

การคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบสามมิติภายในท่อออร์เทกซ์



นายชัยพร พันธุ์กสิกร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

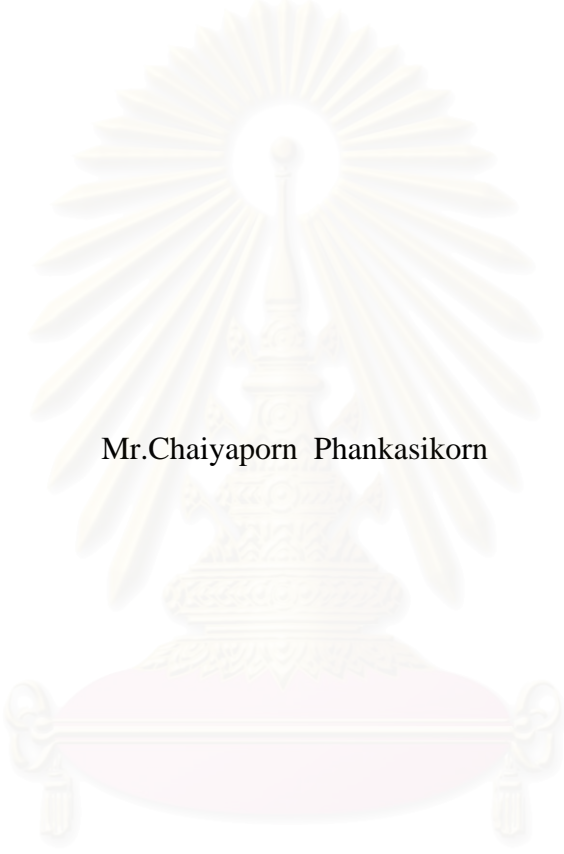
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2720-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPUTATION OF THREE DIMENSIONAL FLOW AND HEAT TRANSFER
IN VORTEX TUBE



Mr.Chaiyaporn Phankasikorn

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2720-4

ชัยพร พันธุ์กสิกร : การคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบสามมิติภายในท่อ
วอร์เทกซ์. (COMPUTATION OF THREE DIMENSIONAL FLOW AND
HEAT TRANSFER IN VORTEX TUBE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. สมพงษ์ พุทธิวิ
สุทธิศักดิ์, 96 หน้า. ISBN 974-53-2720-4.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบสามมิติภายในท่อ
วอร์เทกซ์ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$
และ RNG $k-\epsilon$

การทำวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการสร้างความเชื่อมั่นในการใช้
โปรแกรมด้าน CFD ซึ่งผู้ทำวิจัยได้ทดสอบและเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีผู้ศึกษามาก่อน
โดยเลือกปัญหาการไหลผ่าน Backward-facing step และปัญหาการไหลในเตาเผาแบบวอร์
เทกซ์ ที่มีลักษณะการไหลคล้ายกันกับการไหลในท่อวอร์เทกซ์ พบว่าในกรณีที่เป็นกรณการไหลผ่าน
Backward-facing step ผลที่ได้จะมีความสอดคล้องกับผลการทดลองมาก ส่วนในกรณีการไหล
ในเตาเผาแบบวอร์เทกซ์นั้นพบว่าผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ แต่ก็ยังทำนายความเร็วในบริเวณที่มีผล
เนื่องจากการไหลเข้าของอากาศได้ไม่คลีนัก

ในส่วนที่สองเป็นการใช้โปรแกรมด้าน CFD กับท่อวอร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกันและ
ท่อวอร์เทกซ์แบบไหลตามกันจากการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีผู้ทำการทดลองมาแล้ว
พบว่าการคำนวณความเร็วในแนวสัมผัสแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองยังไม่สามารถทำนาย
การไหลแบบ Free vortex ได้ ส่วนในการคำนวณอุณหภูมินั้นค่าที่ได้จะมีค่ามากกว่าการทดลอง
เนื่องจากข้อจำกัดในการหาค่าเอนทาลปีของโปรแกรมที่ใช้ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพใน
การทำความเย็นของท่อวอร์เทกซ์ทั้งสองแบบพบว่าท่อวอร์เทกซ์แบบไหลตามกันจะมี
ประสิทธิภาพในการทำความเย็นที่ดีกว่า

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อนิสิต..... ชัยพร พันธุ์กสิกร.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... Judy.....
ปีการศึกษา..... 2548.....

4570280421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: COMPUTATION / THREE DIMENSIONAL / VORTEX TUBE

CHAIYAPORN PHANKASIKORN: COMPUTATION OF THREE DIMENSIONAL FLOW AND HEAT TRANSFER IN VORTEX TUBE. THESIS ADVISOR: ASST.PROF. SOMPONG PUTIVISUTISAK, Ph.D, 96 pp. ISBN 974-53-2720-4.

The objective of this research is to study three dimensional flow and heat transfer in a vortex tube. A finite volume method has been used with standard $k - \varepsilon$ and RNG $k - \varepsilon$ models.

The research is divided into two parts. The first part focuses on CFD code validation by comparing the results with the previous researches, backward-facing step flow problem and flow in vortex combustor problems. For the backward-facing step case, the calculation agrees well with the experiment. For the vortex combustor case, the result is in general agreement with experiment but velocity prediction in air inlet region is not good.

In the second part of the thesis, computation has been done for the flows in the counter-flow and uni-flow vortex tubes. When calculation has been compared with the experiment, it is found that the tangential velocity from both turbulence model cannot predict free vortex. The temperature is higher than that of experiment because of limitation of enthalpy calculation in the CFD code.

Finally, it can be see from the result, that the cooling performance of a counter flow vortex tube is better than uni-flow type as expected.

Department.....Mechanical Engineering... Student's signature... *Chaiyaporn Phankasikorn*.....
 Field of study..Mechanical Engineering... Advisor's signature... *Somporn Putivisutisak*.....
 Academic year.....2005.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดเห็นที่มีประโยชน์อย่างยิ่ง และคอยดูแลจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณี มณีรัตน์ และ ดร.ไพบุลย์ ศรีภคกร กรรมการฯ ที่ได้กรุณาตรวจสอบและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข ที่ให้คำปรึกษา และที่ นวัตกรรม ภูเจริญ ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยสอนและให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาอันเป็นที่รักยิ่ง ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาตลอด อนึ่งคุณค่าอันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาแต่บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้ที่มีพระคุณทุกท่าน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฑ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 ผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง.....	5
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	7
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	7
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์.....	7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.7 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและกลไกการทำงานของท่อออร์เทกซ์.....	10
2.1 ชนิดของท่อออร์เทกซ์.....	10
2.1.1 ท่อออร์เทกซ์ชนิดไหลสวนทางกัน.....	10
2.1.2 ท่อออร์เทกซ์ชนิดไหลตามกัน.....	11
2.2 การทำงานของท่อออร์เทกซ์.....	11
2.3 สมมติฐานกลไกการทำงานของท่อออร์เทกซ์.....	13
2.4 การวิเคราะห์ตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์.....	16
2.5 ตัวแปรที่แสดงถึงประสิทธิภาพของท่อออร์เทกซ์.....	17
2.5.1 อัตราส่วนการทำความเย็นต่ออากาศที่เข้ามาในท่อออร์เทกซ์.....	18
2.5.2 ประสิทธิภาพเชิงความเย็นทางเทอร์โมไดนามิกส์ของท่อออร์เทกซ์.....	18
2.5.3 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ.....	20

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	22
3.1 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน.....	22
3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน	24
3.2.1 Standard $k - \varepsilon$ model	25
3.2.2 RNG $k - \varepsilon$ model	27
3.3 ขั้นตอนโดยทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม.....	28
3.4 วิธีหาค่าเสถียรค่า.....	30
3.5 เงื่อนไขขอบ.....	31
บทที่ 4 การทดสอบสมรรถนะของโปรแกรม CFD.....	33
4.1 การไหลผ่าน Backward-facing step.....	33
4.2 การไหลในเตาเผาแบบวอร์เทกซ์.....	37
บทที่ 5 การจำลองการไหลภายในท่อวอร์เทกซ์.....	46
5.1 การจำลองการไหลภายในท่อวอร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน.....	46
5.2 การจำลองการไหลภายในท่อวอร์เทกซ์แบบไหลตามกัน.....	60
5.3 สรุปผลการจำลองการไหลในท่อวอร์เทกซ์.....	72
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	72
รายการอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	78
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	96

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1	ท่อออร์เทกซ์ (Exair Co., 1999)..... 1
รูปที่ 1.2	การนำท่อออร์เทกซ์ไปใช้ในงานอุตสาหกรรม (Newman tools Inc., 1998)..... 2
รูปที่ 1.3	โดเมนการคำนวณของการไหลภายในท่อออร์เทกซ์แบบสองมิติ (Promvonge,1997)..... 3
รูปที่ 1.4	รูปสามมิติของท่อออร์เทกซ์ของ Promvonge (1997)..... 3
รูปที่ 1.5	ท่อออร์เทกซ์ที่ใช้ในการทดลอง (Eiamsa-ard, 2000)..... 4
รูปที่ 1.6	โดเมนการไหลในแบบสามมิติ..... 4
รูปที่ 2.1	ท่อออร์เทกซ์ชนิดไหลสวนทางกัน (Counter Flow Vortex Tube).... 10
รูปที่ 2.2	ท่อออร์เทกซ์ชนิดไหลตามกัน (Uni-Flow Vortex Tube)..... 11
รูปที่ 2.3	ลักษณะการไหลของอากาศภายในท่อออร์เทกซ์ (Frohlingdorf and Unger, 1999)..... 12
รูปที่ 2.4	การกระจายตัวของความเร็วในท่อออร์เทกซ์ (Behera et al., 2005)..... 12
รูปที่ 2.5	ความเค้นและทิศทางของความเค้นในสมมุติฐานกลไกการทำงานของท่อออร์เทกซ์ของ Fulton (1950)..... 13
รูปที่ 2.6	แผนภูมิ $T - s$ ตามกระบวนการไอเซนโทรปิก..... 19
รูปที่ 3.1	ลักษณะของความเร็วที่เวลาใดๆ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน..... 23
รูปที่ 3.2	การแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยๆ..... 28
รูปที่ 3.3	ตำแหน่ง Node ต่างๆ ในปริมาตรควบคุม..... 29
รูปที่ 3.4	Cyclic boundary 32
รูปที่ 4.1	รูปแบบปัญหาของการไหลผ่าน Backward-facing step (Not to scale)..... 33
รูปที่ 4.2	กริดของการจำลองการไหลผ่าน Backward-facing step ที่ $Re_H = 36,000$ (Not to scale)..... 34
รูปที่ 4.3	รูปขยายของกริดละเอียดในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของช่องการไหล..... 34
รูปที่ 4.4	เวกเตอร์ความเร็วการไหลผ่าน Backward-facing step โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ (Not to scale)..... 35
รูปที่ 4.5	รูปขยายเวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณการไหลหมุนวน โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ 35

รูปที่ 4.6	เวกเตอร์ความเร็วการไหลผ่าน Backward-facing step โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$ (Not to scale).....	36
รูปที่ 4.7	รูปขยายเวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณการไหลหมุนวน โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$	36
รูปที่ 4.8	รูปร่างของความเร็วโดยการเปรียบเทียบผลกับการทดลองที่ค่า $Re_H = 36,000$	37
รูปที่ 4.9	ลักษณะการไหลและโดเมนการคำนวณในเตาเผาแบบวอร์เท็กซ์.....	38
รูปที่ 4.10	กริดที่ใช้ในการคำนวณการไหลในเตาเผาแบบวอร์เท็กซ์(Not to scale)	39
รูปที่ 4.11	ระนาบที่พิจารณาในการเปรียบเทียบผล(Not to scale).....	40
รูปที่ 4.12	ลักษณะของกริดในระนาบที่พิจารณา (Not to scale).....	40
รูปที่ 4.13	เวกเตอร์ของความเร็ว ทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ (Not to scale).....	41
รูปที่ 4.14	เวกเตอร์ของความเร็ว ทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$ (Not to scale).....	41
รูปที่ 4.15	เวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณทางเข้าเมื่อใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$	42
รูปที่ 4.16	เวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณทางเข้าเมื่อใช้แบบจำลองความปั่นป่วนปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$	42
รูปที่ 4.17	ความเร็วในแนวแกน โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ และ RNG $k - \epsilon$ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง.....	44
รูปที่ 4.18	ความเร็วในแนวสัมผัสโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ และ RNG $k - \epsilon$ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง.....	45
รูปที่ 5.1	ภาพสเก็ทซ์ทอว์เท็กซ์ของ Brunn (1969).....	47
รูปที่ 5.2	โดเมนการคำนวณของทอว์เท็กซ์แบบไหลสวนทางกัน (Not to scale)	47
รูปที่ 5.3	กริดที่ใช้ในการคำนวณการไหลในทอว์เท็กซ์แบบไหลสวนทางกัน (Not to scale)	48
รูปที่ 5.4	รูปขยายของกริดในบริเวณผนังและทางออกของอากาศเย็น.....	48
รูปที่ 5.5	ลักษณะของกริดในระนาบที่พิจารณา (Not to scale).....	49
รูปที่ 5.6	เวกเตอร์ของความเร็วในแนวแกน ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ สำหรับทอว์เท็กซ์ของ Brunn (1969) (Not to scale)	50

รูปที่ 5.7	เวกเตอร์ของความเร็วในแนวแกน ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Brunn (1969) (Not to scale)	50
รูปที่ 5.8	รูปขยายแสดงการหมุนวนในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$	51
รูปที่ 5.9	รูปขยายแสดงการหมุนวนในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$	51
รูปที่ 5.10	การไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อออร์เทกซ์)	51
รูปที่ 5.11	Static temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Brunn (1969) (Not to scale).....	53
รูปที่ 5.12	Static temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Brunn (1969) (Not to scale).....	53
รูปที่ 5.13	Total temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Brunn (1969) (Not to scale).....	54
รูปที่ 5.14	Total temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Brunn (1969) (Not to scale)	54
รูปที่ 5.15	ความเร็วในแนวสัมผัสในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน	56
รูปที่ 5.16	ความเร็วในแนวสัมผัสในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน.....	57
รูปที่ 5.17	อุณหภูมิในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน.....	59
รูปที่ 5.18	ภาพสเก็ทซ์ท่อออร์เทกซ์ของ Hartnett and Eckert (1957).....	61
รูปที่ 5.19	โดเมนการคำนวณของท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน (Not to scale)...	61
รูปที่ 5.20	กริดที่ใช้ในการคำนวณการไหลในท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน (Not to scale).....	62
รูปที่ 5.21	รูปขยายของกริดในการคำนวณการไหลในท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน	62
รูปที่ 5.22	ลักษณะของกริดในระนาบที่พิจารณา	63

รูปที่ 5.23	เวกเตอร์ของความเร็วในแนวแกน ที่ได้จากการทำนายทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Hartnett and Eckert (1957) (Not to scale)	64
รูปที่ 5.24	เวกเตอร์ของความเร็วในแนวแกน ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Hartnett and Eckert (1957) (Not to scale).....	64
รูปที่ 5.25	รูปขยายแสดงการหมุนวนในท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกันโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$	65
รูปที่ 5.26	รูปขยายแสดงการหมุนวนในท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกันโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$	65
รูปที่ 5.27	Static temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Hartnett and Eckert (1957) (Not to scale).....	66
รูปที่ 5.28	Static temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Hartnett and Eckert (1957) (Not to scale)	66
รูปที่ 5.29	Total temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Hartnett and Eckert (1957) (Not to scale).....	67
รูปที่ 5.30	Total temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Hartnett and Eckert (1957) (Not to scale)	67
รูปที่ 5.31	Total velocityในท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน.....	69
รูปที่ 5.32	ความเร็วในแนวสัมผัสในท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน	69
รูปที่ 5.33	อุณหภูมิในท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน.....	70
รูปที่ ผ.1	หน้าต่าง Star guide.....	78
รูปที่ ผ.2	หน้าต่าง Prostar	79
รูปที่ ผ.3	หน้าต่าง Prostar output	79
รูปที่ ผ.4	คุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการคำนวณ.....	80
รูปที่ ผ.5	แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$	81
รูปที่ ผ.6	แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$	82
รูปที่ ผ.7	ส่วนที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิ.....	83
รูปที่ ผ.8	Monitoring and reference data	84

	หน้า
รูปที่ ผ.9	85
รูปที่ ผ.10	86
รูปที่ ผ.11	87
รูปที่ ผ.12	88
รูปที่ ผ.13	89
รูปที่ ผ.14	90
รูปที่ ผ.15	91
รูปที่ ผ.16	92
รูปที่ ผ.17	93
รูปที่ ผ.18	94
รูปที่ ผ.19	95

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	ค่าคงที่ใน Standard $k - \varepsilon$ model	26
ตารางที่ 3.2	ค่าคงที่ใน RNG $k - \varepsilon$ model	28
ตารางที่ 3.3	Normalization factor	30
ตารางที่ 3.4	Inlet boundary conditions	31
ตารางที่ 4.1	มิติของรูปร่างและเงื่อนไขการไหลภายในเตาเผาแบบวอร์เทกซ์.....	38
ตารางที่ 5.1	ข้อมูลต่อวอร์เทกซ์จากการทดลองของ Brunn (1969)	46
ตารางที่ 5.2	ข้อมูลต่อวอร์เทกซ์จากการทดลองของ Hartnett and Eckert (1957)	61

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

C	Free vorticity constant
c_p	ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
c_v	ค่าความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่
E_k	พลังงานจลน์
g	แรงโน้มถ่วงโลก
H	ความสูงของช่องทางไหล
h	เอนทาลปี
k	Tubulent kinetic energy, สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity)
L	ความยาวทั้งหมดของโดเมนการไหล
m_i	มวลของอากาศที่ไหลเข้าที่ท่อวอร์เทกซ์
m_c	มวลของอากาศเย็นที่ไหลออกจากท่อวอร์เทกซ์
M_ϕ	Normalization factor
p	ความดัน
Pr	พรีนดท์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl number)
Q_T	อัตราการทำความเย็นที่ได้จากท่อวอร์เทกซ์
Q_c	อัตราส่วนการทำความเย็นต่ออากาศที่เข้ามาในท่อวอร์เทกซ์
q	ปริมาณความร้อน
R_{ij}	Kinetic Reynolds stresses
r	รัศมี
r_ϕ	ค่าเศษตกค้างของปริมาตรควบคุม
Re	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์
S_r	พื้นที่ผิว
s_{ij}	Strain tensor
t	เวลา
T	อุณหภูมิ
T_c	อุณหภูมิของอากาศเย็น
T_h	อุณหภูมิของอากาศร้อน
T_i	อุณหภูมิของอากาศที่เข้ามา
$(\Delta T)_c$	อุณหภูมิที่ลดลง
$(\Delta T)_{isen}$	อุณหภูมิที่ลดลงตามกระบวนการไอเซนโทรปิก

u	ความเร็วในแนวแกน x
V	ปริมาตรควบคุม
v	ความเร็วในแนวแกน y
W	พลังงานเชิงกล
w	ความเร็วในแนวสัมผัส
x	ระยะในแนวแกน x
y	ระยะในแนวแกน y
ϕ	ตัวแปรสเกลาร์
η	Dynamic viscosity
η_c	ประสิทธิภาพเชิงความเย็น
τ	ความเค้นเฉือน
Γ	สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)
μ_c	สัดส่วนมวลของอากาศเย็น
μ_t	Turbulent viscosity
ω	ความเร็วเชิงมุม
γ	Specific density
ρ	ความหนาแน่น
ε	Dissipation rate

ตัวห้อย (Subscripts)

i, j, k	Cartesian indices
e, w, n, s	Control volume face ระหว่าง P และ E, P และ W, P และ N, P และ S
t	Turbulent
i	Inlet
h	Hot side
c	Cold side

ตัวยก (Superscripts) และ Overbars

'	ค่าของการสั้นใน Turbulent
-	ค่าเฉลี่ย

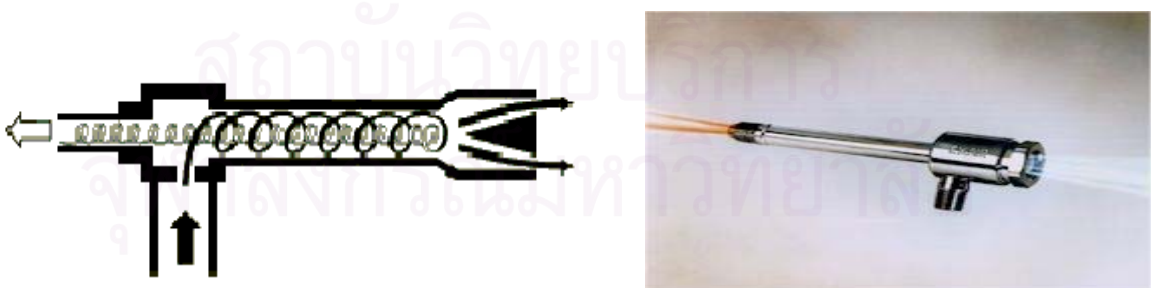
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ทอว์อ์เทกซ์ (Vortex tube) เป็นอุปกรณ์ที่ค้นพบโดย G.J. Ranque ซึ่งเป็นนักโลหะวิทยาและนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสในปี 1933 และได้ถูกปรับปรุงโดย Hilsch ซึ่งเป็นวิศวกรชาวฝรั่งเศสในปี 1947 ทอว์อ์เทกซ์นี้อาจจะเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่า Ranque-Hilsch tube (อ้างอิงจาก Promvong, 1997)

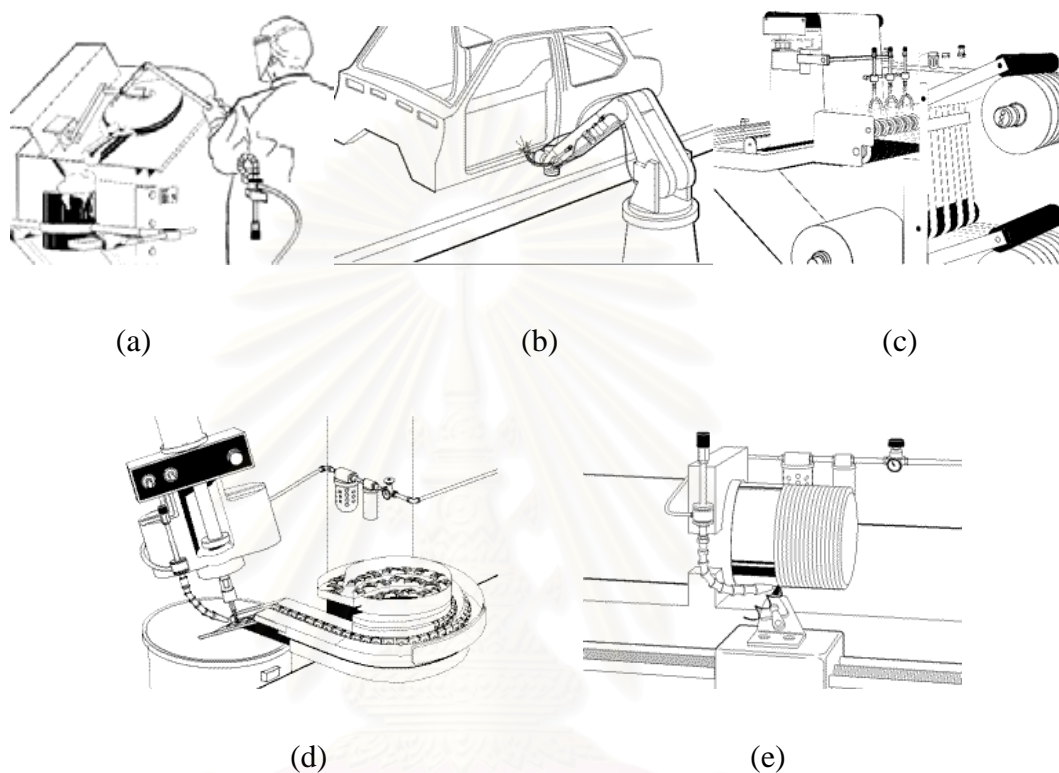
ทอว์อ์เทกซ์เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตอากาศร้อนและอากาศเย็นที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากสามารถผลิตอากาศร้อนและเย็นออกมาได้พร้อมกันโดยอาศัยการอัดอากาศด้วยความเร็วสูงจนเกิดการแยกตัวของพลังงาน ทอว์อ์เทกซ์นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะทางกายภาพ คือ แบบไหลสวนทางกัน (Counter flow vortex tube) และแบบไหลตามกัน (Uni-flow vortex tube) ทอว์อ์เทกซ์เป็นอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน ไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ โดยเมื่ออากาศที่มีความดันสูงไหลผ่านหัวฉีด (Nozzle) เข้ามาในแนวสัมผัสกับผิวทอว์อ์เทกซ์ (ซึ่งจำนวนของหัวฉีดนั้นอาจจะมีได้หลายหัวฉีด เช่น ในการทดลองของ Brunn (1969) จะใช้หัวฉีดจำนวน 4 หัวฉีด) จะทำให้อากาศเกิดการหมุนควง (Vortex) ภายในท่อ ทำให้เกิดการแยกตัวของอากาศร้อนและอากาศเย็นออกจากกัน ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศร้อนและอากาศเย็นนั้นอาจมีค่าแตกต่างกันได้ถึง $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยอากาศที่บริเวณกลางท่อจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและส่วนอากาศบริเวณผนังท่อจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า



รูปที่ 1.1 ทอว์อ์เทกซ์ (Exair Co., 1999)

ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการทำความร้อนด้วยอากาศของทอว์อ์เทกซ์ จะต่ำมากเมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นชนิดอื่นๆ แต่ก็มีข้อดีคือเป็นอุปกรณ์ที่ไม่สลับซับซ้อน และเป็นระบบที่สามารถ

ทำความเย็นได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีเป็นสารทำความเย็น ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าระบบทำความเย็นแบบทอเวอร์เทกซ์มีความปลอดภัยสูง และไม่มีมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงเหมาะกับการใช้งานในโรงงานและภาคอุตสาหกรรม ความเย็นที่ผลิตได้จากทอเวอร์เทกซ์สามารถนำมาใช้ในการหล่อเย็นชิ้นงานและเครื่องมือในงานกลึง งานกัด และงานเชื่อม เป็นต้น



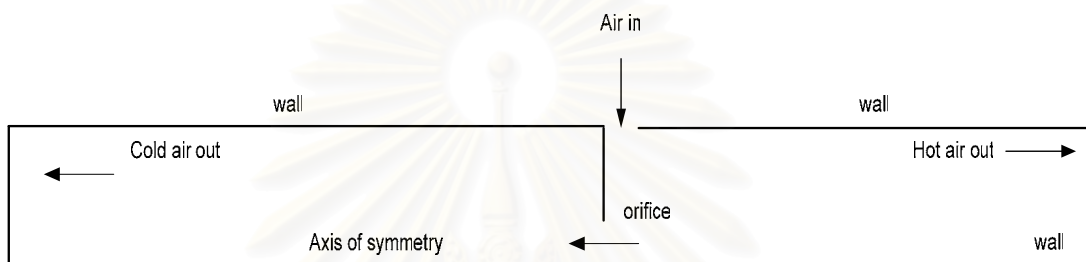
รูปที่ 1.2 การนำทอเวอร์เทกซ์ไปใช้ในงานอุตสาหกรรม (Newman tools Inc., 1998)

ตัวอย่างการนำทอเวอร์เทกซ์ไปใช้ในงานอุตสาหกรรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.2 โดยรูปที่ 1.2 (a) แสดงถึงกระบวนการการทำแม่พิมพ์ซึ่งมีความเข้มของความร้อนสูง (Great intensity of heat) ในขณะที่ทำงาน โดยทอเวอร์เทกซ์นั้นได้ถูกเตรียมไว้ในชุดทำงานของพนักงานเพื่อทำให้รู้สึกเย็นในขณะที่ทำงานในสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง รูปที่ 1.2 (b) แสดงการใช้ทอเวอร์เทกซ์ในการทำความเย็นบริเวณที่ถูกเชื่อมด้วยไฟฟ้าหลังจากการเชื่อมเสร็จสิ้นลง ซึ่งมีความสะดวกรวดเร็ว และทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น โดยวิธีนี้จะถูกใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์เป็นส่วนใหญ่ สำหรับในรูปที่ 1.2 (c) ทอเวอร์เทกซ์จะถูกนำมาใช้ในการทำความเย็นให้ไบมิดเพื่อลดความฝืดและความร้อนระหว่างชิ้นงานและไบมิด ในงานตัดพลาสติกซึ่งไบมิดแต่ละตัวทำงานด้วยความเร็วสูงอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ในรูปที่ 1.2 (d) ทอเวอร์เทกซ์ได้ถูกนำมาใช้ในการผลิตเกลียวทองเหลืองโดยนำอากาศเย็นมาใช้ในการทำความเย็นชิ้นงานและเครื่องทำเกลียวแทนน้ำ ซึ่งวิธีนี้จะทำให้สะดวกและสะอาดมากขึ้น รูปที่ 1.2 (e) แสดงการทำเกลียวซึ่งจะมีความร้อนสูงที่จุดสัมผัส ซึ่งจะทำให้อายุการ

ใช้งานของใบมีดสั้นลงและเกลียวที่ได้ไม่ราบเรียบ ท่อวอร์เทกซ์จะถูกนำไปใช้ในการทำความเย็นใบมีดซึ่งจะช่วยให้สามารถทำงานได้เร็วขึ้นและยืดอายุการใช้งานของใบมีด

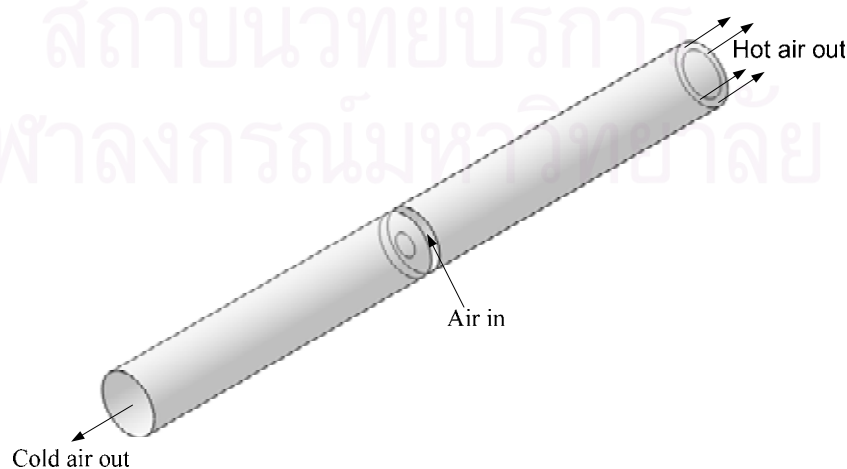
การทำงานของท่อวอร์เทกซ์นั้นเป็นที่น่าสนใจว่าเกิดลักษณะการไหลของอากาศอย่างไรขึ้นภายในท่อจนทำให้เกิดการแยกตัวของอุณหภูมิจึ้น ซึ่งในการศึกษาท่อวอร์เทกซ์นี้อาจทำได้โดยใช้วิธีทางด้านการทดลองเพื่อศึกษาถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น หรือใช้โปรแกรมทาง CFD (Computational fluid dynamics) เพื่อจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในท่อวอร์เทกซ์

Promvonge (1997) ได้ทำการจำลองการไหลแบบ 2 มิติในท่อวอร์เทกซ์ โดยมีแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 1.3

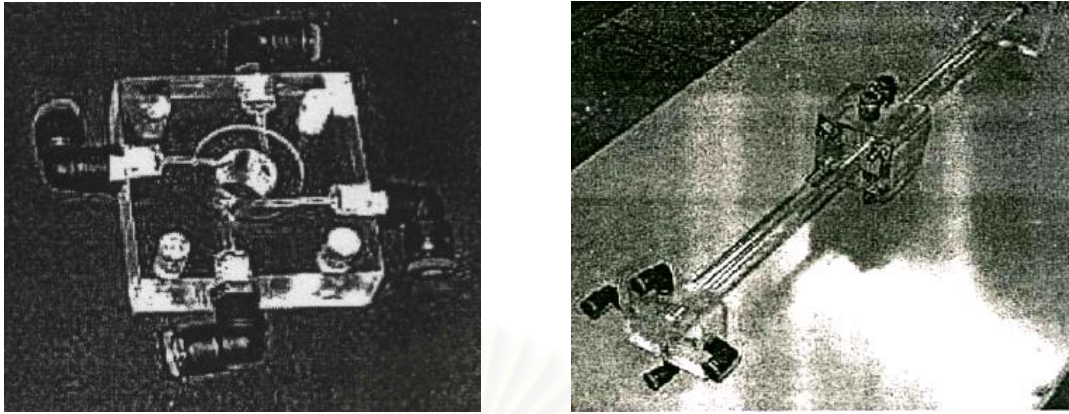


รูปที่ 1.3 โดเมนการคำนวณของการไหลภายในท่อวอร์เทกซ์แบบสองมิติ (Promvonge, 1997)

จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ช่องทางเข้านั้นไม่สามารถที่จะใช้หัวฉีดเป็นทางเข้าได้ จึงได้แทนที่ด้วยช่องที่มีความยาวตลอดเส้นรอบวง ซึ่งเมื่อแปลงรูปการไหลในแบบสองมิติมาเป็นสามมิตินั้นจะได้ดังรูปที่ 1.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการแทนที่หัวฉีดด้วยช่องที่มีความยาวตลอดเส้นรอบวงนั้นจะทำให้ลักษณะทางกายภาพดูแปลกไปเนื่องจากจะทำให้ดูเหมือนท่อนั้นขาดออกจากกัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ท่อวอร์เทกซ์ที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 1.5 จะพบว่ามีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก

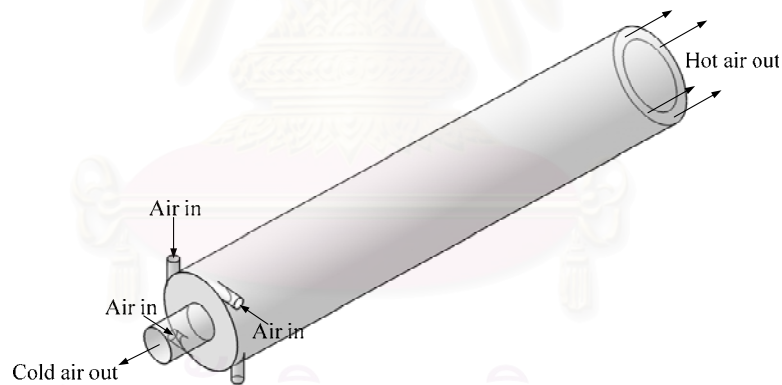


รูปที่ 1.4 รูปสามมิติของท่อวอร์เทกซ์ของ Promvonge (1997)



