั้งความเร็วในแนวแกนและแนวสัมผัส

ในกรณี  $Q_r = 2$  และ  $D_r/D = 1.0$

- 1 ผลจากการเปรียบเทียบ model ที่ใช้พบว่า ASM ทำนายได้ดีกว่า  $k-\epsilon$  model
- 2 จากผลการทำนายโดยการใช้ numerical differencing scheme ต่างๆ พบว่า upwind และ hybrid schemes ประเมินค่าได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า QUICK และ SOU schemes ทั้งในแนวแกนและแนวสัมผัส

ผลการทำนายที่มีความผิดพลาดส่วนหนึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการไหลจริงที่เกิดขึ้นเป็นการไหลแบบ 3 มิติ ซึ่งในการทำนายการไหลในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฉีดอากาศศุขติภูมิด้านข้างนี้ พิจารณาการไหลแค่ 2 มิติแบบสมมาตรในแนวแกน (axisymmetric)

## บทที่ 7

# สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 7.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการทำนายการไหลภายในช่องการไหลที่มีการบิดด้านข้างโดยเปรียบเทียบระหว่าง  $k-\epsilon$  model กับ ASM พบว่าในการบิดของไหลใน กรณีช่องสี่เหลี่ยมอยู่ในแนวตั้งฉากกับช่องการไหล การทำนายการไหลโดย  $k-\epsilon$  model ดีกว่าการทำนายโดย ASM เล็กน้อยในบริเวณช่องบิด และผลของ scheme ต่างๆ ที่ใช้พบว่า upwind และ hybrid schemes ประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า QUICK และ SOU schemes และการบิดของไหลในกรณีช่องสี่เหลี่ยมทำมุมกับช่องการไหล ผลการทำนายการไหลที่ทำนายโดย ASM เมื่อมองโดยรวมแล้วทำนายได้ดีกว่า  $k-\epsilon$  model และการทำนายที่ใช้ SOU scheme ในการคำนวณพบว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าการใช้ upwind และ hybrid schemes

ส่วนผลการทำนายการไหลภายในเตาฟลูอิดไดซ์แบบเบดชนิดอากาศสุญญากาศด้านข้างในแนวสัมผัสโดยเปรียบเทียบระหว่าง  $k-\epsilon$  model กับ ASM ของทั้ง 3 กรณี สรุปได้ดังนี้

ในกรณีแรก  $Q_r = 2$  และ  $D_r/D = 0.5$ , การทำนายโดย  $k-\epsilon$  model ทำนายได้ดีกว่า ASM และผลของ scheme ที่ใช้พบว่า SOU scheme ทำนายความเร็วในแนวแกนได้ดีกว่า upwind และ hybrid schemes ส่วนความเร็วในแนวสัมผัสการทำนายโดยใช้ upwind และ hybrid schemes ดีกว่าการใช้ QUICK และ SOU schemes

ในกรณีที่สอง  $Q_r = 1$  และ  $D_r/D = 0.5$ , การทำนายโดย  $k-\epsilon$  model ทำนายได้ดีกว่า ASM, และผลของ scheme ที่ใช้พบว่า upwind และ hybrid schemes ซึ่งเป็น first order scheme ประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า QUICK และ SOU schemes ของทั้งความเร็วในแนวแกนและแนวสัมผัส

ในกรณีที่สาม  $Q_r = 2$  และ  $D_r/D = 1.0$ , ผลจากการเปรียบเทียบ model ที่ใช้พบว่า ASM ทำนายได้ดีกว่า  $k-\epsilon$  model และผลของ scheme ที่ใช้พบว่า upwind และ hybrid schemes ประมาณค่าความเร็วในแนวแกนและแนวสัมผัสได้ใกล้เคียงมากกว่า QUICK และ SOU schemes

### 7.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป

1. ควรทำการศึกษาผลของรูปร่างของช่องการไหลในลักษณะอื่นๆที่มีต่อลักษณะการไหล
2. ควรมีการเปรียบเทียบการทำนายการไหลโดยใช้ Reynolds stress model ในการคำนวณ
3. ควรมีการพัฒนาการจำลองโดยใช้การคำนวณแบบ 3 มิติสำหรับการไหลในเตาฟลูอิดไดซ์แบบเบดชนิดอากาศสุญญากาศด้านข้างในแนวสัมผัสในงานวิจัยต่อไป

