

พฤติกรรมการไหลหมุนควงของอากาศในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดผงแบบมี
การหมุนเวียนแก๊สไอเสีย

SWIRL FLOW BEHAVIOR IN PULVERIZED FUEL BURNER WITH
FLUE GAS RECIRCULATION

พงศธร ปู่ย่า

PONGSATHON POOYA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL 2014-EN-M-030-054

SWIRL FLOW BEHAVIOR IN PULVERIZED FUEL BURNER WITH
FLUE GAS RECIRCULATION

PONGSATHON POOYA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

KMITL 2014-EN-M-030-054

COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ พหุติกรรมการไหลหมุนควงของอากาศในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดผงแบบมีการหมุนเวียน
แก๊สไอเสีย

Thesis Title Swirl Flow Behavior in Pulverized Fuel Burner with Flue Gas Recirculation

นักศึกษา นายพงศธร ปู่ย่า

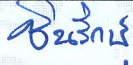



รหัสประจำตัว 52610511

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-030-054

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชินรัชช์	เอียรพงษ์	
ดร.บำรุง	พ่วงเกิด	
รศ.ดร.สมิทธิ์	เอี่ยมสอาด	
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 7 มีนาคม พ.ศ. 2557 เวลา 15.00-17.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ห้อง E12-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุช์ชีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 7 มีนาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมการไหลหมุนควงของอากาศในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิด ผงแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย
ชื่อนักศึกษา	นายพงศธร ปู่ย่า
รหัสประจำตัว	52610511
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการทดสอบหาเลขเวิร์ล (Swirl Number) และการจำลองเชิงตัวเลขพฤติกรรมการหมุนควงของกระแสอากาศในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดผงแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสียที่ได้จากเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบผง (Pulverized Fuel Swirl Burner With Flue Gas Recirculation) ขนาด 100 kW ซึ่งประยุกต์ใช้เทอร์โบแปรผันยี่ห้อฮิตซูบิชิ รุ่น 3C04 รูปทรงหอยโข่ง โดยทำการติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางหัวเผา ซึ่งอากาศที่ใช้ในการสร้างกระแสหมุนควงคืออากาศส่วนที่ 2 ที่ถูกจ่ายเข้าสู่บริเวณทางเข้าของเทอร์โบในแนวรัศมีและถูกปรับมุมของการไหลด้วยใบพัดแปรผัน ไทลออกเป็นลักษณะหมุนควงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และอากาศส่วนที่ 1 จะถูกจ่ายเข้าสู่หัวเผาในแนวแกนที่บริเวณด้านบนของหัวเผาผ่านเจ็ตปัดด้วยความเร็วสูง ในขณะที่การทดสอบนั้นได้ทำการปรับเปลี่ยนมุมใบพัดของเทอร์โบเทียบกับแนวรัศมีที่มีขนาดมุม 60° , 65° , 70° และ 80° และปรับเปลี่ยนสัดส่วนของอากาศส่วนที่ 1 และอากาศส่วนที่ 2 เท่ากับ 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 20 : 80 โดยพบว่ากรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% ค่าเลขสเวิร์ลอยู่ในช่วง 0.123-0.294, 0.152-0.326, 0.194-0.346 และ 0.204-0.394 ตามลำดับ ในขณะที่กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% ค่าเลขสเวิร์ลอยู่ในช่วง 0.153 -0.325, 0.195-0.351, 0.215-0.400 และ 0.240-0.421 ตามลำดับ และเมื่อนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในรูปแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และแบบ RNG $k-\epsilon$ พบว่าแบบ RNG $k-\epsilon$ มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า แต่เมื่อทำการเพิ่มเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินและเพิ่มปริมาณสัดส่วนอากาศของอากาศส่วนที่สอง แสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดของเลขสเวิร์ลมากขึ้น แต่ในนี้การทดสอบหาเลขสเวิร์ลยังมีข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการทดลอง ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาปรับปรุงอุปกรณ์ทดสอบเพื่อให้ข้อมูลที่เชื่อถือได้สำหรับทดสอบหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดผงแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสียในอนาคต

Thesis Title	Swirl Flow Behavior in Pulverized Fuel Burner with Flue Gas Recirculation
Student	Mr. Pongsathon Pooya
Student ID.	52610511
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jarruwat Charoensuk

Abstract

This thesis presents the testing method together with numerical simulation for quantifying the swirl number and to verify the swirl flow generated from swirler in pulverized fuel swirl burner with flue gas recirculation. For the real plant, a variable guide vane turbocharger of Mitsubishi 3C04 series with centrifugal geometry was installed at the center of burner. Air utilized for swirl flow was the secondary air fed into the turbo in radial path. The flow angle could be adjusted by variable vanes making swirl pattern of air flow. The primary air was fed at the top of burner by high velocity jet pump in axial direction. In each experiment the angle of turbo vane referring to radial axis was adjusted for 60° , 65° , 70° and 80° . Meanwhile the primary and secondary air ratio was also varied coupling with the angle as 50:50, 40:60, 30:70 and 20:80, respectively. It was found that in case of 10% excess air, the swirl numbers were discovered in the range of 0.123-0.294, 0.152-0.326, 0.194-0.346 and 0.204-0.351 respectively. And for 20% excess air, they were corrected as 0.153-0.325, 0.195-0.351, 0.215-0.400 and 0.240-0.421 respectively. Then, the empirical parameters were validated with the simulation comparing between Standard $k-\varepsilon$ and RNG $k-\varepsilon$ turbulence model. From validation, it was demonstrated that the results with RNG $k-\varepsilon$ model were close to the Exp. data than with Standard $k-\varepsilon$ model. However, when an excess air and a secondary air were increased, the simulation fails to correspond with the Experimental data. To obtain the reliable data for validation at high flow rate improving measuring equipment and measurement method in the should be a significant realization in this work.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานที่ผู้วิจัยตั้งใจและทุ่มเทอย่างเต็มที่ และได้คำแนะนำ ความกรุณา ความช่วยเหลือและให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีจาก รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ อาวุธ ฤทธิธนากุล และ อาจารย์ นิตินัย ปัญญาบุศยกุล ที่คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำที่ดี รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ก่อนเป็นกำลังใจทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบุพการี นาย พรหมมินทร์ ปู่ย่า, นาง พัชรินทร์ ปู่ย่า (บิดา มารดา) ยี่ง ที่เฝ้าเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และให้ทุนทรัพย์ในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตั้งแต่เริ่มต้นจนประสบความสำเร็จ รวมทั้งเป็นกำลังใจในการฟันฝ่าปัญหาและอุปสรรคต่างๆ เสมอมา และขอขอบคุณครู อาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดจนผู้ที่ให้การสนับสนุนทุกท่านที่มีได้เอื้อนามมา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยขอตลบรตราลให้คุณพระศรีรัตนตรัยอำนวยการพรปกปักรักษาความสุขสวัสดิ์จึงมีแต่ทุกท่านด้วยเทอญ

พงศธร ปู่ย่า

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีการวิจัย.....	3
1.5 สมมุติฐานการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	10
3.1 บทนำ.....	10
3.2 ทฤษฎีพื้นฐานทาง CFD.....	10
3.2.1 กฎการอนุรักษ์ในการเคลื่อนที่ของของไหล.....	10
3.2.2 สมการควบคุมการไหล.....	10
3.2.3 กฎอนุรักษ์มวลในปัญหา 3 มิติ.....	11
3.2.4 สมการโมเมนตัมแบบ 3 มิติ.....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.5 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ.....	14
3.2.6 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม.....	14
3.3 แบบจำลอง $k - \epsilon$	16
3.3.1 แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$	16
3.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$	18
3.4 การหาเลขสเวิร์ล (Swirl Number).....	19
บทที่ 4 อุปกรณ์ วิธีการทดลองและการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (CFD).....	21
4.1 บทนำ	21
4.2 อุปกรณ์การทดลอง.....	21
4.2.1 อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของหัวเผาแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย.....	21
4.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบเลขสเวิร์ล (Swirl Number)	22
4.2.1.2 หัวเผาแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย.....	23
4.2.1.3 เทอร์โบแปรผัน	24
4.2.1.4 บอลวาล์ว	24
4.2.1.5 พัดลมต้นกำลัง (Blower).....	25
4.2.1.6 แผงรังผึ้ง (Honeycomb).....	25
4.2.1.8 เครื่องชั่งดิจิตอลสำหรับวัดแนวสัมผัส.....	26
4.2.1.9 เครื่องชั่งดิจิตอลสำหรับวัดแนวแกน.....	26
4.2.1.10 Pitot tube.....	26
4.2.1.11 Manometer, Inclined.....	27
4.3 วิธีการทดลอง.....	30
4.4 การจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	30
บทที่ 5 ผลการทดลอง ผลการจำลองและการอภิปราย.....	36
5.1 บทนำ.....	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 การศึกษาอิทธิพลของมุมใบพัดของชุดสร้างอากาศหมุนวนเทียบกับแนวรัศมีและสัดส่วนของ.....	
อากาศที่ส่งผลกระทบต่อเลขเสวิร์ล	36
5.2.1 อิทธิพลของมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวนเทียบกับแนวรัศมีที่ส่งผลกระทบต่อ Swirl Number โดยทำการปรับเปลี่ยนอากาศส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองเท่ากับ 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 20 : 80 ตามลำดับ กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% (Excess air 20%).....	37
5.2.2 อิทธิพลของมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวนเทียบกับแนวรัศมีที่ส่งผลกระทบต่อ Swirl Number โดยทำการปรับเปลี่ยนอากาศส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองเท่ากับ 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 20 : 80 ตามลำดับ กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% (Excess air 20%).....	38
5.3 อิทธิพลของแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ ที่มีผลต่อเวิร์ลนัมเบอร์ (Swirl Number) เปรียบเทียบกับผลการทดลอง.....	39
5.3.1 กรณีไม่มีชุดทดสอบเลขเสวิร์ลมาขวางกั้นการไหล.....	39
5.3.1.1 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% (Excess air 10%).....	39
5.3.1.2 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% (Excess air 20%).....	42
5.3.2 เปรียบเทียบสนามเว็ทเตอร์ความเร็วภายในหัวเผาของแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$	44
5.3.2.1 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% (Excess air 10%).....	44
5.3.2.2 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% (Excess air 20%).....	53
5.3.3 Rate of decay ของความเร็วในแนวแกนและความเร็วในการหมุนควง.....	62
5.3.3.1 ปริมาณสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศ 50:50.....	63
5.3.3.2 ปริมาณสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศ 20:80.....	66
5.4 พฤติกรรมของแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ เปรียบเทียบกับผล การทดลอง.....	69
5.4.1 กรณีมีชุดทดสอบเลขเสวิร์ลมาขวางกั้นการไหล.....	69
5.4.1.1 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% (Excess air 10%).....	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4.1.2 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% (Excess air 20%).....	72
5.4.2 เปรียบเทียบสนามเวกเตอร์ความเร็วภายในหัวเผาของแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$	74
5.4.2.1 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% (Excess air 10%).....	74
5.4.2.2 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% (Excess air 20%).....	83
5.5 ผลความคลาดเคลื่อนจากการทดลองกรณีใช้การจำลองแบบมีวัตถุมาขวางกั้นการไหล.....	92
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	94
6.1 สรุปผลงานวิจัย.....	94
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไปในอนาคต.....	95
เอกสารอ้างอิง	96
ภาคผนวก.....	98
ภาคผนวก ก.- ข. เปรียบเทียบสนามเวกเตอร์ความเร็วของแบบจำลองกรณีไม่มีชุดทดลอง.....	99
ภาคผนวก ค.- ง. เปรียบเทียบสนามเวกเตอร์ความเร็วของแบบจำลองกรณีไม่มีชุดทดลอง	112
ภาคผนวก จ. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	123
ประวัติผู้เขียน.....	132

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 เงื่อนไขการทดลองที่ Excess Air 10% อัตราการไหลเชิงมวล 0.034 kg/s.....	29
4.2 เงื่อนไขการทดลองที่ Excess Air 20% อัตราการไหลเชิงมวล 0.037 kg/s.....	29
4.3 การกำหนดแบบจำลอง.....	33
4.4 ตัวอย่างผลของความเร็ว u	34
4.5 เงื่อนไขที่ใช้กำหนดการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% อัตราการไหลเชิงมวล 0.034 kg/s.....	35
4.6 เงื่อนไขที่ใช้กำหนดการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% อัตราการไหลเชิงมวล 0.037 kg/s.....	35
5.1 เปรียบเทียบค่าต่างๆจากการทดลองและการจำลอง ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10%.....	92
5.2 เปรียบเทียบค่าต่างๆจากการทดลองและการจำลอง ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20%.....	93

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดง Flow pattern in Pulverized coal burner.....	1
2.1 เปรียบเทียบเงื่อนไขการจำลองต่างๆ.....	6
2.2 เปรียบเทียบการทดลองและแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$, standard $k-\epsilon$	7
2.3 ลักษณะของ Swirl jet.....	8
2.4 ลักษณะของ swirl generator.....	8
2.5 ลักษณะของ swirl Blocks	9
2.6 ลักษณะปรากฏการณ์แก๊สหมุนหมุนวน.....	9
3.1 ชิ้นส่วนของของไหลสำหรับกฎการอนุรักษ์.....	11
3.2 การไหลของมวลเข้าและออกชิ้นส่วนของไหล	11
3.3 องค์ประกอบความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทางของชิ้นส่วนของไหล.....	13
4.1 ชิ้นส่วนต่างๆของการทดสอบเลขสแวิร์ลของหัวเผาแบบมีการหมุนเวียนแก๊สเสีย	21
4.2 อุปกรณ์ทดสอบเลขสแวิร์ล.....	22
4.3 หัวเผาเชื้อเพลิงแบบมีการหมุนเวียนแก๊สเสีย	23
4.4 เทอร์โบแปรผัน.....	24
4.5 บอลวาล์ว	24
4.6 พัดลมต้นกำลัง (Blower).....	24
4.7 แผงรังผึ้ง (honeycomb), แผ่นรับแรงกดในแนวแกน	25
4.8 เครื่องชั่งดิจิตอลสำหรับวัดโมเมนตัมในแนวสัมผัสเชิงมุม.....	25
4.9 เครื่องชั่งดิจิตอลสำหรับวัดโมเมนตัมในแนวแกน.....	25
4.10 Pitot tube	26
4.11 Manometer.....	26
4.12 inclined	26
4.13 ตำแหน่งการติดตั้งชุดทดสอบเลขสแวิร์ลทางออกดีฟิวเซอร์.....	28
4.14 ลักษณะมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวน	28
4.15 ลักษณะของการป้อนอากาศส่วนที่ 1 และอากาศส่วนที่ 2.....	29
4.16 ลักษณะของ mash 30,000 บริเวณหัวเผา.....	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ลักษณะของ mash 200,000 บริเวณหัวเผา.....	31
4.18 ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน (Axial velocity) บริเวณทางออกของหัวเผา.....	31
4.19 ความเร็วเฉลี่ยของการหมุนควง (Swirl velocity) บริเวณทางออกของหัวเผา	31
4.20 ลักษณะเวกเตอร์ความเร็ว.....	32
4.21 การจำลองแบบไม่มีชุดทดลองมาขวางกั้นการไหล	33
4.22 การกำหนดแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์	33
5.1 ตำแหน่งการติดตั้งชุดทดสอบเลขสเวิร์ล (Swirl Number) ที่ปลายทางออกของดีฟิวเซอร์	36
5.2 ความสัมพันธ์ของเลขสเวิร์ลและมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวน Excess air 10%	37
5.3 ความสัมพันธ์ของเลขสเวิร์ลและมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวน Excess air 20%	38
5.4 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 50 : 50 (EA10%)	39
5.5 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 40 : 60 (EA10%)	40
5.6 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 30 : 70 (EA10%)	40
5.7 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 20 : 80 (EA10%)	41
5.8 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 50 : 50 (EA20%)	42
5.9 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 40 : 60 (EA20%)	42
5.10 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 30 : 70 (EA20%)	43
5.11 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 20 : 70 (EA20%)	43
5.12 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	45
5.13 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	46
5.14 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	47
5.15 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	48
5.16 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	49
5.17 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	50
5.18 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	51
5.19 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	52
5.20 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.21 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	55
5.22 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	56
5.23 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	57
5.24 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	58
5.25 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	59
5.26 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	60
5.27 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	61
5.28 ลักษณะการไหลย้อนกลับของกระแสความเร็ว.....	62
5.29 รูปที่ 5.29 ระบายทั้ง 5 ตำแหน่งที่ใช้สำหรับเก็บผล ณ บริเวณใกล้หัวเผา.....	63
5.30 ผลการจำลองการลดลงของความเร็วในแนวแกน (Axial Velocity 50:50	64
5.31 ผลการจำลองความเร็วในการหมุนควง (Swirl Velocity) 50:50	65
5.32 ผลการจำลองการลดลงของความเร็วในแนวแกน (Axial Velocity) 20:80	67
5.33 ผลการจำลองความเร็วในการหมุนควง (Swirl Velocity) 20:80	68
5.34 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 50 : 50 (EA10%).....	69
5.35 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 40 : 60 (EA10%).....	70
5.36 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 30 : 70 (EA10%).....	70
5.37 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 20 : 80 (EA10%).....	71
5.38 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 50 : 50 (EA20%).....	72
5.39 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 40 : 60 (EA20%).....	72
5.40 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 30 : 70 (EA20%).....	73
5.41 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 20 : 70 (EA20%).....	73
5.42 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	75
5.43 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	76
5.44 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	77
5.45 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	78
5.46 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.47 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	80
5.48 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	81
5.49 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	82
5.50 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	83
5.51 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	84
5.52 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	85
5.53 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	86
5.54 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	87
5.55 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	88
5.56 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 50:50.....	89
5.57 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 20:80.....	90
5.58 เวกเตอร์ความเร็ว (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$	91
6.1 สมมุติฐานที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนมุม.....	94
6.2 Guide vane.....	95

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A	พื้นที่
C_μ	ค่าคงที่ของ $k - \varepsilon$ Turbulent model
d	เส้นผ่านศูนย์กลาง
F	แรง, N
G_b	การกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว
G_k	การกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ความเร็วเฉลี่ย
G_n	ค่าของฟลักซ์โมเมนตัมตามแนวแกนเจ็ท
G_θ	ค่าของฟลักซ์โมเมนตัมตามแนวสัมผัส
k	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
m	มวล, kg
N_u	Nusselt number
Re	Reynolds number
R_ε	เป็นพจน์ที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลที่มีความเครียดเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน
r	พิกัดตามแนวรัศมี
S_{Mx}	การถ่ายโอนโมเมนตัมที่เกิดในปริมาตรควบคุมโดยของไหลทิศทางตามแนวแกน
S_{My}	การถ่ายโอนโมเมนตัมที่เกิดในปริมาตรควบคุมโดยของไหลทิศทางตามแนวรัศมี
S_{Mz}	การถ่ายโอนโมเมนตัมที่เกิดขึ้นในปริมาตรควบคุมโดยของไหลในทิศทางสัมผัสกับเส้นรอบวงกลม
S_w	เลขสเวิร์ล
t	เวลา
u	ความเร็วตามแนวแกน
U_n	ความเร็วในแนวแกนของเจ็ท
U_θ	ความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ท
v	ความเร็วตามแนวรัศมี
w	ความเร็วตามแนวเส้นรอบวงกลม

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

Y_M	แสดงถึงการสนับสนุนของการขยายตัวที่เปลี่ยนแปลงในความปั่นป่วนอัดตัวได้ต่ออัตรา การกระจายทั้งหมด
z	พิกัดตามแนวแกน
α	สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของอนุภาคกับความเร็วสัมพัทธ์
ε	อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน
Φ	ฟังก์ชันเฟส
κ	ค่าคงที่ของ Von Karman
μ	สัมประสิทธิ์ของความหนืด
μ_{eff}	Effective viscosity
μ_l	Laminar viscosity
μ_t	Turbulent viscosity
ρ	ความหนาแน่น
τ_e	ขนาดของเวลาของความปั่นป่วน
τ_w	ความเค้นเฉือนที่ผนัง
\sum	ผลของการบวก

อักษรตัวห้อย

e	Equilibrium
eff	Effective value
i, j, k	Space coordinate
l	Laminar
tot	Total
$turb, t$	Turbulent
vol	Volumetric
v	Coriolis force
$wall$	Wall
ref	Reference

อักษรย่อ

CFD	Computational Fluid Dynamics
ERZ	External Recirculation Zone
IRZ	Internal Recirculation Zone
RNG	Renormalization Group

บทที่ 1

บทนำ

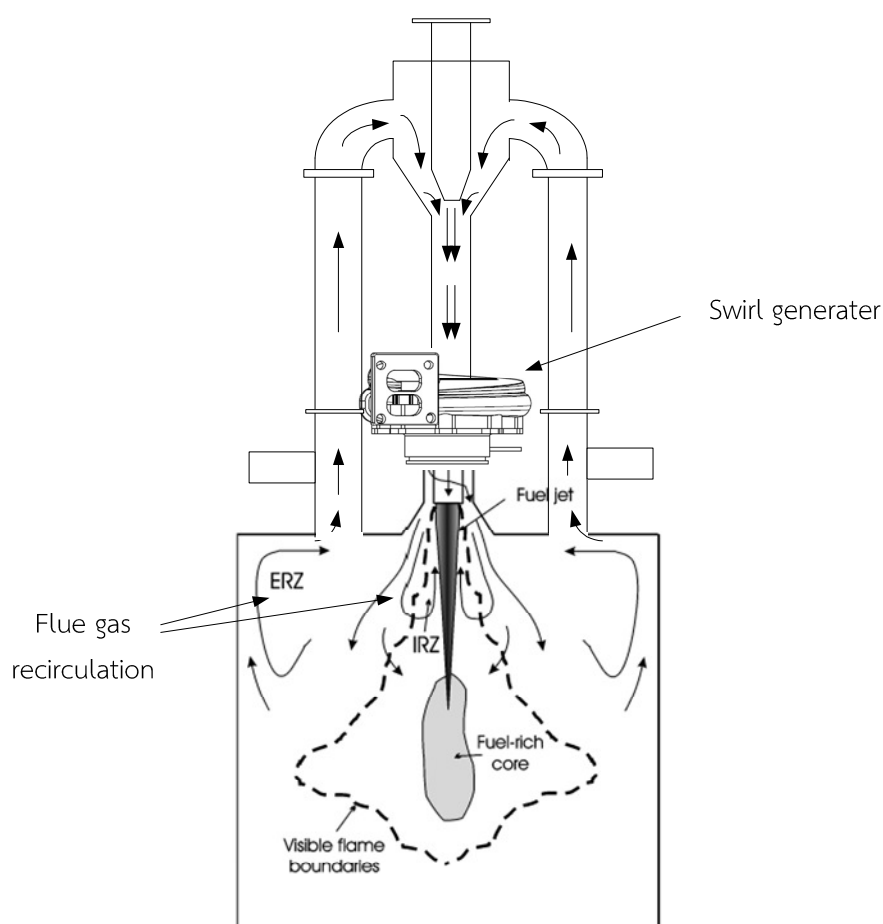
บทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของพลังงาน วัสดุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย สมมุติฐานของการศึกษา ขั้นตอนของการศึกษาการเทียบเคียงระหว่างการทำจำลองและการทดลอง และประโยชน์ของงานวิจัยของวิทยานิพนธ์

1.1 ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของ ประชากรและเป็นปัจจัยพื้นฐานการผลิตในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงต้องมีการจัดหา พลังงานให้มีปริมาณที่เพียงพอสอดคล้องกับความต้องการของประชากร ขณะที่ประเทศไทยเป็น ประเทศแห่งเกษตรกรรมจึงมีชีวมวลบางส่วนที่เหลือจากการเกษตร ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นพลังงาน ทดแทนในภาคอุตสาหกรรม รวมถึงการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า จึงได้มีการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาปรับ ใช้กับเทคโนโลยีสมัยใหม่ ซึ่งการเผาไหม้เป็นวิธีที่ใช้กันมากในการนำเชื้อเพลิงแข็งมาใช้ให้เกิด ประโยชน์ โดยในที่นี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงผงซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้ใน โรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ แต่เทคโนโลยีนี้ยังคงต้องการพัฒนาในระบบขนาดเล็กเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ ระบบ โดยหนึ่งในวิธีการพัฒนาคือ การหมุนเวียนแก๊สไอเสียกลับมาใช้ใหม่ที่มีลักษณะการหมุนควง (Swirl flow) โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในส่วนเฉพาะลักษณะการหมุนควงของหัวเผาและได้มีการติดตั้ง เครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน (Swirl Generator) ที่มีลักษณะของการหมุนควง สำหรับสร้างความ บั่นป่วนและยืดระยะเวลาการเผาไหม้ ทำให้ลักษณะของเปลวไฟเป็นรูปดอกบัวและเกิดการหมุนเวียน ก๊าซไอเสียทั้งแบบหมุนวนภายใน (Internal Recirculation Zone) และหมุนวนภายนอก (External Recirculation zone) ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของหัวเผาดีขึ้น ดังแสดงในรูป 1.1 ใน ขณะเดียวกันการศึกษาลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ภายในห้องเผาไหม้โดยเฉพาะการไหลแบบหมุน ควงมีความจำเป็นที่จะนำไปใช้ในการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้ซึ่งนักวิจัย หลายๆท่าน อาทิเช่น H. J. Sheen, W.J. Chen, S. Y. Jeng และ T. L. Huang ได้ศึกษาผลกระทบ ในการปรับเปลี่ยนมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวน (swirl generator) โดยแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งมุม 30-50 องศาแสดงให้เห็นถึงการเกิด reverse flow ภายในห้องเผาไหม้ และ W. Steenbergen และ J. Voskamp ได้ศึกษาการไหลแบบหมุนวนภายในท่อที่มีลักษณะตรงและผนังที่ราบเรียบ โดยมุ่งเน้น ไปที่อัตราของการเสื่อมสลายของการหมุนวน (Decay of Swirl) เป็นต้น จากงานวิจัยที่กล่าวมา ข้างต้นเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยอีกหลายฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ในอดีตจนถึงปัจจุบันซึ่งอยู่ในรูปแบบ ของการทดลองและโปรแกรมการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (CFD) เช่น FLUENT® และ CFX®

สำหรับงานวิจัยนี้คือ การนำเทอร์โบแปรผัน (Swirl Generator) มาใช้ในการสร้าง Swirl flow โดยเบื้องต้นนั้นจะทำการวัดขนาดมุม Guide Vane ของ Swirl Generator เพื่อใช้เป็นมุมอ้างอิง สำหรับการทดลองและการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ในการหาค่าเลขสเวิร์ลที่ลงเหลือปลายทางออกของดีฟิวเซอร์ และสังเกตพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของ Swirl Flow ที่เกิดขึ้นบริเวณหัวเผา

จึงเป็นที่มาของงานวิจัยฉบับนี้โดยจะทำการสร้างหัวเผาเชื้อเพลิงแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย รวมถึงการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทดสอบเลขสเวิร์ลของหัวเผาชนิดนี้ และทำการจำลองดูพฤติกรรมของอากาศหมุนวนในหัวเผา เพื่อจะใช้เป็นข้อมูลสำหรับประเมินความแม่นยำของการจำลองด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนของกระแสการไหลที่มีการหมุนควง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบผง (Pulverized) แบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย



รูปที่ 1.1 แสดง Flow Pattern in Pulverized Recirculation Burner [1]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อทราบถึงสมรรถนะของ Swirl Generator ที่ใช้ในการสร้าง Swirl flow โดยประยุกต์ใช้เทอร์โบแปรผันยี่ห้อฮิตซูบิชิ รุ่น 3C04 รูปทรงหอยโข่ง ซึ่งถูกติดตั้งไว้ตรงกลางของหัวเผาเชื้อเพลิงแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย

1.2.2 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดภายในหัวเผา ทั้งสนามความเร็ว ความแตกต่างของเลขสแควร์ล และ Rate of decay โดยทำการวิเคราะห์ผลระหว่างการทดลองและการจำลอง ซึ่งการจำลองนี้จะศึกษาและคำนวณโดยใช้โปรแกรมคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ (CFD)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการศึกษาอากาศพลศาสตร์ในหัวเผาใหม่เชื้อเพลิงแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสียเฉพาะในส่วนของการเกิดการหมุนควง (Swirl Flow) โดยจำกัดมุม Guide Vane อยู่ที่มุม 60° , 65° , 70° และ 80° ในขณะเดียวกันจำกัดสัดส่วนอากาศส่วนที่หนึ่งและอากาศส่วนที่สองเป็น $50:50$, $40:60$, $30:70$ และ $20:80$
2. ทำการศึกษาของอัตราส่วนของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิที่มีผลต่อเลขสแควร์ล
3. ทำการศึกษาอิทธิพลของมุมของเครื่องสร้างอากาศหมุนวนที่มีผลต่อเลขสแควร์ล
4. ใช้แบบจำลอง standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$

1.4 วิธีการวิจัย

1. การนำเทอร์โบแปรผันฮิตซูบิชิรุ่น 3C04 รูปทรงหอยโข่งมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ในการสร้างอากาศหมุนวนของหัวเผาใหม่เชื้อเพลิงแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย
2. ใช้เทคนิคแผงรังผึ้งมาช่วยในการวัดทอร์กสถิตที่เกิดจากการสูญเสียของโมเมนตัม
3. การนำเครื่องชั่งดิจิตอลมาประยุกต์มาใช้ในการวัดโมเมนตัมในแนวแกนและโมเมนตัมในแนวสัมผัส
4. ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT® ในการศึกษาอากาศพลศาสตร์ที่เกิดเกิดขึ้นในท่อผสมและ Diffuser ทั้งที่มีและไม่มีอุปกรณ์ทดสอบเลขสแควร์ล

1.5 สมมุติฐานการวิจัย

1. กระแสการไหล ณ ทางเข้าของหัวเผา สมมุติให้เป็นการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform Flow)
2. การจำลองเป็นลักษณะกระบวนการอะเดียร์แบติก
3. เป็นแบบจำลอง 2 มิติ เป็นลักษณะเป็นแกนสมมาตร

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางของการกำหนดเงื่อนไขทางเข้าของการจำลองแบบมีการเผาไหม้
2. เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาไหม้เชื้อเพลิงผง (Pulverized) แบบมีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย
3. เพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะในการจำลองด้วยแบบจำลอง standard $k - \epsilon$ และ RNG $k - \epsilon$ ในการไหลแบบมีการหมุนควง

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

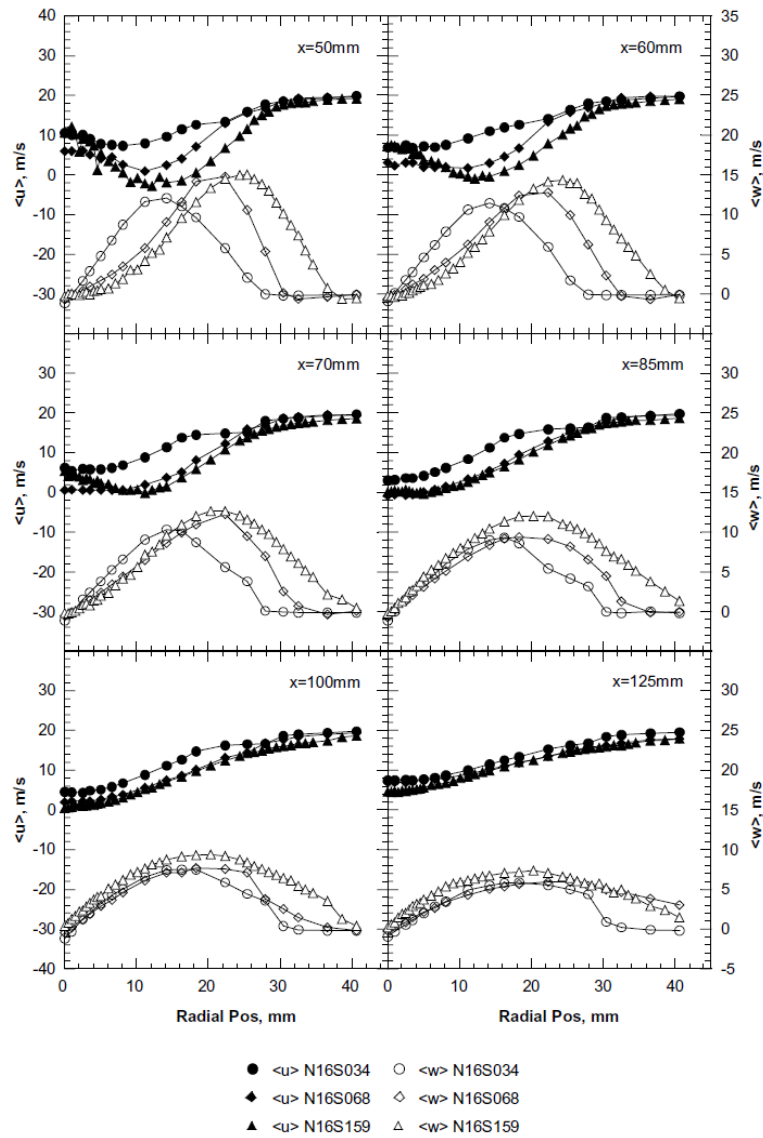
2.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาอากาศหมุนวนภายในห้องจำลองที่มีผลต่อเลขสเวิร์ล โดยจะศึกษางานวิจัยต่างๆเพื่อจะใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์และการวิเคราะห์สำหรับการทดลองหรือการจำลองในงานวิจัยนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

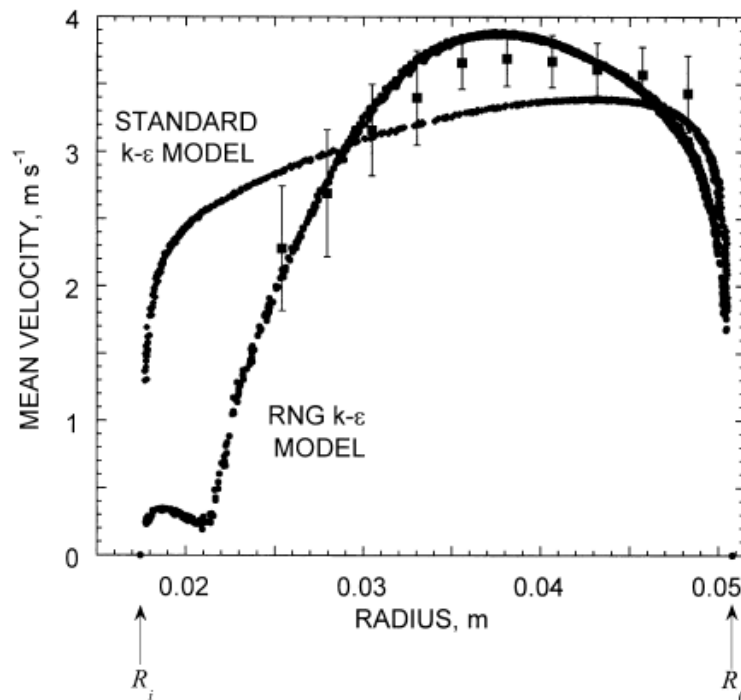
Steenbergen, W. et al. [2] ศึกษาการทดลองสำหรับการวิวัฒนาการของกระแสความเร็วเฉลี่ยที่ได้รับอิทธิพลมาจากกระแสการไหลแบบหมุนวนภายในท่อที่มีลักษณะตรงและผนังที่ราบเรียบ โดยมุ่งเน้นไปที่อัตราการเสื่อมสลายของการหมุนวน (Decay of Swirl) ที่เป็นผลมาจากการส่งถ่ายโมเมนตัมในทิศทางตามแนวเชิงมุม (Angular momentum) ซึ่งมีวิวัฒนาการของสนามการไหลทั้งสามลักษณะที่ใช้ในการทดลอง คือ สนามการไหลที่ทางเข้าเป็นแบบความเร็วในการหมุนวนที่แกนกลางสูง (Concentrated Vortex, CV) แบบความเร็วในการหมุนวนที่ผนังสูงแบบเปลี่ยนคงที่ (Solid Body, SB) และแบบความเร็วในการหมุนวนที่ผนังสูง (Wall jet, WJ) จากผลการทดลองพบว่าอัตราการเสื่อมสลายของการหมุนวนมีค่าเท่ากับ 10% ในช่วงเริ่มต้น และมีค่าสูงถึง 50% ในระยะต่อมา แต่อย่างไรก็ตามสนามการไหลแบบ CV, SB และ WJ ถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันของวิวัฒนาการของสนามการไหล แต่ให้ผลลัพธ์ของอัตราการเสื่อมสลายของการหมุนวนเกือบจะเท่ากันทั้งหมด

Yasir, M. et al. [3] ได้ศึกษาปรากฏการณ์การไหลหมุนวนของอากาศบริเวณรอบๆ bluff-body ที่มีการปล่อยอากาศเป็นลักษณะเจ็ทตรงบริเวณศูนย์กลาง โดยมุ่งเน้นไปที่การดูช่วงของเลขการหมุนวน (Swirl) และ Streamwise Annular Velocity ที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะมีความสำคัญต่อลักษณะของการไหลภายในห้องเผาไหม้ โดยได้ทำการควบคุมในส่วนของเจ็ท ควบคุมในส่วนของการหมุนวน และทำการตรวจสอบการไหลในโซนของส่วนที่มีการหมุนวนในช่วงด้านบนของห้องเผาไหม้ที่บริเวณทางออกของหัวเผา จากผลการทดลองพบว่ากระแสการไหลบริเวณที่อยู่ใกล้กับ Bluff-Body จะมีลักษณะของกระแสการไหลตามแนวแกนที่รุนแรงมากขึ้น และจากการทดลองในเงื่อนไข N16S159 โดยความเร็วในแนวแกนเท่ากับ 16.3 (m/s) ความเร็วในแนวสัมผัส 25.9 (m/s) และ Swirl number เท่ากับ 1.59 (มีค่าสูงสุดของเงื่อนไขทั้งหมด) แสดงให้เห็นถึงการหมุนวนย้อนกลับที่มีเสถียรภาพมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไข N16S068, N16S034, N16S054 และ N16S000



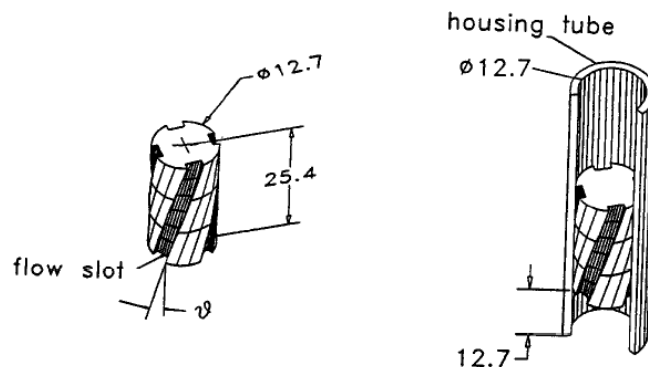
รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบเงื่อนไขการจำลองต่างๆ [3]

John, F. et al. [4] ได้ศึกษาการจำลองของอากาศทางพลศาสตร์ที่ไหลผ่านจากเครื่องกำเนิดการหมุนวน Vane-Cascade ณ ที่ตำแหน่งทางเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งมีค่า Swirl Number จากการคำนวณทางทฤษฎีเท่ากับ 1.0 แต่อย่างไรก็ตามการจำลองนี้ได้ใช้ค่า Swirl Number เท่ากับ 0.49 สำหรับการจำลองอากาศทางพลศาสตร์ของเครื่องกำเนิดการหมุนวนที่มี 12 Vane-Cascade ในทำนองเดียวกันได้ใช้แบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ และ standard $k-\varepsilon$ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในก่อนหน้านี้ จากผลการจำลองพบว่าแบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ ให้ผลการทำนายของ Profile Velocity ที่มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองการปั่นป่วน standard $k-\varepsilon$



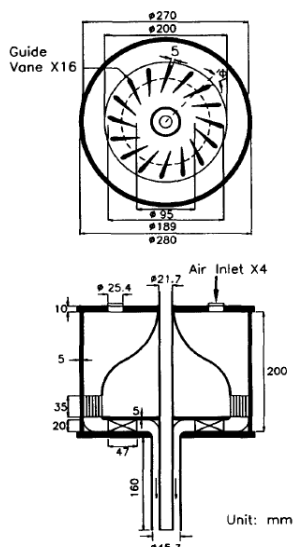
รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบการทดลองและแบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$, standard $k-\varepsilon$ [4]

Huang, L. et al. [5] ได้ออกแบบอุปกรณ์สร้างเจ็ทหมุนควงสำหรับสอดในท่อเจ็ท โดยอุปกรณ์มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกตันที่สวมในท่อเจ็ทได้พอดี แต่บนผิวของแท่งทรงกระบอกจะคว้านให้เป็นร่อง 4 ร่อง ทำมุมกับแกนของเจ็ท ในการทดลองมุมบิดที่ใช้สร้างเจ็ทหมุนควงจะอยู่ที่ 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา ค่า Reynold Number อยู่ระหว่าง $Re = 3620-17600$ และจากผลการศึกษการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีที่ใช้เจ็ทหมุนควงพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวพบว่า การใช้เจ็ทหมุนควงสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนบนผนังได้ค่อนข้างมากและช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนได้เมื่อเทียบกับเจ็ทแบบธรรมดา และเงื่อนไขที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดคือกรณีที่มุมบิดเท่ากับ 15 องศา และระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ทกับพื้นผิวเท่ากับ 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเจ็ท นอกจากนี้จากการศึกษาการไหลด้วยวิธีเชิงทัศนศาสตร์ทำให้สามารถเข้าใจกลไกที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นและสม่ำเสมอขึ้น



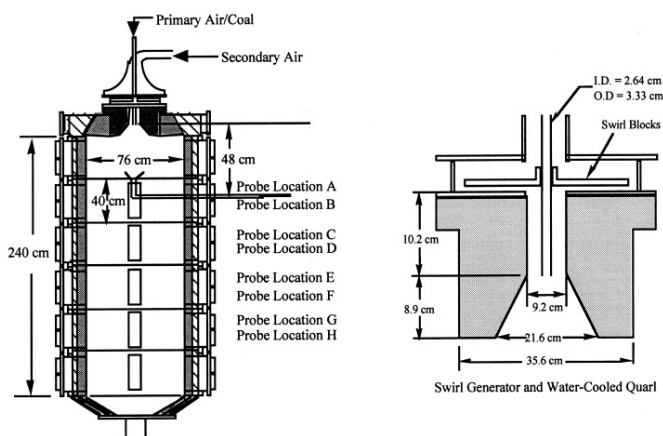
รูปที่ 2.3 ลักษณะของ Swirl jet [5]

Sheen, H. et al. [6] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของ swirl number โดยใช้เครื่อง Swirl Generator ในการทดลอง ซึ่งเงื่อนไขการทดลองได้มีการปรับเปลี่ยนเลขเรย์โนลด์์นัมเบอร์ในช่วง 60 ถึง 6000 และในทำนองเดียวกันนั้นได้ทำการปรับเปลี่ยนมุมของเครื่อง Swirl Generator อยู่ที่ช่วง 0° ถึง 56° เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของ Swirl Number ภายในห้องจำลอง โดยจะทำการวัดเป็นแบบ Laser-Doppler anemometry (LDA) และใช้วิธี smoke-wire ในการดูลักษณะการไหลวนของอากาศในห้องจำลอง ซึ่งจากการทดลองดังกล่าวพบว่าการเพิ่มเรย์โนลด์์นัมเบอร์และการเพิ่มมุมของ Swirl Generator เป็นสาเหตุทำให้ Swirl Number มีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย



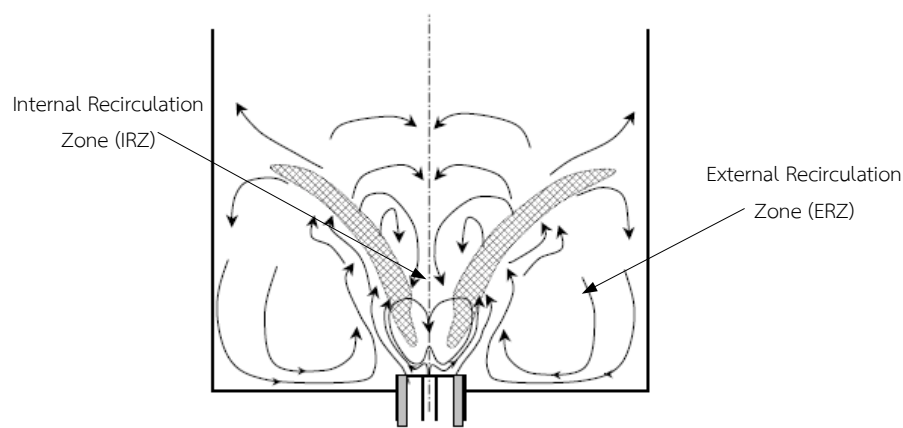
รูปที่ 2.4 ลักษณะของ Swirl Generator [6]

Waseem, A et al. [7] ได้รายงานถึงการหา Swirl Number โดยทำการวัดทอร์คสถิตจากเทคนิคแฉงรังผึ้งและเทคนิค Laser Doppler anemometer และนำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี โดยตำแหน่งการวัด Swirl Number จะวัดถัดจากหัวเผาออกมาประมาณ 5 มิลลิเมตร โดยพบว่าผล Swirl number ทางทฤษฎีมีค่า เท่ากับ 0, 0.5, 1.5 และผล Swirl Number การทดลองนั้น มีค่า 0.1, 0.36 และ 0.87 เป็นไปตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ลักษณะของ Swirl Blocks [7]

Aldo et al. [8] ได้ศึกษาปรากฏการณ์แก๊สหมุนวนในห้องเผาไหม้ โดยจะใช้ Swirl Generator เป็นชุดสร้างอากาศหมุนวน และใช้เทคนิค Laser Doppler Anemometry (LDA) ในการหา swirl number สำหรับจุดมุ่งหมายหลักคือการดูพฤติกรรมของไหลวนย้อนกลับของอากาศภายในห้องเผาไหม้ โดยการทดลองจะทำการปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้พร้อมกับอากาศโดยใน ส่วนแนวแกนจะเป็นเชื้อเพลิงและส่วนแนวสัมผัสจะเป็นชุดสร้างอากาศหมุนวน จากการทดลองดังกล่าวพบว่า การหมุนวนของแก๊สร้อนจะทำให้เกิดเปลวไฟมีเสถียรภาพ และทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ในสัดส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสม



รูปที่ 2.6 ลักษณะปรากฏการณ์แก๊สหมุนวน [8]

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของงานวิจัยนี้ โดยแสดงรายละเอียดและการวิเคราะห์ในการทดสอบหาเลขสเวิร์ล ซึ่งประกอบด้วย การจำลองเชิงตัวเลขของสมการทางคณิตศาสตร์ และหลักการหาสเวิร์ลนัมเบอร์ (Swirl number) ซึ่งการวิเคราะห์และการจำลองทั้งหมดนี้จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ปราศจากการเผาไหม้

3.2 ทฤษฎีพื้นฐานทาง CFD

3.2.1 กฎการอนุรักษ์ในการเคลื่อนที่ของของไหล

กล่าวถึงสมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์สำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ประกอบด้วยกฎการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงานซึ่งได้นำไปสู่สมการควบคุมของการไหลรวมทั้งเงื่อนไขที่จำเป็นเนื้อหาหลักที่ครอบคลุมในบทนี้ประกอบด้วย

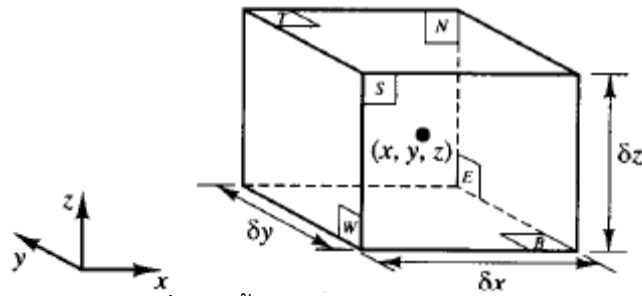
1. ระบบสมการ PDEs (Partial Differential Equations) ซึ่งควบคุมการไหลในพิกัด $(r-z)$
2. สมการสถานะ
3. แนวคิดเกี่ยวกับความหนืดในรูปของ Newtonian ซึ่งนำไปสู่สมการ Navier – Stokes
4. ความเหมือนกันในเชิงหลักการระหว่างสมการ PDEs ของ การไหลกับสมการการเคลื่อนย้าย (Transport Equations)

3.2.2 สมการควบคุมของการไหล

สมการควบคุมของการไหลของของไหลแทนถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ ดังนี้

1. มวลของไหลไม่สูญหายไปไหน
2. อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล (กฎข้อที่สองของนิวตัน)
3. อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับผลรวมของอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนกับอัตราของงานที่กระทำในอนุภาคของไหล (กฎข้อหนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์)

เราพิจารณาชิ้นส่วนของไหลขนาดเล็กที่มีความยาวด้านเท่ากับ δx , δy และ δz ดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ชิ้นส่วนของของไหลสำหรับกฎการอนุรักษ์

ชิ้นส่วนของไหลที่พิจารณานั้นมีขนาดเล็กมาก จนกระทั่งคุณสมบัติของไหลที่ผิวหน้าสามารถอธิบายได้อย่างแม่นยำด้วยสองพจน์แรกของสมการ Taylor ดังนั้น สำหรับตัวอย่างความดันที่ผิวหน้า e และ w ซึ่งทั้งคู่มีระยะห่างจากศูนย์กลางของชิ้นส่วนของไหลเท่ากับ $\frac{1}{2} \delta x$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$p - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \cdot \delta x \quad \text{และ} \quad p + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \cdot \delta x$$

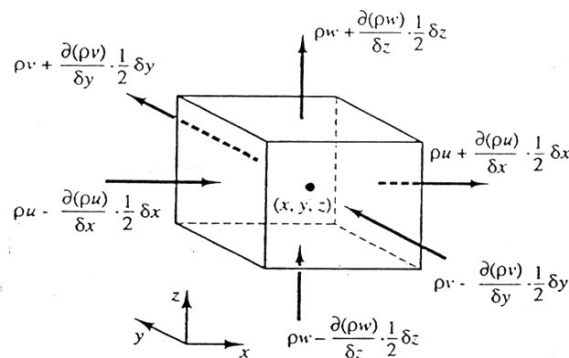
3.2.3 การอนุรักษ์มวลในปัญหา 3 มิติ

ขั้นตอนแรกของการหาสมการอนุรักษ์มวลคือการพิจารณาถึงสมมูลมวลของชิ้นส่วนของไหล ดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนของไหล = อัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้าไปในชิ้นส่วนของไหล

หรือในรูปแบบของเวกเตอร์

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{3.1}$$



รูปที่ 3.2 การไหลของมวลเข้าและออกชิ้นส่วนของไหล [17]

รูปแบบนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการอธิบายความเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหล ในปริมาตรเล็กๆ ที่หยุดนิ่ง เป็นการนิยามความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์คุณสมบัติ ϕ ของอนุภาคของไหล กับ อัตราเปลี่ยนของ ϕ ในชิ้นส่วนหรือปริมาตรย่อยๆ ของของไหล การพิจารณาอนุกรมอนุกรมค่าของมวลต่อหน่วยปริมาตร (ในที่นี้คือ ความหนาแน่น ρ) คือพารามิเตอร์ที่ต้องศึกษา เมื่อพิจารณาผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นในปริมาตรเล็กๆ และผลของการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการพาในสมการอนุกรมอนุกรม (สมการที่ 3.4) คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0$$

ดังนั้นรูปทั่วไปของทั้งสองเทอมนี้สำหรับคุณสมบัติใดๆ ของของไหล ϕ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) \quad (3.2)$$

สมการที่ 3.2 เทอมแรกคืออัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ϕ ต่อหน่วยปริมาตร บวกกับเทอมที่สองคือการไหลสุทธิของ ϕ ต่อปริมาตร ที่ออกจากชิ้นส่วนย่อยๆ ของของไหล ซึ่งสามารถนำมาเขียนใหม่เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของทั้งสองเทอมนี้กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ϕ ในอนุภาคของไหล ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \rho \left[\frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}\phi \right] + \phi \left[\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}) \right] = \rho \frac{D\phi}{Dt} \quad (3.3)$$

เทอม $\phi \left[\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}) \right]$ เท่ากับศูนย์เนื่องจากสมการอนุกรมอนุกรม (สมการ 3.1) จากความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการ 3.3 จะได้ว่า

อัตราการเปลี่ยนแปลงของ ปริมาณที่แสดงด้วยคุณสมบัติ Intensive ϕ ของ ของ ไหล ใน ปริมาตรควบคุมโดยแปลงเป็นค่า ต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลา	+	อัตราการถ่ายโอนออกสุทธิของปริมาณที่ แสดงด้วยคุณสมบัติ Intensive ϕ ของของไหล ที่แผงมากับมวล โดยเข้าและออกข้าม พื้นผิวของปริมาตรควบคุมโดยแปลงเป็นค่า ต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลา
=		
อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ Intensive ϕ ของของไหล เป็น ค่าต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลา		

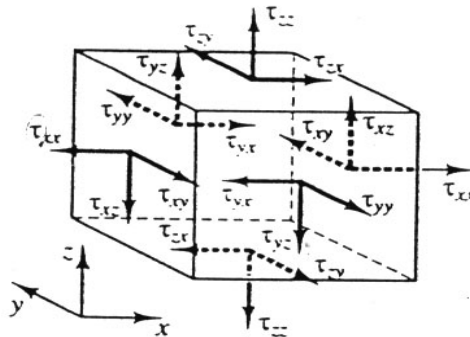
การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหลทั้ง 3 ทิศทาง อ้างอิงแกนในพิกัดฉาก รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานซึ่งเป็นปริมาณสเกลลาร์ สามารถแทนพารามิเตอร์ ϕ และอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยปริมาตรในสมการที่ 3.3

3.2.4 สมการโมเมนตัมแบบ 3 มิติ

กฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวไว้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหลเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาค, อัตราการเพิ่มโมเมนตัมของอนุภาคของไหลเท่ากับผลรวมแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล อัตราการเพิ่มโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของอนุภาคของไหลในทิศ x , y และ z กำหนดได้โดย

$$\rho \frac{Du}{Dt}, \rho \frac{Dv}{Dt}, \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (3.4)$$

การพิจารณาแรงกระทำในทิศทาง x เนื่องจากความดันและความเค้นย่อย τ_{xy} , τ_{yz} และ τ_{xz} ดังในรูปที่ 3.3 ขนาดของแรงที่กระทำบนพื้นผิวเกิดจากผลคูณของความเค้นและพื้นที่ซึ่งมีทิศทางเดียวกับแกนอ้างอิงโดยมีเครื่องหมายบวก และมีค่าเป็นเครื่องหมายลบเมื่อทิศทางตรงข้ามกับแรงสุทธิในทิศทาง x ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงย่อยที่กระทำบนชิ้นส่วนย่อยของไหลในทิศทางดังกล่าว