รูปที่ 1.5 ท่อออร์เทกซ์ที่ใช้ในการทดลอง (Eiamsa-ard, 2000)

ในการสร้างแบบจำลองสามมิตินั้น เราสามารถสร้างแบบจำลองของท่อออร์เทกซ์ โดยใช้ขนาดและรูปร่างจากของจริง ซึ่งจะทำให้แบบจำลองที่ได้นั้นมีความใกล้เคียงกับของจริง ดังแสดงในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 โดเมนการไหลในแบบสามมิติ

การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาจำลองปรากฏการณ์การไหลและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในท่อออร์เทกซ์นั้น จะทำให้เห็นถึงความเร็ว การกระจายตัวของอุณหภูมิ ที่เกิดขึ้นภายในท่อออร์เทกซ์ ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในท่อออร์เทกซ์มากยิ่งขึ้น

1.2 ผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

Scheper (1951) ได้ทำการวัดความเร็ว, ความดัน, Total temperature gradient และ Static temperature gradient ภายในท่อออร์เทกซ์โดยใช้ Probes และ Visualization technique ซึ่งเขาพบว่าความเร็วตามแนวแกนและความเร็วในแนวรัศมี จะมีขนาดน้อยกว่าความเร็วในแนวสัมผัส ผลจากการวัดของเขาแสดงให้เห็นว่า Static temperature จะลดลงในทิศทางออกข้างนอกตามแนวรัศมี

Martynovskii and Alekseev (1956) ได้ทำการทดลองศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการออกแบบท่อออร์เทกซ์ ซึ่งโพรไฟล์ของความเร็ว อุณหภูมิ และ ความดัน เป็นไปในแนวทางเดียวกับสมมติฐานของ Fulton (1950) และพวกเขาได้ทำการเปลี่ยนของไหลทำงานเป็น CH_4 , CO_2 และ NH_3 และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับอากาศ ซึ่งผลที่ได้พบว่าของไหลทำงานที่มีอุณหภูมิลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเข้ามากที่สุด ได้แก่ อากาศ, CH_4 , CO_2 และ NH_3 เรียงตามลำดับ

Blatt and Trusch (1962) ทำการทดลองเพื่อหาสมรรถนะของท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน และได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพของท่อออร์เทกซ์โดยการเพิ่ม Radial diffuser ที่ด้านปลายของท่อแทนที่วาล์วควบคุมการไหล เพื่อที่จะให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ทางเข้า และ อุณหภูมิทางออกด้านเย็นมีค่ามากที่สุด นอกจากนี้ยังได้ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดต่างๆของความยาวของท่อ และ โครงสร้างที่ทางเข้า โดยได้แสดงผลเนื่องจากการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ด้วย

Brunn (1969) ได้ทำการทดลองเพื่อหาความดัน อุณหภูมิและความเร็ว ภายในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน โดยใช้อัตราส่วนของอากาศเย็นกับอากาศทั้งหมดเท่ากับ 0.23 และสรุปว่าเทอมการพาในแนวรัศมีและในแนวแกน ในสมการการเคลื่อนที่และสมการพลังงานนั้นมีความสำคัญเท่ากัน ถึงแม้ว่าจะไม่ได้ทำการวัดความเร็วในแนวรัศมีแต่การคำนวณจากการใช้สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ได้แสดงให้เห็นว่าความเร็วในแนวรัศมีมีทิศพุ่งออกในบริเวณใกล้กับทางเข้าของอากาศและมีทิศพุ่งเข้าในบริเวณที่ห่างออกไป และได้สรุปว่า Turbulent heat transport เป็นส่วนสำคัญในการเกิดการแยกตัวของพลังงาน

Marshall (1977) ได้ทำการเปลี่ยนของผสมและขนาดของท่อต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ $Re = 60,000$ จะมีผลต่อการแยกตัวของพลังงาน

Takahama et al. (1979) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกตัวของพลังงาน โดยใช้ไอน้ำเป็นของไหลทำงาน ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพจะลดลงเนื่องจากความชื้นของไอน้ำที่ทางด้านออกเนื่องจากผลกระทบของการกลั่นตัวเป็นไอ

Takahama and Yokosawa (1981) ทำการทดสอบหาความยาวที่สั้นที่สุดของท่อออร์เทกซ์โดยใช้ Divergent tube ซึ่งผลที่ได้พบว่าความยาวของท่อควรอยู่ที่ $L \geq 100D_0$ (L คือ ความยาวของท่อและ D_0 คือ รัศมีภายในของท่อ) ซึ่งถ้าความยาวของท่อน้อยกว่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพลดลง และถ้าใช้ Divergent tube จะมีประสิทธิภาพมากกว่าท่อตรงที่ยาวเท่ากัน

Promvonge (1997) ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป TEFESS code ซึ่งใช้วิธี Finite volume เพื่อจำลองการไหลแบบหมุนวนและการแยกตัวของพลังงานภายในท่อออร์เทกซ์ โดยนำผลการคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Algebraic Reynolds Stress model (ASM) ให้ผลการทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในท่อออร์เทกซ์ดีกว่าแบบจำลอง standard $k - \epsilon$ model

Frohlingsdorf and Unger (1999) ได้ศึกษาความเร็วของการไหล และการแยกตัวของพลังงาน ภายในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CFX และได้ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$ model โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการเพิ่มเทอมของ Shear-Stress-induced mechanical work ลงไปด้วย ซึ่งผลลัพธ์ของความเร็วและอุณหภูมิที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองของ Brunn (1969)

Eiamsa-ard (2000) ได้ทำการทดลองถึงสมรรถนะการทำความเย็นของท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน (Counter flow type) โดยในการทดลอง ได้ใช้แผ่นอริฟิสที่มีขนาดต่างๆกัน โดยพบว่าแผ่นอริฟิสที่มีขนาด $d/D = 0.25$ จะมีผลทำให้เกิดผลต่างของการลดลงของอุณหภูมิภายในท่อออร์เทกซ์มากที่สุด

Saidi and Valipour (2003) ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการทำงานของท่อออร์เทกซ์ โดยได้แบ่งตัวแปรที่มีผลกระทบออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวแปรทางด้านกายภาพ เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของท่อ, เส้นผ่านศูนย์กลางของอริฟิส และ รูปร่างของหัวฉีด ตัว

แปรทางด้านความร้อน เช่น ความดันแก๊สที่ทางเข้า, ชนิดของแก๊ส, อัตราส่วนของมวลแก๊สเย็นกับแก๊สทั้งหมด และความชื้นของแก๊สที่ทางเข้าทั้งหมด ซึ่งจากผลที่ได้พบว่า การเพิ่มจำนวนหัวฉีดและความชื้นของอากาศที่ทางเข้าจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำควมเย็น ลดลง ส่วนการที่จะทำให้อุณหภูมิแตกต่างทางด้านเย็นเพิ่มขึ้นนั้นทำได้โดยเพิ่มความดันที่ทางเข้า

Behera et al. (2005) ได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบท่อวอร์เทกซ์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป STAR-CD และได้ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ โดยใช้เซลล์ในการคำนวณประมาณ 750,000 เซลล์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่จำนวนของหัวฉีด และอัตราส่วนของความยาวต่อขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อวอร์เทกซ์ (L/D) ซึ่งจากผลที่ได้พบว่า หัวฉีดจำนวน 6 หัวฉีด จะทำให้อุณหภูมิลดลงมากที่สุด และค่า L/D ในช่วง 25-35 จะมีประสิทธิภาพดีที่สุด

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อจำลองแบบสามมิติของการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในท่อวอร์เทกซ์ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม
2. เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในท่อวอร์เทกซ์

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. จำลองปรากฏการณ์การไหลและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในท่อวอร์เทกซ์ โดยใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์ (Commercial program)
2. ตรวจสอบความถูกต้องของความเร็วและอุณหภูมิที่ได้จากการใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์กับผลงานวิจัยที่ใช้วิธีการทดลองและการคำนวณในแบบสองมิติที่เคยมีผู้วิจัยมาแล้ว

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
2. ศึกษาการใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์
3. ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยทำการคำนวณปัญหาอย่างง่ายและเปรียบเทียบผลที่ได้กับงานวิจัยที่เคยมีผู้วิจัยแล้ว
4. ทำการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อวอร์เทกซ์

5. เปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลอง และผลการคำนวณในรูปแบบอื่นที่มีการรายงานผลวิจัยมาแล้ว
6. วิเคราะห์และสรุปผล
7. จัดทำวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเข้าใจลักษณะการไหลและการกระจายตัวของอนุภูมิภาคในทอว์อ์เทกซ์
2. ทราบถึงความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้ระหว่างการคำนวณของไหลแบบสามมิติกับสองมิติ
3. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับปัญหาที่มีการไหลในลักษณะคล้ายกัน

1.7 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งเนื้อหาออกเป็นบทต่างๆ ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ

กล่าวถึงความสำคัญและที่มา การศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา วัตถุประสงค์ ขั้นตอนการดำเนินงาน ขอบเขต ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและกลไกการทำงานของทอว์อ์เทกซ์

กล่าวถึงประเภทของทอว์อ์เทกซ์ กลไกการทำงานและสมมติฐานในการทำงานของทอว์อ์เทกซ์ และตัวแปรที่พิจารณาของทอว์อ์เทกซ์

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

อธิบายถึงสมการพื้นฐานของการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนรวมทั้งแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ ซึ่งได้แก่แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ และแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$

บทที่ 4 การทดสอบสมรรถนะของโปรแกรม CFD

กล่าวถึงกรณีศึกษาที่นำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมทาง CFD ซึ่งประกอบด้วยกรไหลผ่าน Backward-facing step และการไหลในเตาเผาแบบวอร์เทกซ์

บทที่ 5 การจำลองการไหลภายในท่อวอร์เทกซ์

ทำการคำนวณความเร็วและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในท่อวอร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน และแบบไหลตามกัน จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองและการคำนวณในแบบสองมิติ

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ประกอบด้วยบทสรุปของวิทยานิพนธ์และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อเนื่องที่อาจดำเนินการได้ต่อไปในอนาคต



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

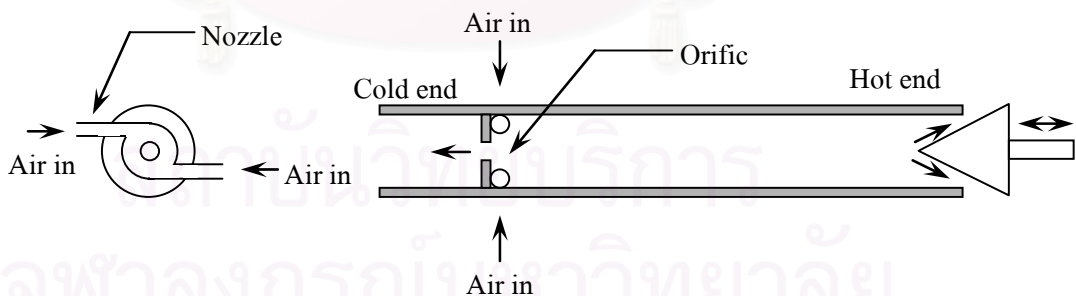
ทฤษฎีและกลไกการทำงานของ ท่อวอร์เทกซ์

2.1 ชนิดของท่อวอร์เทกซ์

การแบ่งชนิดของท่อวอร์เทกซ์นั้นจะแบ่งตามลักษณะการไหลภายในท่อวอร์เทกซ์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิดไหลสวนทางกัน (Counter flow) และชนิดไหลตามกัน (Uni-flow)

2.1.1 ท่อวอร์เทกซ์ชนิดไหลสวนทางกัน (Counter flow vortex tube)

รูปที่ 2.1 แสดงท่อวอร์เทกซ์ชนิดไหลสวนทางกัน ซึ่งประกอบด้วยหัวฉีดที่อยู่ติดกับแผ่นออริฟิส ท่อวอร์เทกซ์ และวาล์วควบคุมการไหล (Cone-shaped valve) เมื่ออากาศที่มีความเร็วสูงถูกอัดผ่านเข้ามาทางหัวฉีดจะทำให้เกิดการไหลหมุนวนภายในท่อ และจะเกิดการแยกตัวระหว่างอากาศร้อนและอากาศเย็น โดยที่อากาศเย็นบริเวณกลางท่อจะไหลออกผ่านทางแผ่นออริฟิสซึ่งอยู่ที่ฝั่งตรงข้ามกับวาล์วควบคุมการไหล ในขณะที่อากาศร้อนที่บริเวณผนังท่อจะไหลผ่านออกมาที่ด้านที่มีวาล์วควบคุมการไหล



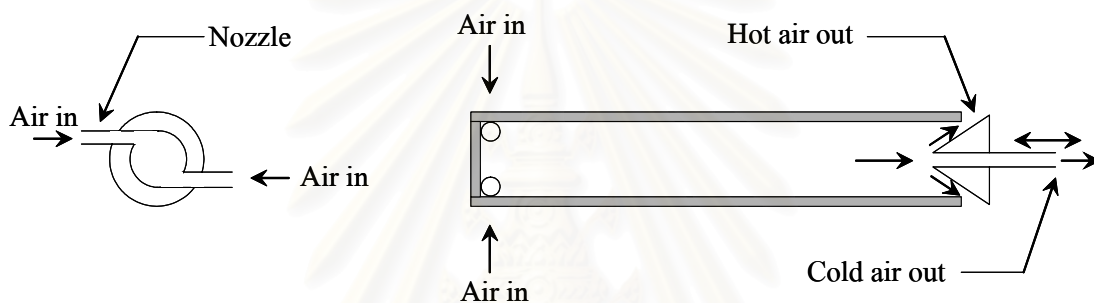
รูปที่ 2.1 ท่อวอร์เทกซ์ชนิดไหลสวนทางกัน (Counter Flow Vortex Tube)

สำหรับท่อวอร์เทกซ์ชนิดไหลสวนทางกันนี้ วาล์วควบคุมการไหลที่อยู่บริเวณทางออกของอากาศร้อน จะช่วยป้องกันการรวมตัวของอากาศร้อนและอากาศเย็นและช่วยควบคุมปริมาณการ

ไหลออกของอากาศร้อนและอากาศเย็น ซึ่งประโยชน์ทั้งสองอย่างนี้จะช่วยทำให้ลดอุณหภูมิทางด้านอากาศเย็นได้มาก

2.1.2 ท่อวอร์เทกซ์ชนิดไหลตามกัน (Uni-flow vortex tube)

รูปที่ 2.2 แสดงท่อวอร์เทกซ์ชนิดไหลตามกัน ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกันกับท่อวอร์เทกซ์ชนิดไหลสวนทางกัน โดยจะมีข้อแตกต่างกันคือส่วนที่อยู่ตรงข้ามกับวาล์วควบคุมการไหล จะปิดสนิทโดยที่ไม่มีแผ่นออริฟิซอยู่ ด้วยเหตุนี้จะทำให้ทั้งอากาศร้อนและอากาศเย็นไหลออกไปทางเดียวกันทางด้านวาล์วควบคุมการไหล

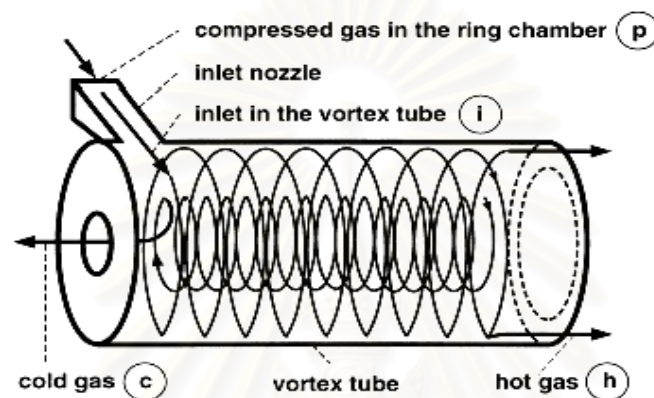


รูปที่ 2.2 ท่อวอร์เทกซ์ชนิดไหลตามกัน (Uni-Flow Vortex Tube)

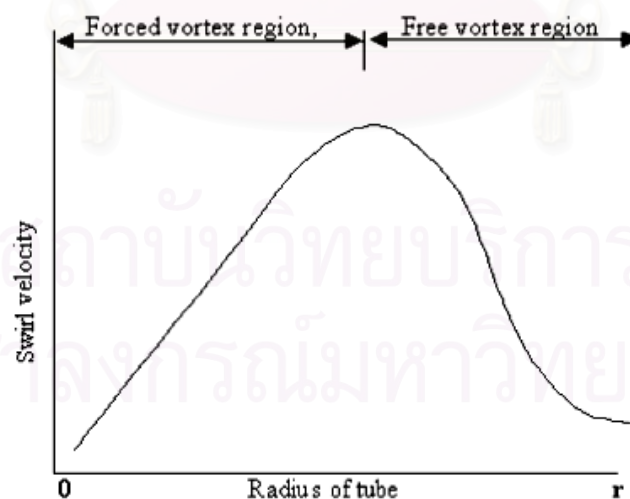
2.2 การทำงานของท่อวอร์เทกซ์

รูปที่ 2.3 แสดงถึงลักษณะการไหลในท่อวอร์เทกซ์ เมื่ออากาศที่มีความดันสูงไหลผ่านหัวฉีดเข้าไปในท่อวอร์เทกซ์ในแนวเส้นสัมผัสกับเส้นรอบท่อ การไหลของอากาศออกจากหัวฉีดเข้าไปในท่อวอร์เทกซ์อย่างทันทีทันใดจะทำให้ความดันอากาศลดลงอย่างฉับพลันจนเข้าใกล้ความดันบรรยากาศและความเร็วของอากาศเข้าใกล้ความเร็วเสียง ทำให้มีแรงหนีศูนย์กลางบังคับให้อากาศหมุนไปตามเส้นรอบวงของขอบท่อ เกิดเป็นที่ว่างของอากาศบริเวณกลางท่อ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Free vortex คืออากาศที่ด้านในมีความเร็วในการหมุนสูงกว่าที่อยู่ใกล้ผนังท่อ แต่เนื่องจากว่าอากาศเป็นสารชนิดหนึ่งที่มีความหนืด (Viscosity) จึงทำให้เกิดมีแรงเสียดทานขึ้นในชั้นของการหมุนวนของอากาศ ทำให้ชั้นความเร็วสูงไปเร่งชั้นความเร็วต่ำให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดลักษณะการไหลที่เรียกว่า Force vortex ขึ้น นั่นคือจะมีความเร็วในการหมุนวนของอากาศตรงจุดศูนย์กลางที่ค่อยๆลดลงโดยที่ความเร็วในการหมุนของอากาศส่วนที่อยู่ใกล้กับผนังท่อเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหมุนวนของอากาศจากลักษณะ Free vortex

ไปเป็น Force vortex ตามที่กล่าวมานั้นจะก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของพลังงานจลน์ จากจุดศูนย์กลางท่อไปสู่ผนังท่อ โดยลักษณะการกระจายตัวของความเร็วในแนวสัมผัสได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 เมื่อพิจารณาตามกฎการอนุรักษ์พลังงานซึ่งกล่าวไว้ว่า พลังงานไม่มีการสูญหายนั่นคือ พลังงานทั้งหมดจากพลังงานจลน์จะถูกถ่ายเทไปเป็นพลังงานความร้อน จึงทำให้มีการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนของอากาศจากจุดศูนย์กลางท่อเคลื่อนที่ออกไปสู่บริเวณใกล้กับผนังท่อ ส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศที่จุดศูนย์กลางท่อต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศที่ใกล้กับผนังท่อ



รูปที่ 2.3 ลักษณะการไหลของอากาศภายในท่อวอร์เทกซ์ (Frohlingsdorf and Unger, 1999)

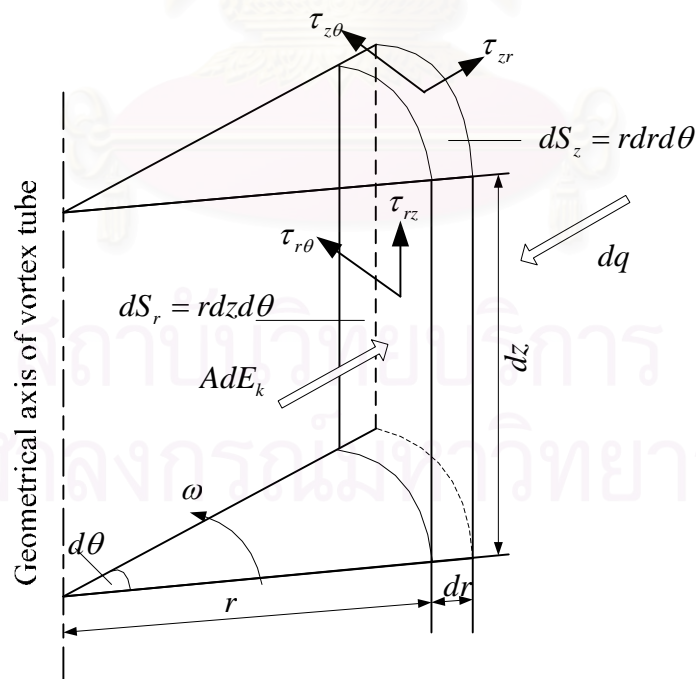


รูปที่ 2.4 การกระจายตัวของความเร็วในท่อวอร์เทกซ์ (Behera et al., 2005)

2.3 สมมติฐานกลไกการทำงานของทอว์เทกซ์

จนถึงปัจจุบันนี้ยังไม่มีทฤษฎีที่จะสามารถอธิบายปรากฏการณ์ภายในทอว์เทกซ์ได้อย่างชัดเจน แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายคนที่ได้เสนอสมมติฐานการทำงานของทอว์เทกซ์ไว้ ซึ่งสมมติฐานที่ได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวางคือสมมติฐานของ Fulton (1950) ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า

เมื่อแก๊สถูกปล่อยออกจากหัวฉีดอย่างทันทีทันใด จะทำให้เกิดความเร็วสูงและอุณหภูมิลดลงทำให้เกิด Free vortex ($\omega r^2 = \text{const}_1$) โดยแรงเสียดทานจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็น Force vortex ($\omega = \text{const}_2$) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นจะทำให้พลังงานจลน์เพิ่มขึ้นโดยมีทิศพุ่งออกไปทางด้านนอก โดยความเร็วเชิงมุมของแก๊สชั้นในจะมีอัตราการลดลงมากกว่าชั้นนอกในเวลาเดียวกันนั่นเอง จะมีการไหลของพลังงานความร้อนเข้ามาทางด้านในเนื่องจากความต่างกันของอุณหภูมิ แต่การไหลของพลังงานจลน์และพลังงานความร้อนนั้นไม่เท่ากัน โดยพลังงานจลน์นั้นมีมากกว่าพลังงานความร้อนซึ่งแก๊สด้านนอกจะรับพลังงานจลน์มากกว่าปล่อยความร้อนออกไปทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นและไหลออกจากท่อโดยผ่านวาล์วควบคุมการไหล ส่วนแก๊สชั้นในนั้นได้ปล่อยพลังงานจลน์ออกไปมากกว่ารับพลังงานความร้อนเข้ามาทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลงและไหลออกไปทางแผ่นออริฟิส



รูปที่ 2.5 ความเค้นและทิศทางของความเค้นในสมมติฐานกลไกการทำงานของทอว์เทกซ์ของ Fulton (1950)

ในการวิเคราะห์อัตราส่วนของพลังงานจลน์ (AE_k) และความร้อน (q) มีหลักการในการพิจารณา คือ สมมติให้การไหลภายในท่อเป็นการไหลแบบราบเรียบ และทำการพิจารณาชั้นส่วนของแก๊สซึ่งมีปริมาตร $rdrdzd\theta$ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยพิจารณาเฉพาะความเค้น $\tau_{r\theta}$, τ_{rz} , $\tau_{z\theta}$ และ τ_{xr} โดยที่ความเค้นในแนวสัมผัส $\tau_{r\theta}$ จะมีขนาดมากที่สุด ซึ่งสามารถเขียน $\tau_{r\theta}$ ได้เป็น

$$\tau_{r\theta} = \eta \left(\frac{dw}{dr} - \frac{w}{r} \right) = \eta r \frac{d\omega}{dr} \quad (2.1)$$

เมื่อ η = Dynamic viscosity สำหรับแก๊สที่ไหลแบบราบเรียบ ($\text{kg} \cdot \text{s} / \text{m}^2$)
 w = ความเร็วในแนวสัมผัส (m/s)
 r = รัศมี (m)
 ω = ความเร็วเชิงมุม (s^{-1})

เมื่อความเร็วในแนวสัมผัสได้เปลี่ยน Free vortex ไปเป็น Force vortex จะเกิดความแตกต่างกันของเงื่อนไขขอบเขตในระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนของท่อ โดยสมมติให้จุดที่พิจารณาของแก๊สที่เคลื่อนที่ใน Free vortex เป็น

$$\frac{d\omega}{dr} = -\frac{2C}{r^3} \quad (2.2)$$

$$\text{และ } \tau_{r\theta} = -2\eta \frac{C}{r^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ C = Free vorticity constant (m^2/s)

แรงบิดของแรงเสียดทานบนพื้นผิวทรงกระบอกรัศมี r คือ

$$M = -2\eta \frac{C}{r^2} 2\pi r r = -4\pi\eta C \quad (2.4)$$

ซึ่งเป็นค่าคงที่ ดังนั้นทุกๆระหว่างกลางชั้นของแก๊สจะมีโมเมนต์สองโมเมนต์ที่มีขนาดเท่ากันแต่มีทิศตรงกันข้าม

อย่างไรก็ตามที่ชั้นในและชั้นนอกของแก๊สไม่ได้หมุนด้วยแรงโมเมนต์ที่เท่ากัน ด้วยเหตุนี้แรงเนื่องจากความหนืดและความเสียดทานจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโปรไฟล์ของความเร็วในแนวสัมผัส

ในแก๊สที่มีความหนืด อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมในแนวรัศมี เป็นสาเหตุให้เกิดความเค้นในแนวสัมผัสระหว่างชั้นของแก๊สที่อยู่ติดกัน ด้วยเหตุนี้ชั้นของแก๊สที่มีความเร็วเชิงมุมสูงกว่าจะถ่ายเทพลังงานจลน์ไปยังชั้นของแก๊สที่มีความเร็วเชิงมุมต่ำกว่า โดยจะถ่ายเทพลังงานไปในแนวรัศมีจากแนวแกนไปสู่ผนัง ถ้าความเค้นในแนวสัมผัสคือ $\tau_{r\theta}$ ความเร็วของแก๊สคือ w ปริมาณของพลังงานจลน์ที่เคลื่อนที่ไปในแนวรัศมีก็คือ

$$E_k = \tau_{r\theta} w \quad (2.5)$$

ส่วนอีกด้านหนึ่งนั้น อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแนวรัศมี เป็นสาเหตุให้ความร้อนพุ่งเข้ามาภายในท่อออร์เทกซ์ ซึ่งสามารถเขียนปริมาณความร้อนได้เป็น

$$dq_r = \lambda \frac{dT}{dr} r d\theta dz = \lambda \frac{dT}{dr} dS_r \quad (2.6)$$

เมื่อ λ = Thermal conductivity (W / m · K)

S_r = พื้นที่ผิว (m²)

จากสมการข้างบน สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ที่มีทิศพุ่งออกและความร้อนที่มีทิศพุ่งเข้า จากข้อสมมติที่ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวรัศมีและแนวแกนมีขนาดน้อยมากและอุณหภูมิเป็นฟังก์ชันของความเร็วในแนวสัมผัส ดังนั้นสมการพลังงานสามารถเขียนให้อยู่ในรูปดังต่อไปนี้

$$w^2 + 2gIc_p T = \omega^2 r^2 + 2gIc_p T = \frac{C^2}{r^2} + 2gIc_p T = \text{const} \quad (2.7)$$

เมื่อ I = Mechanical equivalent of heat (102 kg · m / kJ)

c_p = Specific heat at constant pressure (kJ / kg · K)

พลังงานจลน์ที่ไหลผ่านพื้นที่ผิว dS_r จะเป็น

$$dE_k = 2\eta \frac{C^2}{r^3} dS_r \quad (2.8)$$

และความร้อนที่ไหลเข้าที่พื้นที่ผิวเดียวกันจะมีค่าเท่ากับ

$$dq = \lambda \frac{C^2}{Igc_p r^3} dS_r \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.8) และ (2.9) จะสามารถหาอัตราส่วนของพลังงานจลน์และพลังงานความร้อนได้เป็น

$$\frac{AE_k}{q} = 2 \frac{\eta g C_p}{\lambda} = 2 \text{Pr} \quad (2.10)$$

ในความเป็นจริงนั้นการเคลื่อนที่ของแก๊สในท่อวอร์เทกซ์เป็นแบบปั่นป่วน จึงแทนที่สัมประสิทธิ์ของความหนืดและการนำความร้อนให้เป็นของการไหลแบบปั่นป่วน จะได้เป็น

$$\frac{AE_k}{q} = \frac{2\eta^* g C_p}{\lambda^*} = 2 \text{Pr}^* \quad (2.11)$$

เมื่อ Pr^* = ค่า Prandtl number สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

2.4 การวิเคราะห์ตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

การทำงานของท่อวอร์เทกซ์นั้นจะเป็นไปตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$h_i = \mu_c h_c + (1 - \mu_c) h_h \quad (2.12)$$

โดยที่ตัวห้อย

i คือ Inlet

h คือ Hot side

c คือ Cold side

เมื่อ $\mu_c = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_i}$ คืออัตราส่วนของมวลอากาศเย็นที่ออกไปต่อมวลของอากาศที่เข้ามาทั้งหมด และ

h คือเอนทาลปีรวม

โดยทั่วไปแล้วสำหรับท่อวอร์เทกซ์ที่มีความยาวมาก ความเร็วที่ทางออกจะมีค่าน้อย ดังนั้นความเร็วนี้จะมีผลต่อเอนทาลปีรวมน้อยมาก ทำให้สามารถตัดทิ้งได้ เพราะฉะนั้นสำหรับแก๊สในอุดมคติ สมการอนุรักษ์พลังงานสามารถเขียนได้เป็น

$$c_p T_i = \mu_c c_p T_c + (1 - \mu_c) c_p T_h \quad (2.13)$$

เมื่อ T_i คือ อุณหภูมิของอากาศที่เข้ามา

T_c คือ อุณหภูมิของอากาศเย็น

T_h คือ อุณหภูมิของอากาศร้อน

สำหรับแก๊สสมบูรณ์แบบ (Perfect gas) ค่าความร้อนจำเพาะ c_p จะไม่ขึ้นอยู่กับสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ ดังนั้นสมการที่ 2.13 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้เป็น

$$T_i = \mu_c T_c + (1 - \mu_c) T_h \quad (2.14)$$

สำหรับแก๊สจริงนั้น ค่าเอนทาลปีจะขึ้นอยู่กับความดัน ดังนั้นจึงต้องคิดผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเนื่องจากการขยายตัวของแก๊ส (Joule Thomson effect) เนื่องจากอากาศจะมีการขยายตัวเมื่อผ่านหัวฉีดเข้ามา จึงไม่สามารถใช้สมการที่ 2.13 ได้ ดังนั้นอุณหภูมิรวมของอากาศที่เข้ามาจึงสามารถประมาณได้จาก

$$T_i = \mu_c (T_c - T_{ij}) + (1 - \mu_c) (T_h - T_{ij}) \quad (2.15)$$

2.5 ตัวแปรที่แสดงถึงประสิทธิภาพของทอว์อ์เทกซ์

ตัวแปรที่สำคัญในการแสดงประสิทธิภาพของทอว์อ์เทกซ์ก็คือ สัดส่วนมวลของอากาศเย็นซึ่งก็คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศเย็นต่ออัตราการไหลของมวลที่ไหลเข้ามา อุณหภูมิที่ลดลงและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยสามารถเขียนได้เป็น

$$\mu_c = \frac{m_c}{m_i} \quad (2.16)$$

ส่วนอุณหภูมิของอากาศเย็นที่ลดลงมาคือ

$$(\Delta T)_c = T_i - T_c \quad (2.17)$$

และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นคือ

$$(\Delta T)_h = T_h - T_i \quad (2.18)$$

2.5.1 อัตราส่วนการทำความเย็นต่ออากาศที่เข้ามาในทอเวอร์เทกซ์

อัตราการทำความเย็นที่ได้จากทอเวอร์เทกซ์ (Q_T) หาได้จากสมการ

$$Q_T = m_c c_p (T_i - T_c) \quad (2.19)$$

เมื่อ c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่

อัตราส่วนการทำความเย็นต่ออากาศที่เข้ามาในทอเวอร์เทกซ์ (Q_c) สามารถหาได้จาก

$$Q_c = \frac{Q_T}{m_i} \quad (2.20)$$

$$\text{ดังนั้นจะได้} \quad Q_c = \frac{m_c c_p (T_i - T_c)}{m_i} \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.16) สามารถเขียนสมการ (2.21) ได้ใหม่เป็น

$$Q_c = \mu_c c_p (\Delta T)_c \quad (2.22)$$

2.5.2 ประสิทธิภาพเชิงความเย็นทางเทอร์โมไดนามิกส์ของทอเวอร์เทกซ์

ในการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความเย็นของทอเวอร์เทกซ์ จะพิจารณาว่าเป็นแก๊สในอุดมคติและมีการขยายตัวแบบอะเดียบาติก และอากาศที่ไหลภายในทอเวอร์เทกซ์นั้นมีการขยายตัวตามกระบวนการไอเซนโทรปิก โดยสามารถเขียนได้เป็น

$$(\Delta T)_c = \eta_c (\Delta T)_{isen} \quad (2.23)$$

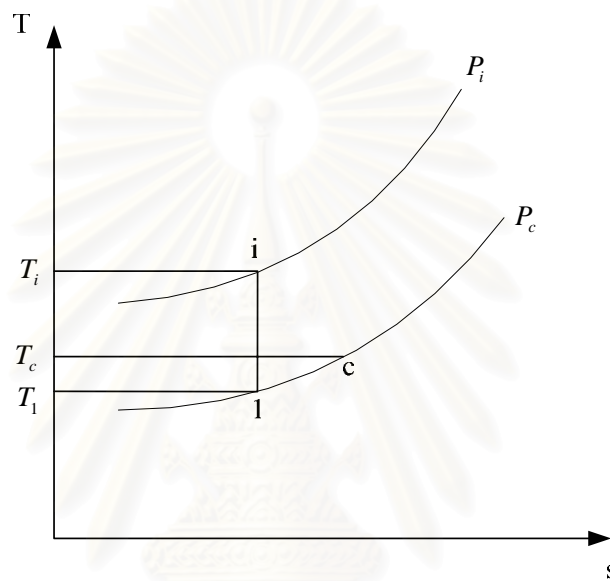
เมื่อ η_c คือ ประสิทธิภาพเชิงความเย็น
 $(\Delta T)_c$ คือ อุณหภูมิที่ลดลง
 $(\Delta T)_{isen}$ คือ อุณหภูมิที่ลดลงตามกระบวนการไอเซนโทรปิก