## บรรณานุกรม

- Andreopoulos, J. and Rodi, W. 1984. "Experimental Investigation of Jet in a Crossflow." **J. of Fluid Mechanics**. Vol. 138 : 93-127.
- Andreopoulos, J. 1982. "Measurement in a Jet-Pipe Flow Issuing Perpendicularly Into a Cross Stream." **Trans. ASME J. of Fluids Engineering**. Vol. 104 : 493-499.
- Chen, C.J. and Jaw, S.Y. 1997. **Fundamentals of Turbulence Modeling**. London. : Taylor&Francis.
- Crabb, D. *et. al.* 1981. "A Round Jet Normal to a Crossflow." **Trans. ASME J. of Fluids Engineering**. Vol. 103 : 142-153.
- Findlay, M. *et. al.* 1999. "Jets in a Crossflow: Effects of Geometry and Blowing Ratio." **Trans. ASME J. of Fluids Engineering**. Vol. 121 : 373-378.
- 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.
- Holzappel, 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.
- Jones, W. P. and Wille, M. 1996. "Large-eddy Simulation of a Plane Jet in a Cross-flow." **Int. J. Heat and Fluid Flow**. Vol. 17 : 296-306.
- Launder, B.E. *et. al.* 1975. "Progress in the Development of a Reynold Stress Turbulence Closure." **J. of Fluid Mechanics**. Vol. 68 : 537-566.
- Lin, C.H. *et. al.* 1997. "Evaluation of the Combustion Efficiency and Emission of Pollutants by Coal Particles in a Vortexing Fluidized Bed." **Combustion and Flame**. Vol. 110 ; 163-172.
- Lin, C.H. *et. al.* 1998. "A Study on the Swirling Flow Flied in the Freeboard of a Vortexing Fluidized Bed Combustor." **JSME international Journal, Series B**. Vol. 41 : 538-545.
- Liou, T. M. *et al.* 1999. "Study on Side-Jet Injection Near a Duct Entry With Various Injection Angles." **Trans. ASME J. of Fluids Engineering**. Vol. 121 : 580-587.
- McGuirk, J. J. and Rodi, W. 1978. "A Depth-averaged Mathematical Model for the Near Field of Side Discharges into Open-channel Flow." **J. Fluid Mechanical** Vol. 86 : 761-781.

- Nieh, S. and Yang, G. 1986. "Modeling of Solid Flows in a Fluidized Bed with Secondary Tangential Air Injection in the Freeboard." **AICHE Annual Meeting**, Paper No. 41K.
- 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.
- Rodi, W.A. 1976. "A New Algebraic Relations for Calculating the Reynolds Stresses." **Z. Angew. Math. Mech. (ZAMM)**. Vol. 56 : T219-T221.
- Sano, M. 1999. "Mean Flow and Turbulence Characteristics in a Turbulent Channel Flow with Injection through a Slit." **Proceeding of the 3<sup>rd</sup> ASME/JSME joint Fluids Engineering Conference**.
- Sano, M. 1992. "Numerical Analysis of Turbulent Boundary Layers with Injection and Suction through a Slit." **JSME international Journal, Series B**. Vol. 35 : 479-485.
- Sloan, D.G. *et. al.* 1986. "Modeling of Swirl in Turbulent Flow System." **Progr. Energy Combust. Sci.** Vol. 12 : 163-250.
- Sowards, N. K. 1978. **U.S. Patent 4,075,935**.
- 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.
- Stoy, R. L. and Ben-Haim Y. 1973. "Turbulent Jets in a Confined Crossflow." **Trans. ASME J. of Fluids Engineering**. Vol. 95 : 551-556.
- Susec, J. and Bowley, W. W. 1976. "Prediction of the Trajectory of a Turbulent Jet Injection into a Crossflowing Stream." **Trans. ASME J. of Fluids Engineering**. Vol. 98 : 667-673.
- 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.
- 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



# วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง

JOURNAL OF KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ISSN 0858-8430 Vol.8 No.1 April 2000 ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 เมษายน 2543 **2543**

## บทความวิจัย

การทำนายการไหลแบบปั่นป่วนในช่องที่มีการฉุดด้านข้าง	1
ทรงมัจฉ พรมวงษ์ สมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์	
การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตของแกะพื้นเมืองและแกะลูกผสมที่เลี้ยงร่วมกับเลี้ยงปล่อย	7
ธวัชชัย พุกคินธุ์ สืบชัย จตุรศิทธา สุรกิจ ณะราช	
ແຫມ່ນ: ການຂັບຂີ່ເຂົ້າ <i>Salmonella</i> Enteritidis ໃນລະຫວ່າງການທັກແຫມ່ນ	13
วราวุฒิ กรุดัง อศิพร เสาววิวัฒน์ อິชนี จิระวิบูลย์เวช	
องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการฟักไข่บนกระเจ๊กเทศ	21
อนุชา แสงใสถน วิชัย พุกถักมณัฏ ณหทัย วิจิตโรทัย	
การดูดซับโครเมียมโดย <i>Chlorella</i>	26
วีณา ชูโชติ มงคล เทัญสาชยใจ	
ผลของอัตราการเจือจางและพีเอชของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปไก่ ที่มีต่อการผลิตโปรตีนเซลล์เดียวโดยเชื้อ <i>Candida tropicalis</i> TISTR 5136	31
ดวงใจ ไชยชัยกุล	
การใช้สารเคมีควบคุมการสร้างอะพลาทอกซินในข้าวโพด	36
อาทิตย์ ทถายนาศ สุวิทย์ สุขสูงเกศย์ พงษ์รัตน์ โฉมนิตเจริญกุล	