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทางของชิ้นส่วนของไหล (1995)

แรงสุทธิในทิศทาง x บนผิวหน้า N , S จะได้ว่า

$$-\left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y\right) \delta x \delta z + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y\right) \delta x \delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad (3.5b)$$

แรงสุทธิในทิศทาง x บนผิวหน้า T, B ได้ว่า

$$-\left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z\right) \delta x \delta y + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z\right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (3.5b)$$

ผลรวมแรงต่อหน่วยปริมาตรทั้งหมดเนื่องจากความเค้นที่ผิวหน้าจะเท่ากับผลรวมของ (3.5a), (3.5b) และ (3.5c) ทหารด้วยปริมาตรสุทธิ

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (3.6)$$

3.2.5 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ

สมการพลังงานหาได้จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ที่กล่าวไว้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคของไหล เท่ากับอัตราการป้อนความร้อนให้แก่อนุภาคบวกกับอัตราการทำงานสู่อุณหภูมิของไหล

ส่วนประกอบย่อยของแรงเนื่องจากความเค้นพื้นผิวในทิศทาง y และ z จะทำงานบนอนุภาคดังกล่าวเช่นกัน กระบวนการคิดแบบข้างต้นอัตราการเกิดงานบนอนุภาคของไหลเนื่องจากการทำงานด้วยแรงเหล่านี้สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\left[\frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial[v(-p + \tau_{yy})]}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (3.7b)$$

และ

$$\left[\frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial[w(-p + \tau_{zz})]}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (3.7c)$$

3.2.6 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

ทิศทางตามแนวรัศมี

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \bar{v} \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \bar{u} \bar{v}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) + \bar{S}_v + \bar{S}_{m,v} \quad (3.8)$$

ซึ่ง

$$\bar{S}_v = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} \right) + \frac{\bar{\rho} \tilde{w}^2}{r} - 2 \mu_{eff} \frac{\tilde{v}}{r^2} \quad (3.9)$$

$\bar{S}_{m,v}$ คือ การถ่ายโอนโมเมนตัมที่เกิดในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็งทิศทางการแนวรัศมี

ทิศทางการแนวแกน

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{u}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right) + \bar{S}_u + \bar{S}_{m,u} \quad (3.10)$$

ซึ่ง

$$\bar{S}_u = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right) \quad (3.11)$$

$\bar{S}_{m,u}$ คือ การถ่ายโอนโมเมนตัมที่เกิดในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็งทิศทางการแนวแกน

ทิศทางการเส้นสัมผัสกับเส้นรอบวงกลม (ตั้งฉากกับระนาบ r-z)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{w}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{w}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} \right) + \bar{S}_w + \bar{S}_{m,w} \quad (3.12)$$

ซึ่ง

$$\bar{S}_w = -\tilde{w} \left(\frac{\bar{\rho} \tilde{v}}{r} + \frac{\mu_{eff}}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mu_{eff}}{\partial r} \right) \quad (3.13)$$

$\bar{S}_{m,w}$ คือ การถ่ายโอนโมเมนตัมที่เกิดขึ้นในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็งในทิศทางสัมผัสกับเส้นรอบวงกลม

3.3 แบบจำลอง $k-\varepsilon$

3.3.1 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ เป็นการจำลองค่า Eddy Viscosity แบบ 2 สมการ ซึ่งมีผู้ให้รูปแบบสมการการจำลองที่หลากหลาย แบบจำลองนี้ให้ผลลัพธ์ที่ดีกับปัญหาการไหลแบบ Free-Shear-Layer ที่มี Pressure Gradient ที่ค่อนข้างต่ำสำหรับปัญหาการไหลผ่านผนัง (Wall Bounded Flow) แบบจำลองให้ผลลัพธ์ที่ดีเมื่อเทียบกับผลการทดลองในกรณีที่มีค่าเฉลี่ยของ Pressure Gradient มีค่าน้อยมากหรือเป็นศูนย์ แต่จะมีความผิดพลาดสูงมากในกรณีการเกิด Adverse Pressure Gradient แบบจำลอง $k-\varepsilon$ มีข้อดีสำหรับการกำหนดค่าที่ Free-Stream กล่าวคือผลเฉลยที่ดีจะไม่ไวต่อการกำหนดค่าที่ขอบของ k และ ε ที่ Free-Stream

ค่า Eddy Viscosity ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานจลน์ความปั่นป่วน k และ อัตราการสลายพลังงานจลน์ความปั่นป่วน ε ดังนี้

$$\mu_t = \rho C_\mu \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \quad (3.14)$$

แบบจำลอง $k-\varepsilon$ แบบมาตรฐานซึ่งเสนอโดย Launder, B.E. และ Spalding, D.B. [12] โดยเป็นแบบจำลองการไหลที่เลข Re สูงดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3.16)$$

ในสมการนี้ G_k แสดงถึงการกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนความเร็วเฉลี่ย G_b เป็นการกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว Y_M แสดงถึงการสนับสนุนของการขยายตัวที่เปลี่ยนแปลงในความปั่นป่วนอัดตัวได้ต่ออัตราการกระจายทั้งหมด $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ และ $C_{3\varepsilon}$ เป็นค่าคงที่ σ_k และ σ_ε เป็น Turbulent Prandtl numbers สำหรับ k และ ε ตามลำดับ S_k และ S_ε เป็นพจน์ที่กำหนดเอง

ค่าคงที่ของแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐานคือ

$$C_{1_\varepsilon} = 1.44, C_{2_\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

ค่าคุณสมบัติการไหลแบบปั่นป่วนในสนามการไหลสามารถทราบได้จากสมการการถ่ายเทของ k และ ε ในส่วนของสมการการถ่ายเท ค่า k สามารถพิสูจน์ได้โดยตรงจากการทำ Correlation ของเทอมโมเดลและค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในสมการนั้น มีพื้นฐานจากการปรับแก้ (Calibrate) กับผลการทดลองที่มีโครงสร้างของการไหลแบบปั่นป่วนตามที่ได้ตั้งสมมติฐานเอาไว้ในโมเดล ซึ่งรายละเอียดสามารถหาได้จากหนังสือที่เกี่ยวกับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนโดยทั่วไป [13] ในส่วนของสมการการถ่ายเท ε ไม่มีการพิสูจน์โดยตรง แต่ได้อาศัยหลักการที่ว่าค่าคุณสมบัติของการไหลแบบปั่นป่วนสามารถถ่ายเทในสนามการไหลได้เหมือนกับค่าคุณสมบัติอื่นๆ ดังนั้นจึงสามารถสร้างสมการการถ่ายเทของ ε โดยค่าคงที่และเทอมต่างๆได้จากการปรับแก้กับผลการทดลองในการไหลแบบต่างๆ ดังนั้นจะพบว่าในการปรับแก้หรือการใส่เทอมต่างๆ ในการไหลแบบต่างๆจะนิยมทำกันในสมการการถ่ายเท ε เนื่องจากค่าคงที่หรือเทอมต่างๆสามารถใช้ทำนายได้ดีในการไหลลักษณะใดลักษณะหนึ่งเท่านั้นและเป็นสมการที่มีพื้นฐานในเชิงกายภาพน้อยที่สุด ยกตัวอย่างเช่น Standard Wall Function [11] จะมีการคิดการสูญเสีย (dissipation) ที่แตกต่างจากสนามการไหลในส่วนอื่นๆของโดเมนการไหล สำหรับสมการการถ่ายเท k และ ε และค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ สามารถหาได้จาก Versteeg, H.K. et al. [14]

ในเชิงกายภาพ ค่าคุณสมบัติการไหลแบบปั่นป่วนสามารถถ่ายเทได้เช่นเดียวกับค่าคุณสมบัติอื่นๆ การถ่ายเทของ Eddy มีการถ่ายเทแบบพัดพาตามทิศทางการไหล (Convection) และสามารถถ่ายเทผ่านความหนืดของของไหล (diffusion) ยกตัวอย่างเช่น เรือข้ามฟากที่แล่นขวางกระแสน้ำ จะสังเกตเห็นได้ว่ากระแสการไหลแบบปั่นป่วนบริเวณท้ายเรือจะมีการถ่ายเทโดยการพัดพาไปตามทิศทางการไหลของกระแสน้ำ ดังนั้นค่าคุณสมบัติของการไหลแบบปั่นป่วนสามารถถ่ายเทได้เช่นเดียวกับการถ่ายเทความร้อน โมเมนตัมและมวล

เทอมการก่อกำเนิด (Source Term) ของการไหลแบบปั่นป่วนของสมการ k สามารถอธิบายเชิงกายภาพได้อย่างชัดเจน การก่อกำเนิดการไหลแบบปั่นป่วนได้รับพลังงานจากการไหลเฉือน (Velocity Gradient) ของสนามความเร็ว (Mean Flow) กล่าวคือ พลังงานที่สูญเสียจากการไหลเฉือนของสนามความเร็วเฉลี่ยส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy) และส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อน (Entropy Generation) และท้ายที่สุดพลังงานการไหลแบบปั่นป่วนจะสูญเสีย (Dissipate) ไปเป็นความร้อน (Entropy generation) ทั้งหมดแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ จากการศึกษาของนักวิจัยหลายกลุ่มได้สรุปปัญหาของแบบจำลองไว้ว่า แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ ทำนายค่า Turbulence

Shear Stress ที่สูงเกินจริง โดยเฉพาะสภาวะการไหลที่เกิด Adverse Pressure Gradient ทำให้พฤติกรรมของการไหลแบบแยกตัวหายไปที่จุด Stagnation ซึ่งเป็นจุดที่การไหลเกิดการปะทะกับผนัง และการทำนายระดับของความปั่นป่วนสูงเกินไป

3.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$

แบบจำลอง RNG $k - \varepsilon$ ได้มาจากการใช้เทคนิคทางสถิติ(เรียกว่า ทฤษฎีการทำให้เป็นกลุ่มมาตรฐาน) จะมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกับแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ แต่ได้รวมสิ่งเหล่านี้เข้าไปด้วย แบบจำลอง RNG มีพจน์ที่เพิ่มเข้ามาในสมการ ε ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำสำหรับการทำนายไหลแบบปั่นป่วนที่มีเทอมของความเครียดเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ผลกระทบสำหรับการหมุนวนบนการไหลแบบปั่นป่วนได้รวมอยู่ในแบบจำลอง RNG ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำให้กับการไหลหมุนวน ทฤษฎี RNG มีสูตรสำหรับ Turbulent Prandtl Numbers ขณะที่ Standard $k - \varepsilon$ จะกำหนดให้เป็นค่าคงที่ ทฤษฎี RNG มีสมการอนุพันธ์สำหรับความหนืดที่มีผลต่อการไหลสำหรับผลกระทบที่ Low-Reynolds Number ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับบริเวณขอบเขตใกล้ผนังซึ่งบริเวณนี้แบบจำลอง RNG $k - \varepsilon$ จะให้ผลการคำนวณที่แม่นยำมากขึ้นและเชื่อถือได้มากกว่าแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ กล่าวอีกนัยหนึ่ง RNG อยู่บนพื้นฐานแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \varepsilon$ ดัดแปลงมาจากสมการนาเวียร์-สโตก ใช้เทคนิคทางวิทยาศาสตร์ที่เรียกว่าวิธี Renormalization Group (RNG) การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับค่าคงที่ที่แตกต่างจากค่าที่ได้จากแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ มีพจน์และฟังก์ชันที่เพิ่มเข้ามาในสมการการถ่ายเทสำหรับ k และ ε

สมการการถ่ายเทสำหรับแบบจำลอง RNG $k - \varepsilon$ มีความคล้ายคลึงกับรูปแบบของแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (3.18)$$

ในสมการข้างต้น G_k แสดงถึงการกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนความเร็วเฉลี่ย G_b เป็นการกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนอันเนื่องมาจากแรงลอยตัว Y_M แสดงถึงความผันผวนของการขยายตัวในความปั่นป่วนอัดตัวได้อัตราการกระจายทั้งหมด ปริมาณ α_k และ α_ε คือส่วนกลับของ Prandtl Numbers สำหรับ k และ ε ตามลำดับ S_k และ S_ε คือพจน์กำเนิดของ

k และ ε และ R_ε เป็นพจน์ที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลที่มีความเครียดเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน

จากการวิเคราะห์พจน์ของความหนืดในทฤษฎี RNG ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์ของความหนืดปั่นป่วนกับพลังงานจลน์ปั่นป่วนและพารามิเตอร์อื่นๆของของไหลดังต่อไปนี้

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_\nu}} d\hat{\nu} \quad (3.19)$$

เมื่อ

$$\hat{\nu} = \frac{\mu_{eff}}{\mu} \quad (3.20)$$

$$C_\nu \approx 100$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ 3.19 จะทำให้ทราบถึงเทอมความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการถ่ายเทสุทธิเนื่องมาจากความปั่นป่วนกับเทอมของค่า Effective Reynolds Numbers จะส่งผลทำให้แบบจำลองสามารถรองรับรูปแบบการไหลที่ค่า Reynolds Number ต่ำ เช่นการไหลใกล้ผนัง เป็นต้น

$$\mu = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.21)$$

ค่า $C_\mu = 0.0845$ ได้มาจากทฤษฎี RNG จะสังเกตได้ว่าค่า C_μ มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.09 ที่ใช้แบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ โดยปกติการคำนวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความหนืดที่ใช้รูปแบบ Reynolds Number สูงๆ จะใช้สมการที่ 3.20 อย่างไรก็ตามสามารถเลือกใช้ความสัมพันธ์ที่แตกต่างซึ่งมีอยู่ในสมการที่ 3.18 โดยจะใช้ในกรณีที่ค่า Reynolds Number ต่ำรวมเข้าไปในการคำนวณ ซึ่งสอดคล้องกับตัวอย่างของ John, F. et al. [4]

3.4 การหาเลขสเวิร์ล (Swirl Number)

Swirl number ซึ่งมีนิยามคือ อัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของโมเมนตัมตามแนวสัมผัสต่อฟลักซ์ของโมเมนตัมตามแนวแกน

$$Sw = \frac{G_\theta}{RG_n} \quad (3.22a)$$

$$G_n = 2\pi \int_0^R \rho U_n^2 r \, dr \quad (3.23b)$$

$$G_\theta = 2\pi \int_0^R \rho U_n U_\theta r^2 \, dr \quad (3.24c)$$

ในที่นี้ G_θ คือ ค่าของฟลักซ์โมเมนตัมตามแนวสัมผัส

G_n คือ ค่าของฟลักซ์โมเมนตัมตามแนวแกนเจ็ท

R คือ รัศมีของท่อ

U_n คือ ความเร็วในแนวแกนของเจ็ท

U_θ คือ ความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ท

บทที่ 4

อุปกรณ์ วิธีการทดลองและการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (CFD)

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวกับ อุปกรณ์และชุดทดสอบเลขสเวิร์ล (Swirl number) ของหัวเผาเชื้อเพลิงผง รวมถึงวิธีการทดลอง ตลอดจนวิธีการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (CFD) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของชุดทดลองและหัวเผาเชื้อเพลิงผงแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อหลักๆ คือ

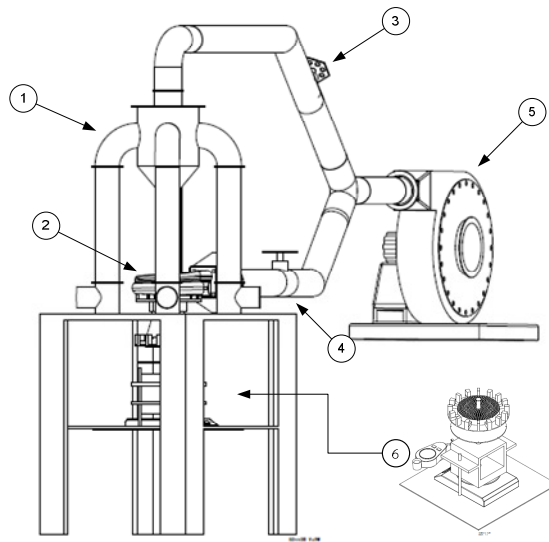
- อุปกรณ์และวิธีการทดลอง
- วิธีการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (CFD)

4.2 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ชุดอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของหัวเผาแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสียและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบเลขสเวิร์ล (Swirl Number)

4.2.1 อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของหัวเผาแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย

อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของหัวเผาแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสียประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ชิ้นส่วนต่างๆของการทดสอบเลขสเวิร์ลของหัวเผาแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย

- 1) หัวเผาเชื้อเพลิงผง 2) ชุดสร้างอากาศหมุนวน (Swirl Generator) 3) บอลวาล์ว(1)

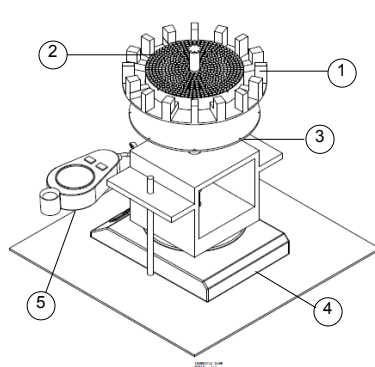
(4) บอลวาล์ว (2)

5) พัดลมต้นกำลัง (Blower)

6) ชุดทดสอบเลขสเวียร์ล

4.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบเลขสเวียร์ล

ชุดทดสอบเลขสเวียร์ลประกอบด้วยชิ้นส่วนดังนี้



1) ครีป (Fin)

2) แผงรังผึ้ง

3) แผ่นรับแรงในแนวแกน

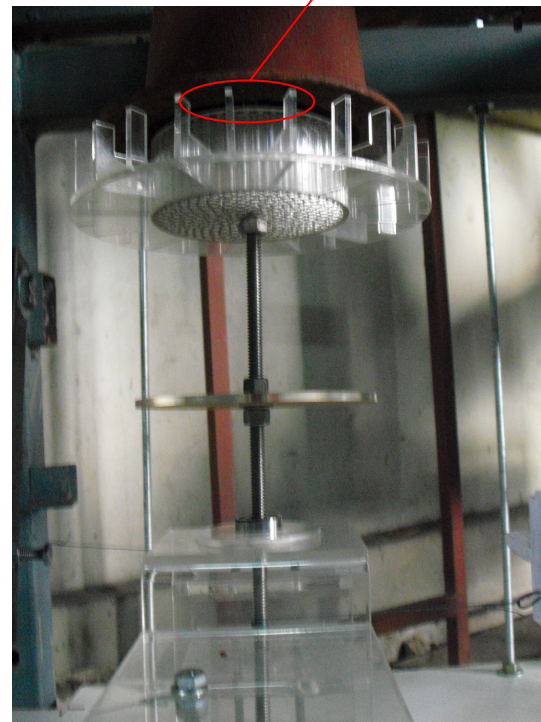
4) เครื่องชั่งดิจิตอลสำหรับวัตโมเมนตัมในแนวแกน

5) เครื่องชั่งดิจิตอลสำหรับวัตโมเมนตัมในแนวสัมผัส

ระยะห่างระหว่างแผงรังผึ้งกับขอบด้านในของดีฟิวเซอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ทดสอบเลขสเวียร์ล

สำหรับอุปกรณ์ทดสอบเลขสเวียร์ลมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้

- นำอุปกรณ์ทดสอบเลขสเวียร์ลไปติดตั้งตรงปลายทางออกของท่อดีฟิวเซอร์ ดังแสดงในรูป 4.2 (ข)
- เมื่อกระแสการไหลของอากาศที่ออกมาจากหัวเผาบางส่วนจะเกิดการหมุนควงเนื่องจากอากาศส่วนที่สอง อากาศจะไหลผ่านแผงรังผึ้ง (หมายเลข 2) ที่ใช้ในการ

สลายโมเมนตัมใน จะทำให้ชุดทดสอบเกิดการหมุนและจะถูกหยุดด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลที่ใช้สำหรับวัดโมเมนตัมในแนวสัมผัส (หมายเลข 5) ในขณะที่กระแสการไหลของอากาศบางส่วนที่ถูกสูญสลายในแผงรังผึ้ง อากาศส่วนหนึ่งจะไหลเข้าไปปะทะกับแผ่นรับแรงในแนวแกน (หมายเลข 3) ซึ่งจะเกิดแรงกดไปยังเครื่องชั่งดิจิตอล (หมายเลข 4) เพื่อใช้ในการวัดโมเมนตัมในแนวแกน สำหรับกระแสของอากาศบางส่วนที่ไหลออกจากระยะห่างระหว่างแผงรังผึ้งกับขอบด้านในของดิฟฟิวเซอร์ จะถูกควบคุมด้วยครีป (หมายเลข 1)

- ทำการอ่านค่านำหนักและนำไปแทนลงในสมการ 4.1 เพื่อใช้ในหาเลขสเวิร์ล

$$S_w = \frac{Weight_{tangent} \cdot r}{Weight_{axial} \cdot D} \quad (4.1)$$

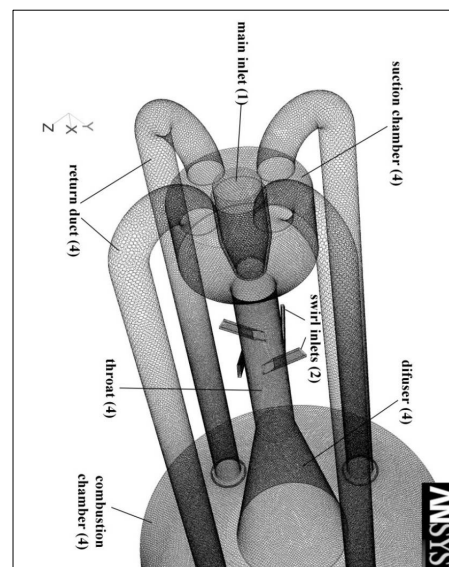
S_w คือ เลขสเวิร์ล

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของดิฟฟิวเซอร์

r คือ รัศมีของแกนชุดทดสอบเลขสเวิร์ล

4.2.1.2 หัวเผาแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย

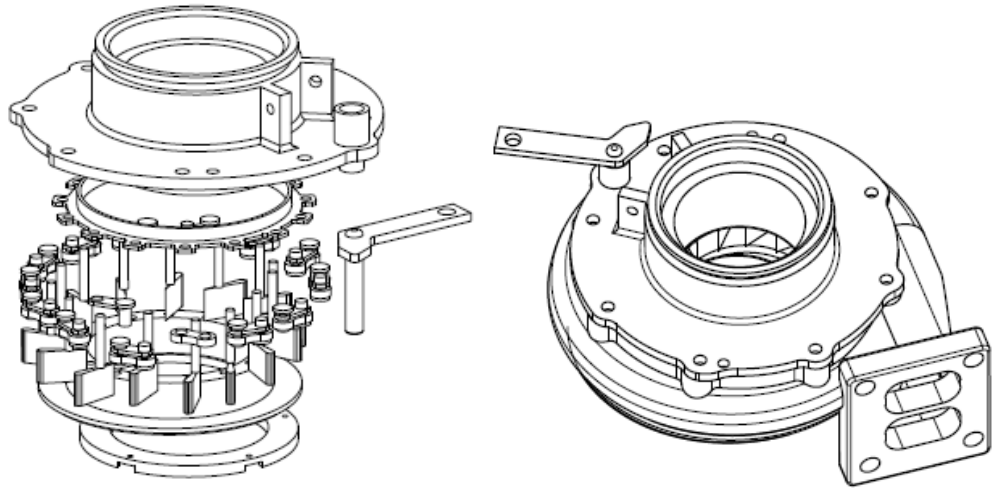
เป็นหัวเผาเชื้อเพลิงผงแบบมีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย ซึ่งมีระบบการทำงานเป็นลักษณะแบบเจ็ตปั๊มความเร็วสูง และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวเผาอยู่ 0.060 เมตร



รูปที่ 4.3 หัวเผาเชื้อเพลิงผงแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย [16]

4.2.1.3 เทอร์โบแปรผัน

เทอร์โบแปรผันได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับสร้างอากาศหมุนควงในหัวเผาเชื้อเพลิงแบบมีการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย และสามารถปรับมุมองศาของใบพัดได้ตั้งแต่ 10° , 20° , 25° และ 30° ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เทอร์โบแปรผัน

4.2.1.4 บอลวาล์ว

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนที่1(Primary Air) และอัตราการไหลของอากาศส่วนที่2 (Secondary air) ที่ป้อนให้แก่ระบบ ดังแสดงในรูป 4.5



รูปที่ 4.5 บอลวาล์ว

4.2.1.5 พัดลมต้นกำลัง (Blower)

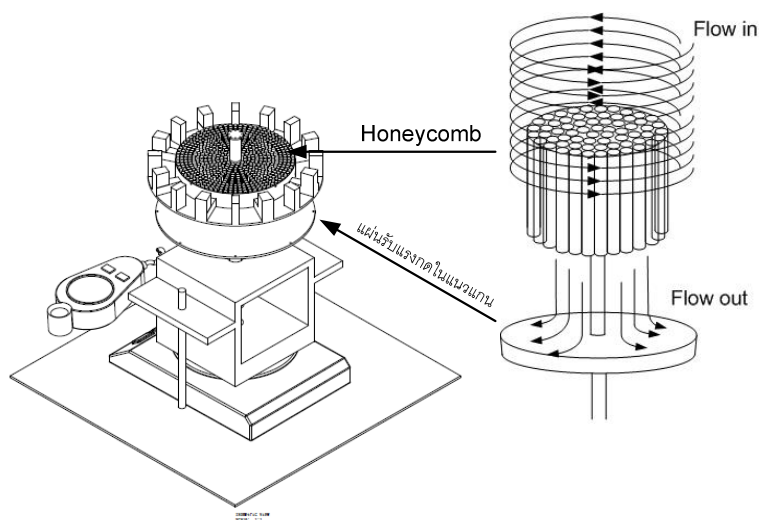
Blower เป็นแหล่งจ่ายอากาศส่วนที่ 1 และเป็นแหล่งจ่ายอากาศส่วนที่ 2 ซึ่งเป็น Blower แบบ 9 ใบพัด ขนาด 9 Hp ดังแสดงในรูป 4.6



รูปที่ 4.6 blower

4.2.1.6 แผงรังผึ้ง (honey Comb), แผ่นรับแรงกดในแนวแกน

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสลายโมเมนตัมในแนวสัมผัสและมีแผ่นรับแรงกดจากการถูกสลายโมเมนตัมในแนวแกน ดังแสดงในรูป 4.7



รูปที่ 4.7 แผงรังผึ้ง (honey Comb), แผ่นรับแรงกดในแนวแกน

4.2.1.7 เครื่องชั่งดิจิตอลสำหรับวัดในแนวสัมผัส

เครื่องชั่งดิจิตอลได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการติดตั้งเข้าสู่ระบบในการทดสอบหาเลขสเวิร์ล เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดโมเมนตัมในแนวสัมผัสเชิงมุม ดังแสดงในรูป 4.8



รูปที่ 4.8 เครื่องชั่งดิจิตอลสำหรับวัดโมเมนต์ในแนวสัมผัสเชิงมุม

4.2.1.8 เครื่องชั่งดิจิตอลสำหรับวันในแนวแกน

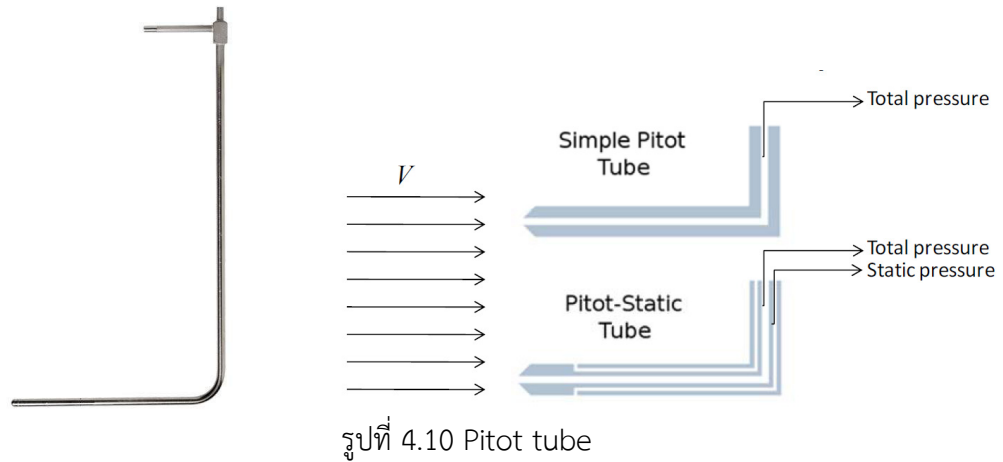
เป็นอุปกรณ์ที่ถูกประยุกต์ใช้ในการหาโมเมนต์ในแนวแกน และโมเมนต์ในแนวสัมผัสที่ถูกสูญเสียในแผงรังผึ้ง (Honey Comb) ดังแสดงในรูป 4.9



รูปที่ 4.9 เครื่องชั่งดิจิตอลสำหรับวัดโมเมนต์ในแนวแกน

4.2.1.9 Pitot tube

Pitot tube จะถูกสอดเข้าไปในทางการไหลของอากาศ เพื่อวัดความเร็วของอากาศและอีกท่อหนึ่งจะถูกสอดให้ชี้สวนกับทิศการไหลของอากาศ ความดันจะถูกวัดและเป็นความดันสถิตแยกเนชั่นความดันสถิตถูกวัดที่ตำแหน่งเดียวกัน และวัดโดยรูเจาะที่ผนังท่อทางไหลของไหลในมานอ มิเตอร์ใช้น้ำเพื่อดูระยะความแตกต่างของความดันแสดงในรูป 4.10 โดยตำแหน่งการติดตั้งจะระบุไว้ในรูปที่ 4.15



4.2.1.10 Manometer, inclined

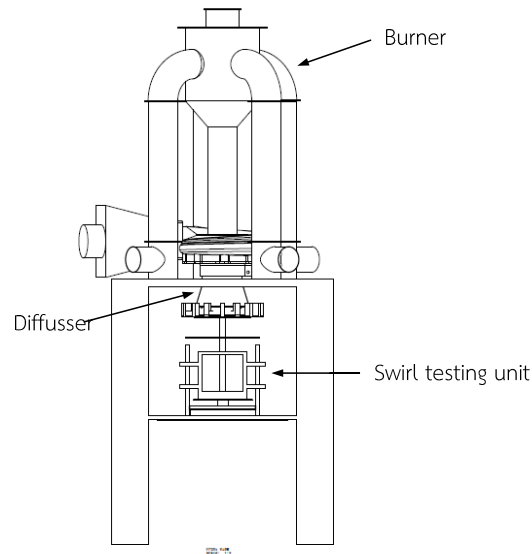
Manometer เป็นอุปกรณ์ใช้วัดความแตกต่างของความดัน เพื่อใช้หาอัตราการไหลของอากาศ ส่วนที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ในกรณีวัดความแตกต่างของความดัน เพื่อวัดอัตราการไหลของอากาศ ส่วนที่ 1 จะใช้ Inclined ดังแสดงในรูป 4.12 เนื่องจากความแตกต่างของความดันมีค่าน้อย ซึ่งจะทำให้สามารถอ่านค่าของระดับน้ำได้มีความถูกต้องมากขึ้น



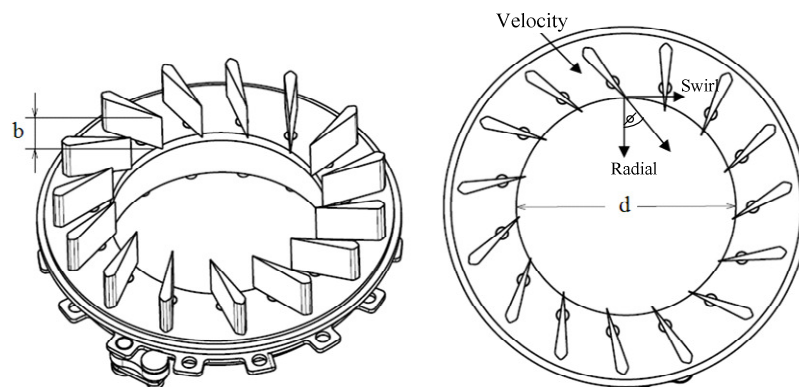
รูปที่ 4.11 Manometer



รูปที่ 4.12 Inclined

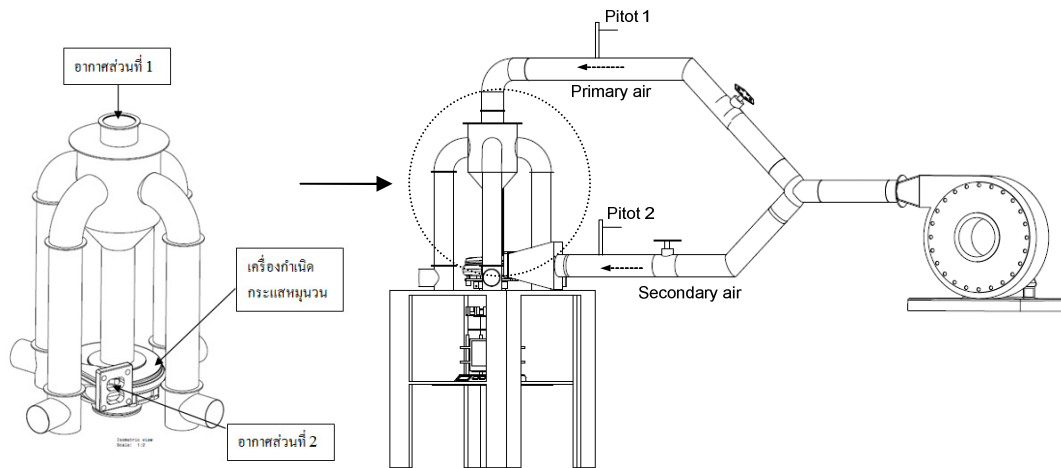


รูปที่ 4.13 ตำแหน่งการติดตั้งชุดทดสอบเลขเสวิร์ลทางออกตีฟิวเซอร์



รูปที่ 4.14 ลักษณะมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวน

สำหรับการแบ่งสัดส่วนอากาศของหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดผงแบบมีการหมุนวนเวียนแก๊สไอเสีย จะประกอบด้วยอากาศหลัก 2 ส่วนด้วยกัน คืออากาศส่วนที่ 1 (Primary Air) ซึ่งเป็นอากาศที่ใช้สำหรับลำเลียงเชื้อเพลิง ซึ่งจะถูกพ่นจากด้านบนในลักษณะรูปแบบเจ็ตปี้มความเร็วสูง และในขณะอากาศส่วนที่ 2 เป็นอากาศที่ใช้สำหรับสร้างอากาศหมุนวนในระบบ ถูกจ่ายเข้าสู่บริเวณทางเข้าของกังหันในแนวรัศมีและถูกปรับมุมของการไหลด้วยใบพัดแปรผัน ไหลออกเป็นลักษณะหมุนควงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ดังแสดงในรูป 4.15 จึงได้เป็นที่มาของการกำหนดสัดส่วนระหว่างอากาศส่วนที่ 1 และอากาศส่วนที่ 2 ดังต่อไปนี้ คือ 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 20 : 80 เป็นต้น



รูปที่ 4.15 ลักษณะของการป้อนอากาศส่วนที่ 1 และอากาศส่วนที่ 2

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทดลองที่ Excess air 10% อัตราการไหลเชิงมวล 0.034 (kg / s)

อากาศส่วนที่ 1 (m/s) [*] : อากาศส่วนที่ 2 (m/s) [*]		มุมใบพัดของชุดสร้างอากาศหมุนวนเทียบกับแนวรัศมี (องศา) ดังแสดงในรูป 4.12
50% (2.88)	50% (2.88)	80°, 70°, 65°, 60°
40% (2.30)	60% (3.45)	80°, 70°, 65°, 60°
30% (1.73)	70% (4.03)	80°, 70°, 65°, 60°
20% (1.15)	80% (4.60)	80°, 70°, 65°, 60°

* หมายถึง ความเร็วในท่อส่งลม ณ จุดวัด

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการทดลองที่ Excess air 20% อัตราการไหลเชิงมวล 0.037 (kg / s)

อากาศส่วนที่ 1 (m/s) [*] : อากาศส่วนที่ 2 (m/s) [*]		มุมใบพัดของชุดสร้างอากาศหมุนวนเทียบกับแนวรัศมี (องศา) ดังแสดงในรูป 4.12
50% (3.14)	50% (3.14)	80°, 70°, 65°, 60°
40% (2.51)	60% (3.76)	80°, 70°, 65°, 60°
30% (1.88)	70% (4.39)	80°, 70°, 65°, 60°
20% (1.25)	80% (5.02)	80°, 70°, 65°, 60°

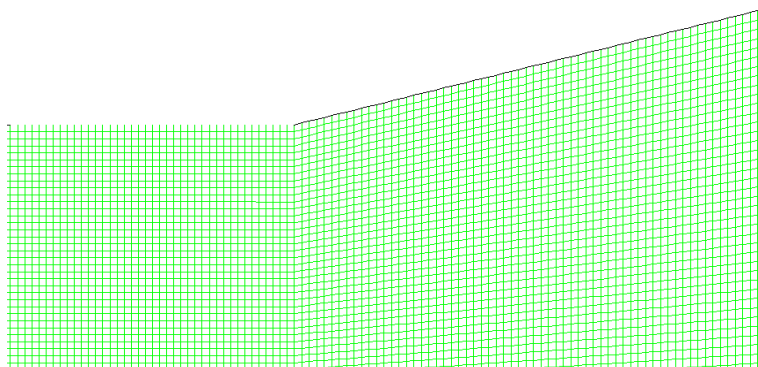
* หมายถึง ความเร็วในท่อส่งลม ณ จุดวัด

4.3 วิธีการทดลอง

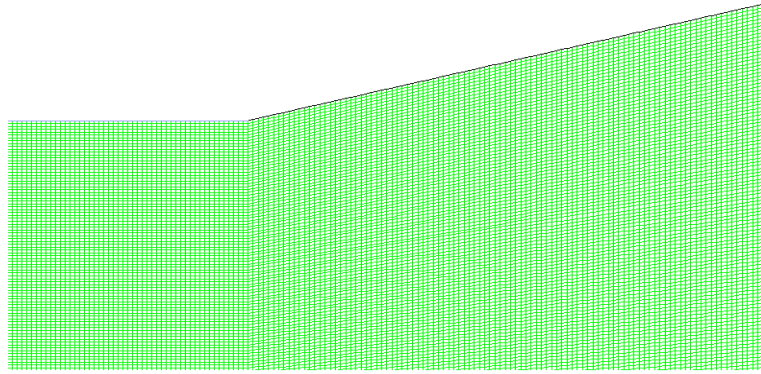
การทดสอบหาเลขสวิร์ล (Swirl Number) จากเครื่องสร้างอากาศหมุนวนโดยใช้เทคนิคแผงรังผึ้งเป็นข้อมูลในการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแบบผง (Pulverized Fuel Burner) ขนาด 100 kW โดยชุดอุปกรณ์ทดสอบตัวเลขสวิร์ลจะถูกติดตั้งตรงปลายทางออกของดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser) ซึ่งดังปรากฏในรูปที่ 4.1 การทดสอบนี้จะใช้พัดลมต้นกำลัง (Blower) สำหรับใช้ในการอัดอากาศเข้าสู่หัวเผาผ่านเจ็ทบี้มด้วยความเร็วสูง (อากาศส่วนที่ 1 Primary air) และเข้าสู่เครื่องสร้างอากาศหมุนวน (อากาศส่วนที่ 2 Secondary) จากนั้นทำการปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 1 (Primary air) และอากาศส่วนที่ 2 (Secondary air) ตามเงื่อนไขที่ตั้งแสดงในตารางที่ 4.1 และตาราง 4.2 ซึ่งในการวัดอัตราการไหลของอากาศทั้งสองส่วนโดยจะใช้ Pitot tube และการควบคุมอัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 1 (Primary air) และส่วนที่ 2 (Secondary air) ด้วย Ball valves จากนั้นทำการปรับอัตราการไหลอากาศพร้อมกับปรับมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวนตามเงื่อนไขที่แสดงในตารางที่ 4.1 และตาราง 4.2 ในขณะเดียวกันทำการอ่านค่าน้ำหนักที่ได้จากชุดอุปกรณ์ทดสอบเลขสวิร์ล ดังแสดงในรูป 4.2 และนำค่าไปแทนลงในสมการ 4.1 โดยทำการจับเวลาพร้อมกับทำการบันทึกผลการทดลอง

4.4 การจำลองเชิงคณิตศาสตร์

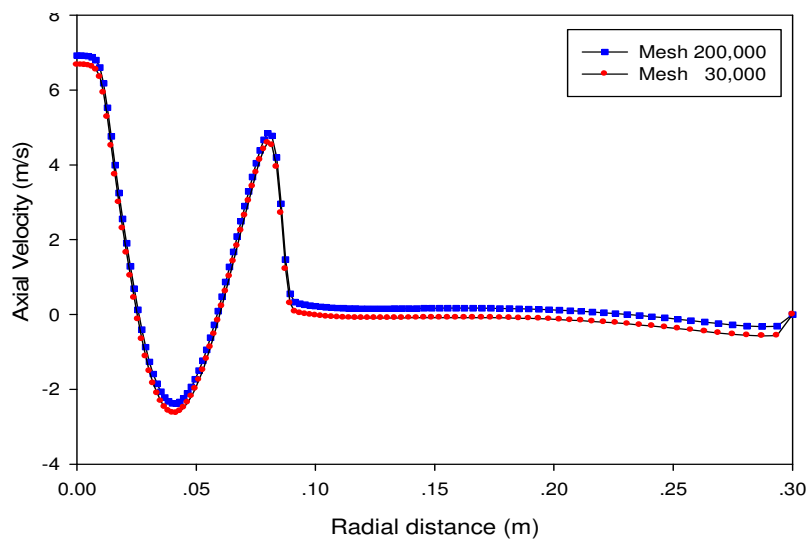
กระบวนการของการสร้าง Mesh มีความสำคัญมากต่อการจำลอง จำนวน Mesh จะส่งผลต่อความถูกต้องและระยะเวลาของการคำนวณ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการตรวจสอบจำนวน Mesh ที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลอง โดยจะเน้นการสร้าง Mesh ให้มีความละเอียดบริเวณทางเข้าของอากาศส่วนที่สองและบริเวณทางออกของหัวเผา ซึ่งบริเวณเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรต่างๆ ในปริมาณสูง เบื้องต้นนั้นจะทำการตรวจสอบความเร็วในแนวแกน (Axial velocity) และความเร็วของการหมุนควง (Swirl velocity) โดย mesh ที่ใช้ในการตรวจสอบมีจำนวน 30,000 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และจำนวน 200,000 ดังแสดงในรูปที่ 4.15



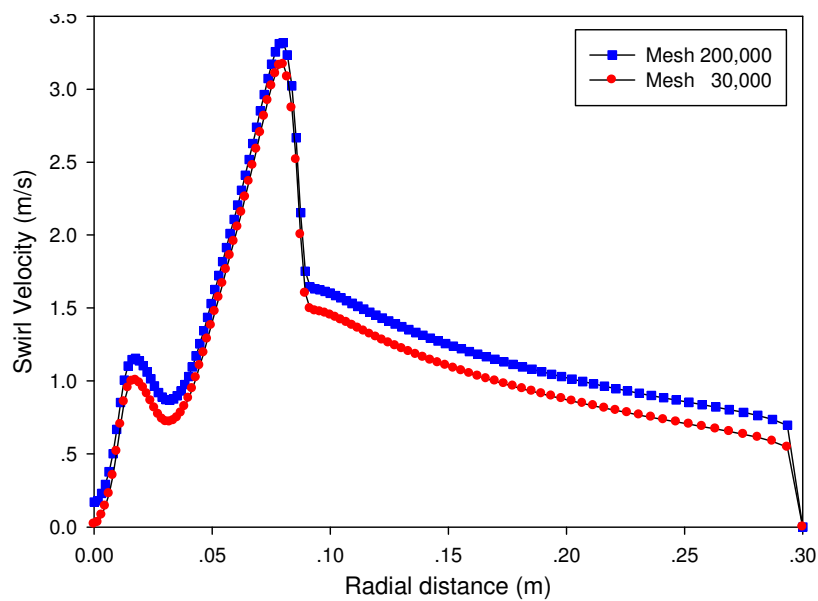
รูปที่ 4.16 ลักษณะของ mash 30,000 บริเวณหัวเผา



รูปที่ 4.17 ลักษณะของ mash 200,000 บริเวณหัวเผา

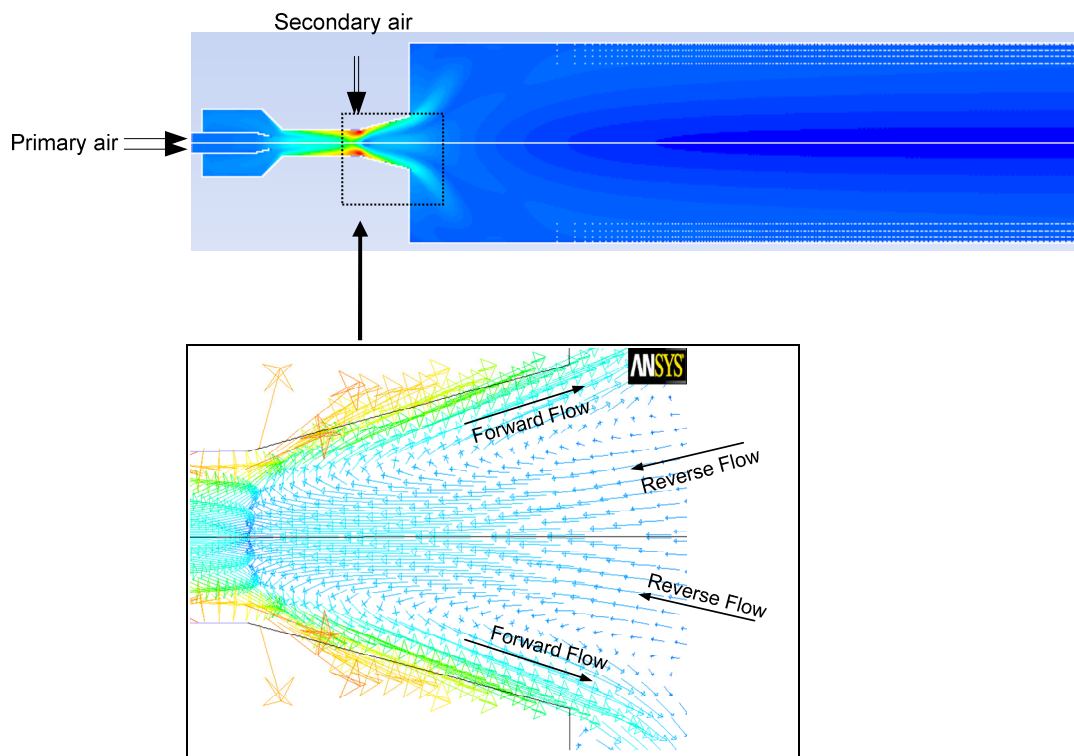


รูปที่ 4.18 ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน (Axial velocity) บริเวณทางออกของหัวเผา



รูปที่ 4.19 ความเร็วเฉลี่ยของการหมุนควง (Swirl velocity) บริเวณทางออกของหัวเผา

สำหรับการตรวจสอบผลความเร็วในแนวแกน ดังแสดงในรูป 4.18 และผลความเร็วของการหมุนควงบริเวณทางออกของหัวเผา ดังแสดงในรูป 4.19 โดยการพิสูจน์เบื้องต้นพบว่า Mesh 30,000 และจำนวน Mesh 200,000 มีค่าความเร็วในแนวแกนแตกต่างกันอยู่ที่ 0.09-0.25 m/s ตลอดช่วงของระยะเตา และค่าความเร็วของการหมุนควงแตกต่างกันอยู่ที่ 0.08-0.27 m/s ตลอดระยะเตา ซึ่งในตำแหน่งต่างๆ จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก งานวิจัยจึงเลือกใช้ Mesh ที่มีความละเอียด 30,000 ในการจำลองเพื่อจะลดระยะเวลาในการคำนวณของโปรแกรม โดยการจำลองนี้จะมีลักษณะของรูปแบบการจำลองแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.20 ลักษณะเวกเตอร์ความเร็ว (\bar{U})

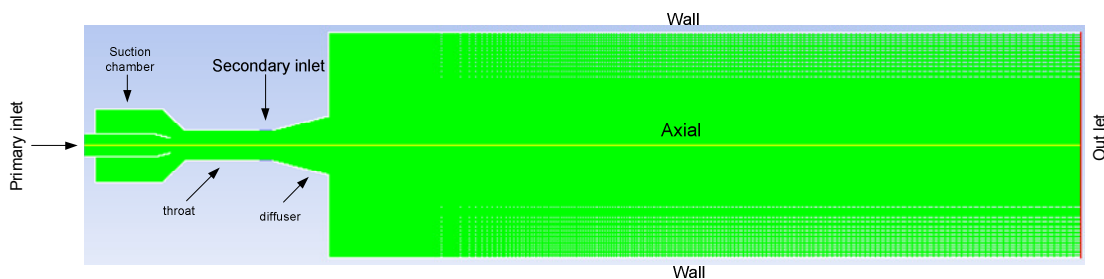




รูปที่ 4.21 การจำลองแบบไม่มีชุดทดลองมาวางกั้นการไหล

ตารางที่ 4.3 การกำหนดแบบจำลอง

Turbulent model		Standard $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$
Grid		Square
Calculation method		Simple and Second Order Upwind
Boundary condition	(1) Primary inlet, Central	Velocity-inlet
	(2) Secondary inlet	Radial-Velocity, Swirl-Velocity
	(3) Outlet boundary	Outlet
	(4) Wall burner	Wall
Number of grid		30,000



รูปที่ 4.22 การกำหนดแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

สำหรับการจำลองนี้จะใช้ค่าเวกเตอร์ของความเร็วดังปรากฏในรูปที่ 4.18 โดยจะเลือกใช้ข้อมูลเวกเตอร์ของความเร็วในช่วงระยะนาบที่ตำแหน่ง B ดังแสดงในรูป 4.19 มาใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาสเวิร์ลลัมเบอ์ เนื่องจากกรณีของการทดลองเมื่อใส่ชุดทดลองเข้าไปที่ปลายทางออกของดิฟฟิวเซอร์เป็นการบังคับให้เกิดเฉพาะ Forward flow ซึ่งแตกต่างจากการจำลองเชิงคณิตศาสตร์พบว่าค่าเวกเตอร์ความเร็วปรากฏให้เห็นทั้ง Forward Flow และ Reversed Flow ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบวิธีการประมวลผลที่เป็นไปได้ เพื่อครอบคลุมความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการคำนวณในลักษณะที่ต่างกัน และจะนำไปเทียบเคียงกับผลการทดลอง แบ่งเป็น 3 กรณี ได้แก่ Swirl1 คือ u^2 กรณีมองความเร็วเป็นบวกทั้งหมด

Swirl2 คือ $(u+)^2$ กรณีเฉพาะความเร็วเป็นบวก

Swirl3 คือ $u \cdot |u|$ กรณีมองความเร็วเป็นได้ทั้งบวกและลบ

ซึ่งตัวแปร u เป็นค่าของเวกเตอร์ความเร็วที่ใช้ในการคำนวณหาเลขสแควร์ในสมการที่ (3.22a-3.24c) เพื่อนำผลจากการจำลองไปเทียบเคียงกับผลการทดลอง

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างผลของความเร็ว u

u	$ u $	u^2
-1.02957	1.0295700	1.0600144
-0.915864	0.9158640	0.8388069
-0.796246	0.7962460	0.6340077
-0.670847	0.6708470	0.4500357
-0.539806	0.5398060	0.2913905
-0.403266	0.4032660	0.1626235
-0.261376	0.2613760	0.0683174
-0.114292	0.1142920	0.0130627
0.0378185	0.0378185	0.0014302
0.194776	0.1947760	0.0379377
0.356385	0.3563850	0.1270103
0.522435	0.5224350	0.2729383
0.69269	0.6926900	0.4798194
0.866889	0.8668890	0.7514965
1.04474	1.0447400	1.0914817
1.22592	1.2259200	1.5028798
1.41006	1.4100600	1.9882692
1.59674	1.5967400	2.5495786
1.78548	1.7854800	3.1879388
1.97576	1.9757600	3.9036276
2.16696	2.1669600	4.6957156

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขที่ใช้กำหนดการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% อัตราการไหลเชิงมวล 0.034 kg/s

Primary air, Central (m/s) [*]	Secondary air				
	Radial Velocity (m/s) [*]	Swirl Velocity (m/s) [*]			
		80°	70°	65°	60°
50% (2.88)	50% (2.88)	16.33	7.9	6.18	4.98
40% (2.30)	60% (3.45)	20.00	9.48	7.40	5.98
30% (1.73)	70% (4.03)	22.86	11.07	8.64	6.98
20% (1.15)	80% (4.60)	26.00	12.64	9.86	7.86

* หมายเหตุ ความเร็วในท่อส่งลม ณ จุดวัด

ตารางที่ 4.6 เงื่อนไขที่ใช้กำหนดการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% อัตราการไหลเชิงมวล 0.037 (kg/s)

Primary air, Central (m/s) [*]	Secondary air				
	Radial Velocity (m/s) [*]	Swirl Velocity (m/s) [*]			
		80°	70°	65°	60°
50% (3.14)	50% (3.14)	17.81	8.63	6.73	5.44
40% (2.51)	60% (3.76)	21.32	10.33	8.06	6.51
30% (1.88)	70% (4.39)	24.90	12.06	9.41	7.60
20% (1.25)	80% (5.02)	28.50	13.79	10.77	8.70

* หมายเหตุ ความเร็วในท่อส่งลม ณ จุดวัด

บทที่ 5

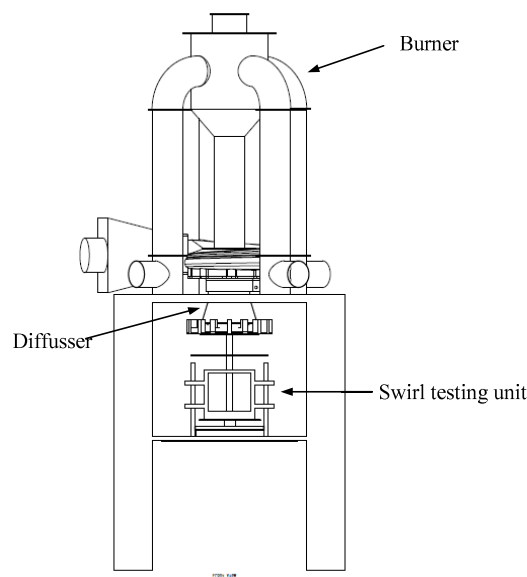
ผลการทดลอง ผลการจำลองและการอภิปราย

5.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการทดลอง ผลการจำลองและการอภิปรายผลที่ได้จากการหาค่าของเลขสเวิร์ล (Swirl number) ภายในช่วงทางออกของดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser) ของหัวเผา โดยจะนำผลที่ได้จากการทดลองไปเทียบเคียงกับผลการจำลอง เพื่อให้ทราบถึงขีดจำกัดของอุปกรณ์ทดสอบเลขสเวิร์ล และพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดผง

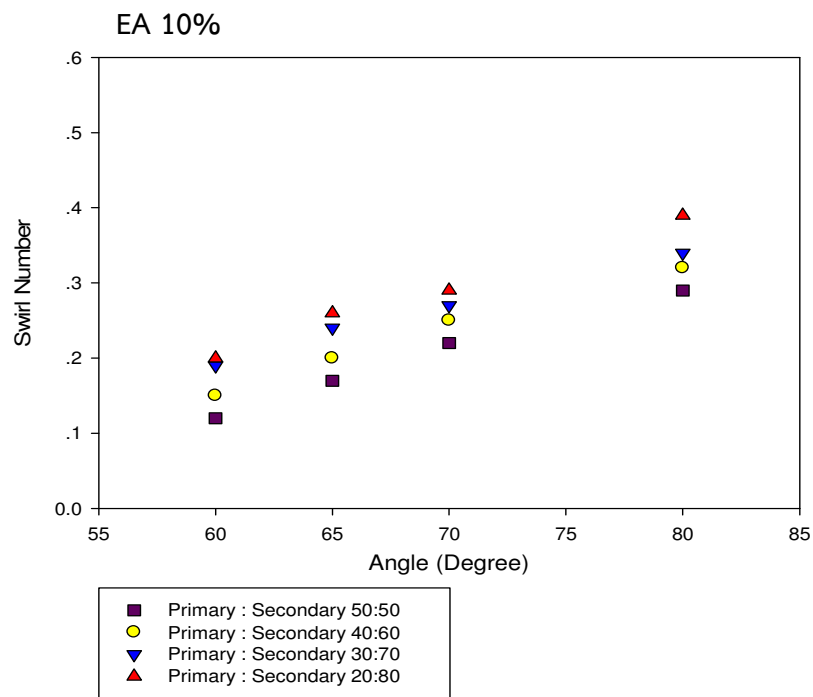
5.2 การศึกษาอิทธิพลของมุมใบพัดของชุดสร้างอากาศหมุนวนเทียบกับแนวรัศมี และ สัดส่วนของอากาศที่ส่งผลกระทบต่อเลขสเวิร์ล

หัวข้อนี้ได้แสดงผลการทดลองของเลขสเวิร์ล (Swirl Number) ที่ทางออก (Swirl B) เมื่อมีการปรับเปลี่ยนมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวนเท่ากับ 60° , 65° , 70° และ 80° โดยสังเกตดูผลกระทบของมุมที่มีผลต่อสเวิร์ลนัมเบอร์ (Swirl number) ภายในบริเวณทางออกดิฟฟิวเซอร์ของหัวเผา ซึ่งได้ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบเลขสเวิร์ล (Swirl Testing Unit) ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ขณะเดียวกันจะทำการปรับสัดส่วนอัตราการการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง (Primary Air) และ อัตราการไหลของส่วนที่สอง (Secondary Air) เท่ากับ 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 20 : 80 รวมถึงเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินที่ใช้ในการทดลองคือ Excess air 10% และ 20% ซึ่งได้สรุปเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 5.1 ตำแหน่งการติดตั้งชุดทดสอบเลขสเวิร์ล (Swirl Number) ที่ปลายทางออกของดิฟฟิวเซอร์

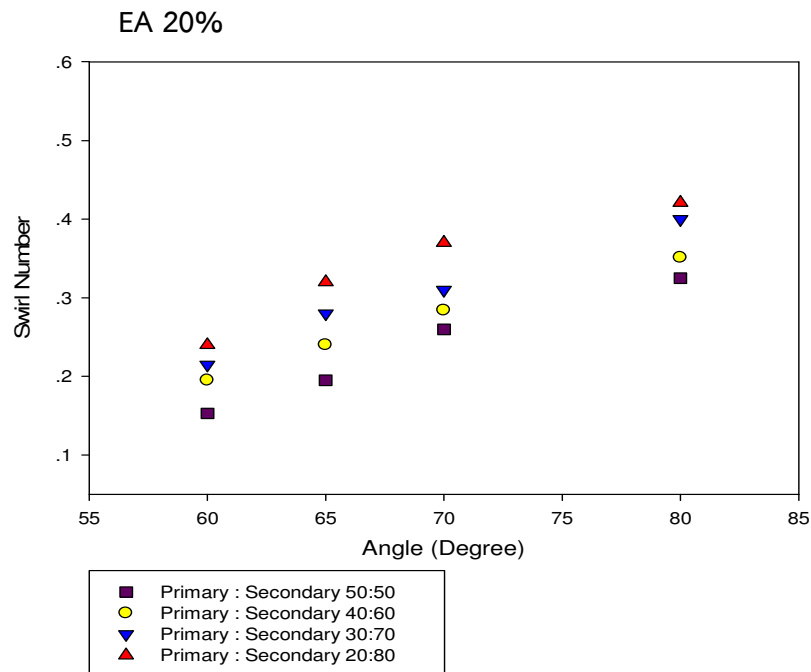
5.2.1 อิทธิพลของมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวนเทียบกับแนวรัศมีที่ส่งผลกระทบต่อเลขสเวิร์ล (Swirl Number) โดยทำการปรับเปลี่ยนอากาศส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองเท่ากับ 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 20 : 80 ตามลำดับ กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% (Excess air 10%)



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของเลขสเวิร์ลที่ระนาบ B (Swirl B) และมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวน

จากรูปที่ 5.2 แสดงผลการทดลองของการปรับมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวนไปที่ 60° , 65° , 70° และ 80° ขณะเดียวกันทำการปรับสัดส่วนอากาศ 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 20 : 80 พบว่าค่าของ เลขสเวิร์ลที่ได้ อยู่ในช่วง 0.123-0.294, 0.152-0.326, 0.194-0.346 และ 0.204-0.394 ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ที่มุม 80° ให้ค่าของเลขสเวิร์ลมากที่สุดและที่มุม 60° ให้ค่าของเลขสเวิร์ลน้อยที่สุด ซึ่งจะเป็นไปตามลักษณะเช่นนี้ทุกสัดส่วนอากาศที่ใช้ในการทดลอง อันเนื่องมาจากมุมมองศาที่และสัดส่วนอากาศส่วนที่ 2 (Secondary air) ที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้กระแสการไหลของมวลอากาศตามแนวสัมผัสมีมากขึ้น เป็นผลให้กระแสการไหลตามแนวแกนมีค่าที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับนิยามของสเวิร์ลนัมเบอร์ว่าด้วยอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของโมเมนตัมตามแนวสัมผัสต่อฟลักซ์ของโมเมนตัมตามแนวแกน เมื่อฟลักซ์โมเมนตัมในแนวสัมผัสเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เลขสเวิร์ลมีค่าเพิ่มมากขึ้น

5.2.2 อิทธิพลของมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวนเทียบกับแนวสัมผัสที่ส่งผลกระทบต่อเลขสเวิร์ล (Swirl Number) โดยทำการปรับเปลี่ยนอากาศส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองเท่ากับ 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 20 : 80 ตามลำดับ กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% (Excess air 20%)



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ของเลขสเวิร์ลที่ระนาบ B (Swirl B) และมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวน

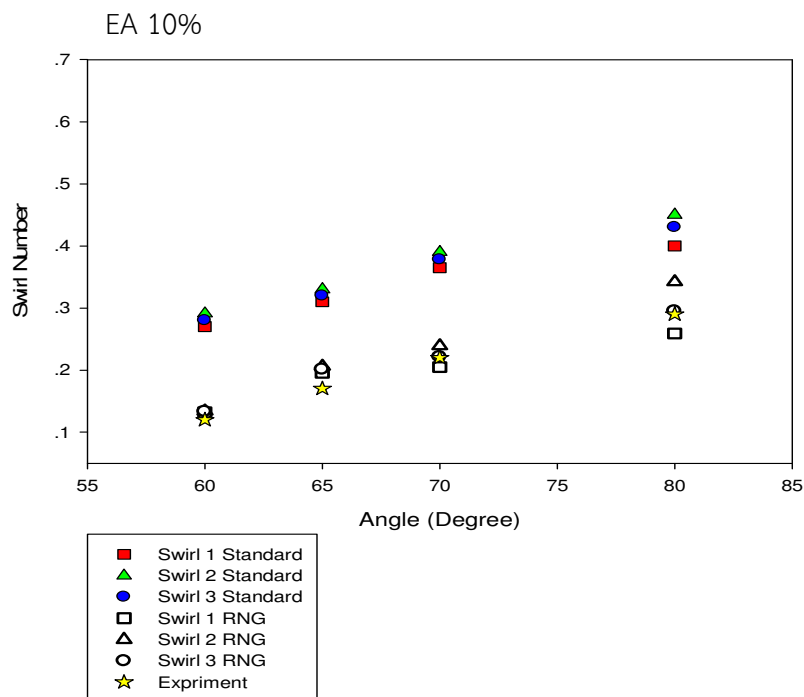
จากรูปที่ 5.3 แสดงผลการทดลองของการปรับมุมของชุดสร้างอากาศหมุนวนไปที่ 60° , 65° , 70° และ 80° ขณะเดียวกันทำการปรับสัดส่วนอากาศ 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 20 : 80 พบว่าค่าของ Swirl Number ที่ได้ อยู่ในช่วง 0.153 -0.325, 0.195-0.351, 0.215-0.400 และ 0.240-0.421 ตามลำดับ สังเกตเห็นได้ว่าที่มุม 80° ให้ค่าของเลขสเวิร์ลมากที่สุดและที่มุม 60° ให้ค่าของเลขสเวิร์ลน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องเช่นเดียวกับหัวข้อ 5.2.1 ค่าของเลขสเวิร์ลจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของมุมไบพัตและการเพิ่มมวลอากาศส่วนที่ 2 (Secondary air) เนื่องจากขนาดของมุมที่เพิ่มมากขึ้นจะเป็นการเพิ่มกระแสการไหลของมวลอากาศในแนวสัมผัส ซึ่งจะทำให้ฟลักซ์โมเมนตัมในแนวสัมผัสเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เลขสเวิร์ลมีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

5.3 อิทธิพลของแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ ที่มีผลต่อสเวิร์ลนัมเบอร์ (Swirl Number) เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

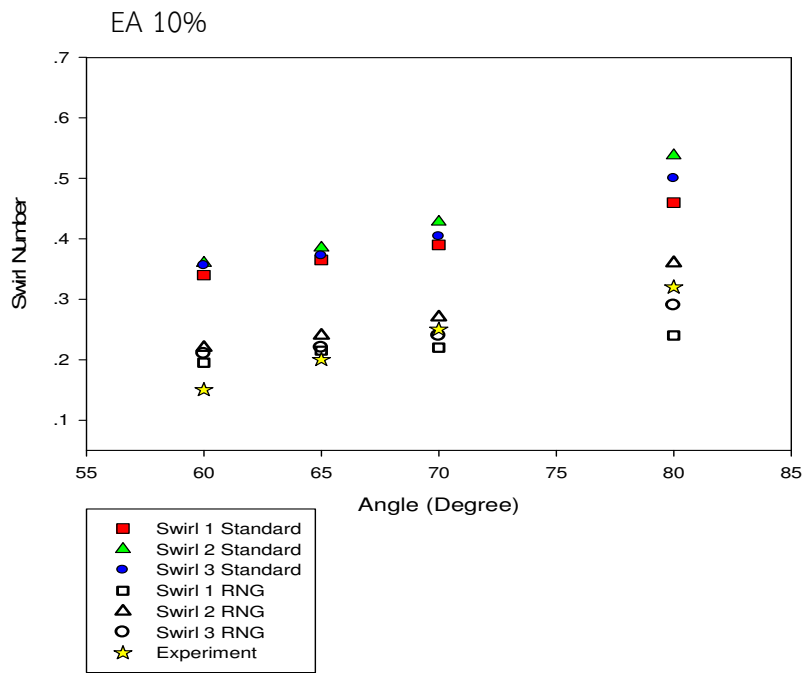
5.3.1 กรณีไม่มีชุดทดสอบเลขสเวิร์ลมาขวางกั้นการไหล

หัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบเลขสเวิร์ล (Swirl number) ที่ทางออก (Swirl B) ของแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$, และแบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ กรณีแบบไม่มีชุดทดสอบเลขสเวิร์ลมาขวางกั้นการไหลเทียบกับผลการทดลอง เพื่อดูว่าแบบจำลองทั้งสองรูปแบบชนิดใดที่ให้ผลของเลขสเวิร์ลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ในทำนองเดียวกันได้สรุปเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

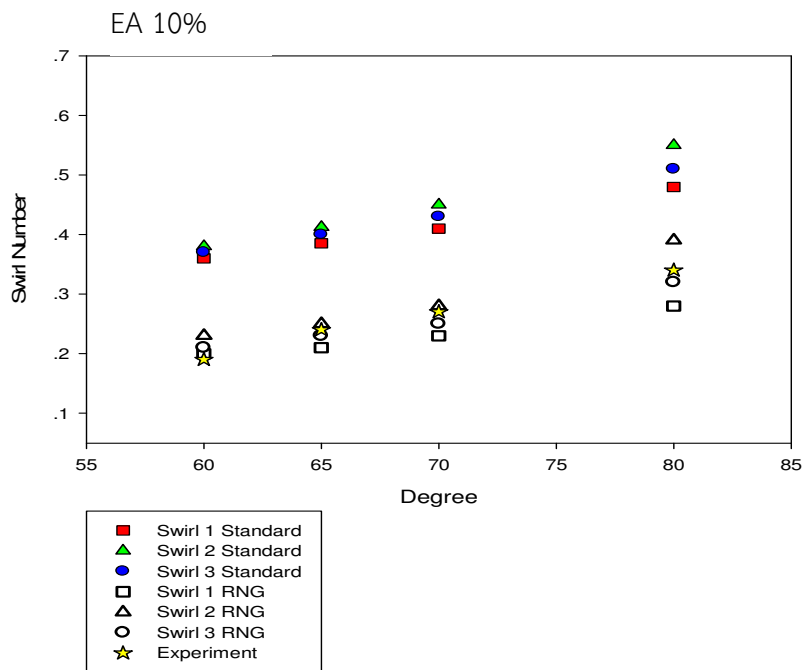
5.3.1.1 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% (Excess air 10%)



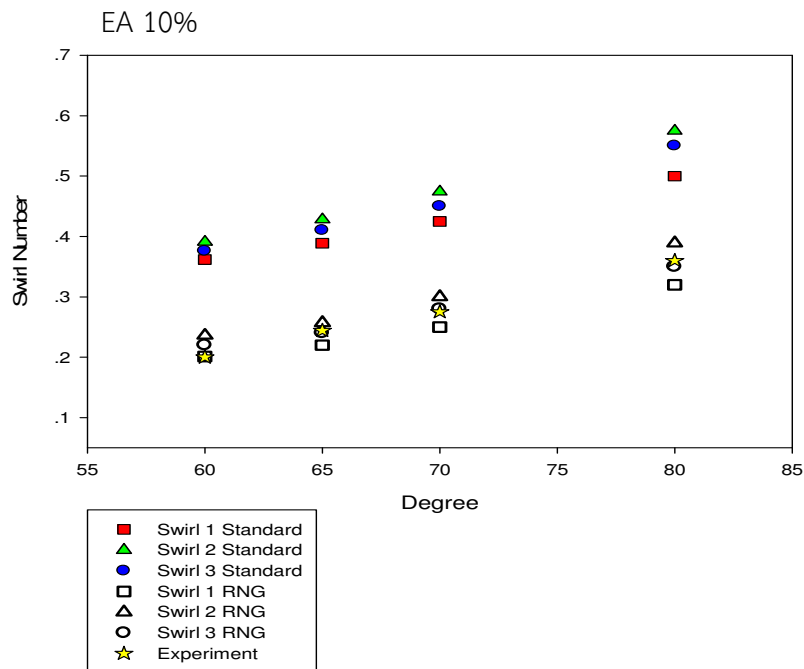
รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 50 : 50
(Primary : Secondary)



รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 40 : 60 (Primary : Secondary)



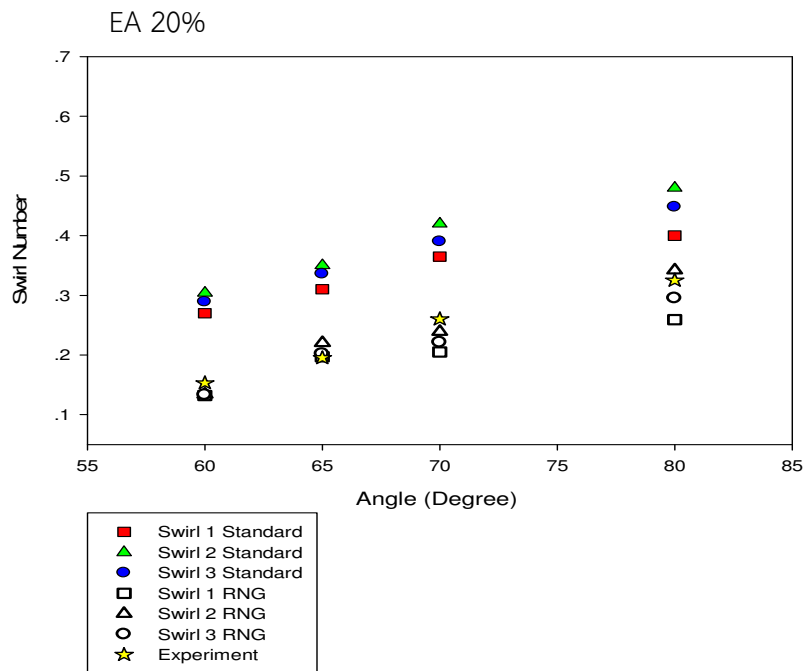
รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 30 : 70 (Primary : Secondary)



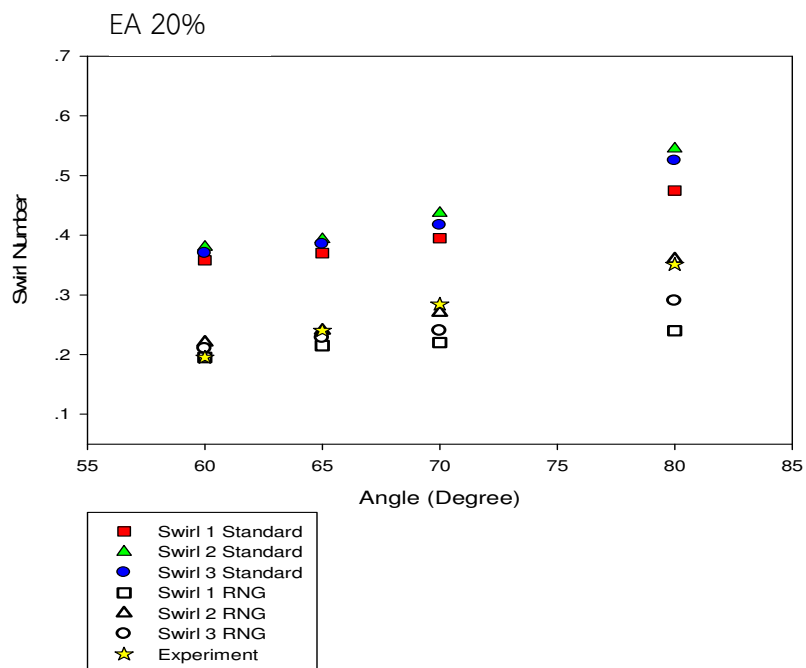
รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 20 : 80
(Primary : Secondary)

จากรูปที่ 5.4, 5.5, 5.6, และ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบของแบบจำลอง standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินเป็น 10% (Excess air 10%) พบว่าค่าของเลขสเวิร์ลของแบบจำลอง $k-\epsilon$ Standard ตั้งแต่สัดส่วนอากาศ 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 20 : 80 อยู่ในช่วง 0.260-0.420, 0.320-0.520, 0.330-0.530 และ 0.350-0.550 ตามลำดับ ส่วนค่าของเลขสเวิร์ลของแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ อยู่ในช่วง 0.132-0.295, 0.195-0.290, 0.200-0.320 และ 0.201-0.350 ตามลำดับ ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่าการจำลองทั้งสองรูปแบบ ค่าของเลขสเวิร์ลจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งมุม 80° , 70° , 65° และต่ำสุดที่มุม 60° ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนอากาศส่วนที่ 2 (Secondary) จาก 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 20 : 80 ส่งผลให้เลขสเวิร์ลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลอากาศส่วนที่ 2 (Secondary) เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดโมเมนตัมในแนวสัมผัสมีมากกว่าโมเมนตัมในแนวแกน จึงส่งผลให้เลขสเวิร์ลมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอากาศส่วนที่ 2 (Secondary) และยังสังเกตเห็นว่า แบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ จะมีผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลอง standard $k-\epsilon$

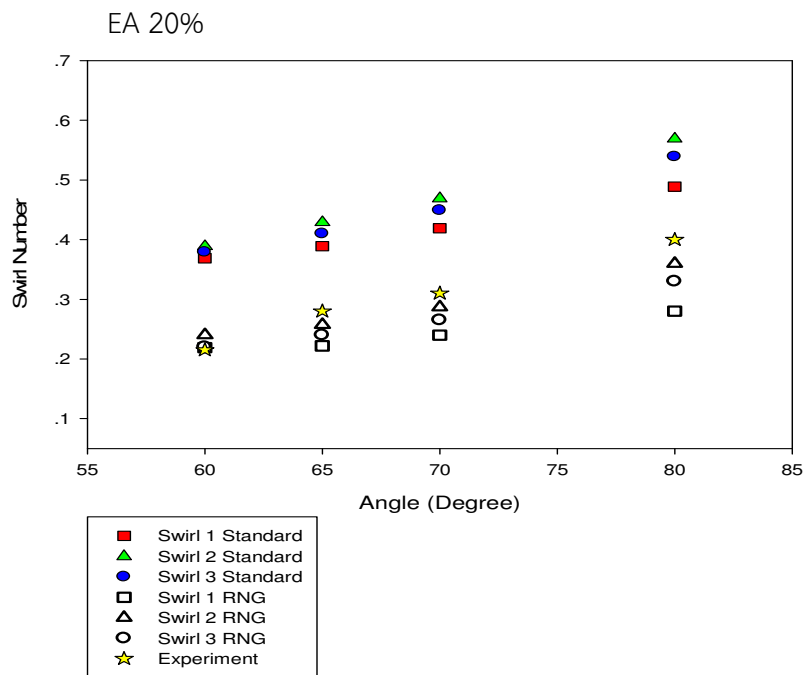
5.3.1.2 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% (Excess air 20%)



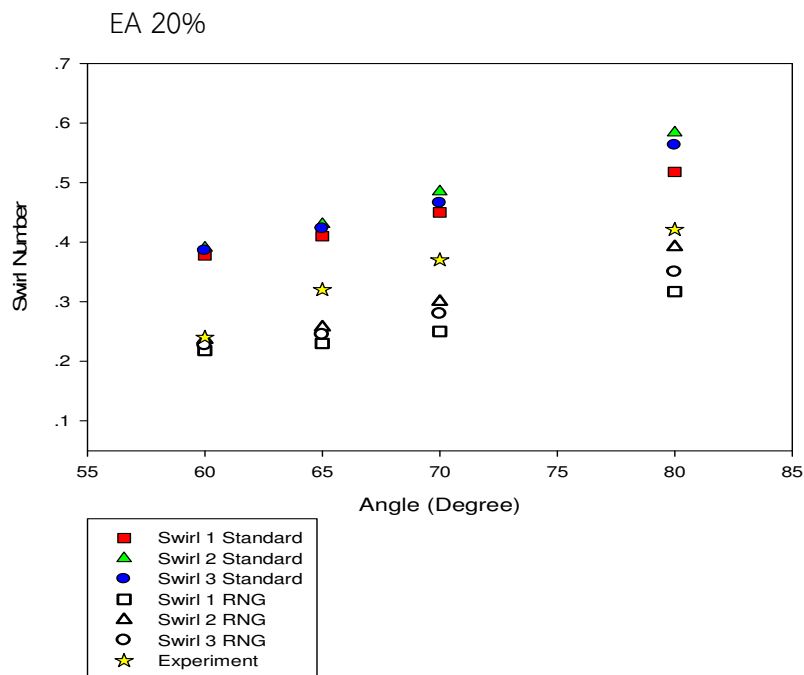
รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 50 : 50
(Primary : Secondary)



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 40 : 60
(Primary : Secondary)



รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 30 : 70
(Primary : Secondary)



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 20 : 80
(Primary : Secondary)

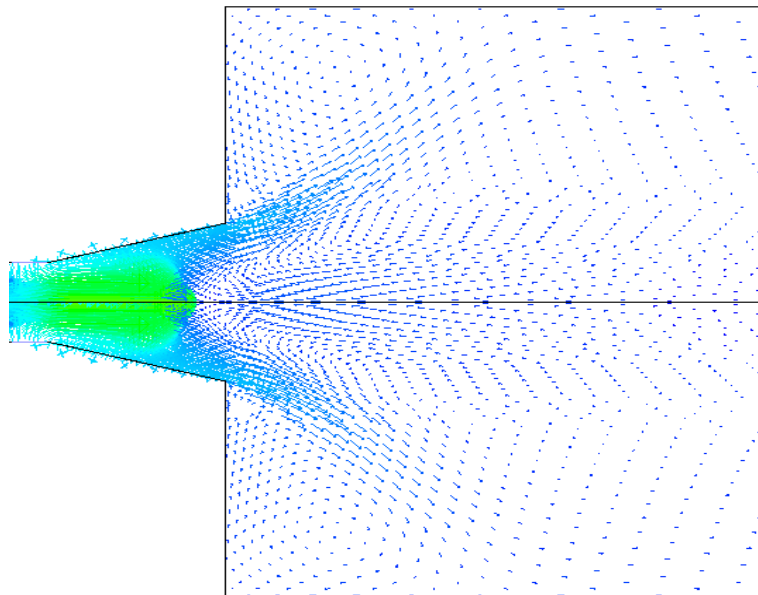
จากรูปที่ 5.8, 5.9, 5.10, และ 5.11 เปรียบเทียบของแบบจำลอง standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ กรณีมีการเพิ่มเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินเป็น 20% (Excess air 20%) พบว่าค่าของเลขสเวิร์ลนัมของแบบจำลอง standard $k-\epsilon$ ตั้งแต่สัดส่วนอากาศ 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ

20 : 80 อยู่ในช่วง 0.270-0.448, 0.358-0.525, 0.369-0.539 และ 0.378-0.563 ตามลำดับ ส่วนค่าของเลขสแควร์ของแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ อยู่ในช่วง 0.132-0.295, 0.195-0.290, 0.219-0.330 และ 0.218-0.350 ตามลำดับ และสังเกตเห็นถึงค่าของเลขสแควร์ที่มีการเพิ่มขึ้นจากกรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% เนื่องจากมวลอากาศที่และความเร็วที่ป้อนให้กับระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้ของเลขสแควร์มีค่ามากเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามไม่ว่ากรณีใดๆเมื่อมีการเพิ่มของมุมมองจะส่งผลกระทบให้ค่าของเลขสแควร์มีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบของแบบจำลองทั้งสองชนิดสังเกตได้ว่าแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ มีผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลอง standard $k-\epsilon$

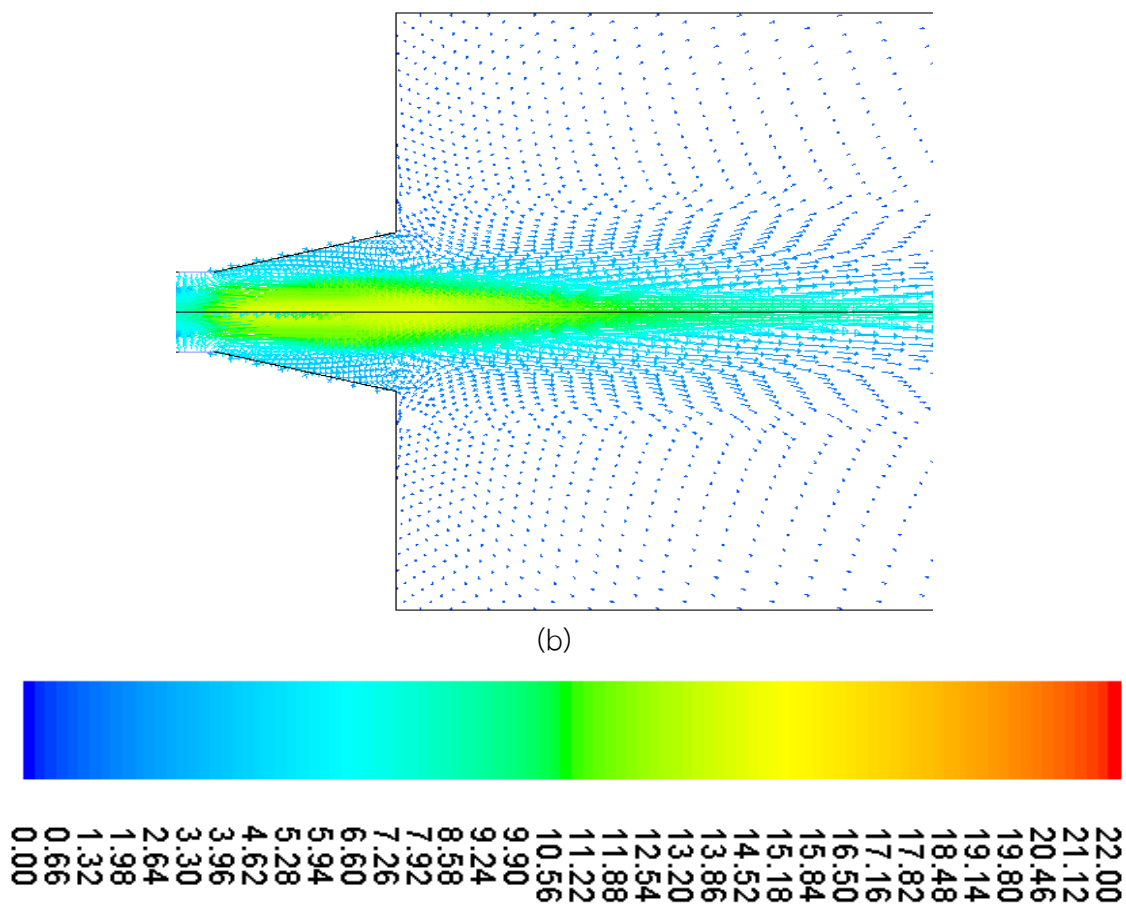
5.3.2 เปรียบเทียบสนามเวกเตอร์ความเร็วภายในหัวเผาของแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$

สำหรับการจำลองนี้ได้แสดงผลในลักษณะเวกเตอร์ความเร็วของอากาศบริเวณใกล้หัวเผาโดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนอากาศ 50 : 50 และ 20 : 80 ในขณะเดียวกันนั้นทำการเปรียบเทียบมุมของ Swirl ที่ใช้ในการจำลองเป็น 60° , 65° , 70° และ 80° เพื่อดูพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในหัวเผาเชื้อเพลิงสำหรับแบบจำลอง และรายละเอียดที่เกิดขึ้นบริเวณหัวเผาสามารถดูได้ที่ ภาคผนวก ก.

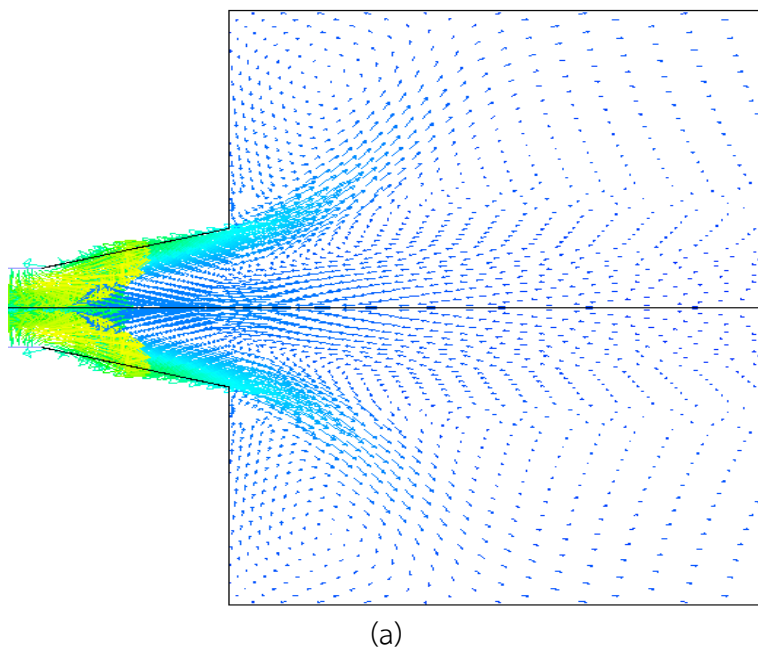
5.3.2.1 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% (Excess air 10%)

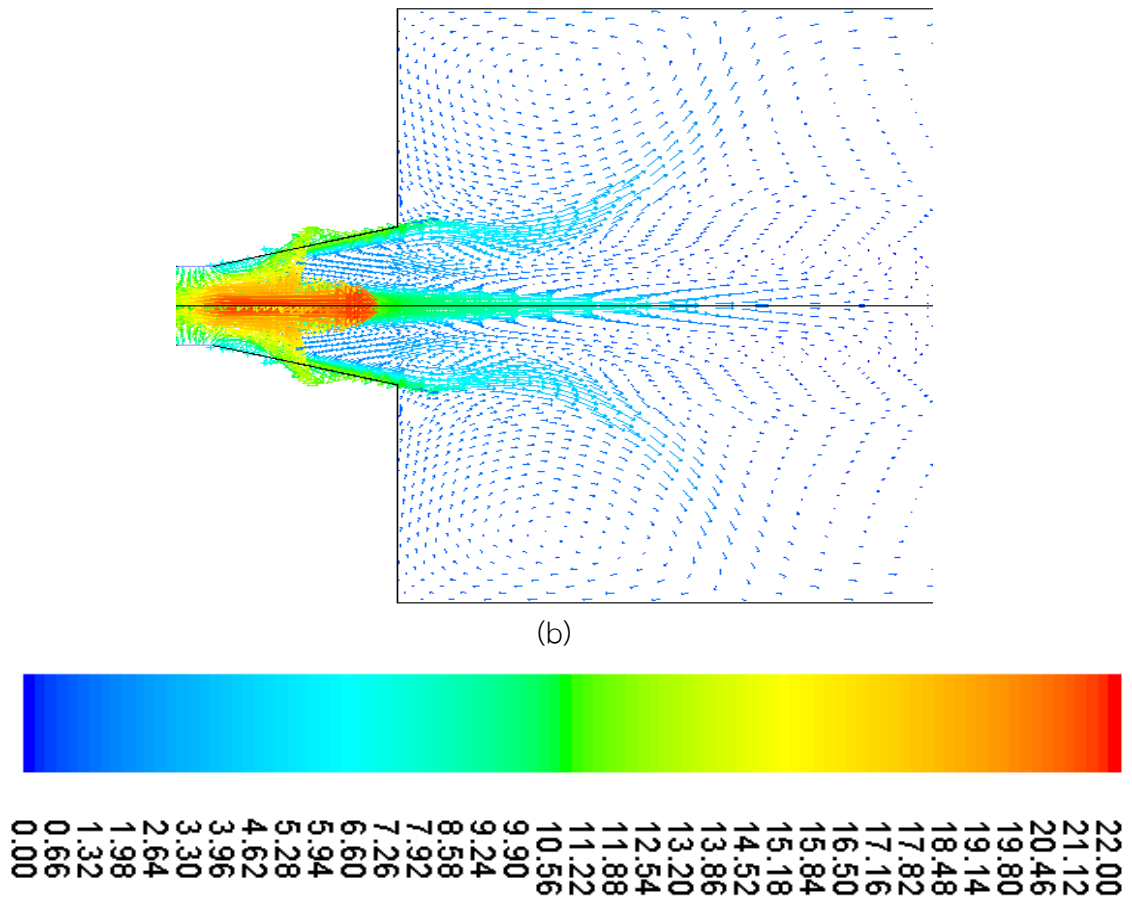


(a)

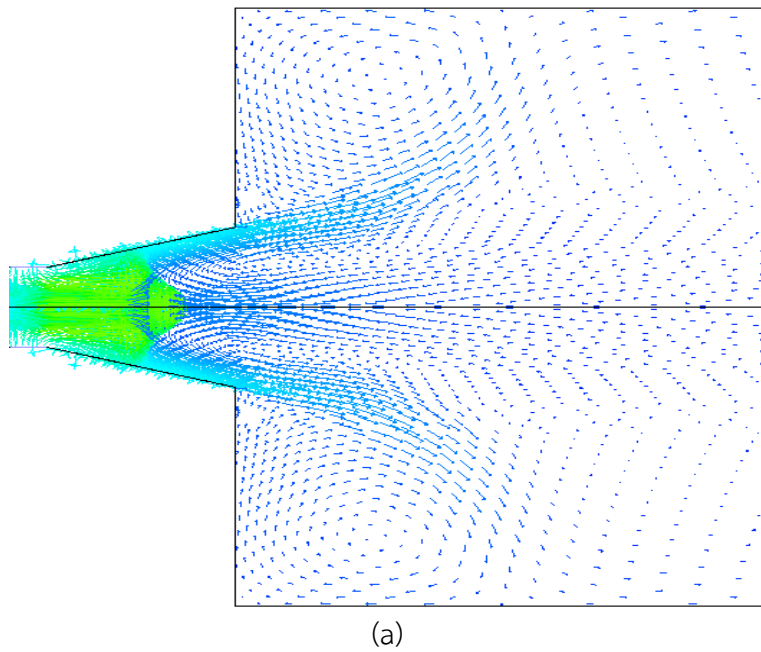


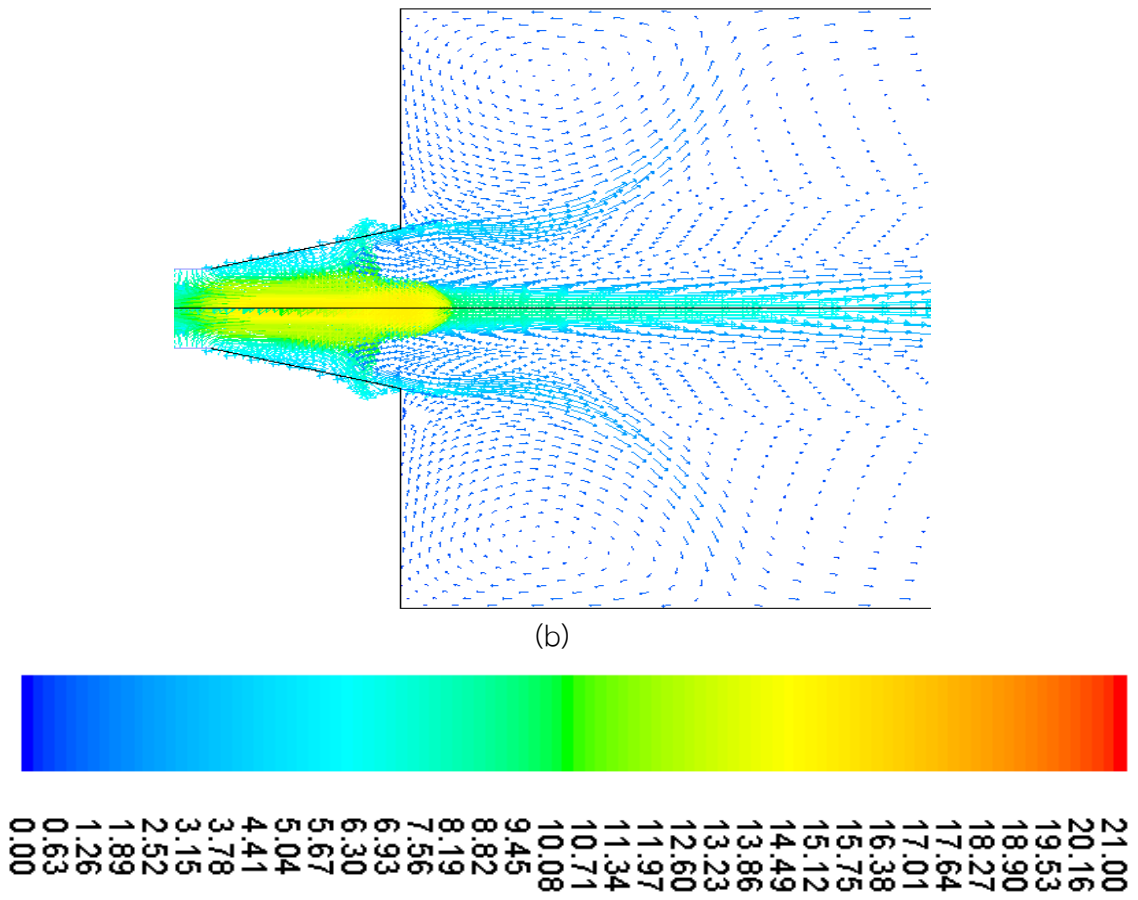
รูปที่ 5.12 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$



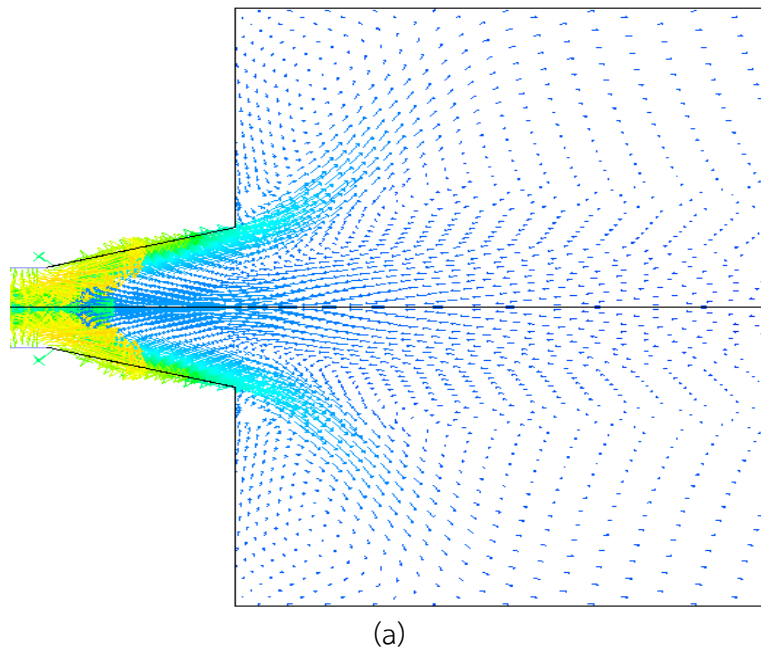


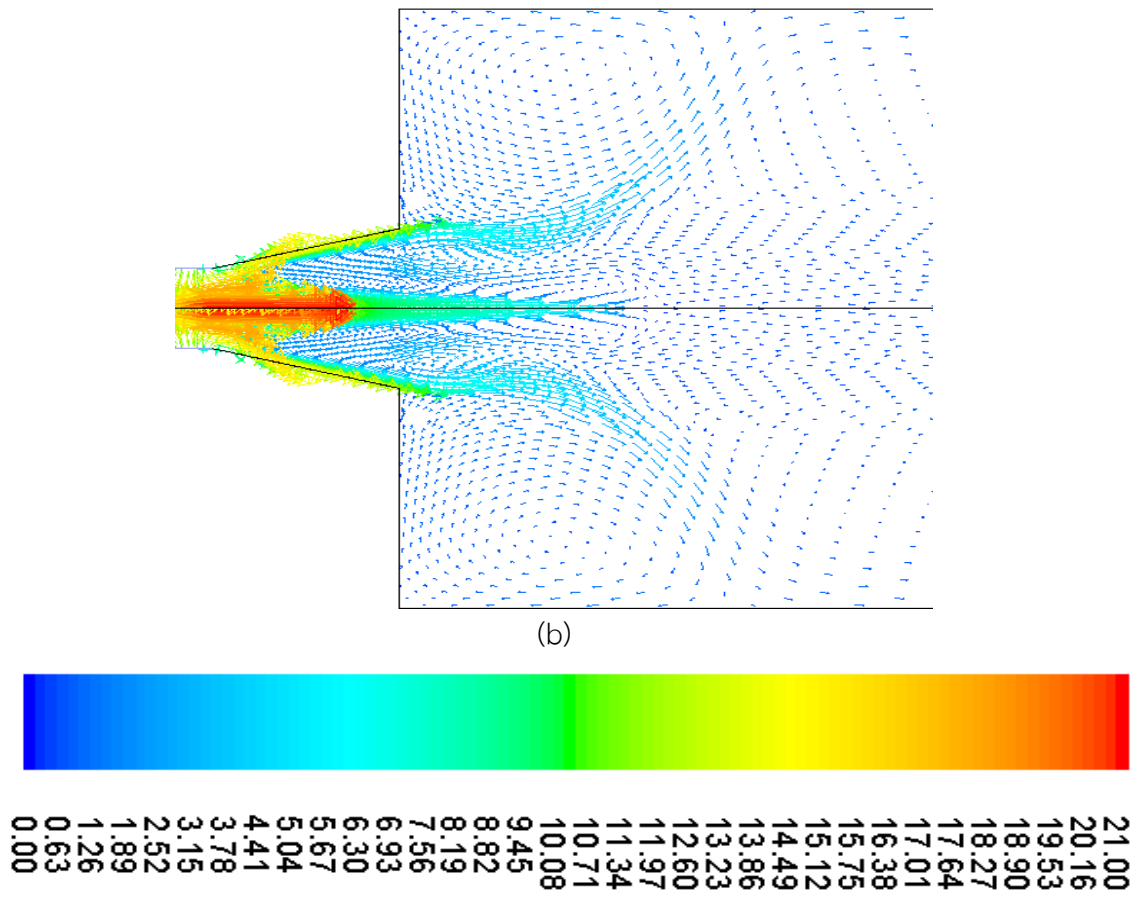
รูปที่ 5.13 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$





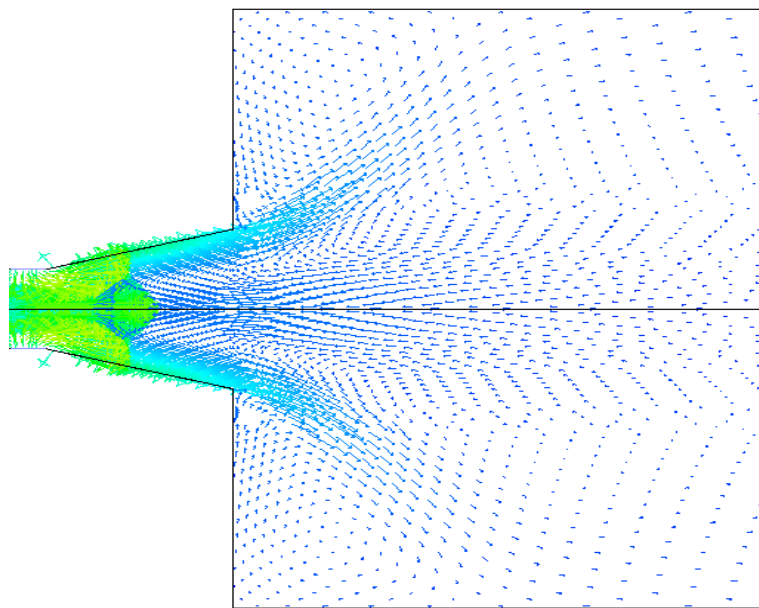
รูปที่ 5.14 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$



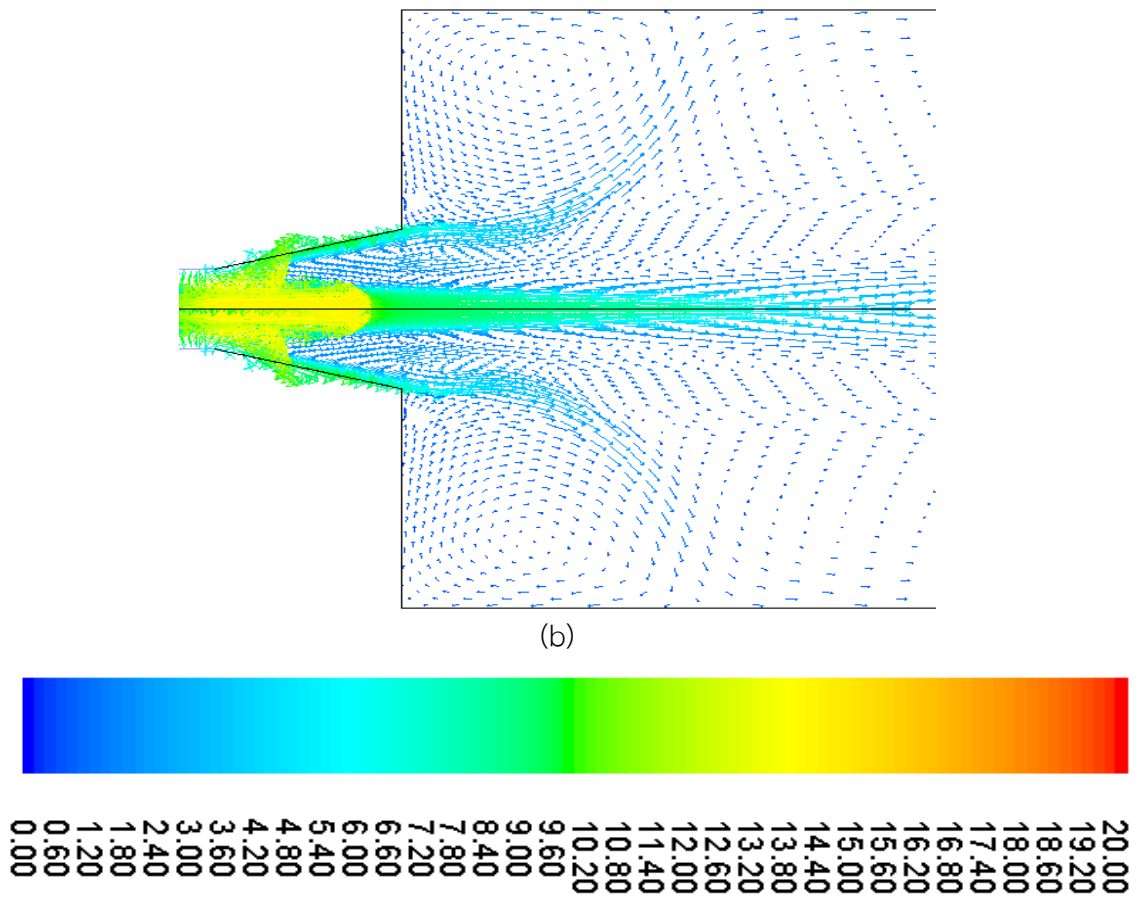


(b)

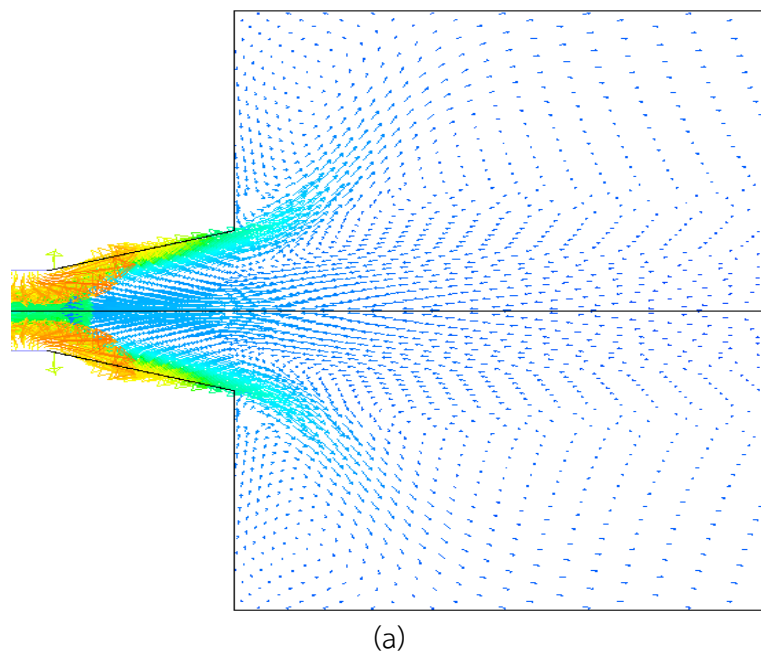
รูปที่ 5.15 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัปดาห์อากาศ 20:80 (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$

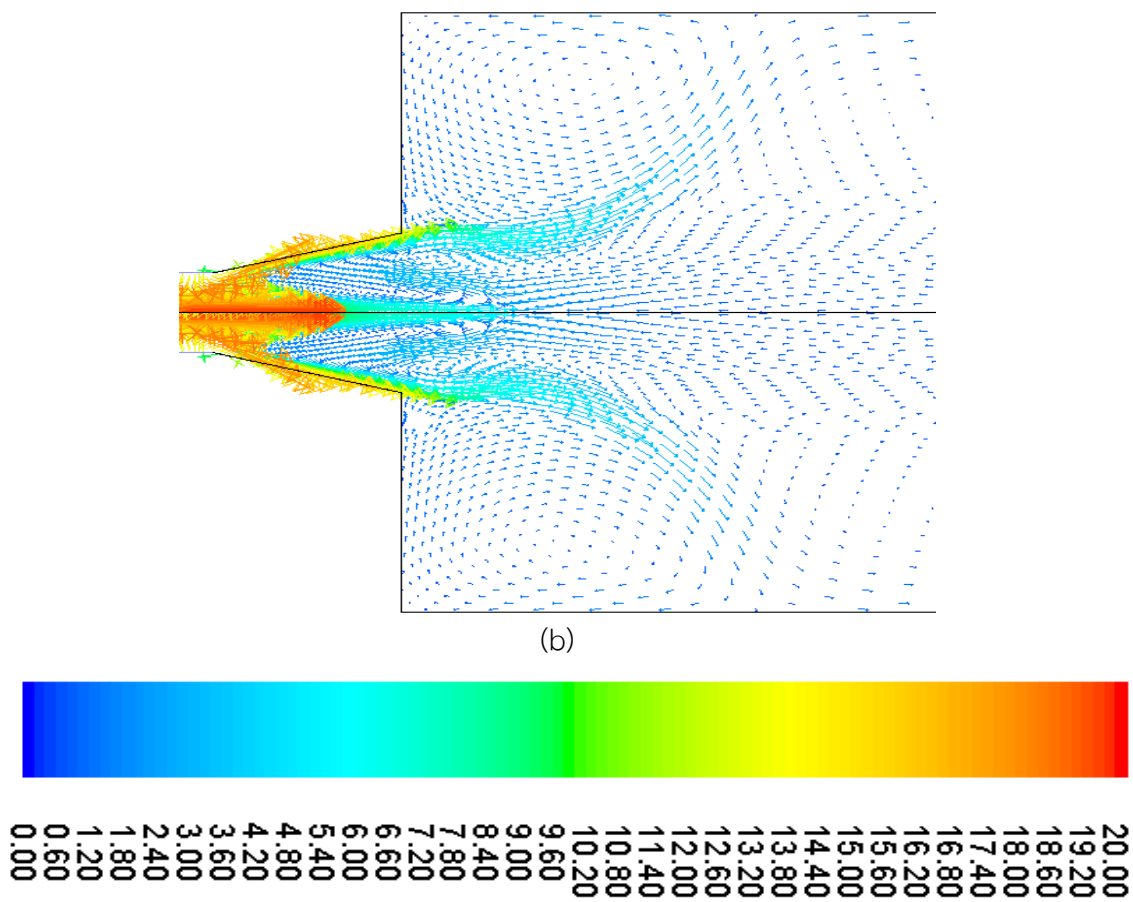


(a)