ในกรณีนี้อากาศที่ขยายตัวจากความดัน P_i ไปยังความดัน P_c โดยใช้กระบวนการไอเซนโทรปิกแสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งอัตราการขยายตัวของอุณหภูมิจาก T_i ไปยัง T_1 สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$PV^\gamma = \text{const} \quad (2.24)$$

ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันคือ

$$\frac{T_i}{T_1} = \left(\frac{P_i}{P_c} \right)^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)} \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.6 แผนภูมิ $T-s$ ตามกระบวนการไอเซนโทรปิก

อุณหภูมิที่จุด 1 สามารถหาได้จากสมการที่ (2.25) โดยจะได้เป็น

$$T_1 = \frac{T_i}{\left(\frac{P_i}{P_c} \right)^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)}} \quad (2.26)$$

อุณหภูมิที่ลดลงตามกระบวนการไอเซนโทรปิกคือ

$$(\Delta T)_{isen} = T_i - T_1 \quad (2.27)$$

แทนค่า T_1 จากสมการ (2.26) จะได้

$$(\Delta T)_{isen} = T_i - \frac{T_i}{\left(\frac{P_c}{P_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = T_i \left(1 - \left(\frac{P_c}{P_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right) \quad (2.28)$$

ซึ่งอุณหภูมิที่ลดลงหลังจากผ่านท่อวอร์เทกซ์แล้วคือ

$$(\Delta T)_c = \eta_c T_i \left(1 - \left(\frac{P_c}{P_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right) \quad (2.29)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงความเย็นคือ

$$\eta_c = \frac{T_i - T_c}{T_i \left(1 - \left(\frac{P_c}{P_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)} \quad (2.30)$$

2.5.3 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ

ในการหาสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, C.O.P) หรือ อัตราส่วนการทำความเย็นต่อพลังงานที่ใช้ในการทำความเย็น จะพิจารณาว่าเป็นแก๊สในอุดมคติ และมีการขยายตัวตามกระบวนการไอเซนโทรปิก โดยที่ค่า C.O.P สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{C.O.P} = \frac{Q_c}{w} \quad (2.31)$$

เมื่อ	C.O.P	คือ	สัมประสิทธิ์สมรรถนะ
	Q_c	คือ	อัตราการทำความเย็นต่อหน่วยของอากาศที่ไหลเข้าในท่อวอร์เทกซ์
	w	คือ	พลังงานเชิงกลที่ใช้ในการทำความเย็นต่อหน่วยของอากาศที่ไหลเข้าในท่อวอร์เทกซ์

พลังงานเชิงกลที่ทำให้เกิดการขยายตัวจากความดัน P_i ไปยังความดัน P_c โดยใช้กระบวนการไอเซนโทรปิก คือ

$$w = \frac{W}{m_i} \quad (2.32)$$

$$W = m_i c_p T_i \left[\left(\frac{P_i}{P_c} \right)^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)} - 1 \right] \quad (2.33)$$

ดังนั้นจะได้

$$w = \frac{\gamma}{\gamma-1} RT_i \left[\left(\frac{P_i}{P_c} \right)^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)} - 1 \right] \quad (2.34)$$

แทนค่า Q_c และ w ในสมการ (2.21) และ (2.34) ลงในสมการ (2.31) จะได้เป็น

$$\text{C.O.P} = \frac{\mu_c c_p (T_i - T_c)}{\frac{\gamma}{\gamma-1} RT_i \left[\left(\frac{P_i}{P_c} \right)^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)} - 1 \right]} \quad (2.35)$$

ในการหาค่า C.O.P นี้ สมการที่นำเสนอใช้การหาพลังงานเชิงกลตามกระบวนการไอเซนโทรปิก แต่กระบวนการไอเซนโทรปิกเป็นกระบวนการในอุดมคติซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นจริง ดังนั้นพลังงานเชิงกลที่ใช้จริงจึงมีค่าที่สูงกว่านี้ ซึ่งจะหาค่า C.O.P ที่แท้จริงมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากสมการ (2.35)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

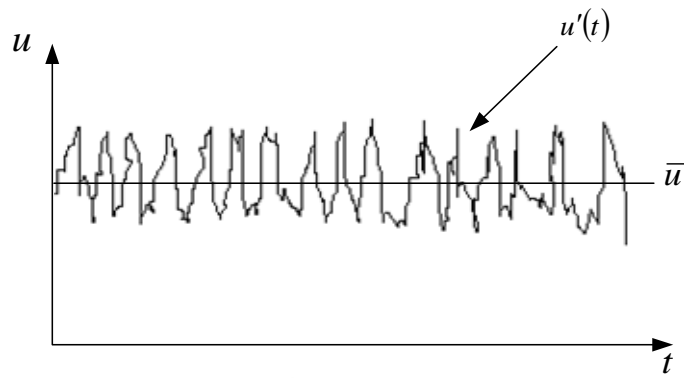
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนของของไหล ซึ่งสามารถเขียนได้อยู่ในรูปชุดสมการเชิงอนุพันธ์ที่ประกอบด้วยสมการพื้นฐาน ดังนี้

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

โดยทั่วไป สามารถแบ่งประเภทการไหลตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน แต่ในที่นี้เราจะกล่าวถึงการไหลแบบปั่นป่วนเป็นหลัก ส่วนการไหลแบบราบเรียบจะกล่าวถึงเพียงเพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการหาสมการพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วนต่อไป

3.1 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

ในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลโดยทั่วไป สามารถทำได้โดยการหาผลเฉลยของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum equation) อย่างไรก็ตามสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนนั้น ตัวแปรต่างๆจะมีค่าไม่คงที่ และจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป เช่น ความเร็ว u ที่แสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งลักษณะเช่นนี้ ทำให้การคำนวณค่าตัวแปรมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้นมาก เพราะฉะนั้นจึงสมมุติว่าคุณสมบัติต่างๆที่พิจารณาอันเกิดจากธรรมชาติของการไหลแบบปั่นป่วนสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลา เช่น \bar{u} , \bar{v} หรือ \bar{p} และส่วนที่แทนที่ผลของการสั่นที่สัมพันธ์กับเวลา (Fluctuation) เช่น u' , v' หรือ p'



รูปที่ 3.1 ลักษณะของความเร็วที่เวลาใดๆ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

สมการพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วน สามารถพัฒนาได้จากสมการของการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งสมการความต่อเนื่อง สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน ของการไหลแบบราบเรียบสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบเทนเซอร์ (Tensor) ได้ตามลำดับดังนี้

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j H) = \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i \sigma_{ij}) - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (3.3)$$

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

$$\sigma_{ij} = 2\mu S_{ij} \quad (3.4)$$

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

ในสมการอนุรักษ์พลังงาน H คือ Total enthalpy สามารถเขียนได้เป็น

$$H = h + \frac{1}{2} u_i u_i \quad (3.5)$$

เมื่อ h คือค่าเอนทาลปี และเวกเตอร์ของ Heat flux (q_j) ในสมการ (3.3) คือ

$$q_j = -k_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (3.6)$$

เมื่อ k_T คือค่า Thermal conductivity

จากการพิจารณาการไหลเป็นแบบปั่นป่วน ทุกตัวแปรในการไหลสามารถแบ่งแยกออกเป็น ส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยและส่วนที่แทนผลของการสั่น ตัวอย่างเช่น ฟังก์ชัน ϕ สามารถเขียนได้เป็น

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (3.7)$$

ทำการเฉลี่ยตัวแปรต่างๆ ในช่วงเวลาหนึ่ง (Time-averaging) จะได้

$$\bar{\phi}(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \phi(x,t) dt \quad (3.8)$$

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ยแล้ว จะทำให้ค่าเฉลี่ยของส่วนที่แทนผลของการสั่นมีค่าเป็นศูนย์ ($\bar{\phi}' = 0$) และจะได้ค่าเฉลี่ยของผลคูณทั้งสองตัวแปรเป็น $\overline{fg} = \bar{f}\bar{g} + \overline{f'g'}$ ดังนั้นจึงเขียนสมการ (3.1) และ (3.2) ได้ใหม่ ในรูปค่าเฉลี่ยของเวลาในรูปของเทนเซอร์ตามลำดับ ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\sigma}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (3.10)$$

สมการ (3.9) และ (3.10) นี้เรียกว่าสมการ Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) ซึ่งจากการสังเกตจะเห็นได้ว่า สมการ (3.10) มีเทอม Kinetic Reynolds stresses ($R_{ij} = \rho \overline{u'_i u'_j}$) เพิ่มขึ้นมาจากรูปของสมการ (3.2) ทำให้มีจำนวนตัวแปรมากกว่าจำนวนสมการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนมาช่วยในการคำนวณ

3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence modeling)

ในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา การศึกษาปรากฏการณ์การไหลแบบปั่นป่วนด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้มีผู้คิดค้นและสร้างแบบจำลองความปั่นป่วน

(Turbulence model) ขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งแบบจำลองส่วนใหญ่ถูกสร้างบนพื้นฐานของ Two-equation model ซึ่งใช้แนวคิดของ Boussinesq approximation ร่วมกับสมการ Kinetic energy และ Auxiliary quantities เช่น Dissipation rate (ε), Turbulence length scale (ℓ) หรือ Specific dissipation rate (ω) เป็นต้น

แบบจำลองความปั่นป่วนมีด้วยกันหลายรูปแบบ เช่น Standard $k - \varepsilon$ model (Launder and Spalding, 1974), RNG $k - \varepsilon$ model (Yakhot and Orszag, 1986) และ $k - \omega$ model (Wilcox, 1993) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds stress จะมีความสามารถในการทำนายการไหลแบบ Swirling ได้ดี แต่ไม่สามารถใช้กับเงื่อนไขขอบแบบ Cyclic ได้ (หัวข้อที่ 3.5) จึงต้องใช้หน่วยความจำในเครื่องคอมพิวเตอร์มาก ทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ไม่สามารถคำนวณได้ ดังนั้นรูปแบบที่เหมาะสมกับการจำลองการไหลแบบหมุนวนและถูกเลือกนำมาใช้ในที่นี้ คือ

- 1) แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$
- 2) แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$

3.2.1 Standard $k - \varepsilon$ model

ในที่นี้ k คือค่า Turbulent kinetic energy ซึ่งถูกนิยามมาจากการแปรผันของความเร็ว มีมิติคือ ($L^2 T^{-2}$) เช่น m^2/s^2 โดยที่

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.11)$$

ε คือค่า Turbulence eddy dissipation คือ อัตราซึ่งความเร็วผันแปรถูกสลาย และมีมิติคือ k ต่อหน่วยเวลา ($L^2 T^{-3}$) เช่น m^2/s^3

สำหรับสมการ Turbulence kinetic energy สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \mu_t (P + P_B) - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t P_{NL} \quad (3.12)$$

$$\text{เมื่อ } P = S_{ij} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.13)$$

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (3.14)$$

$$P_{NL} = - \frac{\rho}{\mu_t} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \left[P - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (3.15)$$

เมื่อค่า σ_k คือ Turbulence Prandtl number ของสมการ Turbulence kinetic energy โดยที่เทอมแรกทางด้านขวามือของสมการ (3.9) แสดงถึง Turbulent generation โดยความเค้นเฉือน ความเค้นตึงฉาก และ Buoyancy force เทอมที่สองแสดงถึง viscous dissipation เทอมที่สามแสดงถึงการขยายตัวหรือการอัดตัวเนื่องจากผลกระทบของการอัดตัวได้ และเทอมสุดท้ายแสดงถึงผลที่เกิดจากความไม่เชิงเส้นอื่นๆ

ในส่วนของสมการ Turbulence dissipation rate สามารถแสดงได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = \\ C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t P - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_B - \\ C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_{NL} \end{aligned} \quad (3.16)$$

เมื่อ σ_ε คือ Turbulent Prandtl number ของสมการ Turbulence dissipation rate และค่า $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$ และ $C_{\varepsilon 4}$ คือค่าคงที่ต่างๆ ซึ่งค่าคงที่ในแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ (Launder and Spalding, 1974) แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่สำหรับ Standard $k - \varepsilon$ model

C_μ	σ_k	σ_ε	σ_h	σ_m	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$C_{\varepsilon 4}$	κ	E
0.09	1.0	1.22	0.9	0.9	1.44	1.92	1.44	-0.33	0.419	9.0

โดยที่ μ_t คือ Turbulence viscosity ในการใช้ $k - \varepsilon$ model ค่า Turbulence viscosity ถูกกำหนดให้มีความเกี่ยวข้องกับ Turbulence kinetic energy และ Dissipation ในรูปแบบความสัมพันธ์นี้

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.17)$$

3.2.2 RNG $k - \varepsilon$ model

ในแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$ สมการ Turbulence kinetic energy สามารถแสดงได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \\ \mu_t (P + P_B) - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (3.18)$$

ในส่วนของสมการ Turbulence dissipation rate สามารถแสดงได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = \\ C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t P - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_B - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \\ + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \rho \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\text{เมื่อ } \eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.20)$$

และ η_0 , β คือค่าคงที่ โดยค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$ แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าคงที่สำหรับ RNG $k - \varepsilon$ model

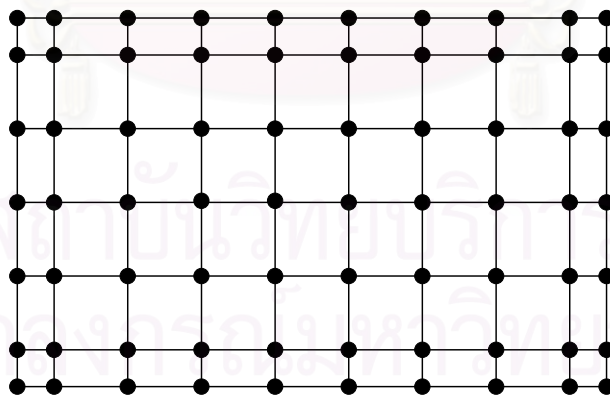
C_μ	σ_k	σ_ε	σ_h	σ_m	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$C_{\varepsilon 4}$	κ	E	η_0	β
0.085	0.719	0.719	0.9	0.9	1.42	1.68	1.42	-0.387	0.4	9.0	4.38	0.012

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (3.18) และ (3.19) กับสมการ (3.12) และ (3.16) ที่แสดงไว้ในแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ จะพบว่ามีการเพิ่มเข้ามาในแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$ คือเทอมสุดท้ายของสมการ Turbulence dissipation rate ซึ่งส่วนที่เพิ่มขึ้นมานี้แสดงถึงผลการเปลี่ยนแปลงของ Mean flow ที่มีผลต่อสมการ Turbulence dissipation rate โดยรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถอ่านได้จาก Rodi (1979)

3.3 ขั้นตอนโดยทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม

โดยทั่วไป ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มจะประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอน (Versteeg and Malalasekera, 1995) ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 แบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาเป็นปริมาตรควบคุม (Control volume) ย่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยๆ

ขั้นตอนที่ 2 ทำการดิสครีไทซ์ (Discretization) สมการ Transport โดยอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุมในมิติที่พิจารณา (2 มิติ หรือ 3 มิติ) ซึ่งเป็นขั้นตอนการเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ไปเป็นสมการพีชคณิตในรูปทั่วไป ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho\phi_i)}{\partial x_i} dV = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \right) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (3.21)$$

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

S_ϕ คือ Source term

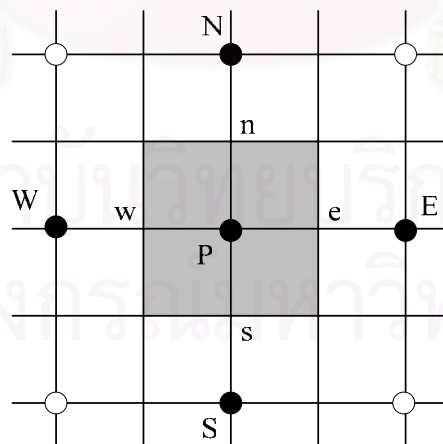
เมื่อทำการดิสครีไทซ์แล้ว จะได้สมการพีชคณิตดังต่อไปนี้ (ตำแหน่งของ Node ต่างๆ ถูกแสดงในรูปที่ 3.3)

$$a_p\phi_p = a_w\phi_w + a_e\phi_e + a_s\phi_s + a_n\phi_n + \bar{S}\Delta V \quad (3.22)$$

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

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

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



■ แทนปริมาตรควบคุม

รูปที่ 3.3 ตำแหน่ง Node ต่างๆ ในปริมาตรควบคุม

ขั้นตอนที่ 3 ทำการหาผลเฉลยด้วย Solver ชนิดต่างๆเช่น Tri-diagonal Matrix Algorithm (TDMA) หรือ Strongly Implicit Procedure (SIP) โดยสมมติค่าบริเวณจุดต่อข้างเคียงและใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (Iteration method) จนได้ผลลัพธ์ที่ผู้เข้าของสมการดิสครีไทซ์ (สมการ (3.22)) ร่วมกับ Algorithms ต่างๆ เช่น SIMPLE, SIMPLER หรือ SIMPLEC เป็นต้น เพื่อให้ผลการคำนวณที่ได้จากสมการความต่อเนื่องและสมการอนุรักษ์โมเมนตัมมีความสอดคล้องกัน โดยรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถอ่านได้จาก Versteeg and Malalasekera (1995)

3.4 วิธีหาค่าเศษตกค้าง

ส่วนที่เหลือตกค้างคือ r_ϕ เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณที่ไม่เท่ากันของสมการเชิงเส้น ซึ่งค่าที่ตกค้างนี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงการลู่เข้าสู่ค่าใดๆที่ยอมรับได้ สำหรับแต่ละตัวแปรของการแก้ปัญหา โดยสามารถพิจารณาการลู่เข้าได้จากผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าเศษตกค้างในเซลล์ทั้งหมดของโดเมนการคำนวณที่รอบการคำนวณ k ซึ่งสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$R_\phi^k = \frac{\sum |r_\phi^k|}{M_\phi} \quad (3.23)$$

โดยที่ M_ϕ คือ Normalization factor ซึ่ง M_ϕ ในแต่ละสมการแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 Normalization factor

Equation	Variable ϕ	Normalization Factor M_ϕ
Continuity	P	$M_P = \sum_{in} \dot{m}_i$
Momentum	u, v, w	$M_{u,v,w} = \sum_{in} \dot{m}_i (\bar{u}_i^2 + \bar{v}_i^2 + \bar{w}_i^2)^{1/2}$
Turbulence Energy	k	$M_k = \sum_{in} \dot{m}_i (\bar{u}_i^2 + \bar{v}_i^2 + \bar{w}_i^2)$
Turbulence Dissipation	ε	$M_\varepsilon = \frac{M_k}{(L/V_{nom})}$
Enthalpy	h	$M_h = h_{in}$

ในตารางที่ 3.3 ตัวห้อย i แสดงถึงขอบเขตที่ i

เมื่อ \dot{m}_i คือ อัตราการไหลทั้งหมดที่ผ่านขอบเขต
 \sum_{in} คือ ผลรวมทั้งหมดของการไหลเข้า

L คือ Characteristic length ของโดเมนการไหล
 V_{nom} คือ ความเร็วเข้าเฉลี่ย

3.5 เงื่อนไขขอบ

การกำหนดเงื่อนไขขอบของโดเมนของปัญหาที่ต้องวิเคราะห์ผลเฉลย เป็นสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญในการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธี Finite volume เนื่องจากเงื่อนไขขอบนี้จะเป็นตัวกำหนดลักษณะเฉพาะของแต่ละปัญหา ซึ่งเงื่อนไขขอบในวิทยานิพนธ์นี้มีรายละเอียดดังนี้

Inlet เป็นการกำหนดค่าคุณสมบัติของของไหลก่อนที่จะไหลข้ามขอบเขตทางเข้าของโดเมนของปัญหา ซึ่งโดยทั่วไปจะรู้ค่าของคุณสมบัติของของไหลก่อนแล้วจากผลการทดลอง ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 Inlet boundary conditions

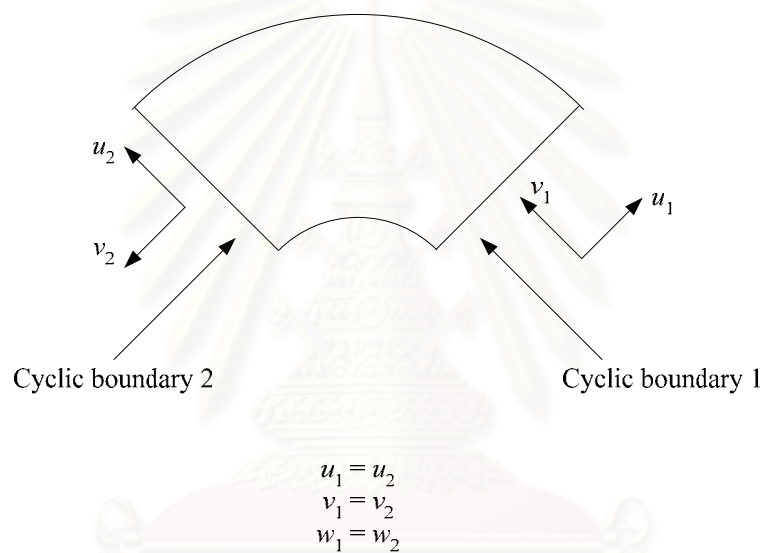
Variable	Expression	Note
u	-	ข้อมูลจากผลการทดลอง
v	-	ข้อมูลจากผลการทดลอง
w	-	ข้อมูลจากผลการทดลอง
k	$\frac{3}{2}(UI)^2$	I : Turbulence intensity
ε	$C_{\mu}^{3/2} \frac{k^{3/2}}{\ell}$	$\ell = 0.07L$ $L =$ Characteristic length
T	-	ข้อมูลจากผลการทดลอง
ρ	$\frac{\dot{m}}{VA}$	\dot{m} = อัตราการไหล A = พื้นที่ของทางเข้า V = ความเร็วเข้า

Outlet เงื่อนไขที่ทางออกนั้นโดยปกติแล้วไม่ทราบค่า สำหรับในบริเวณทางออกความเร็วจะถูกปรับค่าโดยการกำหนดอัตราการไหลที่ไหลออกจากโดเมนการคำนวณ

Wall เงื่อนไขที่ขอบผนังนั้น ได้กำหนดเป็นเงื่อนไขที่ไม่มีการลื่นไถล (No slip) ซึ่งค่าความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งขอบเขตของผนังมีค่าเป็นศูนย์

Symmetry ใช้เมื่อโดเมนของปัญหามีความสมมาตรทั้งรูปร่างและคุณสมบัติของของไหล เพื่อเป็นการประหยัดหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ และลดเวลาในการคำนวณ โดยมีเงื่อนไขคือ ความเร็วในแนวที่ตั้งฉากกับระนาบที่สมมาตรกำหนดให้เป็นศูนย์ $U_n = 0$ และทุกตัวแปรกำหนดไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลง $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$

Cyclic เป็นการแทนที่ความเร็ว, ความดันและอุณหภูมิของการไหลบนขอบเขตของบริเวณที่กำหนดไว้เป็นคู่ เพื่อเป็นการลดขนาดของโดเมนการคำนวณ โดยลักษณะของ Cyclic boundary ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 Cyclic boundary

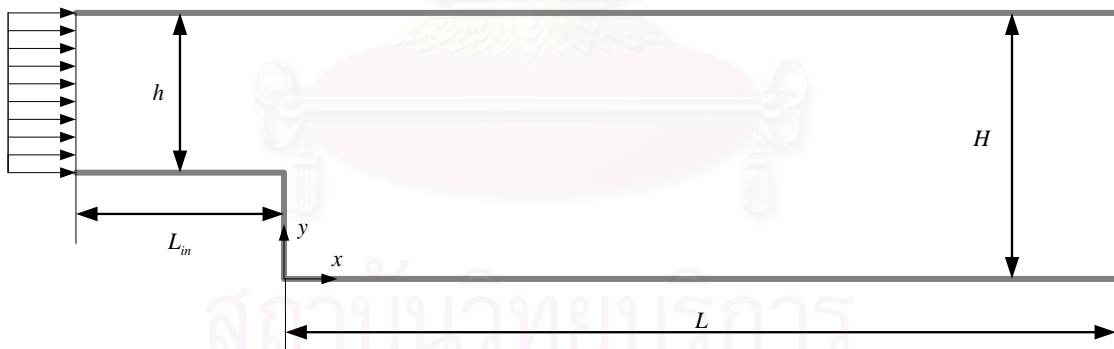
บทที่ 4

การทดสอบสมรรถนะของโปรแกรม CFD

เพื่อให้เกิดความถูกต้องในการที่จะไปวิเคราะห์ปัญหาได้จริงๆ ทางผู้ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ด้าน CFD ต้องทดสอบโปรแกรมกับปัญหาที่มีผลการทดลองเชื่อถือได้ เพื่อเปรียบเทียบผลกัน โดยในที่นี้แบ่งกรณีทดสอบออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีการไหลแบบ Non-swirling flow ซึ่งได้แก่การไหลผ่าน Backward-facing step และกรณีการไหลแบบ Swirling flow ซึ่งได้แก่การไหลภายในเตาเผาแบบวอร์เทกซ์ (Vortex combustor)

4.1 การไหลผ่าน Backward-facing step

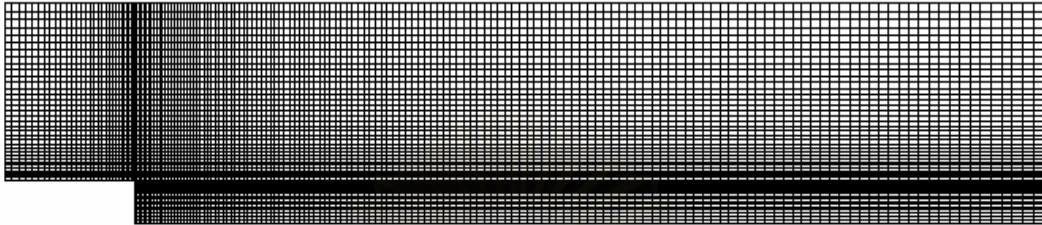
ในกรณีการไหลผ่าน Backward-facing step จะเกิดการไหลแบบหมุนวนขึ้นเมื่อผ่านขอบช่องของการไหล การไหลผ่าน Backward-facing step มีโครงสร้างการไหลซับซ้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการพัฒนาตัวเองอีกครั้งของ Boundary layer และปรากฏการณ์การแยกไหลซึ่งเกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของพื้นที่หน้าตัดในช่องทางไหล ซึ่งในที่นี้ จะทำการทดสอบในรูปแบบปัญหา 2 มิติที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน



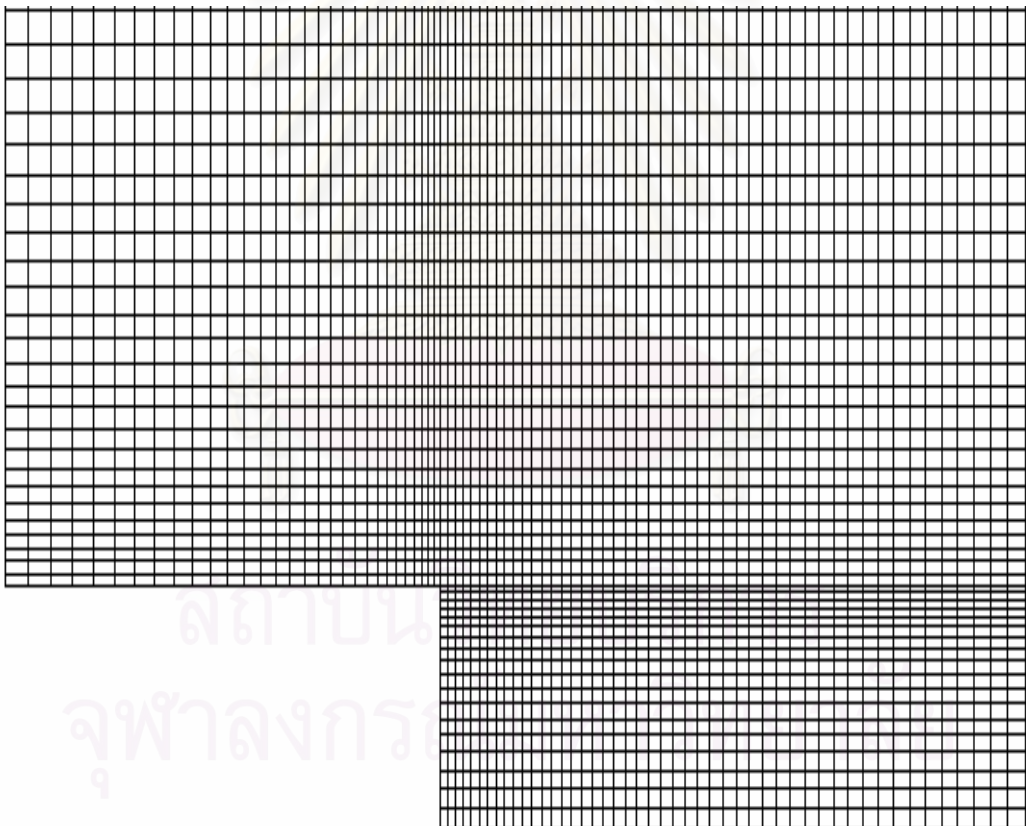
รูปที่ 4.1 รูปแบบปัญหาของการไหลผ่าน Backward-facing step (Not to scale)

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนผ่าน Backward-facing step นั้นได้ใช้ข้อมูลจากงานวิจัยของ Adams and Eaton (1988) เป็นเอกสารอ้างอิงเพื่อทำการเปรียบเทียบผลกัน โดยที่ทางเข้าก่อนถึงขั้นบันไดมีความยาว $L_{in} = 127$ mm ช่องทางไหลกว้าง $h = 152$ mm ช่องทางการไหลทั้งหมดสูง $H = 190$ mm และมีความยาว $L = 889$ mm ซึ่งในการจำลองการไหลนี้ใช้จำนวนเซลล์ทั้งหมด 8470 เซลล์ ซึ่งในการจำลองการไหลกรณีนี้ใช้ค่า $Re_H = 36,000$ โดยที่ทางเข้ามี

ความเร็ว $U_{ref} = 15$ m/s โดยรูปของกริดที่ใช้ในการคำนวณและรูปขยายของกริดละเอียดในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของช่องการไหลได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



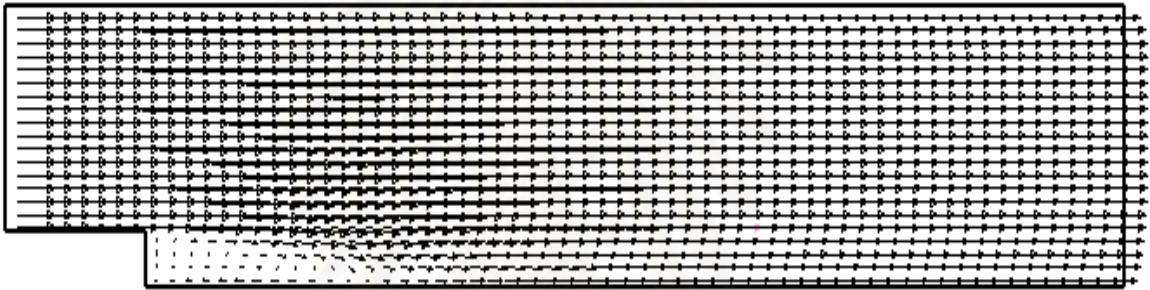
รูปที่ 4.2 กริดของการจำลองการไหลผ่าน Backward-facing step ที่ $Re_H = 36,000$
(Not to scale)



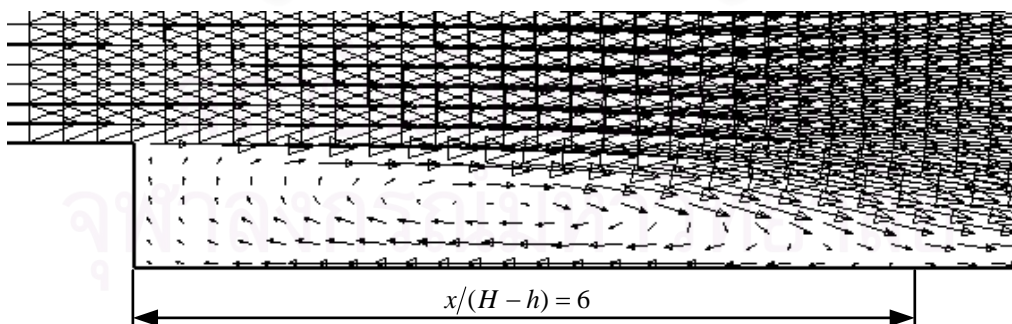
รูปที่ 4.3 รูปขยายของกริดละเอียดในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของช่องการไหล

ผลการคำนวณ

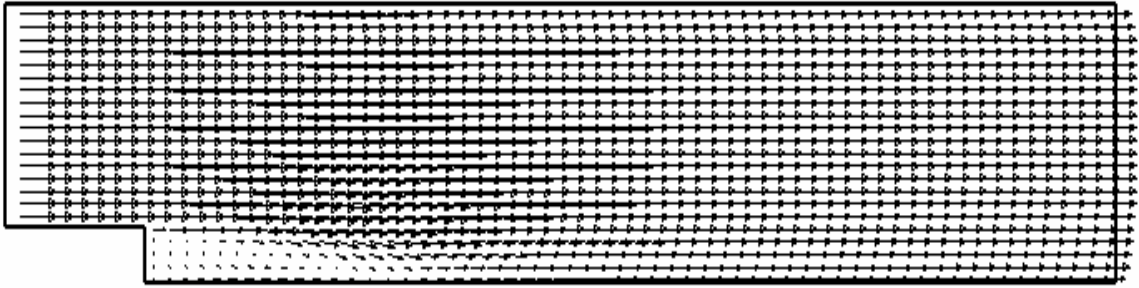
รูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงเวกเตอร์ความเร็วที่ $Re_H = 36,000$ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ ซึ่งจะเห็นว่าบริเวณการหมุนวน (Reattachment region) เกิดขึ้นที่ผนังด้านล่างใกล้กับช่องทางไหลที่ขยายออก มีขนาดความยาวของการไหลหมุนวนเป็น 6 เท่าของความสูงของชั้นบันได โดยมีรูปขยายของบริเวณหมุนวนนี้แสดงในรูปที่ 4.5 ส่วนในรูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงเวกเตอร์ความเร็วโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$ พบว่าจะเกิดการไหลแบบหมุนวน โดยมีขนาดความยาวของการไหลหมุนวนประมาณเท่ากับผลที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกรณีนี้ผลที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองมีค่าไม่แตกต่างกัน