## บทความวิชาการ

การปฏิรูปการอาชีวศึกษาและฝึกอบรมวิชาชีพออกศรตลย	42
สุทิพย์ กาญจนพันธุ์	
การใช้ฮอร์แกนิคโครเมียมในโค	46
จงกตมณี วงศ์แก้ว	
การวิเคราะห์กลุ่มผู้รับมือปัญหาค่าเงินคอตตารโนอนาคค	53
ศุภาวดี ปัตทวิฤคทา	
การหาค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของการแจกแจงแบบนิตศรขวินาม	56
ทรงชัย เกลาอเทศ	
DEMAND AMPLIFICATION: AN EVALUATION OF THE BEER GAME	60
Walailak Aulhirawong	
การพัฒนาบทกโณไลอิตือประตมเพื่อการพวนิชย์เกษตรและอุตสาหกรรม	65
วิเนียร จุติมาศกุล ศิริพร จิตรมงคล	

# การทำนายการไหลแบบปั่นป่วนในช่องที่มีการฉีดด้านข้าง

## Prediction of Turbulent Channel Flow with Side - Jet Injection

ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์

นักศึกษาระดับปริญญาโท

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในช่องที่มีการฉีดด้านล่าง โดยอาศัยวิธีการปริมาตรสืบเนื่องร่วมกับ  $k - \epsilon$  turbulence model ในการวิเคราะห์ ที่สมมุติฐานว่าของไหลที่พิจารณาเป็นแบบคงตัว โดยมีการตรวจสอบผลของ schemes ที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งในที่นี้มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ upwind และ second order upwind (SOU) schemes จากการจำลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนของอัตราการไหลของการฉีดต่ออัตราการไหลหลัก,  $Q$  เพิ่มขึ้น ความเร็วบริเวณผนังด้านล่างจะถูกหน่วงขณะที่บริเวณด้านบนจะถูกเร่งมากขึ้นและตำแหน่งความเร็วสูงสุดจะเลื่อนขึ้นไปทางผนังด้านบน นอกจากนี้ยังนำผลการคำนวณที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งปรากฏว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

### Abstract

The paper presents a numerical simulation of a turbulent channel flow with bottom side-jet injection. A finite volume method with the  $k - \epsilon$  turbulence model for steady incompressible flow was used to carry out all computations. To investigate the effect of numerical schemes on the predicted results, upwind and SOU schemes were employed. The computations showed that increasing the flow rate ratio (ratio of jet flow rate to channel flow rate,  $Q$ ) leads to a large deceleration in the near wall region at lower wall and to an acceleration at upper wall while the location of maximum velocity is shifted toward the upper wall. The predicted results generally are in excellent agreement with available experimental data.

คำสำคัญ(Keywords):  $k - \epsilon$  turbulence model , side-jet injection, finite volume method, channel flow

### 1. บทนำ

เทคนิคการควบคุมการไหลที่มีแรงเฉือนในงานทางด้านวิศวกรรมมีอยู่เทคนิคหนึ่งซึ่งมีประสิทธิภาพคือ การฉีดของไหลออกจากผนังไปยังกระแสการไหลเพื่อควบคุมความปั่นป่วนที่บริเวณผนัง ตัวอย่างเช่นการระบายความร้อนใบพัดกังหันไอพ่นและการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ในการประยุกต์เทคนิคดังกล่าวต้องมีความเข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น

ในบทความนี้จะทำการวิเคราะห์ผลของการฉีดของไหลผ่านช่องเล็กๆ ไปยังช่องที่มีกระแสการไหลแบบปั่นป่วนอย่าง

เต็มตัว ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากการเปลี่ยนอัตราส่วนอัตราการไหล,  $Q$  (อัตราส่วนของอัตราการไหลของการฉีดต่ออัตราการไหลหลัก)ของการฉีดที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 0.067, 0.133 และ 0.200 นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ schemes ที่ใช้ในการคำนวณทั้งสองคือ upwind และ SOU (second order upwind) schemes นอกจากนี้ยังนำผลการคำนวณที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

[1] อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ทฤษฎี

### 2.1 สมการพื้นฐานของการไหล

การวิเคราะห์การไหลในที่นี้ เป็นปัญหาในสองมิติจะมีสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้อยู่คือ สมการอนุรักษ์มวลกับสมการโมเมนตัม โดยสมการดังกล่าวเขียนอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยของเวลา (time average) ดังนี้

สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V) = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม ในแกน x

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho UV) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu_t + \mu) \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu_t + \mu) \frac{\partial U}{\partial y} \right] \quad (2)$$