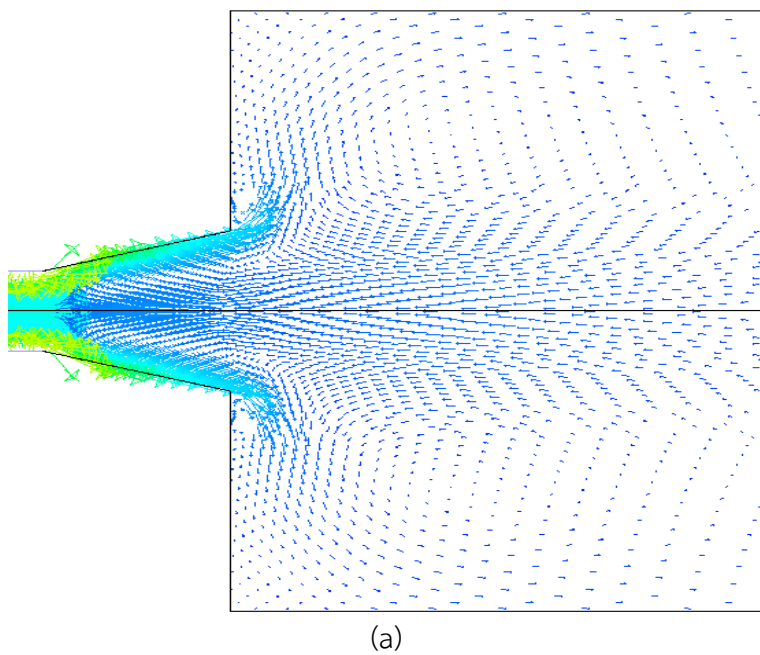


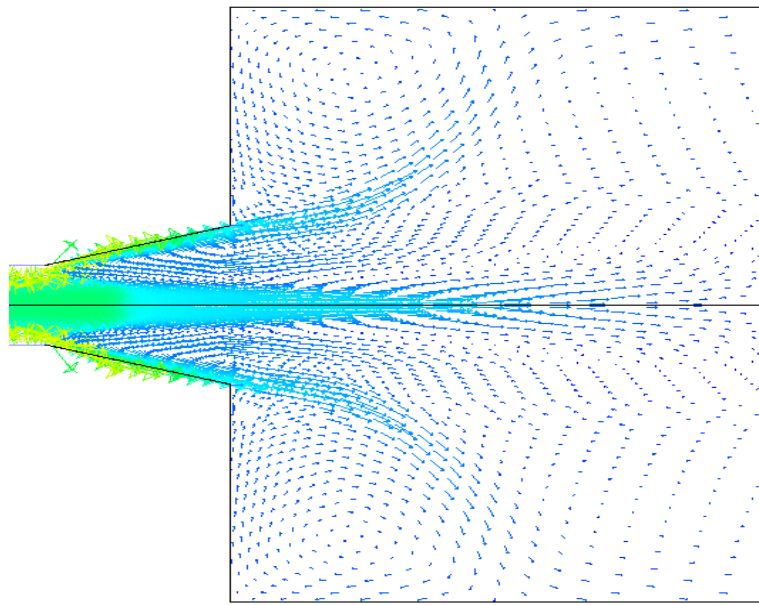
รูปที่ 5.16 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$





รูปที่ 5.17 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$



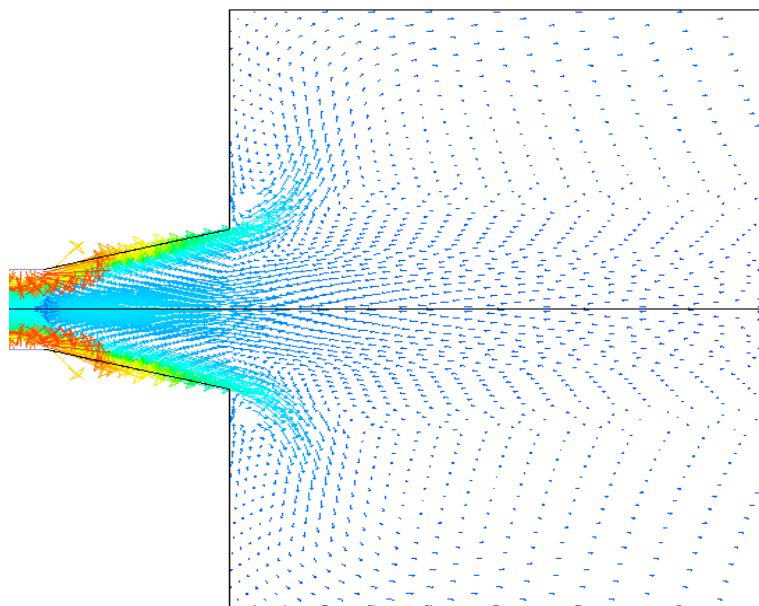


(a)

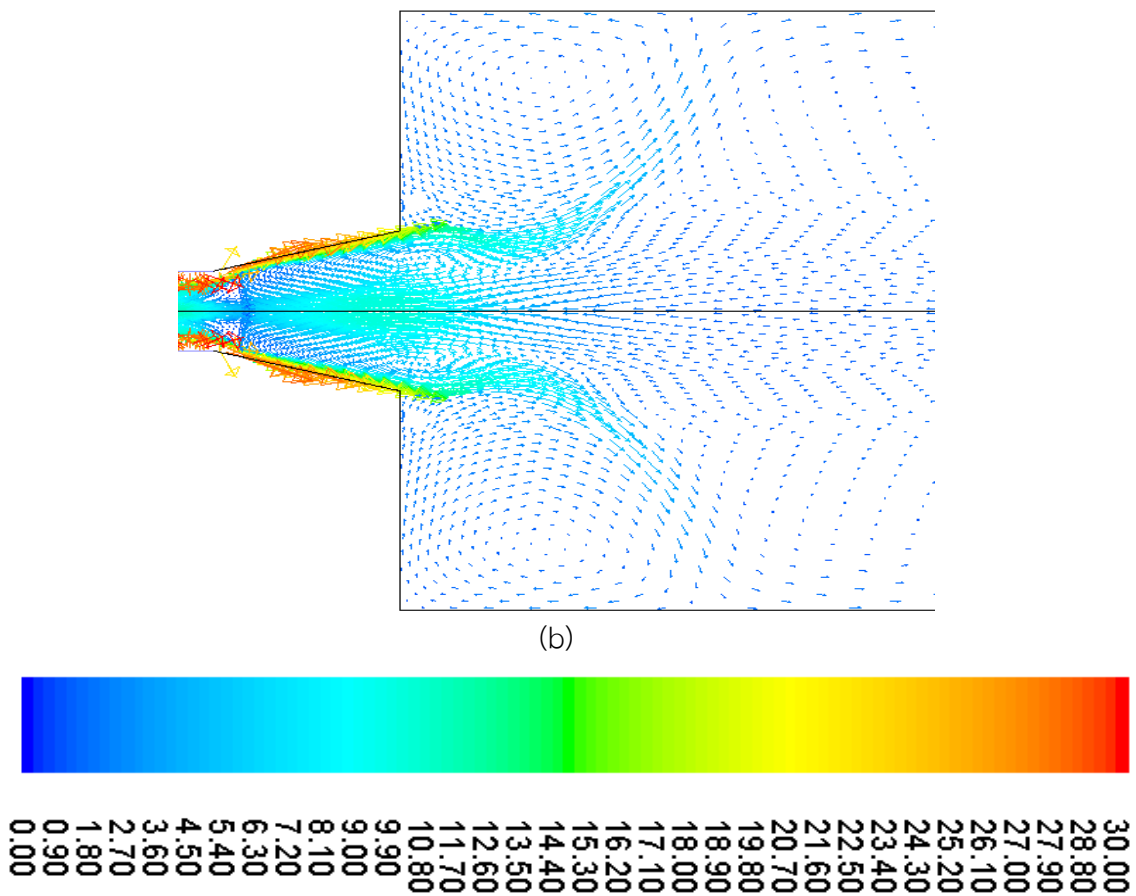


30.00
28.80
27.90
27.00
26.10
25.20
24.30
23.40
22.50
21.60
20.70
19.80
18.90
18.00
17.10
16.20
15.30
14.40
13.50
12.60
11.70
10.80
9.90
9.00
8.10
7.20
6.30
5.40
4.50
3.60
2.70
1.80
0.90
0.00

รูปที่ 5.18 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$



(a)

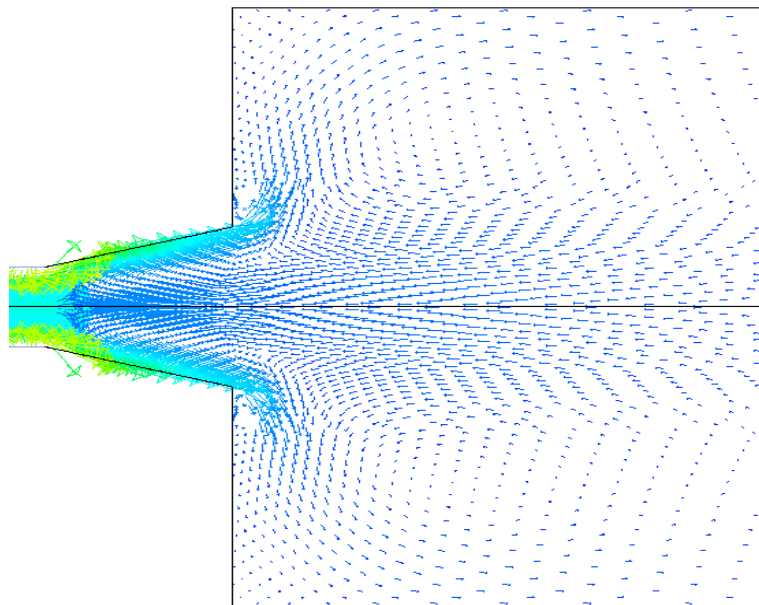


รูปที่ 5.19 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$

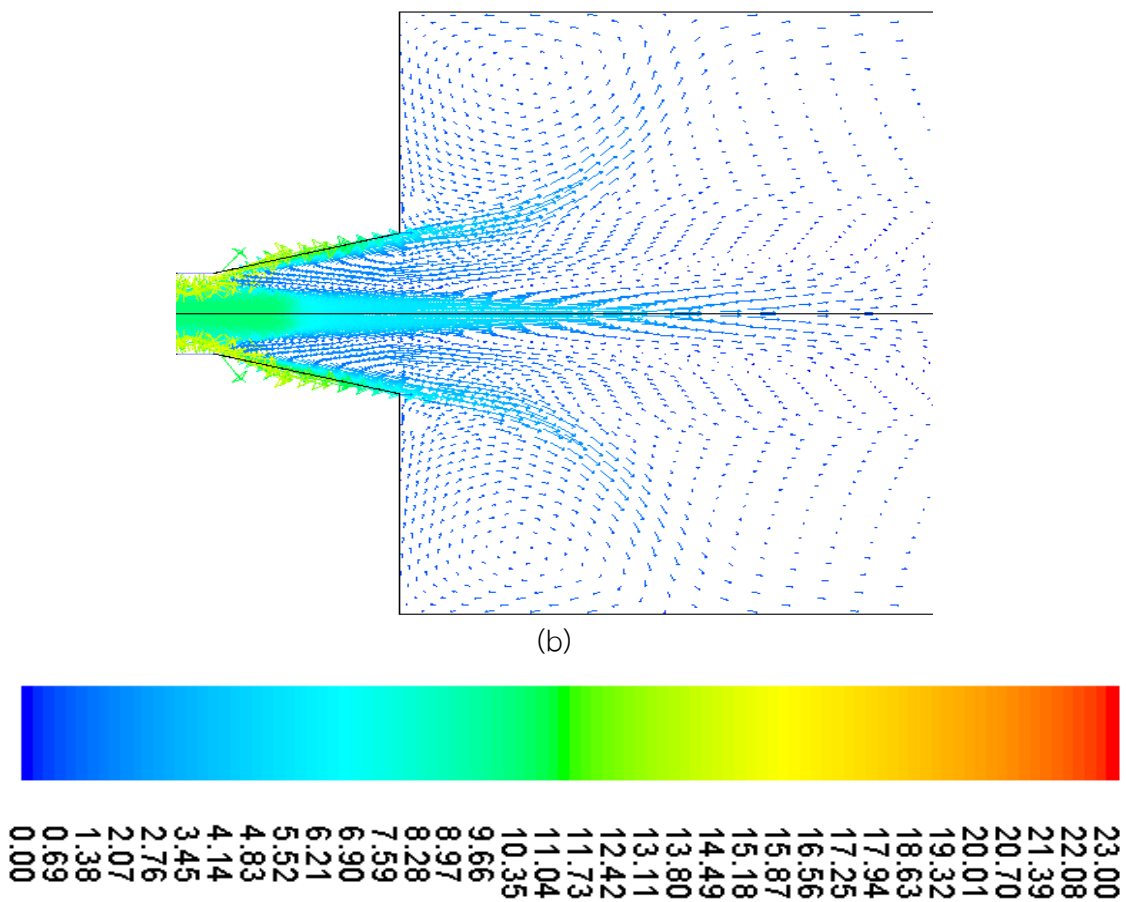
จากรูปที่ 5.12-5.19 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศ ระหว่างแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ กรณีสัดส่วนอากาศ 50:50 และ 20:80 ในขณะที่ใช้มุมในการจำลอง $60^\circ, 65^\circ, 70^\circ$ และ 80° โดยภาพรวมแล้วสามารถสังเกตเห็นการหมุนวนของกระแสภายในแกนกลางของเตาเผา (Internal Recirculation Zone, IRZ) และการหมุนวนของกระแสนอกแกนกลางของเตาเผา (External Recirculation Zone, ERZ) บริเวณทางออกจากหัวเผา เนื่องจากบริเวณใกล้หัวเผาได้รับอิทธิพลจากอากาศส่วนที่สองซึ่งเป็นกระแสการไหลที่มีการหมุนวน จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้กระแสการไหลเป็นลักษณะที่บานออกและทำให้กระแสการไหลบริเวณแกนกลางเกิดการไหลแบบย้อนกลับเนื่องจากในช่วงบริเวณนี้มีความดันที่ต่ำกว่าบริเวณใกล้หัวเผา จึงทำให้ความดันที่บริเวณใกล้หัวเผาสามารถเอาชนะความดันบริเวณใกล้หัวเผาได้ เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด IRZ ในบริเวณนี้ ในทำนองเดียวกันนั้นอิทธิพลของอากาศส่วนที่สองทำให้เกิดแรงเฉือนกับบริเวณทางออกของดีฟิวเซอร์ (Diffuser) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกระแสการไหลแบบย้อนกลับในบริเวณ ERZ เช่นกัน

เมื่อนำแบบจำลองเวกเตอร์ความเร็วของอากาศในรูปแบบ Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ มาเปรียบเทียบกันพบว่า แบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ มีลักษณะบานออกและเป็นลักษณะลำเจ็ทน้อยกว่า RNG $k-\epsilon$ เนื่องจากแบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ จะมีพจน์ที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลที่มีความเครียดเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน และสามารถคำนวณให้เห็นถึงกระแสการไหลที่มีความปั่นป่วนได้ละเอียดกว่าแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ จึงทำให้เห็นถึงลักษณะการหมุนวนของกระแสการไหลได้ชัดเจนมากกว่า ในขณะที่เดียวกันนั้นการเพิ่มมุมจาก 60° , 65° , 70° และ 80° มีผลกระทบทำให้เกิดลักษณะกระแสมุมวนภายใน (IRZ) และกระแสการหมุนวนภายนอก (ERZ) ลดลงตามลำดับเพราะการเพิ่มนั้นจะทำให้กระแสการไหลของมวลอากาศไหลเข้าสู่แนวแกนกลางของหัวเผาได้มากขึ้น และทำให้กระแสการไหลของมวลอากาศในแนวสัมผัสลดลง (ส่วนที่ใช้ในการสร้างอากาศหมุนวน) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เห็นเป็นลักษณะของลำเจ็ทที่ยาวเกิดขึ้นบริเวณใกล้หัวเผา

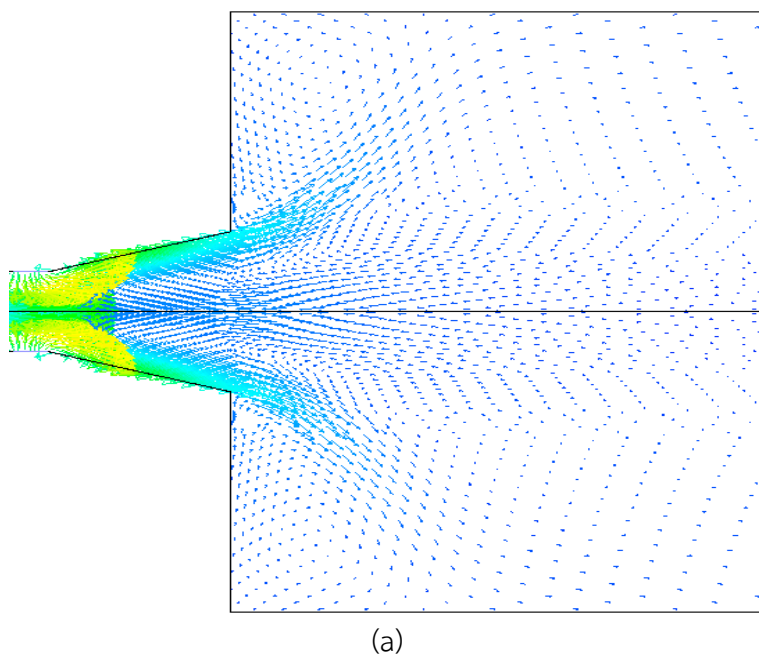
5.3.2.2 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% (Excess air 20%)

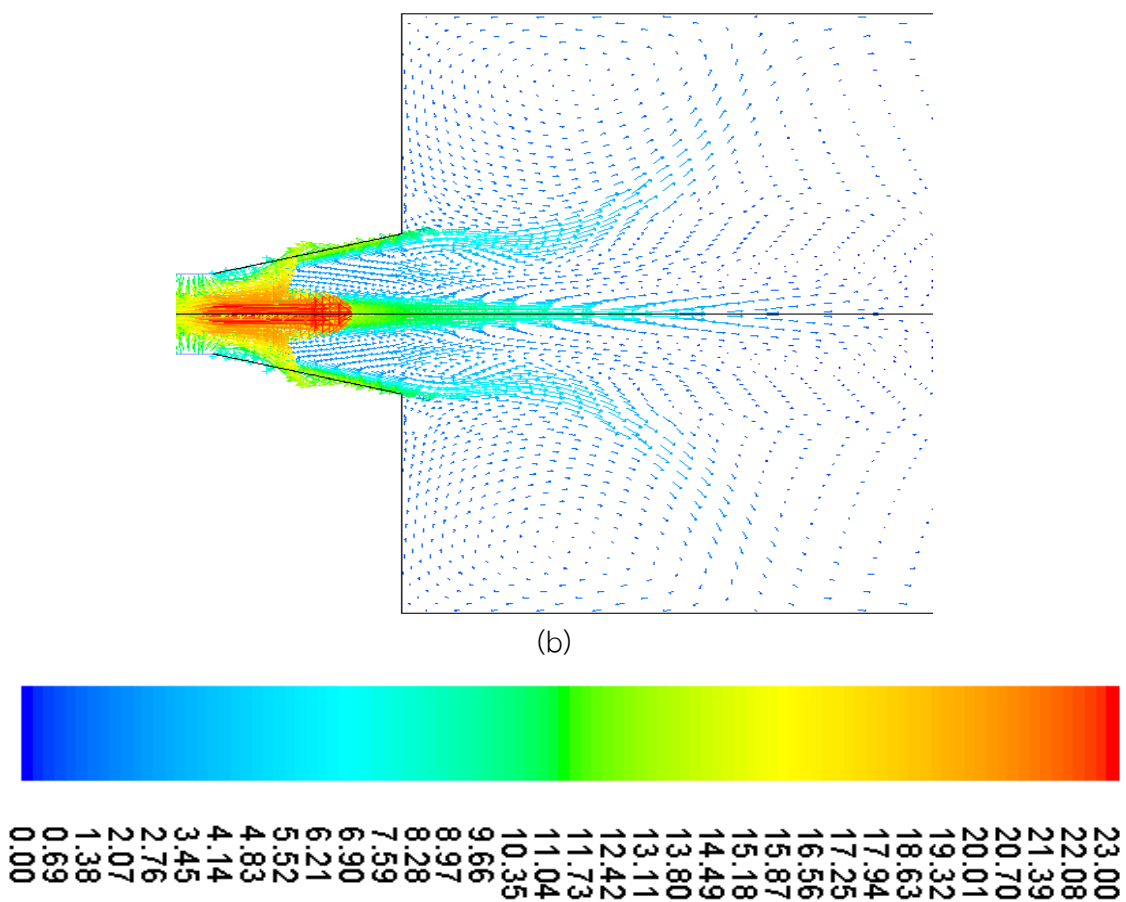


(a)

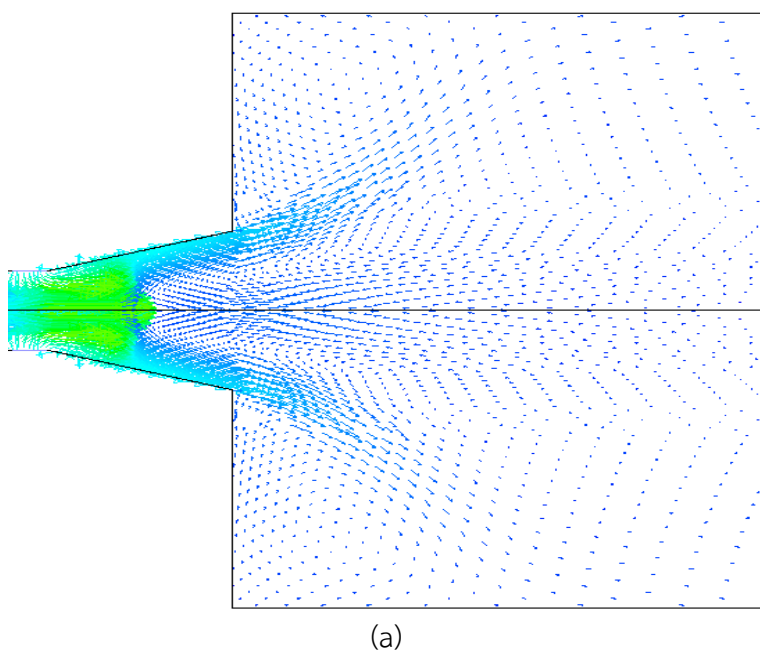


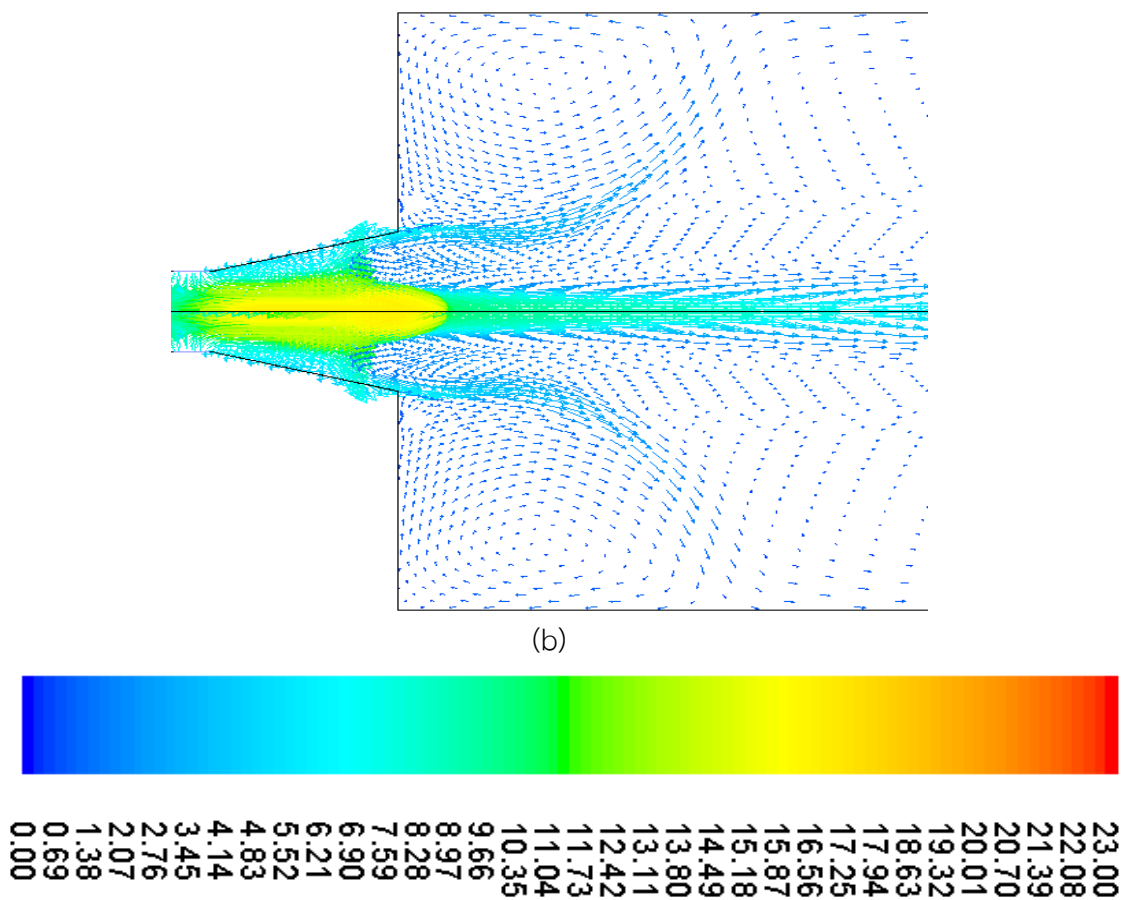
รูปที่ 5.20 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$



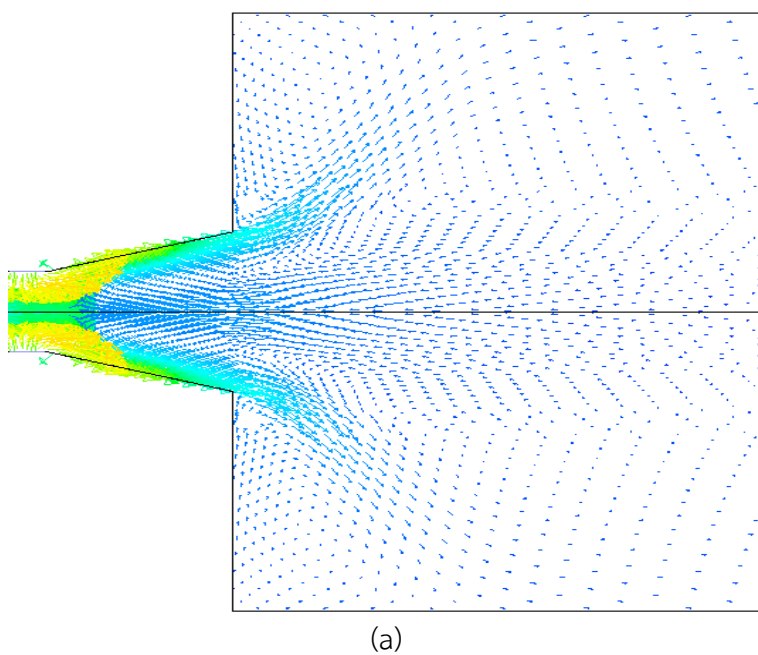


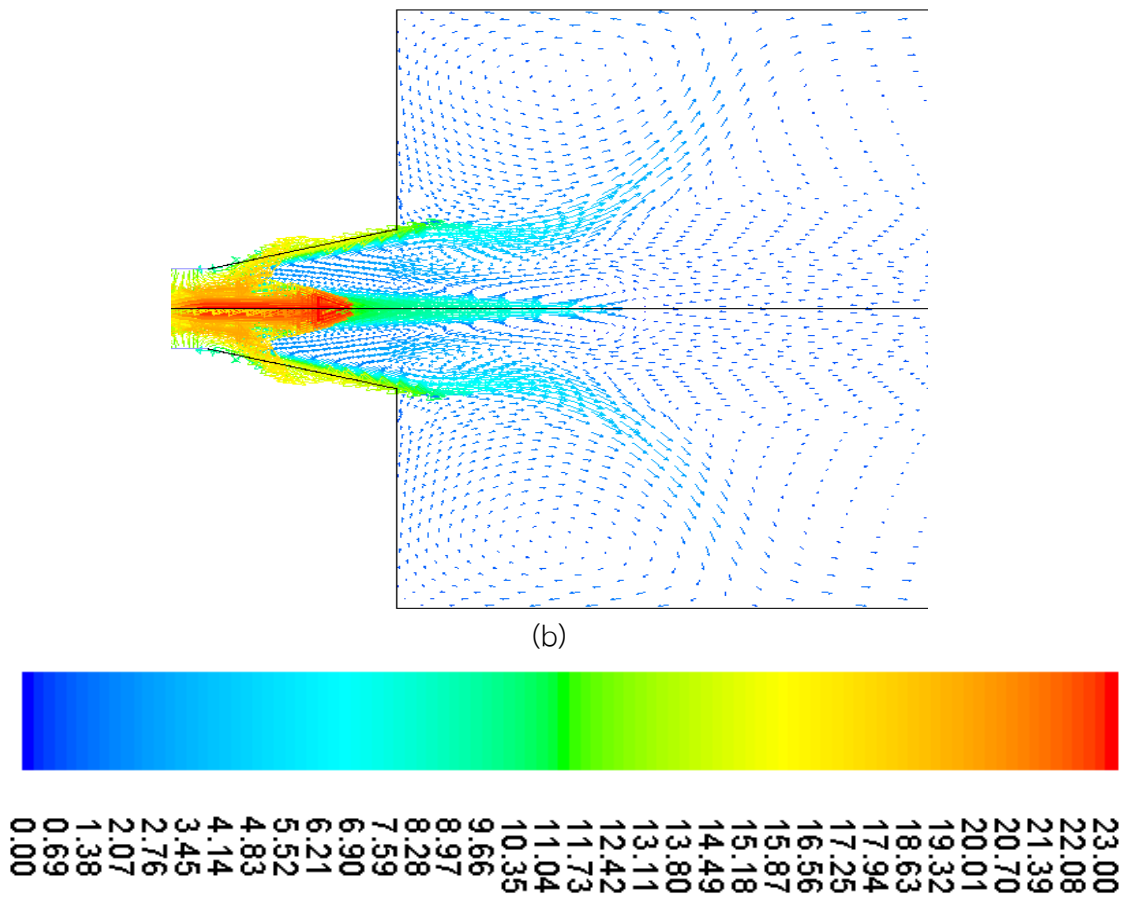
รูปที่ 5.21 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มีมุม 60° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$



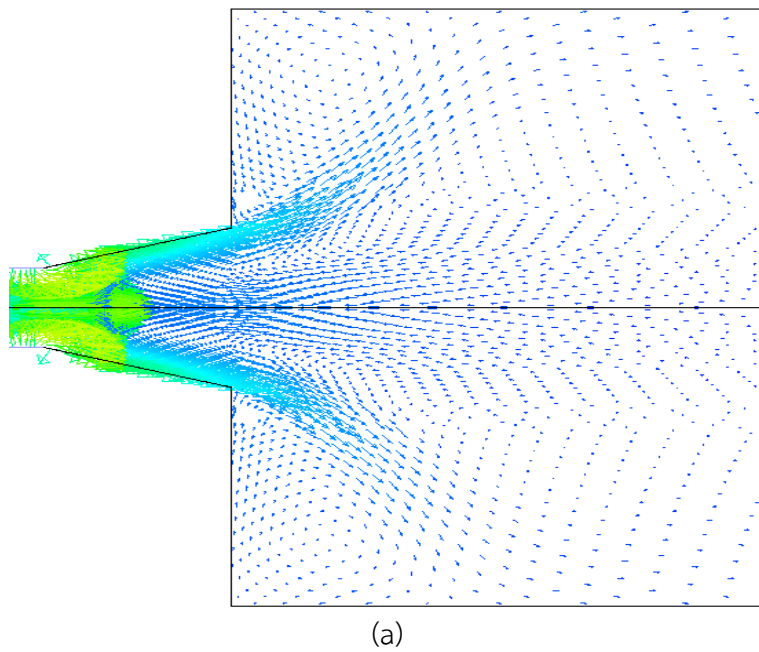


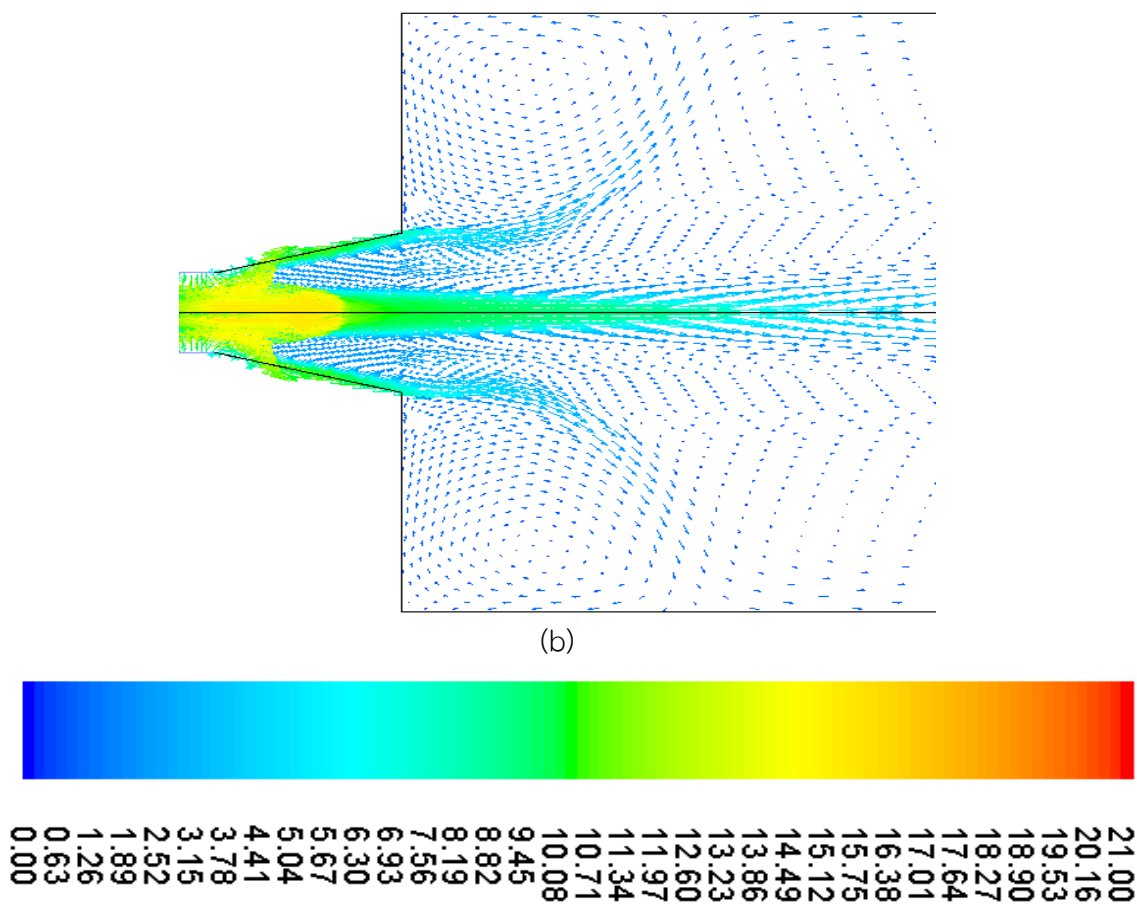
รูปที่ 5.22 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$



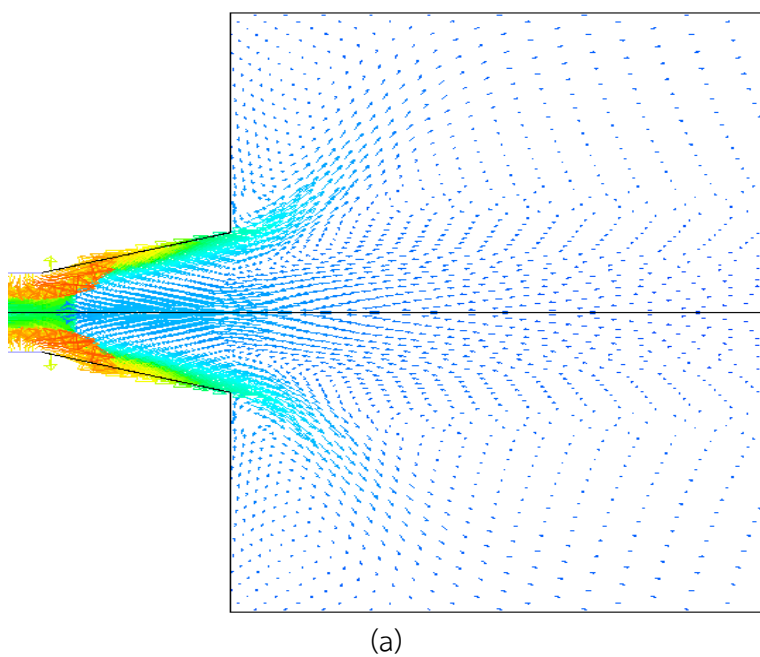


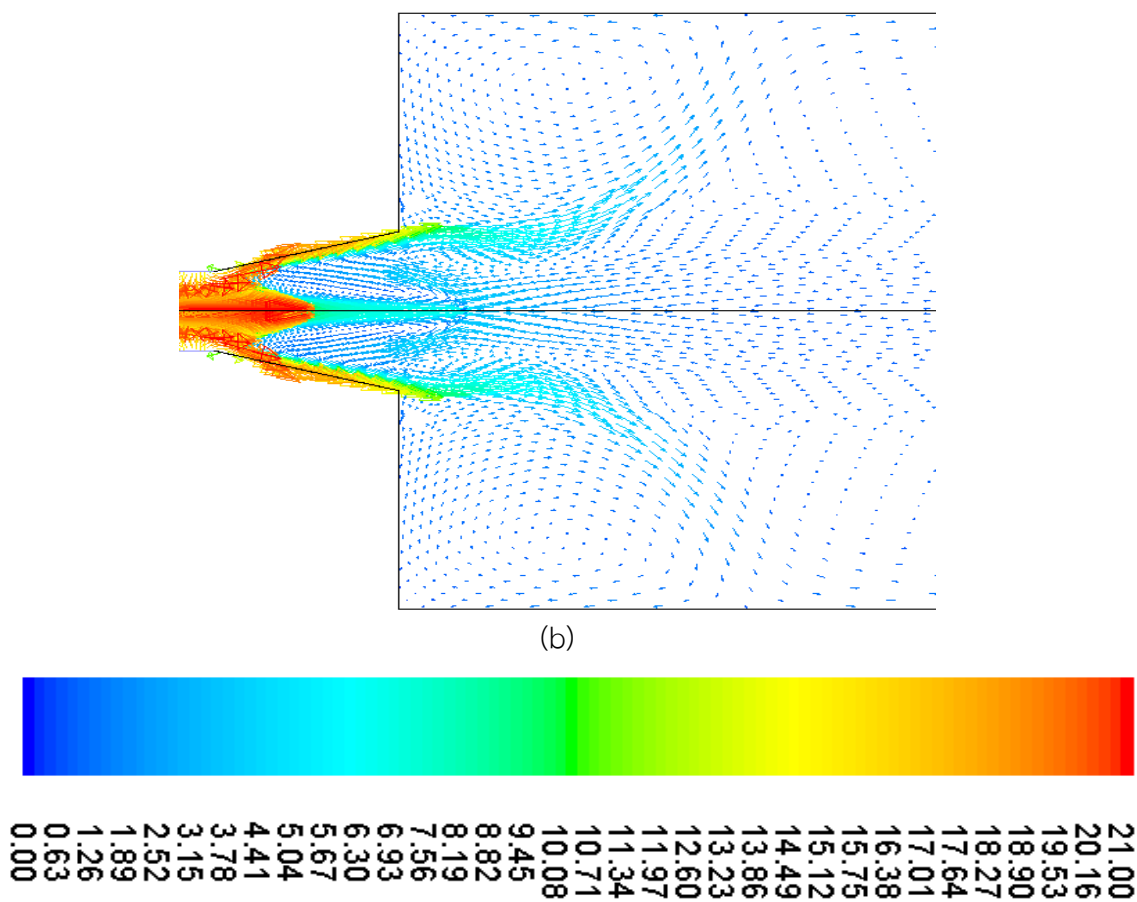
รูปที่ 5.23 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$



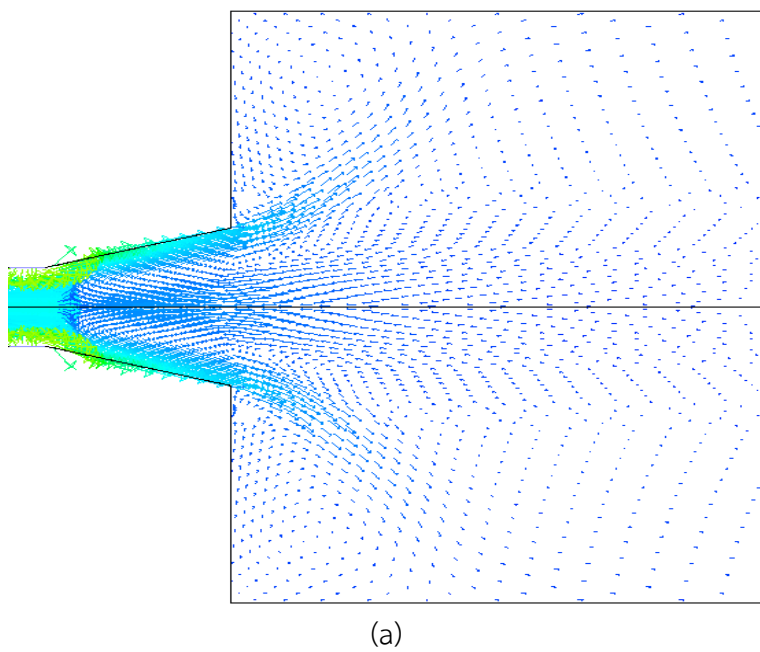


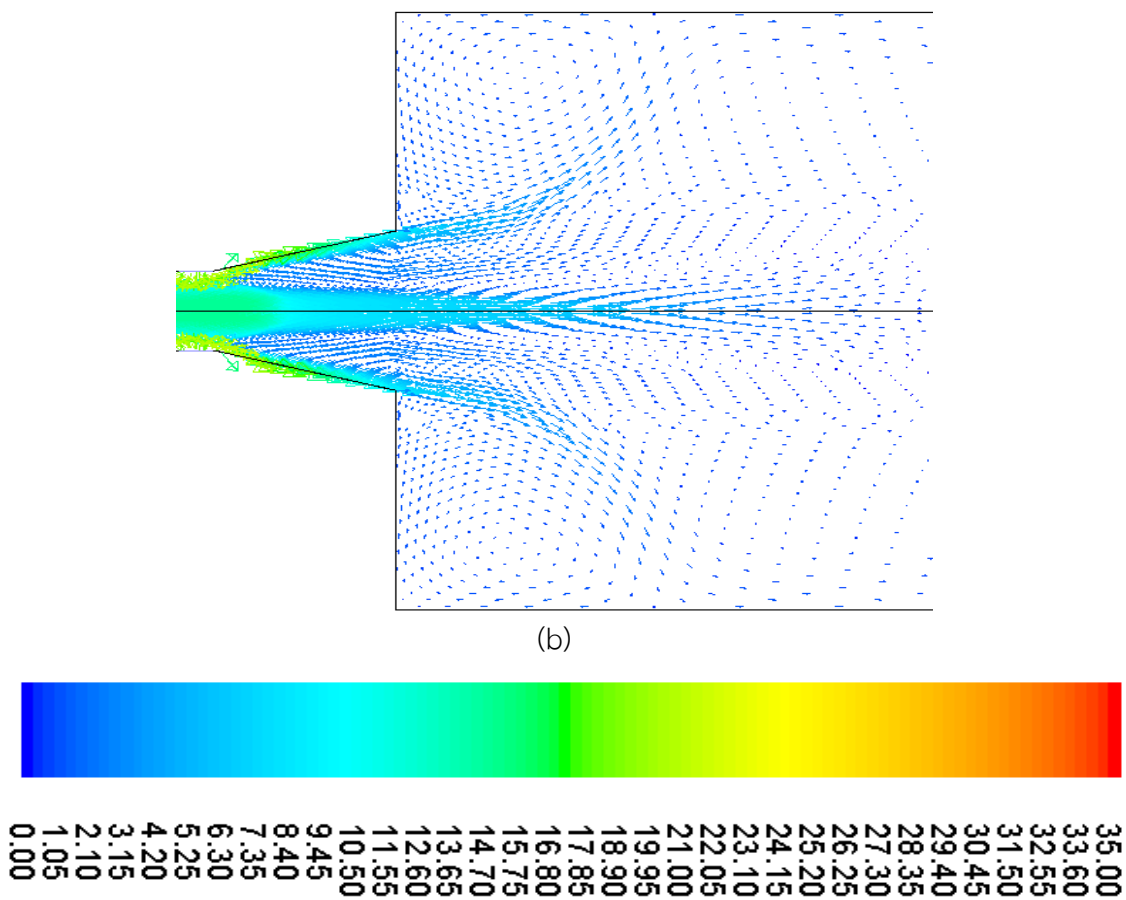
รูปที่ 5.24 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$



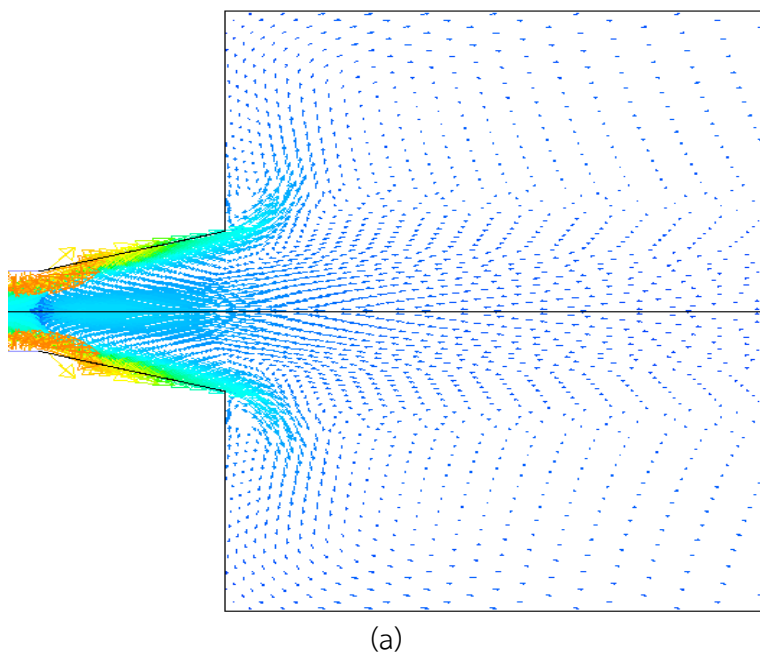


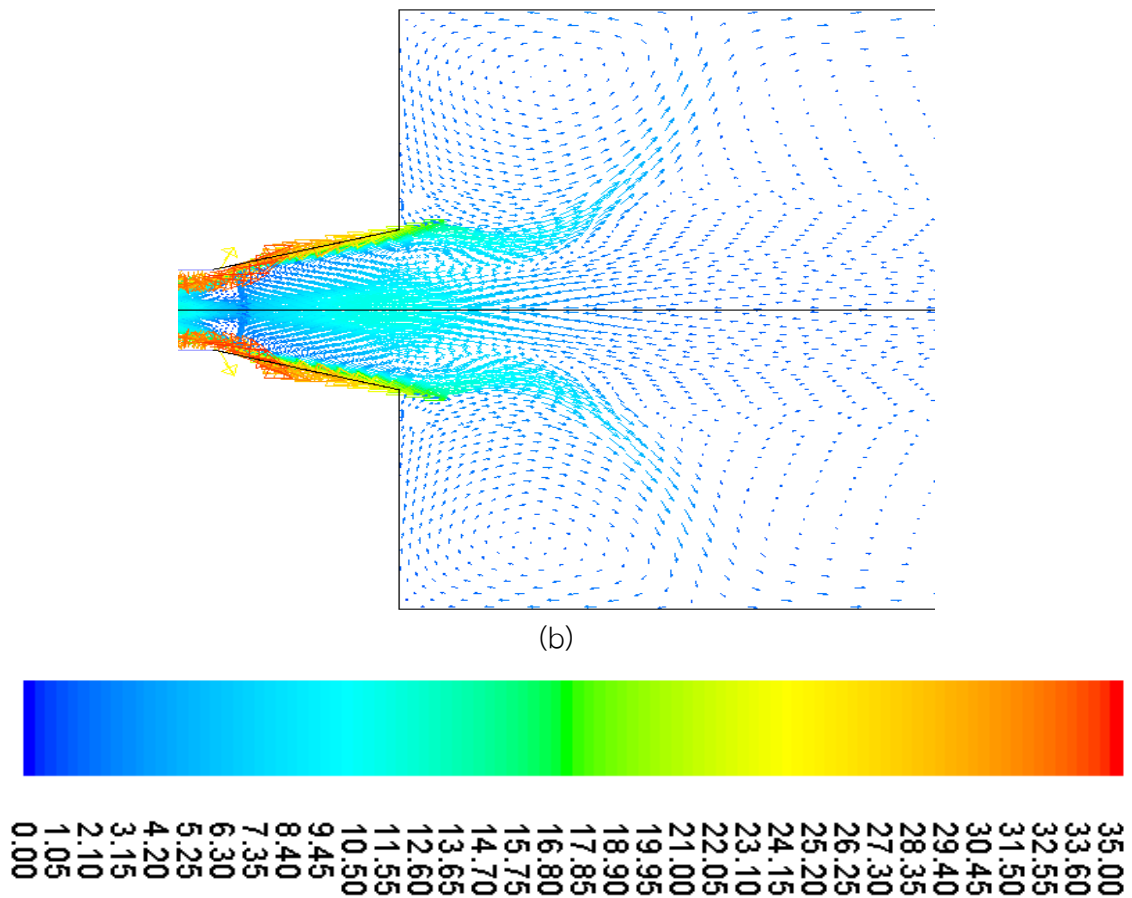
รูปที่ 5.25 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$





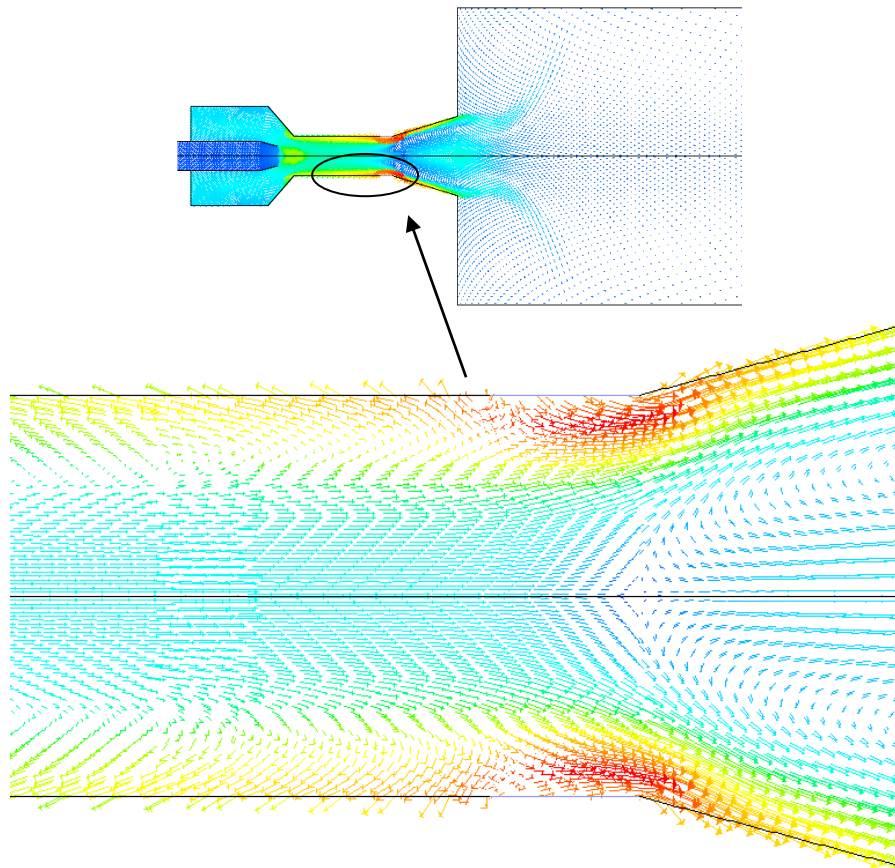
รูปที่ 5.26 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$





รูปที่ 5.27 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเพาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$