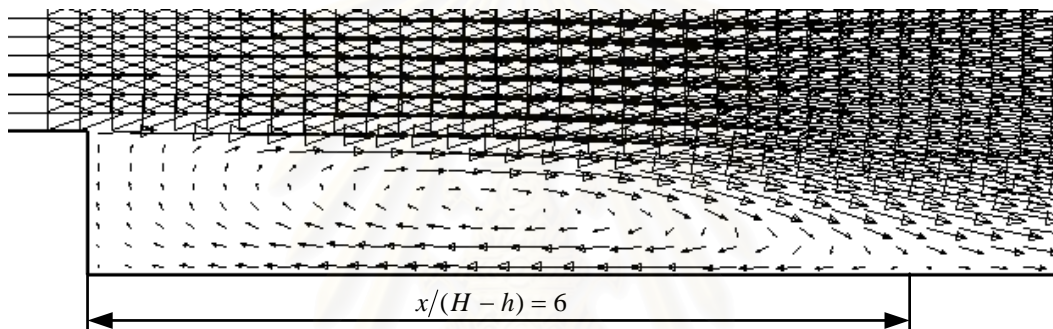
รูปที่ 4.4 เวกเตอร์ความเร็วการไหลผ่าน Backward-facing step โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ (Not to scale)



รูปที่ 4.5 รูปขยายเวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณการไหลหมุนวน โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$



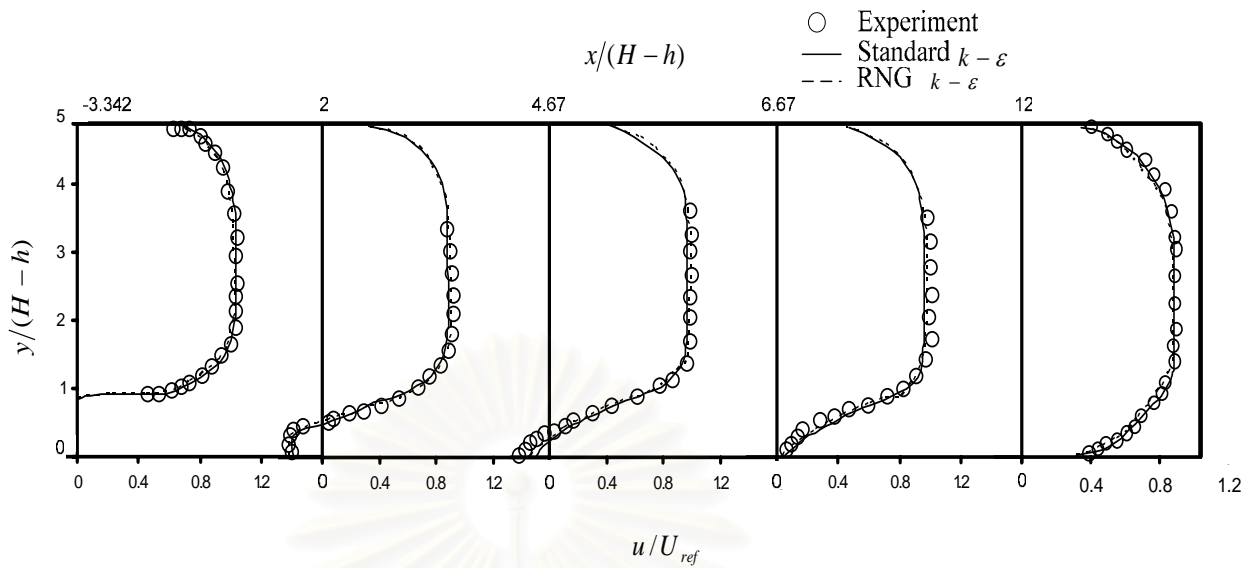
รูปที่ 4.6 เวกเตอร์ความเร็วการไหลผ่าน Backward-facing step โดยใช้
แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$ (Not to scale)



รูปที่ 4.7 รูปขยายเวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณการไหลหมุนวน โดยใช้แบบจำลอง
ความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$

ผลการจำลองการไหลเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

รูปที่ 4.8 แสดงความเร็วที่ได้จากการจำลองการไหลเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ $Re_H = 36,000$ ซึ่งจะเห็นว่าผลการคำนวณมีความสอดคล้องกันดีกับผลการทดลองทั้งจากการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ และ RNG $k - \varepsilon$ โดยพิจารณาจากค่าความเร็วที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง และพบว่าเกิดการไหลย้อนกลับขึ้นที่ผนังด้านล่าง



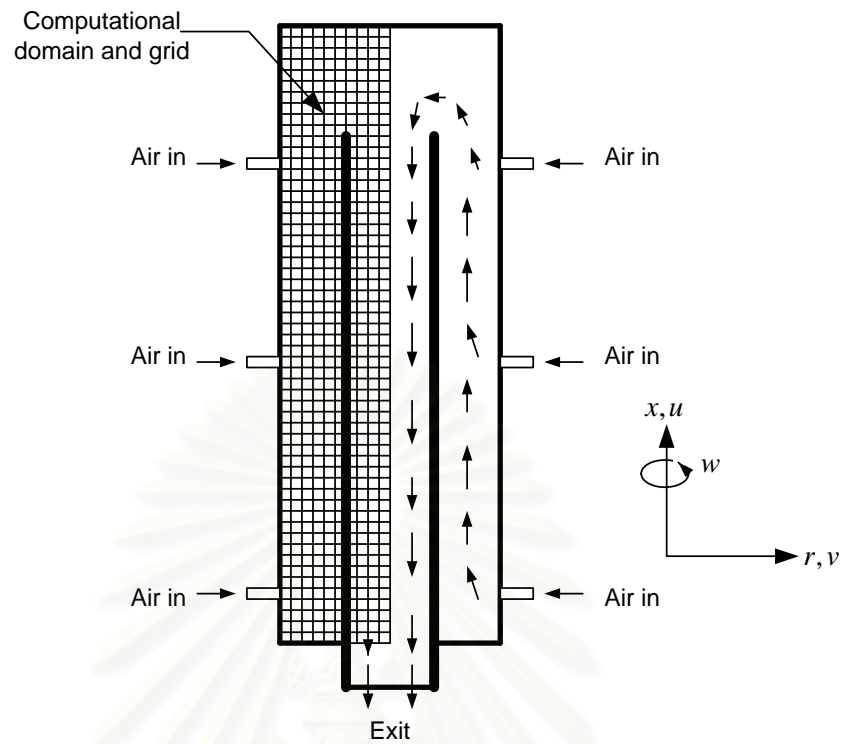
รูปที่ 4.8 รูปร่างของความเร็วโดยการเปรียบเทียบผลกับการทดลองที่ค่า $Re_H = 36,000$

สรุปผล

ในการแก้ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่าน Backward-facing step โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ จะเห็นว่าผลการคำนวณของความเร็วมีค่าใกล้เคียงกับกับผลการทดลองที่หน้าตัดต่างๆ ตลอดทั้งช่วงการไหล ทำให้มีความเชื่อมั่นในการที่จะนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้งานกับปัญหาอื่นๆ

4.2 การไหลในเตาเผาแบบวอร์เทกซ์

การไหลในเตาเผาแบบวอร์เทกซ์นั้นจะมีการไหลแบบหมุนวน (Swirling flow) ซึ่งเป็นลักษณะการไหลเช่นเดียวกับท่อวอร์เทกซ์ ซึ่งการไหลภายในท่อเตาเผาแบบวอร์เทกซ์นี้ได้ใช้ข้อมูลจาก Zhang and Nieh (1992) เป็นเอกสารอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบผลกัน ในรูปที่ 4.9 จะแสดงถึงลักษณะโดเมนการคำนวณในเตาเผาแบบวอร์เทกซ์ โดยที่ Center tube มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.11 m และมีจุดศูนย์กลางร่วมกับห้อง Vortex chamber ที่มีความสูง 0.66 m และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 m โดยที่ Center tube อยู่ลึกเข้าไปใน Vortex chamber 0.51 m อากาศจะถูกฉีดเข้าไปในเตาเผาผ่านหัวฉีด โดยเตาเผาแบบวอร์เทกซ์นี้มีหัวฉีดอยู่ทั้งหมด 3 ระบาย ซึ่งแต่ละระบายจะมีหัวฉีด 4 ตัว

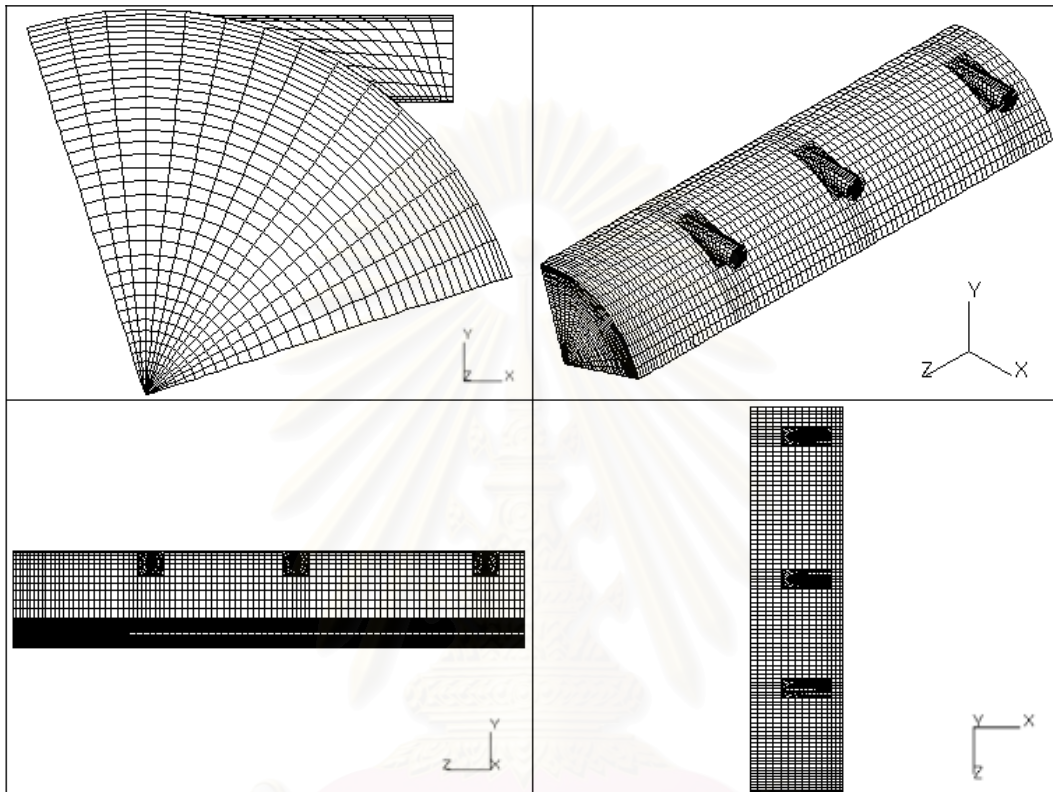


รูปที่ 4.9 ลักษณะการไหลและโดเมนการคำนวณสำหรับเตาเผาแบบวอร์เทกซ์

ตารางที่ 4.1 มิติของรูปร่างและเงื่อนไขการไหลภายในเตาเผาแบบวอร์เทกซ์

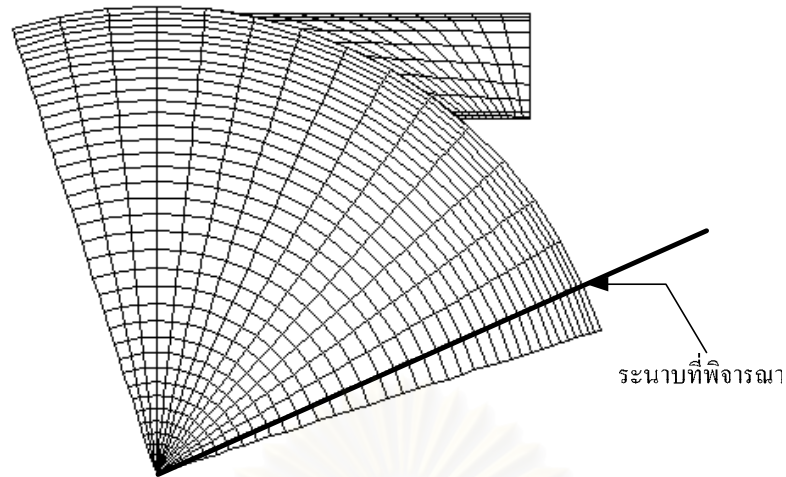
Parameter	Magnitude		
Vortex chamber geometry			
chamber inner dia., m	0.25		
chamber height, m	0.66		
center tube outer dia., m	0.13		
center tube inner dia., m	0.11		
center tube height, m	0.51		
Mutiple air injection			
nozzle height distribution, m	0.051	0.295	0.483
flow rate distribution, m ³ /hr	226	226	226
tangential velocity, m/s	24.6	24.6	24.6
air temperature, K	300	300	300

ในการจำลองการไหลในเตาเผาแบบวอร์เท็กซ์นี้ได้ใช้จำนวนเซลล์ทั้งหมด 63,855 เซลล์ ในการคำนวณ และได้พิจารณาเพียงหนึ่งในสี่ของเตาเผาเพื่อลดขนาดของโดเมนการคำนวณ ซึ่ง ลักษณะของกริดที่ใช้ในการคำนวณนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.10

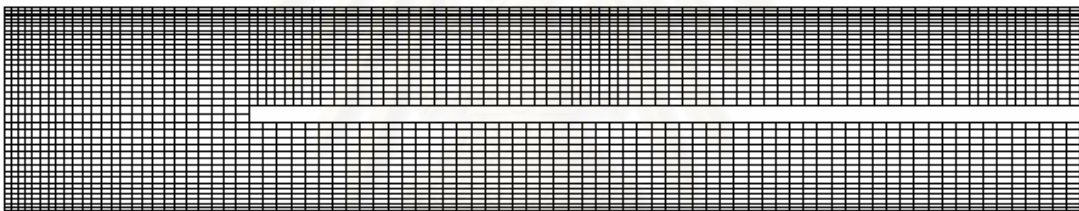


รูปที่ 4.10 กริดที่ใช้ในการคำนวณการไหลในเตาเผาแบบวอร์เท็กซ์ (Not to scale)

เนื่องจากในการคำนวณนี้เป็นการคำนวณแบบ 3 มิติ จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกระนาบขึ้นมา เพื่อทำการเปรียบเทียบค่ากับผลการทดลอง โดยระนาบที่เลือกขึ้นมานี้เป็นระนาบที่อยู่กึ่งกลางระหว่างหัวฉีด เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากทางเข้า โดยรูปที่ 4.11 แสดงระนาบที่เลือกขึ้นมา และรูปที่ 4.12 แสดงลักษณะของกริดในระนาบที่พิจารณา



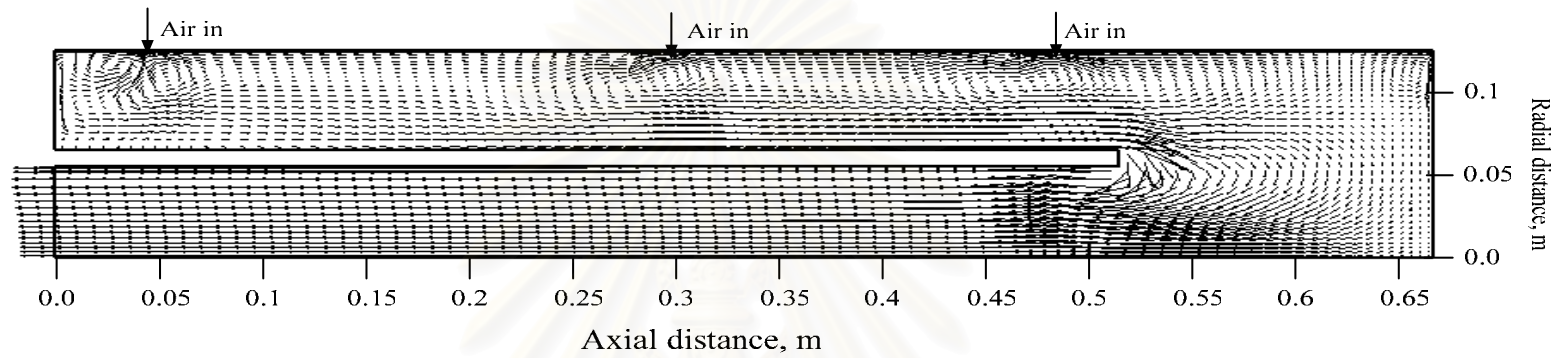
รูปที่ 4.11 ระนาบที่พิจารณาในการเปรียบเทียบผล (Not to scale)



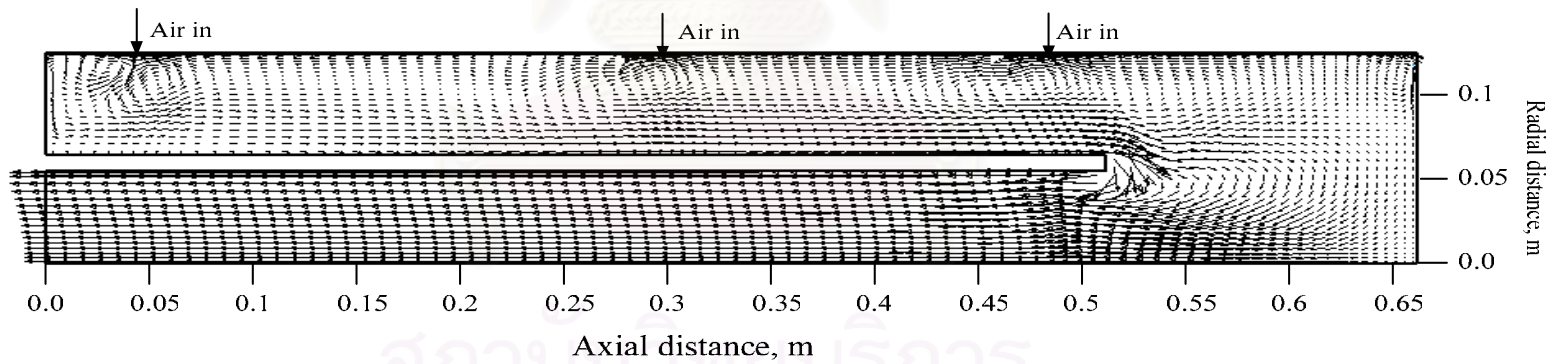
รูปที่ 4.12 ลักษณะของกริดในระนาบที่พิจารณา (Not to scale)

ผลการคำนวณ

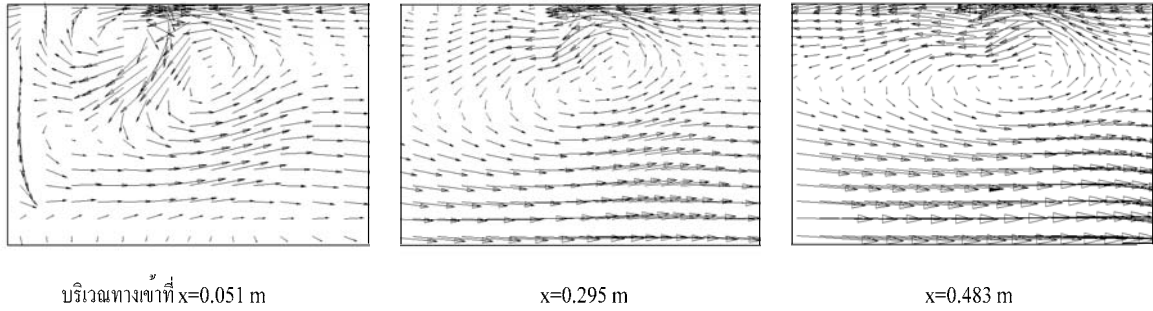
รูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงถึงเวกเตอร์ความเร็ว เมื่อใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ ตามลำดับ ในการคำนวณจากรูปจะเห็นว่าระนาบที่อยู่บริเวณทางเข้าของอากาศจะเกิดการหมุนวนขึ้น โดยรูปขยายของบริเวณทางเข้าที่แสดงให้เห็นการหมุนวนที่เกิดขึ้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.15 จากการหมุนที่เกิดขึ้นมีผลทำให้ความเร็วตามแนวแกนมีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีอากาศเพิ่มเข้ามาในเตาเผา โดยจะมีค่ามากในบริเวณที่ใกล้กับผนังด้านนอกของ Center tube และจะเพิ่มมากขึ้นในบริเวณที่มีอากาศเข้ามาเพิ่ม ก่อนที่จะวากกับไปทางออก โดยค่าความเร็วตามแนวแกนจะมีค่ามากที่สุดบริเวณตรงกลางของ Centre tube มีทิศพุ่งไปที่ทางออก



รูปที่ 4.13 เวกเตอร์ของความเร็ว ทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ (Not to scale)

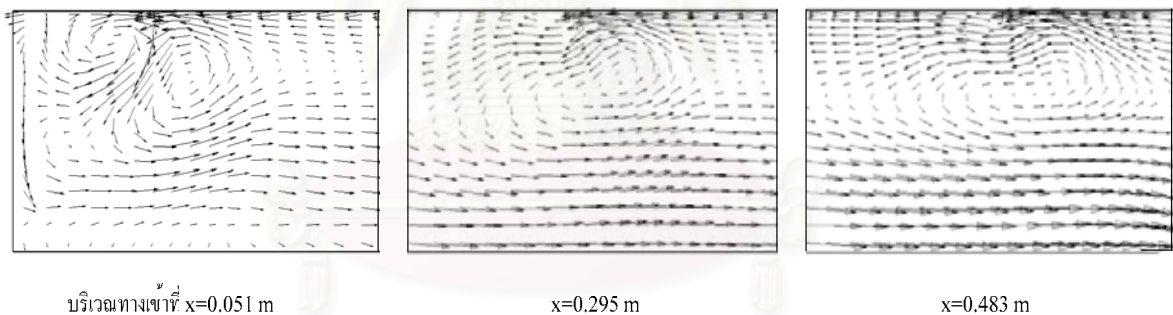


รูปที่ 4.14 เวกเตอร์ของความเร็ว ทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$ (Not to scale)



รูปที่ 4.15 เวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณทางเข้าเมื่อใช้แบบจำลองความปั่นป่วน
Standard $k - \varepsilon$

จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$ ได้ผลลัพธ์ลักษณะคล้ายกันกับผลที่ได้จากการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ โดยจะเห็นได้จากการหมุนวนของอากาศที่บริเวณทางเข้า (รูปที่ 4.16) และค่าความเร็วในแนวแกนที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้จุดที่จะวกกลับไปทางออก โดยค่าความเร็วตามแนวแกนจะมีค่ามากที่สุดบริเวณตรงกลางของ Center tube และมีทิศพุ่งไปที่ทางออก



รูปที่ 4.16 เวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณทางเข้าเมื่อใช้แบบจำลองความปั่นป่วน
RNG $k - \varepsilon$

ผลการจำลองการไหลเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

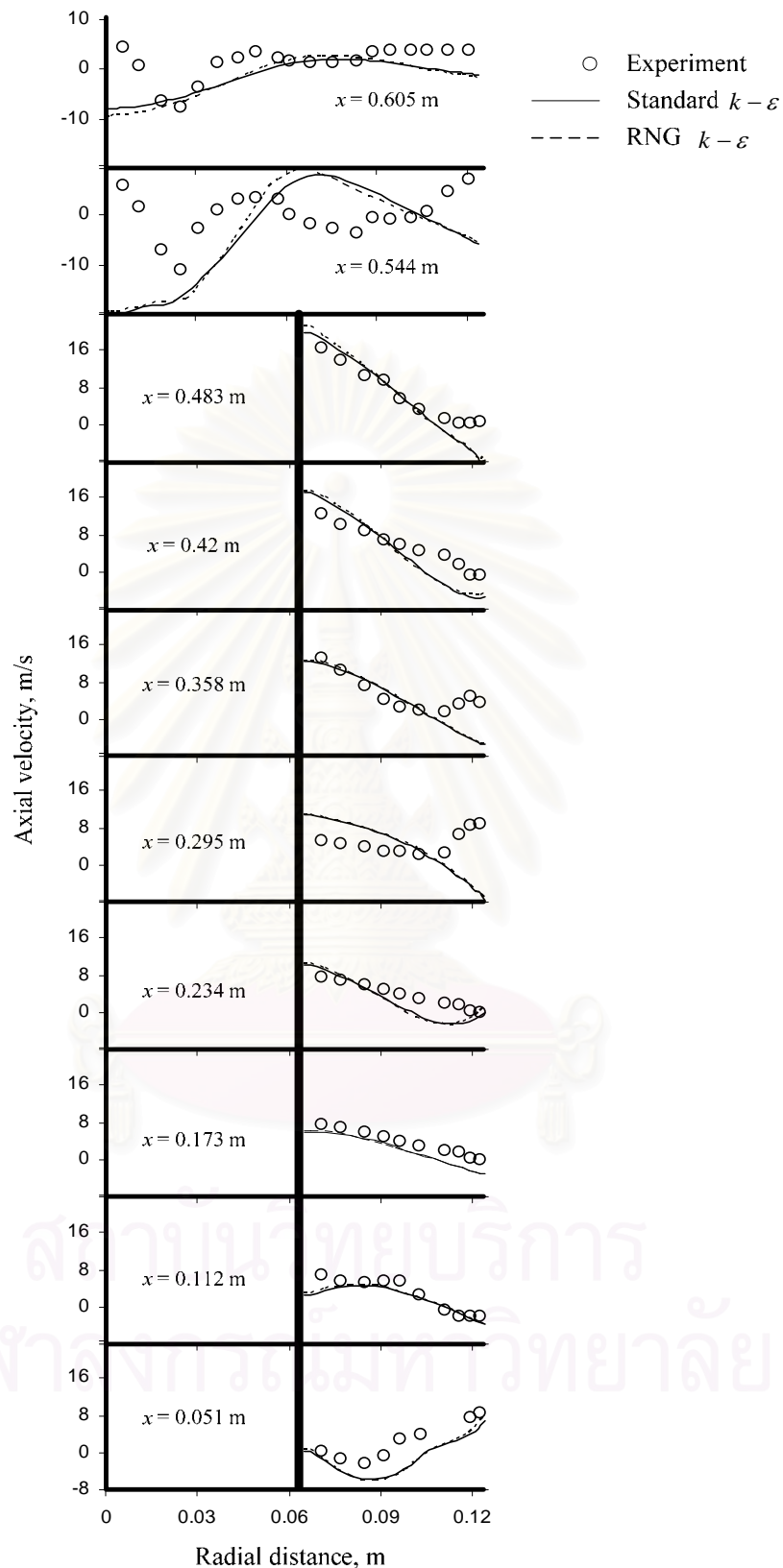
ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ และ RNG $k - \varepsilon$ นั้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ที่ตำแหน่ง $x = 0.051, 0.112, 0.173, 0.234, 0.295, 0.358, 0.420, 0.483, 0.544$ และ 0.605 m

ผลของความเร็วในแนวแกน ได้แสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ มีความใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าผลการคำนวณจากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดลอง ยกเว้นในบริเวณที่ใกล้กับผนังในบริเวณทางเข้าของอากาศ เนื่องจากในบริเวณนี้มีมวลของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในบริเวณนี้ทำให้ไม่สามารถคำนวณความเร็วในบริเวณนี้ได้ถูกต้อง และในบริเวณที่อากาศมีการไหลวกกลับไปทางออก ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วค่อนข้างมาก ทำให้ผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าแตกต่างกับผลการทดลองค่อนข้างมาก

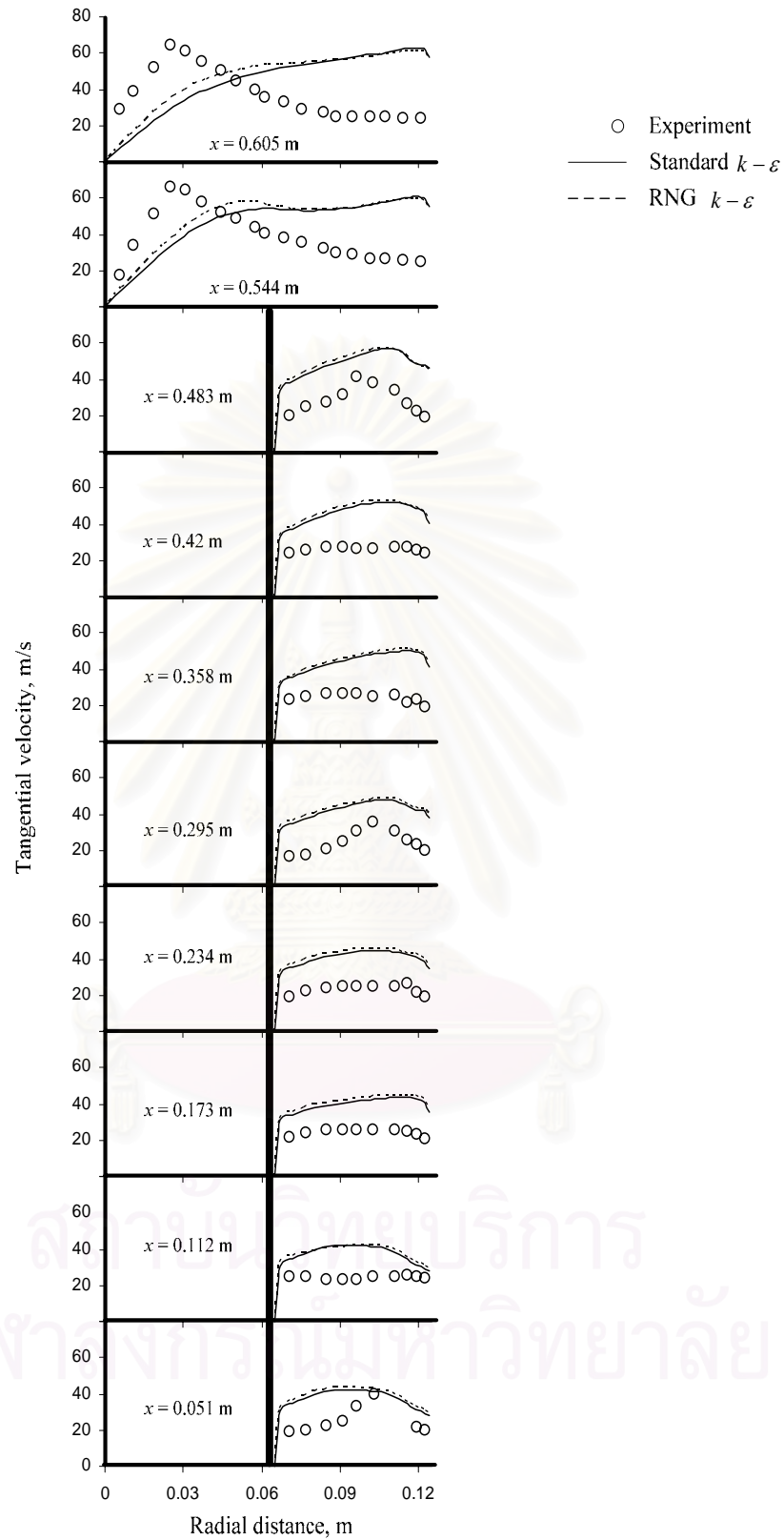
รูปที่ 4.18 แสดงผลของความเร็วในแนวสัมผัสจากการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า แบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองยังทำนายผลได้ไม่ดีนัก โดยจะเห็นได้ชัดในบริเวณส่วนบนของ Chamber ที่ตำแหน่ง $x = 0.544$ และ 0.605 m ซึ่งจากการทดลองพบว่าในบริเวณนี้เป็นการไหลรวมกันของการไหลแบบ Force vortex และ Free vortex แต่แบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองไม่สามารถทำนายความเร็วในบริเวณที่เป็น Free vortex ได้ โดยจากผลการคำนวณจะมีลักษณะการไหลเป็นแบบ Force vortex เท่านั้น

สรุปผล

จากการจำลองการไหลแบบ Swirling flow พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ มีความสามารถในการทำนายความเร็วได้ใกล้เคียงกัน และให้ผลที่น่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตามในบริเวณที่มีผลเนื่องจากทางเข้าของอากาศ แบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองยังทำนายผลได้ไม่ดีนัก และในส่วนที่มีการไหลแบบ Free vortex นั้น แบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองยังไม่สามารถทำนายการไหลแบบนี้ได้ ซึ่งผลที่ได้นี้มีความสอดคล้องกันกับผลการคำนวณของ Promvong (1997)



รูปที่ 4.17 ความเร็วในแนวแกนโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.18 ความเร็วในแนวสัมผัส โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

บทที่ 5

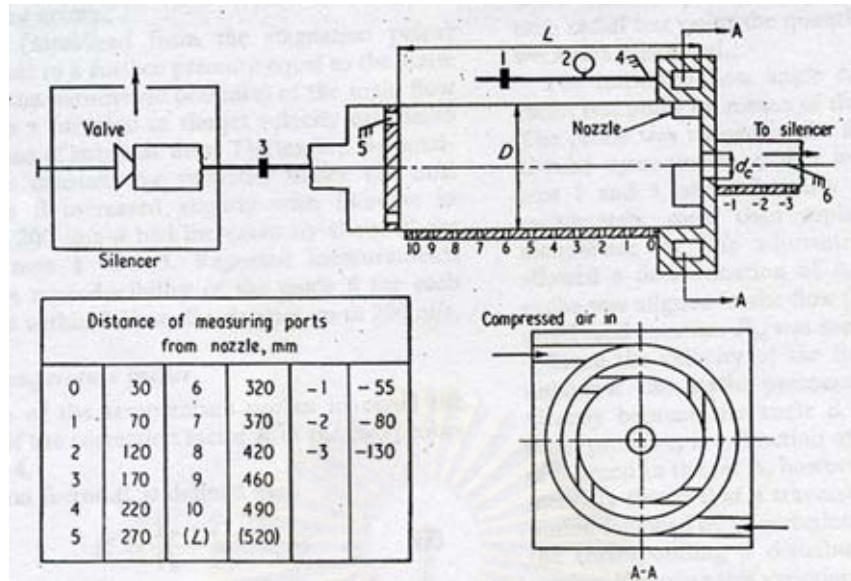
การจำลองการไหลภายในท่อออร์เทกซ์

5.1 การจำลองการไหลภายในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน

ในการจำลองการไหลภายในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกันนี้ ได้ใช้ข้อมูลจากผลการทดลองของ Brunn (1969) ซึ่งภาพสเก็ทซ์ของการทดลองนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.1 โดยท่อออร์เทกซ์นี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $D_o = 0.094$ m และมีความยาว $L = 0.52$ m อากาศจะเข้าสู่ท่อออร์เทกซ์ไปตามแนวสัมผัสของท่อผ่านหัวฉีด 4 ตัว ที่ตั้งอยู่ตามแนวขอบท่อ และอากาศเย็นจะถูกปล่อยออกผ่านทาง Orifice ส่วนอากาศร้อนจะถูกปล่อยออกผ่านทางแผ่น Diaphragm ที่เป็นตัวควบคุมการไหลของอากาศร้อน ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของ Orifice (d_c) เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดและเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่น Diaphragm มีขนาดเท่ากับ 0.035 m , 0.01075 m และ 0.069 m ตามลำดับ ข้อมูลจากการทดลองประกอบด้วย ความเร็วที่ทางเข้าเท่ากับ 200 m/s อุณหภูมิที่ทางเข้า $T_o = 21$ °C และอัตราส่วนของมวลอากาศเย็นต่อมวลของอากาศเข้าทั้งหมด (μ_c) มีค่าเท่ากับ 0.23 โดยข้อมูลการทดลองของ Brunn ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลท่อออร์เทกซ์จากการทดลองของ Brunn (1969)