สมการโมเมนตัม ในแกน y

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho UV) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V^2) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu_t + \mu) \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu_t + \mu) \frac{\partial V}{\partial y} \right] \quad (3)$$

โดยที่

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad (4)$$

ซึ่งค่า  $\mu_t$  นี้หาได้จากการใช้แบบจำลอง  $k-\varepsilon$  turbulence model [2, 4] ในการวิเคราะห์

### 2.2 แบบจำลอง turbulence

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ในที่นี้คือ  $k-\varepsilon$  turbulence model โดยอาศัยแบบจำลองดังกล่าวหาค่า  $\mu_t$  เพื่อที่จะแทนค่า  $\mu_t$  กลับเข้าไปในสมการโมเมนตัม (2) และ (3) สมการสำหรับหาค่า  $\mu_t$  ดังแสดงในสมการที่ (4) หาได้โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ที่หาค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  ดังต่อไปนี้

สมการ turbulent kinetic energy (TKE),  $k$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V k) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\text{โดยที่ } G = \mu_t \left[ 2 \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 \right]$$

สมการที่(5)เป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้นของ turbulent kinetic energy (TKE)

#### สัญลักษณ์

$C_1, C_2$	ค่าคงที่ใน dissipation rate equation	x	พิกัดในแนวนอน
$C_\mu$	ค่าคงที่ใน $k-\varepsilon$ turbulence model	y	พิกัดในแนวตั้ง
$G$	stress generation	สัญลักษณ์กรีก	
$k$	kinetic energy of turbulence	$\varepsilon$	dissipation of turbulent kinetic energy
$L$	ความกว้างของช่องกีด	$\phi$	ตัวแปรที่พิจารณา
$h$	ความสูงของช่องการไหลหลัก	$\mu$	ความหนืด
$P$	ความดันเฉลี่ย	$\Gamma_\phi$	สัมประสิทธิ์ของการแลกเปลี่ยน
$S$	general source term	$\rho$	ความหนาแน่น
$Q$	อัตราส่วนอัตราการไหล, $Q = V_w L / U_{in} h$	$\sigma$	turbulent Prandtl number
$U$	ความเร็วเฉลี่ยในแกน x	ตัวห้อย	
$V$	ความเร็วเฉลี่ยในแกน y	av	ค่าเฉลี่ย
$U_{in}$	เป็นความเร็วทางเข้าของการไหลหลัก	n,s,e,w	ตำแหน่งที่ทิศเหนือ, ใต้, ตะวันออก, ตะวันตกของกริด
$V_w$	เป็นความเร็วของการกีด	p	ตำแหน่งที่จุดศูนย์กลางของกริด
$U_m$	เป็นความเร็วเฉลี่ยรวมหลังจากผ่านการกีดผสมแล้ว	t	turbulent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ dissipation rate ของ TKE,  $\epsilon$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U \epsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \mu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \mu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \rho \epsilon^2 / k \quad (6)$$

สมการที่(6)เป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับ dissipation rate ของ turbulent kinetic energy ซึ่งสมการทั้งสองนี้ได้มาโดยใช้สมมติฐานดังปรากฏในเอกสารอ้างอิง[2, 4]

ค่าคงที่ใน  $k-\epsilon$  turbulence model มีค่าดังต่อไปนี้

$$C_\mu = 0.09 \quad C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

2.3 รูปแบบโดยทั่วไปของสมการควบคุม

สมการเชิงอนุพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้นทุกสมการสามารถเขียนในรูปแบบมาตรฐานที่ประกอบไปด้วยเทอม convection, diffusion และ source สำหรับการไหลในสองมิติได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V \phi) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = S_\phi \quad (7)$$

รายละเอียดของค่า  $\Gamma_\phi$  และ  $S_\phi$  ที่ค่า  $\phi$  ต่างๆแสดงในตารางที่

2.4 การ discretise สมการควบคุม

discretisation ของสมการข้างต้นจะทำได้โดยการอินทิเกรตสมการควบคุมตลอดทั้งปริมาตรควบคุมที่มีการแบ่งออกเป็นกริดทำให้ได้ระบบสมการอย่างง่ายดังต่อไปนี้

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + S \quad (8)$$

ในสมการที่ (8) นี้ จะได้มาจากการ discretise diffusion term ของสมการควบคุม โดยใช้ central differencing scheme ในขณะที่ convection term ของสมการควบคุมนั้นจะไม่สามารถ discretise ได้โดยตรง ต้องอาศัย scheme เข้ามาช่วยซึ่งในบทความนี้จะใช้ 2 schemes คือ upwind และ SOU schemes

ตารางที่ 1. สรุปสมการควบคุมสำหรับ  $k-\epsilon$  turbulence model

สมการอนุรักษ์	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
มวล	1	0	0
โมเมนตัมในแกน x	U	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial V}{\partial x} \right]$
โมเมนตัมในแกน y	V	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial V}{\partial y} \right]$
turbulent kinetic energy	k	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G - \rho \epsilon$
TKE dissipation rate	$\epsilon$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$

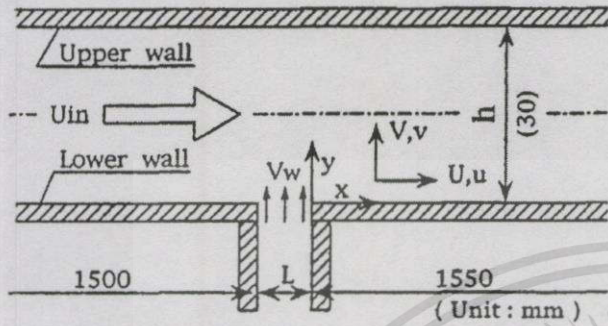
2.5 กระบวนการหาคำตอบ

การคำนวณในที่นี้ สมการค่าเฉลี่ยของเวลา (time-averaged Navier-Stokes) ในสมการที่ (1), (2) และ (3) , สมการ turbulent kinetic energy (TKE) ในสมการที่ (5) , สมการ dissipation rate ของ turbulent kinetic energy ในสมการที่ (6) จะถูกแก้สมการโดยอาศัยวิธีการเชิงตัวเลขที่เรียกว่า วิธีการปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยจะใช้ SIMPLE algorithm [3, 5] ในการแยกความสัมพันธ์ที่มีต่อกันระหว่างความดันกับความเร็วและยังใช้ในขบวนการทำซ้ำ ส่วน upwind และ SOU schemes จะใช้ในการ discretise เทอม convection และ เทอม diffusion จะถูก discretise โดย central differencing scheme บนกริดที่แบบ staggered ในการแก้ระบบสมการที่เกิดขึ้นจะใช้เทคนิคของวิธีการ TDMA (tri diagonal matrix algorithm) แบบ line by line sweeping ในการหาคำตอบ [3, 5]

3. ลักษณะของปัญหา

ปัญหาที่นำมาวิเคราะห์นี้ได้มาจากการทดลองของ Masatoshi SANO [1] ซึ่งเป็นการทดลองโดยการฉีดของไหลผ่านช่องเล็กๆ ไปยังช่องที่มีกระแสการไหลแบบปั่นป่วนอย่าง

เต็มตัวดังแสดงในรูปที่ 1. จากรูป  $h$  เท่ากับ 30 mm โดยมี ความยาวของผนังช่องจากปากทางเข้าไปยังช่องฉีดเท่ากับ 1500 mm และความยาวของผนังช่องจากช่องฉีดไปยังทาง ออกเท่ากับ 1550 mm



รูปที่ 1. ลักษณะของช่องที่ใช้ในการวิเคราะห์

ซึ่งในการวิเคราะห์นี้จะกำหนด  $L$  เท่ากับ 10 mm โดยมี  $U_{in}$  ในช่องเท่ากับ 10 m/s และมีเงื่อนไขในการคำนวณดังต่อไปนี้

- ความเร็ว  $U$  และ  $V$  ตามผนังทั้งสองด้านมีค่าเป็นศูนย์
- ของไหลที่พิจารณาเป็นอากาศที่อุณหภูมิ 25 °C

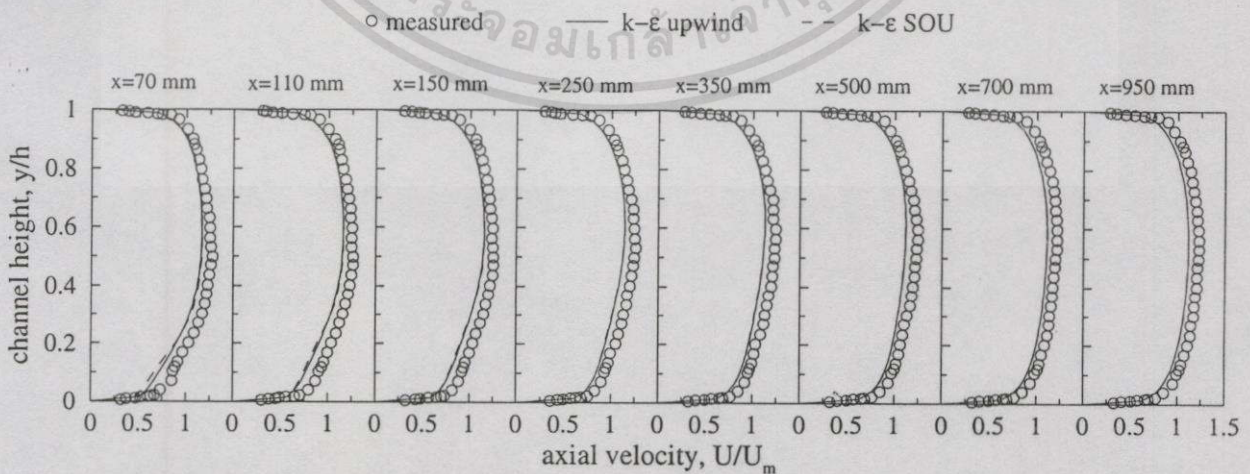
มีค่า  $\mu$  เท่ากับ  $1.85 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  และ  $\rho$  เท่ากับ  $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$