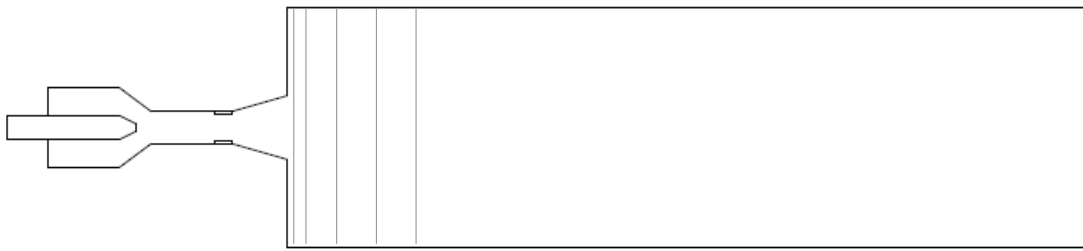
จากรูปที่ 5.19-5.27 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศระหว่างแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% โดยใช้สัดส่วนอากาศ 50:50 และ 20:80 ในขณะที่มุมในการจำลองเท่ากับ 60° , 65° , 70° และ 80° สามารถสังเกตเห็นลักษณะการหมุนวนของกระแสน้ำในแกนกลางของเตาเผา (Internal Recirculation Zone, IRZ) และการหมุนวนของกระแสน้ำนอกแกนกลางของเตาเผา (External Recirculation Zone, ERZ) บริเวณทางออกจากหัวเผา จะเป็นในทิศทางทำนองเดียวกับหัวข้อ 5.3.2.1 และเมื่อนำแบบจำลองเวกเตอร์ความเร็วของอากาศในรูปแบบ Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ มาเปรียบเทียบกันพบว่า ปริมาณสัดส่วนอากาศ 20:80 ที่มุม 70° และ 80° แสดงให้เห็นทิศทางการไหลย้อนกลับขึ้นไปของกระแสน้ำเนื่องจากกระแสน้ำไหลในช่วงบริเวณนี้ถูกเหนี่ยวมาด้วยความแรงเฉือนบางส่วนของอากาศส่วนที่สอง จึงทำให้เกิดการไหลย้อนกลับไปยังบริเวณขอบด้านข้างของท่อ throat ดังแสดงในรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.28 ลักษณะการไหลย้อนกลับของกระแสความเร็ว

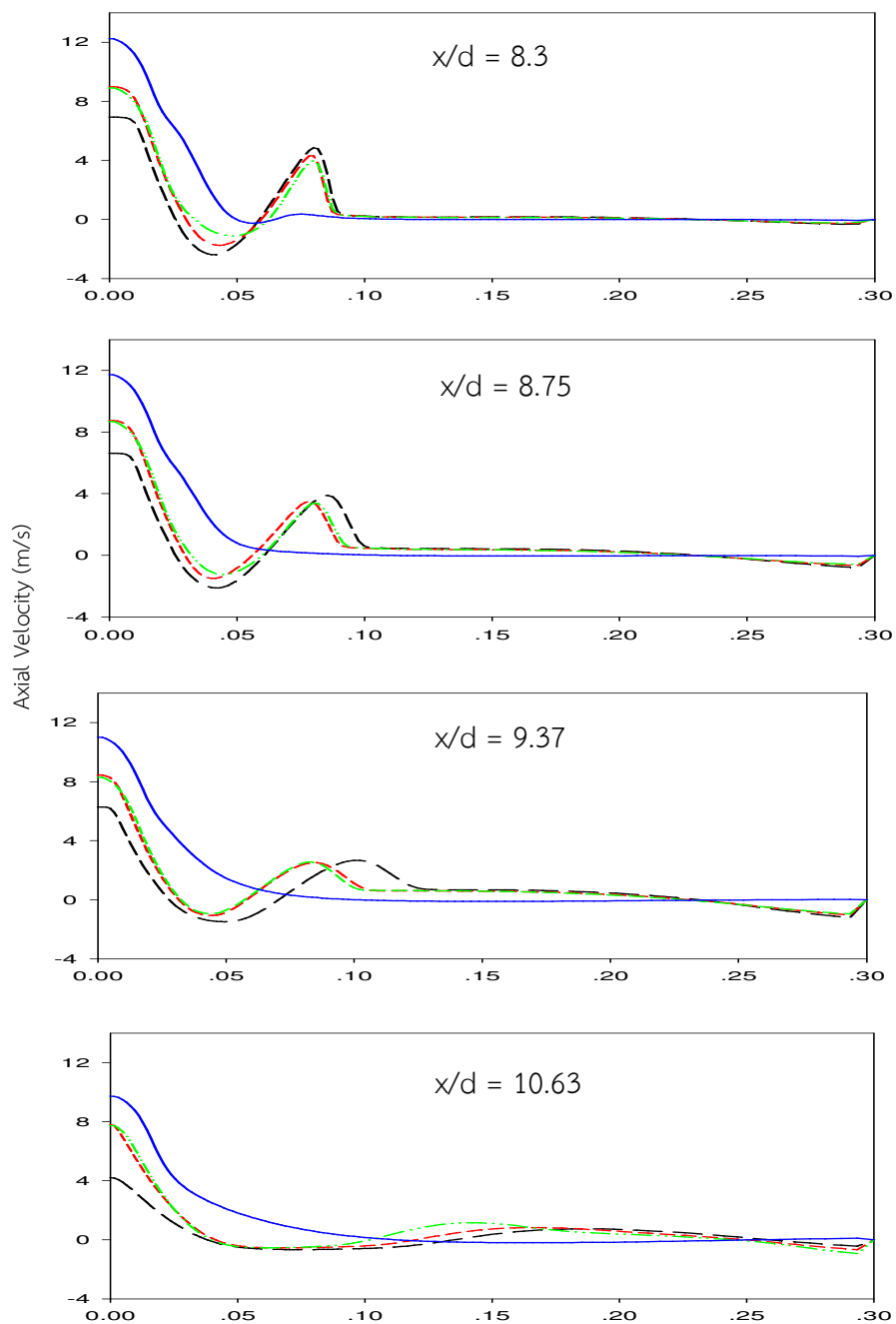
5.3.3 Rate of Decay ของความเร็วในแนวแกน (Axial Velocity) และ ความเร็วในการหมุนควง (Swirl Velocity)

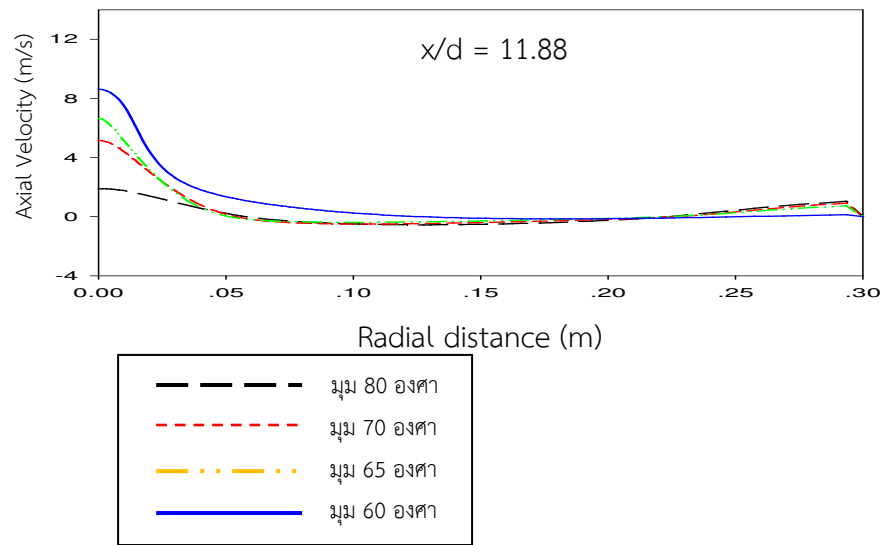
หัวข้อนี้แสดงผลของ rate of decay ของความเร็วในแนวแกน (Axial Velocity) และ rate of decay ของความเร็วในการหมุนควง (Swirl Velocity) นอกจากนี้ได้ทำการเลือกเก็บผลการจำลอง 5 ตำแหน่งตามแนวรัศมี ณ บริเวณใกล้หัวเผาที่ระนาบ $x/d = 8.3, 8.75, 9.37, 10.63$ และ 11.88 ดังแสดงในรูป 5.29 โดยเลือกแบบจำลอง RNG $k - \epsilon$ เนื่องจากแบบจำลองนี้ให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ขณะเดียวกันทำการปรับสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง (Primary Air) และอัตราการไหลของส่วนที่สอง (Secondary Air) เท่ากับ 50 : 50 และ 20 : 80 รวมถึงเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินที่ใช้ Excess air 10%



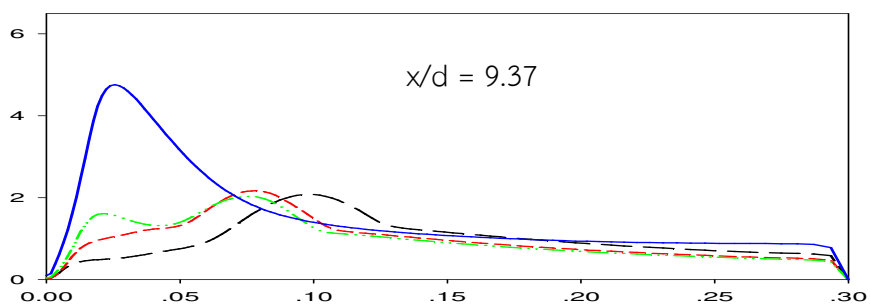
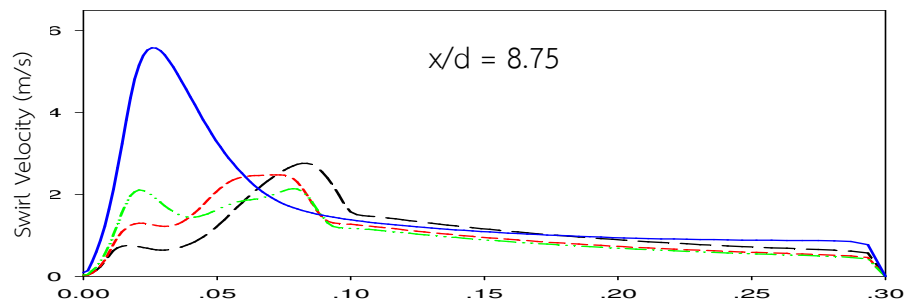
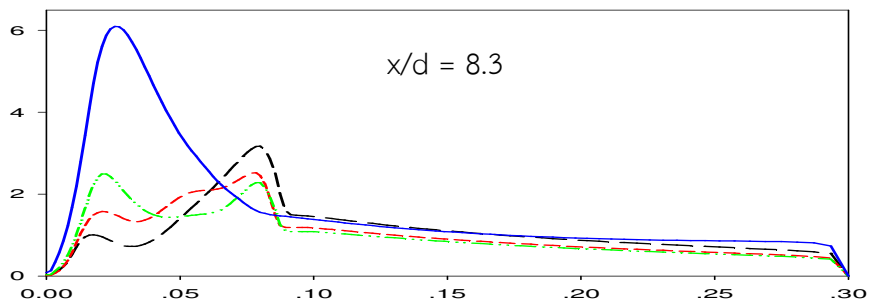
รูปที่ 5.29 ระนาบทั้ง 5 ตำแหน่งที่ใช้สำหรับเก็บผล ณ บริเวณใกล้หัวเผา

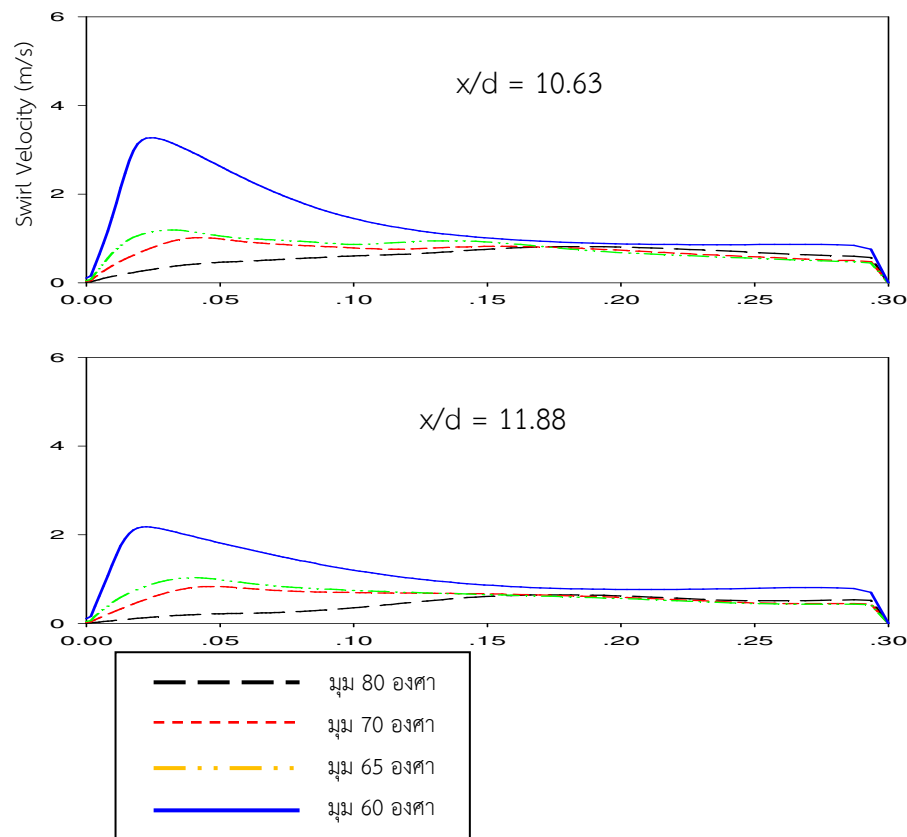
5.3.3.1 ปริมาณสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศ 50:50





รูปที่ 5.30 ผลการจำลองการลดลงของความเร็วในแนวแกน (Axial Velocity)

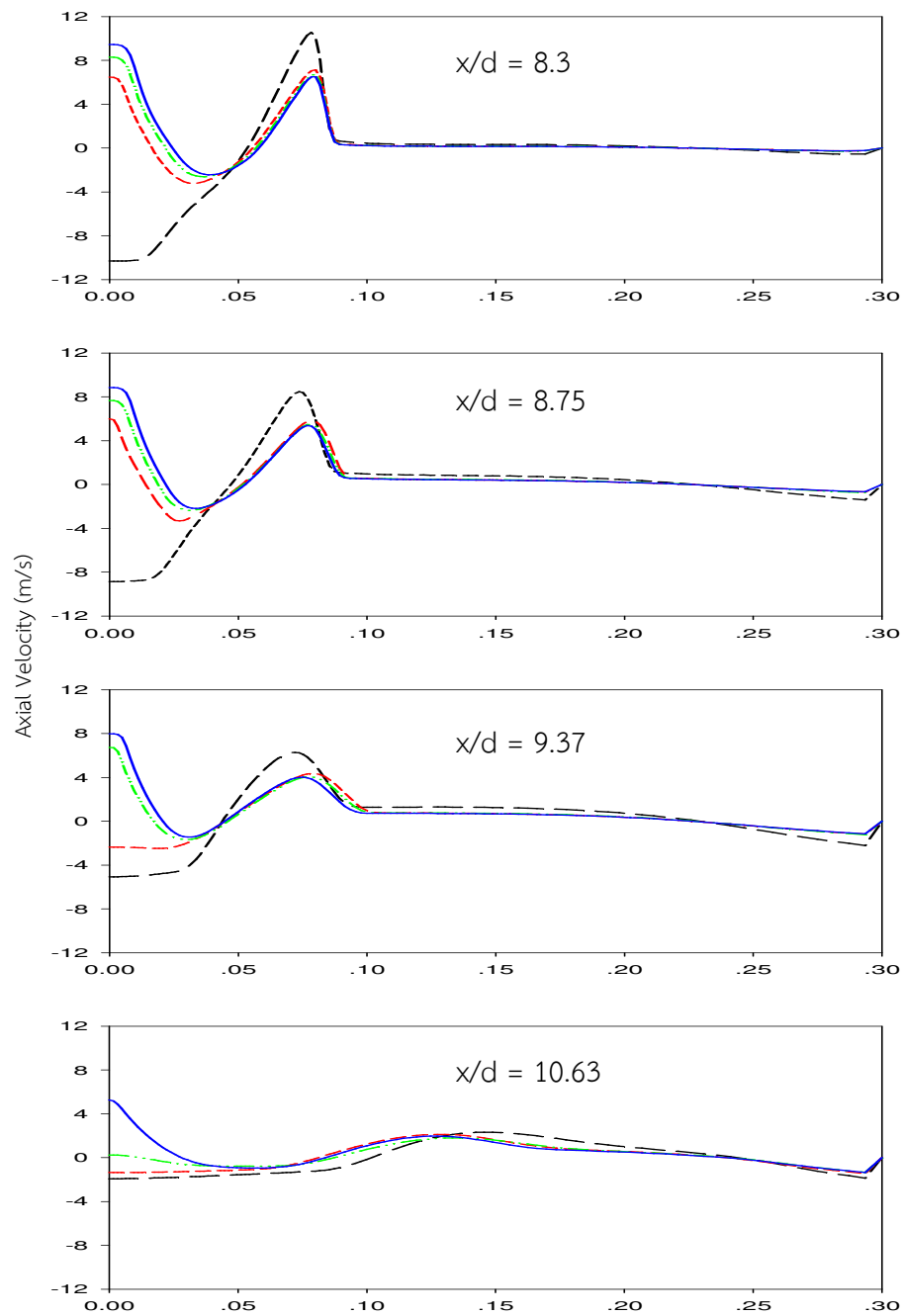


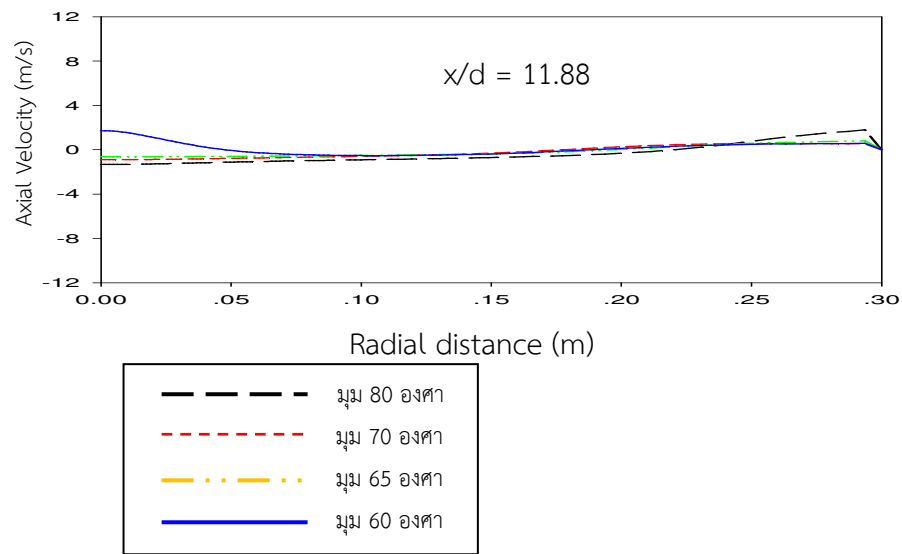


รูปที่ 5.31 ผลการจำลองความเร็วในการหมุนควง (Swirl Velocity)

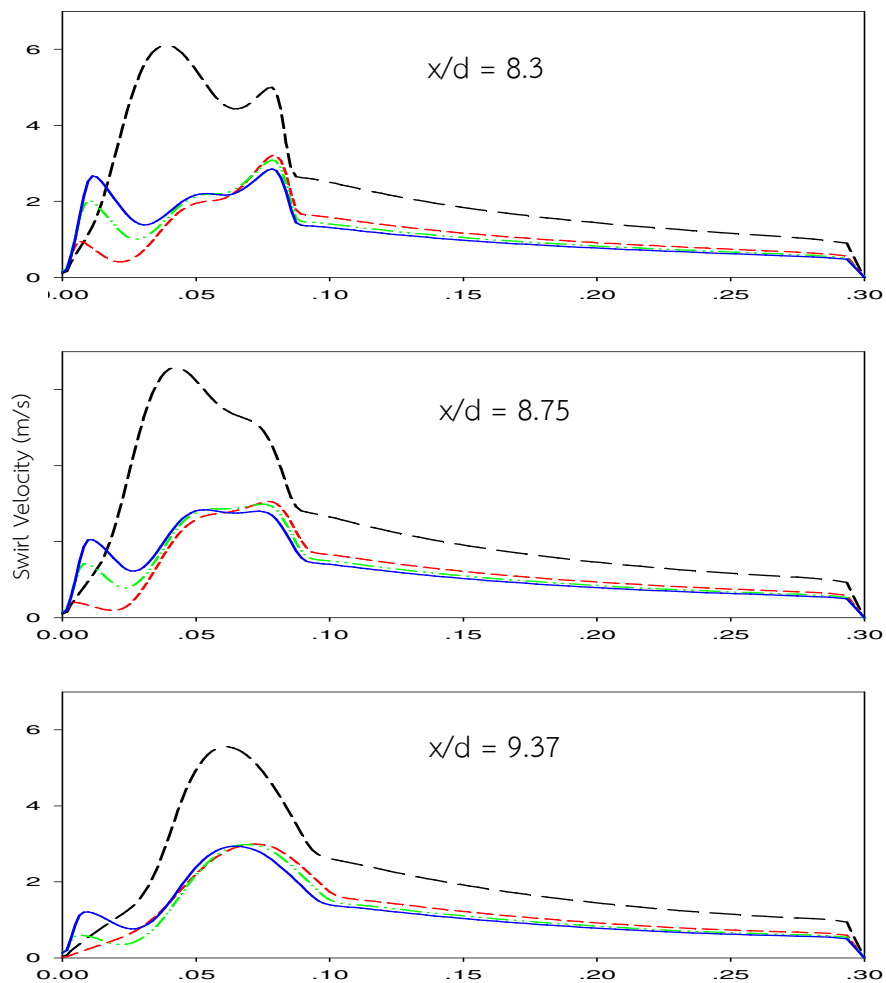
จากรูปที่ 5.30 และ 5.31 แสดงถึง Rate of decay กรณีปริมาณสัดส่วนอากาศ 50:50 ของความเร็วในแนวแกนและความเร็วในการหมุนควงซึ่งผลการจำลองทั้งสองรูปแบบนี้จะมีผลต่อการทำนายเลขเซวีร์ล โดยสังเกตเห็นได้ชัดว่าที่ตำแหน่งมุม 60 องศา จะให้ค่าความเร็วในแนวแกนสูงสุด 12.24 m/s และความเร็วในการหมุนควงสูงสุด 6.09 m/s ที่ตำแหน่งระยะ $x/d = 8.3$ เนื่องจากระยะนี้อยู่บริเวณใกล้หัวและกระแสน้ำไหลของมวลอากาศบางส่วนจะวิ่งเข้าสู่แนวแกนกลางทำให้หลุดพ้นจากการปะทะในท่อดีฟิวเซอร์ (Diffuser) จึงทำให้บริเวณนี้มีค่าความเร็วที่สูง ในขณะที่มุมองศาที่เพิ่มขึ้นกลับทำให้ความเร็วในแนวแกนและความเร็วในการหมุนควงมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากที่มุม 80° เกิดกระแสน้ำไหลในแนวสัมผัสที่ค่อนข้างสูง ทำให้กระแสน้ำไหลของมวลอากาศจะไหลเป็นวงที่แคบและกว้างถูกปะทะไปกับด้านข้างของท่อดีฟิวเซอร์ (Diffuser) จึงทำให้ความเร็วของกระแสน้ำไหลถูกสูญเสียไปตามระยะทางจนถึงระยะ $x/d = 11.88$ บริเวณใกล้หัวเผาออกไป

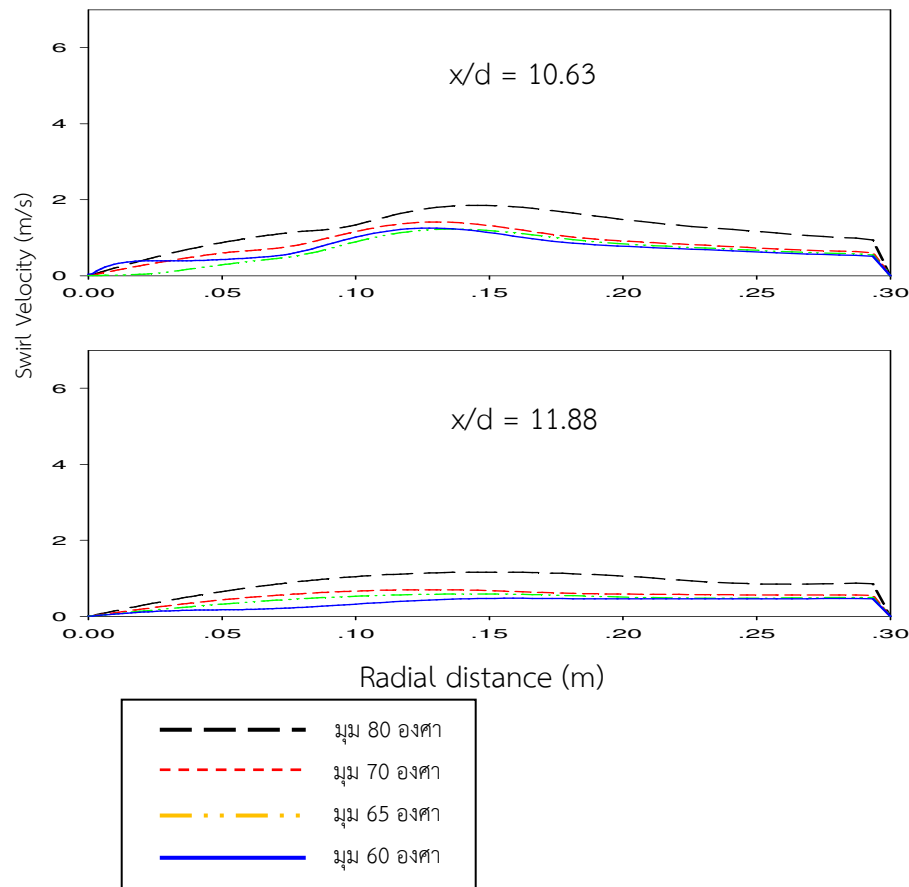
5.3.3.2 สัดส่วนอัตราไหลของอากาศ 20:80





รูปที่ 5.32 ผลการจำลองการลดลงของความเร็วในแนวแกน (Axial Velocity)





รูปที่ 5.33 ผลการจำลองความเร็วในการหมุนควง (Swirl Velocity)

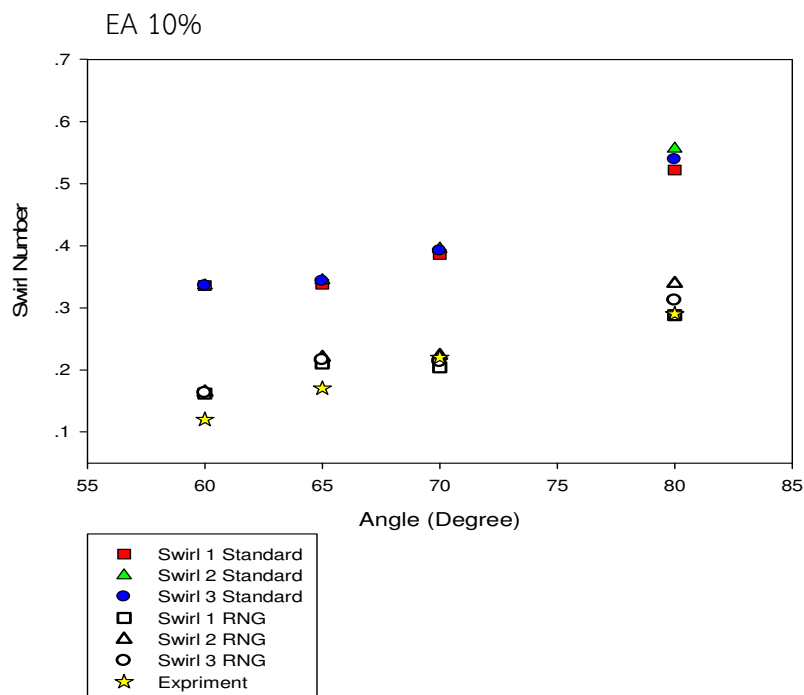
จากรูปที่ 5.32 และ 5.33 แสดงถึง Rate of Decay กรณีปริมาณสัดส่วนอากาศ 20:80 ของความเร็วในแนวแกนและความเร็วในการหมุนควง โดยสังเกตเห็นได้ว่าค่าของความเร็วในแนวแกนมีค่าที่ต่ำกว่าปริมาณสัดส่วนอากาศ 50:50 และค่าของความเร็วในการหมุนควงมีค่าสูงกว่าปริมาณสัดส่วนอากาศ 50:50 ที่ช่วงระยะ $x/d = 8.3$, $x/d = 8.75$ และ $x/d = 9.37$ เนื่องจากบริเวณนี้อยู่บริเวณใกล้หัวเผาและได้รับอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สอง ซึ่งเป็นกระแสการไหลที่มีการหมุนวน เพราะในช่วงบริเวณนี้มีความดันที่ต่ำกว่าบริเวณใกล้หัวเผา จึงเป็นสาเหตุที่กระแสการไหลบริเวณแกนกลางเกิดการไหลแบบย้อนกลับของกระแสภายในแกนกลางของหัวเผา (Internal Recirculation Zone, IRZ) และยังพบว่าความเร็วของอากาศหมุนควงของปริมาณสัดส่วนอากาศ 20:80 มีค่าการสูญเสียที่สูงกว่าปริมาณสัดส่วนอากาศ 50:50 เนื่องจากเกิดจากกระแสการไหลในแนวสัมผัสที่ค่อนข้างสูง ทำให้กระแสการไหลของมวลอากาศไหลส่วนหนึ่งถูกปะทะไปกับด้านข้างของท่อ Diffuser จึงทำให้ความเร็วของกระแสการไหลถูกสูญเสียไปตาม $x/d = 8.3$ จนถึงระยะ $x/d = 11.88$ บริเวณใกล้หัวเผาออกไป

5.4 พฤติกรรมของแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

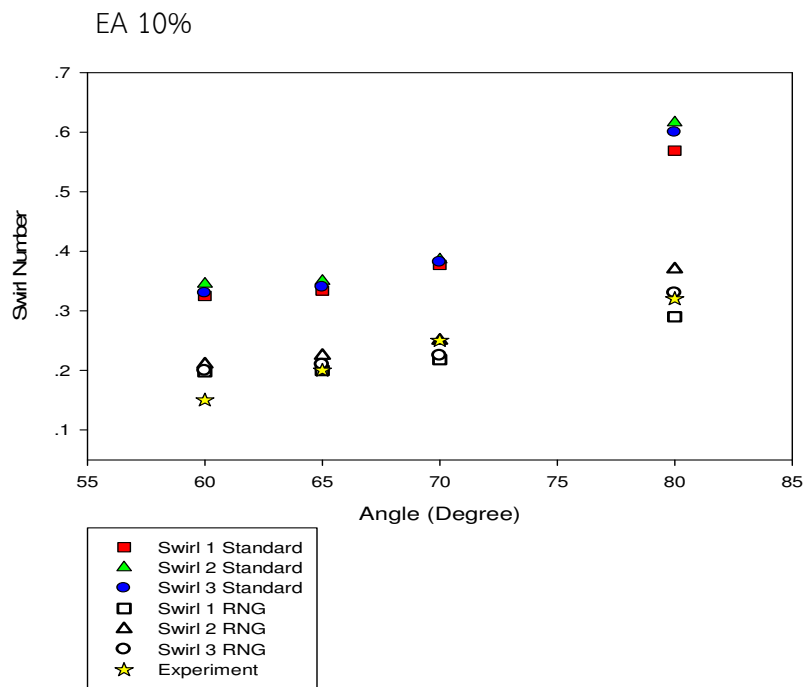
5.4.1 กรณีมีชุดทดสอบเลขสเวิร์ลมาขวางกั้นการไหล

หัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบเลขสเวิร์ล (Swirl Number) ของแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$, และแบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ กรณีแบบมีชุดทดสอบเลขสเวิร์ลมาขวางกั้นการไหลของอากาศเทียบกับผลการทดลอง กรณีจำลองแบบมีชุดทดลองมาขวางกั้นการไหลของอากาศที่ปลายทางออกของดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser) โดยทำการปรับสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่1 (Primary Air) และอัตราการไหลของส่วนที่2 (Secondary Air) เท่ากับ 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 20 : 80 รวมถึงเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินที่ใช้ในการทดลองคือ Excess air 10% , และ 20% ในทำนองเดียวกันได้สรุปเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3

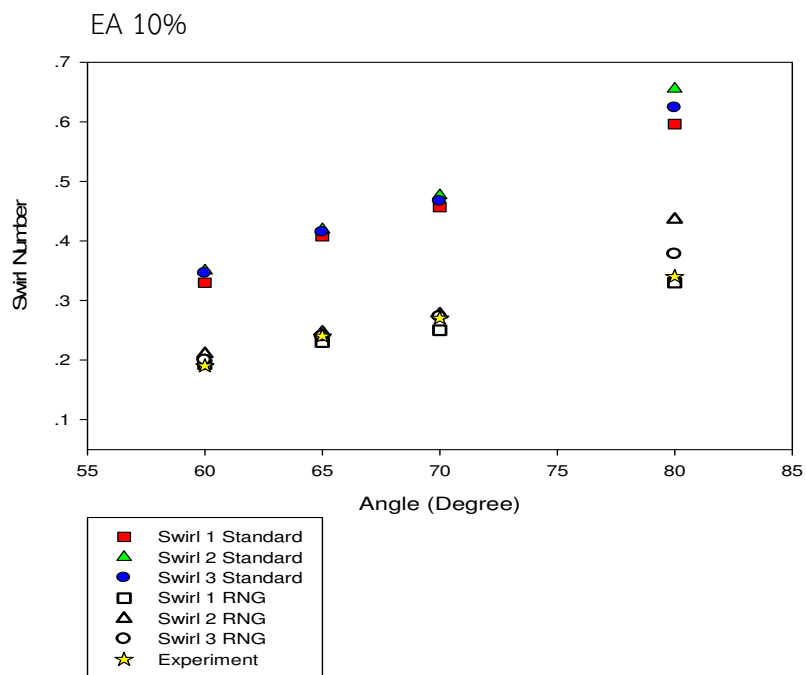
5.4.1.1 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% (Excess air 10%)



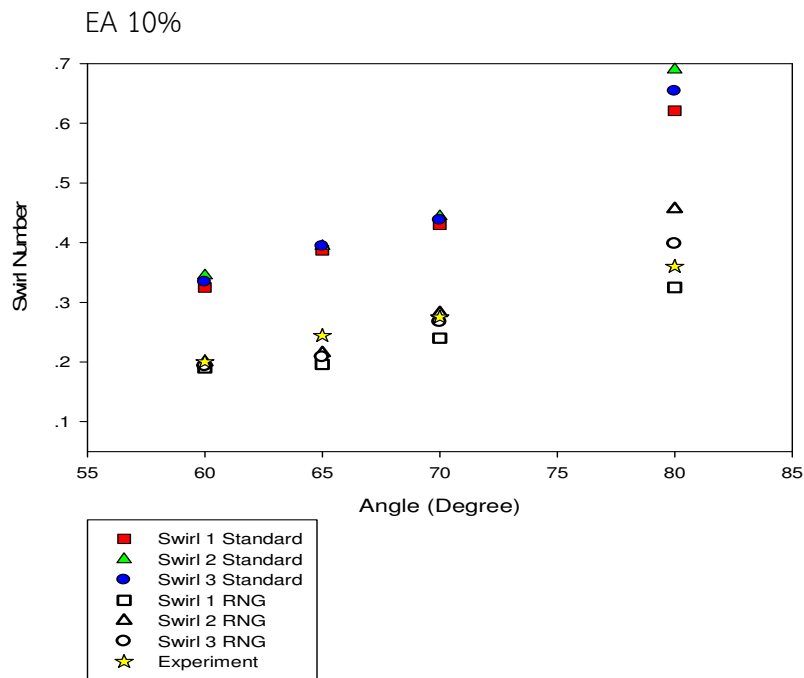
รูปที่ 5.34 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 50 : 50 (Primary : Secondary)



รูปที่ 5.35 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 40 : 60
(Primary : Secondary)



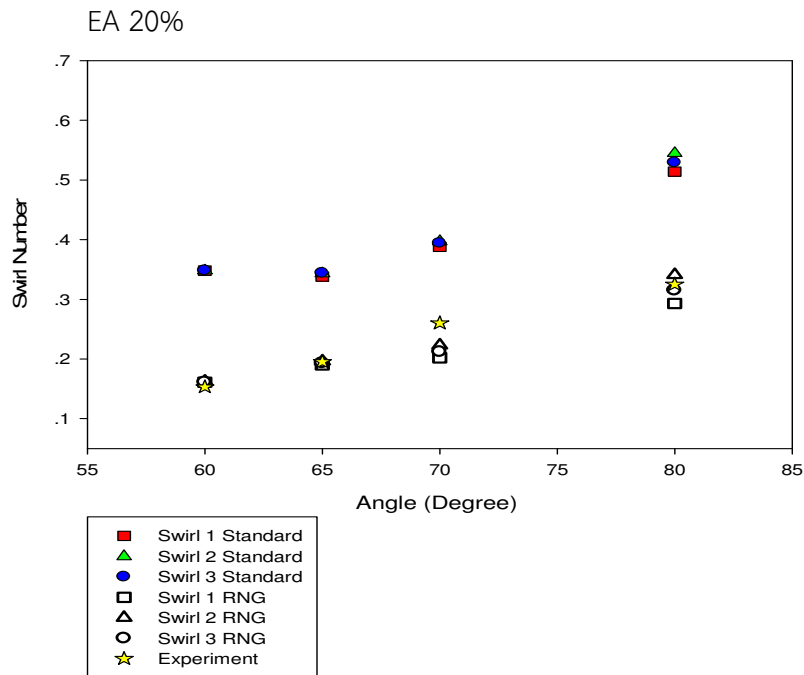
รูปที่ 5.36 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 30 : 70
(Primary : Secondary)



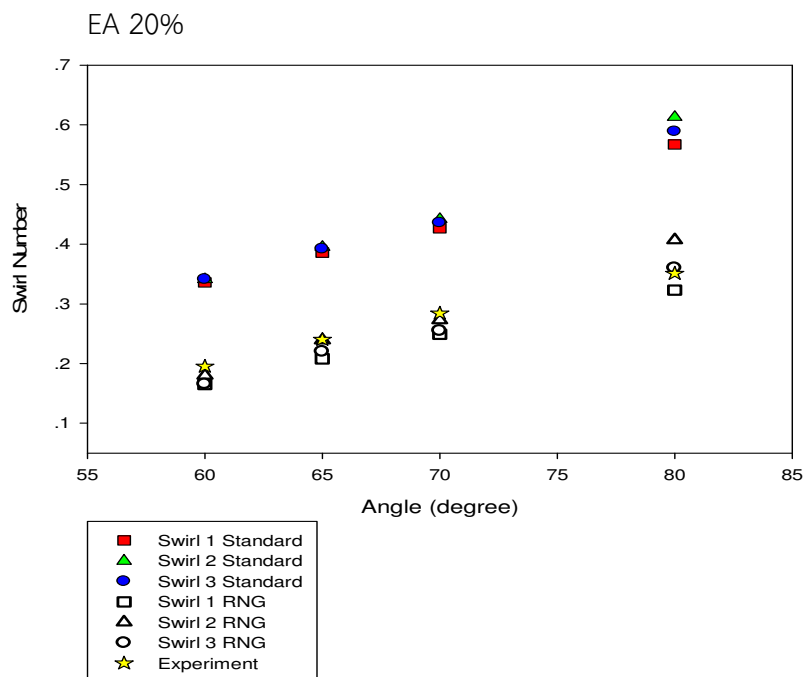
รูปที่ 5.37 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 20 : 80
(Primary : Secondary)

จากรูปที่ 5.34, 5.35, 5.36, และ 5.37 แสดงการเปรียบเทียบของแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินเป็น 10% (Excess air 10%) พบว่าค่าของเลขสเวิร์ลในแบบจำลอง $k-\epsilon$ Standard ตั้งแต่สัดส่วนอากาศ 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 20 : 80 อยู่ในช่วง 0.320-0.550, 0.313-0.608, 0.320-0.650 และ 0.3250-0.698 ตามลำดับ ส่วนค่าของเลขสเวิร์ลในแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ อยู่ในช่วง 0.155-0.280, 0.210-0.320, 0.200-0.350 และ 0.213-0.356 ตามลำดับ ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่าการจำลองทั้งสองรูปแบบ ค่าของเลขสเวิร์ลจะมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งมุม 60° และเพิ่มขึ้น $65^\circ, 70^\circ$ จนถึงสูงสุดที่มุม 80° ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนอากาศส่วนที่ 2 (Secondary) จาก 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 20 : 80 ส่งผลให้เลขสเวิร์ลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลอากาศส่วนที่ 2 (Secondary) เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดโมเมนตัมในแนวสัมผัสมีมากกว่าโมเมนตัมในแนวแกน จึงส่งผลให้เลขสเวิร์ลมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอากาศส่วนที่ 2 (Secondary) และสังเกตเห็นว่า แบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ จะมีผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$

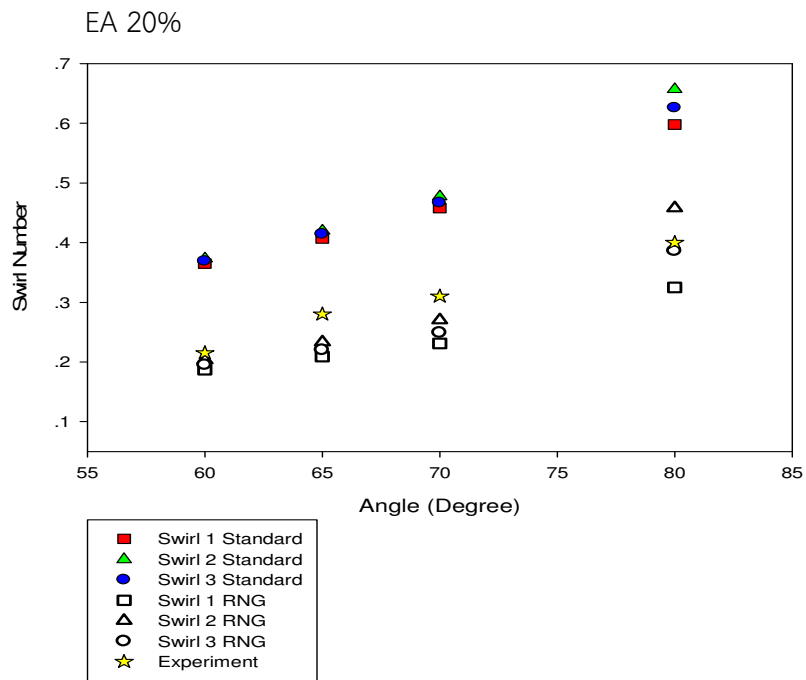
5.4.1.2 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% (Excess air 20%)



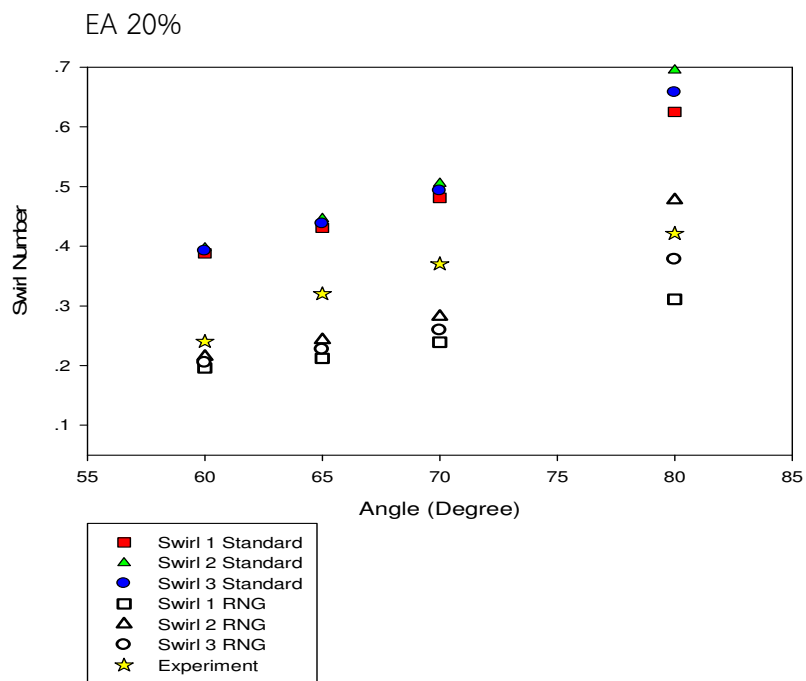
รูปที่ 5.38 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 50 : 50
(Primary : Secondary)



รูปที่ 5.39 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 40 : 60
(Primary : Secondary)



รูปที่ 5.40 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 30 : 70
(Primary : Secondary)



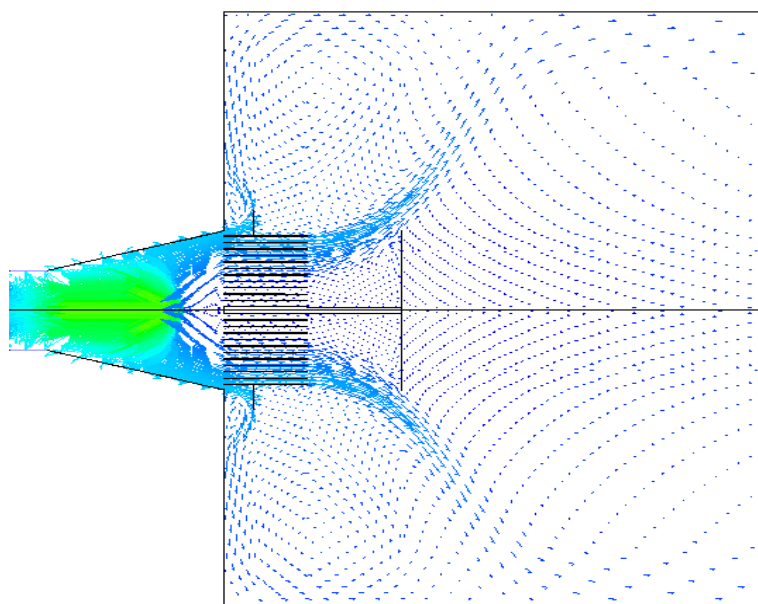
รูปที่ 5.41 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองปริมาณสัดส่วนอากาศ 20 : 80
(Primary : Secondary)

จากรูปที่ 5.38, 5.39, 5.40, และ 5.41 เปรียบเทียบของแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ กรณีมีการเพิ่มเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินเป็น 20% (Excess air 20%) พบว่าค่าของเลขสเวิร์ลมีการเพิ่มขึ้นจากกรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% และเมื่อมีการเพิ่มมุมสังเกตเห็นว่าเลขสเวิร์ลมีแนวโน้มให้ผลลัพธ์สอดคล้องตามหลักกายภาพของการปรับเปลี่ยนมุมจาก $60^\circ, 65^\circ, 70^\circ$ ไปจนถึง 80° เช่นเดียวกับพฤติกรรมของการปรับเปลี่ยนมุมในการทดลอง และเมื่อเปรียบเทียบของแบบจำลองทั้งสองชนิดสังเกตได้ว่าแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ มีผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ ทุกสัดส่วนของอัตราการไหลที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด

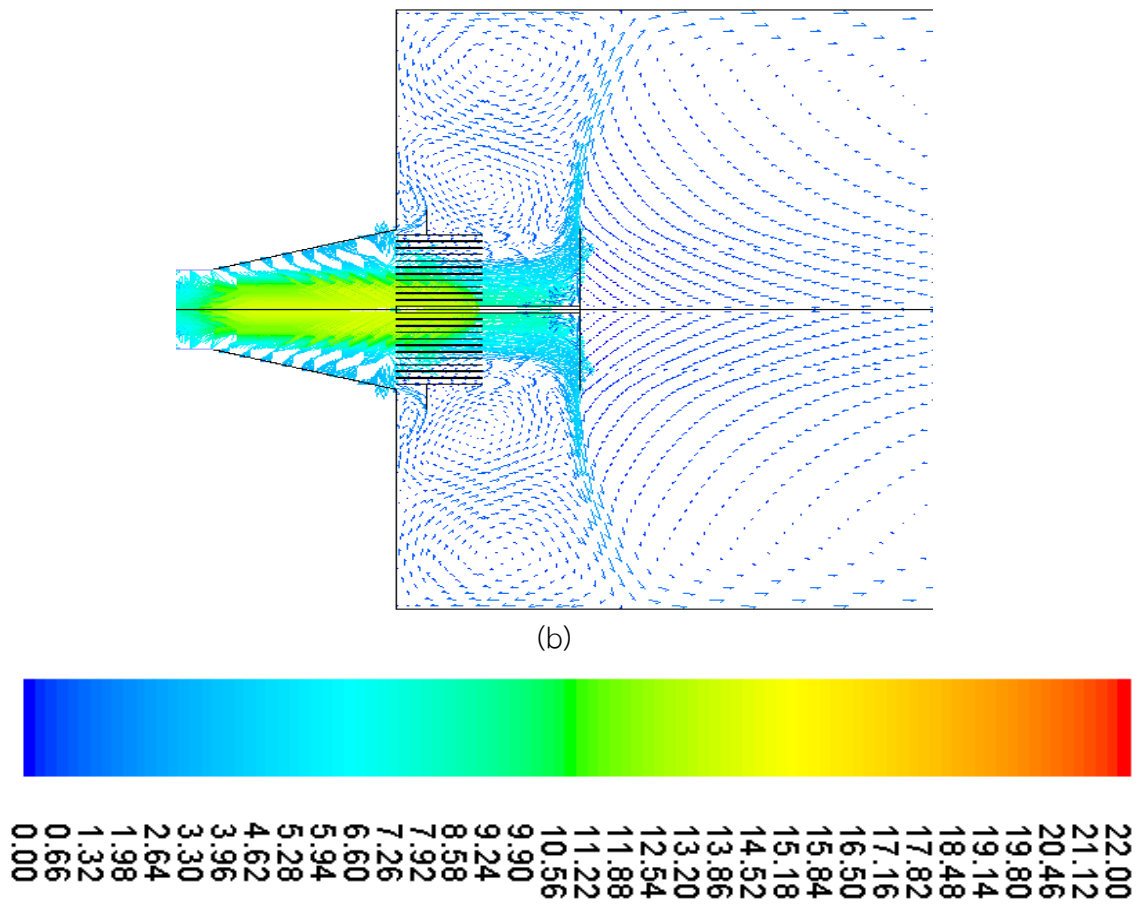
5.4.2 เปรียบเทียบสนามเวกเตอร์ความเร็วภายในหัวเผาของแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$

สำหรับการจำลองนี้ได้แสดงผลในลักษณะเวกเตอร์ความเร็วของอากาศบริเวณใกล้หัวเผาในกรณีที่ได้จำลองแบบมีชุดทดสอบเลขสเวิร์ลมาขวางกั้นการไหล โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนอากาศ 50:50 และ 20:80 ในขณะเดียวกันนั้นทำการเปรียบเทียบมุมของ Swirl ที่ใช้ในการจำลองเป็น $60^\circ, 65^\circ, 70^\circ$ และ 80° เพื่อดูพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในหัวเผาเชื้อเพลิงสำหรับแบบจำลองนี้และรายละเอียดที่เกิดขึ้นบริเวณหัวเผาดูได้ที่ ภาคผนวก ข.