Tube Characteristics	
Tube length, L (m)	0.52
Tube diameter, D_o (m)	0.094
No. of Nozzle	4
Nozzle diameter, (m)	0.01075
Cold orifice diameter, d_c (m)	0.035
L/D_o ratio	5.532
Inlet Fluid Properties	
Fluid	Air
Temperature (K)	294.15
Velocity (m/s)	200
Flow Conditions	
Mass flow rate (kg/s)	0.122
Cold mass flow (kg/s)	0.028
Hot mass flow (kg/s)	0.094



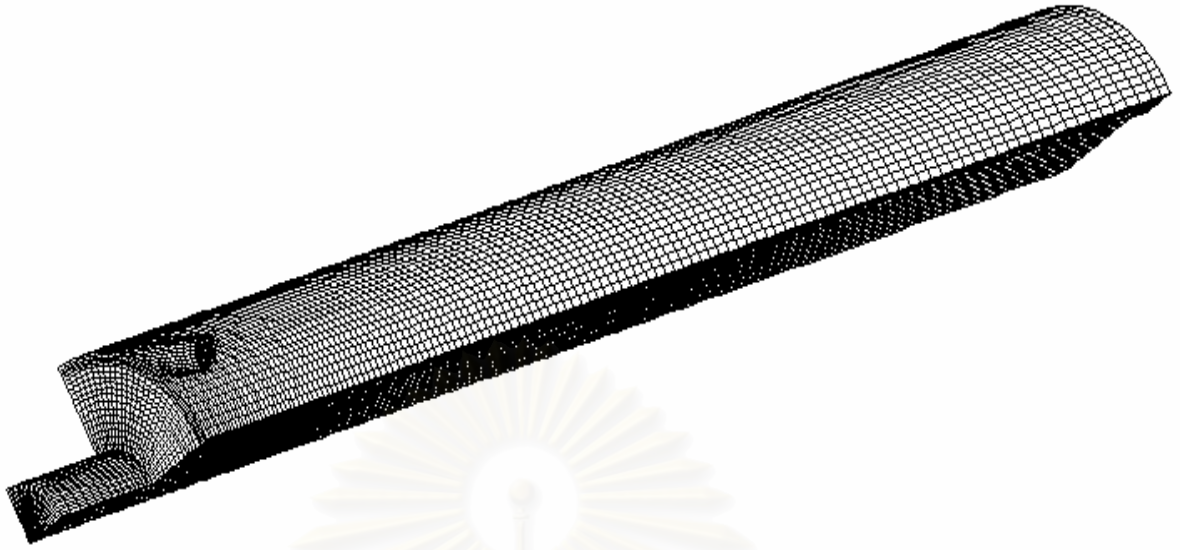
รูปที่ 5.1 ภาพสเก็ชท่อออร์เทกซ์ของ Brunn (1969)

เนื่องจากต้องการลดขนาดของโดเมนการคำนวณ เพื่อเป็นการประหยัดเวลาในการประมวลผล ในการจำลองการไหลภายในท่อออร์เทกซ์จึงพิจารณาเพียงหนึ่งในสี่ของท่อออร์เทกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.2

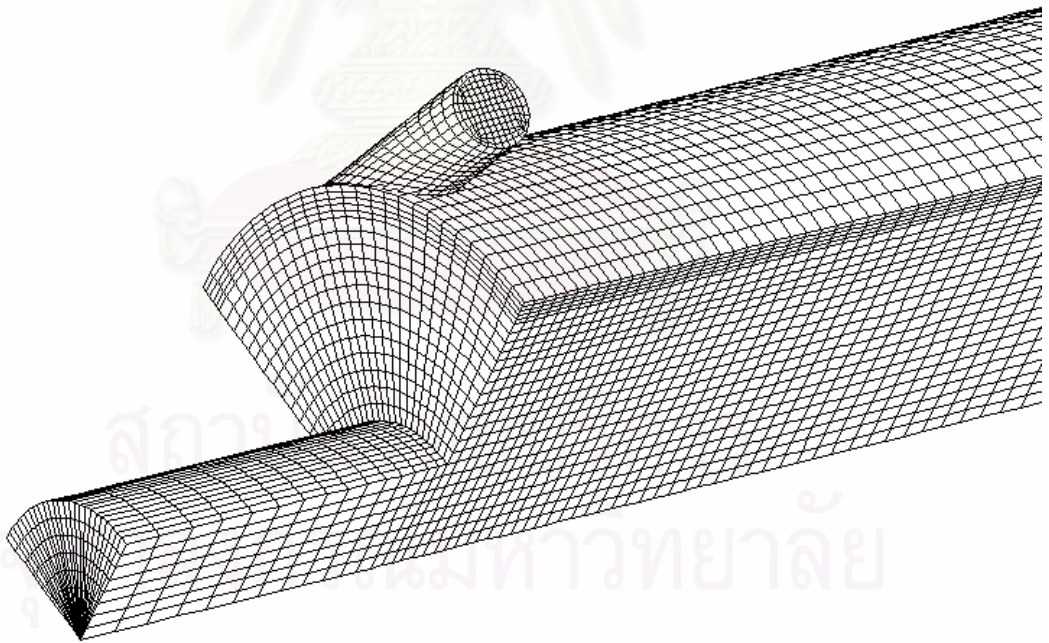


รูปที่ 5.2 โดเมนการคำนวณของท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน (Not to scale)

ในการจำลองการไหลในท่อออร์เทกซ์นี้ได้ใช้จำนวนเซลล์ทั้งหมด 87,380 เซลล์ ในการคำนวณ ซึ่งลักษณะของกริดที่ใช้ในการคำนวณได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.3 โดยจะเน้นให้กริดมีความละเอียดในบริเวณใกล้ผนังและในบริเวณใกล้กับทางออกของอากาศเย็นเนื่องจากบริเวณนี้เป็นส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วค่อนข้างมาก โดยรูปขยายของกริดในบริเวณนี้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.4

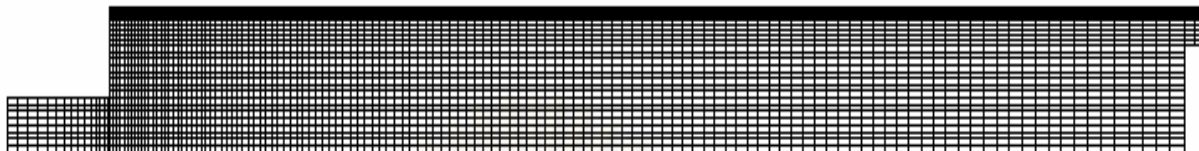


รูปที่ 5.3 กริดที่ใช้ในการคำนวณการไหลในทอเวอร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน
(Not to scale)



รูปที่ 5.4 รูปขยายของกริดในบริเวณผนังและทางออกของอากาศเย็น

ในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจำเป็นต้องเลือกระนาบขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยในกรณีนี้ได้เลือกระนาบที่อยู่กึ่งกลางระหว่างหัวฉีดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบเนื่องจากทางเข้า (ลักษณะของกริดในระนาบที่พิจารณา แสดงไว้ในรูปที่ 5.5)

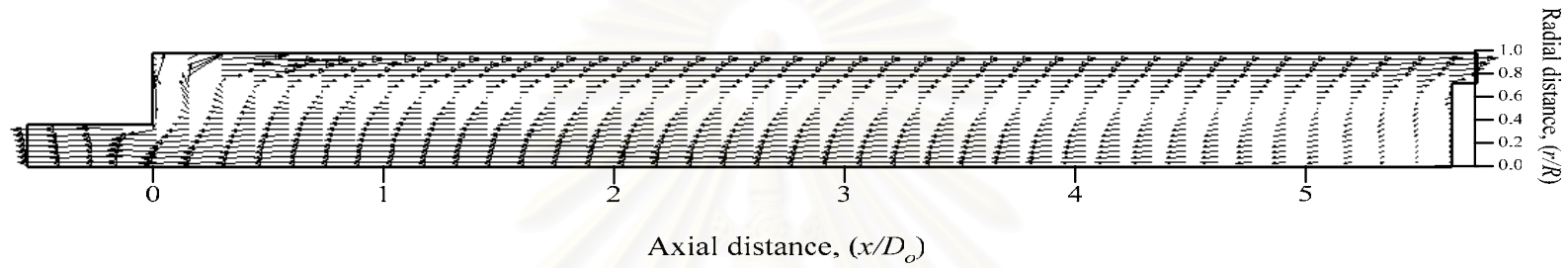


รูปที่ 5.5 ลักษณะของกริดในระนาบที่พิจารณา (Not to scale)

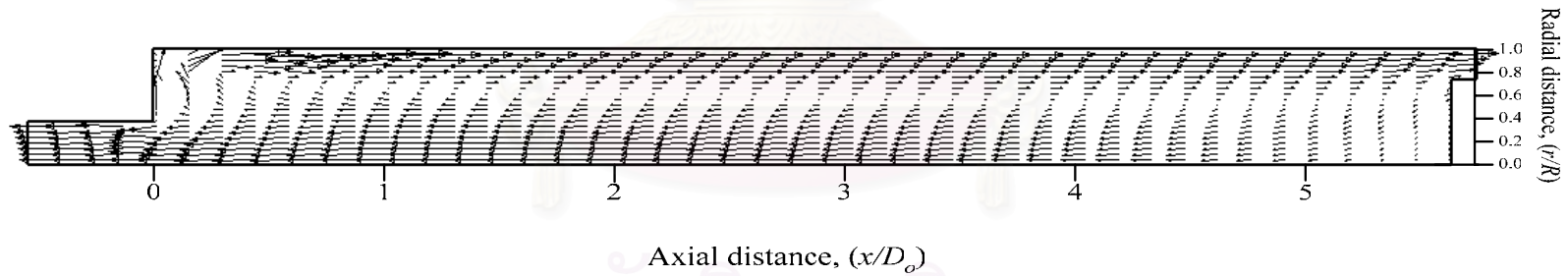
ทั้งนี้ จะนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณซึ่งได้แก่ความเร็วและอุณหภูมิไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ตำแหน่ง $x/D_o = 0.745, 1.277, 1.809, 2.872, 4.468$ และ 5.123 และเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในแบบสองมิติของ Promvonge (1997) ที่ใช้ข้อมูลการทดลองของ Brunn มาคำนวณเช่นเดียวกัน

ผลการคำนวณ

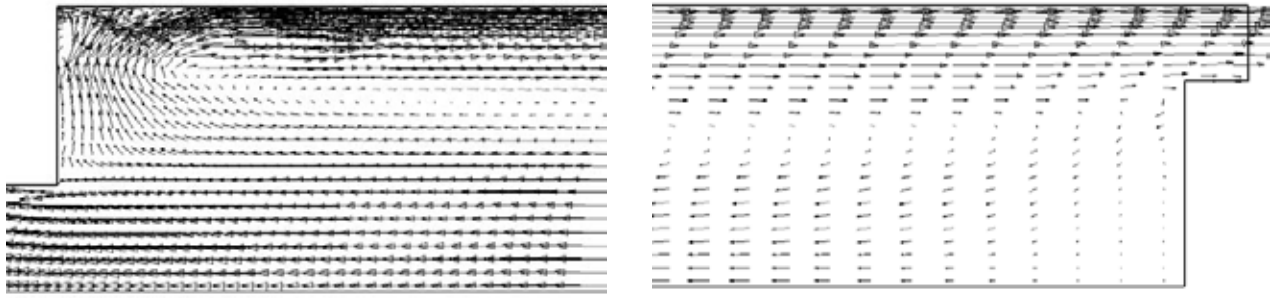
รูปที่ 5.6 และ 5.7 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วในแนวแกนจากผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าในบริเวณผนังท่ออากาศจะไหลไปในทิศทางที่เป็นทางออกของอากาศร้อนและเกิดการไหลย้อนกลับในบริเวณกลางท่อ โดยการไหลย้อนกลับนี้จะเริ่มจากบริเวณใกล้กับทางออกของอากาศร้อนไปถึงทางออกของอากาศเย็น ซึ่งความเร็วสูงสุดจะเกิดขึ้นในบริเวณผนังของท่อ และจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองจะเห็นได้ว่าการหมุนวน ในบริเวณใกล้กับทางออกของอากาศเย็นและในบริเวณใกล้กับทางออกของอากาศร้อน โดยรูปขยายที่แสดงถึงการหมุนวนนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.8 และ 5.9



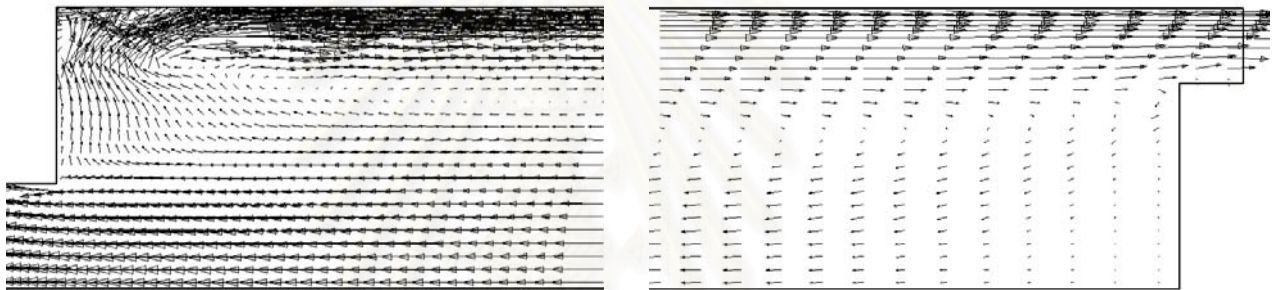
รูปที่ 5.6 เวกเตอร์ของความเร็วในแนวแกน ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$
สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Brunn (1969) (Not to scale)



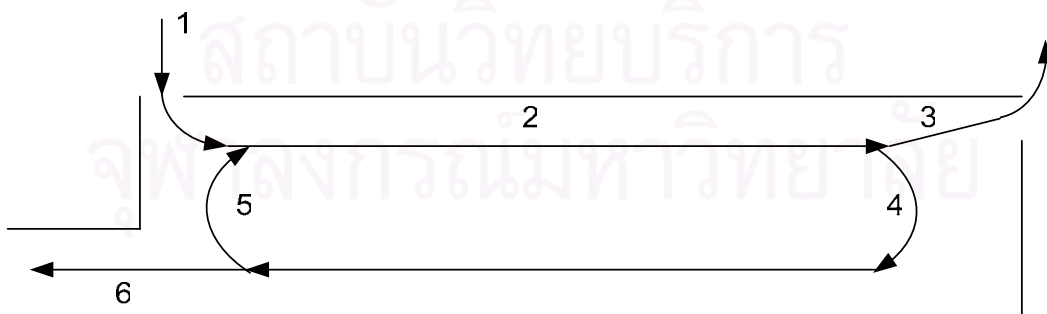
รูปที่ 5.7 เวกเตอร์ของความเร็วในแนวแกน ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$
สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Brunn (1969) (Not to scale)



รูปที่ 5.8 รูปขยายแสดงการหมุนวนในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน
โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$



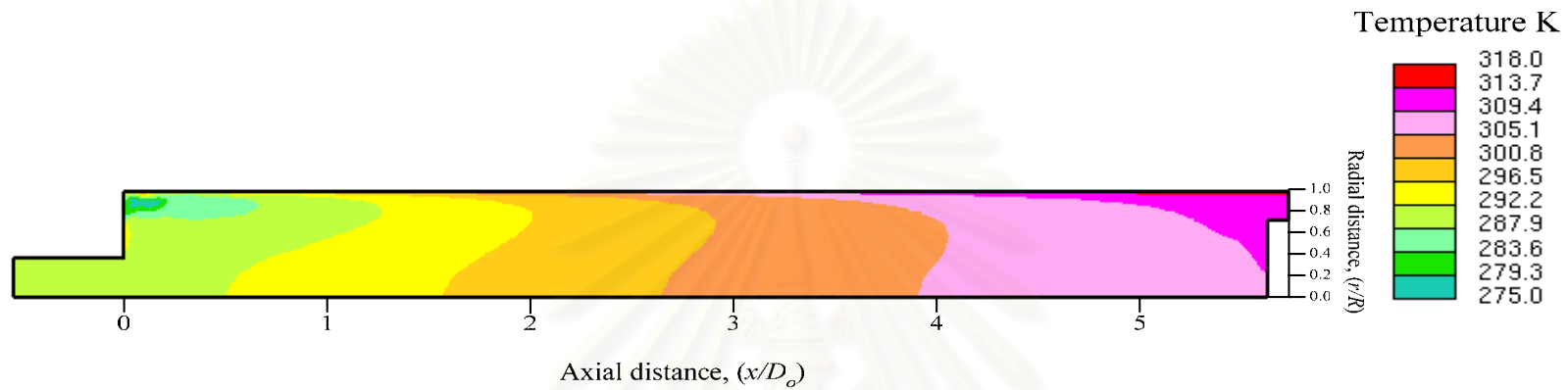
รูปที่ 5.9 รูปขยายแสดงการหมุนวนในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน
โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$



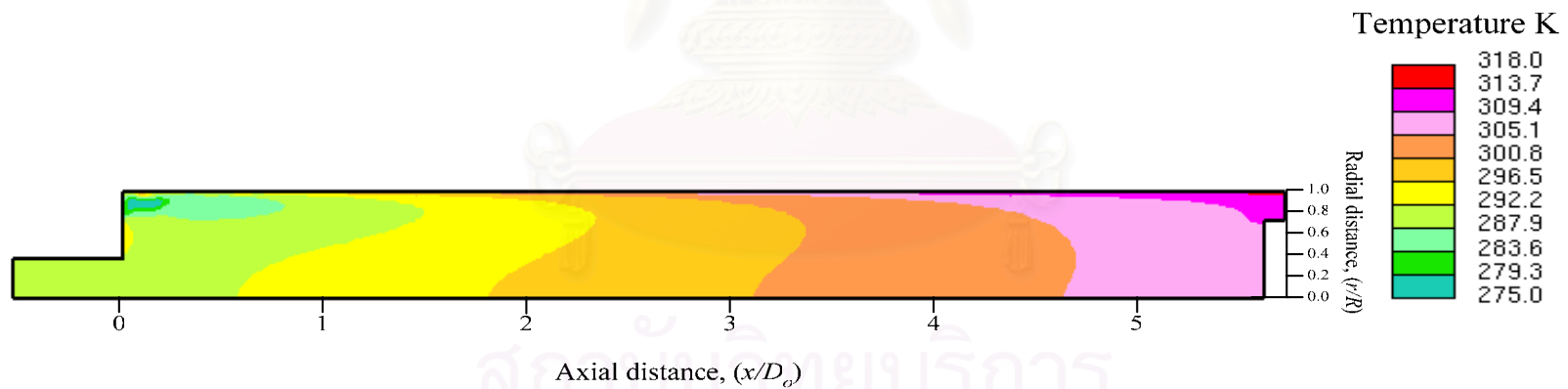
รูปที่ 5.10 การไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อออร์เทกซ์

จากรูปขยายแสดงการหมุนวนในทอเวอร์เทกซ์จะเห็นได้ว่าเกิดบริเวณการหมุนวน (Circulation zone) ขึ้นในทอเวอร์เทกซ์ ซึ่งสามารถแสดงภาพสเก็ตซ์ได้ดังรูปที่ 5.10 จะเห็นได้ว่าเมื่ออากาศไหลเข้ามาจากจุดที่ 1 อากาศในส่วนที่ 2 จะหมุนควงออกไปทางออกของอากาศร้อนในบริเวณใกล้กับผนัง โดยในบริเวณที่ใกล้กับทางออกของอากาศร้อน อากาศจะแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยส่วนที่ 3 จะไหลออกไปที่ทางออกของอากาศร้อนและอากาศในส่วนที่ 4 จะเกิดการหมุนย้อนกลับไปทางออกของอากาศเย็น เมื่อใกล้ถึงบริเวณทางออกของอากาศเย็น อากาศส่วนหนึ่งจะไหลออกไปที่ทางออกของอากาศเย็น และอีกส่วนหนึ่งจะไหลย้อนกลับเกิดเป็นบริเวณการหมุนวนขึ้น

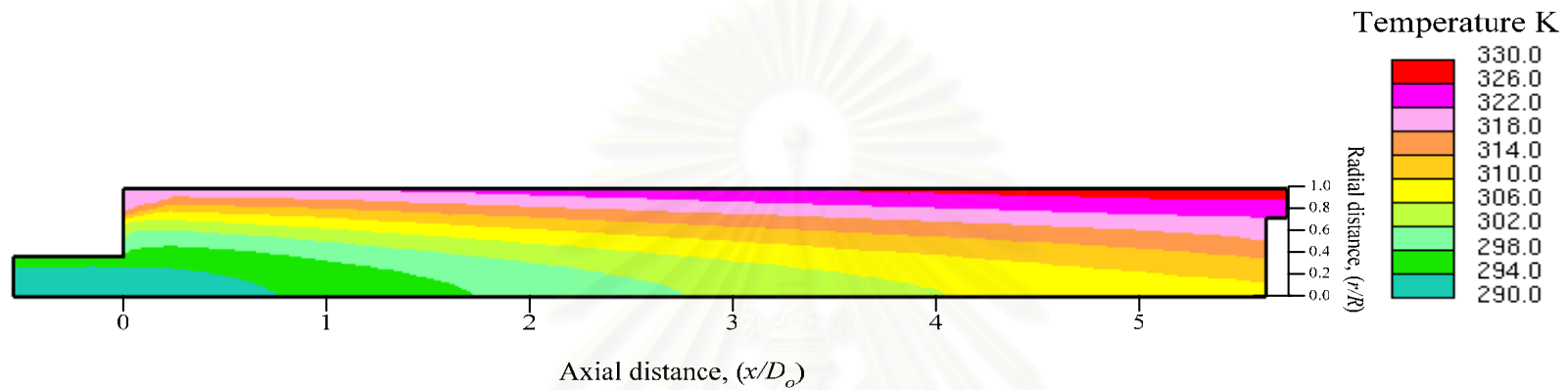
รูปที่ 5.11 และ 5.12 แสดง Static temperature contour ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่รวมผลของพลังงานจลน์เข้าไปด้วย จากผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ ตามลำดับจากรูปจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิจะกระจายไปตามแนวแกนและเกิด Temperature gradient ขึ้นมากในบริเวณใกล้กับผนังของท่อ โดย Static temperature จะมีค่าน้อยที่สุดในบริเวณที่อากาศฉีดเข้ามา ส่วนในรูปที่ 5.13 และ 5.14 แสดงถึง Total temperature contour จากรูปจะเห็นได้ว่า อากาศจะมีอุณหภูมิสูงในบริเวณผนังท่อ ส่วนอากาศเย็นจะอยู่ในบริเวณกลางท่อใกล้กับทางออกของอากาศเย็น ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่า อากาศร้อนจะอยู่บริเวณผนังส่วนอากาศเย็นจะอยู่บริเวณกลางท่อ และจากผลการคำนวณพบว่า อุณหภูมิสูงสุดมีค่าประมาณ 329 K ส่วนอุณหภูมิต่ำสุดมีค่าประมาณ 291 K



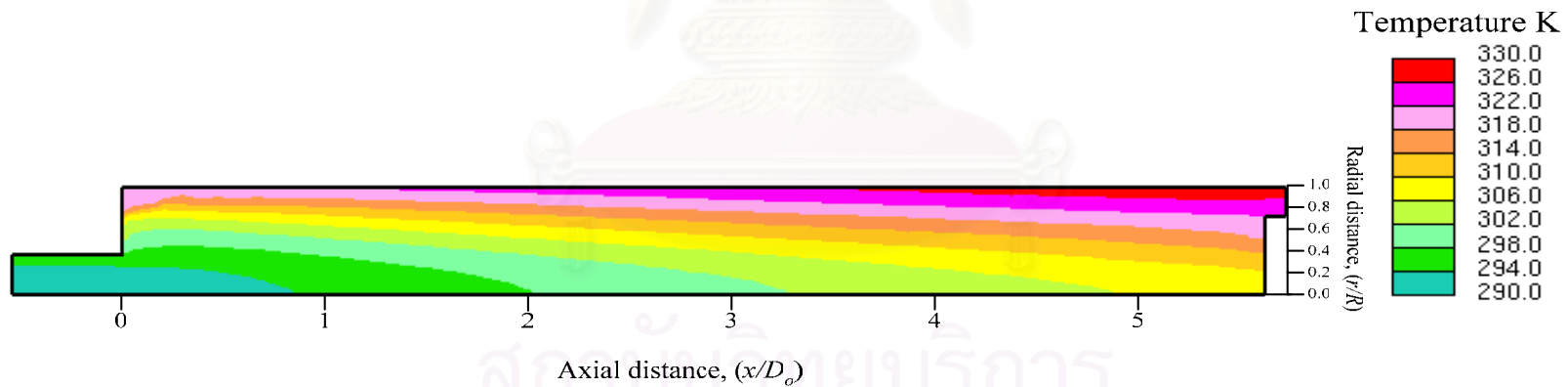
รูปที่ 5.11 Static temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ สำหรับท่อวอร์เทกซ์ของ Brunn (1969) (Not to scale)



รูปที่ 5.12 Static temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$ สำหรับท่อวอร์เทกซ์ของ Brunn (1969) (Not to scale)



รูปที่ 5.13 Total temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Brunn (1969) (Not to scale)



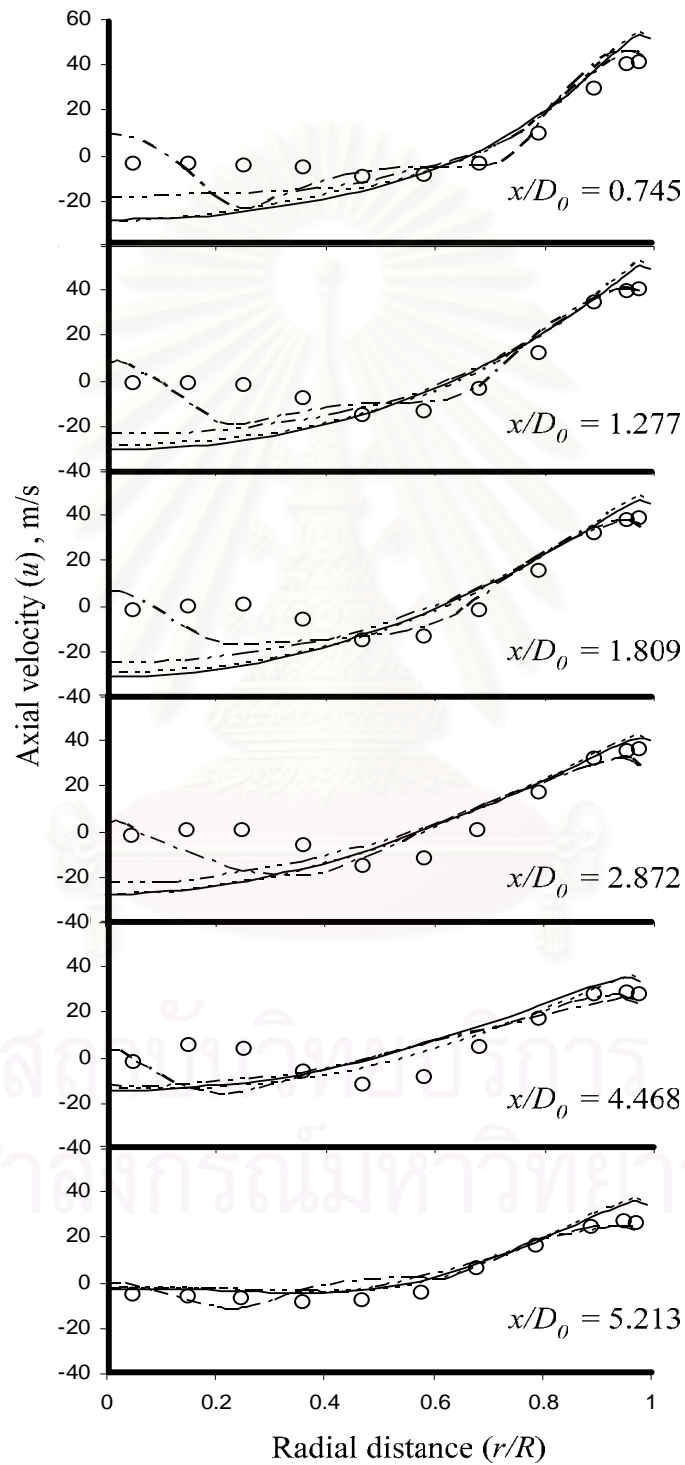
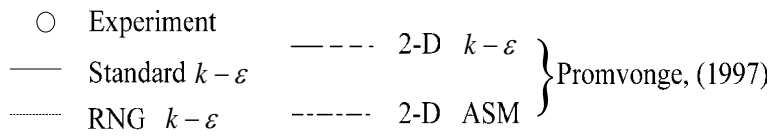
รูปที่ 5.14 Total temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Brunn (1969) (Not to scale)

ผลการจำลองการไหลเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

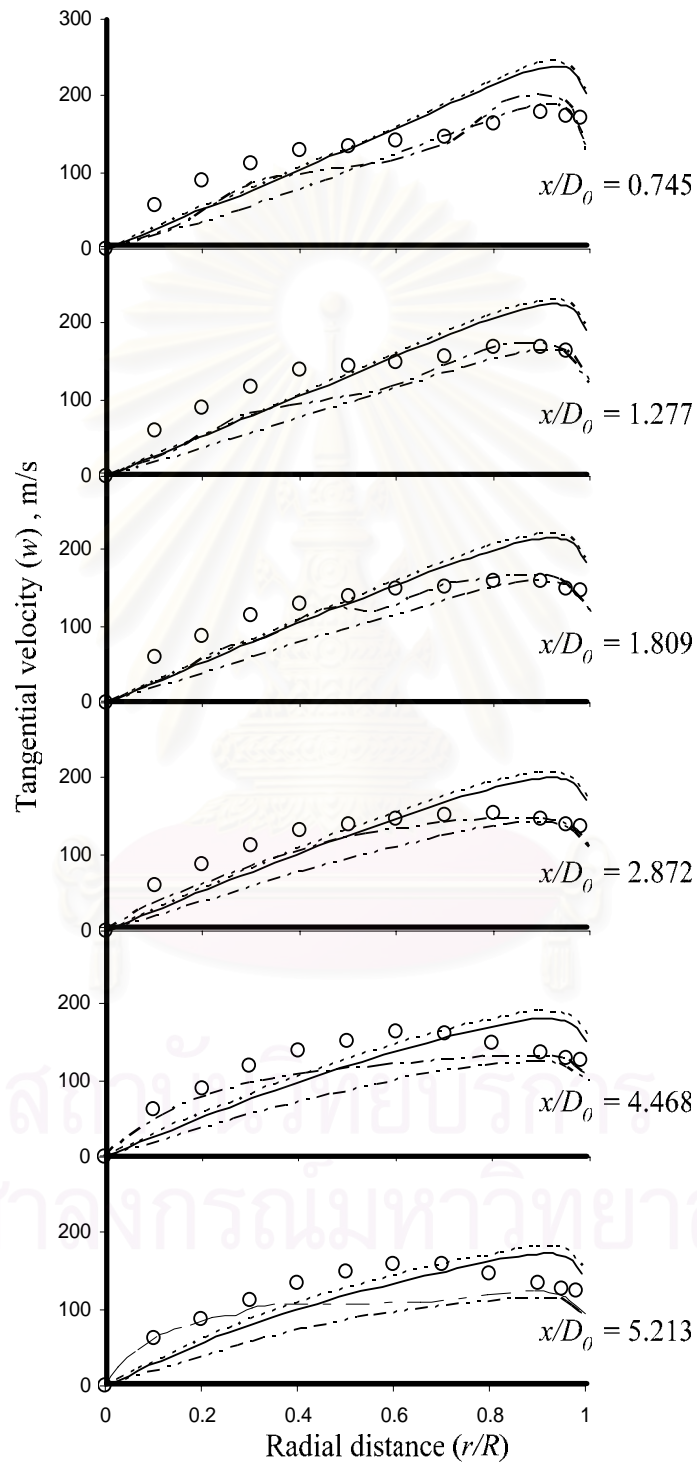
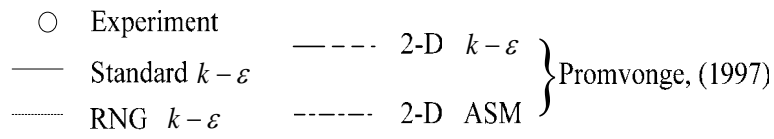
รูปที่ 5.15, 5.16 และ 5.17 แสดงกราฟเปรียบเทียบความเร็วในแนวแกน ความเร็วในแนวสัมผัส และอุณหภูมิ ตามลำดับ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ เปรียบเทียบกับการทดลองและผลการคำนวณในแบบสองมิติ จากรูปที่ 5.15 จะเห็นได้ว่าการคำนวณแบบสามมิติ ค่าที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง (Brunn, 1969) พบว่าตั้งแต่ระยะนาบที่ $x/D_o = 0.745$ ถึง 4.468 ในบริเวณด้านในที่ตำแหน่งน้อยกว่า $0.5R$ นั้นพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มที่แตกต่างไปจากผลการทดลอง เนื่องจากในบริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วจากการไหลย้อนกลับของอากาศออกไปที่ทางออกของอากาศเย็น ซึ่งแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองยังไม่สามารถทำนายความเร็วในบริเวณนี้ได้อย่างถูกต้อง ส่วนในบริเวณที่ใกล้กับผนังด้านนอกและที่ระยะนาบที่ $x/D_o = 0.5.213$ นั้นค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง เนื่องจากบริเวณนี้ห่างออกมาจากบริเวณที่มีการไหลไปที่ทางออกของอากาศเย็น ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่น้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในแบบสองมิติ (Promvong, 1997) พบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณในแบบสามมิติกับการคำนวณในแบบสองมิติโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ASM (Algebraic Reynolds stress model) นั้นจะมีความใกล้เคียงกับการทดลองที่จุดศูนย์กลางของท่อ แต่หลังจากจุดศูนย์กลางของท่อจนถึงระยะ $0.5R$ นั้น จะมีค่าความเร็วสูงกว่าการทดลอง ส่วนในระยะตั้งแต่ $0.5R$ ถึง R นั้น การคำนวณในแบบสามมิติและแบบสองมิติให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสำหรับการทำนายความเร็วในแนวแกนนั้น การคำนวณทั้งสองแบบสามารถทำนายความเร็วได้ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามการคำนวณทั้งสองแบบก็ยังไม่สามารถทำนายความเร็วในบริเวณกลางท่อ ซึ่งมีการไหลย้อนกลับไปที่ทางออกของอากาศเย็นได้เช่นเดียวกัน แต่ผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ASM จะแตกต่างออกไปโดยสามารถทำนายความเร็วได้ใกล้เคียงกับการทดลองที่บริเวณกลางท่อด้วย