ในการคำนวณแบ่งโดเมนที่ทำการวิเคราะห์ออกเป็น กริด ขนาด  $80 \times 40$  จุดต่อ (80 ตามแนวแกน  $x$  และ 40 ตามแนว แกน  $y$ )

#### 4. ผลการคำนวณและการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์การไหลภายในช่องที่มีการฉีดด้านข้าง โดยอาศัยวิธีการเชิงตัวเลขร่วมกับ  $k-\epsilon$  turbulence model ที่ได้อธิบายมาข้างต้น นำมาแสดงโดยเขียนอยู่ในรูปของความ สัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  ที่ตำแหน่งต่างๆ กับระยะความสูงของช่องการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2., 3., 4. และ 5. ตามลำดับซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

รูปที่ 2. เป็นรูปที่แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  ซึ่งเขียนอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ  $U/U_m$  ที่ตำแหน่ง  $x = 70, 110, 150, 250, 350, 500, 700$  และ 950 mm ตามลำดับ โดยเป็นการฉีดที่อัตราส่วนอัตราการไหล ( $Q$ ) เท่ากับ 0.067 จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่ คำนวณได้ที่ตำแหน่ง  $x = 70 \text{ mm}$  ของทั้งสอง schemes จะมี ค่าที่ใกล้เคียงกันในช่วง  $y/h$  ประมาณ 0.25 ถึง 1.0 และมี ความแตกต่างเล็กน้อยในช่วง  $y/h$  ประมาณ 0 ถึง 0.25 โดย ค่าที่คำนวณได้ทั้งสองมีความแตกต่างจากผลการทดลองบ้าง เล็กน้อยในช่วงที่อยู่บริเวณใกล้กับผนังด้านล่าง ลักษณะเช่นนี้ ยังปรากฏต่อไปยังตำแหน่ง  $x = 110$  และ  $150 \text{ mm}$  เมื่อเลย ตำแหน่งนี้ไป ค่าความเร็วเฉลี่ยทั้งสอง schemes แทบจะไม่ เห็นความแตกต่างกัน แต่ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนจากผลการ ทดลองเล็กน้อย

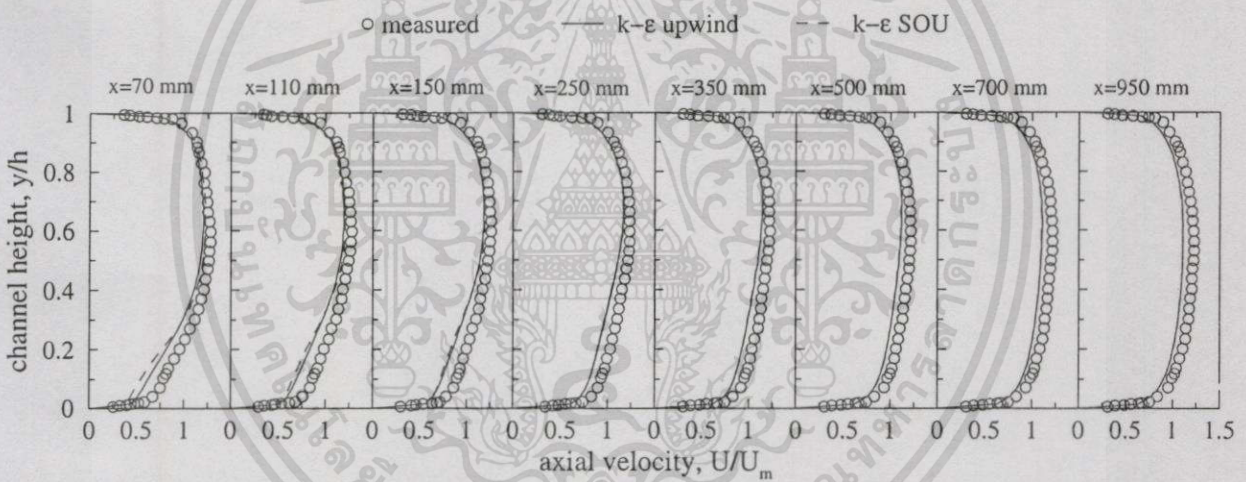


รูปที่ 2. รูปร่างของความเร็วในแนวแกนจากการคำนวณและผลการทดลองที่  $Q = 0.067$

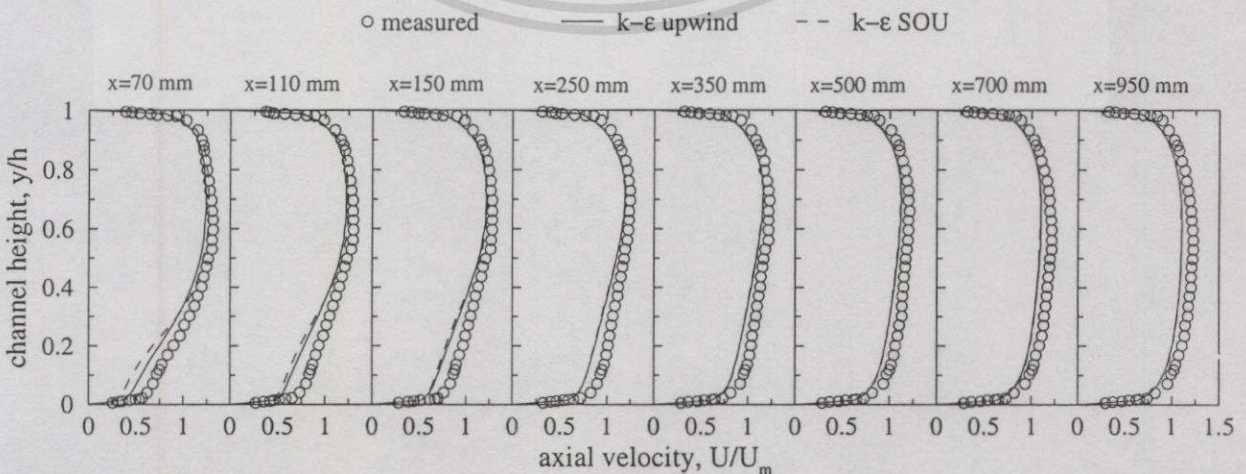
รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  ซึ่งอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ  $U/U_m$  ที่ตำแหน่ง  $x = 70, 110, 150, 250, 350, 500, 700$  และ  $950 \text{ mm}$  ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3. โดยเป็นการฉีดที่อัตราส่วนอัตราการไหล ( $Q$ ) เท่ากับ 0.133 จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ที่ตำแหน่ง  $x = 70 \text{ mm}$  ของทั้งสอง schemes นั้นค่าที่ได้จาก SOU scheme มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า upwind scheme ในช่วง  $y/h$  ประมาณ 0.3 ถึง 1.0 ส่วนที่ตำแหน่ง  $y/h$  ประมาณ 0 ถึง 0.3 upwind scheme กลับมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า SOU scheme โดยค่าทั้งสองมีความแตกต่างจากผลการทดลองบ้างในช่วงที่อยู่บริเวณใกล้กับผนังด้านล่าง ลักษณะเช่นนี้ยังปรากฏต่อไปยังตำแหน่ง  $x = 110$  และ  $150 \text{ mm}$  เมื่อเลยตำแหน่งนี้ไป ค่าความเร็วเฉลี่ย

ทั้งสอง schemes แทบจะไม่เห็นความแตกต่างกัน แต่ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองเล็กน้อย

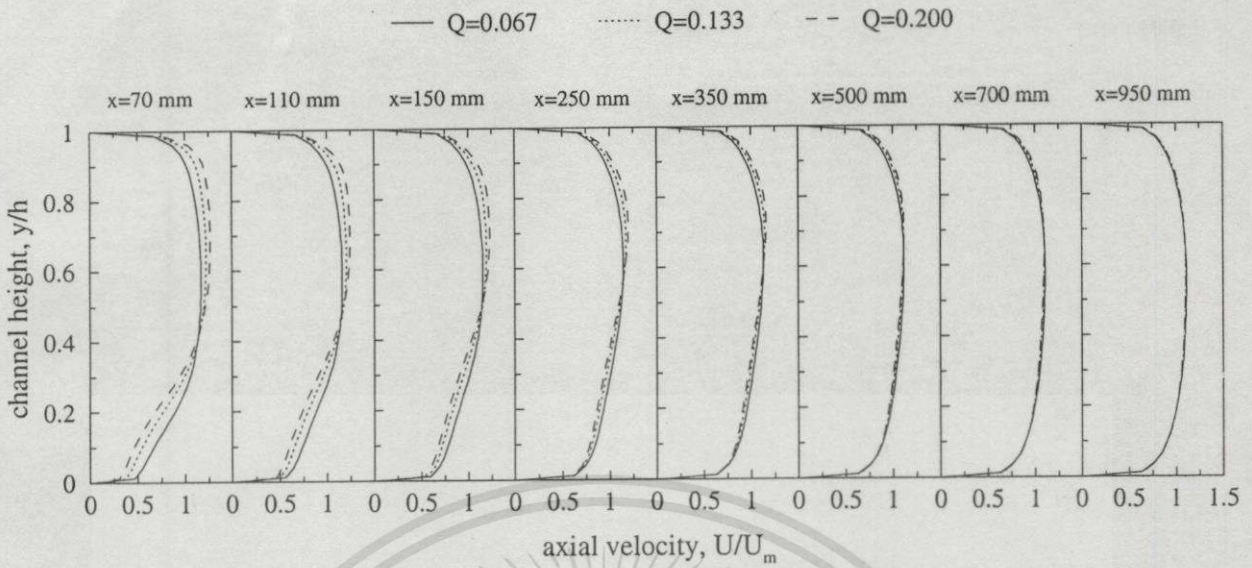
รูปที่ 4. เป็นรูปที่แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน  $x$  ซึ่งอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ  $U/U_m$  ที่ตำแหน่ง  $x = 70, 110, 150, 250, 350, 500, 700$  และ  $950 \text{ mm}$  ตามลำดับ จากการฉีดที่อัตราส่วนอัตราการไหล ( $Q$ ) เท่ากับ 0.200 จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ที่ตำแหน่ง  $x = 70 \text{ mm}$  ของทั้งสอง schemes จะพบว่าค่าที่ได้จาก SOU scheme มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า upwind scheme ในช่วง  $y/h$  ประมาณ 0.3 ถึง 1.0 ส่วนในช่วง  $y/h$  ประมาณ 0 ถึง 0.3 ค่าที่ได้จาก upwind scheme มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า SOU scheme โดยค่าทั้งสองมีความแตกต่างจากผลการทดลองบ้าง