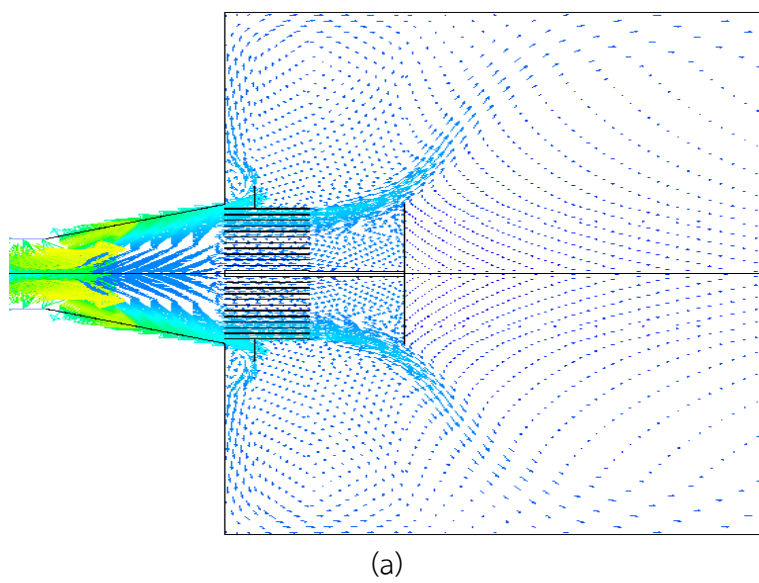
5.4.2.1 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% (Excess air 10%)

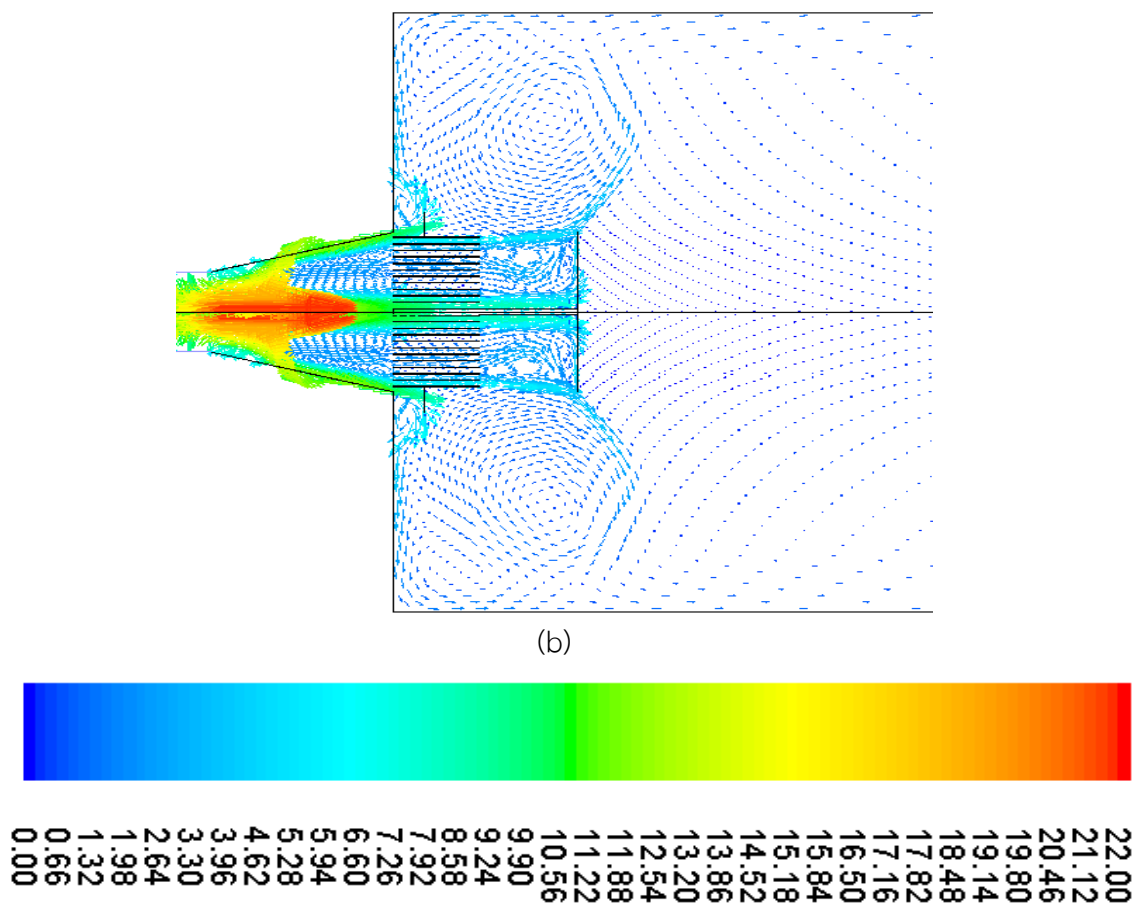


(a)

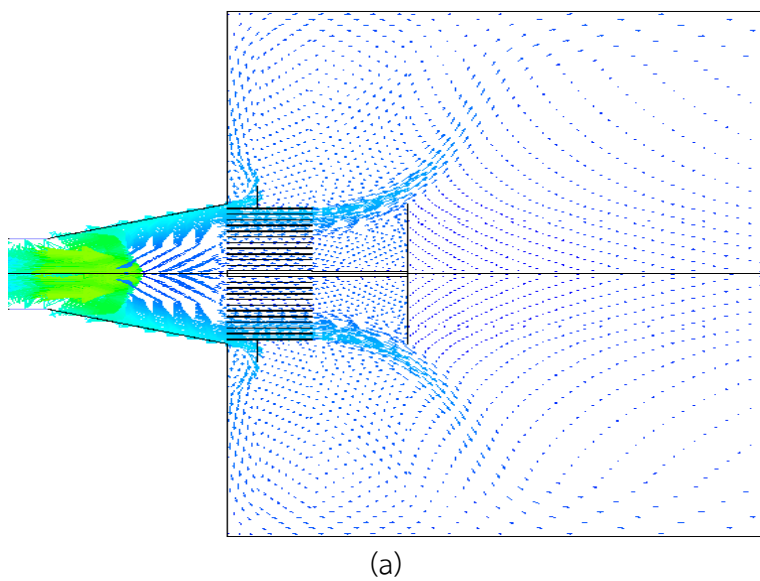


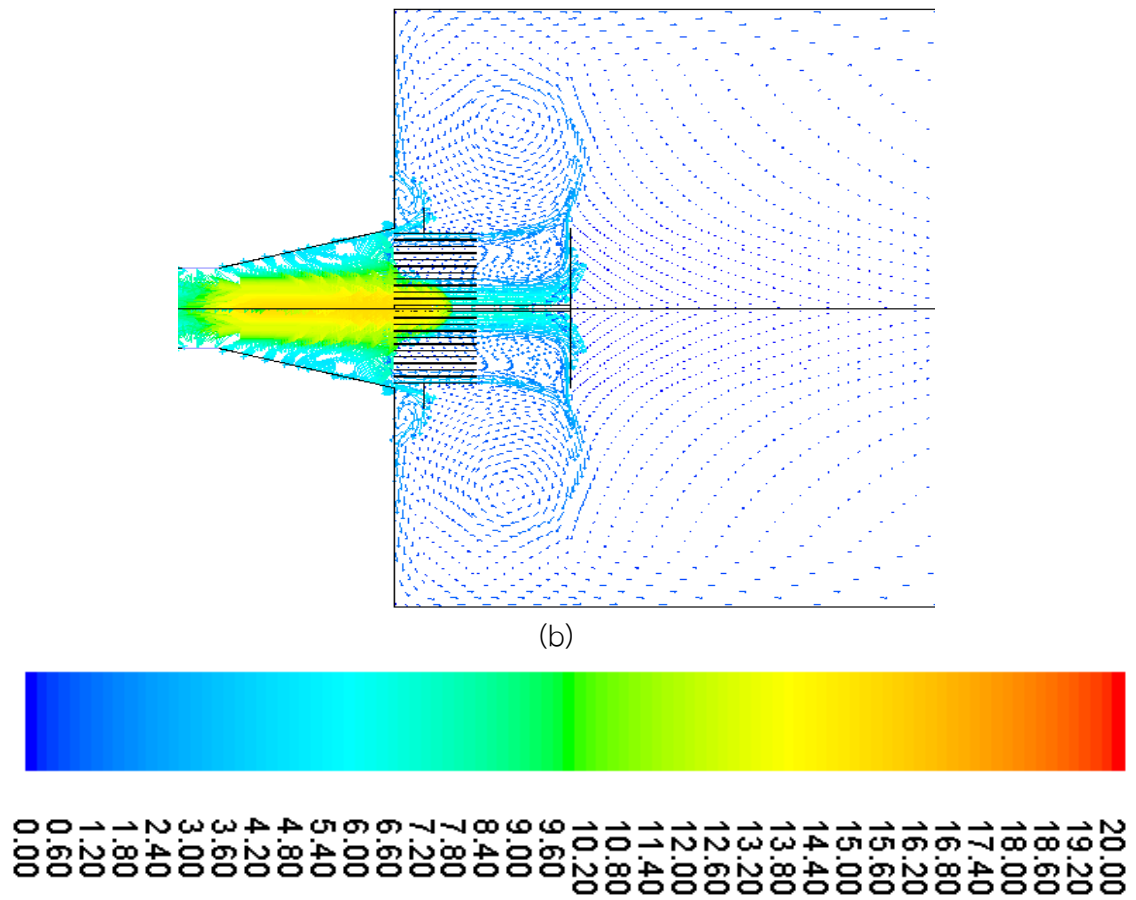
รูปที่ 5.42 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$





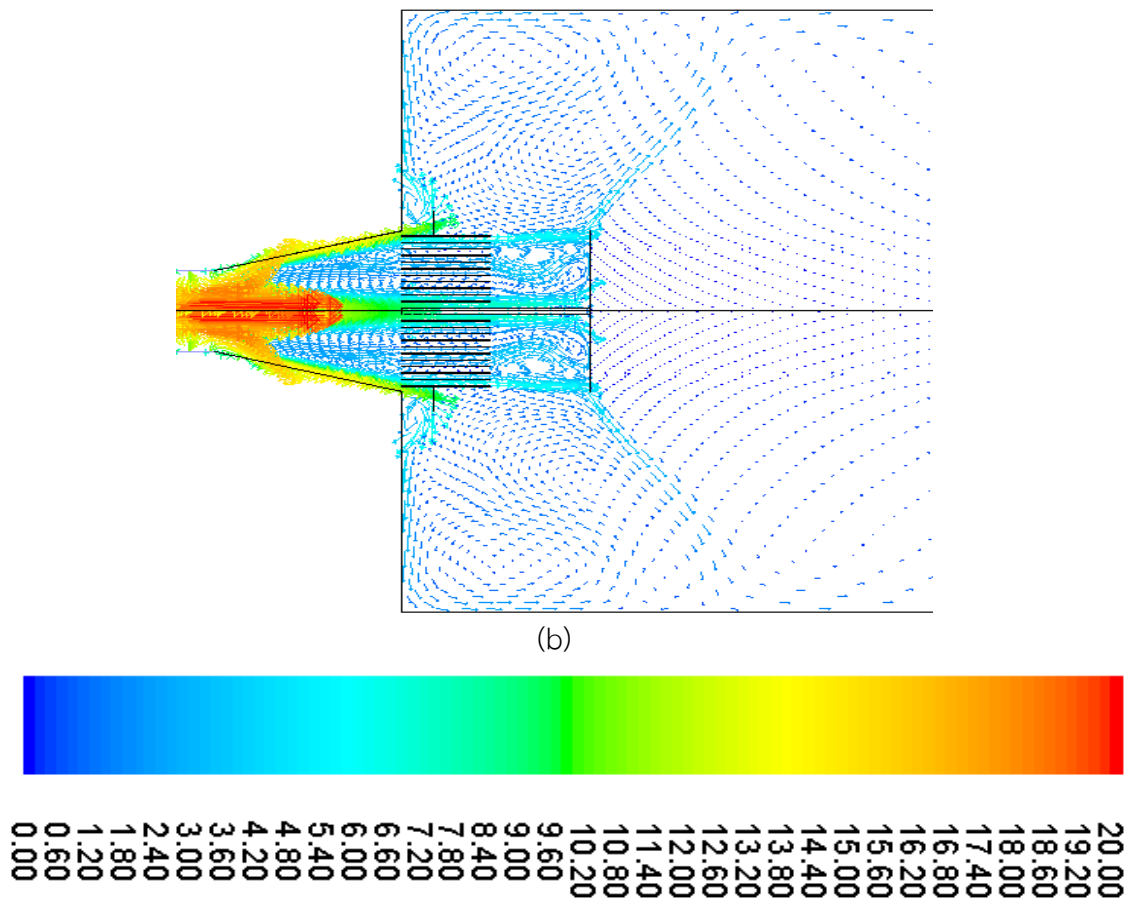
รูปที่ 5.43 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$



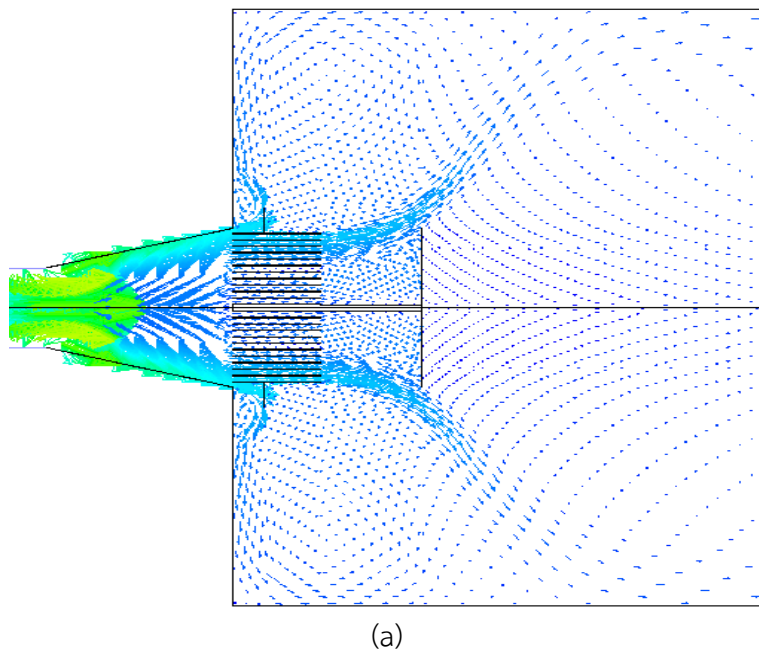


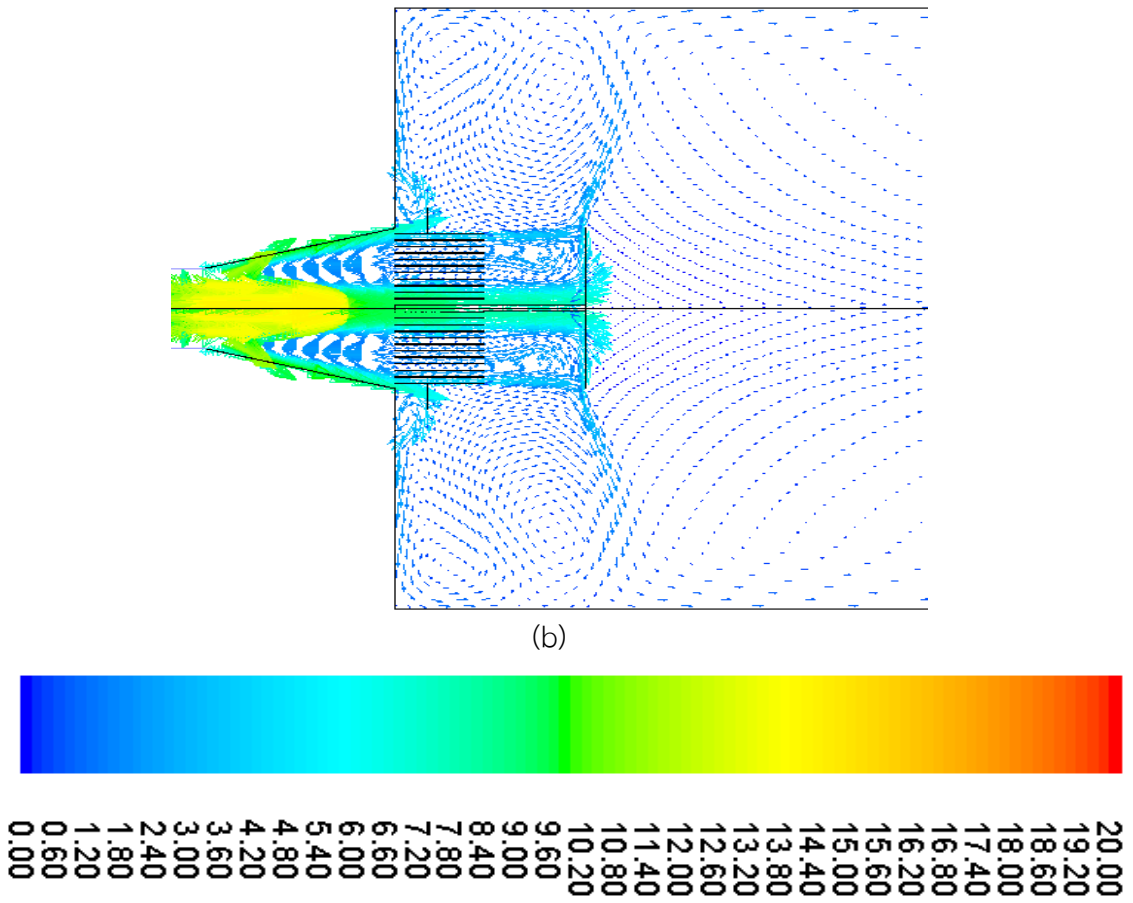
รูปที่ 5.44 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$



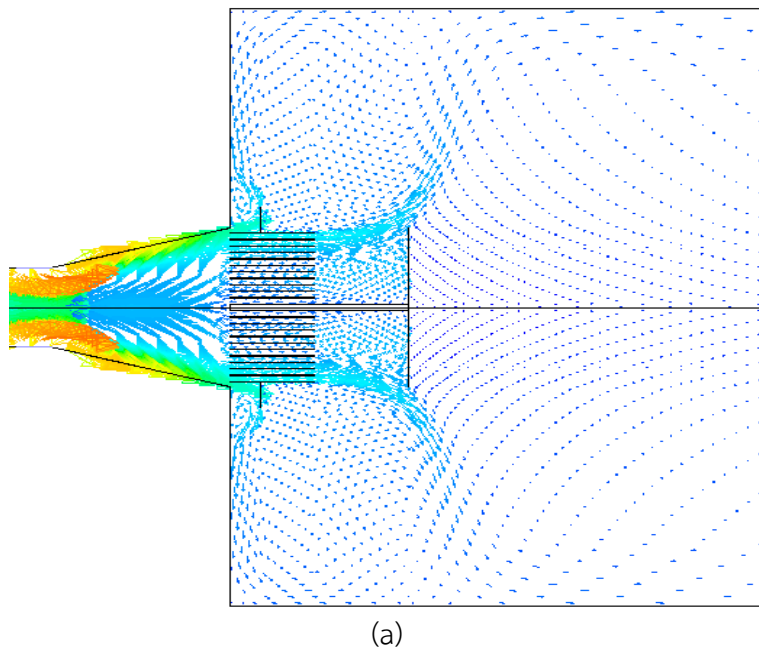


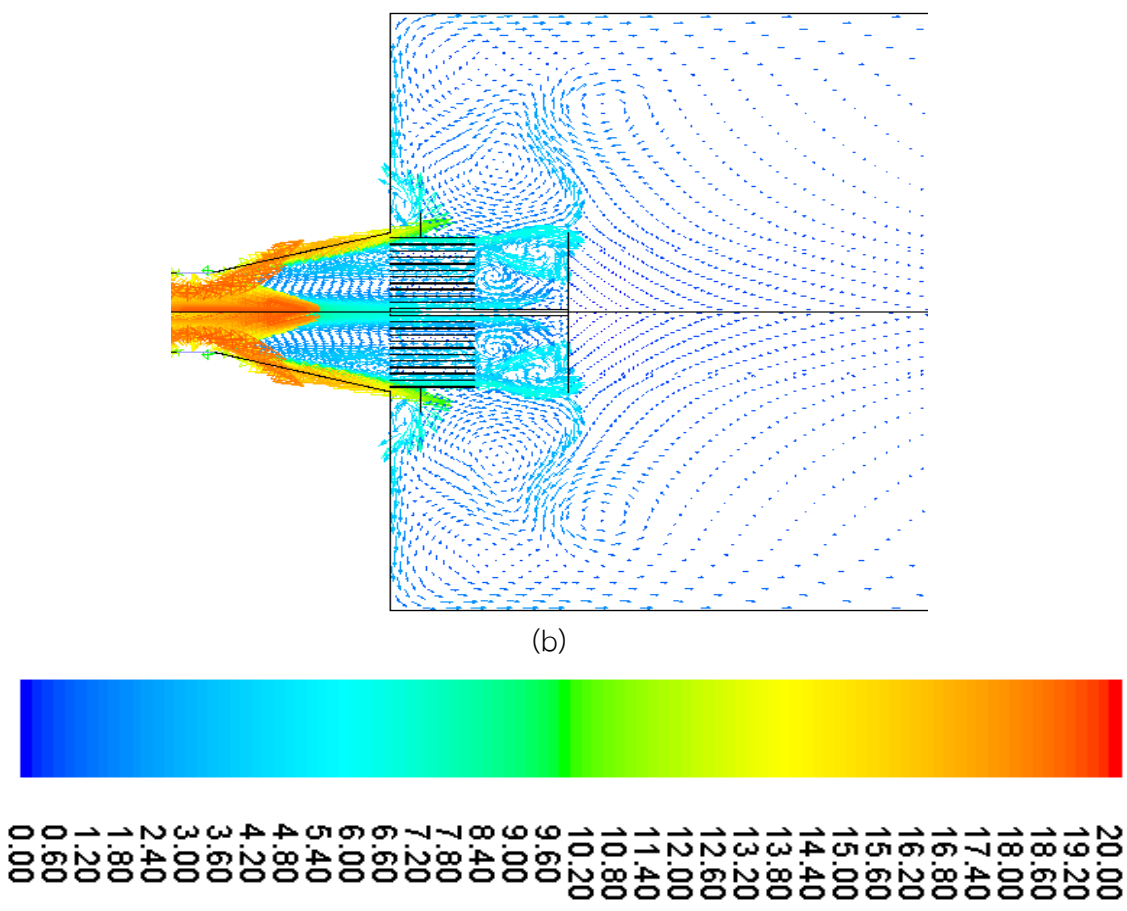
รูปที่ 5.45 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$



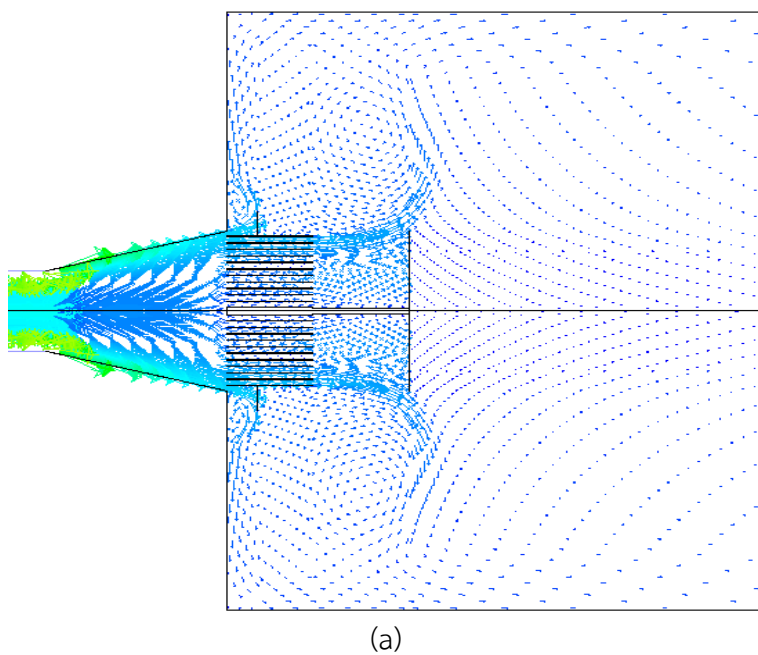


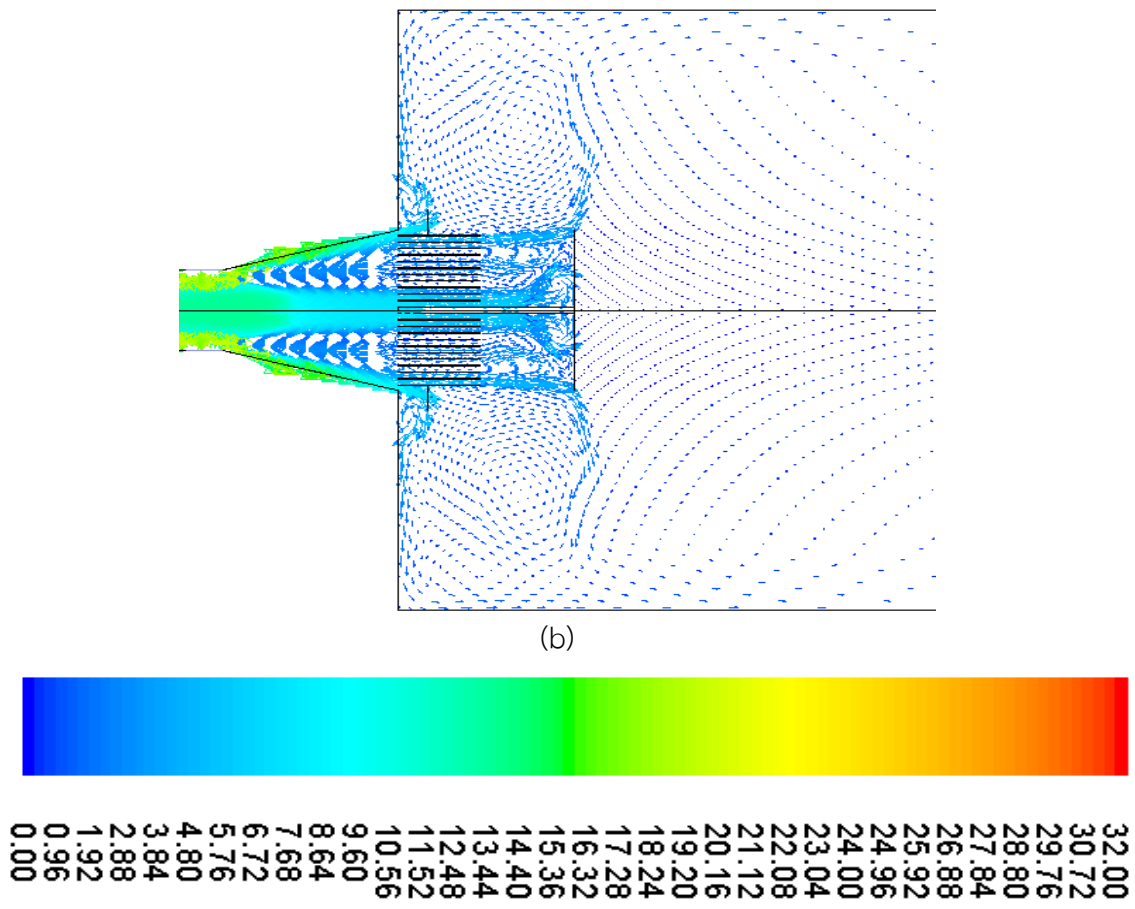
รูปที่ 5.46 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$



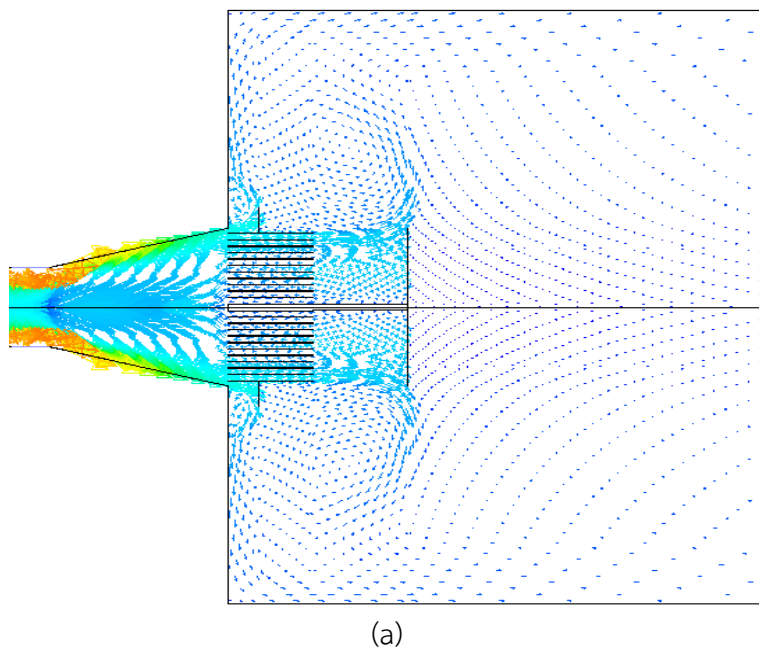


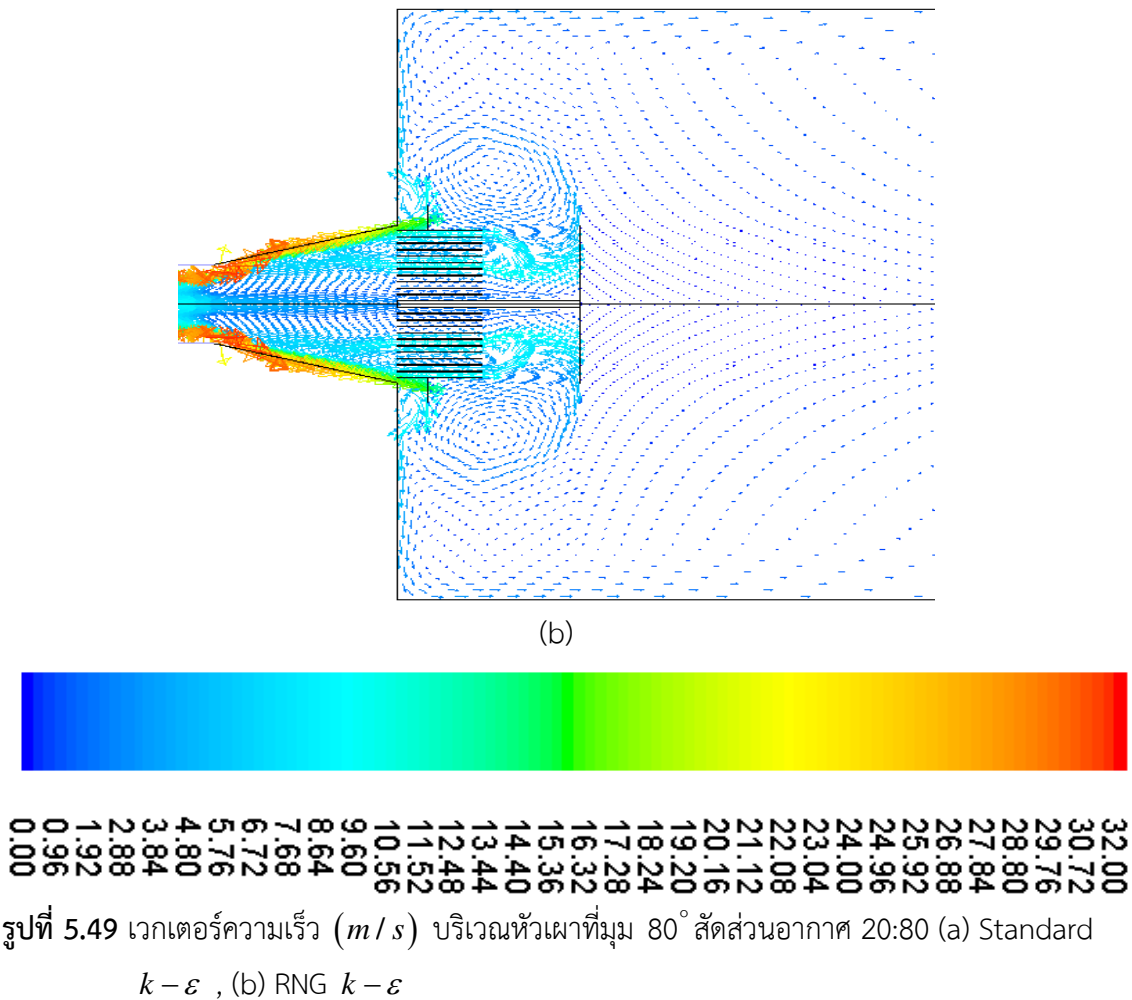
รูปที่ 5.47 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$





รูปที่ 5.48 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$

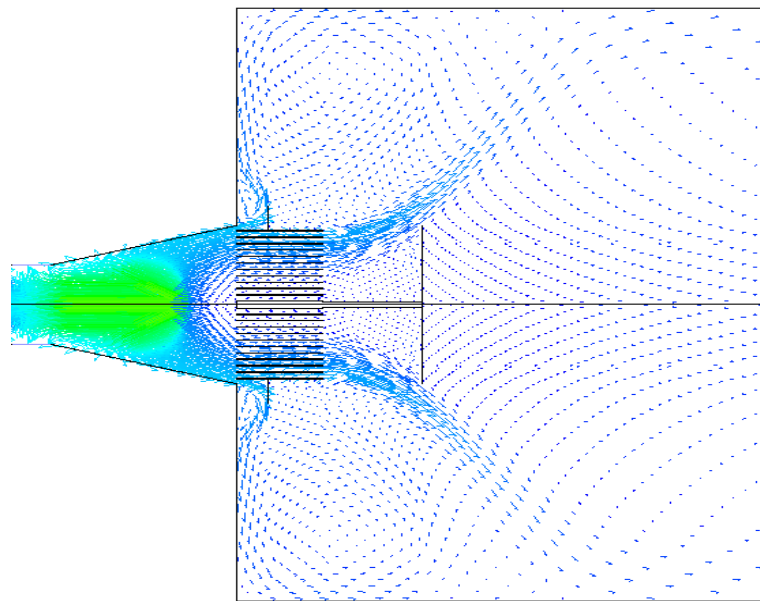




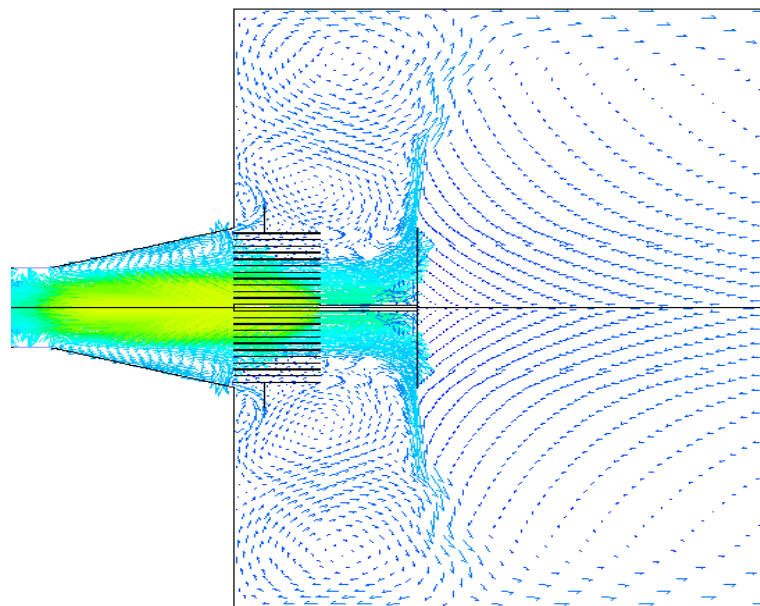
รูปที่ 5.49 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$

จากรูปที่ 5.42-5.49 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศระหว่างแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ และ RNG $k-\varepsilon$ กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% จำลองแบบมีการชุดการทดลองมาข้างกัน การไหล โดยใช้สัดส่วนอากาศ 50:50 และ 20:80 ในขณะที่มุมในการจำลองเท่ากับ $60^\circ, 65^\circ, 70^\circ$ และ 80° สามารถสังเกตเห็นที่สัดส่วนอากาศ 20:80 รูปแบบของกระแสการไหลของมวลอากาศในแนวสัมผัสมีมากกว่าสัดส่วนอากาศ 50:50 เนื่องจากบริเวณนี้ได้รับอิทธิพลจากอากาศส่วนที่สอง ซึ่งเป็นกระแสการไหลที่มีการหมุนวนจึงทำให้กระแสการไหลถูกเหวี่ยงออกไปจากแกนกลางหัวเผา จึงทำให้กระแสการไหลในช่วงแกนกลางของห้องเผาไม่มีหรือแทบจะน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามกระแสการไหลบางส่วนจะถูกควบคุมและสูญสลายไปด้วยชุดทดลองที่เป็นลักษณะของแผงรังผึ้ง (Honey Comb) ที่ปลายทางออกของดีฟิวเซอร์ จึงทำให้จุดนั้นกระแสการไหลจะเป็นไปลักษณะของเส้นตรงยาวไกลออกไปจากหัวเผา

5.4.2.2 กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% (Excess air 20%)



(a)



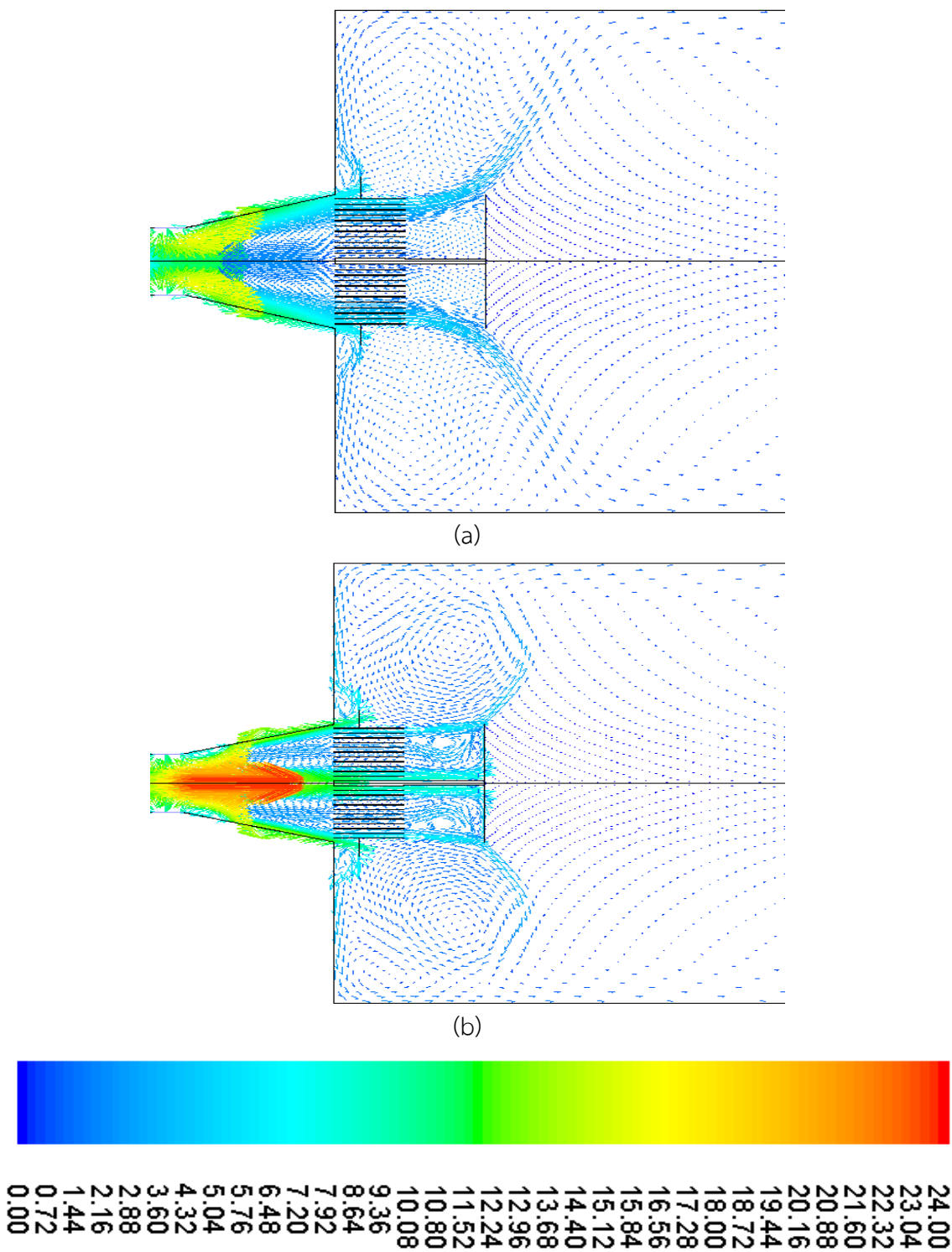
(b)



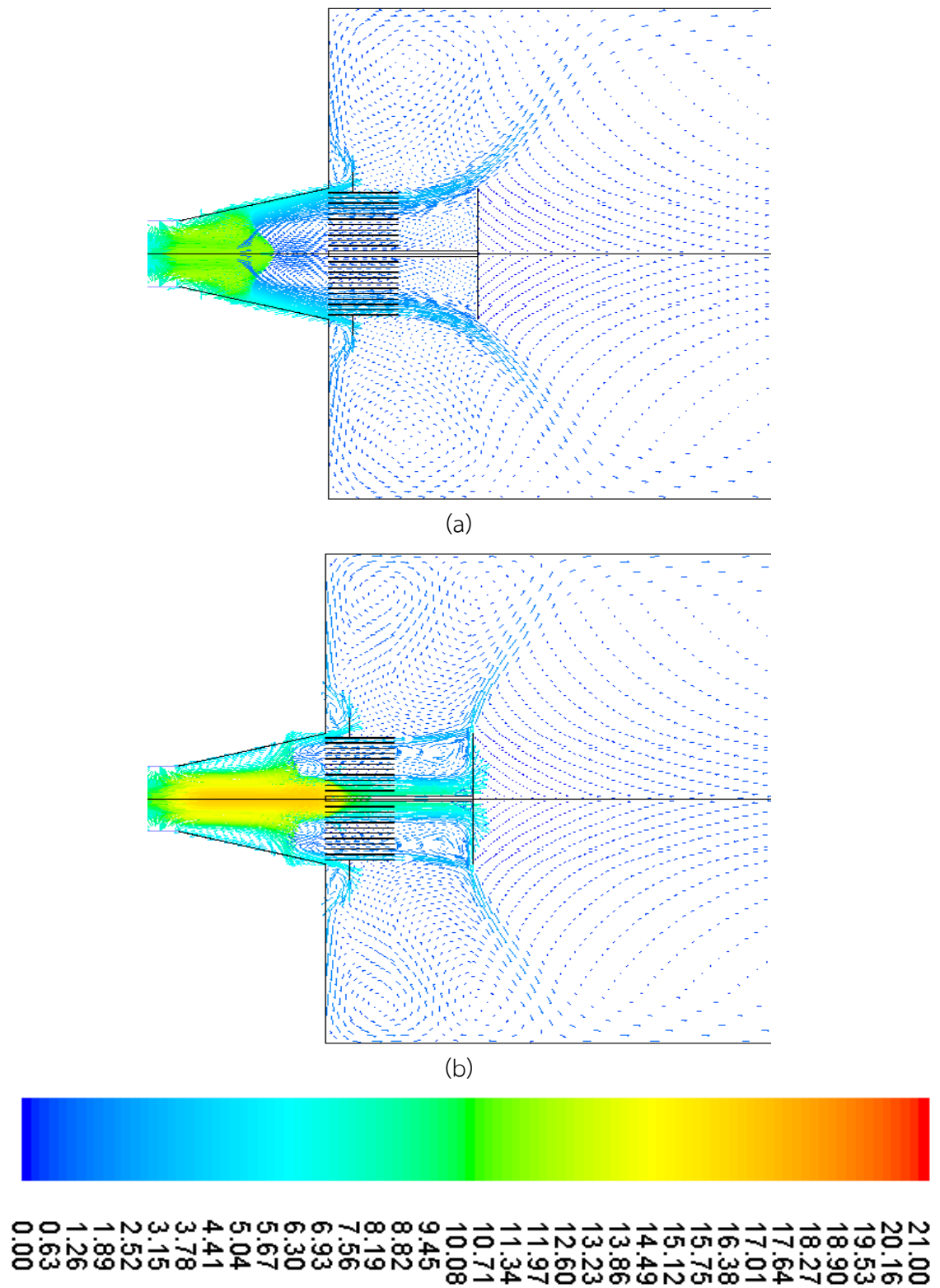
0.00 0.72 1.44 2.16 2.88 3.60 4.32 5.04 5.76 6.48 7.20 7.92 8.64 9.36 10.08 10.80 11.52 12.24 12.96 13.68 14.40 15.12 15.84 16.56 17.28 18.00 18.72 19.44 20.16 20.88 21.60 22.32 23.04 24.00

รูปที่ 5.50 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard

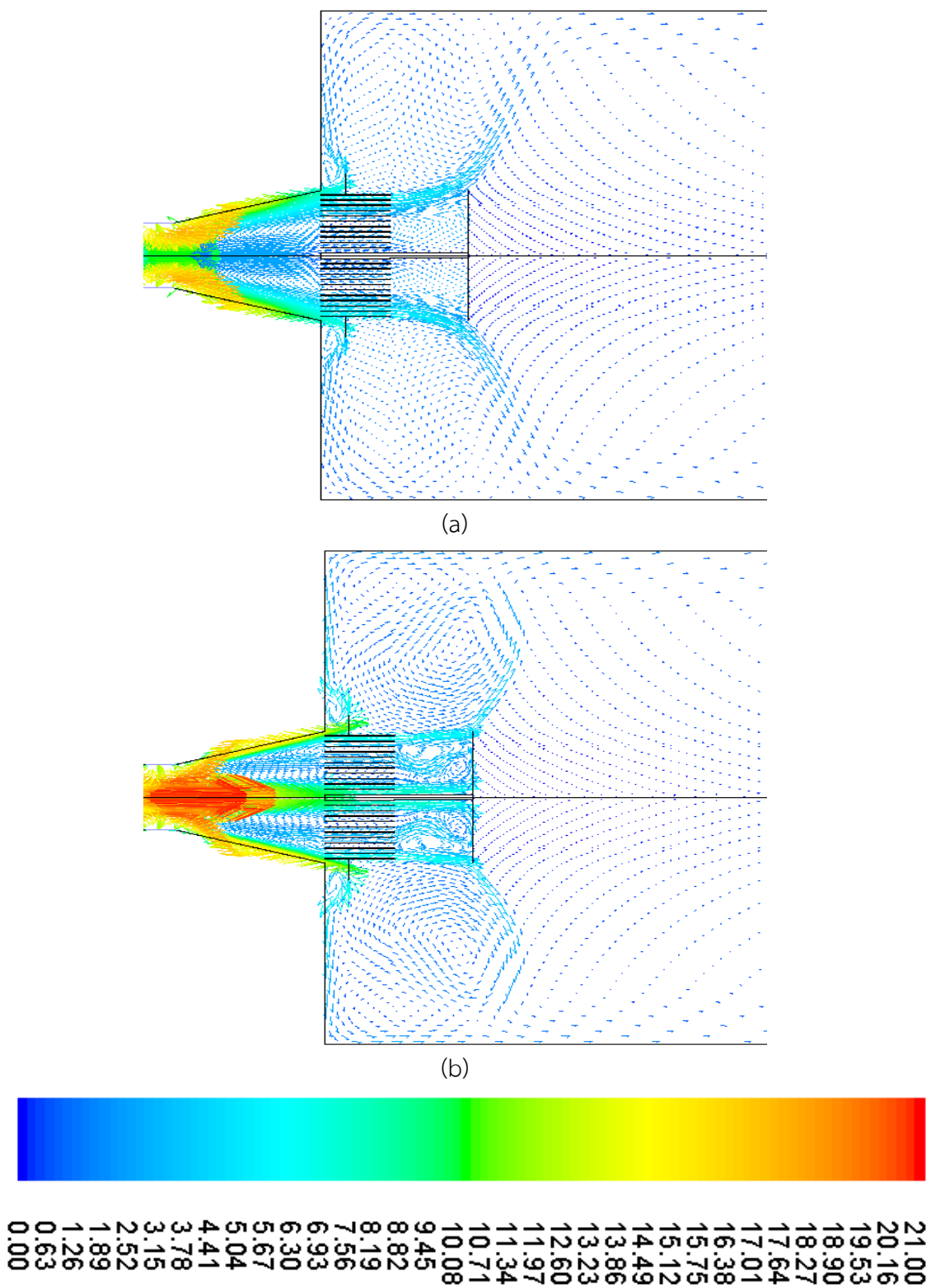
$k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$



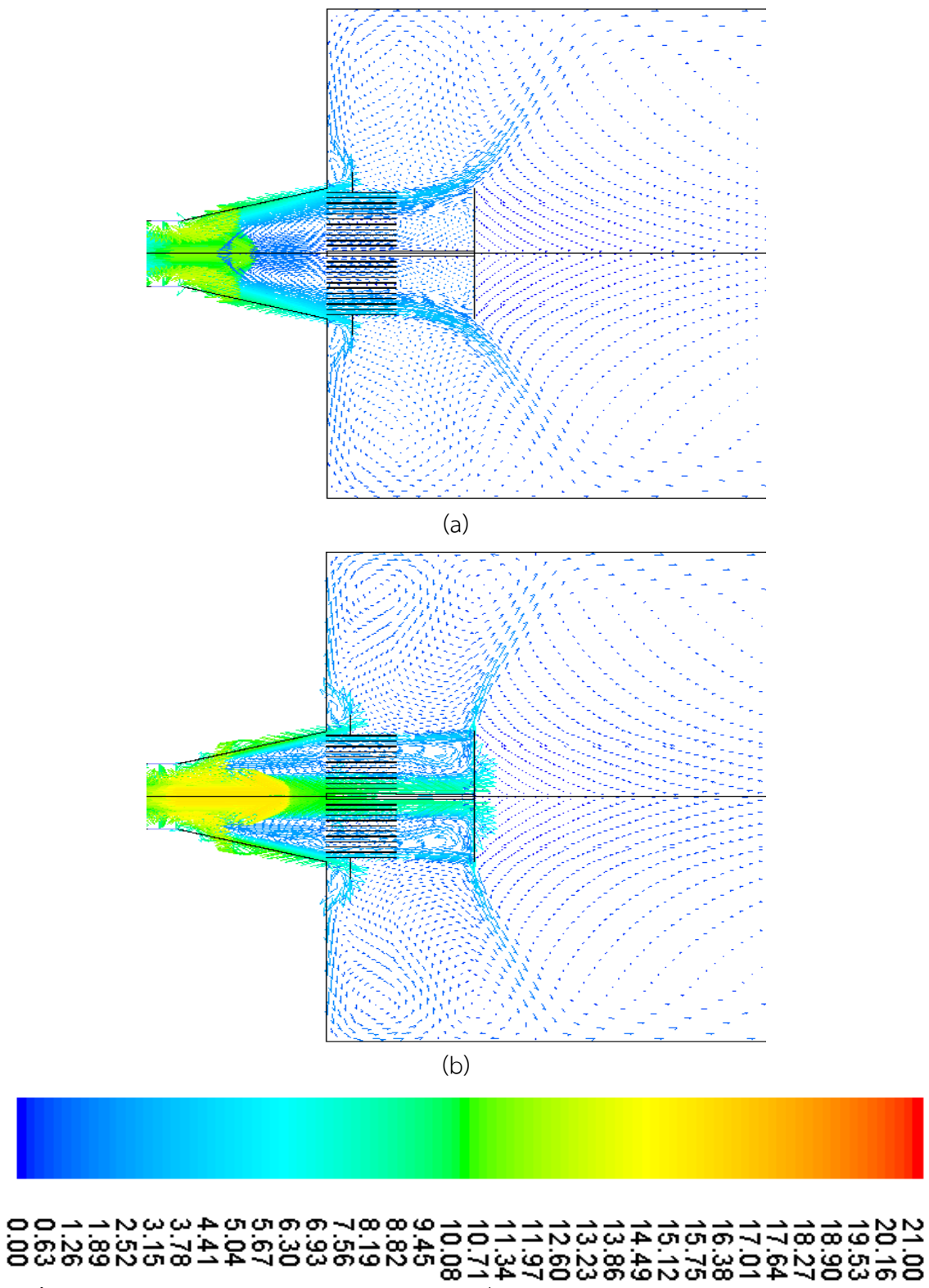
รูปที่ 5.51 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$



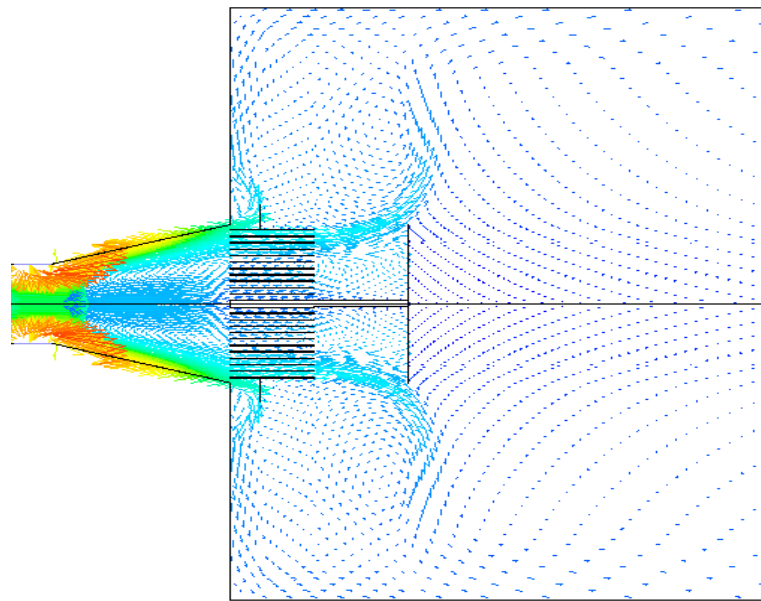
รูปที่ 5.52 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$



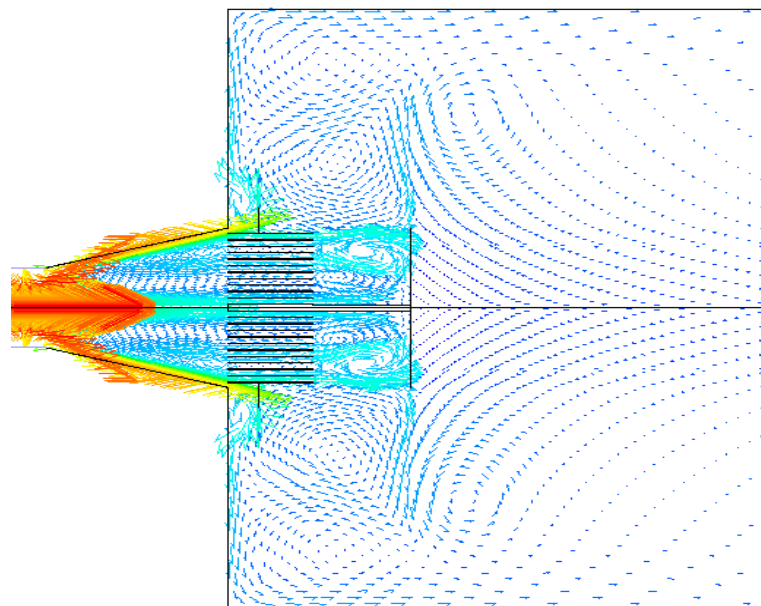
รูปที่ 5.53 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$



รูปที่ 5.54 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$



(a)

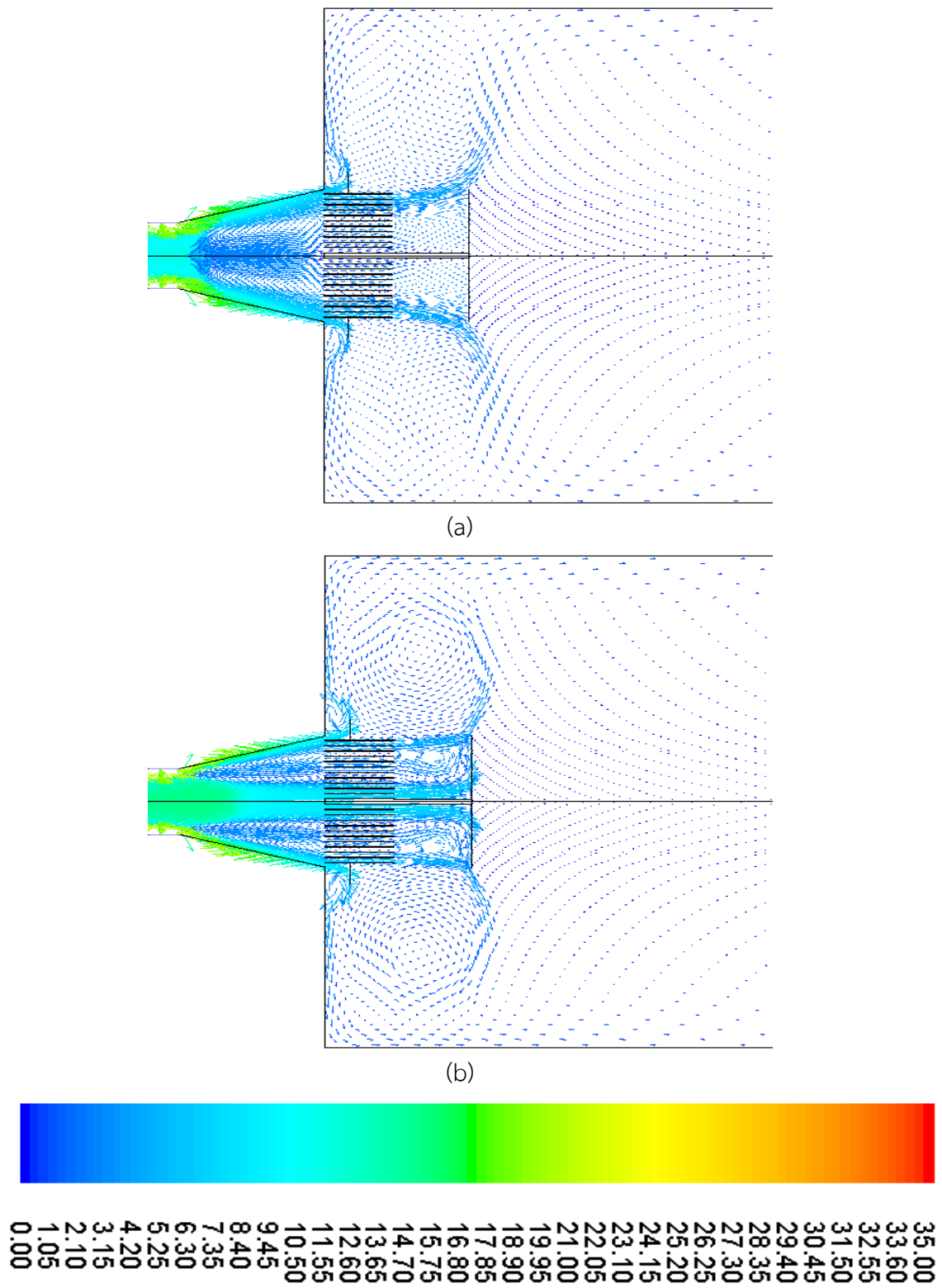


(b)