เมื่อพิจารณาถึงความเร็วในแนวสัมผัสดังแสดงในรูปที่ 5.16 จากการคำนวณในแบบสามมิติค่าที่ได้จากการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ จะมีค่าใกล้เคียงกับการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า ในบริเวณด้านในของท่อที่ตำแหน่งน้อยกว่า $0.6R$ นั้น ค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลอง เนื่องจากในบริเวณนี้จะเกิดการไหลแบบ Force vortex ซึ่งแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองสามารถทำนายการไหลแบบ Force vortex ได้ แต่ในบริเวณรอบนอกที่เป็นการไหลแบบ



รูปที่ 5.15 ความเร็วในแนวแกนในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน



รูปที่ 5.16 ความเร็วในแนวสัมผัสในท่อวอร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน

Free vortex นั้น พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีค่ามากกว่า เนื่องจากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองไม่สามารถจำลองการไหลแบบ Free vortex ได้ ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณในแบบสองมิติโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ ของ Promvong (1997)

เมื่อเปรียบเทียบกับคำนวณในแบบสองมิติพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณในแบบสามมิติและการคำนวณในแบบสองมิติโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ นั้นจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งการคำนวณในแบบสองมิตินั้นจะมีความใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าในบริเวณใกล้กับผนัง แต่การคำนวณในแบบสองมิติก็ยังไม่สามารถจำลองการไหลแบบ Free vortex ได้ เนื่องจากในการคำนวณแบบสามมิติและการคำนวณในแบบสองมิติโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ ความเร็วที่ได้จะมีลักษณะเป็น Rigid body rotation คือแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกราฟความเร็วเลย แต่การคำนวณในแบบสองมิติโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ASM จะมีแนวโน้มแตกต่างออกไปโดยจะไม่มีลักษณะการไหลแบบ Force vortex เพียงอย่างเดียว

ในการคำนวณอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในท่อออร์เทกซ์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.17 การคำนวณในแบบสามมิติจากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีค่ามากกว่าการทดลอง ตลอดทั้งระนาบและทุกระนาบที่พิจารณา

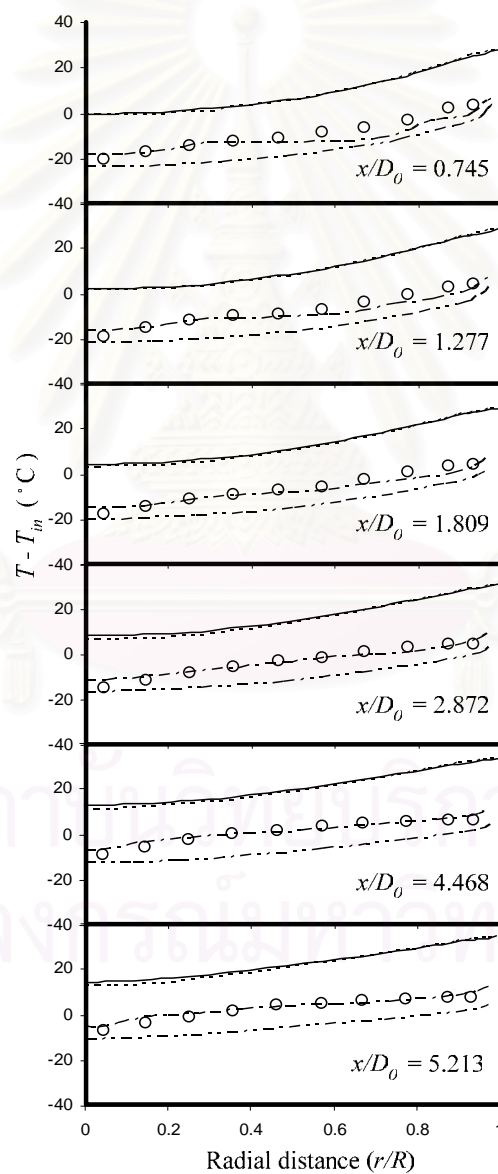
เมื่อเปรียบเทียบกับคำนวณในแบบสองมิติพบว่า การคำนวณในแบบสองมิตินั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองเนื่องจากการใช้ค่าพลังงานภายในในสมการพลังงานที่ใช้ค่า c_p ในการคำนวณ โดยมีสมมติฐานว่าปริมาตรภายในโดเมนไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการคำนวณแบบสองมิติโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ASM นั้นจะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับการทดลอง

สรุปผลการจำลองการไหลภายในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน

ในการจำลองการไหลภายในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกันนั้น การคำนวณในแบบสามมิติและแบบสองมิตินั้นสามารถทำนายความเร็วในแนวแกนได้ใกล้เคียงกัน โดยมีความใกล้เคียงกับการทดลองในบริเวณ $0.5R$ ถึง R ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบเนื่องจากการไหลย้อนกลับไปที่ทางออกของอากาศเย็น ส่วนในการทำนายความเร็วในแนวสัมผัสนั้น การคำนวณในแบบสามมิติและการคำนวณในแบบสองมิติโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ ไม่สามารถทำนายการไหลในแบบ Free vortex ได้ โดยจะมีลักษณะการไหลเป็นแบบ Force vortex เท่านั้น แต่การคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ASM จะมีแนวโน้มเข้าที่แตกต่างออกไปโดยลักษณะของกราฟที่ได้จะไม่มีลักษณะเป็น Rigid body rotation เพียงอย่างเดียว ส่วนในการ

คำนวณอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในท่อออร์เทกซ์ การคำนวณในแบบสองมิติจะมีความใกล้เคียงกับการทดลองเนื่องจากการใช้พลังงานภายในในการคำนวณสมการพลังงานซึ่งใช้ค่า c_p ในการคำนวณ ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าการคำนวณในแบบสองมิติก็เพียงพอในการคำนวณความเร็วและอุณหภูมิภายในท่อออร์เทกซ์ และแบบจำลองความปั่นป่วน ASM สามารถทำนายการไหลและอุณหภูมิได้ดีกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ ทั้งสองแบบ

○ Experiment
 — Standard $k-\varepsilon$
 - - - 2-D $k-\varepsilon$
 - - - 2-D ASM } Promvonge, (1997)
 - - - RNG $k-\varepsilon$



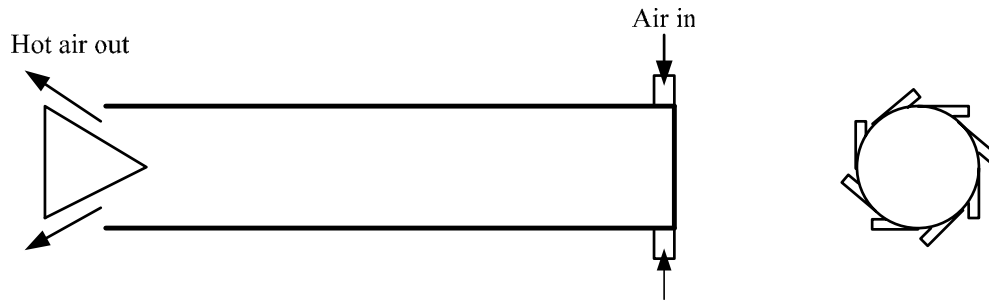
รูปที่ 5.17 อุณหภูมิในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน

5.2 การจำลองการไหลภายในท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลตามกัน

ในการจำลองการไหลภายในท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลตามกันนี้ ได้ใช้ข้อมูลจากการทดลองของ Hartnett and Eckert (1957) โดยได้ทำการปิดช่องทางออกของอากาศเย็นไว้จะมีแต่ทางออกของอากาศร้อนซึ่งอยู่ที่ปลายของท่ออีกด้านหนึ่ง ซึ่งภาพสเก็ทซ์ของการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.18 โดยท่อวอร์เท็กซ์นี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0762 m และมีความยาว 0.77 m อากาศจะเข้าสู่ท่อวอร์เท็กซ์ไปตามแนวสัมผัสของท่อผ่านหัวฉีด 8 ตัว ส่วนอากาศร้อนจะถูกปล่อยออกผ่านทาง 60° Cone-shaped valve รายละเอียดของท่อวอร์เท็กซ์และคุณสมบัติของอากาศในการทดลองของ Hartnett and Eckert ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2

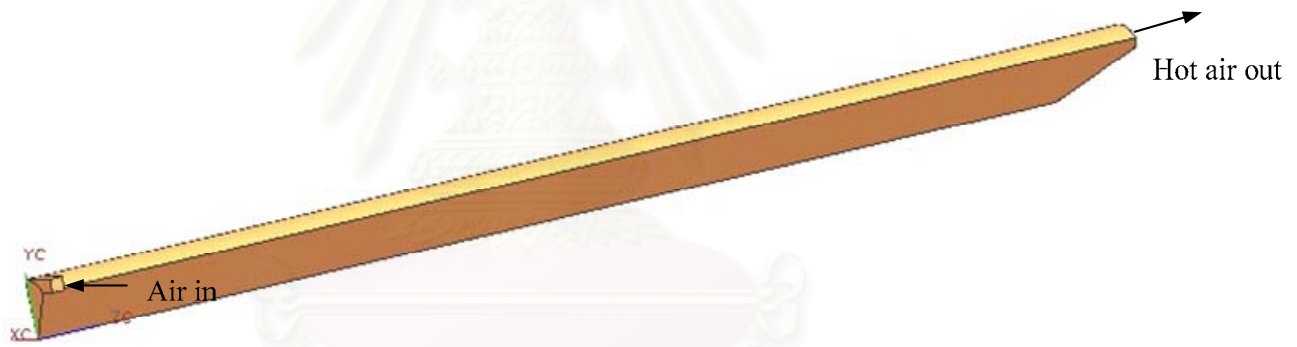
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลท่อวอร์เท็กซ์จากการทดลองของ Hartnett and Eckert (1957)

Tube Characteristics	
Tube length, L (m)	0.77
Tube diameter, D_0 (m)	0.0762
No. of Nozzle	8
Nozzle diameter, d_n (m)	0.009525
Cone valve opening (m)	0.007854
L/D_0 ratio	10.1
Inlet Fluid Properties	
Type of fluid	Air
Temperature (K)	297
Velocity (m/s)	230
Flow Condition	
Mass flow rate (kg/s)	0.2184



รูปที่ 5.18 ภาพสเก็ทซ์ท่อวอร์เทกซ์ของ Hartnett and Eckert (1957)

เพื่อเป็นการลดขนาดของโดเมนการคำนวณและเป็นการประหยัดเวลาในการประมวลผล จึงพิจารณาเพียงหนึ่งในแปดของท่อวอร์เทกซ์ ซึ่งลักษณะของโดเมนการคำนวณได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.19

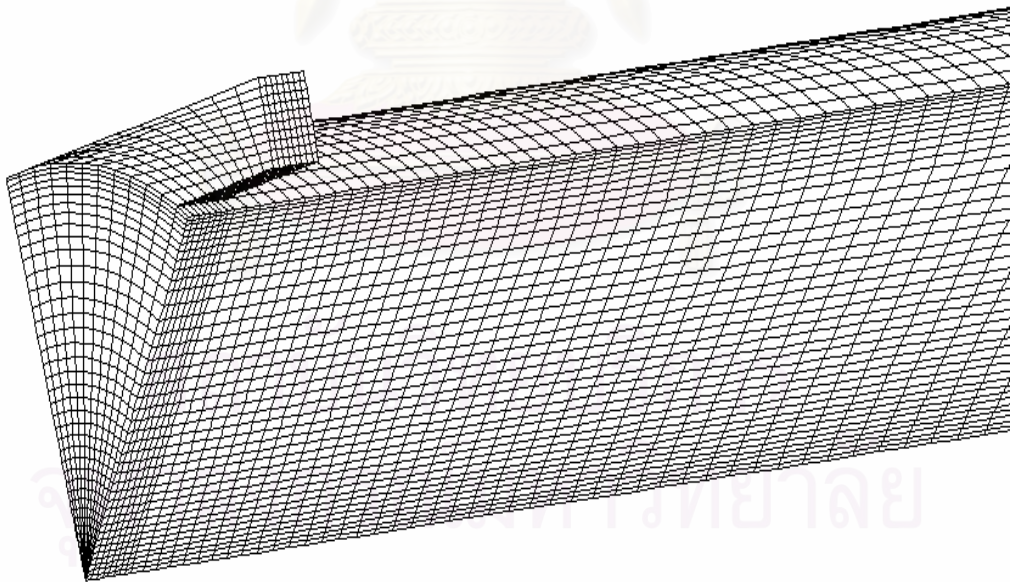


รูปที่ 5.19 โดเมนการคำนวณของท่อวอร์เทกซ์แบบไหลตามกัน (Not to scale)

ในการจำลองการไหลในท่อวอร์เทกซ์แบบไหลตามกันนี้ได้ใช้จำนวนเซลล์ทั้งหมด 76,640 เซลล์ ในการคำนวณ ซึ่งลักษณะของกริดที่ใช้ในการคำนวณได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.20 โดยจะเน้นให้กริดมีความละเอียดในบริเวณใกล้ผนังและบริเวณทางเข้าของอากาศ โดยได้แสดงรูปขยายของ กริดในรูปที่ 5.21

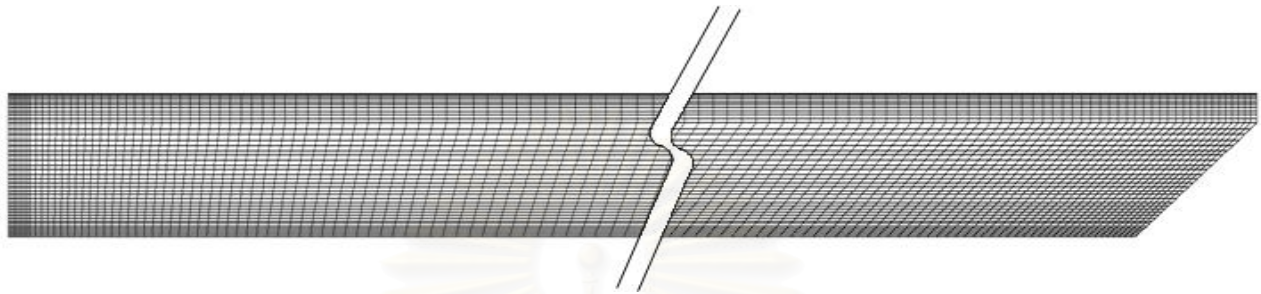


รูปที่ 5.20 กริดที่ใช้ในการคำนวณการไหลในท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน
(Not to scale)



รูปที่ 5.21 รูปขยายของกริดในการคำนวณการไหลในท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน

รูปที่ 5.22 แสดงถึงลักษณะของกริดในระนาบที่พิจารณาเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยระนาบนี้จะอยู่กึ่งกลางระหว่างหัวฉีดเพื่อลดผลกระทบเนื่องจากทางเข้า โดยจะนำข้อมูลที่ได้จากการซึ่งได้แก่ความเร็วและอุณหภูมิไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ตำแหน่ง $x/D_o = 0.333$, 2 และ 6 และเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในแบบสองมิติของ Promvonge (1997)

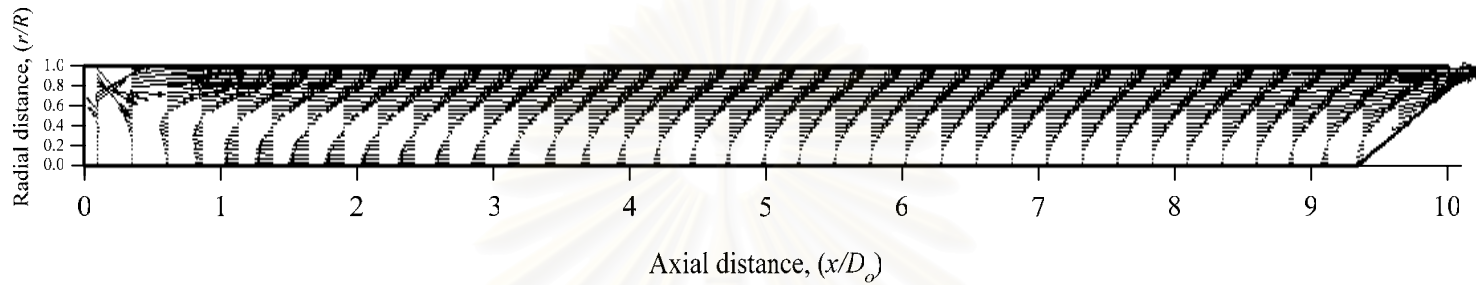


รูปที่ 5.22 ลักษณะของกริดในระนาบที่พิจารณา

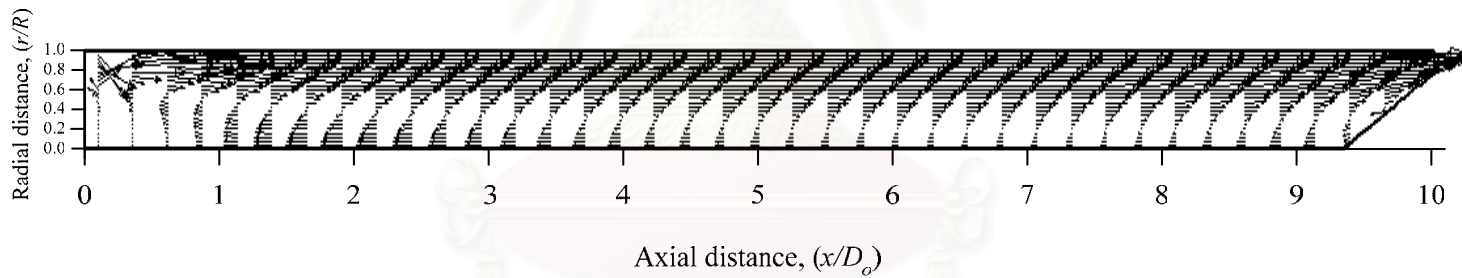
ผลการคำนวณ

รูปที่ 5.23 และ 5.24 แสดงถึงเวกเตอร์ของความเร็วในแนวแกนจากผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าลักษณะการไหลโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองแบบมีความใกล้เคียงกัน โดยจะเห็นการไหลในบริเวณใกล้กับผนังมีทิศพุ่งไปทาง Cone-shaped valve และมีการไหลย้อนกลับไปที่ทางเข้าของอากาศในบริเวณกลางท่อ โดยความเร็วจะมีค่ามากที่สุดบริเวณใกล้กับผนัง และจะเห็นการหมุนวนขึ้นในบริเวณทางเข้าของอากาศและในบริเวณ Cone-shaped valve โดยรูปขยายของการหมุนวนนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.25 และ 5.26

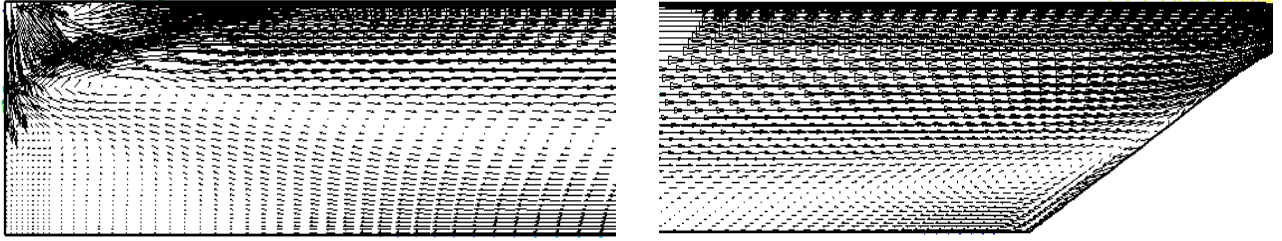
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



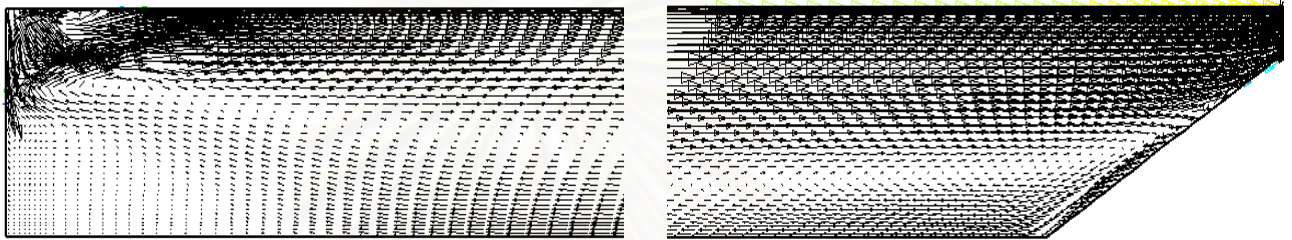
รูปที่ 5.23 เวกเตอร์ของความเร็วในแนวแกน ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Hartnett and Eckert (1957) (Not to scale)



รูปที่ 5.24 เวกเตอร์ของความเร็วในแนวแกน ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Hartnett and Eckert (1957) (Not to scale)

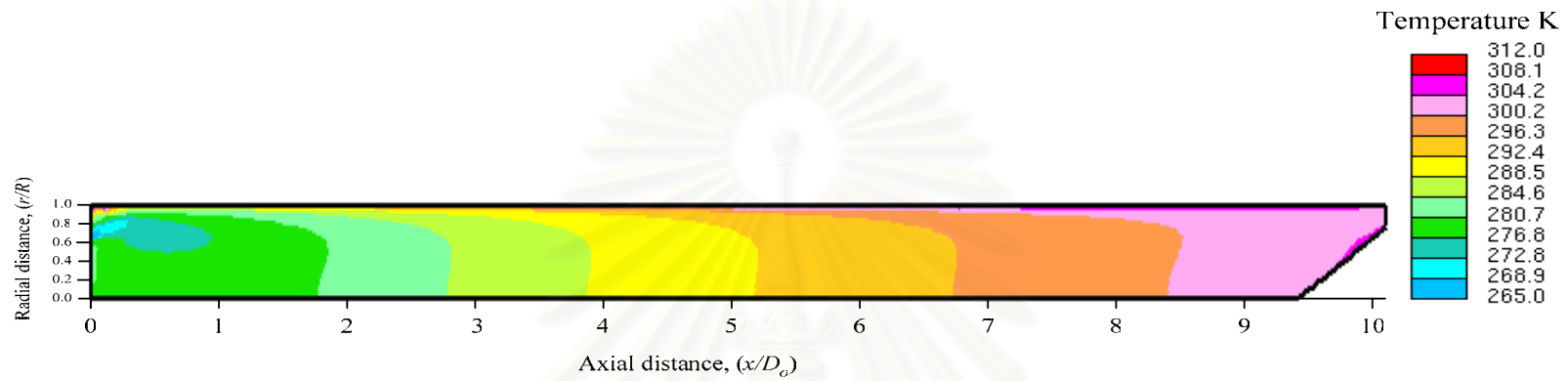


รูปที่ 5.25 รูปขยายแสดงการหมุนวนในท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน
โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$

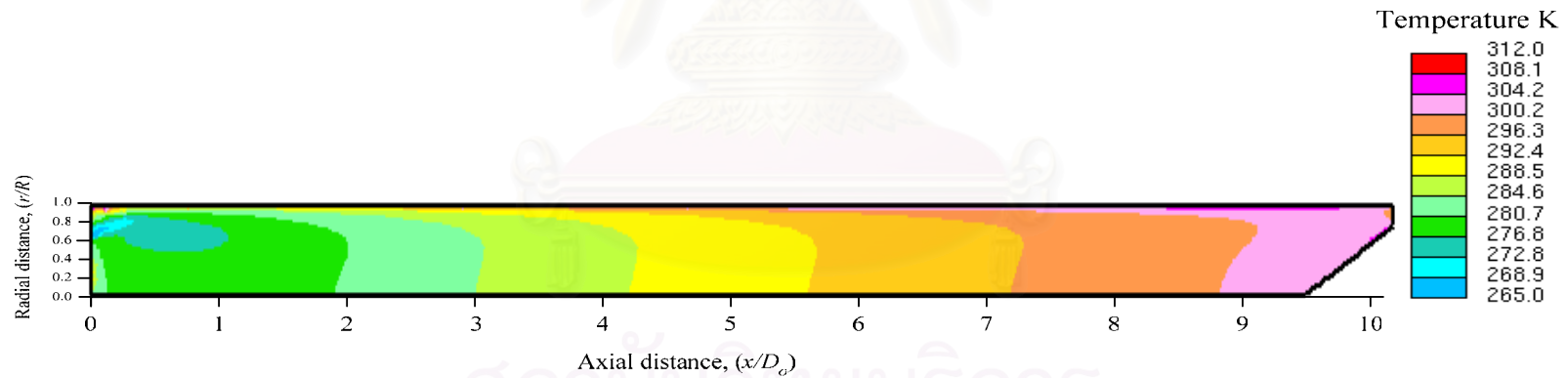


รูปที่ 5.26 รูปขยายแสดงการหมุนวนในท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน
โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$

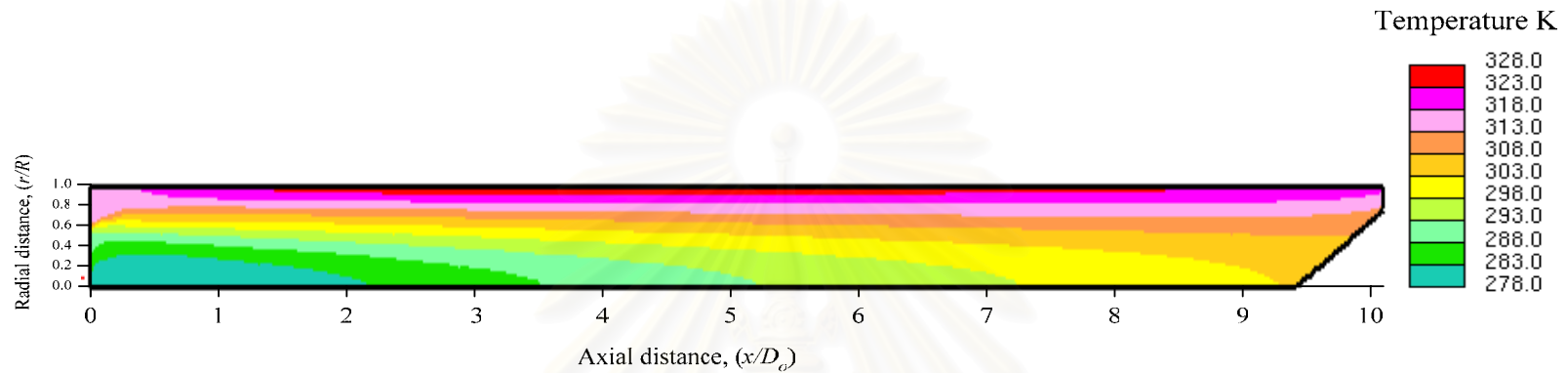
รูปที่ 5.27 และ 5.28 แสดงถึง Static temperature contour จากผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ และ RNG $k - \varepsilon$ ส่วน Total temperature contour ได้แสดงไว้ในรูปที่รูปที่ 5.29 และ 5.30 โดยในการคำนวณ Static temperature จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวจะเป็นไปตามแนวแกนและเกิด Temperature gradient ขึ้นมากในบริเวณที่ใกล้กับผนัง ($r/R > 0.6$) และจะเกิดขึ้นน้อยในบริเวณกลางท่อ สำหรับในส่วนของ Total temperature จะเห็นได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิจะเป็นลักษณะเดียวกันกับท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน โดยอากาศจะมีอุณหภูมิสูงในบริเวณผนังของท่อ ส่วนอากาศเย็นจะอยู่ในบริเวณกลางท่อใกล้กับทางเข้าของอากาศ จากการคำนวณพบว่าอุณหภูมิสูงสุดมีค่าประมาณ 326 K ส่วนอุณหภูมิต่ำสุดมีค่าประมาณ 278 K



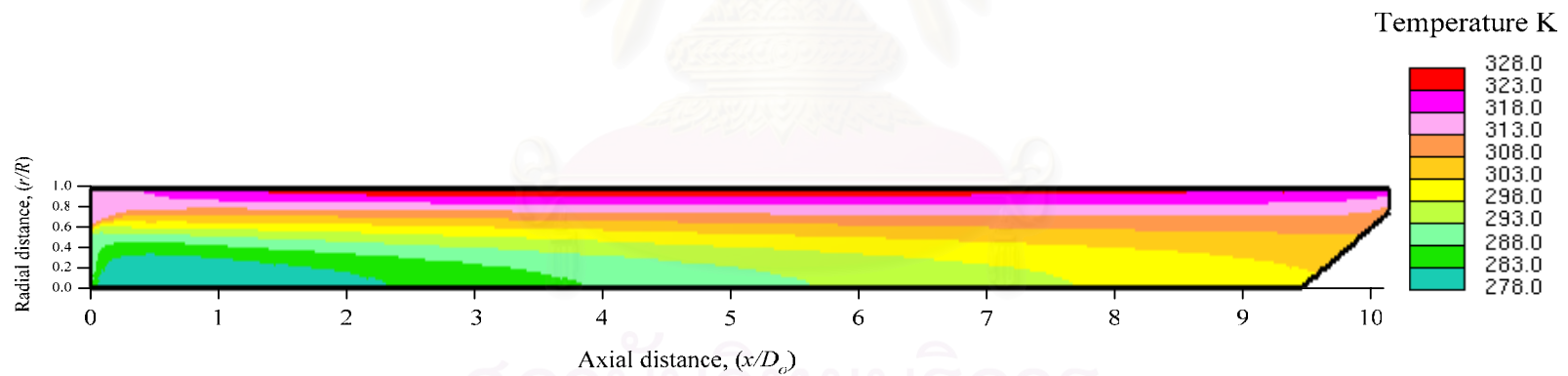
รูปที่ 5.27 Static temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Hartnett and Eckert (1957) (Not to scale)



รูปที่ 5.28 Static temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Hartnett and Eckert (1957) (Not to scale)



รูปที่ 5.29 Total temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Hartnett and Eckert (1957) (Not to scale)



รูปที่ 5.30 Total temperature contour ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$ สำหรับท่อออร์เทกซ์ของ Hartnett and Eckert (1957) (Not to scale)

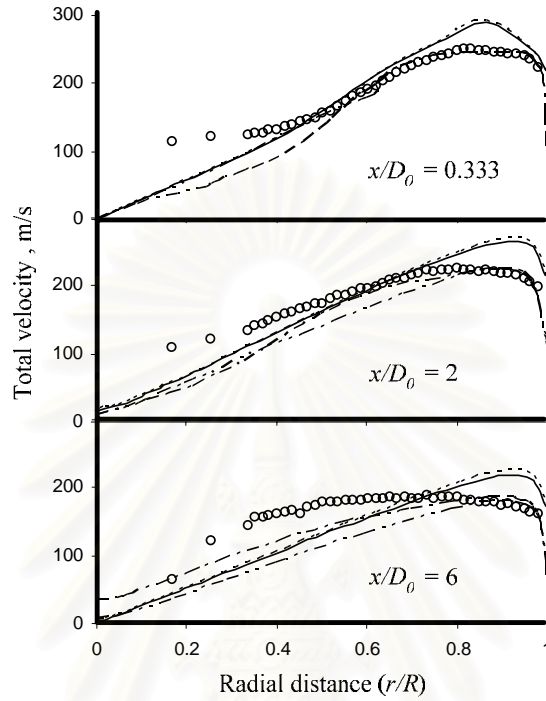
ผลการจำลองการไหลเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

รูปที่ 5.31, 5.32, และ 5.33 แสดงกราฟเปรียบเทียบ Total velocity, ความเร็วในแนวสัมผัส และอุณหภูมิ ตามลำดับ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ เปรียบเทียบกับผลการทดลองและผลการคำนวณในแบบสองมิติ จากรูปที่ 5.31 และ 5.32 พบว่าการคำนวณแบบสามมิตินั้นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าความเร็วในแนวสัมผัสที่ระนาบ $x/D_o = 0.333$ จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลอง ส่วนในระนาบที่ $x/D_o = 2$ และ 6 นั้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการไหลทั้งแบบ Force vortex และ Free vortex ซึ่งในการคำนวณยังไม่สามารถทำนายการไหลแบบ Free vortex ได้ จากกราฟค่าจากการคำนวณจะเป็นลักษณะของการไหลแบบ Force vortex เท่านั้น โดยในระนาบที่ $x/D_o = 2$ ในช่วงที่เป็นการไหลแบบ Force vortex จะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง

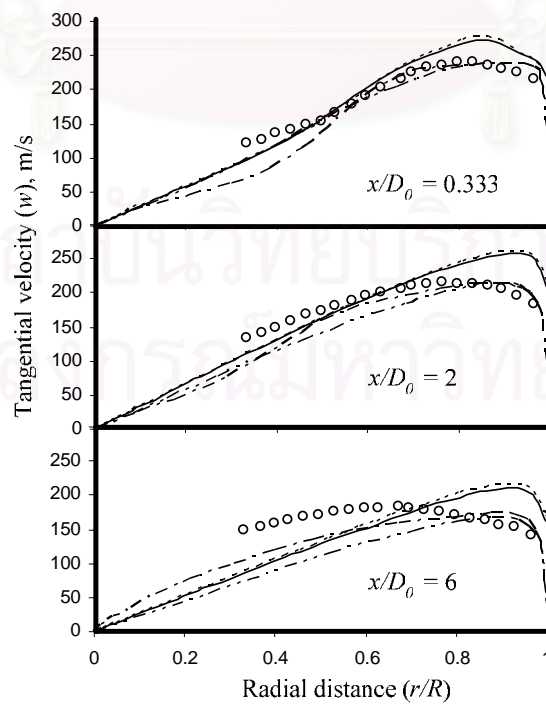
เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในแบบสองมิติพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการคำนวณในแบบสามมิติคือมีลักษณะการไหลเป็นแบบ Force vortex เท่านั้น โดยการคำนวณในแบบสามมิติจะมีความมากกว่า ส่วนการคำนวณในแบบสองมิติโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ASM นั้นจะมีแนวโน้มเข้าใกล้การทดลองมากที่สุด

ผลการคำนวณอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในท่อออร์เทกซ์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.33 ซึ่งพบว่าผลการคำนวณในแบบสามมิติจากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีความมากกว่าการทดลอง ตลอดทั้งระนาบและทุกระนาบที่พิจารณา แต่อย่างไรก็ตามผลการคำนวณและผลการทดลองก็ยังมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

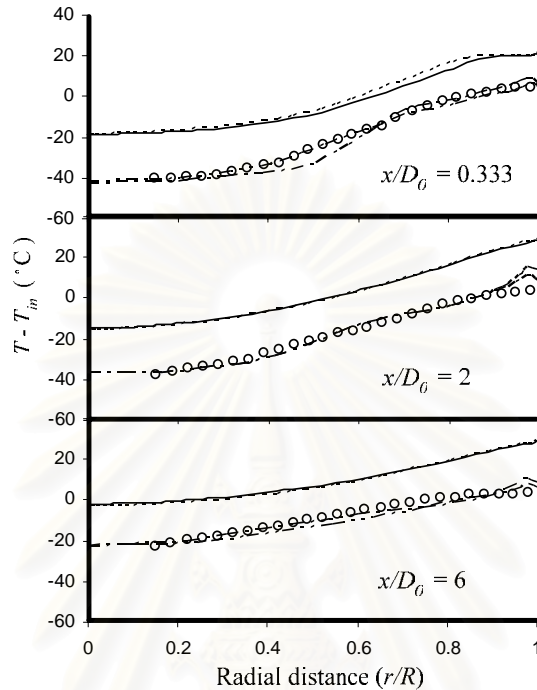
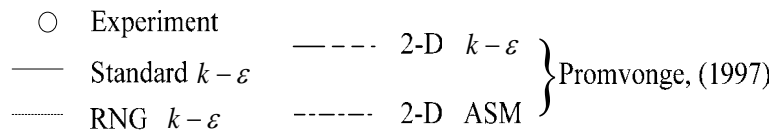
- Experiment
 - Standard $k-\varepsilon$
 - ⋯ RNG $k-\varepsilon$
 - 2-D $k-\varepsilon$
 - 2-D ASM
- } Promvonge, (1997)



รูปที่ 5.31 Total velocity ในท่อวอร์เทกซ์แบบไหลตามกัน



รูปที่ 5.32 ความเร็วในแนวสัมผัสในท่อวอร์เทกซ์แบบไหลตามกัน



รูปที่ 5.33 อุณหภูมิในทอว์ร์เท็กซ์แบบไหลตามกัน

เมื่อเปรียบเทียบกับ การคำนวณในแบบสองมิติพบว่า การคำนวณในแบบสองมิตินั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่า

สรุปผลการจำลองการไหลภายในทอว์ร์เท็กซ์แบบไหลตามกัน

ในการจำลองการไหลภายในทอว์ร์เท็กซ์แบบไหลตามกันนั้น การคำนวณความเร็วในแนวสัมผัสนั้น การคำนวณในแบบสามมิติและแบบสองมิติที่ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ นั้นได้ผลเช่นเดียวกันกับการคำนวณในทอว์ร์เท็กซ์แบบไหลสวนทางกัน คือไม่สามารถทำนายการไหลแบบ Free vortex ได้ ส่วนในการคำนวณอุณหภูมินั้นการคำนวณในแบบสองมิติมีความใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าการคำนวณในแบบสามมิติ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าการคำนวณในแบบสองมิติก็เพียงพอ ในการคำนวณความเร็วและอุณหภูมิภายในทอว์ร์เท็กซ์แบบไหลตามกัน

5.3 สรุปผลการจำลองการไหลในท่อออร์เทกซ์

จากการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกันและแบบไหลตามกัน พบว่าในการคำนวณแบบสามมิติโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ นั้นสามารถทำนายความเร็วในแนวแกนในส่วนที่ไม่มีผลกระทบเนื่องจากการไหลย้อนกลับไปที่ทางออกของอากาศเย็นได้ดี ส่วนในการทำนายความเร็วในแนวสัมผัสนั้นแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองสามารถทำนายการไหลแบบ Force vortex ได้ดีในระดับหนึ่ง ส่วนการไหลแบบ Free vortex นั้นแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองนั้นยังไม่สามารถทำนายได้ ซึ่งการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ASM นั้นจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ส่วนในการทำนายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในท่อออร์เทกซ์นั้นพบว่าผลการคำนวณในแบบสามมิติจะมีค่ามากกว่าการทดลองและการคำนวณในแบบสองมิติ โดยการคำนวณในแบบสองมิติจะมีความใกล้เคียงกับการทดลอง เนื่องในการคำนวณหาพลังงานที่เกิดขึ้นนั้นได้พิจารณาเป็นพลังงานภายในรวมกับพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นซึ่งใช้ค่า c_p ในการคำนวณหาพลังงานภายใน ส่วนการคำนวณในแบบสามมิตินั้นคำนวณหาพลังงานที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาเป็นค่าเอนทาลปีรวมกับพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นซึ่งใช้ค่า c_p ในการคำนวณค่าเอนทาลปี ในการไหลแบบอัดตัวได้นั้นค่าของ c_p จะมีค่ามากกว่า c_p ทำให้การคำนวณอุณหภูมิในแบบสามมิตินั้นค่ามากกว่าการคำนวณในแบบสองมิติ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของโปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่ใช้เนื่องจากในการคำนวณพลังงานในการไหลแบบอัดตัวได้นั้นจะใช้ค่า c_p ในการคำนวณเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกันและแบบไหลตามกัน (จากรูปของ Total temperature contour, รูปที่ 13, 14, 29 และ 30) จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในท่อออร์เทกซ์ อากาศเย็นจะอยู่ในบริเวณกลางท่อตรงบริเวณทางออกของอากาศเย็นซึ่งท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกันจะปิดบริเวณนี้ไว้ ทำให้ท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกันมีประสิทธิภาพในการทำความเย็นมากกว่า

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้คำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบสามมิติภายในท่อวอร์เทกซ์ โดยใช้โปรแกรมทางด้าน CFD โดยทำการหาค่าความเร็วและอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆในโดเมนของปัญหา แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองและการคำนวณในแบบสองมิติ โดยในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน 2 แบบจำลองด้วยกันคือ แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ (บทที่ 3) และเพื่อต้องการให้เกิดความเชื่อมั่นในการใช้โปรแกรม CFD นี้ ผู้ทำวิจัยได้แสดงผลของการใช้โปรแกรมกับปัญหาที่ไม่ซับซ้อนและปัญหาที่มีลักษณะการไหลแบบ Swirling (บทที่ 4) ซึ่งได้แก่ ปัญหาการไหลผ่าน Backward-facing step และปัญหาการไหลในเตาเผาแบบวอร์เทกซ์ จากผลการคำนวณพบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองไม่แตกต่างกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลอง แต่แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ก็ยังไม่สามารถทำนายการไหลในส่วนของ Free vortex ได้

ในบทที่ 5 แสดงการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อวอร์เทกซ์ โดยท่อวอร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน ได้เลือกการทดลองของ Brunn (1969) ส่วนท่อวอร์เทกซ์แบบไหลตามกัน ได้เลือกผลการทดลองของ Hartnett and Eckert (1957) ซึ่งจากการเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า ในการคำนวณความเร็วในแนวแกนมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ตำแหน่ง $0.5R$ ขึ้นไปซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีผลกระทบเนื่องจากทางออกของอากาศเย็น ส่วนในการคำนวณความเร็วในแนวสัมผัสพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองไม่สามารถทำนายการไหลในส่วนที่เป็น Free vortex ได้ ในการคำนวณอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้นพบว่า มีลักษณะเป็นไปตามสมมติฐานคือ อากาศเย็นจะอยู่ในบริเวณกลางท่อที่ทางออกของอากาศเย็น ส่วนอากาศร้อนจะอยู่ที่ผนังท่อ ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นจะมีค่ามากกว่าการทดลองในช่วงประมาณ 20 K

จากการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในแบบสองมิติ พบว่าในการคำนวณแบบสองมิติโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ จะมีความสามารถในการทำนายความเร็วในแนวแกนและความเร็วในแนวสัมผัสใกล้เคียงกับการคำนวณในแบบสามมิติ แต่การคำนวณในแบบสองมิติโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ASM จะมีแนวโน้มเข้าใกล้การทดลองมากที่สุด ส่วนในการคำนวณอุณหภูมินั้นการคำนวณในแบบสามมิติจะมีค่ามากกว่าการทดลองและการคำนวณในแบบสองมิติโดยการคำนวณในแบบสองมิติจะมีความใกล้เคียงกับการทดลอง โดยสาเหตุที่การ

คำนวณในแบบสามมิติมีค่ามากกว่าการคำนวณในแบบสองมิตินั้น เนื่องจากการคำนวณในแบบสองมิติ ได้ใช้ค่าพลังงานภายในคำนวณในสมการพลังงานแทนที่ค่าเอนทาลปีโดยการย้ายเทอม $\frac{P}{\rho}$ ไปรวมในส่วนของ Source term แต่การคำนวณแบบสามมิตินั้นโปรแกรมที่ใช้มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงในส่วนของสมการพลังงานได้

จากสมมติฐานที่ว่าแก๊สบริเวณใกล้กับผนังจะรับพลังงานจลน์เข้ามาแล้วทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่าการคำนวณในแบบสามมิติไม่สามารถคำนวณความเร็วในส่วน of Free vortex ซึ่งเกิดในบริเวณใกล้กับผนังได้ เป็นผลให้การคำนวณอุณหภูมิในแบบสามมิตินั้นมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง แต่การคำนวณในแบบสองมิติของ Promvong (1997) มีการแก้ปัญหาเพื่อให้สามารถคำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยการใช้สมมติฐานว่า ปริมาตรภายในโดเมนไม่มีการเปลี่ยนแปลงและทำการเปลี่ยนแปลงเทอมในสมการพลังงาน อย่างไรก็ตามเท่าที่ได้ทำการสืบค้นวารสารวิจัยในขณะนี้ ยังไม่มีผลงานวิจัยของผู้อื่นมายืนยันสมมติฐานนี้

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำความเย็นของทอเวอร์เทกซ์ทั้งสองแบบจากการคำนวณจะเห็นได้ว่า ทอเวอร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกันจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเนื่องจากอากาศเย็นนั้นจะอยู่ในกลางท่อใกล้กับทางเข้าของอากาศเย็น ซึ่งในแบบไหลสวนทางกันบริเวณนี้จะเป็นทางออกของอากาศเย็น แต่สำหรับแบบไหลตามกันบริเวณนี้จะถูกปิดไว้ ทำให้แบบไหลสวนทางกันสามารถทำความเย็นได้ดีกว่า

สาเหตุที่ทำให้ผลที่ได้จากการคำนวณมีความแตกต่างจากผลการทดลอง อาจเกิดจากข้อจำกัดในการใช้โปรแกรม CFD จากสาเหตุเหล่านี้

1. จำนวนของเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องคอมพิวเตอร์ (AMD 1.8 GHz, Ram 768 MB) ที่ใช้ในการประมวลผล ทำให้ไม่สามารถเพิ่มจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณได้มากกว่านี้
2. แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้คือ Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ ซึ่งทำนายการไหลแบบ Swirling flow ได้ไม่ดีนัก

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds stress ที่มีความสามารถในการทำนายการไหลแบบ Swirling ได้ดี เพื่อศึกษาผลเนื่องจากการไหลแบบ Free vortex
2. ศึกษาผลของการเปลี่ยนแก๊สที่ใช้ในท่อออร์เทกซ์แทนที่อากาศ
3. ศึกษาถึงผลการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในท่อออร์เทกซ์ เช่น ความยาวของท่อ ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง และ จำนวนของหัวฉีด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- Adams, E.W., and Eaton, J.K., An LDA Study of the backward-facing step flow, including the effects of velocity bias. Journal of Fluids Engineering 110 (1988): 275-282.
- Behera, U., Paul, P.J., Kasthuriengan, S., Karunanithi, R., Ram, S.N., Dinesh, K., and Jacob, S., CFD analysis and experimental investigations towards optimizing the parameters of Ranque-Hilsch vortex tube. International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005): 1961-1973.
- Blatt, T.A., and Trusch, R.B., An experimental investigation of an improved vortex cooling device. American Society of Mechanical Engineers, Winter Annual Meeting (1962): 25-30.
- Brunn, H.H., Experimental investigation of the energy separation in vortex tubes. Journal of Mechanical Engineering Science 11, 6 (1969): 367-382.
- CD-adapco Ltd., STAR-CD Version 3.24 Methodology. (2005).
- Eiamsa-ard, S., An experimental performance study of a Ranque-Hilsch vortex tube. Master Thesis. Department of Mechanical Engineering, Graduate School, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. 2000.
- EXAIR Corporation., Vortex tube. [Online].1999. Available from: [http://www.exair.com/vortex tube/frmain.htm](http://www.exair.com/vortex%20tube/frmain.htm) [2003,June 16]
- Frohlingsdof, W., and Unger, H., Numerical investigations of the compressible flow and the energy separation in the Ranque-Hilsch vortex tube. International Journal of Heat and Mass Transfer 42 (1999): 415-422.
- Fulton, C. D., Ranque's tube. ASRE refrigeration engineering 5 (1950):473-479.
- Hartnett, J.P., and Eckert, E.R.G., Experimental study of the velocity and temperature distribution in a high velocity vortex-type flow. Transaction of the ASME, Series C, Journal of Heat Transfer 79 (1957): 751-758.
- Launder, B.E., and Spalding, D.B., The Numerical Computation of Turbulent Flows. Computational Methods for Applied Mechanical Engineering 3 (1974): 269-289.

- Marshall, J., Effect of operating conditions, Physical size and fluid characteristic on the gas separation performance of a Linderstrom-Lang vortex tube. International Journal of Heat and Mass Transfer 20 (1977): 227-231.
- Martynovskii, V.S., and Alekseev, V.P., Investigation of the vortex thermal separation effect for gases and vapors. Soviet Physics-Technical Physics 1 (1956): 2233-2243.
- Newman Tool Inc., Vortex tube. [Online].1998. Available from:
<http://www.newmantools.com/vortex.htm>. [2003,June 16]
- Promvongse, P., A numerical study of vortex tubes with an algebraic Reynolds stress model. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine University of London. 1997.
- Rodi, W., Influence of buoyancy and rotation on equations for the turbulent length scale. Proceedings of the 2nd Symposium on Turbulent Shear Flows (1979)
- Saidi, M.H., and Valipour, M.S., Experimental modeling of vortex tube refrigerator. Applied Thermal Engineering 23 (2003): 1971-1980.
- Scheper, G.W., The vortex tube internal flow data and a heat transfer theory. Journal of ASRE, Refrigerating Engineering 59 (1951): 985-989.
- Takahama, H., Kawamura, M., Kato, B., and Yokosawa, H., Performance characteristics of energy separation in a steam operated vortex tube. International Journal of Engineering Science 17 (1979): 735-744.
- Takahama, H. and Yokosawa, H., Energy separation in vortex tubes with a divergent chamber. Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer 103 (1981):196-203.
- Versteeg, H.K., and Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Longman Scientific & Technical: London, 1995.
- Wilcox, C.D., Turbulence modeling for CFD. California: DCW Industries, 1993.
- Yakhot, V., and Orszag, S.A. Renormalization group analysis of turbulence I: Basic theory. Journal of Scientific Computing 1 (1986): 1-51.

Zhang, J., Nieh,S. and Zhou, L., A New version of algebraic stress model for simulating strongly swirling turbulent flows. Journal of Numerical Heat Transfer 22 (1992): 49-62.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



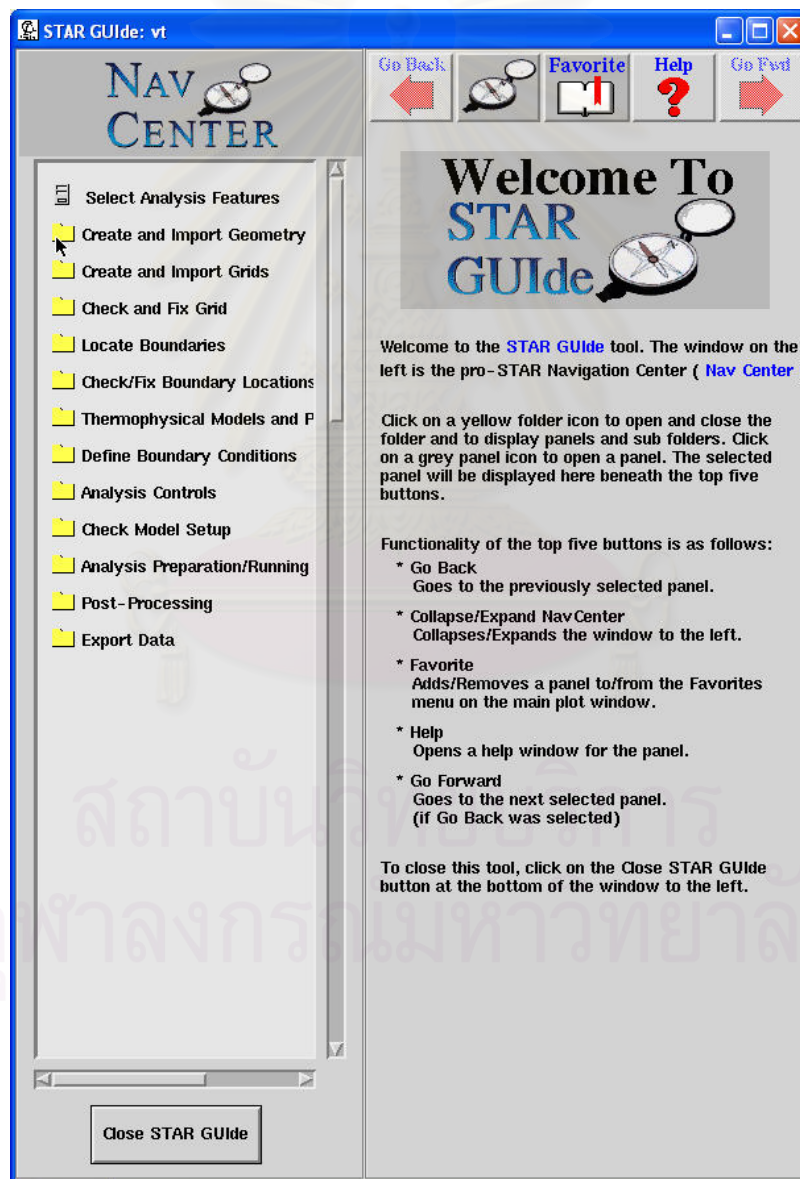
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

การใช้โปรแกรม Star-cd

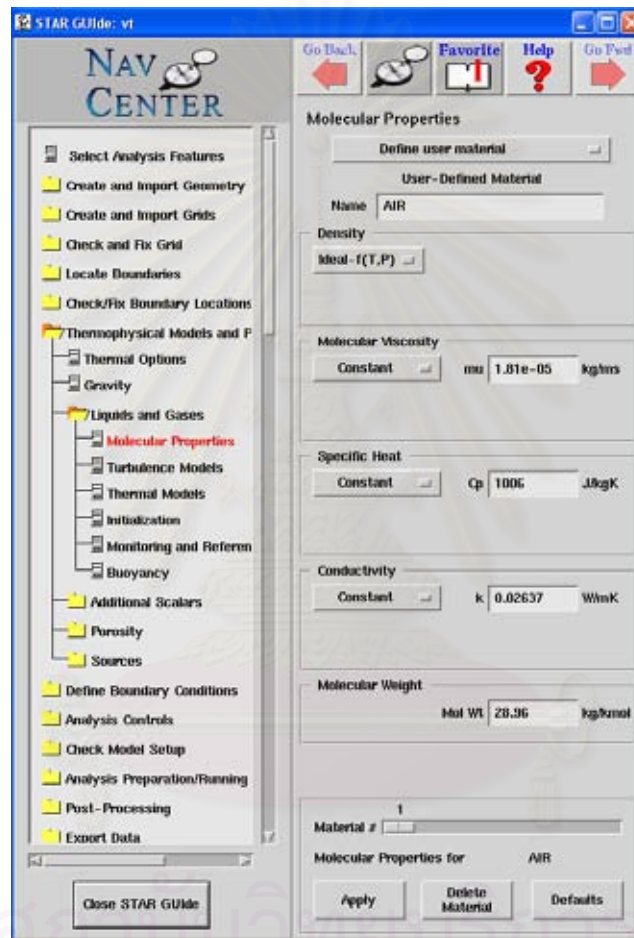
โปรแกรม Star-cd มีส่วนประกอบ 3 ซึ่งได้แก่ ส่วนที่ 1 Star guide ใช้สำหรับสั่งคำสั่งและกำหนดค่าต่างๆ โดยแสดงไว้ในรูปที่ ผ.1 ส่วนที่ 2 Prostar ใช้สำหรับแสดงผลโดยแสดงไว้ในรูปที่ ผ.2 และส่วนที่ 3 Prostar output ในส่วนนี้สามารถสั่งคำสั่งได้เช่นเดียวกับส่วนของ Star guide โดยการพิมพ์ Code



รูปที่ ผ.1 หน้าต่าง Star guide

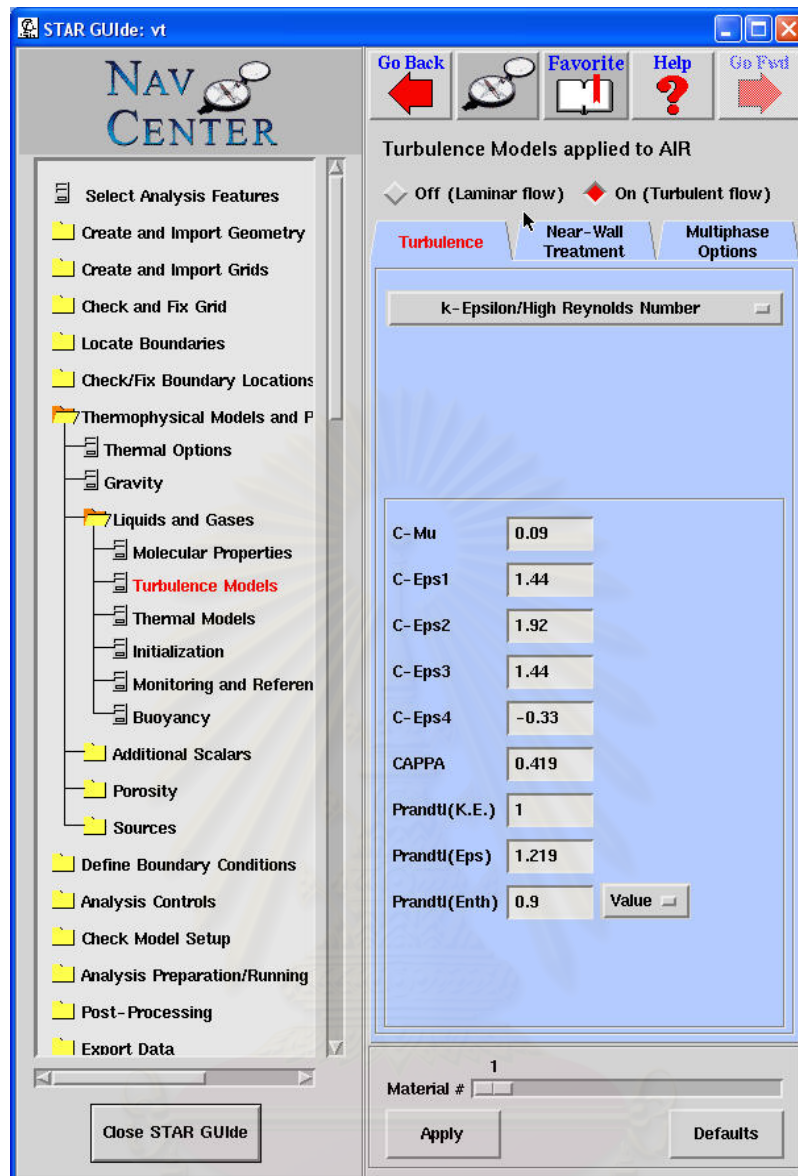
การกำหนดคุณสมบัติของของไหล

ในการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อออร์เทกซ์ จะเริ่มจากการกำหนดคุณสมบัติของอากาศ โดยไปที่หน้าต่าง Star guide Thermophysical models and Properties > Liquids and gases > Molecular properties กำหนดคุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการคำนวณตามที่แสดงไว้ในรูปที่ ผ.4



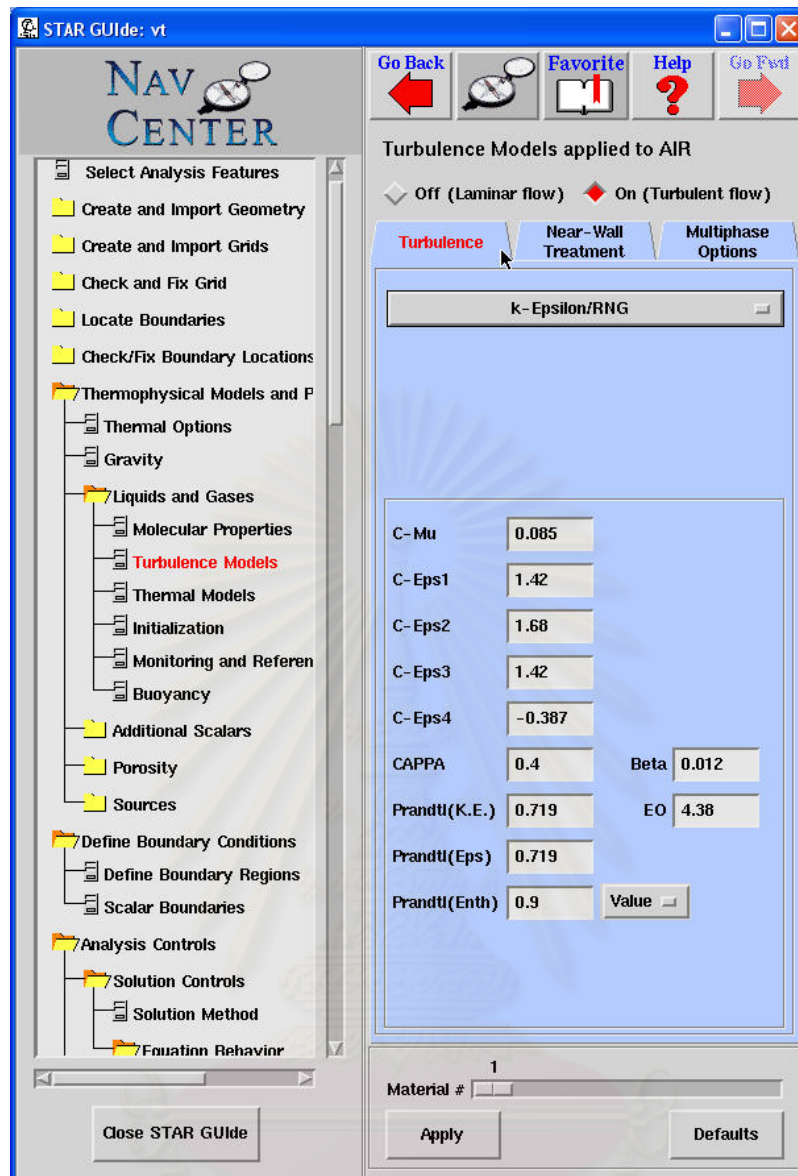
รูปที่ ผ.4 คุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการคำนวณ

ในส่วนต่อมาเป็น การเลือกแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ซึ่งได้แก่ Standard $k - \epsilon$ และ RNG $k - \epsilon$ ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ ผ.5 และ ผ.6 ตามลำดับ



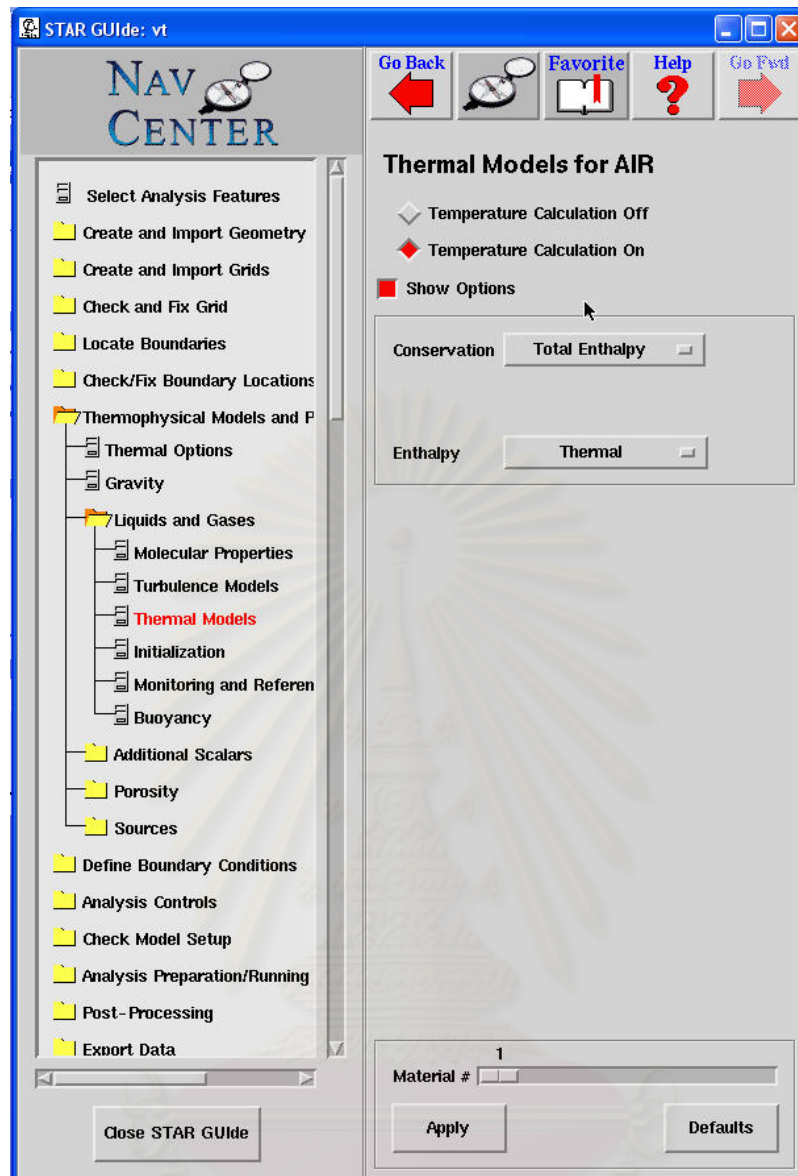
รูปที่ ๗.5 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๗.6 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$

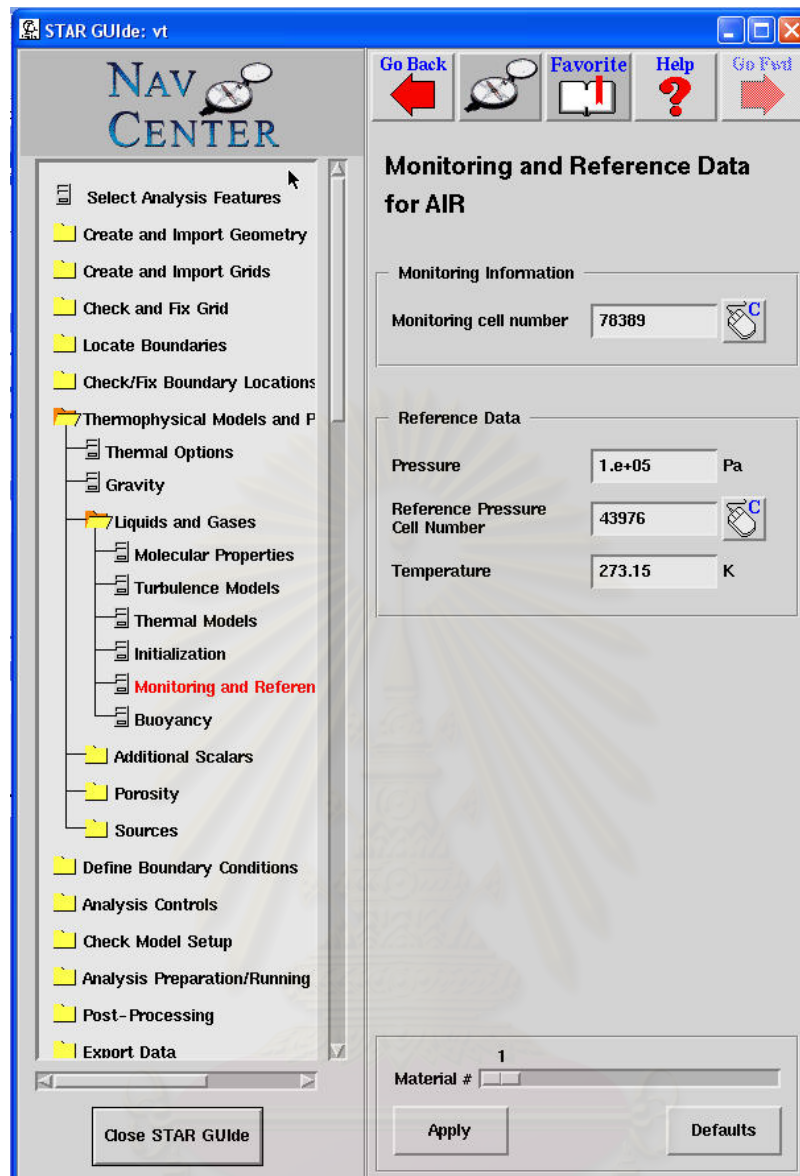
การกำหนดส่วนของการคำนวณอุณหภูมินั้น กำหนดโดยเลือกที่ Thermal Models > On > Total enthalpy ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ ๗.7