รูปที่ 3. รูปร่างของความเร็วในแนวแกนจากการคำนวณและผลการทดลองที่  $Q = 0.133$



รูปที่ 4. รูปร่างของความเร็วในแนวแกนจากการคำนวณและผลการทดลองที่  $Q = 0.200$



รูปที่ 5. การเปรียบเทียบลักษณะของรูปร่างความเร็วที่แต่ละอัตราส่วนอัตราการไหล

ในบริเวณใกล้กับผนังด้านล่าง ลักษณะเช่นนี้ยังปรากฏต่อไปยังตำแหน่ง  $x = 110$  และ  $150 \text{ mm}$  เมื่อเลขตำแหน่งนี้ไปค่าความเร็วเฉลี่ยทั้งสอง schemes แทบจะไม่เห็นความแตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งสองอัตราส่วนอัตราการไหลที่ผ่านมา จะพบว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งไม่ค่อยแตกต่างกัน ในช่วงตั้งแต่  $x = 250 \text{ mm}$  เป็นต้นไป

รูปที่ 5. เป็นการแสดงลักษณะรูปร่างที่ได้จากอัตราส่วนอัตราการไหล ( $Q$ ) เท่ากับ 0.067, 0.133 และ 0.200 ตั้งแต่ค่าเมื่ออัตราส่วนอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ความเร็วบริเวณผนังด้านล่างถูกหน่วงขณะที่บริเวณด้านบนจะถูกเร่งมากขึ้นและตำแหน่งความเร็วสูงสุดจะเลื่อนขึ้นไปทางผนังด้านบน แต่เมื่อห่างออกไปจากช่องฉีดรูปร่างความเร็วจะปรับตัวเข้าสู่ลักษณะสมมาตรอีกครั้ง

## 5. สรุป

จากผลการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการเชิงตัวเลขดังได้อธิบายไว้ตอนต้น ซึ่งให้เห็นว่าการใช้  $k-\epsilon$  turbulence model ร่วมกับวิธีการปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method) โดยมีวิธีการเปลี่ยน schemes ที่ใช้ในการคำนวณนั้น สามารถทำนายการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการฉีดของไหลทางด้านข้างของช่องไปยังกระแสการไหลหลักได้อย่างเป็นปกติ แต่พบความคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อยในตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับช่องฉีด และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ schemes ที่ใช้ใน

การวิเคราะห์พบว่า upwind ซึ่งเป็น first order accurate สามารถทำนายได้ดีใกล้เคียงกันกับ SOU schemes ซึ่งเป็น second order accurate เมื่อมองในภาพรวม

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Sano M., "Mean Flow and Turbulence Characteristics in a Turbulent Channel Flow with Injection through a Slit." Proceedings of the 3<sup>rd</sup> ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference 18-23 July, San Francisco, California, 1999
- [2] Wilcox C.D., Turbulent Modelling for CFD. DCW Industries Inc., California, 1993.
- [3] Patankar S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere., Washington D.C., 1980.
- [4] Gatski T.B., Turbulent Flows: Model Equations and Solution Methodology. in Handbook of Computational Fluid Mechanics, Edited by Roger Peyret, Academic Press Ltd., London, 1986.
- [5] Versteeg H.K. and Malalasekera W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Longman Scientific & Technical, Longman Group Limited., England, 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายสมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 15 เมษายน 2518 ที่จังหวัดตรัง สำเร็จการศึกษา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ศูนย์องครักษ์  
ปีการศึกษา 2540 และในปีการศึกษา 2541 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโททางวิศวกรรมศาสตร์  
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