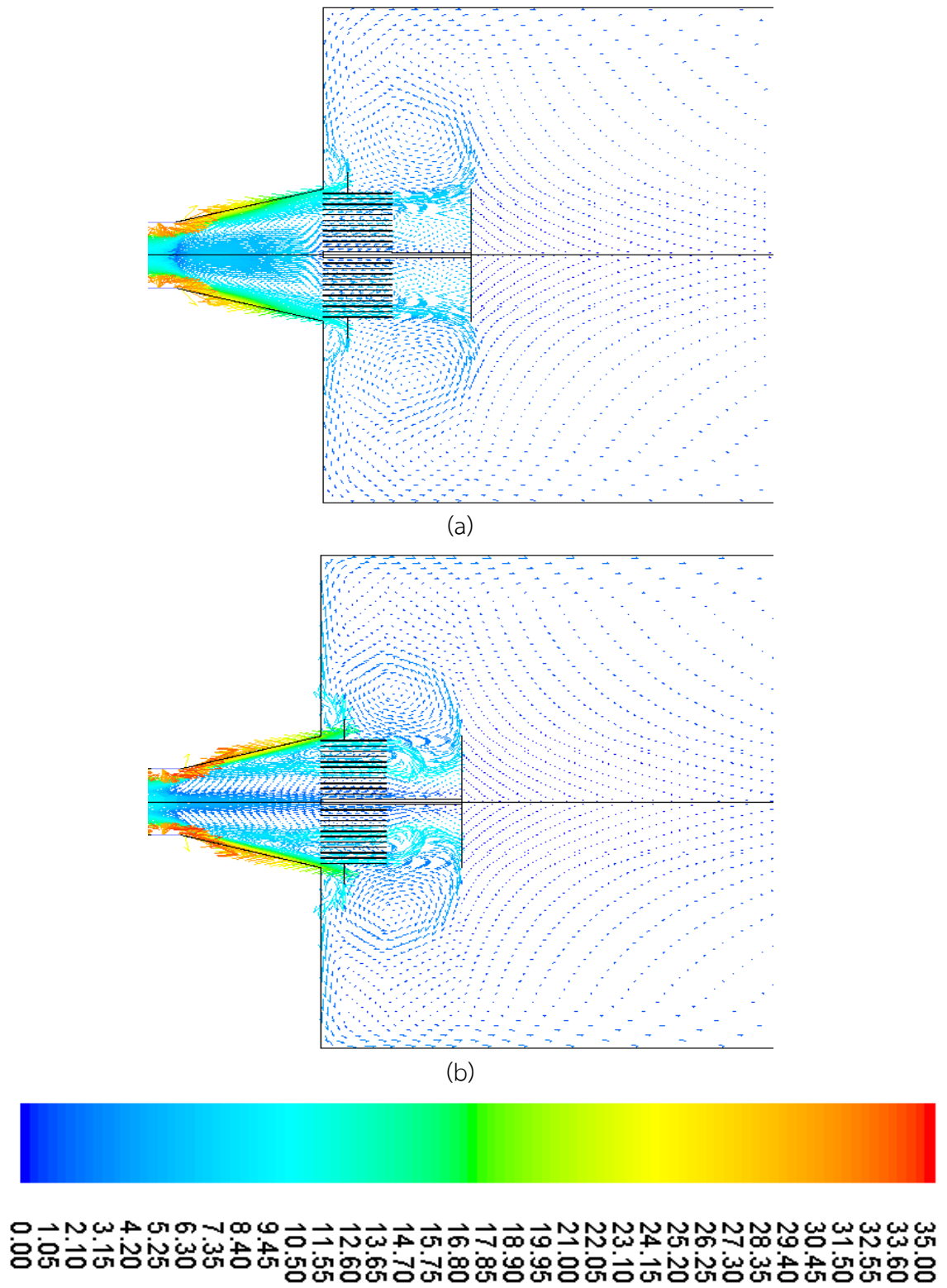


21.00
20.16
19.53
18.90
18.27
17.64
17.01
16.38
15.75
15.12
14.49
13.86
13.23
12.60
11.97
11.34
10.71
10.08
9.45
8.82
8.19
7.56
6.93
6.30
5.67
5.04
4.41
3.78
3.15
2.52
1.89
1.26
0.63
0.00

รูปที่ 5.55 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$

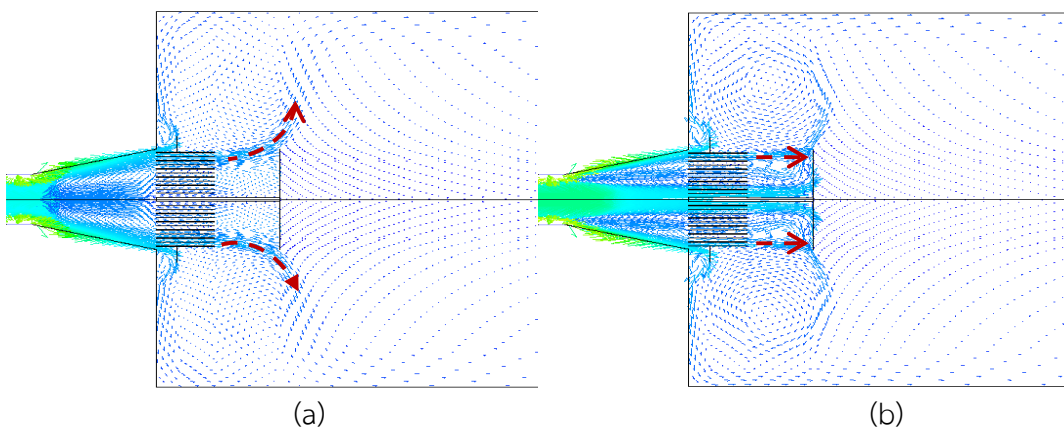


รูปที่ 5.56 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 50:50 (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$



รูปที่ 5.57 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° สัดส่วนอากาศ 20:80 (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$

จากรูปที่ 5.50-5.57 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศระหว่างแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% กรณีมีชุดทดลองมาวางกั้นการไหล ใช้สัดส่วนอากาศ 50:50 และ 20:80 ในขณะที่มุมในการจำลองเท่ากับ $60^\circ, 65^\circ, 70^\circ$ และ 80° โดยภาพรวมการกระจายของสนามเวกเตอร์จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับกรณีหัวข้อ 5.4.1.1 เพียงแต่กระแสภายในแกนกลางของเตาเผา (IRZ) เป็นลำเจ็ทที่ยาวขึ้นเพียงเล็กน้อย และการหมุนวนของกระแสนอกแกนกลางของเตาเผา (ERZ) มีรัศมีที่กว้างออกจากกรณีอากาศส่วนเกิน 10% เพียงเล็กน้อยเช่นกัน แต่ลักษณะรูปลักษณะยังคงใกล้เคียงกับกรณีอากาศส่วนเกิน 10% เมื่อนำแบบจำลองเวกเตอร์ความเร็วของอากาศในรูปแบบ Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ มาเปรียบเทียบกันพบว่า แบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ มีลักษณะบานออกและเป็นลำเจ็ทน้อยกว่า RNG $k-\epsilon$ เนื่องจากแบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ มีความสามารถในการคำนวณได้ละเอียดกว่า Standard $k-\epsilon$ จึงเป็นสาเหตุทำให้สังเกตเห็นลักษณะของการหมุนวนในกระแสการไหลมากขึ้นและชัดเจนกว่า



รูปที่ 5.58 เวกเตอร์ความเร็ว (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$

จากรูปที่ 5.58 แสดงแบบจำลองการจำลองเวกเตอร์ความเร็วของอากาศในรูปแบบ Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ มาเปรียบเทียบกัน พบว่าแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ แสดงให้เห็นกระแสการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแผงรังผึ้ง (Honey Comb) หลุดพ้นจากการปะทะบริเวณแผ่นรับแรงกด และมีลักษณะบานออกเป็นลำเจ็ทน้อยกว่า RNG $k-\epsilon$ เนื่องจากแบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ จะมีพจน์ที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลที่มีความเครียดเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน (R_ϵ) และสามารถคำนวณให้เห็นถึงกระแสการไหลที่มีความปั่นป่วนได้ละเอียดกว่าแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ จึงทำให้เห็นกระแสการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแผงรังผึ้ง (Honey Comb) ปะทะบริเวณแผ่นรับแรงกดเป็นลักษณะลำเจ็ทที่ค่อนข้างยาวและเกิดการหมุนวนภายในของกระแสการไหลได้ชัดเจนมากกว่า Standard $k-\epsilon$

5.5 ผลความคลาดเคลื่อนจากการทดลองกรณีใช้การจำลองแบบมีวัตถุมาขวางกั้นการไหล

เพื่อให้เป็นไปตามเป้าหมายของงานวิจัย ได้นำเสนอผลความคลาดเคลื่อนจากการทดลองกรณีมีวัตถุมาขวางกั้นการไหลบริเวณใกล้หัวเผา ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และ ตารางที่ 5.2 เพื่อให้แสดงถึงสมรรถนะของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบเลขสเวิร์ล

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าต่างๆจากการทดลองและการจำลอง ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10%

ปริมาณสัดส่วนอากาศ Primary air : Secondary air	Angle (Degree)	Experiment	ผลการจำลองเลขสเวิร์ล (เฉลี่ย)		ความคลาดเคลื่อน (%)	
			Standard	RNG	Standard	RNG
			$k - \varepsilon$	$k - \varepsilon$	$k - \varepsilon$	$k - \varepsilon$
50 : 50	60°	0.120	0.336	0.163	64.285	26.380
	65°	0.170	0.341	0.213	50.243	21.053
	70°	0.220	0.391	0.215	43.734	3.125
	80°	0.290	0.539	0.313	46.196	7.348
40 : 60	60°	0.150	0.333	0.202	55.000	25.987
	65°	0.200	0.341	0.211	41.406	5.512
	70°	0.250	0.381	0.231	34.497	8.225
	80°	0.320	0.595	0.330	46.218	3.030
30 : 70	60°	0.190	0.342	0.201	44.444	5.473
	65°	0.240	0.414	0.238	42.028	0.559
	70°	0.270	0.466	0.266	42.142	1.250
	80°	0.340	0.625	0.381	45.600	10.839
20 : 80	60°	0.200	0.334	0.194	40.239	3.093
	65°	0.240	0.391	0.206	37.702	18.255
	70°	0.270	0.437	0.263	37.1189	4.563
	80°	0.360	0.655	0.393	45.038	8.397

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าต่างๆจากการทดลองและการจำลอง ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20%

ปริมาณสัดส่วนอากาศ Primary air : Secondary air	Angle (Degree)	Experiment	ผลการจำลองเลขเสวิร์ล (เฉลี่ย)		ความคาดเคลื่อน (%)	
			Standard	RNG	Standard	RNG
			$k-\varepsilon$	$k-\varepsilon$	$k-\varepsilon$	$k-\varepsilon$
50 : 50	60°	0.153	0.348	0.161	56.034	5.165
	65°	0.195	0.342	0.193	42.927	1.026
	70°	0.260	0.393	0.212	33.842	18.333
	80°	0.325	0.529	0.316	38.602	2.667
40 : 60	60°	0.195	0.339	0.170	42.534	12.735
	65°	0.240	0.391	0.222	38.619	7.361
	70°	0.284	0.435	0.259	34.713	8.803
	80°	0.351	0.590	0.363	40.475	3.394
30 : 70	60°	0.215	0.369	0.195	41.734	9.302
	65°	0.280	0.414	0.221	32.313	21.190
	70°	0.310	0.467	0.250	33.666	19.355
	80°	0.400	0.627	0.390	36.204	2.583
20 : 80	60°	0.240	0.392	0.205	38.828	14.444
	65°	0.320	0.438	0.227	26.996	28.958
	70°	0.370	0.493	0.260	24.949	29.730
	80°	0.421	0.659	0.389	36.148	7.680

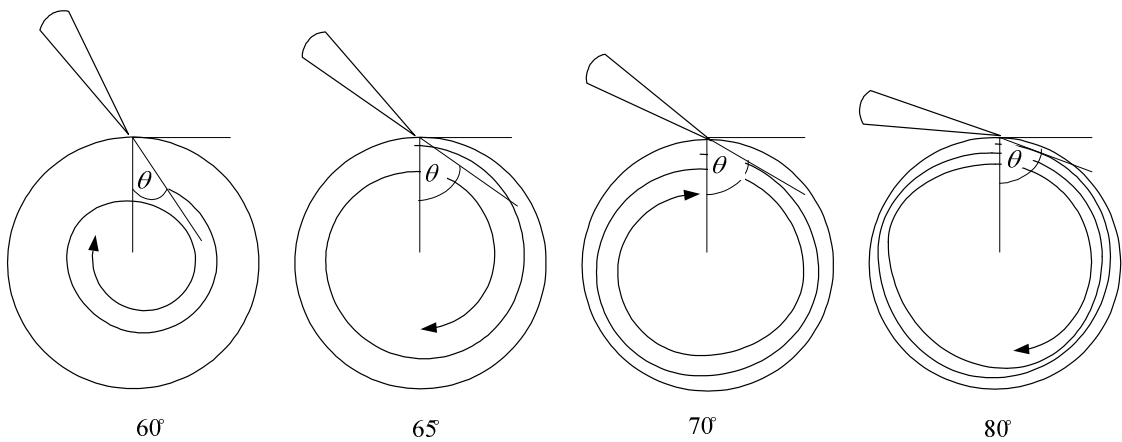
บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง การจำลองและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาสาระที่สำคัญของงานวิจัยที่ได้ดำเนินการ ซึ่งอภิปรายสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไปในอนาคต

6.1 สรุปผลงานวิจัย

6.1.1 การศึกษาอิทธิพลของมุมใบพัดของชุดสร้างอากาศหมุนวนเทียบกับแนวรัศมีที่มีผลต่อเลขสเวิร์ล ปริมาณอากาศที่ไหลผ่านใบพัดจะมีลักษณะหมุนควงเกิดเป็นกระแสหมุนวนที่มีขนาดต่างกันตามการเปลี่ยนแปลงของมุม และความรุนแรงของโมเมนตัมในแนวสัมผัสจะมีขนาดเพิ่มตามการเพิ่มของมุมใบพัด ดังแสดงในรูป 6.1 และพบว่าการนำชุดอุปกรณ์ทดสอบเลขสเวิร์ลไปติดตั้งตรงปลายทางออกของหัวเผา นั้น มีผลกระทบต่อผลการนำผลที่ได้ไปคำนวณหาเลขสเวิร์ลอย่างแน่นอน เนื่องจากกระแสการไหลของอากาศถูกขวางกั้นด้วยชุดอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 6.1 สมมุติฐานที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนมุม

6.1.2 จากการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลอง แสดงให้เห็นแนวโน้มของเลขสเวิร์ลจะมีการเพิ่มขึ้นตามมุม $60^\circ, 65^\circ, 70^\circ$ จนถึงสูงสุดที่มุม 80° ตามลำดับ การจำลองระหว่าง RNG $k-\epsilon$ และ Standard $k-\epsilon$ พบว่าแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ ให้ผลการทำนายค่าเลขสเวิร์ลค่อนข้างใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า Standard $k-\epsilon$ และขณะที่การคำนวณเลขสเวิร์ลแบบเฉพาะ Reversed Flow

หรือรวมทั้ง Forward Flow + Reversed Flow แบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ ก็ยังให้การทำนายผลได้ใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด

6.1.3 กรณีที่มีการจำลองเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน และเพิ่มอากาศส่วนที่ 2 ในขณะอากาศส่วนที่ 1 ลดลง แสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดของเลขสเวิร์ลมากขึ้นเมื่อเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเกิดจากความคาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่ใช้วัดสเวิร์ลยังมีไม่สมบูรณ์มากนัก

6.14 ในการจำลองควรเลือกรูปแบบการหาในลักษณะของทอร์ก เพื่อไปเปรียบเทียบกับข้อแตกต่างกับการทดลอง แต่ในที่นี้เป็นแบบจำลองแบบ 2 มิติ จึงไม่สามารถหาทอร์กได้ ดังนั้นควรเลือกใช้แบบจำลอง 3 มิติ

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไปในอนาคต

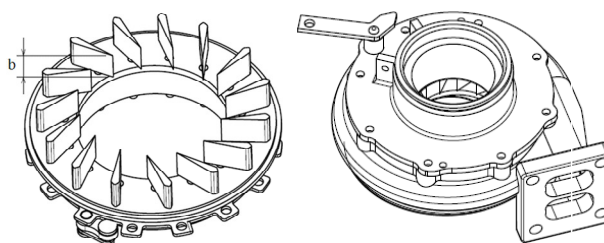
เนื่องจากการทดลองพบว่า ในสัดส่วนอัตราการไหลที่ต่ำเกินไปหรืออัตราการไหลที่สูงเกินไป จะทำให้ไม่สามารถวัดหรือเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากมีข้อจำกัดของอุปกรณ์ ควรออกแบบหรือปรับปรุงอุปกรณ์ทดสอบเลขสเวิร์ลให้มีความเหมาะสมกับการทดลองเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น

ควรปรับเปลี่ยนอุปกรณ์สำหรับปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 1 และอัตราการไหลอากาศส่วนที่ 2 ให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น

ควรปรับปรุงอุปกรณ์ Swirl Generator เนื่องจากอัตราการไหลที่สูงๆจะทำให้เกิดการสั่นที่รุนแรง อาจทำให้ Guide vane ของ Swirl Generator เกิดการเปลี่ยนแปลงของมุมไป จึงทำให้ผลที่ได้มีความคาดเคลื่อน

ในการจำลองแบบ 2 มิติ มีข้อจำกัดของโปรแกรม จึงไม่สามารถแสดงผลบางส่วนได้ จึงควรเลือกใช้การจำลองแบบ 3 มิติ เพื่อที่จะสามารถแสดงให้เห็นพฤติกรรมการหมุนควงการไหลในห้องเผาไหม้ที่มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

เพื่อให้ทราบถึงการไหลหมุนควงที่ออกจาก Swirl Generator ให้เห็นภาพชัดเจนมากยิ่งขึ้น ควรทำการจำลอง Swirl Generator ในรูปแบบ 3 มิติ ดังแสดงในรูป 6.2



รูปที่ 6.2 Guide Vane

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kiga, T. Watanabe, S. Yoshikawa, K. and Asano, K. "Evaluation of NO_x formation in pulverized coal firing by use of nitrogen isotope ratios", **Proceedings of the International Joint Power Generation Conference**; 2000, p. 1–7.
- [2] Steenbergen, W. Voskamp, J. "The rate of decay of swirl in turbulent pipe flow" **Flow Measurement and Instrumentation** 9 (1998) 67–78.
- [3] Yasir, M. Al-Abdeli , Assaad R. Masri "Recirculation and flowfield regimes of unconfined non-reacting swirling flows" **Experimental Thermal and Fluid Science** 27 (2003) 655–665
- [4] John F. Widmann, S. Rao Charagundla, Cary Presser "Aerodynamic study of a vane-cascade swirl generator " **Chemical Engineering Science** 55 (2000) 5311-5320
- [5] Huang, L. and EL-GENK1, M. S. "Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets" **Int. J. Heat Mass Transfer** Vol. 41, No. 3, pp. 583-400, 1998-1997 Elsevier Science Ltd. All rights reserved Printed in Great Britain
- [6] Sheen, H. J. Chen, W.J. Jeng, S. Y. Huang, T. L. "Correlation of Swirl Number for a Radial-Type Swirl Generator" **Experimental Thermal and Fluid Science** 1996; 12:444-451
- [7] Waseem, A. Nazeer, Robert E. Jackson, Jacob A. Peart, Dale R. Tree "Detailed measurements in a pulverized coal flame with natural gas reburning" **Fuel** 78 (1999) 689–699
- [8] Aldo Coghe, Giulio Solero, Gianfranco Scribano "Recirculation phenomena in a natural gas swirl combustor" **Experimental Thermal and Fluid Science** 28 (2004) 709–714
- [9] Beer, J. M. and Chigier, N. A., **Combustion Aerodynamics, Applied Science Publishers LTD, 1972.**
- [10] Wicker, R.B. and Eaton, J.K., Structure of a swirling, recirculating coaxial free jet and its effect on particle motion, **International of Multiphase Flow**, Volume 27, Issue 6, June 2001,Page 949-970.

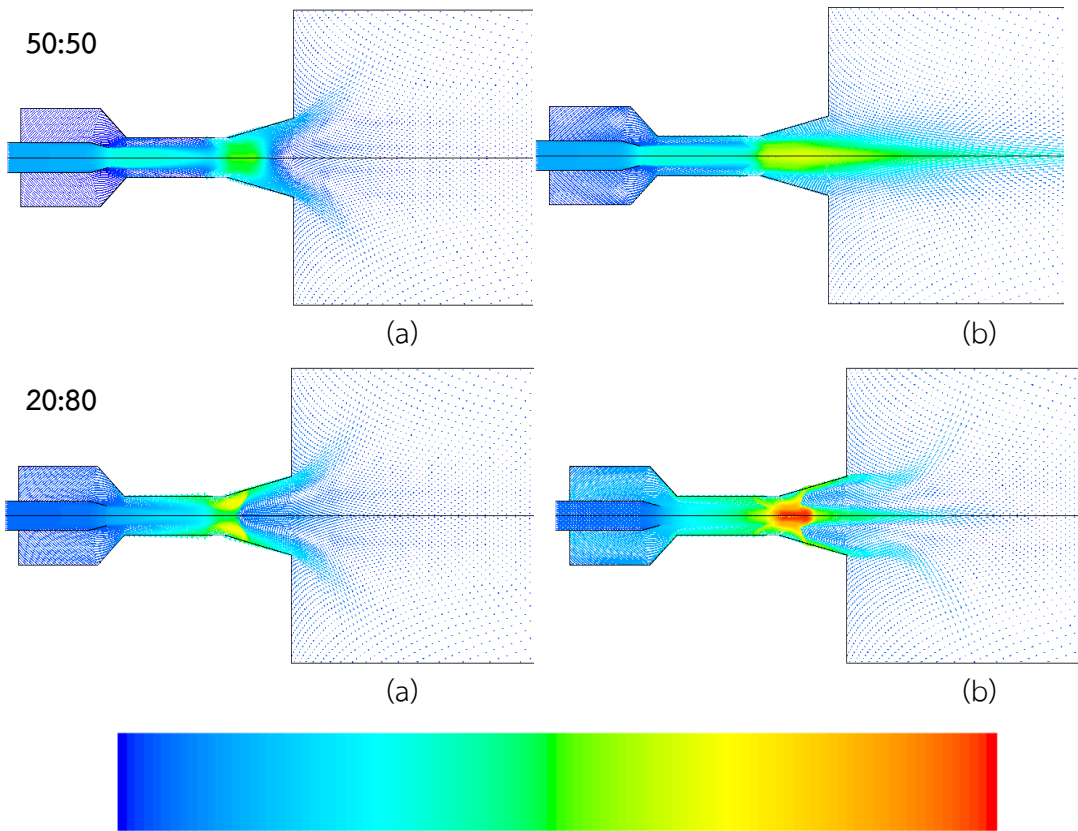
- [11] ANSYS CFX Release 12.0. 2006. **CFX-Solver Theory Guide**.
- [12] Launder, B.E. and Spalding, D.B. 1974. "The numerical computation of turbulent flows." **Computer methods in applied mechanics and engineering**. 3: 269-289
- [13] Wilcox, D.C. 1993. Turbulence modeling for CFD. La Canada CA :DCW **Industries Inc.**
- [14] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. 1995. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. **Longman Scientific and Technical**, Malaysia.
- [15] Zhengui, Li. Sun Rui, Chen Lizhe, Wan Zhixin, Wu Shaohua, Qin Yukun "Effect of primary air flow types on particle distribution in the near swirl burner region" **Fuel** 81 (2002) 829-835
- [16] กัณฑ์ อุดมโชคปิติ "การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อการออกแบบหัวเผาถ่านหินผงชนิดปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ต่ำ" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553
- [17] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. 2007. **An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method**. United Kingdom: Pearson Prentice hall.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

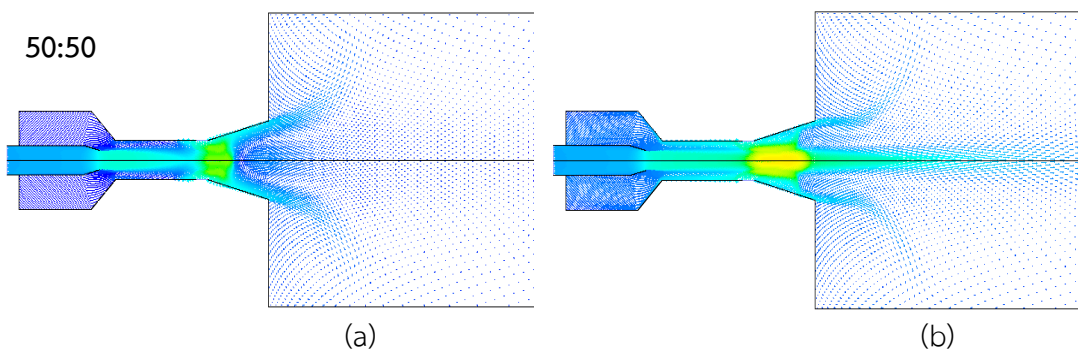
เปรียบเทียบสนามเวกเตอร์ความเร็วของแบบจำลองกรณีไม่มีชุดทดลอง

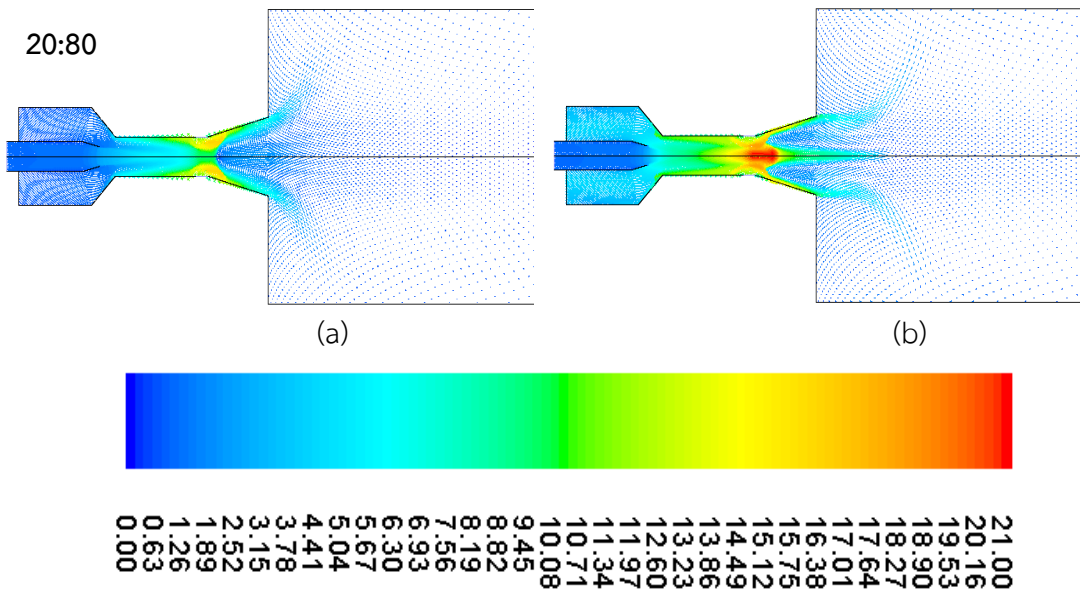
กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% (Excess air 10%)



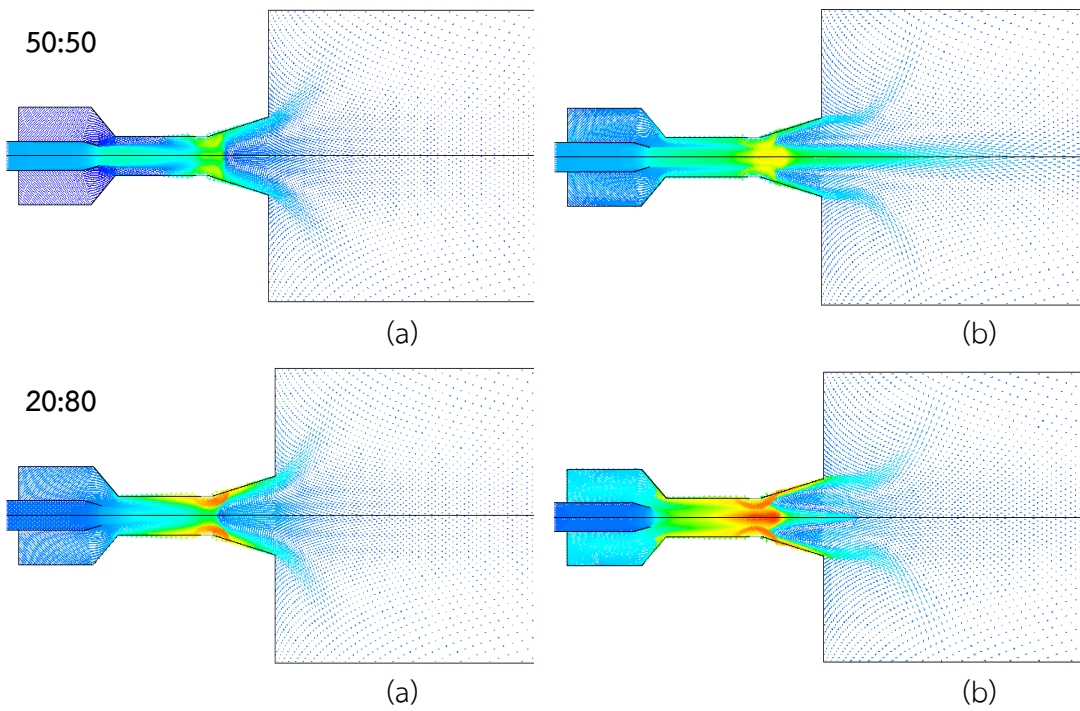
22.00
20.46
19.80
19.14
18.48
17.82
17.16
16.50
15.84
15.18
14.52
13.86
13.20
12.54
11.88
11.22
10.56
9.90
9.24
8.58
7.92
7.26
6.60
5.94
5.28
4.62
3.96
3.30
2.64
1.98
1.32
0.66
0.00

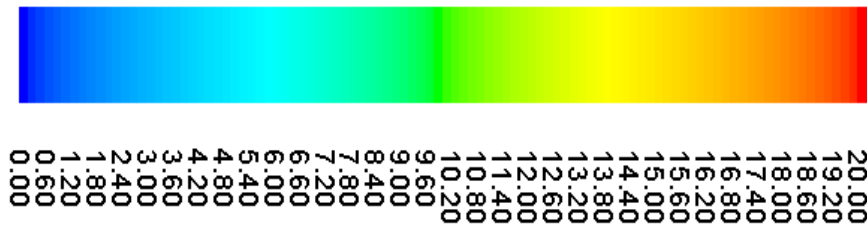
รูปที่ 5.12 และ 5.13 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° (a) Standard $k-\epsilon$,
(b) RNG $k-\epsilon$



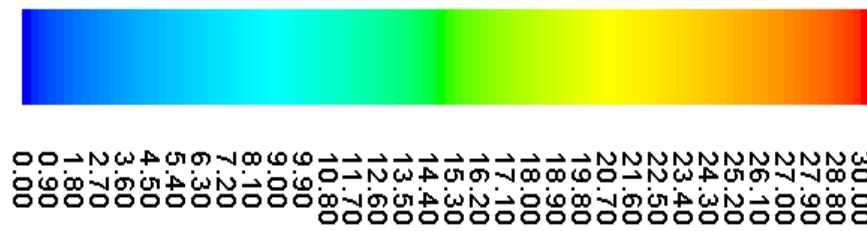
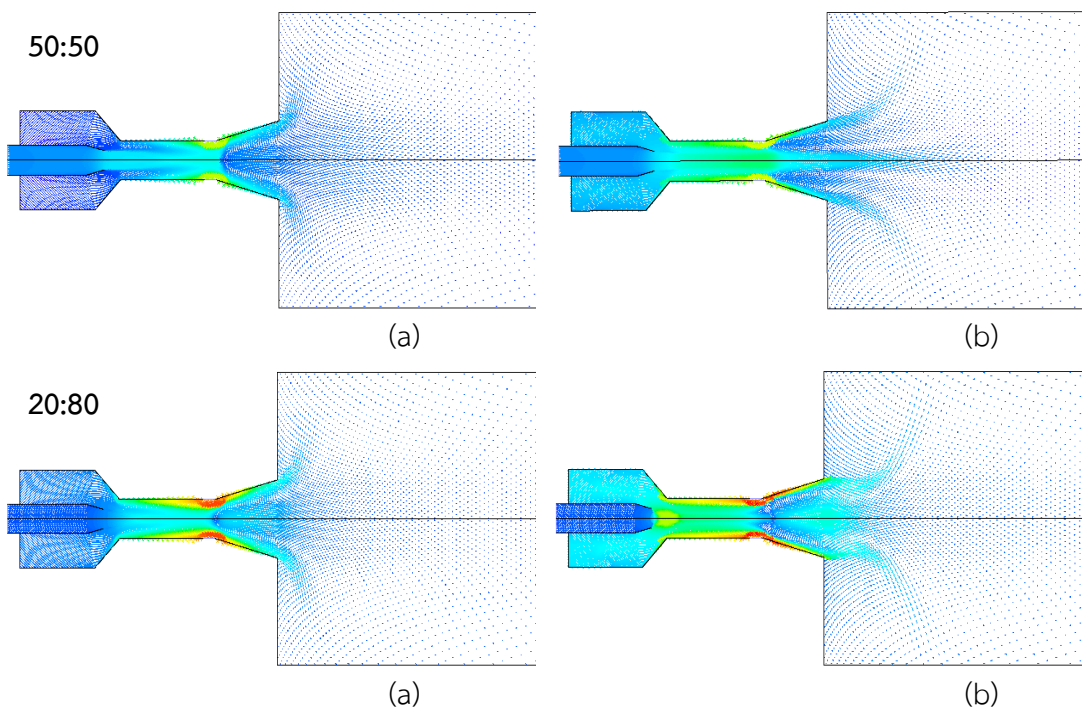


รูปที่ 5.14 และ 5.15 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° (a) Standard $k-\epsilon$,
(b) RNG $k-\epsilon$



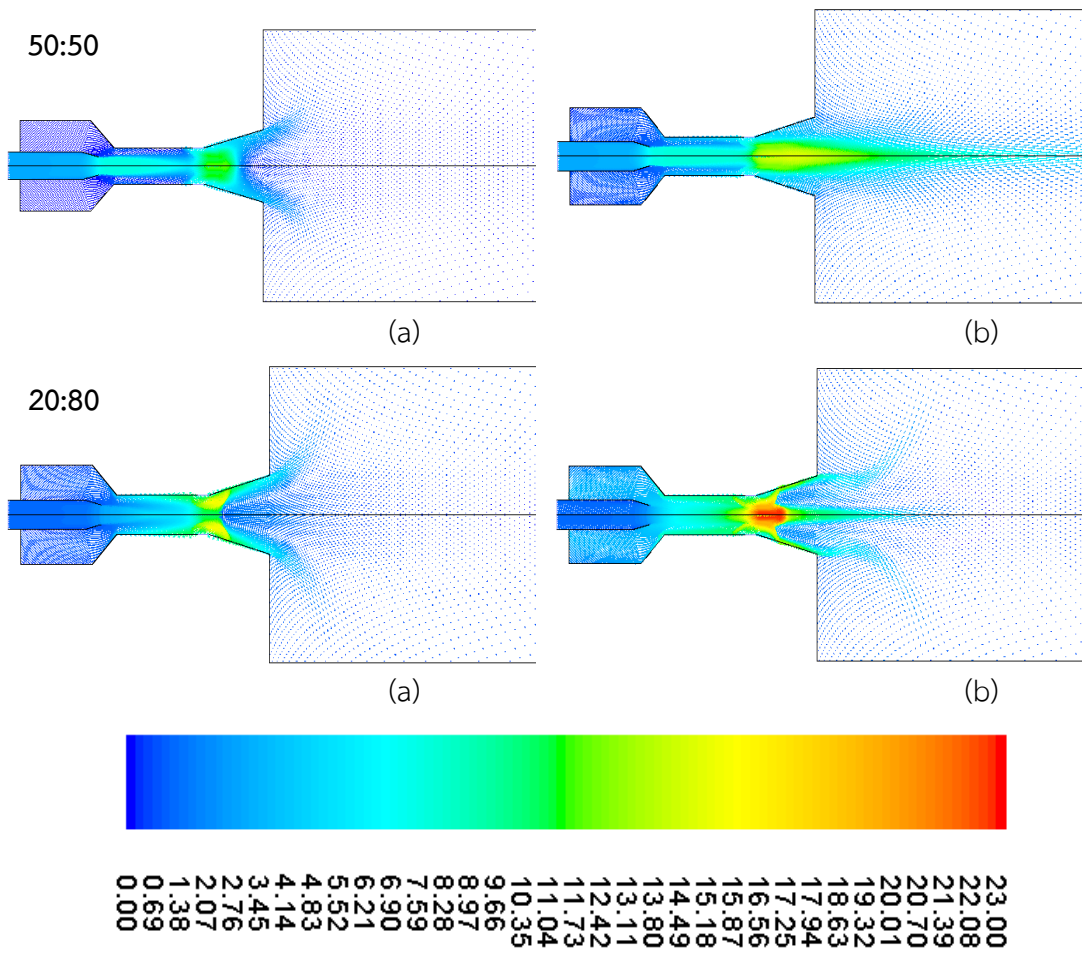


รูปที่ 5.16 และ 5.17 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° (a) Standard $k-\epsilon$,
 (b) RNG $k-\epsilon$

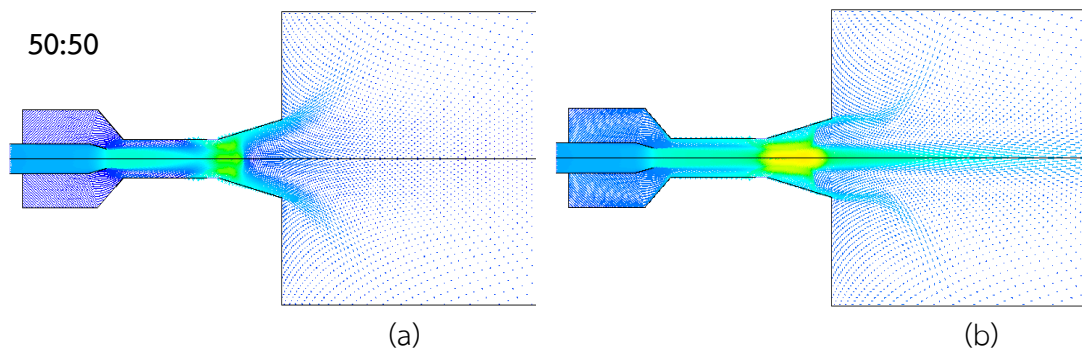


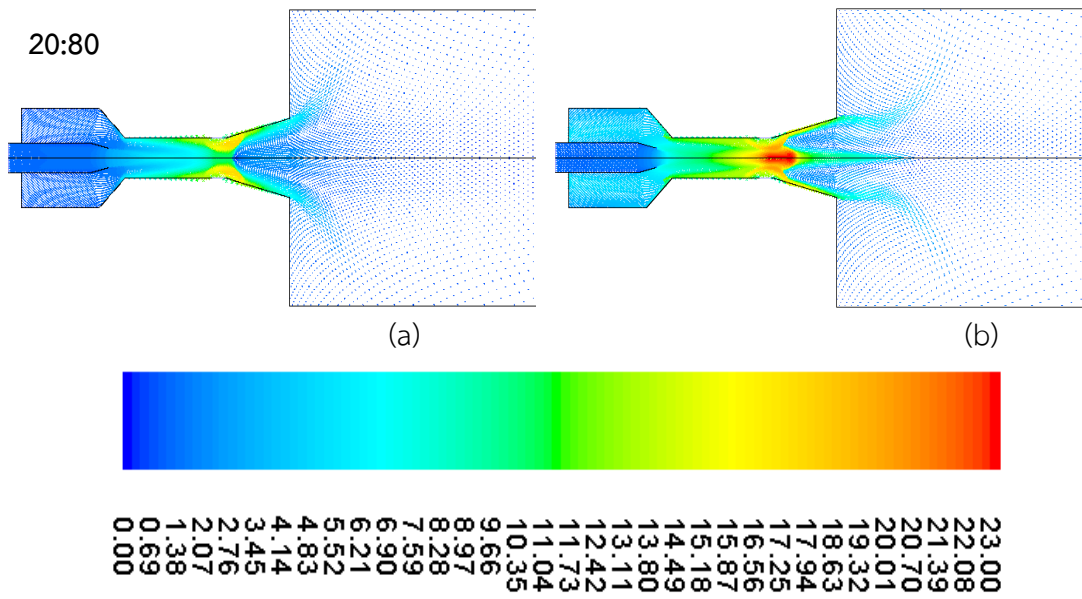
รูปที่ 5.18 และ 5.19 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° (a) Standard $k-\epsilon$,
 (b) RNG $k-\epsilon$

กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% (Excess air 20%)

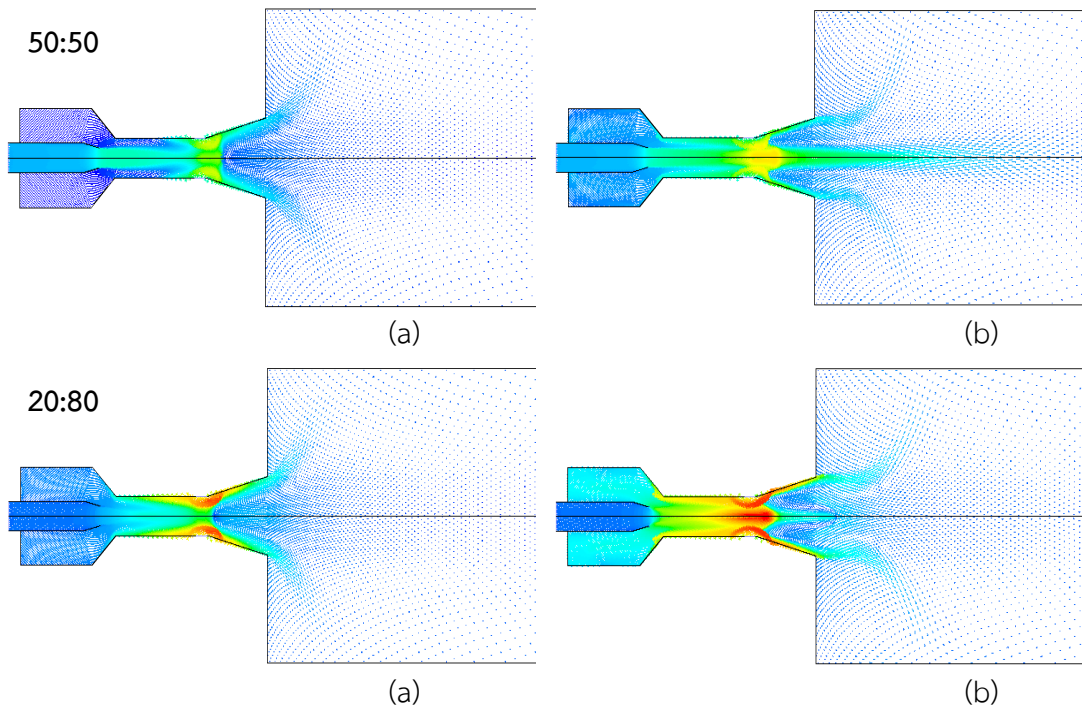


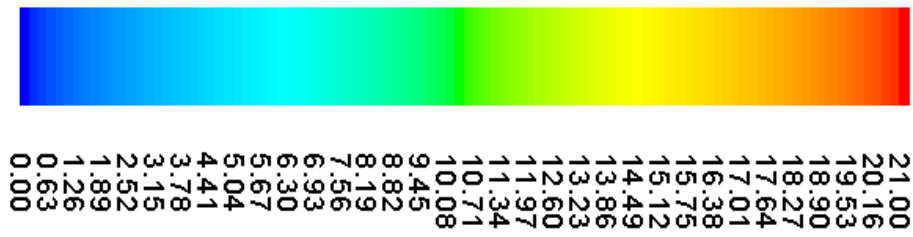
รูปที่ 5.20 และ 5.21 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$



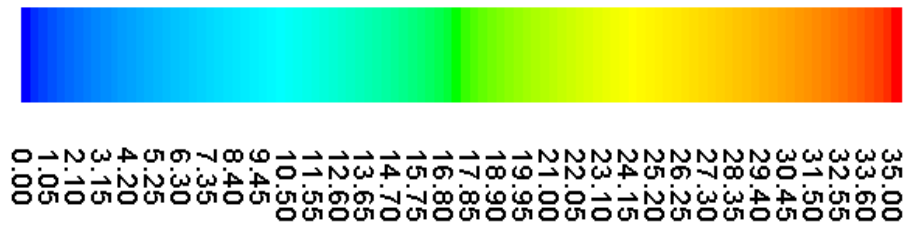
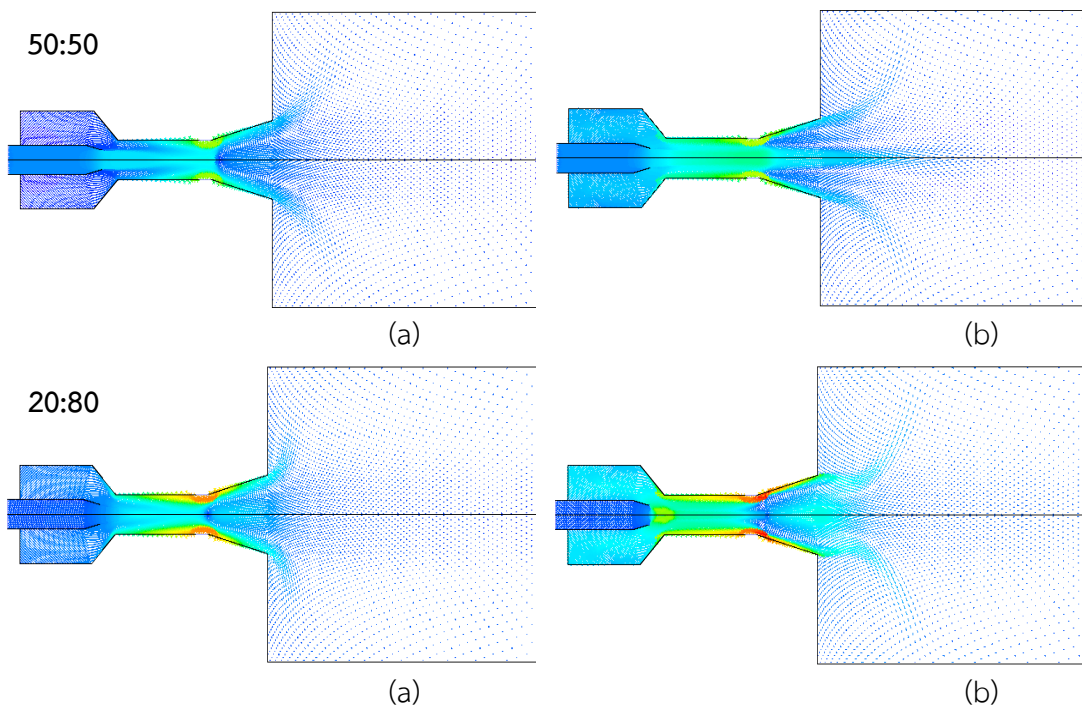


รูปที่ 5.22 และ 5.23 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° (a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$





รูปที่ 5.24 และ 5.25 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° (a) Standard $k-\epsilon$,
 (b) RNG $k-\epsilon$

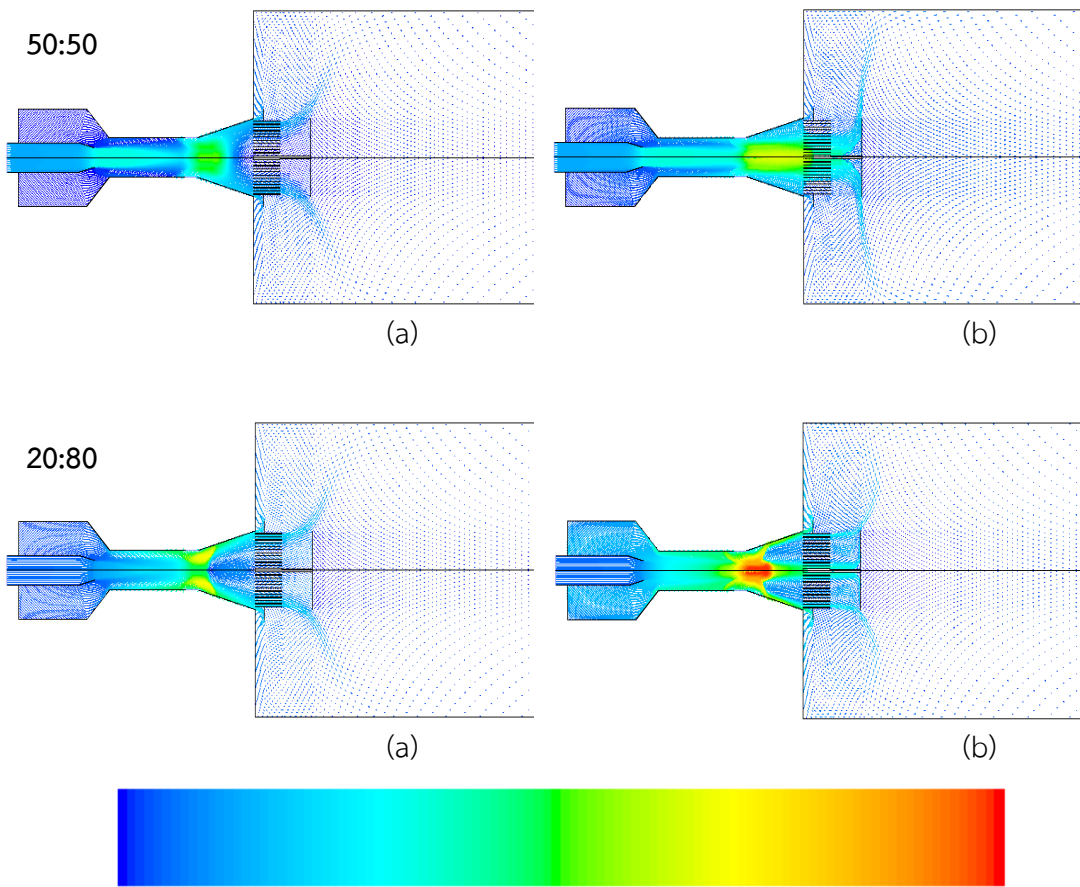


รูปที่ 5.26 และ 5.27 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° (a) Standard $k-\epsilon$,
 (b) RNG $k-\epsilon$

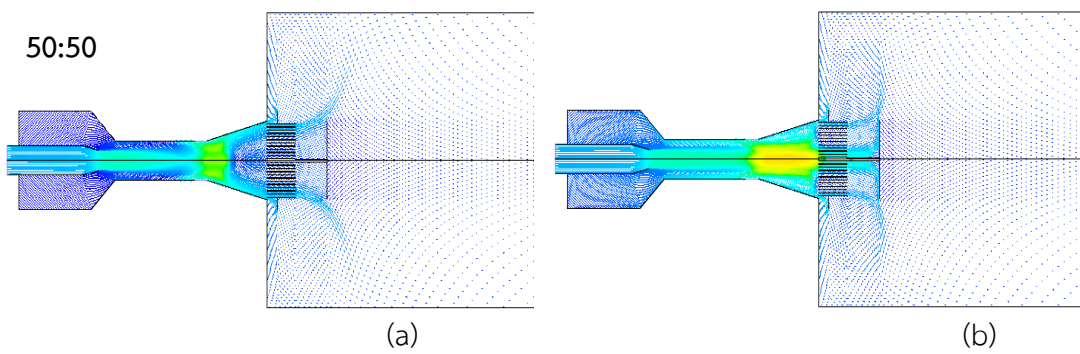
ภาคผนวก ข.

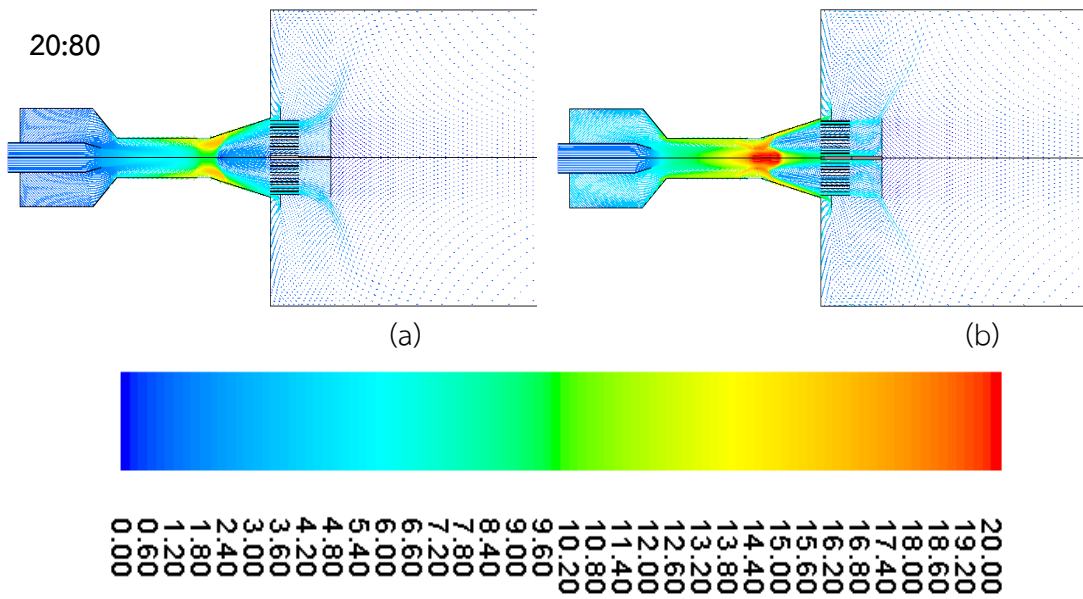
เปรียบเทียบสนามเวกเตอร์ความเร็วของแบบจำลองกรณีมีชุดทดลอง

กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10% (Excess air 10%)

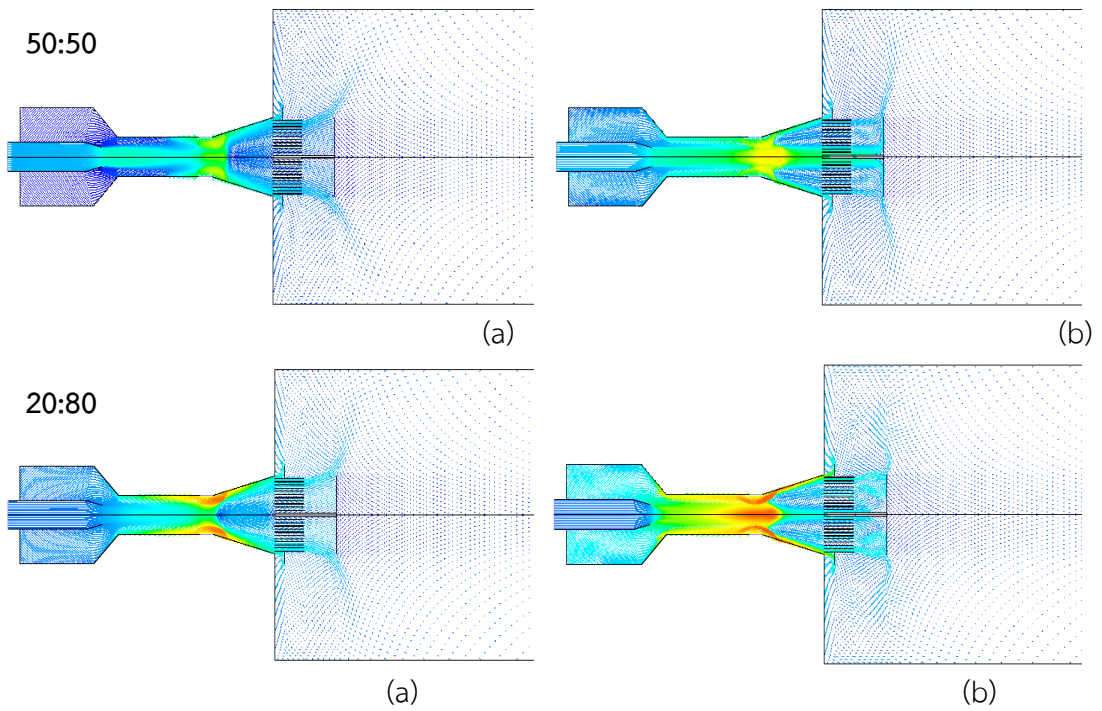


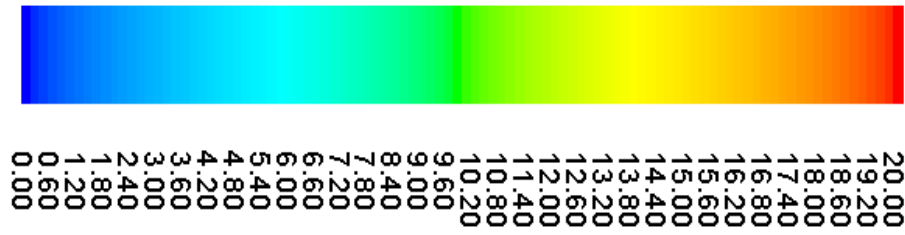
รูปที่ 5.42 และ 5.43 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° (a) Standard $k-\epsilon$,
(b) RNG $k-\epsilon$



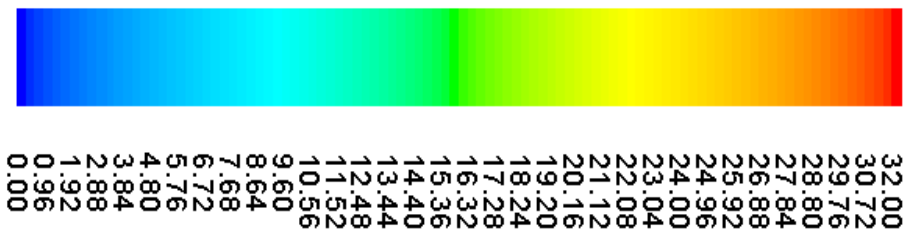
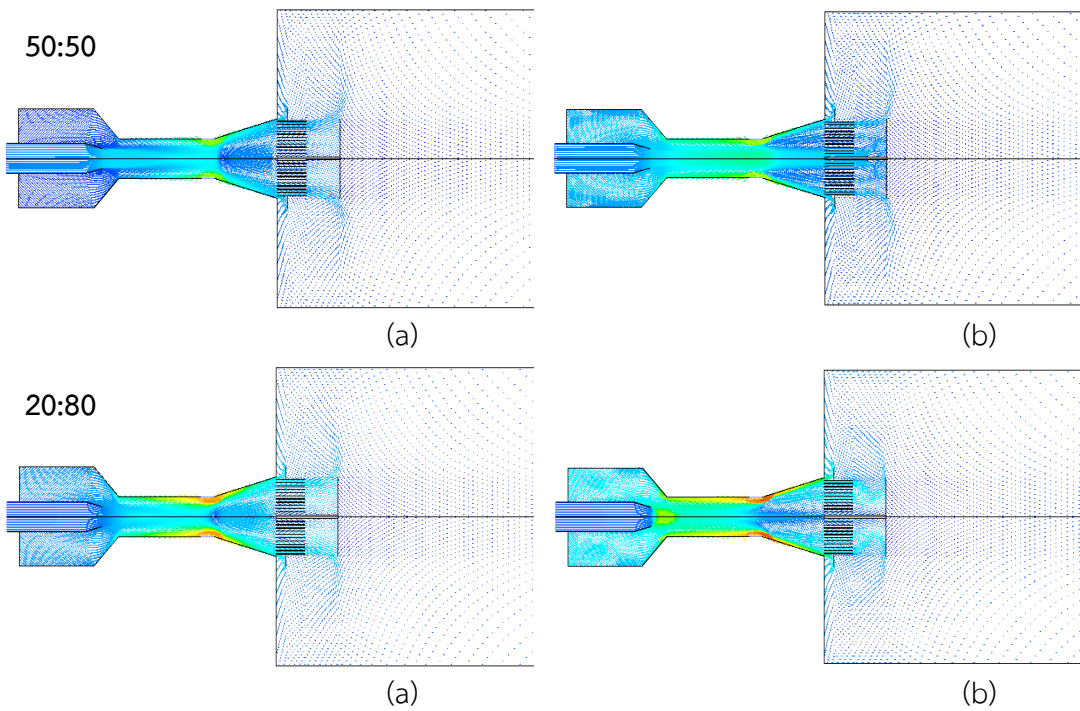


รูปที่ 5.44 และ 5.45 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° (a) Standard $k-\epsilon$,
 (b) RNG $k-\epsilon$



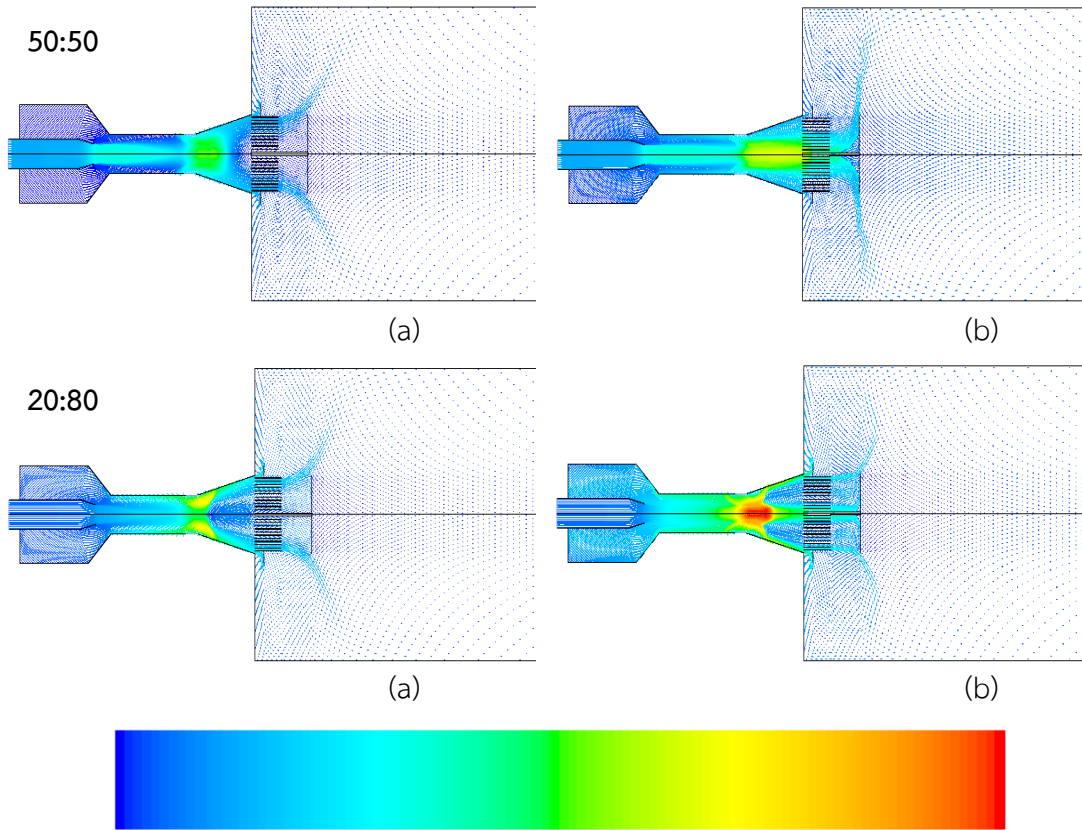


รูปที่ 5.46 และ 5.47 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° (a) Standard $k-\varepsilon$,
(b) RNG $k-\varepsilon$

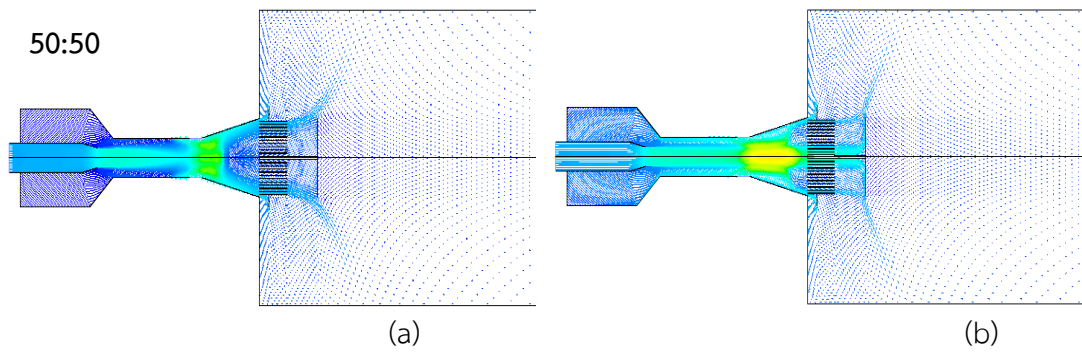


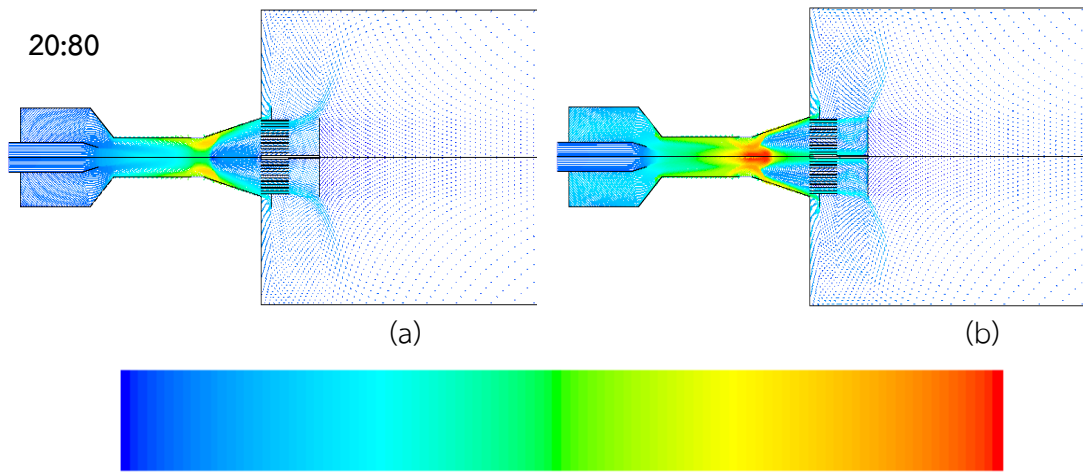
รูปที่ 5.48 และ 5.49 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° (a) Standard $k-\varepsilon$,
(b) RNG $k-\varepsilon$

กรณีเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20% (Excess air 20%)



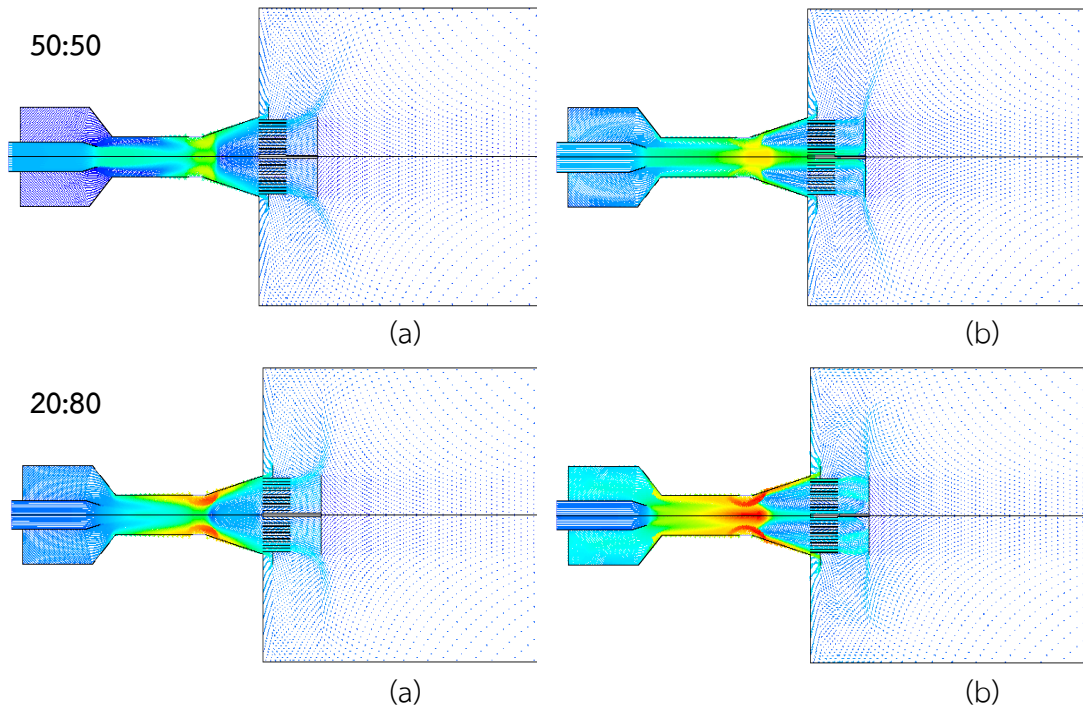
รูปที่ 5.50 และ 5.51 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 60° (a) Standard $k-\epsilon$,
 (b) RNG $k-\epsilon$





21.00
20.16
19.53
18.90
18.27
17.64
17.01
16.38
15.75
15.12
14.49
13.86
13.23
12.60
11.97
11.34
10.71
10.08
9.45
8.82
8.19
7.56
6.93
6.30
5.67
5.04
4.41
3.78
3.15
2.52
1.89
1.26
0.63
0.00

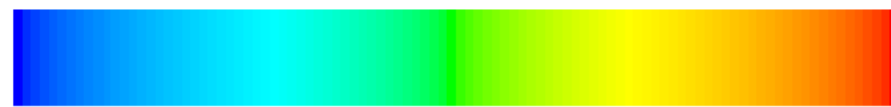
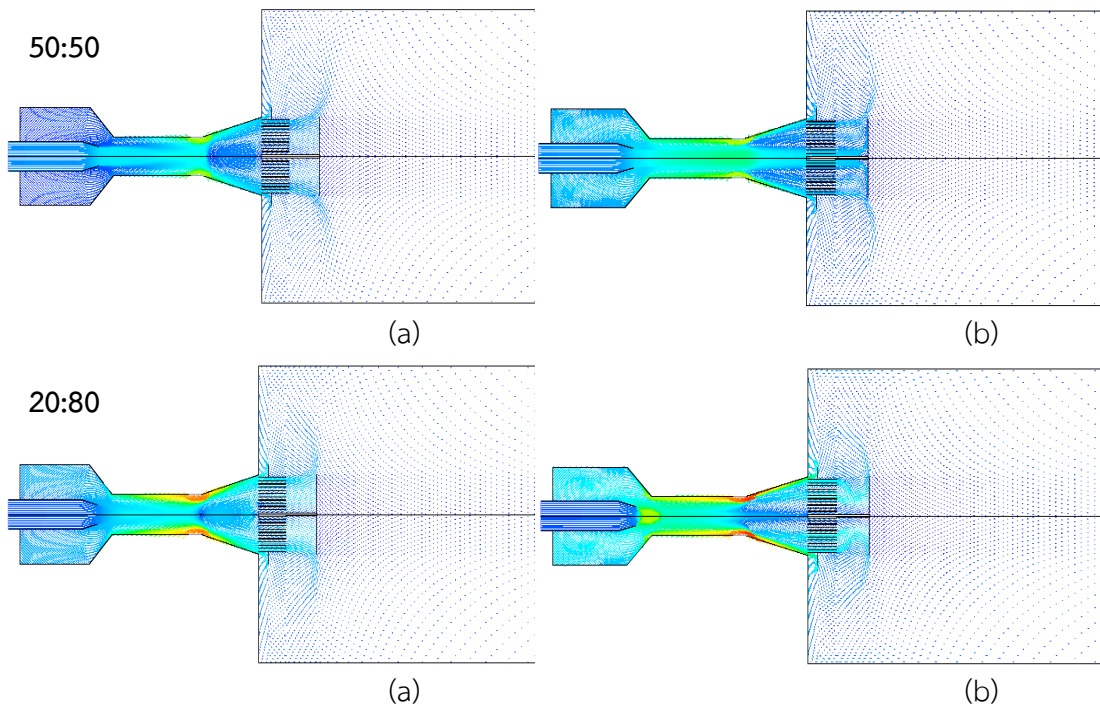
รูปที่ 5.52 และ 5.53 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 65° (a) Standard $k-\varepsilon$,
(b) RNG $k-\varepsilon$





21.00
20.16
19.53
18.90
18.27
17.64
17.01
16.38
15.75
15.12
14.49
13.86
13.23
12.60
11.97
11.34
10.71
10.08
9.45
8.82
8.19
7.56
6.93
6.30
5.67
5.04
4.41
3.78
3.15
2.52
1.89
1.26
0.63
0.00

รูปที่ 5.54 และ 5.55 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 70° (a) Standard $k-\epsilon$,
(b) RNG $k-\epsilon$



35.00
33.60
32.55
31.50
30.45
29.40
28.35
27.30
26.25
25.20
24.15
23.10
22.05
21.00
19.95
18.90
17.85
16.80
15.75
14.70
13.65
12.60
11.55
10.50
9.45
8.40
7.35
6.30
5.25
4.20
3.15
2.10
1.05
0.00

รูปที่ 5.56 และ 5.57 เวกเตอร์ความเร็ว (m/s) บริเวณหัวเผาที่มุม 80° (a) Standard $k-\epsilon$,
(b) RNG $k-\epsilon$

ภาคผนวก จ.
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์



ME-NETT 25

The 25th Conference of the Mechanical
Engineering Network of Thailand



ME-NETT 25

The 25th Conference of the Mechanical
Engineering Network of Thailand

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25

19 – 21 ตุลาคม 2554

[ENTER]

โดย



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ร่วมกับ



สมาคมวิศวกรรมเครื่องกลไทย

ณ โรงแรมอ่าวนาง วิลล่า รีสอร์ท
จังหวัดกระบี่

**การทดสอบหาตัวเลขสเวิร์ลของเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน
สำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงผง**

Examination of swirl number from a swirl generator for pulverized burner

พงศธร ปุยา^{1*} และ จารุวัตร เจริญสุข¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 0-2326-4197 โทรสาร: 0-2326-4198 E-mail: champ_kmitl52@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบหาตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน โดยใช้เทคนิคแผงรังผึ้งเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบแบบผง (Pulverized) ขนาด 100 kW แบบมีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียภายในห้องเผาไหม้กลับมาใช้ใหม่ โดยในการทดสอบได้ทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของอากาศส่วนที่ 1 คืออากาศที่ใช้ในการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศส่วนที่ 2 คืออากาศที่ใช้ในการสร้างอากาศหมุนวนในห้องเผาไหม้เป็น 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 และทำการปรับมุมใบพัดของกังหันเป็น 10, 20, 25 และ 30 องศาตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าค่าตัวเลขสเวิร์ลจะมีค่าสูงสุดที่มุมของใบพัดของกังหันเท่ากับ 20° โดยมีค่าเท่ากับ 0.25 และ 0.3 ที่อากาศส่วนเกิน 10% และ 20% ตามลำดับ อีกทั้งได้มีการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากการคำนวณพบว่าตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ในย่านเดียวกันกับค่าตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากการคำนวณ ยังคงมีความผิดพลาดอยู่ ซึ่งทางผู้วิจัยจะนำค่าความผิดพลาดไปใช้ชดเชยค่าตัวเลขสเวิร์ลที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาต่อไป

คำสำคัญ: ตัวเลขสเวิร์ล, หัวเผาเชื้อเพลิงผง, แผงรังผึ้ง

Abstract

This research aims to find the swirl count of a swirl generator that is installed in the 100 kW of flue gas recirculation pulverized burner by using the honeycomb technique. The primary/secondary air ratios were adjusted as: 50:50, 60:40, 70:30 and 80:20, while adjusting the blade angle of the swirl generator from 10-degrees up to 30-degrees. It was found that the maximum swirl count occurred at a 20-degree blade angle. There is 0.25 and 0.3 excess air at 10% and 20%. Moreover, the swirl number from the experiment and calculations are in the same range but there is an error. This error will be compensated for to improve the swirl number in the performance tests of the future.

Keywords: swirl number, pulverized burner, honeycomb technique.

1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญ ในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐาน ของประชากรและ เป็นปัจจัยพื้นฐาน การผลิตในภาคธุรกิจ และ อุตสาหกรรมดังนั้นจึงต้องมีการจัดหาพลังงานให้มี ปริมาณที่เพียงพอสอดคล้องกับความต้องการของ ประชากร จากที่ประเทศไทยเป็นประเทศแห่ง เกษตรกรรมจึงมีชีวมวลบางส่วนที่เหลือจาก การเกษตรซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนใน ภาคอุตสาหกรรม รวมถึงการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้มีการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้กับ เทคโนโลยีสมัยใหม่ ซึ่งการเผาไหม้เป็นวิธีที่ใช้กัน มากในการนำเชื้อเพลิงแข็งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดย ในที่นี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบระบบการ เผาไหม้แบบเชื้อเพลิงผงซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้ กันอย่างแพร่หลาย แต่เทคโนโลยีนี้ยังต้องการ พัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยหนึ่งใน วิธีการพัฒนาคือ การหมุนเวียนก๊าซไอเสียที่มีอุณหภูมิ สูงกลับมาใช้ใหม่ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้โดยระบบ ของหัวเผาเชื้อเพลิงผงแบบมีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย ย้อนกลับมาใช้ใหม่ที่สร้างขึ้นมีการติดตั้งเครื่องกำเนิด กระแสหมุนวนเพื่อสร้างความปั่นป่วนและยืด ระยะเวลาการเผาไหม้ ทำให้ลักษณะของเปลวไฟเป็น รูปดอกบัวและเกิดการหมุนเวียนก๊าซไอเสียทั้งแบบ หมุนวนภายใน (Internal recirculation zone) และ หมุนวนภายนอก (External recirculation zone) ซึ่ง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของหัวเผาดีขึ้น

สำหรับการศึกษาลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ ภายในห้องเผาไหม้โดยเฉพาะการไหลแบบหมุนวนมีความจำเป็นที่จะนำไปใช้ในการออกแบบและเพิ่ม ประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้ซึ่งสามารถศึกษาได้จาก Beer และ Chigier [1] Greitzer และคณะ [2] Lefebvre [3] และ Schlüter [4] Wicker และ Eaton [5] ได้แสดงให้เห็นถึงข้อดีของการใช้ตัวสร้างการไหลแบบหมุนวนซึ่งทำให้การกระจายตัวของอากาศเกิดอย่างรวดเร็วและช่วยให้เกิดการผสมกันของอากาศและ

เชื้อเพลิงดีขึ้น Sadd A.Ahmed [6] แสดงให้เห็นว่าการ ไหลแบบหมุนวนจะทำให้เกิดการกระแสวนไหล ย้อนกลับ ณ บริเวณตรงกลางห้องเผาไหม้และทำให้ การกระแสวนไหลมีโครงสร้างที่ปั่นป่วนมากขึ้น จึงทำให้อากาศและเชื้อเพลิงเกิดการผสมกันที่ดี

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การทดสอบ หาตัวเลขสวิร์ลที่ได้จากเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทดสอบสมรรถนะของหัวเผา เชื้อเพลิงผงขนาด 100 kW และทำการเปรียบเทียบ ผลการทดลองที่ได้กับการคำนวณหาตัวเลขสวิร์ลทาง ทฤษฎี

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

การออกแบบการสร้างการไหลแบบหมุนวนให้มีความเหมาะสมและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของห้องเผา ไหม้โดยที่ขนาดของมุม จำนวนและขนาดของใบพัด จะส่งผลถึงความแรงของการหมุนวนและบ่งบอกถึง ขนาดของการไหลวนกลับของกระแสอากาศตรงกลาง ห้องเผาไหม้ โดยที่ความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวน บ่งบอกด้วยตัวเลขสวิร์ล (Sw) ซึ่งการไหลภายใน ห้องเผาไหม้จะถูกนิยามด้วยอัตราส่วนของ โมเมนตัมเชิงมุมต่อโมเมนตัมเชิงเส้นหารด้วยคุณสมบัติเชิง ความยาว จึงได้นำเทคนิคดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ดัง สมการ

$$Sw_{ril} = \frac{\tan \text{ gentinal momentum}}{\text{axial momentum}} \quad (1)$$

$$Sw_{ril} = \frac{\rho_{air} v_r A v_{\theta} r}{((\rho_{air} v_1 A_1 + \rho_{air} v_r A_2) v_{exit}) D} \quad (2)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัด

ρ_{air} คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของอากาศ

v_r คือ ความเร็วในแนวรัศมี

v_{θ} คือ ความเร็วในแนวสัมผัส

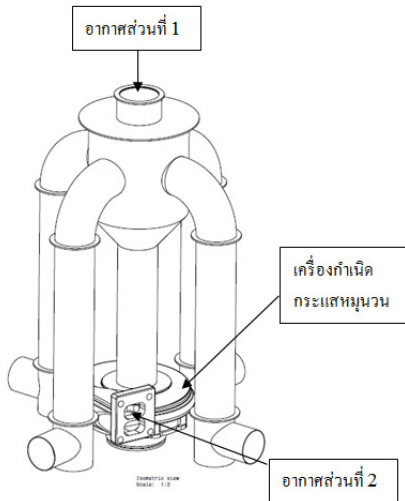
v_{exit} คือ ความเร็วทางออก

r คือ รัศมี

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

3. อุปกรณ์ทดสอบตัวเลขสเวิร์ล

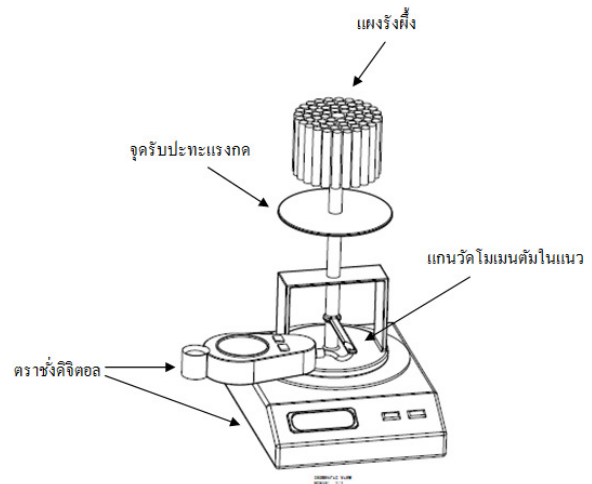
งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้กังหันแปรผันที่ห่อमितซูบิชิ รุ่น 3C04 รูปทรงหอยโข่ง ที่สามารถปรับมุมของใบพัดได้ 10-30 องศา มาเป็นเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวนที่ โดยทำการติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางหัวเผาซึ่งอากาศที่ใช้ในการสร้างกระแสหมุนวนคืออากาศส่วนที่ 2 ที่ถูกจ่ายเข้าสู่บริเวณทางเข้าของกังหันในแนวรัศมีและถูกปรับมุมของการไหลด้วยใบพัดแปรผัน ไหลออกเป็นลักษณะหมุนควงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ในขณะที่อากาศส่วนที่ 1 จะถูกจ่ายเข้าสู่หัวเผาในแนวแกนที่บริเวณด้านบนของหัวเผาผ่านเจ็ทปัดด้วยความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 1.



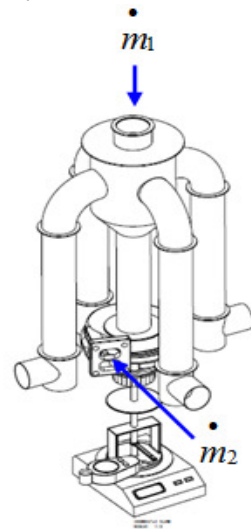
รูปที่ 1 แสดงช่องทางเข้าของอากาศส่วนที่ 1 และ 2 และเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน

ในการทดลองวัดหาตัวเลขสเวิร์ลทำโดยการหาอัตราส่วนของโมเมนต์ในแนวสัมผัสและแนวแกน โดยโมเมนต์ในแนวสัมผัส ทำการวัดด้วยเทคนิคการวัดทอร์กสถิตย์ที่เกิดจากการสูญเสียของโมเมนต์ภายในแผงรังผึ้ง ที่ถูกติดตั้งถัดจากทางออกของกังหัน โดยจะวัดด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลในลักษณะของแรงดึงค่าที่ได้จะเป็นแรงดึงที่เกิดจากการต้านแรงการหมุนควงของอากาศ เพราะฉะนั้นโมเมนต์ในแนวสัมผัสจะ ได้จากการหาทอร์กของแรงดึงที่เกิดขึ้น ส่วนโมเมนต์ในแนวแกนได้จากผลคูณของแรงกดอันเนื่องมาจากอัตราการไหลรวมที่วัดบริเวณทางออกของกังหันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออก โดยแรงกดได้จาก

การอ่านค่าจากตราชั่งดิจิตอลที่ต่ออยู่กับแกนของจุดรับปะทะแรงกด ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นจึงทำการติดตั้งชุดทดสอบเข้ากับระบบของท่ออากาศส่วนที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3

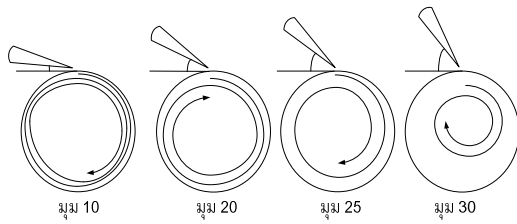


รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาตัวเลขสเวิร์ล



รูปที่ 3 ลักษณะการติดตั้งชุดทดสอบหาตัวเลขสเวิร์ล ในขณะที่อากาศส่วนที่ 2 ไหลเข้าเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน ปริมาณอากาศทั้งหมดจะไหลตามทิศทางของมุมของใบพัดที่สามารถปรับมุมได้ 10, 20, 25 และ 30 องศา กับแนวสัมผัส ดังนั้นปริมาณอากาศที่ไหลผ่านใบพัดจะมีลักษณะหมุนควงเกิดเป็นกระแสหมุนวนของอากาศที่มีขนาดต่างกันตามการเปลี่ยนแปลงมุมของใบพัด โดยขนาดของกระแสหมุนวนแสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าขนาดความรุนแรงของโมเมนต์ในแนวสัมผัสจะมี ขนาดลดลงตามการเพิ่มของมุมของใบพัด ดังนั้นสมมุติฐาน

ในการทดลอง คาดว่าการเพิ่มมุมของใบพัดจะส่งผลให้ค่าตัวเลขสเวิร์ลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเมนตัมในแนวสัมผัสมีมาก



รูปที่ 5 ลักษณะกระแสหมุนวนของอากาศ

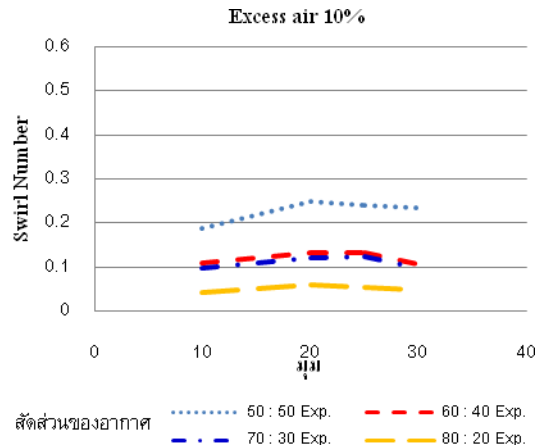
4. วิธีการทดลอง

เตรียมอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 3 โดยการนำชุดทดสอบตัวเลขสเวิร์ลไปติดตั้งตรงปลายทางออกของกังหันซึ่งการทดสอบนี้จะใช้พัดลมต้นกำลังขนาด 9 แรงม้า สำหรับใช้ในการอัดอากาศเข้าสู่ด้านบนของหัวเผาผ่านเจ็ทบี้มด้วยความเร็วสูงและเข้าสู่เครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน จากนั้นทำการปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 1 (Primary air) และอากาศส่วนที่ 2 (Secondary air) ตามเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งในการวัดอัตราการไหลของอากาศทั้งสองส่วนโดยจะใช้ Pitot tube ควบคุมอัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 1 (Primary air) และส่วนที่ 2 (Secondary air) ด้วย Ball valves จากนั้นทำการปรับอัตราการไหลอากาศพร้อมกับปรับมุมของกังหันตามเงื่อนไขในขณะเดียวกันก็ทำการบันทึกผลการทดลองตารางที่ 1. เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองที่ Excess air 10% และ Excess air 20%

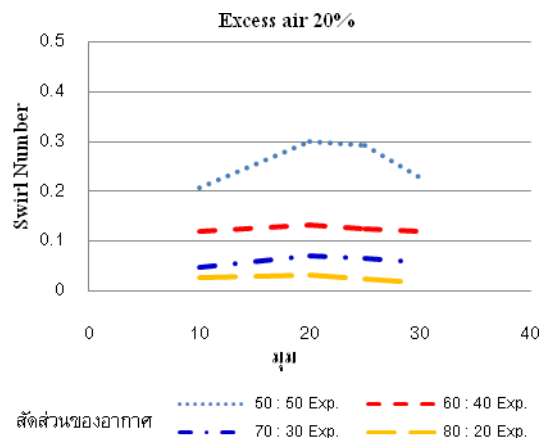
$m_1 : m_2$		มุมของใบพัดของเทอร์โบแปรผันเทียบกับแนวสัมผัส (องศา)
50%	50%	10, 20, 25, 30
60%	40%	10, 20, 25, 30
70%	30%	10, 20, 25, 30
80%	20%	10, 20, 25, 30

5. ผลการทดลอง

5.1 ค่าตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของมุมใบพัดที่มีผลต่อตัวเลขสเวิร์ลที่สัดส่วนอากาศต่างๆ กรณีอากาศส่วนเกิน 10%



รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของมุมใบพัดที่มีผลต่อตัวเลขสเวิร์ลที่สัดส่วนอากาศต่างๆ กรณีอากาศส่วนเกิน 20%

จากรูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของมุมใบพัดที่มีผลต่อตัวเลขสเวิร์ลที่สัดส่วนอากาศต่างๆ กรณีอากาศส่วนเกิน 10% จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการเพิ่มมุมของใบพัด ค่าตัวเลขสเวิร์ลจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่มุมใบพัด 20° จากนั้นตัวเลขสเวิร์ลจะมีค่าลดลงต่ำที่มุม 30° โดยมีแนวโน้มเดียวกันในทุกเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งค่าตัวเลขสเวิร์ลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.25 ที่สัดส่วนอากาศ 50:50 ซึ่งผลการทดลองที่ได้ขัดแย้งกับสมมุติฐานของงานวิจัย ทั้งนี้คาดว่าที่มุมของใบพัด 10° ค่าตัวเลขสเวิร์ลมีค่าน้อยเพราะเกิดการลดลงของ

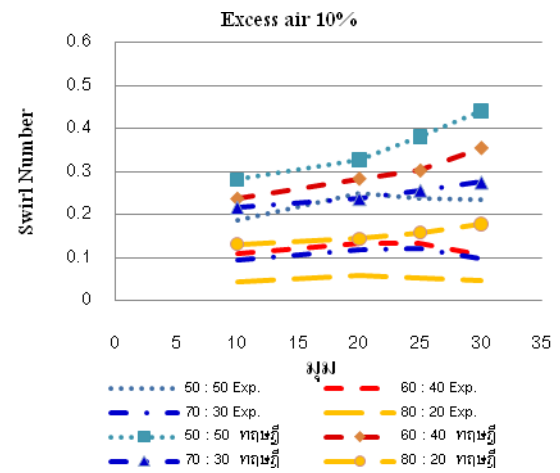
โมเมนต์ในแนวสัมผัส เนื่องจากปริมาณอากาศพุ่งเข้าไปปะทะกับผนังของท่อทางออกของเทอร์โบ ส่วนการตกลงของค่าตัวเลขสวิร์ลในกรณีมุมใบพัดมากกว่า 20° เนื่องจากโมเมนต์ในแนวสัมผัสสูญเสียไปกับโมเมนต์ในแนวแกน เพราะขนาดกระแสมุมวนที่ถูกสร้างขึ้นมีขนาดเล็กแสดงดังรูปที่ 5 นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มสัดส่วนของอากาศทั้งสองส่วนส่งผลให้ ค่าตัวเลขสวิร์ลมีค่าน้อยลงเนื่องจาก โมเมนต์ในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 1

จากรูปที่ 7. แสดงอิทธิพลของมุมใบพัดที่มีผลต่อตัวเลขสวิร์ลที่สัดส่วนอากาศต่างๆ กรณีอากาศส่วนเกิน 20% จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการเพิ่มมุมของใบพัด ค่าตัวเลขสวิร์ลจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่มุมใบพัด 20° จากนั้นตัวเลขสวิร์ลจะมีค่าลดลงต่ำสุดที่มุม 30° โดยมีแนวโน้มเดียวกันในทุกเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งค่าตัวเลขสวิร์ลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.3 ที่สัดส่วนอากาศ 50:50 พฤติกรรมของค่าตัวเลขสวิร์ลในของอากาศส่วนเกินทั้งสองกรณีจะเป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน แต่ค่าตัวเลขสวิร์ลโดยเฉลี่ยของกรณีอากาศส่วนเกินเท่ากับ 20% ที่สัดส่วน 70:30 และ 80:20 มีค่าน้อยกว่า ค่าตัวเลขสวิร์ลของสัดส่วนเดียวกัน ที่อากาศส่วนเกิน 10% คาดว่าเป็นเพราะที่อากาศส่วนเกิน 20% มีปริมาณอัตราการไหลรวมของระบบมากกว่า จึงทำให้เมื่อเพิ่มสัดส่วนของอากาศส่วนที่ 1 แล้วส่งผลให้โมเมนต์ในแนวแกนมีความรุนแรงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอากาศส่วนเกิน 10%

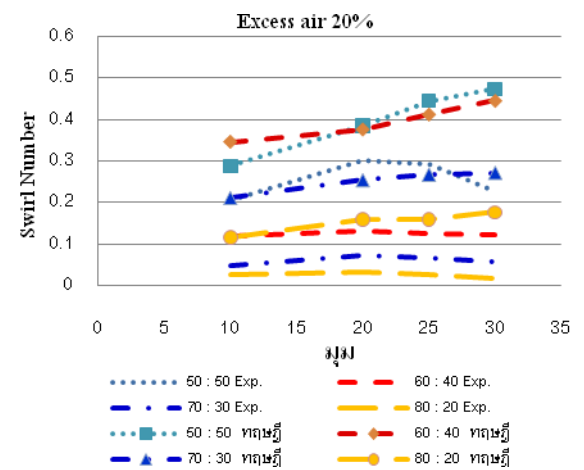
รูปที่ 8 และ 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขสวิร์ลที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎี ที่สัดส่วนอากาศและมุมต่างๆ กรณีอากาศส่วนเกิน 10% และ 20 % ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบพบว่าตัวเลขสวิร์ลที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ในย่านเดียวกับค่าตัวเลขสวิร์ลที่ได้จากการคำนวณ แต่อย่างไรก็ตามมีความคลาดเคลื่อน (error) อยู่มาก โดยค่าความคลาดเคลื่อนจะน้อยลงตามการเพิ่มสัดส่วนอากาศทั้งสองส่วน คาดว่าเกิดจากการทดลอง มีความเสียดทาน

ของตลับลูก การรั่วของปริมาณลม หรือความผิดพลาดเนื่องจากการวัดและการอ่านค่า ทั้งหมดนี้จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าตัวเลขสวิร์ล ของทั้งสองวิธี ซึ่งทางผู้วิจัยจะนำค่าความผิดพลาดไปใช้ชดเชยค่าตัวเลขสวิร์ลที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาต่อไป

5.2 การเปรียบเทียบค่าตัวเลขสวิร์ลที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณทางทฤษฎีตามสมการที่ 2



รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขสวิร์ลที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎี ที่สัดส่วนอากาศและมุมต่างๆ กรณีอากาศส่วนเกิน 10%



รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขสวิร์ลที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎี ที่สัดส่วนอากาศและมุมต่างๆ กรณีอากาศส่วนเกิน 20%

6. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่าตัวเลขสเวิร์ลจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่มุมใบพัด 20° จะมีค่าลดลงต่ำที่มุม 30° ทุกๆ เงื่อนไขของการทดลอง และเมื่อมีการปรับสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 1 เพิ่มมากขึ้นและอากาศส่วนที่ 2 ลดลงจะส่งผลทำให้ตัวเลขสเวิร์ลมีค่าลดลงตามอันเนื่องมาจากโมเมนตัมในแนวแกนที่มีมากกว่าโมเมนตัมในแนวสัมผัสจึงเกิดการสูญเสียโมเมนตัมเป็นผลทำให้เกิดการหมุนควงที่น้อยทำให้ตัวเลขสเวิร์ลมีค่าลดลง อีกทั้งในการปรับมุมใบพัดของเทอร์โบแปรผันที่พอเหมาะจะผลต่อตัวเลขสเวิร์ลถ้ามุมมองเสาที่แคบเกินไปกระแสการหมุนควงแคบและมุมมองเสาที่กว้างมากเกินไปการหมุนควงห่างจากแนวสัมผัสทำให้เกิดโมเมนตัมที่น้อยจึงเป็นผลให้ตัวเลขสเวิร์ลมีค่าต่ำ เนื่องจากการทดลองดังกล่าวยังมีความคาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังนั้นอาจมีความคาดเคลื่อนของผลการทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Beer, J. M. and Chigier, N. A., Combustion Aerodynamics, Applied Science Publishers LTD, 1972.
- [2] Greitzer, E. M., Tan, C. S. and Graf, M. B., Internal Flow: Concepts and Applications, Cambridge University Press, 2004.
- [3] Lefebvre A. H., Gas Turbine Combustion 2nd Ed., Taylor & Francis, Philadelphia, 1999.
- [4] Schlüter, J. U., Large Eddy Simulations of Flow and Mixing in Jets and Swirl Flows: Application to a Gas Turbine, Doctorat de L'I.N.P.T, 2002.
- [5] Wicker, R.B. and Eaton, J.K., Structure of a swirling, recirculating coaxial free jet and its effect on particle motion, International of Multiphase Flow, Volume 27, Issue 6, June 2001, Page 949-970.
- [6] Saad A. Ahmed, Velocity measurement and turbulence statistics of a confined isothermal

swirling flow, Journal of Experimental Engineering Thermal and Fluid Science 17 (1998) 256-264.

ภาคผนวก ค.

ตารางแสดงเลขสเวิร์ลที่ ตำแหน่ง A และ ตำแหน่ง B
กรณีไม่มีชุดทดลองมาวางกั้นการไหล

ตารางที่ ก-1 เลขสเวิร์ล ตำแหน่ง A และ ตำแหน่ง B ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10%

Standard $k - \varepsilon$					
ปริมาณสัดส่วนอากาศ Primary air : Secondary air	Angle (Degree)	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B		
			Swirl 1	Swirl 2	Swirl 3
50 : 50	60°	0.340	0.270	0.291	0.280
	65°	0.410	0.310	0.330	0.320
	70°	0.501	0.365	0.390	0.378
	80°	0.700	0.400	0.450	0.430
40 : 60	60°	0.400	0.340	0.360	0.356
	65°	0.450	0.365	0.385	0.372
	70°	0.550	0.390	0.428	0.404
	80°	0.726	0.460	0.538	0.500
30 : 70	60°	0.400	0.360	0.380	0.370
	65°	0.480	0.385	0.412	0.400
	70°	0.555	0.410	0.450	0.430
	80°	0.796	0.480	0.550	0.510
20 : 80	60°	0.430	0.362	0.391	0.376
	65°	0.495	0.389	0.428	0.410
	70°	0.570	0.425	0.474	0.450
	80°	0.805	0.500	0.575	0.550

*Swirl คือ เลขสเวิร์ล

ตารางที่ ก-2 เลขสเวิร์ล ตำแหน่ง A และ ตำแหน่ง B ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10%

RNG $k - \varepsilon$					
ปริมาณสัดส่วนอากาศ Primary air : Secondary air	Angle (Degree)	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B		
			Swirl 1	Swirl 2	Swirl 3
50 : 50	60°	0.220	0.132	0.134	0.133
	65°	0.382	0.196	0.206	0.201
	70°	0.452	0.205	0.239	0.221
	80°	0.650	0.259	0.342	0.295
40 : 60	60°	0.270	0.195	0.220	0.210
	65°	0.400	0.215	0.240	0.220
	70°	0.500	0.220	0.270	0.240
	80°	0.680	0.240	0.360	0.290
30 : 70	60°	0.400	0.200	0.230	0.210
	65°	0.480	0.210	0.250	0.230
	70°	0.555	0.230	0.280	0.250
	80°	0.796	0.280	0.390	0.320
20 : 80	60°	0.430	0.201	0.236	0.220
	65°	0.495	0.220	0.257	0.240
	70°	0.570	0.250	0.300	0.280
	80°	0.805	0.320	0.389	0.350

*Swirl คือ เลขสเวิร์ล

ตารางที่ ก-3 เลขสเวิร์ล ตำแหน่ง A และ ตำแหน่ง B ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20%

Standard $k - \varepsilon$					
ปริมาณสัดส่วนอากาศ Primary air : Secondary air	Angle (Degree)	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B		
			Swirl 1	Swirl 2	Swirl 3
50 : 50	60°	0.345	0.270	0.304	0.269
	65°	0.450	0.310	0.350	0.326
	70°	0.542	0.365	0.420	0.390
	80°	0.725	0.400	0.480	0.448
40 : 60	60°	0.424	0.358	0.380	0.370
	65°	0.462	0.370	0.393	0.385
	70°	0.576	0.395	0.437	0.417
	80°	0.734	0.475	0.545	0.525
30 : 70	60°	0.435	0.369	0.389	0.379
	65°	0.490	0.389	0.429	0.410
	70°	0.572	0.419	0.469	0.449
	80°	0.802	0.489	0.569	0.539
20 : 80	60°	0.454	0.378	0.390	0.386
	65°	0.503	0.410	0.430	0.423
	70°	0.591	0.450	0.485	0.466
	80°	0.809	0.518	0.584	0.563

*Swirl คือ เลขสเวิร์ล

ตารางที่ ก-4 เลขสเวิร์ล ตำแหน่ง A และ ตำแหน่ง B ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20%

RNG $k - \varepsilon$					
ปริมาณสัดส่วนอากาศ Primary air : Secondary air	Angle (Degree)	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B		
			Swirl 1	Swirl 2	Swirl 3
50 : 50	60°	0.250	0.132	0.134	0.133
	65°	0.400	0.197	0.22	0.202
	70°	0.510	0.205	0.239	0.221
	80°	0.730	0.259	0.342	0.295
40 : 60	60°	0.285	0.195	0.220	0.210
	65°	0.411	0.215	0.240	0.228
	70°	0.513	0.220	0.270	0.240
	80°	0.701	0.240	0.360	0.290
30 : 70	60°	0.422	0.219	0.240	0.220
	65°	0.503	0.222	0.257	0.240
	70°	0.652	0.240	0.287	0.265
	80°	0.810	0.280	0.360	0.330
20 : 80	60°	0.430	0.218	0.236	0.227
	65°	0.495	0.230	0.257	0.245
	70°	0.570	0.250	0.300	0.280
	80°	0.805	0.317	0.392	0.350

*Swirl คือ เลขสเวิร์ล

ภาคผนวก ง.

ตารางแสดงเลขสเวิร์ลที่ ตำแหน่ง A และ ตำแหน่ง B
กรณีมีชุดทดลองมาวางกันการไหล

ตารางที่ ข-1 เลขสเวิร์ล ตำแหน่ง A และ ตำแหน่ง B ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10%

Standard $k - \varepsilon$					
ปริมาณสัดส่วนอากาศ Primary air : Secondary air	Angle (Degree)	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B		
			Swirl 1	Swirl 2	Swirl 3
50 : 50	60°	0.503	0.336	0.336	0.336
	65°	0.612	0.338	0.344	0.343
	70°	0.709	0.386	0.395	0.392
	80°	0.706	0.522	0.556	0.539
40 : 60	60°	0.523	0.325	0.345	0.33
	65°	0.597	0.334	0.35	0.34
	70°	0.706	0.377	0.386	0.382
	80°	0.81	0.569	0.616	0.6
30 : 70	60°	0.507	0.33	0.35	0.346
	65°	0.575	0.408	0.419	0.415
	70°	0.643	0.457	0.476	0.467
	80°	0.808	0.596	0.655	0.624
20 : 80	60°	0.495	0.325	0.345	0.334
	65°	0.562	0.387	0.394	0.394
	70°	0.706	0.43	0.444	0.438
	80°	0.816	0.621	0.69	0.654

*Swirl คือ เลขสเวิร์ล

ตารางที่ ข-2 เลขสเวิร์ล ตำแหน่ง A และ ตำแหน่ง B ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 10%

RNG $k - \varepsilon$					
ปริมาณสัดส่วนอากาศ Primary air : Secondary air	Angle (Degree)	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B		
			Swirl 1	Swirl 2	Swirl 3
50 : 50	60°	0.590	0.162	0.164	0.163
	65°	0.720	0.215	0.216	0.216
	70°	0.807	0.204	0.223	0.213
	80°	0.906	0.288	0.339	0.312
40 : 60	60°	0.600	0.198	0.210	0.200
	65°	0.800	0.200	0.225	0.210
	70°	0.789	0.218	0.25	0.225
	80°	0.801	0.290	0.37	0.330
30 : 70	60°	0.69	0.193	0.21	0.2
	65°	0.722	0.23	0.246	0.24
	70°	0.729	0.25	0.277	0.273
	80°	0.767	0.33	0.436	0.378
20 : 80	60°	0.65	0.19	0.199	0.193
	65°	0.679	0.196	0.215	0.208
	70°	0.687	0.24	0.282	0.267
	80°	0.748	0.325	0.456	0.398

*Swirl คือ เลขสเวิร์ล

ตารางที่ ข-3 เลขสเวิร์ล ตำแหน่ง A และ ตำแหน่ง B ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20%

Standard $k - \varepsilon$					
ปริมาณสัดส่วนอากาศ Primary air : Secondary air	Angle (Degree)	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B		
			Swirl 1	Swirl 2	Swirl 3
50 : 50	60°	0.504	0.348	0.348	0.348
	65°	0.611	0.338	0.343	0.344
	70°	0.709	0.388	0.397	0.394
	80°	0.825	0.514	0.545	0.529
40 : 60	60°	0.519	0.336	0.341	0.341
	65°	0.709	0.386	0.395	0.392
	70°	0.706	0.427	0.442	0.436
	80°	0.804	0.567	0.613	0.589
30 : 70	60°	0.506	0.365	0.373	0.369
	65°	0.574	0.407	0.42	0.414
	70°	0.642	0.458	0.477	0.467
	80°	0.808	0.598	0.657	0.626
20 : 80	60°	0.495	0.388	0.397	0.392
	65°	0.562	0.431	0.446	0.438
	70°	0.633	0.481	0.505	0.493
	80°	0.816	0.625	0.695	0.658

*Swirl คือ เลขสเวิร์ล

ตารางที่ ข-4 เลขสเวิร์ล ตำแหน่ง A และ ตำแหน่ง B ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 20%

RNG $k - \varepsilon$					
ปริมาณสัดส่วนอากาศ Primary air : Secondary air	Angle (Degree)	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B		
			Swirl 1	Swirl 2	Swirl 3
50 : 50	60°	0.532	0.161	0.162	0.161
	65°	0.705	0.19	0.196	0.193
	70°	0.887	0.202	0.223	0.212
	80°	0.996	0.293	0.341	0.315
40 : 60	60°	0.591	0.165	0.180	0.1655
	65°	0.888	0.208	0.239	0.220
	70°	0.817	0.249	0.273	0.255
	80°	0.901	0.323	0.407	0.360
30 : 70	60°	0.741	0.187	0.203	0.195
	65°	0.742	0.209	0.233	0.22
	70°	0.749	0.231	0.27	0.249
	80°	0.787	0.325	0.458	0.386
20 : 80	60°	0.653	0.196	0.215	0.205
	65°	0.699	0.212	0.243	0.227
	70°	0.695	0.239	0.282	0.259
	80°	0.748	0.311	0.477	0.378

*Swirl คือ เลขสเวิร์ล

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางพงศธร ปูย่า
วัน เดือน ปีเกิด	20 พฤษภาคม 2529
ที่อยู่	77 ม.1 บ้านใหม่สวนดอกคำ ถ.ลำปาง - แจ้ห่ม ต.วิเชตนคร อ.แจ้ห่ม จ.ลำปาง 52120
ประวัติการศึกษา	2547 มัธยมตอนปลาย โรงเรียนอัสสัมชัญ ลำปาง 2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผลงานทางวิชาการที่เคยได้รับการตีพิมพ์	
พ.ศ. 2554	การทดสอบหาตัวเลขสเวิร์ลของเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวนสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงผง (Examination of Swirl Number From a Swirl Generator For Pulverized Burner)