รูปที่ ผ.7 ส่วนที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิ

ต่อไปเป็นการกำหนด Monitoring and reference data โดยกำหนดค่าตามที่แสดงไว้ในรูปที่

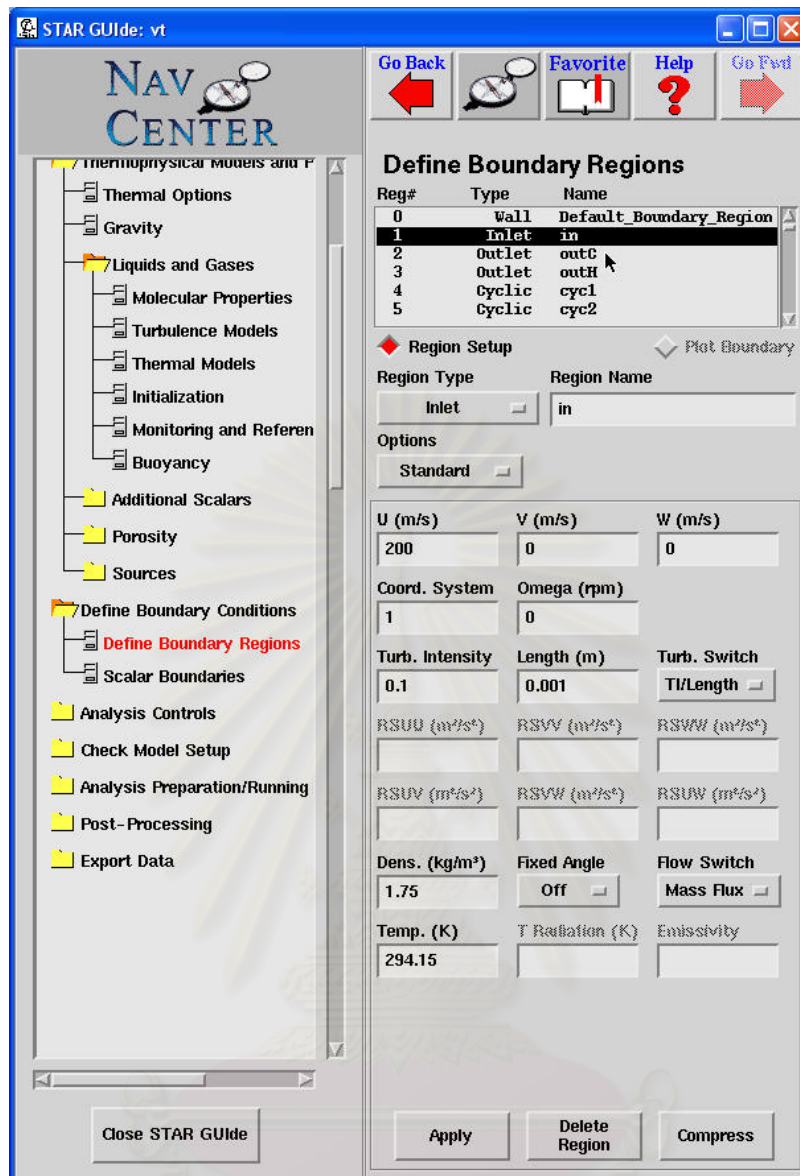
ผ.8



รูปที่ ๘.8 Monitoring and reference data

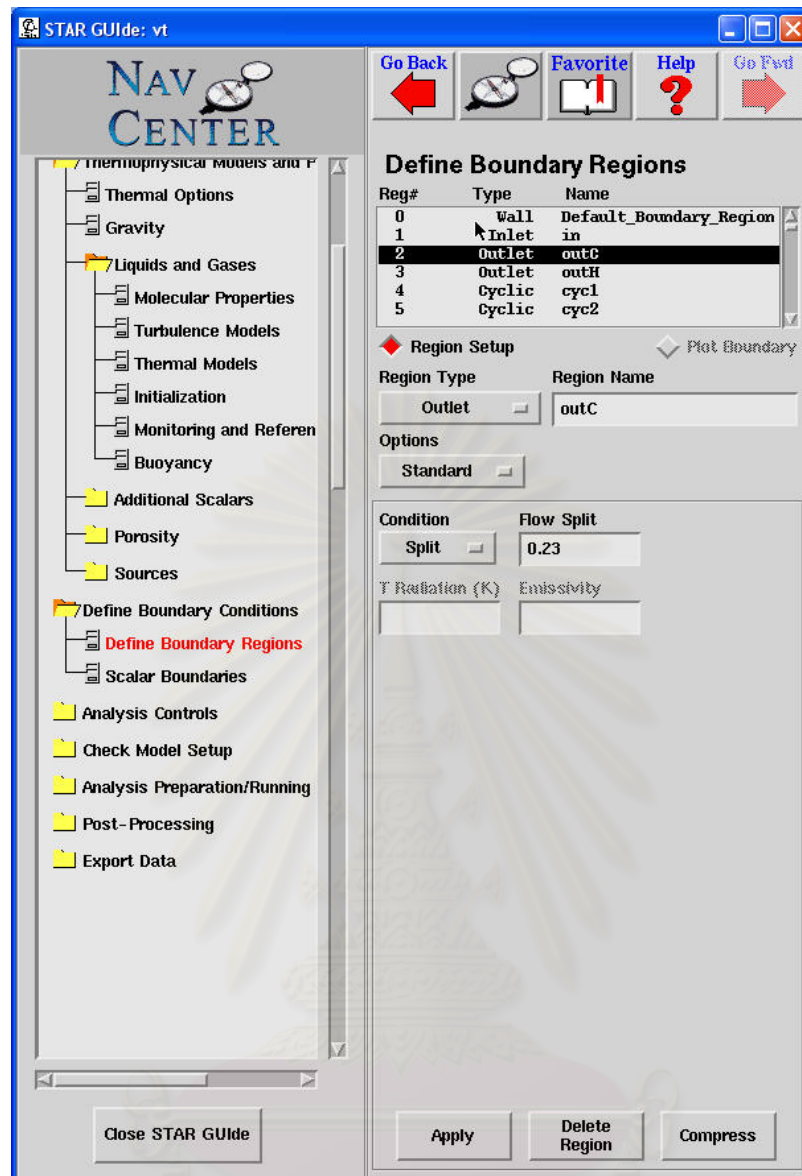
การกำหนดเงื่อนไขขอบ

ในกรณีจำลองการไหลในท่อออร์เทกซ์นั้นการกำหนดค่าของเงื่อนไขขอบ สามารถกำหนดได้ที่ Define boundary conditions > Define boundary regions โดยในกรณีที่ออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกันนั้น ได้แสดงการกำหนดค่าของเงื่อนไขขอบที่ทางเข้า ทางออกของอากาศเย็น ทางออกของอากาศร้อน ไว้ในรูปที่ ๘.9 , ๘.10 และ ๘.11 ตามลำดับ



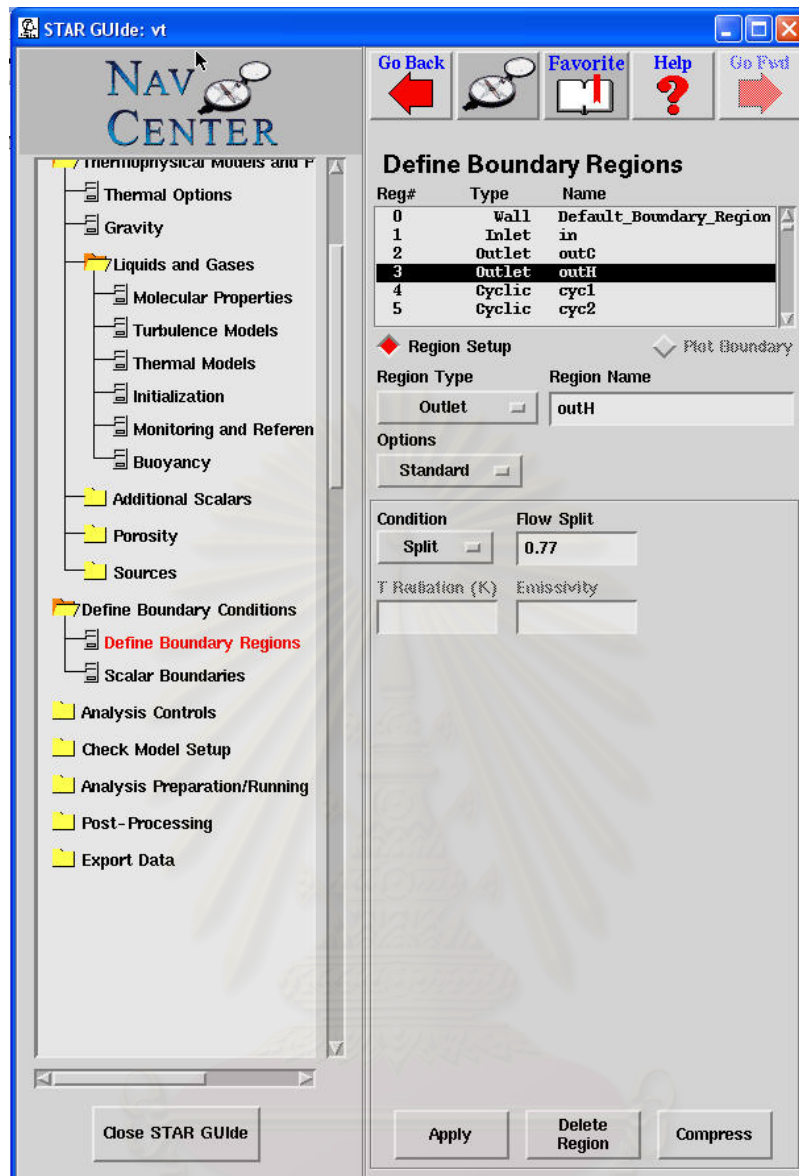
รูปที่ ๘.๙ เงื่อนไขขอบที่ทางเข้าของท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



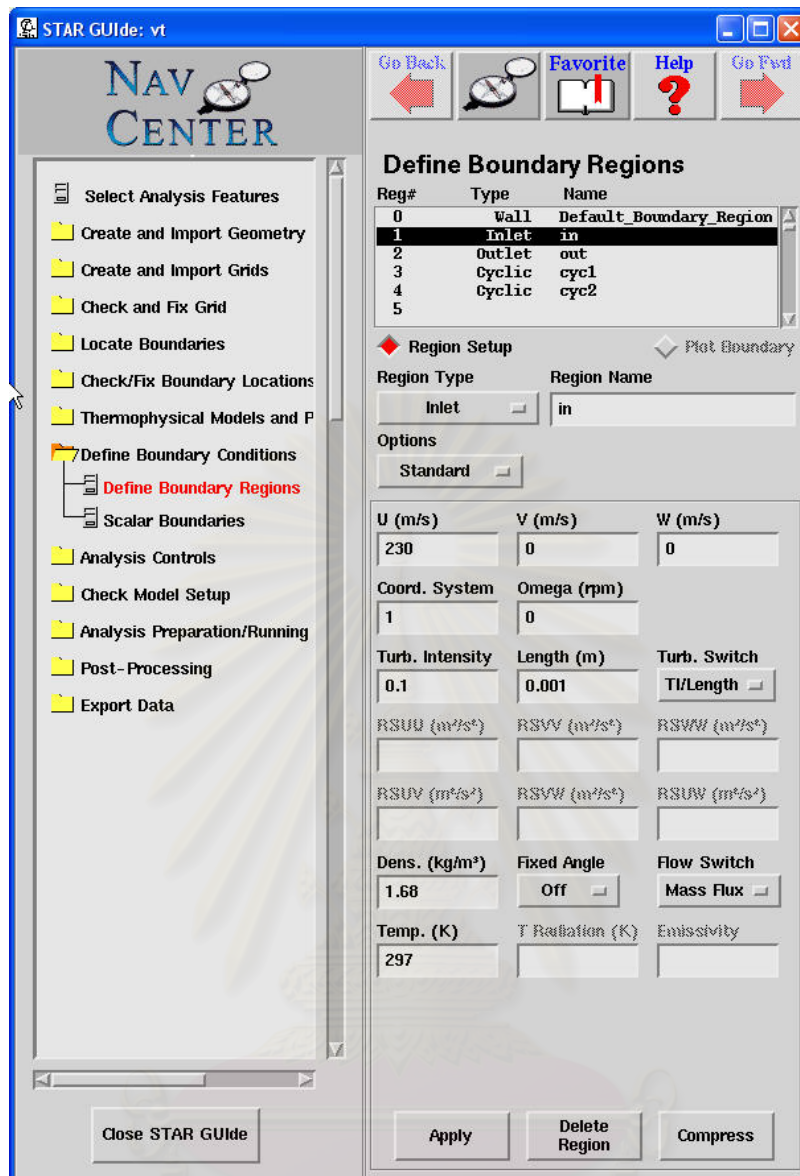
รูปที่ ผ.10 เงื่อนไขขอบที่ทางออกของอากาศเย็นของท่อออร์เทกซ์แบบไหลสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



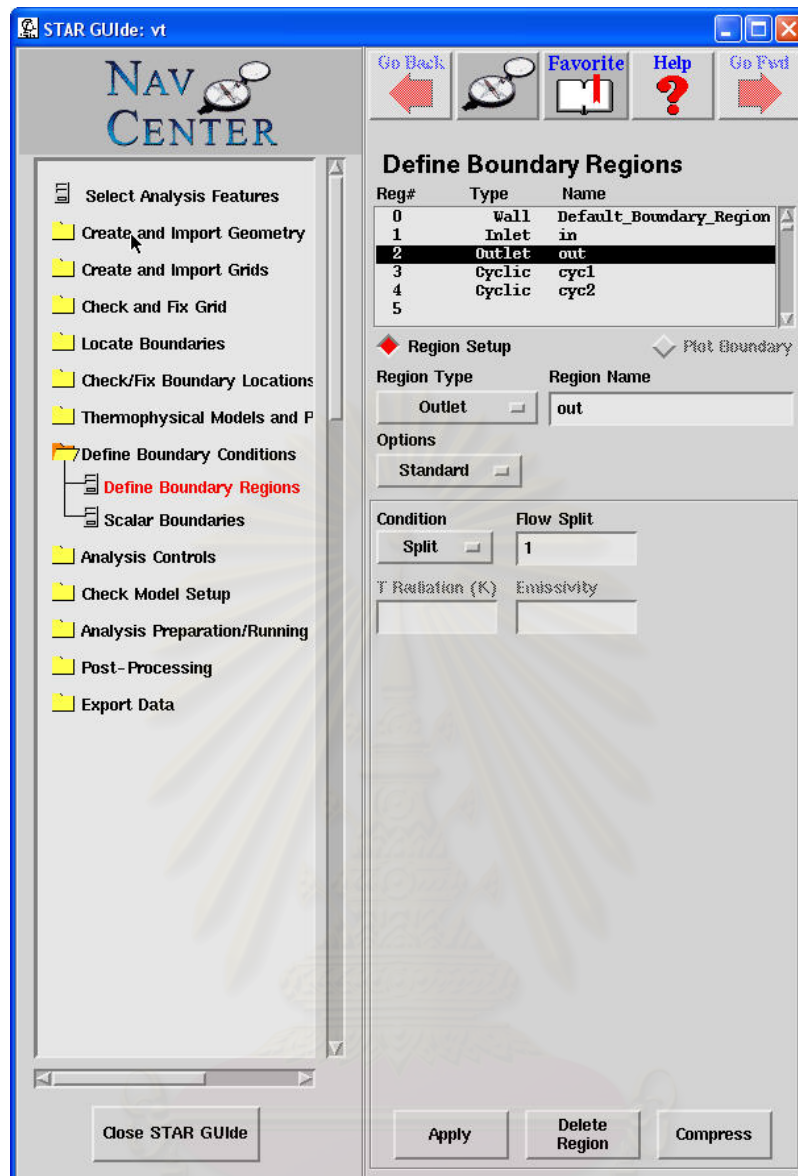
รูปที่ ผ.11 เงื่อนไขขอบที่ทางออกของอากาศร้อนของทอว์ร์เท็กซ์แบบไหลสวนทางกัน

โดยในกรณีทอว์ร์เท็กซ์แบบไหลตามกันนั้น ได้แสดงการกำหนดค่าของเงื่อนไขขอบที่ทางเข้า ทางออกของอากาศร้อน ไว้ในรูปที่ ผ.12 และ ผ.13 ตามลำดับ



รูปที่ ผ.12 เงื่อนไขขอบที่ทางเข้าของท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน

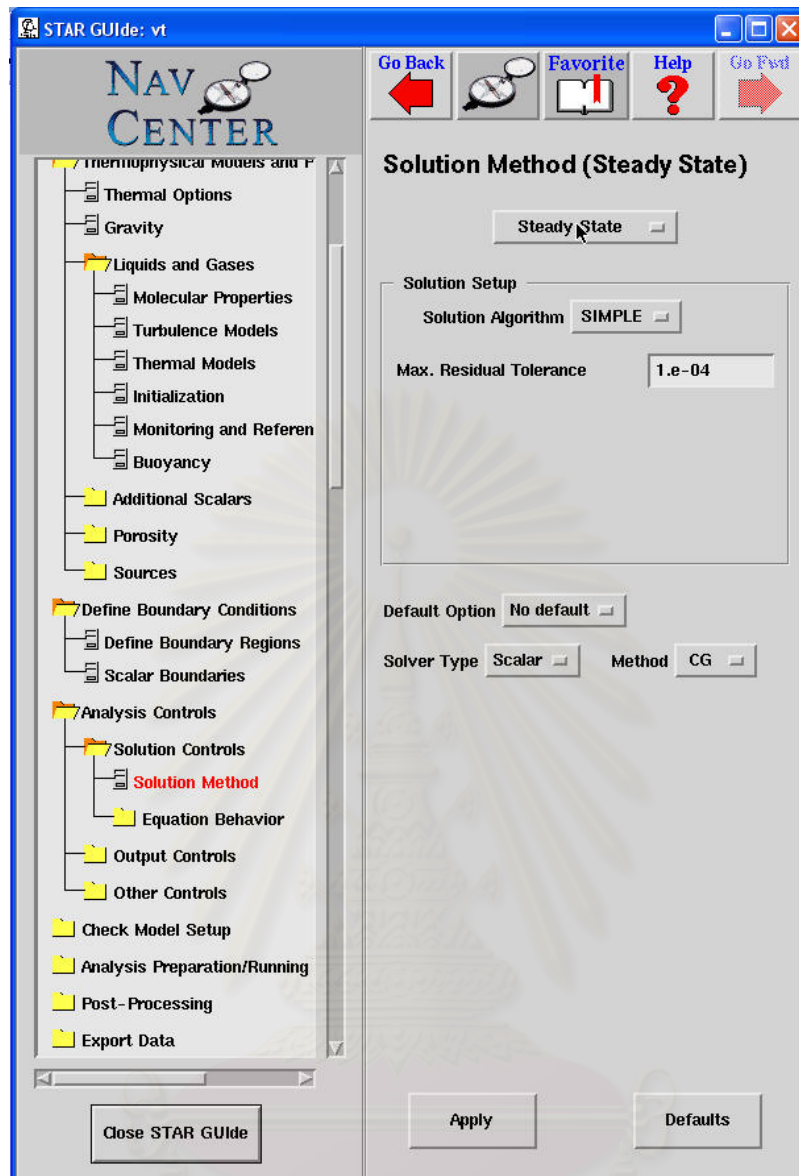
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ผ.13 เงื่อนไขขอบที่ทางออกของอากาศร้อนของท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน

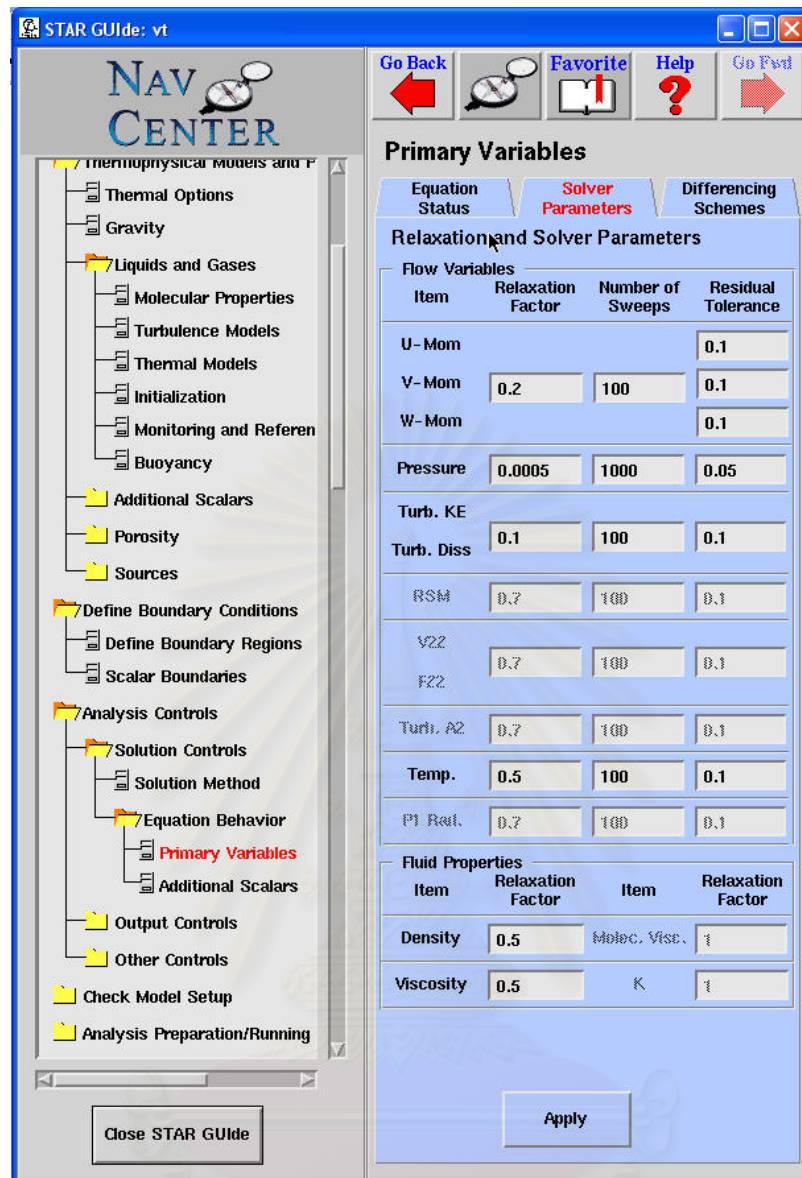
การกำหนดค่าในการประมวลผล

ในส่วนนี้จะเป็นการกำหนดค่าต่างที่ใช้ในการประมวลผล เช่น การกำหนดรอบการคำนวณ การกำหนดค่า Residual โดยแสดงไว้ในรูปที่ ผ.14 ถึง ผ.18



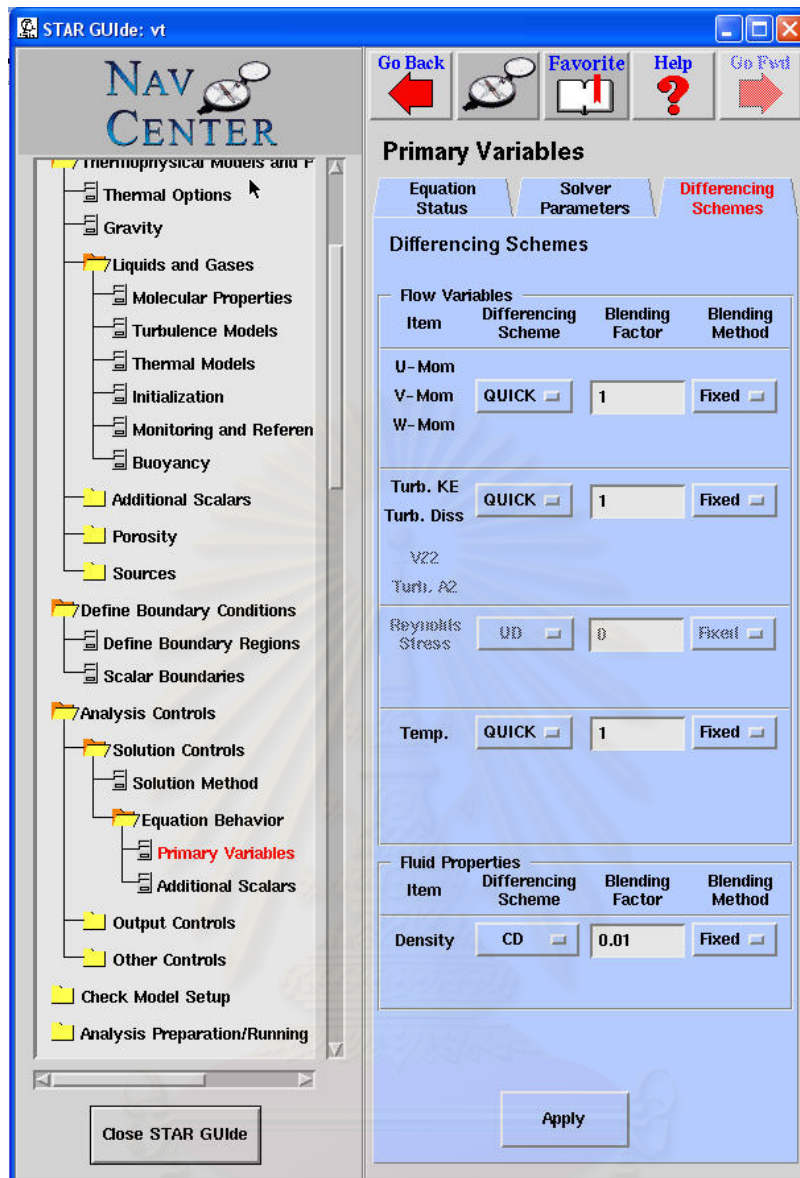
รูปที่ ๗.14 Solution method

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



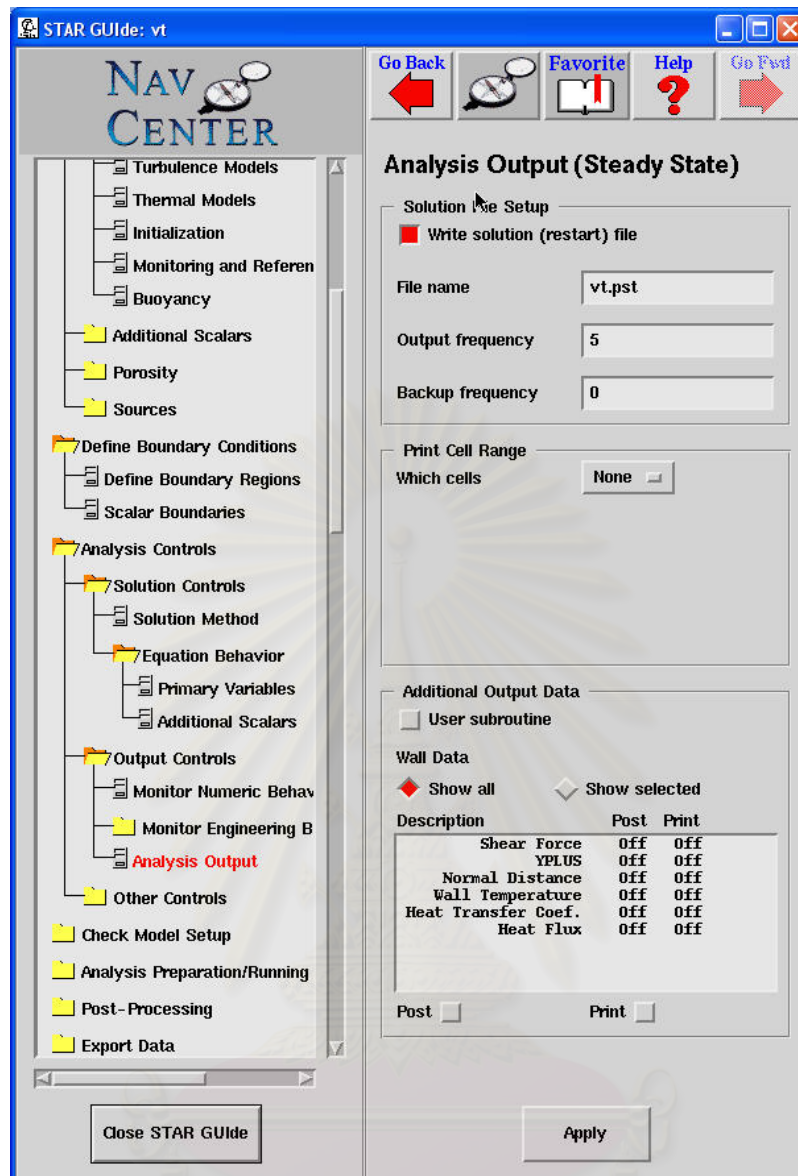
รูปที่ ๑๕.15 Solver parameters

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



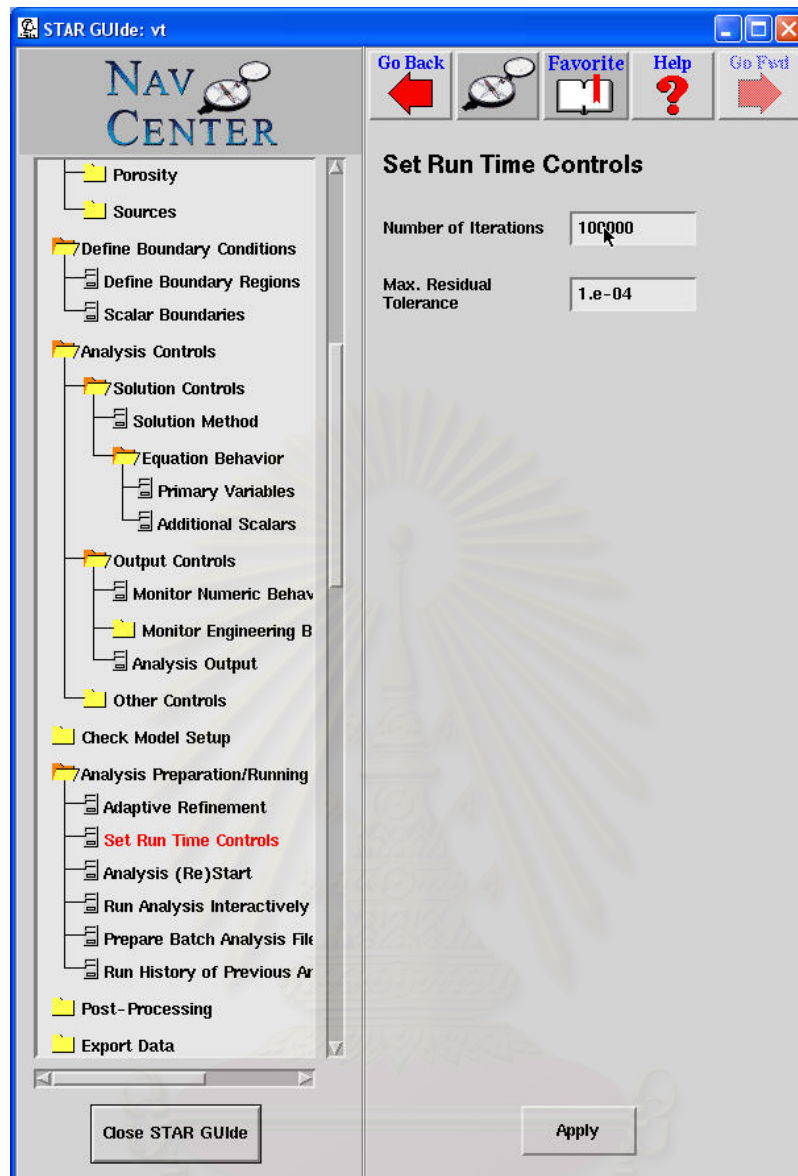
รูปที่ ๗.16 Differencing schemes

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



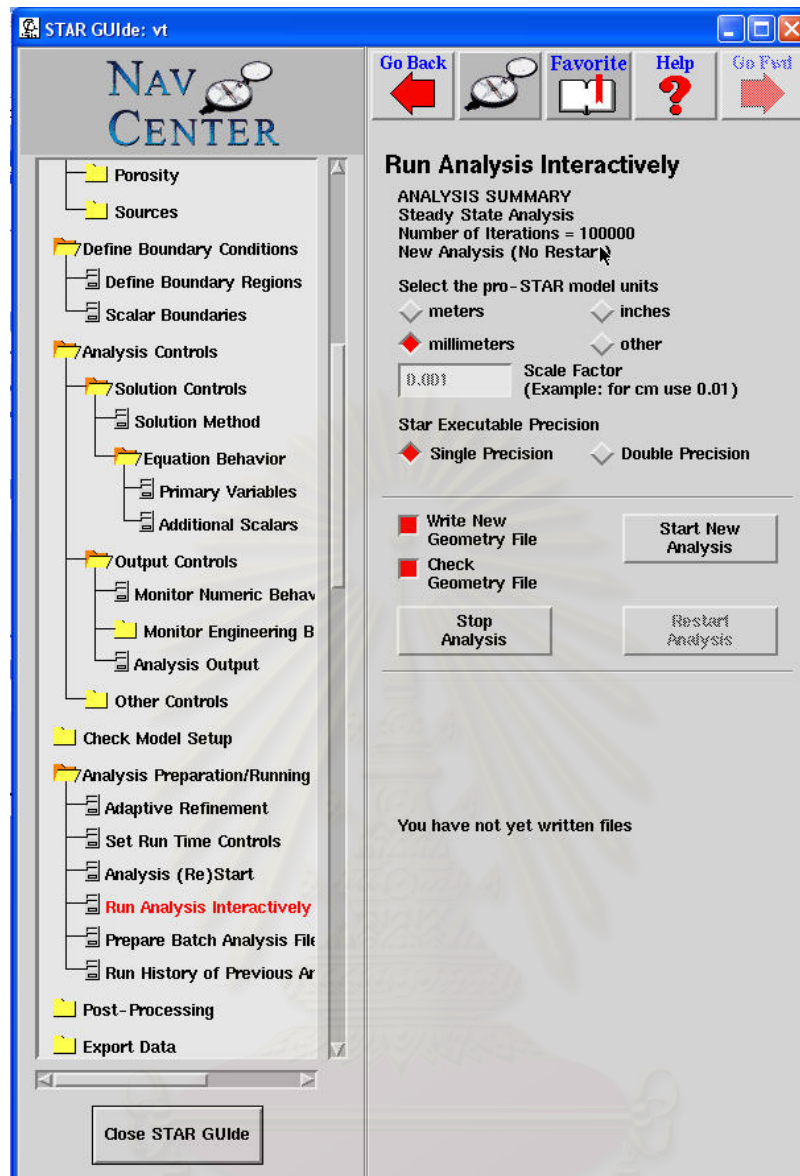
รูปที่ พ.17 Analysis output

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ผ.18 Set run time controls

ในรูปที่ ผ.19 จะเป็นการสั่งประมวลผลโดยไปที่ Analysis preparation/running > Run analysis interactively > Start new analysis



รูปที่ ๑๙.19 Run analysis interactively

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชัยพร พันธุ์กลีกร เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พุทธศักราช 2523 จังหวัด สุโขทัย สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อปีการศึกษา 2545 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย