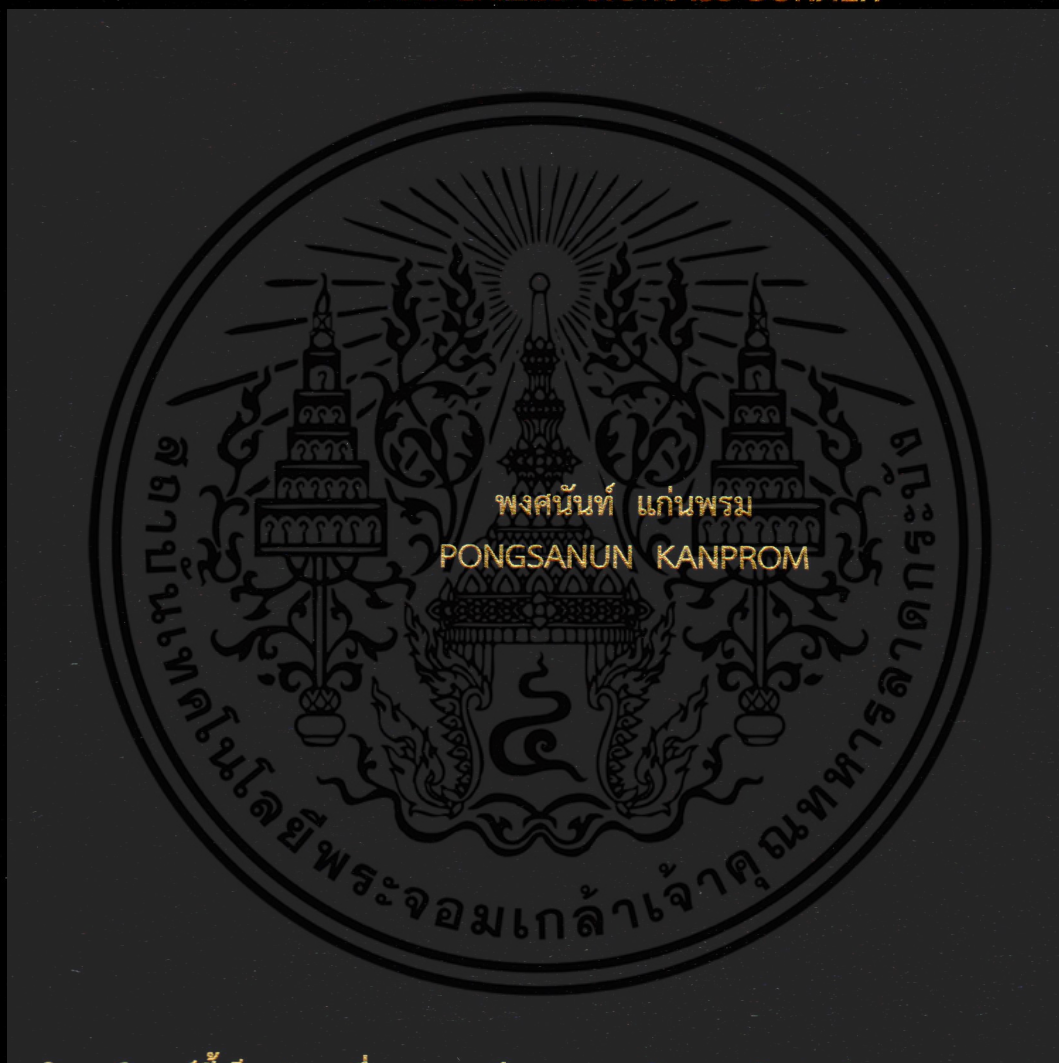


อิทธิพลของแผ่นขวางกั้นช่องการไหลและแผ่นบิดต่อสมรรถนะของ
หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น

EFFECT OF BLUFF BODY AND SWIRL PLATE ON PERFORMANCE OF
PULVERIZED BIOMASS BURNER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-030-105

EFFECT OF BLUFF BODY AND SWIRL PLATE ON PERFORMANCE OF
PULVERIZED BIOMASS BURNER



PONGSANUN KANPROM

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
2017
KMITL-2017-EN-M-030-105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


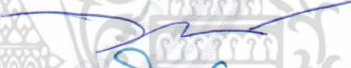




COPYRIGHT 2017
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

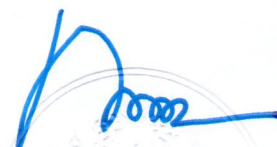
หัวข้อวิทยานิพนธ์ อธิพลของแผ่นขวางกั้นช่องการไหลและแผ่นบิดต่อสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิง
ชีวมวลฝุ่น
Thesis Title Effect of Bluff Body and Swirl Plate on Performance of Pulverized Biomass
Burner
นักศึกษา นายพงศนันท์ แก่นพรม
รหัสประจำตัว 58601116
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ณัตวิภา เจียรระโนวชิระ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) รศ.ดร.จรรูวัตร เจริญสุข
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-030-105

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ประสาน	สฤติย์เรืองศักดิ์	
รศ.ดร.จรรูวัตร	เจริญสุข	
รศ.ดร.ชินรัชช์	เจียรพงษ์	
ผศ.ดร.สุตาภัทร	แคว้นเขาเม็ง	
ผศ.ดร.ณัตวิภา	เจียรระโนวชิระ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมตัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา **ฉบับตีพิมพ์** คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้งแต่วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 ที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของแผ่นขวางกั้นช่องการไหลและแผ่นบิดต่อสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น
ชื่อนักศึกษา	นายพงศนันท์ แก่นพรม
รหัสประจำตัว	58601116
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ณัตวิภา เจียรระโนวชิระ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ ทำการศึกษาการนำแผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body) และแผ่นบิด (swirl plate) มาใช้ในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น (pulverized biomass burner) เพื่อให้การเผาไหม้มีความเสถียรที่กำลังความร้อน 300 kW และ เชื้อเพลิงถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm โดยใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลข และการทดลอง เปรียบเทียบกับกรณีของ ซินัทธ ฐรการ ที่ได้ทำการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 0.5 mm การจำลองและการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ กรณีพื้นฐาน และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือแผ่นบิด จากผลการจำลอง พบว่า การติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยสูงกว่า กรณีติดตั้งแผ่นบิด และกรณีพื้นฐาน รวมถึงมีการปลดปล่อยสารระเหยในสัดส่วนที่สูงกว่า และมีสัดส่วน O_2 ภายในห้องเผาไหม้ช่วยในระดับต่ำกว่า นอกจากนี้ มีการกระจายของอนุภาคขนาดใหญ่ ไปที่ผนังของห้องเผาไหม้ช่วยอย่างมาก และมีบริเวณที่มีความเร็วต่ำกินพื้นที่กว้างกว่าในห้องเผาไหม้ช่วย สอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่า กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นการไหล สามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ และการเผาไหม้สมบูรณ์ กว่ากรณีที่เชื้อเพลิงถูกบดผ่าน ตะแกรง 0.5 mm ทำให้ประหยัดพลังงานในการบดเชื้อเพลิง ส่วนกรณีติดตั้งแผ่นบิด พบว่า ไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ เช่นเดียวกับกรณีพื้นฐานที่เชื้อเพลิงถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm เมื่อทำการตรวจสอบตัวเลขการหมุนควง จากผลการจำลอง พบว่ากรณีพื้นฐานมีค่า 0.74 (การหมุนควงอย่างเข้ม) และกรณีติดตั้งแผ่นบิดมีค่า 0.59 (การหมุนควงระดับปานกลาง) ซึ่งมีความแตกต่างจากการคำนวณด้วยโครงสร้างอยู่ที่ 114.89 และ 65.14% ตามลำดับ

Thesis Title	Effect of bluff body and swirl plate on performance of pulverized biomass burner
Student	Mr. Pongsanun Kanprom
Student ID.	58601116
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Nuthvipa Jayranaiwachira
Thesis Co-Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk

ABSTRACT

The purpose of this study were to installed bluff body and swirl plate for stabilized combustion in pulverized biomass burner on 300 kW for 1 mm-fuel crushing grid by using numerical simulation and experiment. The result was compared with Chinnapat Turakarn and was tested for 0.5 mm-fuel crushing grid. The simulation and experiment was divided into two parts including base case and bluff body or swirl plate installation. The simulation results suggested that the bluff body installation resulted in higher temperature and volatile fraction in pre-chamber and lower O₂ fraction than those found with swirl plate installation and base case. Moreover, significant amount of the large fuel particle had scattered to pre-chamber wall and wider low-velocity zone. The simulation conformed to the result of experiment. It was also found that the bluff body installation could achieve stabilized flame and completed combustion than the previous version of combustor with 0.5 mm-fuel crushing grid. As a result, energy saving was realized for fuel crushing, on the other hand, the swirl plate installation alone was incapable to stabilize flame, as same as the 1 mm-fuel crushing grid of base case. The calculation of swirl number by using simulation result of base case and swirl plate installation were 0.74 (strongly swirl) and 0.59 (moderately swirl) which were different when compared with geometry calculation by 114.89 and 65.14%, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ณัฏวิภา เจียรระโนวชิระ และ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าได้เข้ามาศึกษาต่อ ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลแห่งนี้ และเป็นผู้ให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ รวมถึงอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือ ห้องพักรักวิจัย ตลอดระยะเวลาที่ข้าพเจ้าทำการศึกษา และให้ความอิสระในการค้นคว้า ลงมือทำสิ่งใหม่ๆอย่างมากมาย นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณทีมวิจัยที่มีประสิทธิภาพทุกคน จากห้องปฏิบัติการการเผาไหม้ แห่งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ร่วมกันทำให้การทดลองเสร็จอย่างสมบูรณ์ ได้แก่กลุ่มของ นักศึกษา ปริญญาตรี นักศึกษาปริญญาโท และที่ขาดไม่ได้คือกลุ่มของนักศึกษาปริญญาเอก ที่ถ่ายทอดประสบการณ์ การใช้โปรแกรมจำลองการเผาไหม้

และสุดท้าย ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้า ได้แก่ บิดา มารดา น้องสาว และญาติพี่น้อง ที่ให้กำลังใจข้าพเจ้ามาโดยตลอด โดยเฉพาะ บิดา มารดา ผู้ให้โอกาสทางการศึกษา

พงศนันท์ แก่นพรม



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	9
3.2 การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass Combustion).....	10
3.2.1 สโตยชิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion Stoichiometry).....	12
3.2.2 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio).....	12
3.2.3 เปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎี (Percent theoretical air).....	13
3.2.4 ค่าความร้อน (Heating values).....	13
3.2.4.1 ค่าความร้อนสูง (Higher heating values).....	14
3.2.4.2 ค่าความร้อนต่ำ (Lower heating values).....	14
3.2.5 อุณหภูมิจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	14
3.2.6 การคำนวณประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้.....	15
3.2.6.1 ประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal efficiency).....	15
3.2.6.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Combustion efficiency).....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.6.3 ประสิทธิภาพรวม (Total Efficiency)	15
3.3 การปลดปล่อยมลพิษ.....	16
3.3.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂).....	16
3.3.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO _x)	16
3.3.3 ไนตรัสออกไซด์ (N ₂ O)	19
3.3.4 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO _x).....	19
3.3.5 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	20
3.3.6 ผุ่นและเขม่า (Particulates and Soot).....	21
3.4 การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ.....	22
3.4.1 การใช้แผ่นขวางกั้นช่องการไหล (Bluff body).....	22
3.4.2 การใช้ตัวสร้างการหมุนควง (Swirl generator).....	23
บทที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง.....	28
4.1 สมการความต่อเนื่องของพิกัดทรงกระบอก.....	28
4.2 สมการโมเมนตัมของพิกัดทรงกระบอก.....	28
4.3 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \epsilon$ มาตรฐาน.....	29
4.4 สมการพลังงาน	30
4.4.1 พลังงานจากปฏิกิริยาเคมี.....	30
4.5 สมการถ่ายโอนสปีชีส์ (Species transport equations).....	30
4.5.1 การแพร่ของมวลในการไหลปั่นป่วน.....	30
4.5.2 การถ่ายโอนสปีชีส์ในสมการพลังงาน.....	31
4.6 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้.....	31
4.6.1 แบบจำลอง eddy-dissipation	31
4.6.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical Mechanism).....	32
4.7 แบบจำลองการปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization).....	32
4.8 แบบจำลองการเผาไหม้ที่พื้นผิว.....	34
4.8.1 แบบจำลอง diffusion-limited rate.....	35
4.8.2 แบบจำลอง kinetics/diffusion-limited rate.....	35
4.8.3 การถ่ายเทมวลและความร้อนจากการเผาไหม้ถ่านชาร์.....	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.9 แบบจำลองส่วนประกอบที่ไม่เผาไหม้ (Inert heating or cooling).....	37
4.10 แบบจำลองการแผ่รังสีของอนุภาค.....	38
4.10.1 สมการการแผ่รังสี	38
4.10.2 แบบจำลอง Discrete Ordinates (DO) Radiation	39
4.11 แบบจำลองการไหลที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Discrete phase model).....	40
4.11.1 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	40
4.11.2 การกระจายตัวของอนุภาคจากความปั่นป่วน	41
บทที่ 5 ส่วนประกอบของระบบ และการคำนวณที่เกี่ยวข้อง	42
5.1 ส่วนประกอบของระบบ.....	42
5.2 การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการจำลอง และการทดลอง	47
5.2.1 อัตราการไหลของเชื้อเพลิง	47
5.2.2 อัตราการไหลของอากาศ.....	49
5.2.3 การคำนวณตัวเลขการหมุนควง.....	51
บทที่ 6 วิธีการจำลองเชิงตัวเลข และการทดลอง.....	54
6.1 วิธีการจำลองเชิงตัวเลข.....	54
6.1.1 โครงสร้าง (Geometry) ที่ใช้จำลองกรณีพื้นฐาน (Base case).....	54
6.1.2 โครงสร้างที่ใช้จำลองกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล (Bluff body) หรือแผ่นบิด (Swirl plate).....	55
6.1.2.1 แผ่นขวางกั้นช่องการไหล (Bluff body).....	56
6.1.2.2 แผ่นบิด (Swirl plate).....	57
6.1.3 ขอบเขตของการจำลอง (Boundary Condition).....	58
6.1.4 โครงสร้างและจำนวนกริด (Geometry and Mesh structure).....	59
6.1.5 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	60
6.2 วิธีการทดลอง	61
6.2.1 การเตรียมระบบ.....	61
6.2.2 การอุ่นห้องเผาไหม้ช่วยด้วยแก๊ส LPG	62
6.2.3 การอุ่นห้องเผาไหม้ช่วยด้วยแก๊ส LPG ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น	62
6.2.4 การเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิง และอากาศทั้งสามส่วน	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2.5 การหยุดระบบแก๊สเพื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นอย่างเดียว.....	63
6.2.6 การบันทึกภาพ การวัดอุณหภูมิ และแก๊สไอเสีย	63
บทที่ 7 ผลการจำลองเชิงตัวเลข ผลการทดลอง และการอภิปราย	65
7.1 การเลือกใช้จำนวนกริดที่เหมาะสม	65
7.2 กรณีพื้นฐาน (Base case).....	66
7.2.1 ผลการจำลองกรณีพื้นฐาน.....	66
7.2.2 ผลการทดลองกรณีพื้นฐาน.....	70
7.2.3 การอภิปรายผลการจำลอง และการทดลองกรณีพื้นฐาน	71
7.3 กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล (Bluff body) หรือแผ่นบิด (Swirl plate).....	72
7.3.1 ผลการจำลอง กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลหรือแผ่นบิด	73
7.3.2 ผลการทดลอง กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลหรือแผ่นบิด	78
7.3.2.1 อุณหภูมิตามแนวแกน	81
7.3.2.2 อุณหภูมิตามแนวรัศมี.....	81
7.3.2.3 ความเสถียรของเปลวไฟ กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิด	82
7.3.2.4 การปลดปล่อยแก๊สไอเสียของกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิด	87
7.3.3 อภิปรายผลการจำลอง และการทดลองกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือแผ่นบิด.....	88
7.4 การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้	92
7.5 อภิปรายข้อดี ข้อเสีย ของการติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล	96
บทที่ 8 สรุป และข้อเสนอแนะ	98
8.1 สรุป	98
8.2 ข้อเสนอแนะ	100
เอกสารอ้างอิง	101
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	103
ประวัติผู้เขียน	113

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ตัวอย่างการเปรียบเทียบ ผลการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงต่างๆ (หลักอ้างอิงแห้ง และไม่คิดเถ้า)	10
5.1 การกระจายขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิง (1 kg) ที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm	47
5.2 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ และแยกธาตุของเชื้อเพลิง	48
5.3 การคำนวณหาอัตราการไหลของแต่ละอนุภาค	48
5.4 อัตราการไหลของอากาศ	50
5.5 อัตราการไหลเชิงมวล ของอากาศทั้งสามส่วน	50
5.6 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับ การคำนวณตัวเลขการหมุนควง และผลการคำนวณตัวเลขการหมุนควง	52
5.7 การอินทิเกรตหาตัวเลขการหมุนควง	53
5.8 ค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์	52
6.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการปลดปล่อยสารระเหย	60
6.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านชาร์	60
6.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของเชื้อเพลิง	60
6.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของน้ำ ในสถานะของเหลว	61
7.1 เงื่อนไขขอบเขตการจำลองของกรณีพื้นฐาน	66
7.2 เงื่อนไขขอบเขตการจำลองกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือแผ่นปิด	72
7.3 สรุปผลการจำลองของกรณี ติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือแผ่นปิด	91
7.4 ผลการคำนวณตัวเลขการหมุนควง จากผลการจำลอง และจากโครงสร้าง	92
7.5 ผลการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้	95

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การทดลองของ ซินภัทร ชูรการ	5
2.2 การทดลองของ Sung แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการไหลหมุนควง ที่มุมไบปิดสูงๆ ทำให้ การเผาไหม้มีความรุนแรง และมีเสถียรภาพ	5
2.3 แบบจำลองการไหลหมุนควงที่แสดงการสูญเสียของกระแสไหลวน เมื่อตัวเลขการหมุน ควงเพิ่มสูงขึ้น	6
2.4 การวิเคราะห์ของ Xu แสดงให้เห็นถึงกลุ่มอนุภาคขนาดเล็ก ถูกเหนี่ยวนำให้หมุนวนอยู่ที่ บริเวณ wake	7
2.5 แบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหินฝุ่นของ Liu แสดงให้เห็นการปลดปล่อยสารระเหยเริ่มต้น จากบริเวณ wake.....	7
2.6 ตำแหน่งของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดแตกต่างกัน.....	8
2.7 เทคโนโลยีที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดต่างๆ	8
3.1 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด	9
3.2 เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่ผ่านการบด	11
3.3 กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอนุภาคขนาดเล็ก	11
3.4 การเกิด NO ที่ขับเคลื่อนด้วยกลไกของ Zeldovich	18
3.5 การไหลผ่านแผ่นขวางกันช่องการไหล	23
3.6 ลักษณะตัวสร้างการหมุนวนตามแนวรัศมี และค่า σ จากการทดลองและการคำนวณ	24
3.7 ลักษณะตัวสร้างการหมุนวนตามแนวแกน และผลการคำนวณตัวเลขการหมุนวนตาม ทฤษฎี กับการทดลอง.....	26
4.1 กระบวนการแผ่รังสีความร้อน.....	39
4.2 การสุ่มเส้นทางเดินของอนุภาค	41
5.1 ส่วนประกอบของระบบ	42
5.2 ไซโลเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด และสกรูลำเลียง.....	43
5.3 เครื่องบดชนิด Hammer mill.....	43
5.4 พัฒมลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น	43
5.5 ไซโคลนคัดแยกอนุภาค.....	44
5.6 ไซโลเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น สกรูลำเลียง และ bag house	44
5.7 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น และตัวสร้างการหมุนวนตามแนวรัศมี	45
5.8 พัฒลมอากาศปฐมภูมิ	45
5.9 เตาเผา.....	45
5.10 wet scrubber.....	46

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11	พัดลม ID fan และท่อไอเสีย 46
5.12	ระบบบำบัดน้ำ 46
5.13	ระบบควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลอง 50
5.14	ขนาดของตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี 52
6.1	โครงสร้างและขนาดของแบบจำลอง 55
6.2	โครงสร้างกรณีที่ใช้จำลองแบบต่างๆ 56
6.3	โครงสร้างและขนาดของแผ่นขวางกั้นช่องการไหล 57
6.4	โครงสร้างและขนาดของแผ่นปิด 58
6.5	ขอบเขตของแบบจำลอง 58
6.6	จำนวนกริดที่ใช้ในระบบ 59
6.7	แผนภาพระบบจุดและจ่ายแก๊ส LPG 62
6.8	ระบบจุดและจ่ายแก๊ส LPG ที่ใช้ในการทดลอง 62
6.9	จุดบันทึกภาพเปลวไฟ ตำแหน่งวัดอุณหภูมิตามแกนกลาง และแก๊สไอเสีย 63
6.10	เทอร์โมคัปเปิลชนิด K และเครื่องแสดงผล YOKOGAWA XL 100 64
6.11	ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วย 64
6.12	เครื่องวัดแก๊สไอเสีย Testo รุ่น 350 XL 64
7.1	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนเมื่อเลือกใช้จำนวนกริดแตกต่างกัน 65
7.2	ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ กรณีของซินกัทร์ และกรณีพื้นฐาน 67
7.3	กราฟผลการจำลองอุณหภูมิตามแนวแกนกลางของระบบ กรณีของซินกัทร์ และกรณีพื้นฐาน 68
7.4	ผลการจำลองการปลดปล่อยสารระเหยในห้องเผาไหม้ช่วย กรณีของซินกัทร์ และกรณีพื้นฐาน 68
7.5	ผลการจำลองสัดส่วนของออกซิเจนในห้องเผาไหม้ช่วย กรณีของซินกัทร์ และกรณีพื้นฐาน .. 69
7.6	ผลการจำลองเส้นทางเดินของอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุด กรณีของซินกัทร์ และกรณีพื้นฐาน 69
7.7	ภาพถ่ายการทดลองการเผาไหม้ เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น กรณีของซินกัทร์ และกรณีพื้นฐาน 70
7.8	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่าง ผลการจำลองกับการทดลอง กรณีของซินกัทร์ 71
7.9	กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองอุณหภูมิตามแนวแกน เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผนังเตา 500-900 °C 73
7.10	ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ ของกรณีต่างๆ 74
7.11	กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองอุณหภูมิตามแนวแกน ของกรณีต่างๆ 75
7.12	ผลการจำลองการปลดปล่อยสารระเหยในห้องเผาไหม้ช่วย ของกรณีต่างๆ 76
7.13	ผลการจำลองสัดส่วน ของออกซิเจน (O ₂) ในห้องเผาไหม้ช่วย ของกรณีต่างๆ 76
7.14	ผลการจำลองการกระจายความเร็วในห้องเผาไหม้ช่วย ที่สภาวะการเผาไหม้ ของกรณี ติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือ แผ่นปิด เปรียบเทียบกับกรณีพื้นฐาน 77

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.15 ผลการจำลองเส้นทางเดินของอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุด ของกรณีต่างๆ.....	78
7.16 รูปถ่ายเปลวไฟจากการทดลอง กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล	79
7.17 รูปถ่ายเปลวไฟจากการทดลอง กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ร่วมกับแผ่นปิด	79
7.18 รูปถ่ายเปลวไฟจากการทดลอง กรณีติดตั้งแผ่นปิด	79
7.19 รูปแสดงระยะของเปลวไฟ ที่วัดจากทางออกของหัวเผา	80
7.20 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกน จากการทดลองของกรณีต่างๆ.....	80
7.21 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวรัศมี ในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่งต่างๆ จากผลการทดลอง เปรียบเทียบระหว่างกรณี ติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล กับ ติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ร่วมกับแผ่นปิด	83
7.22 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกน จากการทดลอง กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล กับกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 50 %.....	83
7.23 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกน จากการทดลองกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 15 และ 50%	84
7.24 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกน จากการทดลองกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 15 และ 50%.....	84
7.25 ผลการวัดแก๊สไอเสียของกรณีต่างๆ ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 15%.....	86
7.26 ผลการจำลองการกระจาย CO บริเวณจุดวัดแก๊สไอเสีย ที่ช่องทางออกของกรณีต่างๆ ที่อากาศส่วนเกิน 15%	86
7.27 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกน จากผลการจำลองกับผลการทดลอง ของกรณีต่างๆ.....	88
7.28 บริเวณช่องทางออก ที่ทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบความเร็ว จากผลการจำลอง และสูตรคำนวณตัวเลขการหมุนควง ตามสมการที่ (5.6) ที่ไม่ขึ้นกับรัศมีช่องทางออก	92
7.29 ผลการจำลองอนุภาคคาร์บอนในระบบของกรณีต่างๆ.....	95
7.30 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมเชื้อเพลิงที่กำลังความร้อนต่างๆ.....	96
7.31 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการเตรียมเชื้อเพลิง.....	96

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

m_{air}	มวลของอากาศ
m_{fuel}	มวลของเชื้อเพลิง
\dot{m}_F	อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง
\dot{m}_{Air}, \dot{M}	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ
MW_{air}	มวลโมเลกุลของอากาศ
MW_{fuel}	มวลโมเลกุลของเชื้อเพลิง
ρ	ความหนาแน่น
Φ_{fuel}	อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง
Φ_{oxi}	อัตราส่วนสมมูลออกซิไดเซอร์
GCV, HHV	gross calorific value ,higher heating value
NCV, LHV	net calorific value ,lower heating value
X_i	สัดส่วนของธาตุที่อยู่ในเชื้อเพลิงโดยน้ำหนัก
h_F	เ็นทรีลปีของเชื้อเพลิง
h_{Air}	เ็นทรีลปีของอากาศ
h_{FG}	เ็นทรีลปีของ flue gas
T_F	อุณหภูมิของเชื้อเพลิง
T_{Air}	อุณหภูมิของอากาศ
T_{Amb}	อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม
Q_{Ch}	ความร้อนที่สูญเสียที่ปล่องไฟ
η_{th}	ประสิทธิภาพทางความร้อน
η_{comb}	ประสิทธิภาพการเผาไหม้
η_{tot}	ประสิทธิภาพรวม
d	รัศมีฝั่งของแผ่นขวางกั้นช่องการไหล (ด้านหลังของแผ่น)
D	ระยะจากจุดศูนย์กลางของแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ถึงขอบของช่องทางออก
S	ตัวเลขการหมุนควง
G_ϕ	ฟลักซ์ของโมเมนตัมเชิงมุม
G_x	ฟลักซ์ของโมเมนตัมตามแนวแกน
G'_x	ฟลักซ์ของโมเมนตัมตามแนวแกน จากการประมาณ
R	รัศมีของช่องทางออก ,ค่าคงตัวของแก๊ส, ผลกระทบของปฏิกิริยาเคมีภายในพื้นผิวของถ่านชาร์และรูพรุน
U	ความเร็วตามแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

W	ความเร็วตามแนวสัมผัส
σ	อัตราส่วนขององค์ประกอบความเร็ว, ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann
\bar{W}_1	องค์ประกอบความเร็วตามแนวสัมผัสที่ช่องทางออก R_1
\bar{V}_1	องค์ประกอบความเร็วตามแนวรัศมีที่ช่องทางออก R_1
ψ	Blockage factor
s	ความหนาของใบพัด
z	จำนวนของใบพัด
k	พลังงานจลน์ปั่นป่วน, อัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะ
ε	อัตราสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วน
G_k	การก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ความเร็ว
G_b	การก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว
Y_M	การขยายตัวของการสูญเสีย
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$	ค่าคงที่
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Prandtl numbers ของ k และ ε
S_k, S_ε	เทอมของการก่อกำเนิด
μ_t	ความหนืดปั่นป่วน
k_{eff}	ประสิทธิผลของการนำ
\bar{J}_j	ฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์ j
S_h	

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$f_{w,o}$	สัดส่วนโดยมวลของความชื้นที่ระเหยหรือเดือด (กรณีไม่มีความชื้น $f_{w,o} = 0$)
$f_{v,0}$	สัดส่วนโดยมวลของสารระเหยเริ่มต้นที่อยู่ในอนุภาค
A_0	ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา
A_1	ตัวประกอบความถี่
E	พลังงานก่อกัมมันต์
Y_{OX}	สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนที่ตำแหน่งใดๆ
T_∞	อุณหภูมิตัวกลาง รอบอนุภาคที่ตำแหน่งใดๆ (K)
T_p	อุณหภูมิของอนุภาค (K)
d_p	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
p_{OX}	ความดันย่อยของออกซิเจนโดยรอบ
H_{react}	ความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาที่พื้นผิว
f_h	สัดส่วนการดูดกลืนความร้อน
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
c_p	ความจุความร้อนของอนุภาค
ε_p	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของอนุภาค
θ_R	อุณหภูมิจากการแผ่รังสีความร้อน
Re_d	ตัวเลขเรย์โนลด์
n	ดัชนีหักเห
σ_s	สัมประสิทธิ์การกระเจิง
I	ความเข้มของการแผ่รังสี
Φ	phase function
Ω'	มุมตัน
λ	ความยาวคลื่น
a_λ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนสเปกตรัม
I_λ	ความเข้มการแผ่รังสีของวัตถุดำ จากฟังก์ชันของแพลงค์
u	ความเร็วของการไหล
u_p	ความเร็วของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

g_x	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
F_x	เทอมของแรงที่เพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากวิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตของ ชินภัทร ชูการ [1] ได้ทำการออกแบบ และสร้างหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น (pulverized biomass burner) เพื่อใช้กับหม้อกำเนิดไอน้ำชนิดท่อไฟแบบวางนอน (horizontal fire tube boiler) ขนาดกำลังความร้อนสูงสุดที่ถูกออกแบบไว้คือ 1 MW เขาได้ทำการออกแบบให้หัวเผามีห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งเป็นห้องที่ช่วยรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ โดยใช้หลักการไหลหมุนควง (swirling flow) มาช่วยในการทำให้เกิดบริเวณที่มีกระแสไหลวนภายใน (internal recirculation zone, IRZ) เพื่อให้เกิดร้อนถูกกระแสนอนกลับมาถ่ายเทความร้อนให้กับเชื้อเพลิงที่เข้ามาใหม่ ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ภายในหัวเผานั้นถูกออกแบบให้ใช้อากาศ 3 ส่วนในการเผาไหม้ ได้แก่ อากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิ ในส่วนของอากาศทุติยภูมินี้เอง ที่เป็นอากาศหลักที่หมุนควงและทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง ด้วยกลไกของกล่องลม ซึ่งภายในติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี (radial type swirl generator) ที่ปรับมุมของใบพัดได้ตั้งแต่ $60 - 100^\circ$

การทดลองของ ชินภัทร ชูการ ได้สรุปว่าย่านกำลังความร้อน ที่ทำให้การเผาไหม้ของหัวเผานี้มีเสถียรภาพคือ 300-500 kW โดยต้องเป็นการใช้เชื้อเพลิงถูกบดผ่านตะแกรง 0.5 mm และมุมของใบพัดของตัวสร้างการหมุนควงคือ 100° อย่างไรก็ตามเขาได้เสนอว่า ควรออกแบบหรือปรับปรุงตัวสร้างการหมุนควง เพื่อเพิ่มอิทธิพลของการหมุนควงให้รุนแรงขึ้น เพราะในการทดลองพบว่า มีการปลดปล่อย CO ในระดับสูง ซึ่งแสดงถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ จากการคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิง ในบริเวณห้องเผาไหม้ช่วยไม่เพียงพอ นอกจากนี้ระบบบดเชื้อเพลิงของเขา ที่ใช้ตะแกรง 0.5-1.5 mm ซึ่งใช้เครื่องบดชนิด Pin mill เขาพบว่า มีอัตราการบดเชื้อเพลิงต่ำ ในปัจจุบันมีการเปลี่ยนเครื่องบดเป็นชนิด Hammer mill ที่ตอบสนองต่อการบดเชื้อเพลิงในปริมาณมากและบดได้อย่างต่อเนื่อง โดยใช้ตะแกรงขนาด 1 mm ซึ่งการเตรียมเชื้อเพลิงที่ใช้ตะแกรงบด 1 mm ให้ได้ปริมาณเชื้อเพลิงเทียบเท่ากำลังความร้อน 1 MW มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific consumption) เพียง 320 kJ/kg หรือคิดเป็น 1.98% ของค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง [24] เมื่อเทียบกับของชินภัทรที่ใช้ตะแกรง 0.5 mm และเครื่องบดแบบเก่ามีค่าสูงถึง 9.72 MJ/kg หรือ 60.24% ของค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง ซึ่งไม่คุ้มค่าต่อการนำไปใช้ วิทยานิพนธ์นี้จึงจะใช้ตะแกรงขนาด 1 mm ที่ใช้เครื่องบด Hammer mill ซึ่งทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่กว่าของชินภัทร ดังนั้น ถ้าหากทำการเผาไหม้ด้วยกรณีเดียวกับของชินภัทร เปลวไฟอาจไม่เสถียรหรือมีการปลดปล่อยแก๊สไอเสียที่มากขึ้น โดยหลักการแล้วหากจะทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นให้มีเสถียรภาพเชื้อเพลิงจะต้องมีระยะเวลาในการเผาไหม้ที่นานขึ้นภายในห้องเผาไหม้ ดังนั้นอากาศหมุนควงในห้องเผาไหม้ต้องรุนแรงขึ้น เพื่อทำให้บริเวณที่มีกระแสไหลวนสร้างกระแสนอนกลับที่สูงและกว้างขึ้น ทำให้ภายในห้องเผาไหม้มีบริเวณที่มีความเร็วต่ำเกินบริเวณกว้าง เชื้อเพลิงจึงมีระยะเวลาในการเผาไหม้นานขึ้น เปลวไฟจึงมีเสถียรภาพ

นอกจากหลักของอากาศหมุนควงแล้ว มีอีกหลักการที่น่าสนใจ คือการใช้แผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body) เพื่อขวางกั้นกระแสการไหลของเชื้อเพลิง โดยคุณสมบัติของแผ่นขวางกั้นช่องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหล เมื่อมีการไหลปะทะที่ด้านหน้าจะทำให้เกิดบริเวณที่มีกระแสไหลวน (recirculation zone) เนื่องจากความดันต่ำที่ด้านหลังของแผ่น เกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้างหรือยาว ขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่าง และการไหลโดยรอบ การศึกษาเสถียรภาพของการเผาไหม้ เมื่อติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ส่วนใหญ่จะใช้กับเชื้อเพลิงเหลว หรือแก๊ส ดังนั้นการนำมาใช้รักษาเสถียรภาพของ การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็ง จึงมีความน่าสนใจที่จะเป็นหัวข้อในการศึกษาอิทธิพลของมุมต่อสมรรถนะของหัวเผา เมื่อนำแผ่นขวางกั้นช่องการไหลมาใช้ ร่วมกับตัวสร้างการหมุนควง ที่ขึ้นภัทรจตุรการ ได้ออกแบบไว้ หรือทำการปรับปรุงให้ดีขึ้น จะเป็นการรวมคุณสมบัติของทั้ง กระแสไหลวนที่เกิดจากตัวสร้างการหมุนควง และกระแสไหลวนที่เกิดจากแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกที่จะศึกษา อิทธิพลของแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และการปรับปรุงตัวสร้างการหมุนควง โดยมีทฤษฎีและวิธีการคำนวณ ที่ศึกษาจากงานวิจัยทางด้าน อากาศพลศาสตร์การเผาไหม้ (combustion aerodynamics)

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษา การนำแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และแผ่นบิต มาใช้ในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น เพื่อให้เปลวไฟ ที่เกิดจากการเผาไหม้มีความเสถียร ที่กำลังความร้อน 300 kW โดยใช้อากาศส่วนเกินตามทฤษฎี 15% สัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ ทุดิยภูมิ และตติยภูมิ มีค่าเท่ากับร้อยละ 15 65 และ 25 ตามลำดับ และเชื้อเพลิงถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm ด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลข และการทดลอง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. การติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล เพื่อทำให้เกิดกระแสไหลวน และการกระจายของอนุภาคสามารถทำให้เปลวไฟ มีความเสถียร ที่กำลังความร้อน 300kW โดยใช้เชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm
2. การติดตั้งแผ่นบิต เพื่อเพิ่มอิทธิพลของการไหลหมุนควง สามารถทำให้เปลวไฟมีความเสถียร ที่กำลังความร้อน 300kW โดยใช้เชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. วิธีการจำลองเชิงตัวเลขจะทำการศึกษาเฉพาะที่กำลังความร้อน 300 kW ในสภาวะคงตัว (steady state) โดยใช้เชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm ที่อากาศส่วนเกิน 15% เปรียบเทียบกับใช้เชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 0.5 mm โดยใช้ผลการจำลองการกระจายอนุกรม การปลดปล่อยสารระเหย สัดส่วนของออกซิเจน การกระจายความเร็ว และเส้นทางเดินของอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุด
2. การทดลองจะทำการวัดอุณหภูมิจำนวน 7 จุดตามแนวแกนของระบบ และ 5 จุดตามแนวรัศมีเฉพาะในห้องเผาไหม้ช่วย โดยเป็นการวัดเฉพาะช่วงที่ต้องการ คือสภาวะคงที่ ที่กำลังความร้อนเท่ากับ 300 kW ที่อากาศส่วนเกิน 15% ทำการเก็บภาพถ่าย 2 ตำแหน่งได้แก่ ตำแหน่งด้านหลังของหัวเผา และด้านข้างเตาเผา และทำการวัดแก๊สไอเสียที่ท่อทางออก

3. หากการทดลองที่กำลังความร้อน 300 kW ที่อากาศส่วนเกิน 15% เปลวไฟมีความเสถียร จะทำการเพิ่มอากาศส่วนเกินเป็น 50% โดยวัดเพียงอุณหภูมิตามแนวแกน เพื่อเปรียบเทียบเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ในการทดลอง ความเสถียรของเปลวไฟ จะหมายถึงการที่เชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ใช้แก๊ส LPG ร่วม เป็นเวลาอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 30 นาที และอุณหภูมิมีแนวโน้มคงที่ จึงทำการวัดค่าต่างๆ

5. สมรรถนะการเผาไหม้จะพิจารณาจากผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิ การปลดปล่อย CO NO_x และผลการจำลองอนุภาคคาร์บอนที่หลงเหลือจากปฏิกิริยาการเผาไหม้

6. การติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือแผ่นบิด จะศึกษาเฉพาะรูปทรงพื้นฐาน โดยไม่มีการศึกษาผลจากรูปทรง และการปรับเปลี่ยนตำแหน่งที่ติดตั้ง

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. กำหนดวัตถุประสงค์ และขอบเขตการวิจัย
2. ศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้ วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ แผ่นขวางกั้นช่องการไหล และ แผ่นบิด
3. ศึกษาการใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT ver.12.0 เพื่อใช้ในการจำลอง
4. ทำการจำลองการเผาไหม้ ของกรณีต่างๆ
5. ทำการทดลองการเผาไหม้ ของกรณีต่างๆ
6. อภิปรายผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง และการทดลอง จากกรณีต่างๆ
7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือแผ่นบิด มาใช้ในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น แบบมีห้องเผาไหม้ช่วย เพื่อให้การเผาไหม้มีเสถียรภาพ และสามารถใช้อุณหภูมิที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อการประหยัดพลังงานจากการลดเชื้อเพลิง

2. เป็นแนวทางการศึกษาในอนาคต ของการใช้แผ่นขวางกั้นช่องการไหล เพื่อรักษาเสถียรภาพเปลวไฟในเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น ซึ่งจัดเป็นเชื้อเพลิงแข็ง เพราะส่วนใหญ่นิยมนำไปใช้กับ เชื้อเพลิงเหลวหรือแก๊ส

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

จากความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ในบทที่ผ่านมา วิทยานิพนธ์นี้ได้นำบทสรุป และข้อเสนอแนะของ ซินภัทร ฐรการ [1] ผู้ทำการออกแบบและสร้างหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น ที่มีห้องเผาไหม้ช่วย มาทำการศึกษาต่อ ในการทดลอง เขาพบว่าการปรับมุมมองศาใบปิดของตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี (radial swirl generator) ที่ติดตั้งอยู่ในกล่องลม ที่ 100 องศา การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น มีการไหลหมุนควงที่รุนแรง ก่อให้เกิดบริเวณที่มีกระแสไหลวนภายใน (internal recirculation zone, IRZ) ทำให้การเผาไหม้มีเสถียรภาพ ที่กำลังความร้อน 300 400 และ 500 kW โดยใช้เชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 0.5 mm ผลการทดลองของ ซินภัทร ฐรการ สอดคล้องกับงานวิจัย ของนักวิจัยท่านอื่น จากหลายที่ ยกตัวอย่างเช่น Sung [2] ได้ศึกษาผลจากการปรับเปลี่ยนมุมมองศาของตัวสร้างการหมุนควงตามแนวแกน (axial swirl generator) ต่อการปลดปล่อย NO_x ของเชื้อเพลิงถ่านหินฝุ่น (pulverized coal burner) เขาพบว่าเมื่อปรับมุมเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ มีการปลดปล่อย NO_x ในปริมาณสูง เนื่องจากบริเวณที่เกิดกระแสไหลวนภายในเลื่อนมายังต้นกระแสการไหล (upstream) และมีความกว้างมากขึ้น เนื่องจากตัวเลขการหมุนควงสูงขึ้น Huang [3] ทำการศึกษาดิฟฟิออลของการไหลหมุนควง ต่อสมรรถนะของการเผาไหม้ ในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส ด้วยแบบจำลอง LES (large eddy simulation) เขาพบว่าเมื่อตัวเลขการหมุนควง (swirl number) เพิ่มสูงขึ้น การสูญสลายของกระแสไหลวน (vortex breakdown) จะเลื่อนขึ้นมาที่ต้นกระแสการไหล เมื่อตัวเลขการหมุนควงสูงขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของความปั่นป่วนสูง และเปลวไฟสั้นลง อย่างไรก็ตามงานวิจัยข้างต้น ค่อนข้างเป็นการนำอิทธิพลของการไหลหมุนควงมาประยุกต์ ส่วนการศึกษาทางทฤษฎี อากาศพลศาสตร์การเผาไหม้ ได้แก่ หนังสือ Combustion aerodynamics ของ J.M Beer [4] ซึ่งมีการคำนวณทั้งในส่วนของ แผ่นขวางกั้นช่องการไหล และตัวสร้างการหมุนควงชนิดต่างๆ จากการศึกษาหนังสือเล่มนี้ ทำให้ทราบถึงวิธีการคำนวณตัวเลขการหมุนควงโดยใช้โครงสร้าง และการคำนวณเมื่อทราบองค์ประกอบความเร็ว รวมถึงการกำหนดความเข้มข้นของการหมุนควงด้วยตัวเลขการหมุนควง เขาได้สรุปวิธีทำให้เกิดการไหลหมุนควง ได้แก่ การให้อากาศพุ่งเข้าตามแนวสัมผัสของท่อทรงกระบอก การใช้ตัวสร้างการหมุนควงโดยใช้ใบปิด และกลไกการหมุนของอุปกรณ์

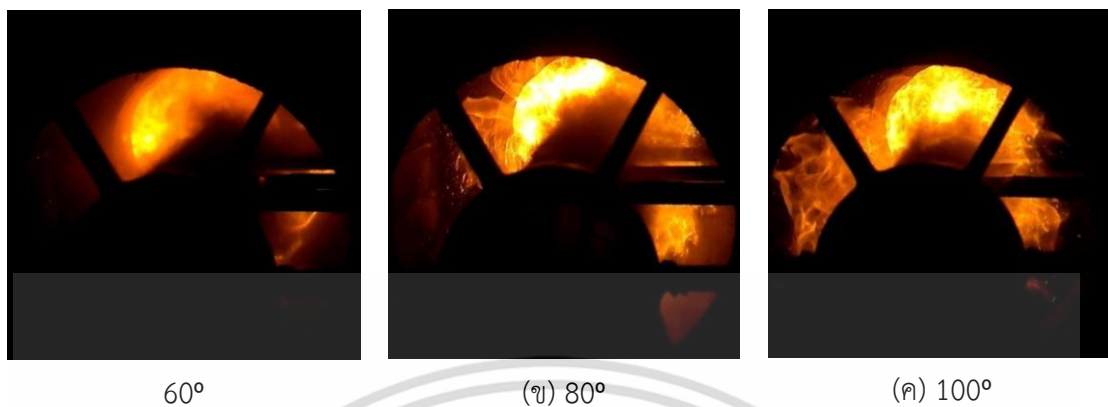
N.Syred [5] ซึ่งเป็นเป็นที่วิจัยเดียวกับ J.M Beer ได้สรุปสาระสำคัญของการไหลหมุนควงการเผาไหม้ว่า

1) ทำให้ลดความยาวนานของการเผาไหม้ เพราะอัตราผสมกันกับอากาศ (rate of entrainment of ambient fluid) เพิ่มขึ้น และผสมกับเชื้อเพลิงได้อย่างรวดเร็ว ณ บริเวณที่เกิดกระแสไหลวน (recirculation zone)

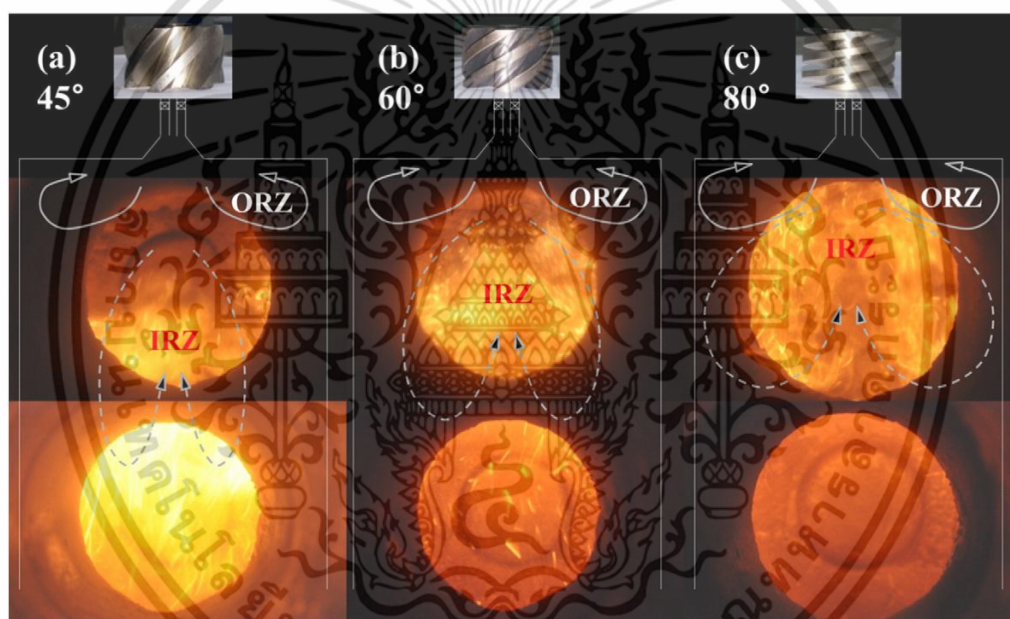
2) ทำให้เปลวไฟเสถียรซึ่งเป็น ผลจากบริเวณที่มีกระแสไหลวน เมื่อการหมุนควงมีความเข้มข้นสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ลดการกระแทกของเปลวไฟที่ผนังห้องเผาไหม้ ทำให้ลดต้นทุนการซ่อมบำรุง

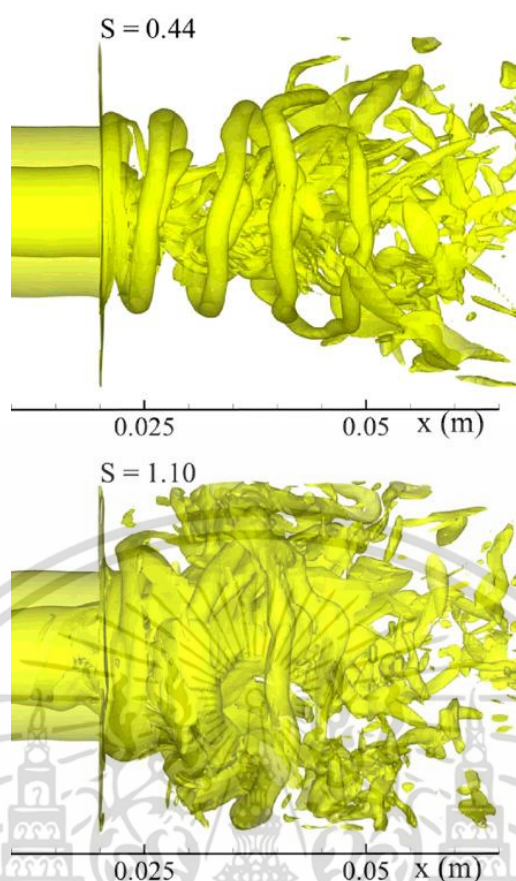


รูปที่ 2.1 การทดลองของ ซินภัทร ชูรการ [1]



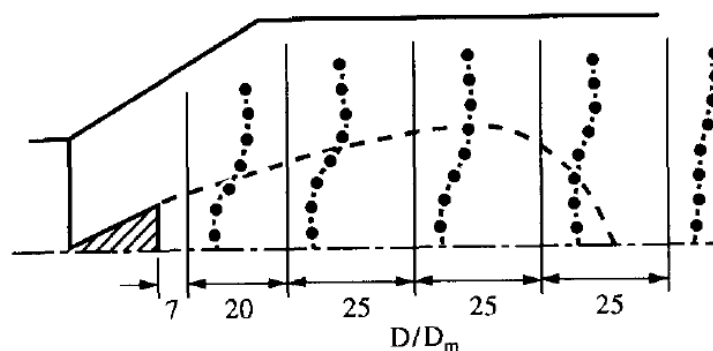
รูปที่ 2.2 การทดลองของ Sung แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการไหลหมุนควง ที่มุมไปบิดสูงๆ ทำให้การเผาไหม้มีความรุนแรง และมีเสถียรภาพ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

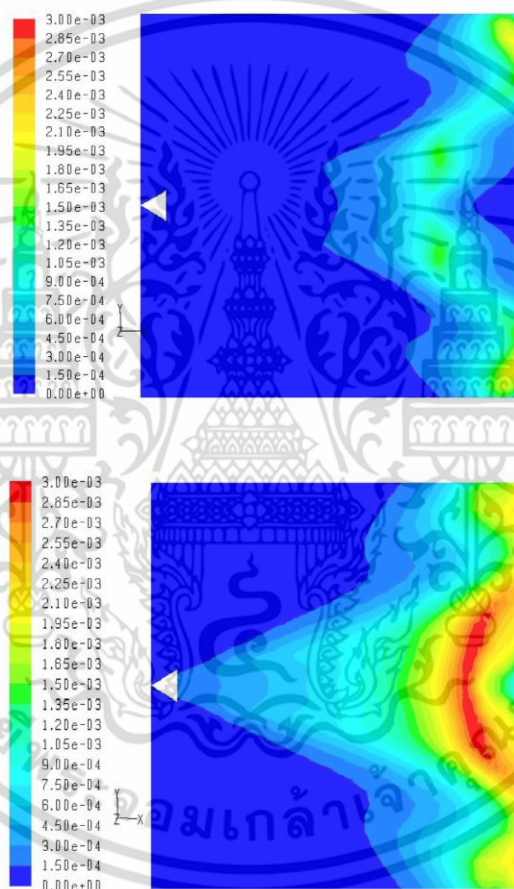


รูปที่ 2.3 แบบจำลองการไหลหมุนควง ที่แสดงการสูญเสียของกระแสไหลวน เมื่อตัวเลขการหมุนควงเพิ่มสูงขึ้น [3]

การศึกษางานวิจัยทางการนำแผ่นขวางกั้นช่องการไหลมาใช้กับเชื้อเพลิงแข็ง เช่น Xu [6] ได้ทำการตรวจสอบการกระจายของอนุภาคถ่านหินเกรดต่ำที่บริเวณ wake ของแผ่นขวางกั้นช่องการไหลรูปสามเหลี่ยม ด้วยเทคนิค 3D PDA (three-dimensional laser particle dynamics anemometry) เขาพบว่าอนุภาคขนาดเล็กจะถูกเหนี่ยวนำด้วยกระแสไหลวน ให้รวมตัวกันอยู่บริเวณ wake เป็นเวลานานเนื่องจากกระแสย้อนกลับที่สูง ทำให้การเผาไหม้มีเสถียรภาพ ส่วนอนุภาคขนาดใหญ่จะกระจายไปที่ผนังของห้องเผาไหม้ Liu [7] ได้พัฒนาแบบจำลอง การติดไฟของหัวเผาเชื้อเพลิงถ่านหินฝุ่น โดยใช้แบบจำลอง EDC (eddy dissipation concept) extinction model เขาพบว่าสารระเหยจะเริ่มถูกปลดปล่อยตั้งแต่บริเวณ wake ของแผ่นขวางกั้นช่องการไหลรูปสามเหลี่ยม ในการคาดการณ์ระยะเวลาการติดของเปลวไฟของเขา มีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำแผ่นขวางกั้นช่องการไหลมาใช้กับเชื้อเพลิงแข็งแบบฝุ่นมีอยู่น้อย เพราะส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวสร้างการหมุนควง การนำแผ่นขวางกั้นช่องการไหลมาใช้ ส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงเหลว หรือ แก๊ส ซึ่งแนวทางเหมือนกันคือทำให้เปลวไฟเสถียร แตกต่างกันในวิธีการจำลอง การทดลอง หรือ รูปทรง



รูปที่ 2.4 การวิเคราะห์ของ Xu แสดงให้เห็นถึงกลุ่มอนุภาคขนาดเล็กถูกเหนี่ยวนำให้หมุนวนอยู่ที่บริเวณ wake [6]



รูปที่ 2.5 แบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหินฝุ่นของ Liu แสดงให้เห็น การปลดปล่อยสารระเหยเริ่มต้นจาก บริเวณ wake [7]

การศึกษาทางทฤษฎี และการคำนวณ ของแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ตามหนังสือของ J.M. Beer [4] พบว่าที่ อัตราส่วนขวางกั้น (blockage ratio) เท่ากัน แผ่นขวางกั้นช่องการไหลรูปจาน ทำให้เกิดบริเวณที่มีกระแสไหลวน กว้างกว่ารูปทรงอื่น และมีกระแสนอนกลับสูงกว่ารูปทรงอื่น

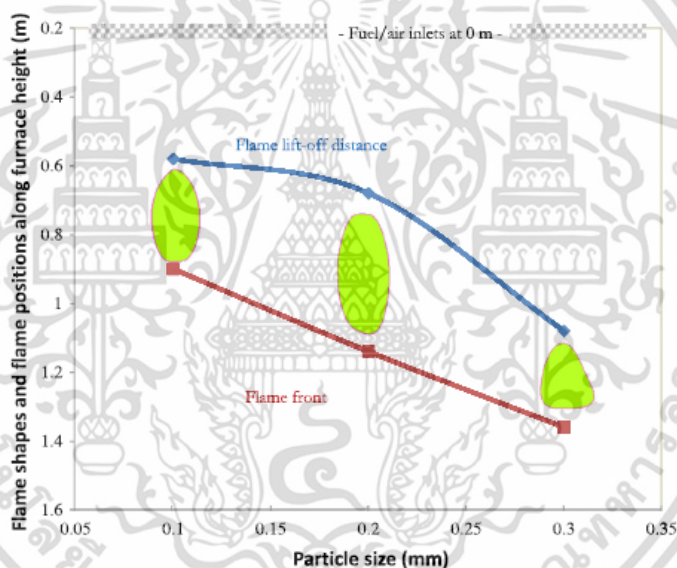
สำหรับเชื้อเพลิงแข็ง ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงก็เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการเผาไหม้ โดย Jun Li [8] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงต่อพฤติกรรมของเปลวไฟที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล และสังเกตเห็นว่าเมื่ออนุภาคเชื้อเพลิงมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ฐานของเปลวไฟจะค่อยๆเลื่อนออกไปสู่บริเวณส่วนปลายของห้องเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ใช้เชื้อเพลิงที่บดผ่านตะแกรง 1 mm ซึ่งการศึกษาขนาดของอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวล ที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีที่แนะนำดังรูปที่ 2.7 เชื้อเพลิงที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 5 mm ยังคงใช้ได้กับระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบฝุ่น (pulverized burner) หรือการใช้อากาศเป็นตัวลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ธนภัทร์ ภักดีวรวงค์ [9] ซึ่งเป็น 1 ในทีมวิจัย ได้พบว่าการใช้แบบจำลองการเผาไหม้ species transport แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ มาตรฐาน โดยมีการเพิ่มค่าคงที่ของอัตราการแพร่ออกซิเจนภายในพื้นผิวอนุภาคคาร์ และอัตราจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของคาร์ในอัตราส่วน 2.5 เท่าของค่าเริ่มต้น และใช้แบบจำลองการติดตามแบบสุ่ม (random walk) ให้ผลการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินฝุ่น ที่มีความใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลองอย่างน่าพอใจ และแบบจำลองดังกล่าวถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น เพื่อทำการจำลองการเผาไหม้



รูปที่ 2.6 ตำแหน่งของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดต่างกัน [8]

Shape	Maximum particle size	Appropriate delivery system	Appropriate combustion technology
Bulk material	< 5mm	Direct injection, pneumatic conveyors	Directly fired furnaces, cyclone burners, CFB
Bulk material	< 50mm	Screw conveyors, belt conveyors	Underfeed stokers, grate furnaces, BFB, CFB
Bulk material	< 100mm	Vibro-conveyors, chain trough conveyors, hydraulic piston feeders	Grate furnace, BFB
Bulk material	< 500mm	Sliding bar conveyors, chain trough conveyors	Grate furnace, BFB
Shredded or cut bales	< 50mm	Cutters/shredders followed by pneumatic conveyors, screw conveyors or belt conveyors	Directly fired furnaces, grate furnaces, BFB, CFB
Bales, sliced bales	whole bales	Cranes, hydraulic piston feeders	Grate furnaces, cigar burners
Pellets	< 30mm	Screw conveyors, belt conveyors	Underfeed stokers, grate furnaces, BFB, CFB
Briquettes	< 120mm	Sliding bar conveyors, chain trough conveyors	Grate furnaces, BFB

รูปที่ 2.7 เทคโนโลยีที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดต่างๆ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล [10, 11, 12, 13]

เชื้อเพลิงชีวมวลจัดเป็นเชื้อเพลิงแข็งชนิดหนึ่ง สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดได้แก่ เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดไม้ (woody biomass) เช่น กิ่งไม้ เศษไม้ ถ่านไม้ เป็นต้น และเชื้อเพลิงชีวมวลที่ไม่ใช่ไม้ เช่น แกลบ ขานอ้อย ฟางข้าว เป็นต้น ชีวมวลมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนคือ

1. ความชื้น เกิดจากน้ำที่อยู่ในชีวมวล
2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ ได้แก่ สารระเหย และคาร์บอน
3. ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ หรือเถ้า ชีวมวลแต่ละประเภทมีสัดส่วนเถ้าแตกต่างกัน

เชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าความร้อนต่ำเนื่องจากมีความชื้นสูง แต่ปัจจุบันมีเทคโนโลยีสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพคือ การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (wood pellet) ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่สำคัญ 5 กระบวนการคือ

1. กระบวนการย่อยเชื้อเพลิง (crushing process) เป็นกระบวนการลดขนาดของวัตถุดิบ
2. กระบวนการลดความชื้น (drying process) เป็นกระบวนการกำจัดน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงให้เหมาะสมก่อนเข้าสู่กระบวนการอัด
3. กระบวนการผสม (mixing process) เป็นกระบวนการผสมวัตถุดิบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปให้เข้ากัน
4. กระบวนการอัด (pelletizing process) เป็นกระบวนการขึ้นรูปวัตถุดิบให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6-10 มิลลิเมตร ความยาว 3-6 เซนติเมตร ลักษณะชีวมวลอัดเม็ดแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดให้ค่าความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลทั่วไป โดยมีค่าความร้อนต่ำ (lower heating value, LHV) หรือ net calorific value (NCV) มากกว่า 16.5 MJ/kg เมื่อนำมาเทียบกับน้ำมันเบา เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดประมาณ 2 กิโลกรัมจะเท่ากับน้ำมันเบา 1 ลิตร ในขณะที่เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นมีค่าความร้อนทางต่ำประมาณ 10.9 MJ/kg การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์หรือเห็นว่าการคัดลอกเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นที่ไม่ใช่การศึกษา กรุณาแจ้งให้ทราบถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีหลักการเหมือนเชื้อเพลิงแข็งทั่วไป โดยใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM ได้แก่ การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ค่าความร้อน (calorific value) และอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของเถ้า (ash fusion temperature) ตัวอย่างการวิเคราะห์โดยประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนจากเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่างๆแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างการเปรียบเทียบ ผลการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ของเชื้อเพลิงต่างๆ (หลังอ้างอิงแห้ง และไม่คิดเถ้า)

องค์ประกอบ	ชนิดเชื้อเพลิง				
	ไม้	ฟีด	ถ่านหิน ลิกไนต์	ถ่านหิน บิทูมินัส	เชื้อเพลิง จากขยะ (RDF)
ผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (wt %)					
สารระเหย	81	65	55	40	85
คาร์บอนคงตัว	19	35	45	60	15
ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (wt %)					
ไฮโดรเจน (H)	6	6	5	5	7
คาร์บอน (C)	50	55	68	78	52
กำมะถัน (S)	0.1	0.4	1	2	0.3
ไนโตรเจน (N)	0.1	1	1	2	0.6
ออกซิเจน (O)	44	38	25	13	40
ค่าความร้อนทางสูง (HHV), (MJ/kg)	20	22	23	33	22

ที่มา: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

เมื่อทราบองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในเชื้อเพลิงจะสามารถนำไปหาสตอยชิโอเมตรีของการเผาไหม้ (combustion stoichiometry) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.2 การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล [10, 11, 12, 13]

ปัจจุบันเทคโนโลยีการนำเชื้อเพลิงชีวมวลไปผลิตความร้อนในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งตามหลักการได้ 3 แบบคือ

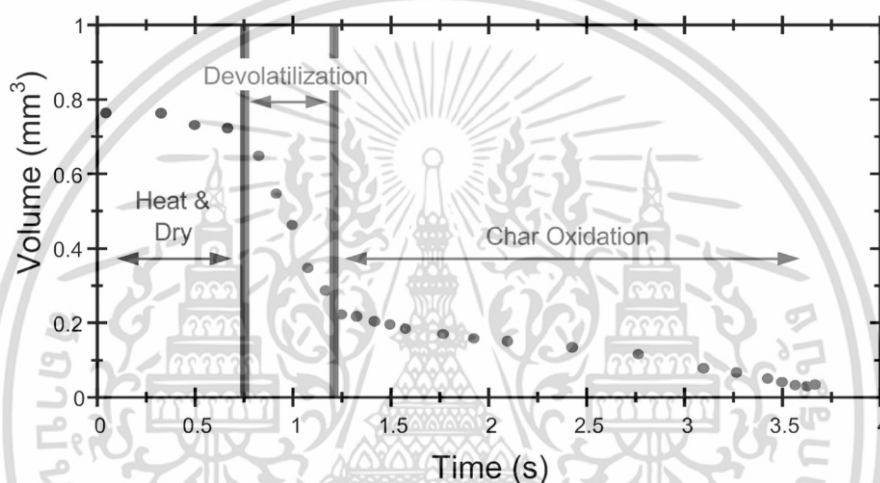
1. fixbed combustion
2. fluidized bed combustion
3. pulverized fuel combustion

สำหรับวิธีการ และข้อดี ข้อเสียของแต่ละแบบสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ [10] ในส่วนของวิทยานิพนธ์นี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจะหมายถึงแบบ pulverized fuel combustion เท่านั้น หรือเรียกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงฝุ่น ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น (pulverized biomass) ได้จากการบดเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่พ่นเชื้อเพลิงฝุ่นและอากาศเพื่อทำปฏิกิริยาการเผาไหม้จะถูกรวมเรียกว่า หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น (pulverized biomass burner)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่ผ่านการบด



รูปที่ 3.3 กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอนุภาคขนาดเล็ก [10]

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล อธิบายได้ดังรูปที่ 3.3 โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

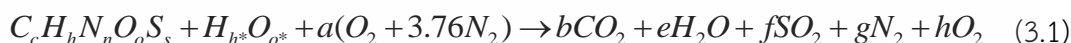
1. การทำแห้ง (drying) เมื่อเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีหรือการพา ในห้องเผาไหม้ ความชื้นที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงจะระเหยออกมาภายนอก ความชื้นที่สะสมในเชื้อเพลิงมากจะทำให้กระบวนการเผาไหม้มีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากมีพลังงานบางส่วนถูกใช้เพื่อการระเหยน้ำ ทำให้การเผาไหม้มีอุณหภูมิต่ำถ้าเชื้อเพลิงมีความชื้นสูง
2. การปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization) หรือ ไพโรไลซิส (pyrolysis) เมื่อเชื้อเพลิงระเหยน้ำจนถึงอุณหภูมิสูงจุดหนึ่งแล้ว สารระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิง ได้แก่ น้ำมันดิน (tar) คาร์บอน (Char coal) จะทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับอากาศรอบๆ เมื่ออุณหภูมิถึงจุดติดไฟจึงเกิดเป็นเปลวไฟรอบอนุภาคเชื้อเพลิง
3. การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Char oxidation) หลังจากสารระเหยเผาไหม้ ส่วนที่เหลือคือถ่านชาร์ ออกซิเจนรอบๆจะแพร่เข้าไปในถ่านชาร์ซึ่งมีช่องว่างเนื่องจากความพรุน ทำให้เกิดการเผาไหม้

มีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อขั้นตอนทั้ง 3 เช่น ชนิดของเชื้อเพลิง ซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุต่างกัน อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น อย่างไรก็ตาม มีทฤษฎีที่นำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของอนุภาคเชื้อเพลิง สารระเหย และถ่านชาร์ ซึ่งจะนำเสนอในบทที่ 4

3.2.1 สตอยซิโอเมตรีของการเผาไหม้ (combustion stoichiometry)

เมื่อทราบองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุแล้ว จะสามารถคำนวณหาอากาศที่ทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์ทางทฤษฎี หรือเรียกว่า สตอยซิโอเมตรีของการเผาไหม้ โดยเขียนสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งมวลที่สภาวะอากาศแห้งมี ออกซิเจน 21% และ ไนโตรเจน 79% และมีความชื้นได้ดังนี้



เทอมของ $H_{h^*} O_{o^*}$ เกิดจากความชื้นของเชื้อเพลิง

เมื่อ

$$a = \frac{2b + e + 2f - o - o^*}{2} \quad (3.2)$$

สามารถหาอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎีได้ดังนี้

$$(A/F)_{stoic} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = 4.76a \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}} \quad (3.3)$$

3.2.2 อัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio, Φ)

เมื่อทราบอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎีก็สามารถหาอัตราส่วนสมมูล ซึ่งเป็นตัวแปรที่ทำให้ทราบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้ห่างจากค่าทฤษฎีแค่ไหน โดยอัตราส่วนสมมูลมีสองชนิดคือ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง (fuel equivalence ratio, Φ_{fuel}) และ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงออกซิไดเซอร์ (oxidizer equivalence ratio, Φ_{oxi}) คำนวณได้จาก

$$\Phi_{fuel} = \frac{m_{fuel}/m_{air}}{(m_{fuel}/m_{air})_{stoic}} \quad (3.4)$$

$$\Phi_{oxi} = \frac{1}{\Phi_{fuel}} \quad (3.5)$$

โดย

$\Phi_{fuel} < 1$ หรือ $\Phi_{oxi} > 1$ หมายความว่าส่วนผสมบาง (fuel-lean mixture) กรณีนี้อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้จริงน้อยกว่าค่าทฤษฎี

$\Phi_{fuel} > 1$ หรือ $\Phi_{oxi} < 1$ หมายความว่าส่วนผสมหนา (fuel-rich mixture) กรณีนี้ส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้จริงมากกว่าค่าทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Phi_{fuel} = \Phi_{oxi} = 1$ หมายความว่าส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้จริงเป็นไปตามทฤษฎี ส่วนใหญ่นิยมใช้อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง Φ_{fuel}

3.2.3 เปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎี (percent theoretical air) และเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (percent excess air)

เปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎีเรียกอีกชื่อว่าอัตราส่วนอากาศ (air ratio) เป็นปริมาณที่บอกให้ทราบว่าอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้คิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศทางทฤษฎีคำนวณได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎี} = \frac{100}{\Phi_{fuel}} = 100\Phi_{oxi} \quad (3.6)$$

เช่น $\Phi_{fuel} = 0.8$ หรือ $\Phi_{oxi} = 1.25$ ดังนั้นเปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 125 จากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100

เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าอากาศที่ใช้จริงเกินจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100 กี่เปอร์เซ็นต์ คำนวณได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน} = \frac{100}{\Phi_{fuel}} - 100 = 100\Phi_{oxi} - 100 \quad (3.7)$$

3.2.4 ค่าความร้อน (calorific value)

3.2.4.1 ค่าความร้อนสูง (higher heating value, HHV) หรือ gross calorific value (GCV)

หมายถึงความร้อนที่ปลดปล่อยจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยมวล ที่รวมค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ การเผาไหม้กำหนดให้เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิ 25°C ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้สารผลิตภัณฑ์ที่เย็นตัวลงมา 25°C และน้ำในสารผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะของเหลว ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวล ปกติจะอยู่ประมาณ 18-22 MJ/Kg สามารถคำนวณหาค่าความร้อนสูงจากหลักอ้างอิงแห้ง (dry basis) โดยใช้สูตร [10]

$$GCV = 0.3491 \cdot X_C + 1.1783 \cdot X_H + 0.1005 \cdot X_S - 0.0151 \cdot X_N - 0.1034 \cdot X_O - 0.0211 \cdot X_{ash} \quad (3.8)$$

มีหน่วยเป็น MJ/Kg โดย X_i คือสัดส่วนของธาตุที่อยู่ในเชื้อเพลิงโดยน้ำหนัก ได้แก่คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) กำมะถัน (S) ไนโตรเจน (N) ออกซิเจน (O) และ เถ้า (ash)

3.2.4.2 ค่าความร้อนต่ำ (lower heating value, LHV) หรือ net calorific value (NCV)

หมายถึงความร้อนที่ปลดปล่อยจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยมวล โดยไม่รวมค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ การเผาไหม้กำหนดให้เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิ 25°C ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้สารผลิตภัณฑ์ที่เย็นตัวลงมา 25°C และน้ำในสารผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะของแก๊ส สามารถคำนวณหาความร้อนต่ำโดยใช้หลักอ้างอิงเปียก (wet basis) ที่สัมพันธ์กับค่าความร้อนสูง ความชื้น และไฮโดรเจน ที่อยู่ในเชื้อเพลิง จากสมการ

$$NCV = GCV(1 - \frac{w}{100}) - 2.444 \cdot \frac{w}{100} - 2.444 \cdot \frac{h}{100} \cdot 8.936(1 - \frac{w}{100}) \quad (3.9)$$

มีหน่วยเป็น MJ/kg โดย w และ h คือสัดส่วนของน้ำและความชื้นที่อยู่ในเชื้อเพลิงโดยน้ำหนัก ตามลำดับ ค่า 2.444 คือผลต่างของเอนทัลปี (enthalpy) ระหว่างน้ำในสถานะแก๊สกับของเหลวที่อุณหภูมิ 25°C และค่า 8.936 คืออัตราส่วนมวลโมเลกุลของน้ำกับมวลโมเลกุลของไฮโดรเจน ($\frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}}$)

ในทางปฏิบัติจะนำค่าความร้อนต่ำไปคำนวณ เนื่องจากไม่สามารถนำความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอจากค่าความร้อนสูงมาใช้ในทางปฏิบัติได้

3.2.5 อุณหภูมิจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลคำนวณได้จากสมดุลพลังงานและสมดุลเคมีจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ พลังงานที่เชื้อเพลิงคายออกมาจากปฏิกิริยาจะให้ความร้อนแก่สารผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะแก๊ส (flue gas) สมดุลพลังงานของการเผาไหม้เขียนได้ดังนี้

พลังงานในเชื้อเพลิง + พลังงานจากการอุ่น = พลังงานในสารผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะแก๊ส + พลังงานที่สูญเสีย

พลังงานจากการอุ่น (preheat energy) ในที่นี้หมายถึงการอุ่นอากาศ หรือเชื้อเพลิง พลังงานที่สูญเสียในกระบวนการเผาไหม้เกิดได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (incomplete combustion) และส่วนของคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ (unburned carbon) จากนิยามดังกล่าวสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$NCV \cdot \dot{m}_F + [h_F(T_F) - h_F(T_{Amb})]\dot{m}_F + [h_{Air}(T_{Air}) - h_{Air}(T_{Amb})]\dot{m}_{Air} = [h_{FG}(T_{FG}) - h_{FG}(T_{Amb})]\dot{m}_{FG} + \sum_i Q_i + \sum_j \bar{E}_j \cdot \dot{m}_F \quad (3.10)$$

ถ้าพิจารณาที่สภาวะไม่มีการสูญเสียความร้อน และไม่มีการอุ่นเชื้อเพลิงหรืออากาศ สมการสมดุลพลังงานจะเขียนใหม่ได้เป็น

$$NCV \cdot \dot{m}_F = [h_{FG}(T_{FG}) - h_{FG}(T_{Amb})] \dot{m}_{FG} \quad (3.11)$$

โดย $h_{FG} = X_{CO_2} h_{CO_2} + X_{H_2O} h_{H_2O} + X_{SO_2} h_{SO_2} + X_{N_2} h_{N_2} + X_{O_2} h_{O_2}$

ดังนั้นสามารถหาอุณหภูมิที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลได้จากการแก้สมการหาค่า T_{FG} ในส่วนรายละเอียดของการคำนวณหาพลังงานที่สูญเสียและพลังงานจากการอุ่นอากาศหรือเชื้อเพลิงสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ [10]

3.2.6 การคำนวณประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้

3.2.6.1 ประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal efficiency)

ประสิทธิภาพทางความร้อนคืออัตราส่วนระหว่าง ความร้อน หรือ งานที่ผลิตกับพลังงานที่ให้กับระบบ เช่น ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับหม้อไอน้ำ (boiler) งานที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าหรือขับเคลื่อนกลไกต่างๆ ในอุปกรณ์ทางกล เป็นต้น การคำนวณประสิทธิภาพทางความร้อนในเชิงการทดลองอาจพิจารณาการถ่ายเทความร้อนสู่ห้อง (room heating application) เมื่อทราบอุณหภูมิทางเข้าปล่องไฟ (chimney inlet, T_{Ch}) ซึ่งในการทดลองคือท่อทางออกของห้องเผาไหม้และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากการวัด ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส (flue gas analyzer) ความร้อนที่สูญเสียที่ปล่องไฟ (chimney heat loss) คำนวณได้จากสูตร

$$Q_{Ch} = [h_{FG}(T_{Ch}) - h_{FG}(T_{Amb})] \dot{m}_{FG} \quad (3.12)$$

กรณีที่ไม่มี การอุ่นเชื้อเพลิงหรืออากาศ และสมมติว่ามีความร้อนสูญเสียที่ปล่องไฟเท่านั้น ประสิทธิภาพทางความร้อนคำนวณได้จากสูตร

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{Ch}}{NCV \cdot \dot{m}_F} \quad (3.13)$$

3.2.6.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (combustion efficiency)

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยปกติการเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์ร้อยเปอร์เซ็นต์ เพราะจะมีองค์ประกอบที่เผาไหม้ไม่หมด ดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้จะพิจารณาความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงบางส่วนที่ไม่ถูกเผาไหม้ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\eta_{comb} = 1 - \frac{\sum_j \overline{E}_j \cdot \dot{m}_F}{NCV \cdot \dot{m}_F} = 1 - \frac{\sum_j \overline{E}_j}{NCV} \quad (3.14)$$

3.2.6.3 ประสิทธิภาพรวม (total efficiency)

ประสิทธิภาพรวมจะพิจารณาทั้งความร้อนที่สูญเสียที่ปล่องไฟ ความร้อนที่สูญเสียจากการถ่ายเทเนื่องจากการพา การนำ และการแผ่รังสีความร้อน และความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงบางส่วนไม่ถูกเผาไหม้ กรณีที่ไม่มี การอุ่นอากาศหรือเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพรวมสามารถคำนวณได้จากสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta_{tot} = 1 - \frac{Q_{Ch} + \sum_i Q_i + \sum_j \overline{E}_j \cdot \dot{m}_F}{NCV \cdot \dot{m}_F} \quad (3.15)$$

3.3 การปลดปล่อยมลพิษ

การปลดปล่อยมลพิษในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล อาจแบ่งเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ มลพิษจากการเผาไหม้สมบูรณ์ และมลพิษจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สำหรับการปลดปล่อยอนุภาคที่เป็นมลพิษจะเกิดขึ้นได้ทั้งสองแบบ สำหรับมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล มีทั้งหมดดังนี้

3.3.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

เป็นผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล มีต้นกำเนิดมาจากคาร์บอนที่อยู่ในเชื้อเพลิง คาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น

3.3.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (Nitrogen oxide, NO_x)

NO_x เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิง มลพิษที่เกิดจากออกไซด์ของไนโตรเจน สาเหตุหลักมาจาก ไนตริกออกไซด์ (NO) ทำปฏิกิริยากลายเป็น ไนโตรเจนออกไซด์ (NO₂) ในชั้นบรรยากาศ NO_x เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดหมอกทางโฟโตเคมี นั่นคือ แก๊สโอโซนในระดับต่ำ (ground-level ozone) และทำลายโอโซนในระดับสูงที่ช่วยลดรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์สู่ผิวโลก ดังสมการ



จะเห็นว่า NO เพียงโมเลกุลเดียวสามารถทำลาย O₃ อย่างต่อเนื่องโดยปฏิกิริยารีดอกซ์ ตามสมการที่ (3.16) จะเห็นว่า NO₂ จะถูกรีดิวซ์กลับมาเป็น NO ย้อนกลับไปทำลาย O₃ ดังสมการที่ (3.17) เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ กลไกการเกิด NO_x ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล มีรูปแบบดังนี้

1. Thermal NO_x

เป็น NO_x ที่เกิดในสภาวะอุณหภูมิสูง ประมาณ 1300 °C บางครั้งเรียกว่า Zeldovich-NO ซึ่ง Zeldovich เป็นคนแรกที่อธิบายการเกิด NO_x ชนิดนี้ มีสมการการเกิดดังนี้



เมื่อ $k_1 = 1.8 \times 10^{14} \exp(-318 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} / (RT)) \text{ cm}^3 / (\text{mol} \cdot \text{s})$

$k_2 = 9.0 \times 10^9 \exp(-27 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} / (RT)) \text{ cm}^3 / (\text{mol} \cdot \text{s})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_3 = 2.8 \times 10^{13} \quad \text{cm}^3/(\text{mol.s})$$

สาเหตุที่ชื่อว่า thermal NO_x เพราะว่า NO ที่เกิดจากสมการที่ (3.18) นั้นต้องใช้พลังงานกระตุ้นสูงมากเมื่อเทียบกับสมการที่ (3.19) ทั้งนี้เพราะต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของ N_2 ซึ่งเป็นแบบไตรพันธะ (triple bond) ขณะเดียวกันสมการที่ (3.20) จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้ต่อเมื่ออุณหภูมิสูงเท่านั้น ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นตัวควบคุมการเกิด NO ตามสมการที่ (3.18) ผ่านค่าคงตัวของการเกิดปฏิกิริยา k_1 ซึ่งแปรผกผันกับ $1/T$ ในการทำนายปริมาณการเกิด NO_x ในปฏิกิริยาการเผาไหม้ ไม่ควรใช้วิธีการทำสมดุลเคมีเหมือนการหาปริมาณ H_2O หรือ CO_2 เพราะจะเกิดความผิดพลาดอย่างมาก เนื่องจากสมดุลเคมีจะเกิดขึ้นได้นั้นต้องใช้เวลาที่ค่อนข้างนาน และนานกว่าเวลาที่อยู่ในเปลวไฟอุณหภูมิสูงเสียอีก จากสมการเคมีกลไกของ Zeldovich สามารถหาอัตราการเกิด NO_x ได้คือ

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = k_1[\text{O}][\text{N}_2] + k_2[\text{N}][\text{O}_2] + k_3[\text{N}][\text{OH}] \quad (3.21)$$

เนื่องจากว่าอัตราการเกิดอะตอมของไนโตรเจนขณะเกิดปฏิกิริยา ในสภาวะเสถียรคือ

$$\frac{d[\text{N}]}{dt} = k_1[\text{O}][\text{N}_2] + k_2[\text{N}][\text{O}_2] + k_3[\text{N}][\text{OH}] \approx 0 \quad (3.22)$$

ดังนั้นได้อัตราการเกิด NO คือ

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_1[\text{O}][\text{N}_2] \quad (3.23)$$

จะเห็นว่าการลดปริมาณ thermal NO_x ได้นั้นมีเพียงสองวิธีคือ ลด $[\text{N}_2]$ และ $[\text{O}]$ หรือลด k_1 ซึ่งมีความหมายคือต้องลดอุณหภูมิในการเผาไหม้นั้นเอง

2. Prompt NO_x

เมื่อทำการวัดหาปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ของเปลวไฟแบบราบเรียบจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน จากจุดที่ห่างจากปลายของเปลวไฟเข้าหาแนวของเปลวไฟ พบว่าปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ไม่ได้มีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์แต่ประการใดเหมือนที่ทำนายโดยกลไกของ Zeldovich แต่กลับพบว่าไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด (promptly) ที่บริเวณใกล้แนวของเปลวไฟซึ่ง มีความซับซ้อนมากกว่า thermal NO_x ทั้งนี้เพราะว่า prompt NO_x เกิดจากอนุมูลอิสระ CH ที่เกิดขึ้นในลักษณะเป็นสารชั้นกลางที่บริเวณแนวของเปลวไฟ จากนั้น CH จะทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนในอากาศ ทำให้ได้กรดไฮโดรไซยานิค (HCN) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไปจนเกิด NO ดังสมการต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

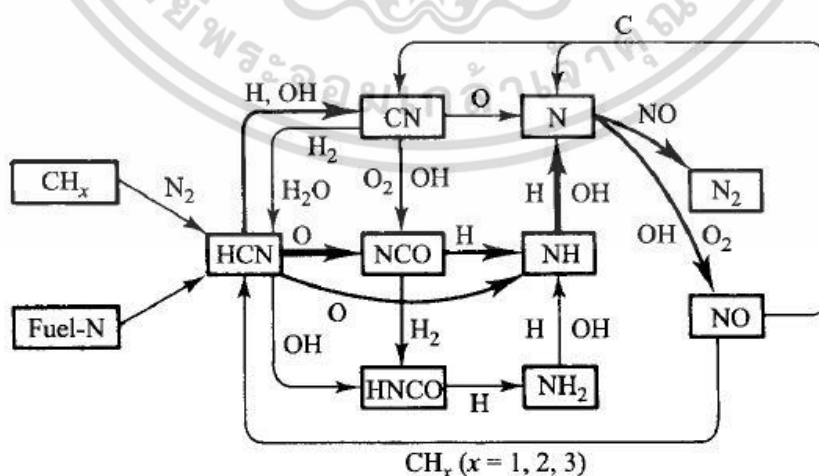


prompt NO_x มักเกิดในกรณีส่วนผสมหนา prompt NO_x จะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า thermal NO_x เพราะปฏิกิริยาต้องใช้พลังงานกระตุ้นที่น้อยกว่า ที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำประมาณ 1000 K ในกรณีเชื้อเพลิงชีวมวล prompt NO_x จะมีความสำคัญน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในเชื้อเพลิงฟอสซิล

3. Fuel NO_x

สำหรับเชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบได้แก่ เชื้อเพลิงชีวมวล และถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งถ่านหินอาจมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบได้ถึงร้อยละ 2 ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปเป็น HCN ในเปลวไฟซึ่งจะเปลี่ยนต่อไปเป็น NH หรือ NH_2 จากนั้นทั้งคู่ก็จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และทำให้เกิด $NO + H_2O$ หรืออาจทำปฏิกิริยากับ NO แล้วเปลี่ยนเป็น N_2 และ H_2O ดังนั้นสัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่หลุดออกมาจากเปลวไฟกลายเป็น NO นั้นจะเป็นอิสระต่ออัตราส่วนระหว่าง NO/O_2 ในเปลวไฟ นั่นคือหากรักษาให้สัดส่วนของออกซิเจนในแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงในเปลวไฟให้ต่ำไว้ ก็จะทำให้ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเปลี่ยนไปเป็น NO น้อยลงตามไปด้วย

สัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนเป็น NO_x ในแก๊สไอเสียนั้นประมาณได้ว่ามีสัดส่วนประมาณร้อยละ 20 ถึง 50 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะของเตาเผา และอาจขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของไนโตรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงอีกด้วย จะเห็นได้ว่าแม้จะทำการวิเคราะห์และศึกษากลไกการเกิด NO แต่ละประเภทแยกออกจากกัน แต่ทั้ง thermal NO_x , prompt NO_x และ Fuel NO_x ต่างก็เกิดขึ้นพร้อมๆกัน และมีกลไกการเกิดร่วมกัน



รูปที่ 3.4 การเกิด NO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ไนตรัสออกไซด์ (N₂O)

การปลดปล่อยไนตรัสออกไซด์ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการสันดาปของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง จากการวัดไนตรัสออกไซด์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลพบว่ามีความน้อยมาก นอกจากนี้ ไนตรัสออกไซด์ยังก่อให้เกิด NO ตามสมการด้านล่าง



NO ที่เกิดจากสมการทั้งสองด้านบนจะเกิดที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ ซึ่งส่วนใหญ่พบเจอในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส หรือกรณีไอดีบางมาก ๆ

3.3.4 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x)

เป็นที่ทราบกันดีว่าออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) นอกจากจะมีผลต่อสิ่งแวดล้อมแล้วยังสามารถทำลายอุปกรณ์การเผาไหม้ และอุปกรณ์อื่นๆ ให้ผุกร่อนเสียหายได้ ออกไซด์ของซัลเฟอร์มีที่มาจากซัลเฟอร์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการเผาไหม้ โดยจะได้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) เป็นสารประกอบหลัก มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) อยู่เล็กน้อยและอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) คาร์บอนิลซัลไฟด์ (COS) ซึ่งเรียกรวมกันว่า SO_x ซึ่งเชื้อเพลิงเกือบทั้งหมดที่ใช้โดยมนุษย์ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ ไม้ และสารอินทรีย์อื่นๆ เป็นต้น ล้วนมีซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบ เชื้อเพลิงไม้จะมีอยู่ในปริมาณน้อยเพียงร้อยละ 0.1 ในขณะที่ถ่านหินเกือบทุกชนิดอาจมีอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 0.5 ถึง ร้อยละ 3 ในขณะที่น้ำมันโดยทั่วไปจะมีซัลเฟอร์มากกว่าไม้แต่น้อยกว่าที่มีในถ่านหิน ถ้าทำการเผาไหม้ไม้ ซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในไม้เกือบทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ดังสมการต่อไปนี้



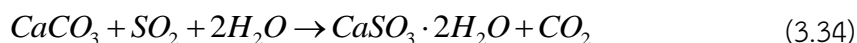
ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วกลายเป็นกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดฝนกรด



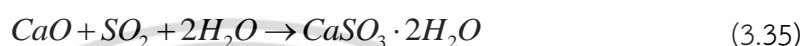
ซึ่งน้ำที่ทำปฏิกิริยากับ SO₃ คือน้ำที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ และมีอยู่แล้วในแก๊สไอเสียพร้อมกับ SO₃ นั่นเอง SO₂ ที่เกิดจากการเผาไหม้จะมีปริมาณมากกว่าแก๊ส SO₃ ดังนั้น SO₂ จะถูกออกซิเดชันไปเป็น SO₃ โดยอนุมูลของ OH ก่อนทำปฏิกิริยากับ H₂O เป็นกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไป ซึ่งวิธีการทั่วไปที่ใช้กำจัด SO_x จากแก๊สไอเสียคือใช้หินปูน (limestone, $CaCO_3$) หรือใช้ปูนขาว (lime, CaO) ผสมน้ำจนเป็นโคลนเหลวแล้วพ่นเข้าไปในท่อที่แก๊สไอเสียไหลผ่าน ซึ่ง SO_x จะถูกกำจัดตั้งสมการต่อไปนี้

กรณีใช้โคลนเหลวของหินปูน (aqueous slurry of limestone)



กรณีใช้โคลนเหลวของหินขาว (aqueous slurry of lime)



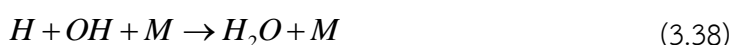
นอกจากการใช้หินปูนหรือปูนขาวผสมน้ำ (แบบเปียก) กำจัด SO_2 ได้แล้ว ยังสามารถกำจัด SO_2 ด้วยหินปูนหรือปูนขาวในรูปแบบผง (แบบแห้ง) ได้อีกด้วย ซึ่งกรณีแบบเปียกต้องรอให้ calcium sulfite dihydrate ($CaSO_3 \cdot 2H_2O$) ตกตะกอนในถังพักเสียก่อนแล้วค่อยแยกน้ำออกเพื่อขนย้ายออกไปกำจัดโดยการฝังต่อไป ส่วนในกรณีแบบแห้งนั้นใช้เครื่องแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อแยกผง $CaSO_3$ ออกไปเสียก่อนแล้วจึงนำไปกำจัดต่อไป

3.3.5 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้มีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น สภาวะการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป การผสมคลุกเคล้ากันไม่ดีพอ ปริมาณอากาศไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงจนทำให้เกิดการแตกสลายของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มาเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ได้ตั้งสมการ



สาเหตุที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้เกิด CO คือการมีเวลาสั้นเกินไปในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากต้องระบายไอเสียออกทันที อุณหภูมิ และความดันเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ดังนั้น CO จะอยู่ในสภาวะสมดุลบางส่วนมากกว่าที่จะอยู่ในสภาวะสมดุลอย่างสมบูรณ์ ทำให้การเปลี่ยนแปลงจาก CO เป็น CO_2 เกิดขึ้นไม่เต็มที่ เพราะถูกจำกัดด้วยการแย่งเข้าทำปฏิกิริยาของ OH กับ H



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์สามารถควบคุม ปริมาณออกซิเจนในปฏิกิริยาการเผาไหม้ แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์เป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และเป็นพิษต่อร่างกายอย่างมาก เมื่อร่างกายได้รับแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์จะทำให้ร่างกาย สมอง และกล้ามเนื้อได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ ปฏิกิริยาการตอบสนองของร่างกายจะช้าลง และขาดการตัดสินใจที่ดี เมื่อได้รับแก๊สชนิดนี้เข้าไปในปริมาณมากๆ สามารถทำให้เสียชีวิตได้

3.3.6 ฝุ่นและเขม่า (Particulates and Soot)

ฝุ่นและเขม่าสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในเปลวไฟชนิดแพร่ และในเปลวไฟชนิดผสมก่อน ฝุ่นเกิดจากสารอนินทรีย์ที่ปนอยู่ในเชื้อเพลิง เช่น ในรูปของสารละลายในเชื้อเพลิงเหลว หรือในรูปของเถ้าในเชื้อเพลิงแข็ง สารอนินทรีย์จะถูกเผาไหม้แล้วกลายเป็นฝุ่นออกมาพร้อมกับแก๊สไอเสีย ฝุ่นบางชนิดมีขนาดใหญ่ และน้ำหนักมากจึงแยกตัวออกจากแก๊สไอเสียได้ง่าย เช่น เถ้าก้นเตา (bottom ash) ของระบบการเผาไหม้ถ่านหินบดละเอียด เป็นต้น ฝุ่นบางชนิด เช่น ที่มีขนาดเล็กกว่า $10\ \mu\text{m}$ จะลอยปนอยู่ในแก๊สไอเสียอย่างถาวรเรียกว่าเถ้าลอย (fly ash) จึงต้องใช้วิธีการพิเศษเพื่อแยกออก เช่น ถูกรอง (bag filter), เครื่องแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) และไซโคลน เป็นต้น

เขม่า (soot) คืออนุภาคคาร์บอนที่มีส่วนของไฮโดรเจนรวมอยู่อย่างน้อย 1% โดยมวล คิดเป็นสูตรทางเคมีอย่างง่ายคือ C_8H เขม่าจึงไม่ใช่คาร์บอนบริสุทธิ์ มักเกิดในบริเวณที่มีเชื้อเพลิงอยู่อย่างเข้มข้น (fuel-rich regions) เสมอ ซึ่งเป็นธรรมชาติของกลไกการเผาไหม้ที่ส่วนผสมของเชื้อเพลิงและออกซิไดซ์จะไม่สม่ำเสมอเท่ากันหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกลไกการผสมหรือความปั่นป่วน สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ เขม่าเกิดขึ้นได้ง่ายในเปลวไฟชนิดแพร่มากกว่าในเปลวไฟชนิดผสมก่อน ขั้นตอนการเกิดเขม่า (soot formation) แบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

1. การเกิดขึ้นเป็นอนุภาค (particle inception) ระหว่างปฏิกิริยาการเผาไหม้ ขั้นตอนเริ่มต้นของการเกิดเขม่าต้องมีโมเลกุลสารอนุมูลเป็นสารตั้งต้น ก่อตัวเป็นนิวเคลียส (nucleation) หรือเป็นอนุภาคที่เล็กมากระดับโมเลกุล นิวเคลียสดังกล่าวมักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน เช่น polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) ซึ่งถือเป็นสารขั้นกลาง (intermediates) ทำหน้าที่เป็นสารเกิดก่อนเขม่า จากนั้นอะเซทิลีน (C_2H_2) จะเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบห่วง แล้วรวมตัวกันเป็นก้อนโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น จนนำไปสู่การเติบโตเป็นอนุภาคเขม่าในขั้นตอนต่อไป

2. การเติบโตของผิวรอบนอก (surface growth) แต่ละจะเกิดการขยายใหญ่ขึ้นด้วยการเกาะตัวของสารขั้นกลางต่างๆบนผิว ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นอะเซทิลีน (C_2H_2) ที่มีมากถึง 85% ของมวลรวม

3. การเกาะรวมตัวกัน (coagulation) อนุภาคเขม่าแต่ละก้อน เคลื่อนที่ชนกัน และเกาะรวมกันเป็นกลุ่ม เกิดเป็นอนุภาคจุลสารรูปร่างลักษณะคล้ายห่วงโซ่

4. การออกซิไดซ์เขม่า (soot oxidation) ภายหลังที่เขม่าเกิดขึ้นแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งมักเกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของ reaction zone ที่อยู่ตรงปลายของเปลวไฟ (flame tip) เขม่าจะเคลื่อนที่

ไปตามเส้นกระแสผ่านเข้าไปในบริเวณการเผาไหม้ที่ปลายของเปลวไฟนั้น ถ้าเขม่าถูกเผาไหม้จนหมด จะเรียกเปลวไฟนั้นว่าเปลวไฟไร้เขม่า ในขณะที่ถ้าเขม่าเผาไหม้ไม่หมดจะเกิดเปลวไฟมีเขม่า

3.4 การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ [4, 10, 13]

หากปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการเผาไหม้ เช่นการเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิงหรืออากาศ อาจส่งผลต่อความเสถียรของเปลวไฟ เช่น เกิดการเป่าดับ (blow off) หรือ เปลวไฟย้อนกลับ (flashback) การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟในหัวเผาจึงมีความสำคัญ สำหรับการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟในหัวเผาเชื้อเพลิงฝุ่น ทำได้โดยวิธีการทางอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic) โดยการหมุนวนกลับของแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงมาผสมกับเชื้อเพลิงที่เข้ามาใหม่ในห้องเผาไหม้ เปลวไฟจะเสถียรเมื่อ เวลาที่ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศใหม่ ไหลเข้ามาในห้องเผาไหม้ ผ่านบริเวณที่เกิดแอสไหลวน (recirculation zone) ยาวนานกว่าเวลาที่ใช้ในการติดไฟ ซึ่งสารระเหยส่วนใหญ่จะถูกปลดปล่อย ณ บริเวณที่เกิดกระแสไหลวน นอกจากหลักของอากาศพลศาสตร์แล้ว คุณภาพของเชื้อเพลิงก็มีส่วนสำคัญที่ทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ เช่น ขนาดของอนุภาคที่ผ่านการบด ความชื้น และค่าความร้อน เป็นต้น การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ ความเร็วการไหลของส่วนผสม ต้องพอดีกันกับ ความเร็วของเปลวไฟ (flame speed) และการจะใช้ความเร็วการไหลของส่วนผสมให้สูงขึ้น ความเร็วเป่าดับ (blow-off velocity) ต้องสูงกว่าความเร็วการไหลของส่วนผสม

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอ การใช้แผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body) และตัวสร้างการหมุนวน (swirler หรือ swirl generator) เพื่อทำให้เกิดกระแสไหลวน ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของเปลวไฟ

3.4.1 การใช้แผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body)

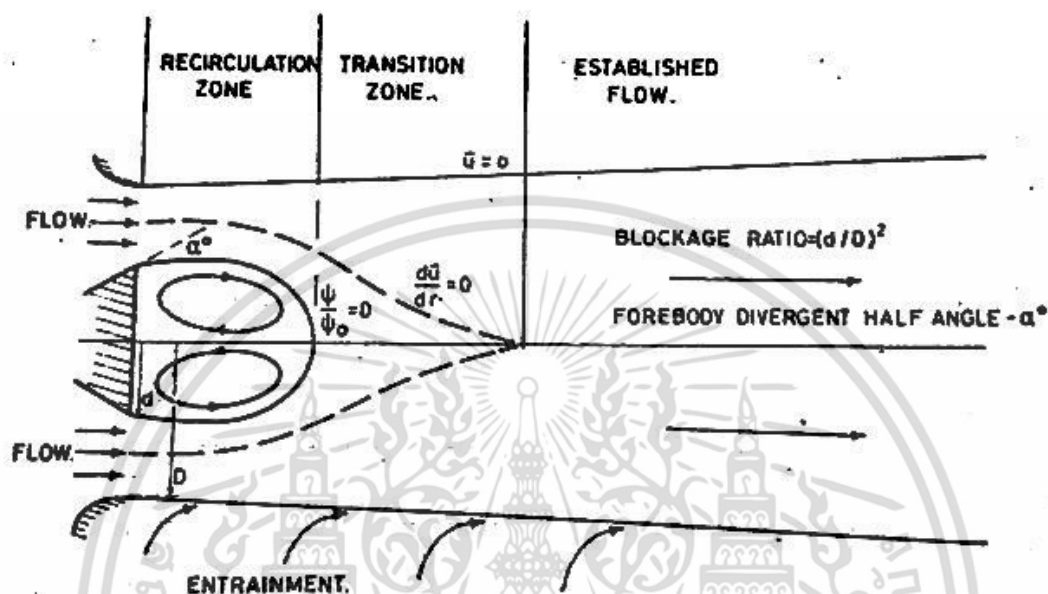
เมื่อส่วนผสมไหลผ่านแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ความเร็วของส่วนผสมจะลดลงตรงบริเวณผนังของแผ่น การไหลปะทะด้านหน้าของแผ่นทำให้เกิดความดันสูง และด้านหลังมีความดันต่ำกว่า ทำให้เกิดการไหลวนเรียกว่า wake นอกจากนี้บริเวณที่ไม่มีเส้นกระแส (stream line) ทำให้เกิดความดันที่สวนทางกับกระแสการไหล ที่ปลายกระแสการไหล (downstream) สูงมาก ทำให้เกิดการแยกตัวของชั้นขอบเขต และบริเวณที่เกิดกระแสไหลวน (recirculation zone) จะถูกสร้างขึ้นบริเวณ wake ซึ่งบริเวณนี้จะมีการถ่ายเทมวล และความร้อนที่สูงมาก สารผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นรอบๆบริเวณที่เกิดกระแสไหลวน จะแทรกซึมเข้าไปในกระแสไหลวนและถูกส่งมาที่ต้นกระแสการไหล (upstream) คลุกเคล้ากับส่วนผสมใหม่ (fresh combustible mixture) จนถึงจุดติดไฟ

สิ่งที่ส่งผลต่อการไหลวนภายใน wake ของแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่าง และการไหลล้อมรอบระบบ (surrounding flow system) ขอบเขตของบริเวณที่เกิดกระแสไหลวนจะถูกล้อมรอบด้วยเส้นความเร็วศูนย์ จากรูปที่ 3.4

$$\text{blockage ratio} = (d / D)^2 \quad (3.39)$$

มุมของวัตถุขวางกั้น α° ของ แต่ละชนิด (forebody divergent) จะมีค่าเท่ากับ 0° สำหรับวัตถุทรงกระบอก และ 180° สำหรับวัตถุรูปจาน (disc shape) สำหรับแผ่นรูปจาน ถ้าค่า blockage

ratio ต่ำ จะทำให้บริเวณที่เกิดกระแสไหลวนยาวขึ้น แต่ส่งผลต่อความกว้างเพียงเล็กน้อย ถ้า blockage ratio คงที่ จะพบว่าแผ่นรูปงานทำให้บริเวณที่เกิดกระแสไหลวน กว้าง และยาว กว่า แผ่นรูปกรวย 45° และทรงกระบอก ตามลำดับ และแผ่นรูปงานจะสร้างกระแสนย้อนกลับ (reverse flow) สูงสุดซึ่งส่งผลต่อความเร็วลบที่นำพาแก๊สร้อนมาคลุกเคล้ากับส่วนผสมใหม่



รูปที่ 3.5 การไหลผ่านแผ่นขวางกั้นช่องการไหล [4]

3.4.2 การใช้ตัวสร้างการหมุนควง (swirl generator)

การทำให้เกิดการหมุนควงของกระแสการไหลมีหลักการดังต่อไปนี้

1. การทำให้กระแสของของไหลพุ่งเข้าตามแนวสัมผัสในท่อทรงกระบอก
2. ใช้ใบพัด (guide vane) เป็นตัวขวางการไหล
3. ของไหลเคลื่อนที่ไปพร้อมกับอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการหมุน

การไหลหมุนควงมักถูกใช้ในการควบคุมเปลวไฟในท่อเผาไหม้ การไหลหมุนควงมีคุณลักษณะของการเคลื่อนที่แบบหมุน และความปั่นป่วนอิสระ เมื่อของไหลเกิดการหมุนควง จะมีองค์ประกอบความเร็วตามแนวสัมผัส ที่อยู่ในความเร็วตามแนวแกนและรัศมี นอกจากนี้ผลของการหมุนควงทำให้เกิดความดันตามแนวรัศมีและตามแนวแกนที่ส่งผลกระทบต่อสนามการไหล ในกรณีที่มีการหมุนควงมีความเข้มข้นสูง ความดันลบส่งผลให้เกิดกระแสนย้อนกลับ ทำให้บริเวณที่เกิดกระแสไหลวนภายใน (internal recirculation zone, IRZ) ถูกสร้างขึ้น ความเข้มข้นของการหมุนควงจะถูกวัดด้วยตัวเลขการหมุนควง (swirl number) ซึ่งมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของโมเมนตัมเชิงมุม (angular momentum) กับฟลักซ์ของโมเมนตัมตามแนวแกน (axial momentum) โดยคำนวณได้จากสมการ

$$S = \frac{G_\phi}{G_x R} \quad (3.40)$$

เมื่อ R คือรัศมีของช่องทางออก
โดยที่

$$G_\phi = \int_0^R (Wr) \rho U 2\pi r dr \quad (3.41)$$

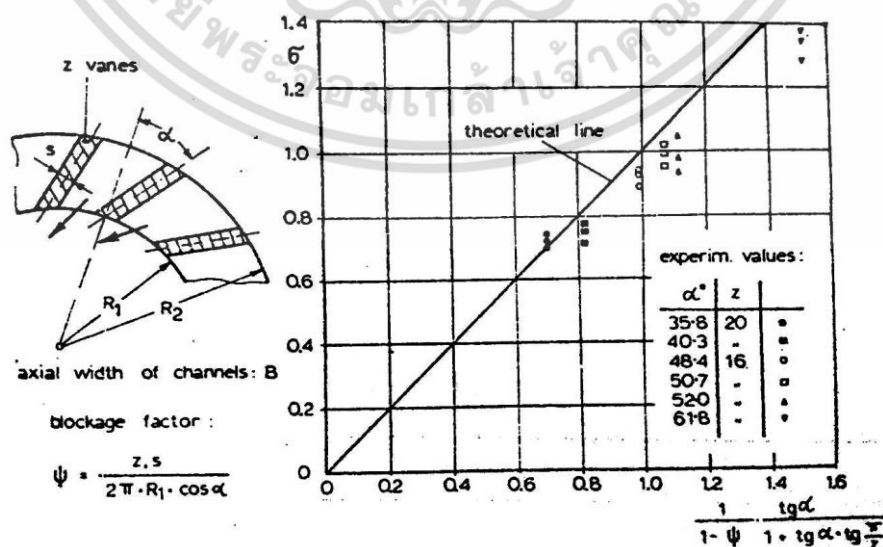
$$G_x = \int_0^R U \rho U 2\pi r dr + \int_0^R p 2\pi r dr \quad (3.42)$$

U , W และ p คือความเร็วตามแนวแกน ความเร็วตามแนวสัมผัส และความดันสถิตตามลำดับ

การคำนวณตัวเลขการหมุนควงโดยตรงจากสมการที่ (3.40) นั้น ต้องมีการวัดความเร็วและความดันสถิตที่แม่นยำ ซึ่งการออกแบบมักจะไม่มามีข้อมูลการทดลอง จึงใช้การคำนวณตัวเลขการหมุนจากรูปทรง (geometry) โดย G_ϕ และเทอมของความเร็วที่อยู่ใน G_x สามารถคาดเดาได้โดยประมาณจากข้อมูลเริ่มต้นสำหรับตัวสร้างการหมุนควงแบบต่างๆ ในการคำนวณตัวเลขการหมุนควงเทอมของความเร็วใน G_x จะมีอิทธิพลมากกว่าเทอมของความดัน ทำให้ตัดเทอมของความดันทิ้งได้ ทำให้ตัวเลขการหมุนควงที่ได้จากการประมาณคำนวณได้ดังนี้

$$S' = \frac{G_\phi}{G_x R} \quad (3.43)$$

$$G_x' = 2\pi \int_0^R \rho U^2 r dr \quad (3.44)$$



รูปที่ 3.6 ลักษณะตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี และค่า σ จากการทดลองและการคำนวณ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี (guide-vane cascades in a radial flow) แสดงตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.6 โมเมนต์เชิงมุมจะคำนวณได้จากสมการ

$$G_\phi = \sigma \frac{\dot{M}^2}{\rho 2\pi B} \quad (3.45)$$

โดยที่

$$\sigma = \frac{\bar{W}_1}{\bar{V}_1} \quad (3.46)$$

$$\bar{W}_1 = \frac{G_\phi}{MR_1} \quad (3.47)$$

$$\bar{V}_1 = \frac{\dot{M}}{\rho 2\pi R_1 B} \quad (3.48)$$

เมื่อ

\dot{M} = อัตราการไหลเชิงมวล

B = ความยาวของช่องตามแนวแกน

σ = อัตราส่วนขององค์ประกอบความเร็วตามแนวสัมผัส (\bar{W}_1) กับตามแนวรัศมี (\bar{V}_1) เฉลี่ย ที่ช่องทางออกของตัวสร้างการหมุนควง R_1

หากสมมติให้ตัวเลขเรโนลด์ (Reynolds number) มีผลน้อยและสามารถละทิ้งได้ในการคำนวณ σ จะสามารถคำนวณได้จากรูปทรงของตัวสร้างการหมุนควง โดยสมการ

$$\sigma = \frac{1}{1-\psi} \cdot \frac{\tan \alpha}{1 + \tan \alpha \tan(\pi/z)} \quad (3.49)$$

โดยที่ ψ คือ blockage factor คำนวณได้จาก

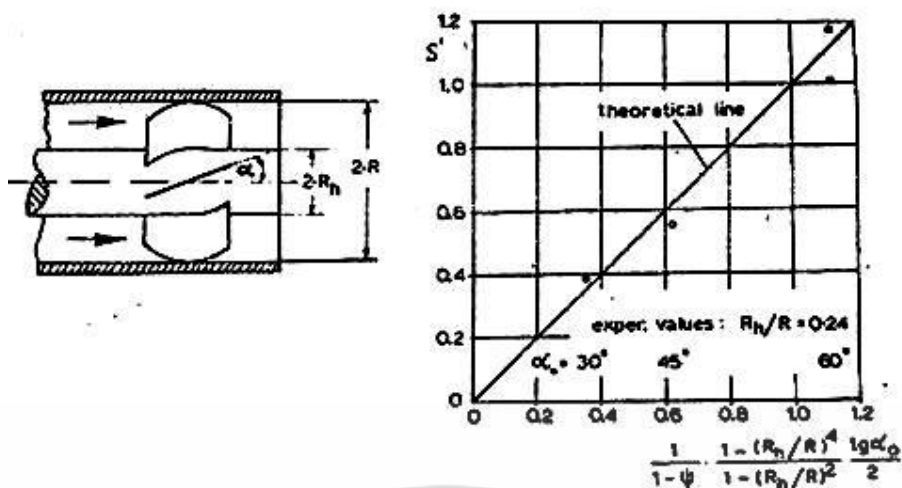
$$\psi = \frac{zs}{2\pi R_1 \cos \alpha} \quad (3.50)$$

เมื่อ

s = ความหนาของใบปิด

z = จำนวนของใบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ลักษณะตัวสร้างการหมุนควงตามแนวแกน และผลการคำนวณตัวเลขการหมุนควงตามทฤษฎีกับการทดลอง [4]

ตัวสร้างการหมุนควงตามแนวแกน แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.7 โมเมนต์ตัมเชิงมุมคำนวณได้จาก

$$G_\phi = \int_{R_h}^R UW \rho 2\pi r^2 dr \quad (3.51)$$

ถ้าไปบิดบางมากโดยมีคอร์ดและมุม α คงที่ โมเมนต์ตัมเชิงมุมคำนวณได้จาก

$$G_\phi = 2\pi\rho U_0^2 \tan \alpha \frac{R^3 - R_h^3}{3} \quad (3.52)$$

โมเมนต์ตัมตามแนวแกนคำนวณได้จาก

$$G'_x = \pi\rho U_0^2 (R^2 - R_h^2) \quad (3.53)$$

หรืออาจเขียนความสัมพันธ์ของโมเมนต์ตัมเชิงมุมกับโมเมนต์ตัมตามแนวแกนได้ดังนี้

$$G_\phi = G'_x \tan \alpha R \frac{2}{3} \cdot \frac{1 - (R_h/R)^3}{1 - (R_h/R)^2} \quad (3.54)$$

ดังนั้นตัวเลขการหมุนควงของตัวสร้างการหมุนควงตามแนวแกนคำนวณได้จากสมการ

$$S' = \frac{G}{G'_x R} = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (R_h/R)^3}{1 - (R_h/R)^2} \right] \tan \alpha \quad (3.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าตัวสร้างการหมุนควงตามแนวแกนไม่มีปาร์บ (hubless) ตัวเลขการหมุนควงจะลดรูปการคำนวณได้คือ

$$S' = \frac{2}{3} \tan \alpha \quad (3.56)$$

ความเข้มของการไหลหมุนควงแสดงอยู่ในรูปของตัวเลขการหมุนควง ถ้า $0 \leq S \leq 0.2$ จัดว่าเป็นการหมุนควงอย่างอ่อน (weak swirl) ถ้า $0.2 \leq S \leq 0.5$ จัดว่าเป็นการหมุนควงระดับปานกลาง (moderate swirl) และถ้า $0.6 \leq S$ จัดว่าเป็นการหมุนควงอย่างเข้ม (strong swirl)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการจำลองในงานวิจัยนี้ โดยสามารถศึกษาได้จาก help ของโปรแกรม ANSYS Fluent ver.12.0 และจากงานวิจัยที่โปรแกรมได้อ้างอิงถึง

4.1 สมการความต่อเนื่องของพิกัดทรงกระบอก (cylindrical continuity equation) [14]

พิจารณาของไหลอัดตัวได้ และเป็นของไหลแบบ Newtonian สมการต่อเนื่องของพิกัดทรงกระบอกคือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho u_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z) = 0 \quad (4.1)$$

4.2 สมการโมเมนตัมของพิกัดทรงกระบอก (cylindrical momentum equation) [14]

พิจารณาของไหลที่อัดตัวได้ และเป็นของไหลแบบ Newtonian สมการโมเมนตัมพิกัดทรงกระบอก r, θ, z คือ องค์ประกอบ r

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \rho g_r + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right] - \rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \quad (4.2)$$

องค์ประกอบ θ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right] - \rho \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_r u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) \quad (4.3)$$

องค์ประกอบ z

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right] - \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k-\varepsilon$ มาตรฐาน (standard $k-\varepsilon$ turbulence flow model) [14, 15]

แบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k-\varepsilon$ มาตรฐาน เป็นแบบจำลองที่สมบูรณ์อย่างง่ายที่สุดสำหรับการไหลปั่นป่วน คือแบบจำลองของสมการสองชุด ที่สามารถแก้ปัญหาสมการการถ่ายโอนแยกกันสองแบบ เพื่อให้สามารถกำหนดความปั่นป่วนของความเร็ว และ length scale อีสรระจากกัน นำเสนอโดย Launder and Spalding [14] แบบจำลอง ประกอบด้วยสมการถ่ายโอนพลังงานจลน์ปั่นป่วน k และสมการสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วน ε ตั้งอยู่บนข้อสมมติฐานคือ การไหลปั่นป่วนเต็มขั้น (fully turbulent flow) และไม่มีผลของความหนืดในระดับโมเลกุล สามารถคำนวณ k และ ε ได้จาก

สมการถ่ายโอนพลังงานจลน์ปั่นป่วน k

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.5)$$

อัตราสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วน ε

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4.6)$$

เมื่อ

G_k = การก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ความเร็ว

G_b = การก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว

Y_M = การขยายตัวของอัตราการสูญเสีย

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ = ค่าคงที่

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ = Prandtl numbers ของ k และ ε ตามลำดับ

S_k, S_ε = เทอมของการก่อกำเนิด

$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ = ความหนืดปั่นป่วน (turbulent (or eddy) viscosity) โดย C_μ = ค่าคงที่

จากการทดลองการไหลปั่นป่วนที่ใช้อากาศและน้ำเป็นของไหล [16] พบว่าค่าคงที่ต่างๆมีค่าดังนี้

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

4.4 สมการพลังงาน (energy equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (4.7)$$

เทอมแรกฝั่งขวามือของสมการ คือการถ่ายโอนพลังงานจากการนำ การแพร่ของสปีชีส์ และการขยายตัวจากความหนืด ตามลำดับ

เมื่อ

k_{eff} = ประสิทธิภาพของการนำ (effective conductivity)

\vec{J}_j = ฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์ j

S_h = ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี และแหล่งความร้อนอื่นๆที่กำหนดให้กับระบบ

$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$ โดย h = sensible enthalpy ของแก๊สอุดมคติ

4.4.1 พลังงานจากปฏิกิริยาเคมี

$$S_{h,rxn} = - \sum_j \frac{h_j^0}{M_j} R_j \quad (4.8)$$

เมื่อ

h_j^0 = enthalpy of formation ของสปีชีส์ j

R_j = อัตราการกำเนิดโดยปริมาตร (volumetric rate of creation) ของสปีชีส์ j

4.5 สมการถ่ายโอนสปีชีส์ (species transport equations) [15]

เป็นสมการอนุรักษ์ที่ใช้หาสัดส่วนมวลของแต่ละสปีชีส์ (Y_i) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีที่ตำแหน่งต่างๆ ผ่านการแก้สมการการพาและการแพร่ สมการอนุรักษ์นี้มีรูปแบบทั่วไปคือ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = - \nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (4.9)$$

เมื่อ

R_i = อัตราการกำเนิดสุทธิของสปีชีส์ i โดยปฏิกิริยาเคมี

S_i = อัตราการกำเนิดจากการรวมกันของการแพร่และที่ถูกระบุค่า

4.5.1 การแพร่ของมวลในการไหลปั่นป่วน

$$\vec{J}_i = -(\rho D_{i,m} + \frac{\mu}{Sc_i}) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

Sc_t = turbulent Schmidt number

$D_{i,m}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสำหรับสปีชีส์ i ในส่วนผสม

$D_{T,i}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่จากความร้อน

μ_t = ความหนืดปั่นป่วน

4.5.2 การถ่ายโอนสปีชีส์ในสมการพลังงาน

สำหรับองค์ประกอบที่หลากหลายผสมกันในการไหล การถ่ายโอนเอ็นทัลปีเนื่องจากการแพร่ของสปีชีส์ เขียนสมการในรูปทั่วไปคือ

$$\nabla \cdot \left[\sum_{i=1}^n h_i \bar{J}_i \right] \quad (4.11)$$

การแพร่ของสปีชีส์ อาจมีผลต่อสนามเอ็นทัลปีอย่างมาก ซึ่งพิจารณาได้จาก Lewis number

$$Le_i = \frac{k}{\rho c_p D_{i,m}} \quad (4.12)$$

4.6 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ [15, 17]

4.6.1 แบบจำลอง eddy-dissipation

งานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลอง eddy-dissipation แบบจำลองสมมติว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยความปั่นป่วน ดังนั้นจึงสามารถหลีกเลี่ยงการคำนวณทางจลนศาสตร์เคมีที่ซับซ้อน ของ ฟังก์ชัน Arrhenius ได้ เพื่อให้ผลลัพธ์การจำลองสมจริง อาจกำหนดกลไกการปลดปล่อยความร้อนแบบขั้นตอนเดียว (one step) หรือสองขั้นตอน (two step) แบบจำลองนี้ นำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Magnussen และ Hjertager [17]

อัตราค่ากำเนิดสปีชีส์สุทธิ i เนื่องจากปฏิกิริยา r, R_{ir} หาได้จากค่าที่น้อยที่สุดของผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากสมการ [4.12] หรือ [4.13] ดังนี้

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right) \quad (4.12)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j^N v''_{j,r} M_{w,j}} \quad (4.13)$$

เมื่อ

Y_p = สัดส่วนโดยมวลของสารผลิตภัณฑ์สปีชีส์ใดๆ, P

Y_R = สัดส่วนโดยมวลของสารตั้งต้น, R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$A, B =$ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 4.0 และ 0.5 ตามลำดับ

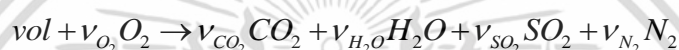
ในสมการที่ [4.12] และ [4.13] อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีถูกควบคุมโดย large-eddy mixing time scale ($\frac{k}{\epsilon}$) การเผาไหม้จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความปั่นป่วน ($\frac{k}{\epsilon} > 0$) ซึ่งเป็นปกติในกรณีเปลวไฟแบบไม่มีการผสมมาก่อน (non-premixed flames)

4.6.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี (chemical mechanism)

การวิเคราะห์โดยประมาณทำให้ทราบสัดส่วนโดยมวลของ สารระเหย คาร์บอนคงตัว เถ้า และความชื้น และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุทำให้ทราบสัดส่วนโดยมวลของธาตุ C,H,O, N และ S

การเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบหนึ่งขั้นตอนและสองขั้นตอน ของสารระเหย (volatile) แสดงการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

แบบหนึ่งขั้นตอน



แบบสองขั้นตอน



จะเห็นว่าในปฏิกิริยาเคมีแบบสองขั้นตอน ปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารระเหยจะมี CO เป็นผลิตภัณฑ์รวมอยู่ด้วย และในปฏิกิริยาที่สองจะเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของ CO ที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาแรก

4.7 แบบจำลองการปลดปล่อยสารระเหย (devolatilization) [15, 18, 19]

การปลดปล่อยสารระเหยของอนุภาคที่กำลังเผาไหม้จะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคมีอุณหภูมิถึงจุดระเหย (vaporization temperature, T_{vap}) และมวลรวมของอนุภาค (m_p) มากกว่ามวลของอนุภาคที่ไม่มีสารระเหย

$$T_p \geq T_{vap} \text{ และ } T_p \geq T_{bp}$$

$$m_p > (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,o})m_{p,0}$$

เมื่อ

T_{bp} = อุณหภูมิจุดเดือด

T_p = อุณหภูมิจุดระเหย

$m_{p,0}$ = มวลของอนุภาคเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m_p = มวลของอนุภาค

$f_{w,0}$ = สัดส่วนโดยมวลของความชื้นที่ระเหยหรือเดือด (กรณีไม่มีความชื้น $f_{w,0} = 0$)

$f_{v,0}$ = สัดส่วนโดยมวลของสารระเหยเริ่มต้นที่อยู่ในอนุภาค

โปรแกรม ANSYS Fluent ver.12.0 มีแบบจำลองการปลดปล่อยสารระเหยได้แก่

1. Constant rate model
2. Single kinetic rate model
3. Two competing rates model หรือ (Kobayashi model)
4. Chemical percolation devolatilization model (CPD)

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ จะนำเสนอเฉพาะแบบจำลอง constant rate และ single kinetic rate เพราะได้เลือกใช้แบบจำลอง single kinetic rate ในวิทยานิพนธ์นี้

4.7.1 แบบจำลอง constant rate

เป็นแบบจำลองที่คำนวณการปลดปล่อยสารระเหยแบบคงที่ แสดงสมการได้ดังนี้

$$\frac{1}{f_{v,0}(1-f_{w,0})m_{p,0}} \cdot \frac{dm_p}{dt} = A_0 \quad (4.14)$$

เมื่อ

A_0 = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (s^{-1})

แบบจำลองจะต้องทำการกำหนดค่าคงที่ A_0 โดยโปรแกรมจะกำหนดเริ่มต้นไว้ $12 s^{-1}$ ซึ่งได้จากงานของ Pillai [18] เป็นการเผาไหม้ของถ่านหิน การใช้แบบจำลองนี้อย่างถูกต้อง ต้องกำหนดอุณหภูมิจุดระเหยซึ่งเป็นตัวควบคุมการเริ่มต้นปลดปล่อยสารระเหยออกมา จากงานวิจัยพบว่าอุณหภูมิจุดระเหยที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองนี้ จะมีค่าเท่ากับ 600 K [19]

4.7.2 แบบจำลอง single kinetic rate

แบบจำลองนี้สมมติให้อัตราการปลดปล่อยสารระเหย (ลำดับหนึ่ง) ขึ้นอยู่กับปริมาณสารระเหยที่อยู่ในอนุภาค

$$\frac{dm_p}{dt} = k[m_p - (1-f_{v,0})(1-f_{w,0})m_{p,0}] \quad (4.15)$$

เมื่อ

k = อัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะ (kinetic rate, s^{-1})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัดส่วนของสารระเหยในอนุภาค ($f_{v,0}$) หาได้จากการวิเคราะห์โดยประมาณ และ kinetic rate (k) หาได้จากกฎค่าคงตัวอัตราการเกิดปฏิกิริยาของอาร์เรเนียส (Arrhenius' law of reaction rate constant)

$$k = A_1 e^{-(E/RT)} \quad (4.16)$$

เมื่อ

A_1 = ตัวประกอบความถี่ (frequency factor หรือ pre-exponential factor)

E = พลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy)

R = ค่าคงตัวของแก๊ส

T = อุณหภูมิ

จะเห็นว่าอัตราการปลดปล่อยสารระเหยของแบบจำลอง single kinetic rate จะไม่คงที่เหมือนกับแบบจำลอง constant rate เนื่องจากถูกควบคุมด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะ (kinetic rate) หรือ k ในสมการที่ (4.16) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมาก

สมการ (4.15) ประมาณได้โดยใช้หลักการวิเคราะห์ (analytical) คือ

$$m_p(t + \Delta t) = (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0} + [m_p(t) - (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0}]e^{-k\Delta t} \quad (4.17)$$

ซึ่งสมมติว่าอุณหภูมิของอนุภาคแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยระหว่างขั้นตอนการรวมเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete time integration steps)

4.8 แบบจำลองการเผาไหม้ที่พื้นผิว (surface combustion) หรือชาร์ (char oxidation) [15]

หลังจากที่อนุภาคได้ปลดปล่อยสารระเหย จะเกิดการเผาไหม้ที่พื้นผิวของส่วนประกอบที่เผาไหม้ได้ (combustible component) หรือชาร์ ของอนุภาคตามมา จะเกิดขึ้นเมื่อ มวลของอนุภาค (m_p) น้อยกว่ามวลของอนุภาคที่ไม่มีสารระเหย และส่วนประกอบที่เผาไหม้ได้นั้นเริ่มถูกเผา

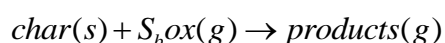
$$m_p < (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0}$$

$$m_p > (1 - f_{v,0} - f_{comb})(1 - f_{w,0})m_{p,0}$$

เมื่อ

f_{comb} = สัดส่วนของส่วนประกอบที่เผาไหม้ได้ (combustible fraction)

การเผาไหม้ชาร์สามารถเขียนปฏิกิริยาทางทฤษฎีที่เกิดขึ้นได้ดังนี้



เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S_b = ค่าทางทฤษฎีของปฏิกิริยาเผาไหม้ที่พื้นผิว (stoichiometric of the surface burnout reaction) หาได้จากอัตราส่วนมวลของสารออกซิเจนต่อมวลของคาร์

ในโปรแกรม ANSYS Fluent ver.12.0 มีแบบจำลองการเผาไหม้ของคาร์ให้เลือก 4 แบบคือ

1. diffusion-limited rate model
2. kinetics/diffusion-limited rate model
3. intrinsic model
4. multiple surface reactions model

วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอแบบจำลอง diffusion-limited rate และ kinetics/diffusion limited-rate ซึ่งจะใช้แบบจำลอง kinetics/diffusion-limited rate ในการจำลอง

4.8.1 แบบจำลอง diffusion-limited rate

แบบจำลองนี้สมมติว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวถูกกำหนดโดยการแพร่ของออกซิเจนไปยังพื้นผิวของอนุภาค โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลง และไม่พิจารณาจลนศาสตร์ทางเคมีที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิว

$$\frac{dm_p}{dt} = -4\pi d_p D_{i,m} \frac{Y_{Ox} T_\infty \rho}{S_b (T_p + T_\infty)} \quad (4.18)$$

เมื่อ

$D_{i,m}$ = สัมประสิทธิ์อัตราการแพร่ของออกซิเจนในก้อนอนุภาค (m^2 / s)

Y_{Ox} = สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนที่ตำแหน่งใดๆ

ρ = ความหนาแน่นของแก๊ส (kg / m^3)

T_∞ = อุณหภูมิตัวกลาง (continuous phase) รอบอนุภาคที่ตำแหน่งใดๆ (K)

T_p = อุณหภูมิของอนุภาค (K)

แบบจำลองนี้เหมาะสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง และการไหลรอบอนุภาคเป็นไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ (ออกซิเจนถูกดูดกลืน) จะเกิดขึ้นเร็วกว่าออกซิเจนที่แพร่เข้าสู่อนุภาคและสารผลิตภัณฑ์ที่แพร่ออกจากเชื้อเพลิง ดังนั้นอัตราการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ผิวเชื้อเพลิง ซึ่งอัตราการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคมากกว่าอุณหภูมิ

4.8.2 แบบจำลอง kinetics/diffusion-limited rate

แบบจำลองสมมติว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวถูกกำหนดโดยอัตราจลน์หรืออัตราการแพร่ ขนาดของอนุภาคมีค่าคงที่ และความหนาแน่นมีค่าลดลงได้ สัมประสิทธิ์ของอัตราการแพร่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty) / 2]^{0.75}}{d_p} \quad (4.19)$$

เมื่อ

d_p = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

และ อัตราจลน์ (kinetic rate) คือ

$$R = C_2 e^{-(E/RT_p)} \quad (4.20)$$

สมการทั้งสองข้างต้นจะทำการถ่วงน้ำหนักอัตราการเผาไหม้ของซาร์ในสมการ

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{OX} \frac{D_0 R}{D_0 + R} \quad (4.21)$$

เมื่อ

A_p = พื้นที่ผิวของอนุภาค

p_{OX} = ความดันย่อยของออกซิเจนรอบๆอนุภาค

R = ผลกระทบของปฏิกิริยาเคมีภายในพื้นผิวของซาร์และรูพรุน

จากสมการที่ (4.21) เปลี่ยนเทอมความดันย่อยให้อยู่ในรูปเชิงมวลของออกซิเจนได้คือ

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p \frac{\rho RT_\infty Y_{OX}}{M_{w,OX}} \frac{D_0 R}{D_0 + R} \quad (4.22)$$

จะเห็นว่าอัตราการเผาไหม้ จะถูกควบคุมด้วยอัตราจลน์หรืออัตราการแพร่ก็ได้ ทำให้มีความยืดหยุ่นกว่าการใช้แบบจำลอง diffusion-limited rate เพียงอย่างเดียว ซึ่งในกรณีที่อนุภาคมีขนาดเล็ก อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ จะเกิดขึ้นช้ากว่าอัตราการแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ ที่แพร่ออกจากผิวอนุภาค ดังนั้นอัตราการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยจลน์ทางเคมี (chemical kinetics) เป็นหลัก โดยในกรณีดังกล่าว อัตราการเผาไหม้จะขึ้นกับอุณหภูมิ ไม่ขึ้นกับขนาดของอนุภาคและการไหลแต่อย่างใด

4.8.3 การถ่ายเทมวลและความร้อนจากการเผาไหม้ซาร์

เมื่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ซาร์กับออกซิเจนเกิดขึ้น จะทำให้เกิดเทอมของแหล่งกำเนิดที่มีเครื่องหมายลบในการคำนวณสมการถ่ายโอนสปีชีส์ ขณะเดียวกันก็เป็นแหล่งกำเนิดสปีชีส์แก๊สจากสารผลิตภัณฑ์ พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาคำนวณได้จาก ความร้อนของปฏิกิริยา

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p (T_\infty - T_p) - f_h \frac{dm_p}{dt} H_{\text{reac}} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (4.23)$$

เมื่อ

H_{reac} = ความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาที่พื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f_h = สัดส่วนการดูดกลืนความร้อน

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2-K)

c_p = ความจุความร้อนของอนุภาค ($J/kg-K$)

ε_p = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของอนุภาค

σ = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann = 5.67×10^{-8} (W/m^2-K^4)

θ_R = อุณหภูมิจากการแผ่รังสีความร้อน

4.9 แบบจำลองส่วนประกอบที่ไม่เผาไหม้ (inert heating or cooling) [15]

ถ้าอุณหภูมิของอนุภาคถึงจุดระเหยจะเข้าสู่กระบวนการดังหัวข้อที่ 4.8 ที่อธิบายไปก่อนหน้านี้คือการเผาไหม้ของซาร์ แต่ถ้าอุณหภูมิของอนุภาคน้อยกว่าอุณหภูมิจุดระเหย และสารระเหยที่อยู่ในอนุภาคถูกเผาไหม้แล้ว จะมีส่วนประกอบของอนุภาคที่เผาไหม้ไม่ได้คงเหลืออยู่

$$T_p < T_{vap}$$

$$m_p \leq (1 - f_{v,0}) m_{p,0}$$

สมดุลความร้อนอย่างง่ายที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิของอนุภาค การพาความร้อน และการดูดกลืนหรือแผ่รังสีความร้อนที่พื้นผิว แสดงได้ดังนี้

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (4.24)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (4.24) กับเวลาโดยใช้การประมาณ และเพื่อให้อยู่ในรูปเชิงเส้นจะสมมติว่าอุณหภูมิของอนุภาคเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

$$T_p(t + \Delta t) = \alpha_p + [T_p(t) - \alpha_p] e^{-\beta_p \Delta t} \quad (4.25)$$

โดย

$$\alpha_p = \frac{h T_\infty + \varepsilon_p \sigma \theta_R^4}{h + \varepsilon_p \sigma T_p^3(t)}$$

$$\beta_p = \frac{A_p (h + \varepsilon_p \sigma T_p^3(t))}{m_p c_p}$$

เมื่อ

Δt = integration time step

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน h หาได้จาก ความสัมพันธ์ของ Ranz และ Marshall [21]

$$Nu = \frac{h d_p}{k_\infty} = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

k_∞ = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวกลาง (W/m-K)

Re_d = ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold number) ที่ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและความเร็วสัมพัทธ์

Pr = Prandtl number ของตัวกลาง ($c_p \mu / k_\infty$)

4.10 แบบจำลองการแผ่รังสีของอนุภาค [15]

4.10.1 สมการการแผ่รังสี

สมการการแผ่รังสี สำหรับการดูดกลืน การปลดปล่อย และการกระเจิง ที่ตำแหน่ง \vec{r} ในทิศทาง \vec{s} คือ

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (4.27)$$

เมื่อ

\vec{r} = เวกเตอร์ตำแหน่ง

\vec{s} = เวกเตอร์ทิศทาง

\vec{s}' = เวกเตอร์ทิศทางของการกระเจิง

s = ระยะทางการแผ่รังสี

a = สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

n = ดัชนีหักเห

σ_s = สัมประสิทธิ์การกระเจิง

σ = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann = 5.67×10^{-8} (W/m²-K⁴)

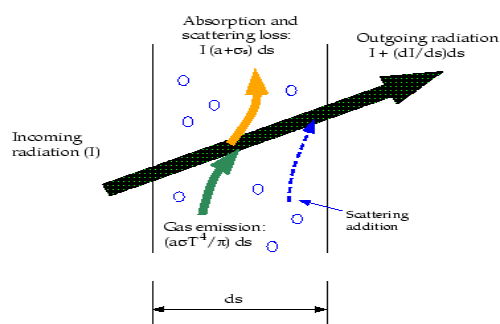
I = ความเข้มของการแผ่รังสี (ขึ้นอยู่กับ \vec{r} และ \vec{s})

T = อุณหภูมิ

Φ = phase function

Ω' = มุมตัน

โดย $(a + \sigma_s)s$ คือความหนาเชิงแสง หรือความทึบของตัวกลาง ดัชนีหักเหจะมีความสำคัญเมื่อพิจารณาการแผ่รังสีในตัวกลางโปร่งแสง รูปที่ 4.1 แสดงกระบวนการแผ่รังสีความร้อน



รูปที่ 4.1 กระบวนการแผ่รังสีความร้อน [15]

สำหรับแบบจำลองการแผ่รังสีในโปรแกรม ANSYS Fluent ver.12.0 มีให้เลือก 5 แบบคือ

1. Discrete Transfer Radiation model
2. P-1 Radiation model
3. Rosseland Radiation model
4. Surface-to-Surface (S2S) Radiation model
5. Discrete Ordinates (DO) Radiation model

ในวิทยานิพนธ์นี้ จะกล่าวถึงเพียง แบบจำลอง Discrete Ordinates (DO) Radiation เพราะได้เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

4.10.2 แบบจำลอง Discrete Ordinates (DO) Radiation

แบบจำลองนี้จะครอบคลุมทั้งหมดของความหนาเชิงแสงและสามารถแก้ปัญหาการแผ่รังสีจากผิวสู่ผิว ที่ร่วมกับกระบวนการเผาไหม้ และสามารถแก้ปัญหาผนังกึ่งโปร่งแสง สำหรับสมการของแบบจำลอง DO พิจารณาสมการการแผ่รังสี (4.27) โดยสมมติว่า สัมประสิทธิ์การกระเจิง phase function และดัชนีหักเห ไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น จะได้

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = a_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (4.28)$$

เมื่อ

λ = ความยาวคลื่น

a_λ = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนสเปคตรัม

I_λ = ความเข้มการแผ่รังสีของวัตถุดำ จากฟังก์ชันของแพลงค์ (Planck function)

4.11 แบบจำลองการไหลที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (discrete phase model) [15]

แบบจำลองนี้ใช้สำหรับคำนวณปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคเชื้อเพลิงกับของไหล มีสมการที่เกี่ยวข้องที่สำคัญคือ

4.11.1 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค

ในโปรแกรมจะทำการคาดการณ์วิถีของอนุภาค โดยการสมดุลแรงบนกรอบอ้างอิงของ Lagrangian (Lagrangian reference frame) สมดุลแรงนี้จะเท่ากับความเฉื่อยกับแรงที่กระทำกับอนุภาค เขียนสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค สำหรับทิศทาง x ในพิกัดคาที่เขียน ได้ดังนี้

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (4.29)$$

เมื่อ

u = ความเร็วของของไหล

u_p = ความเร็วของอนุภาค

g_x = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาค

F_x = เทอมของแรงที่เพิ่มขึ้น (แรงต่อหนึ่งหน่วยมวลของอนุภาค)

$F_D(u - u_p)$ = แรงต้านต่อหน่วยมวลของอนุภาค

หา F_D ได้จากสมการ

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \cdot \frac{C_D R_c}{24} \quad (4.30)$$

μ = ความหนืดโมเลกุลของของไหล

d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

R_c = ตัวเลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์ (relative Reynolds number); $\equiv \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}$

สมการของแรงที่กระทำต่ออนุภาค (F_x) จากของไหลรอบๆแสดงได้ดังนี้

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (u - u_p) \quad (4.31)$$

ถ้า $\rho > \rho_p$ แรงที่เพิ่มขึ้นจะเกิดจากระดับของความดันในของไหล

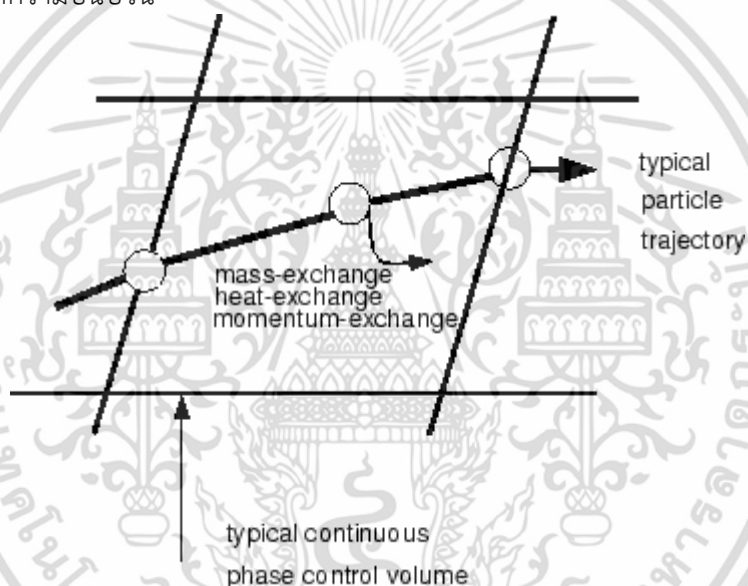
$$F_x = \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right) u_{pi} \frac{\partial u}{\partial x_i} \quad (4.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสถานการณ์บางอย่างจะต้องพิจารณาแรงพิเศษ อื่นๆ เช่นผลของแรงจากการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน (Brownian motion) หรือผลจากแรง Thermophoretic สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ [21]

4.11.2 การกระจายตัวของอนุภาคจากความปั่นป่วน (Turbulent dispersion of particles)

การกระจายตัวของอนุภาคจากความปั่นป่วน หาได้จากแบบจำลอง stochastic tracking หรือ particle cloud สำหรับวิธานิพนธ์นี้ จะใช้แบบจำลอง stochastic tracking หรือ random walk แบบจำลองจะรวมผลของความเร็วปั่นป่วนชั่วขณะของอนุภาคโดยใช้วิธีแบบสุ่ม (stochastic method) พิจารณารูปที่ 4.2 เส้นทางของอนุภาคจะถูกคำนวณจาก ความร้อน มวล และโมเมนตัม ที่ได้รับหรือสูญเสีย การสุ่มเส้นทางของอนุภาคจะใช้ความเร็วเฉลี่ยของเฟสของไหล (\bar{u}) ในสมการที่ (4.29) หรือใช้ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงชั่วขณะ ($u = \bar{u} + u'$) ในการคาดเดาการกระจายตัวของอนุภาคเนื่องจากความปั่นป่วน



รูปที่ 4.2 การสุ่มเส้นทางเดินของอนุภาค [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

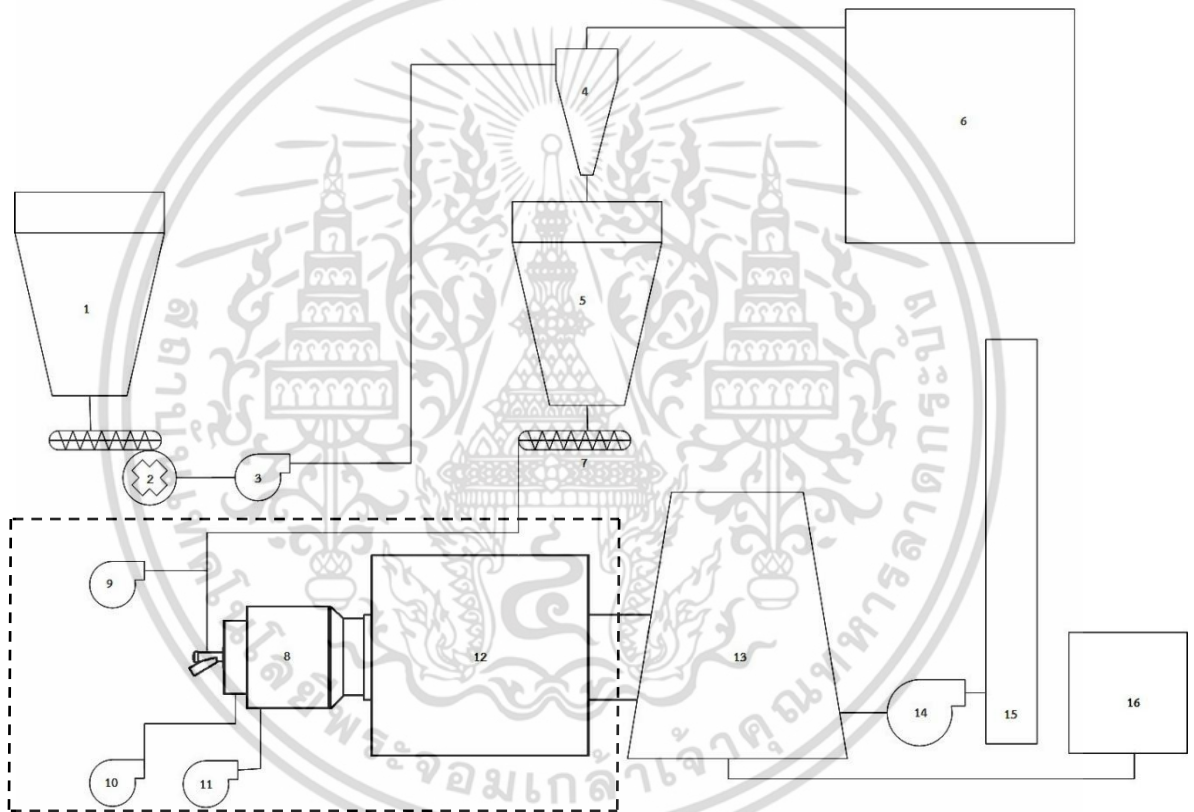
บทที่ 5

ส่วนประกอบของระบบ และการคำนวณที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะนำเสนอส่วนประกอบ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง โดยรายละเอียดของ ของแต่ละส่วน เกิดจากการออกแบบของผู้ร่วมวิจัย หลายท่าน ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [1, 23, 24, 25]

5.1 ส่วนประกอบของระบบ

ส่วนประกอบของระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่ใช้ทดลองในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 5.1

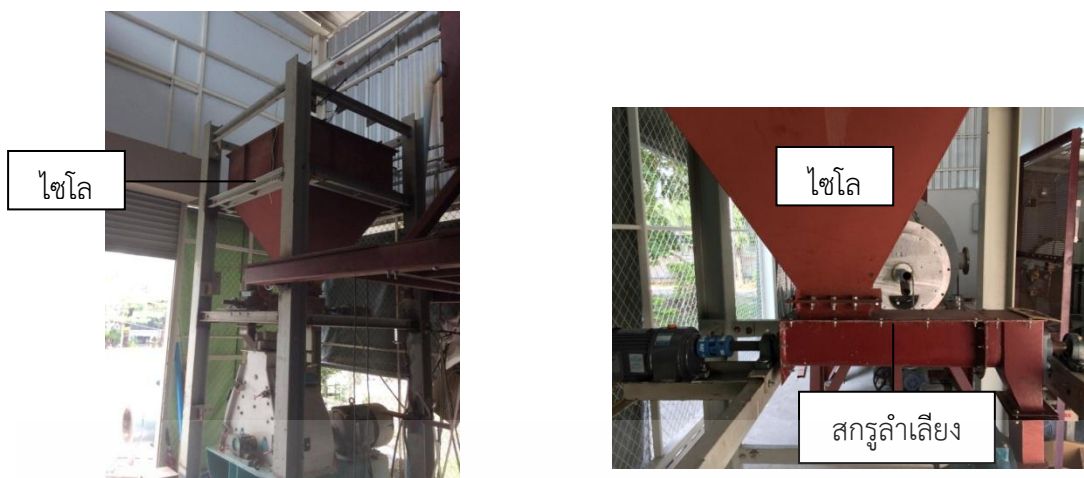


รูปที่ 5.1 ส่วนประกอบของระบบ

จากรูปที่ 5.1

หมายเลข 1 คือ ไซโลเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดและสกรูขนถ่าย แสดงดังรูปที่ 5.2

หมายเลข 2 คือ เครื่องบดเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด แสดงดังรูปที่ 5.3 เป็นเครื่องบดชนิด Hammer mill ทำหน้าที่บดเชื้อเพลิงให้เป็นผงฝุ่น ฝุ่นเชื้อเพลิงจะผ่านตะแกรงที่ติดตั้งในเครื่องบดสองฝั่ง ฝุ่นที่ผ่านตะแกรงจะมีขนาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.2 ไซโลเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด และสกรูลำเลียง



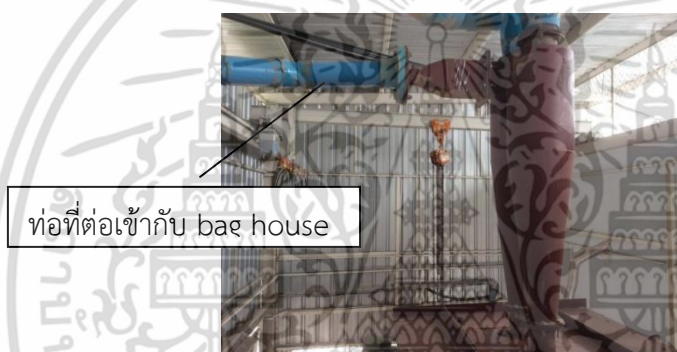
รูปที่ 5.3 เครื่องบดชนิด Hammer mill



รูปที่ 5.4 พัดลมลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลฟุ้ง

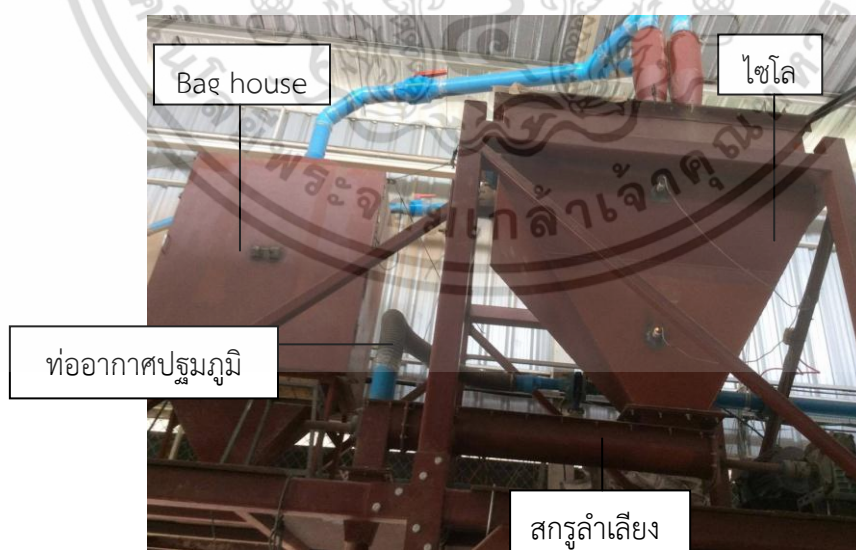
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 3 คือ พัดลมลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นเข้าสู่ไซโคลนแยกขนาดอนุภาค แสดงดังรูปที่ 5.4
 หมายเลข 4 คือ ไซโคลนแยกขนาดอนุภาค [23] แสดงดังรูปที่ 5.5 โดยอนุภาคที่ผ่านการบดจะถูกคัดแยก อนุภาคหยาบจะเข้าสู่ไซโลเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น อนุภาคละเอียดจะเข้าสู่ bag house
 หมายเลข 5 คือ ไซโลเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น แสดงดังรูปที่ 5.6 เมื่อไซโคลนคัดแยกอนุภาค อนุภาคหยาบจะตกลงสู่ด้านล่างของไซโคลนเข้าสู่ไซโล
 หมายเลข 6 คือ bag house แสดงดังรูปที่ 5.6 ทำหน้าที่กักเก็บอนุภาคขนาดเล็ก ภายในบรรจุถุงกรอง (bag filter) อนุภาคขนาดเล็กจะถูกถุงกรองดักไว้
 หมายเลข 7 คือ สกรูลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น (screw feeding) แสดงดังรูปที่ 5.6 ติดตั้งที่ด้านล่างไซโลเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น ทำหน้าที่ลำเลียงเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงจะตกสู่ท่อลำเลียงเดียวกันกับอากาศปฐมภูมิเพื่อลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้
 หมายเลข 8 คือ หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น แสดงดังรูปที่ 5.7 ประกอบด้วยท่อทางเข้าของอากาศสามส่วนและห้องเผาไหม้ช่วย กล่องลมที่อยู่ส่วนท้ายภายในติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี ที่ปรับมุมได้ตั้งแต่ 60-100° รูปที่ 5.14 (ข) แสดงการอ้างอิงมุมของใบพัด



ท่อที่ต่อเข้ากับ bag house

รูปที่ 5.5 ไซโคลนคัดแยกอนุภาค



ท่ออากาศปฐมภูมิ

สกรูลำเลียง

รูปที่ 5.6 ไซโลเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น สกรูลำเลียง และ bag house

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 9 คือ พัดลมอากาศปฐมภูมิ (primary air fan) แสดงดังรูปที่ 5.8 ทำหน้าที่ลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่หัวเผา

หมายเลข 10 คือ พัดลมอากาศทุติยภูมิ (secondary air fan) ทำหน้าที่ลำเลียงอากาศที่เป็นอากาศหลักเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง อากาศทุติยภูมิจะไหลแบบหมุนควงเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยกลไกของตัวสร้างการหมุนควงที่ติดตั้งในกล่องลม (wind box)

หมายเลข 11 คือ พัดลมอากาศตติยภูมิ (tertiary air fan) ทำหน้าที่ลำเลียงอากาศส่วนสุดท้ายที่เข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงบริเวณก่อนเข้าสู่เตาเผา อากาศส่วนนี้จะแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังของปูนทนไฟชั้นนอกก่อน แล้วจึงพุ่งออกจากรูที่ส่วนปลายของหัวเผา

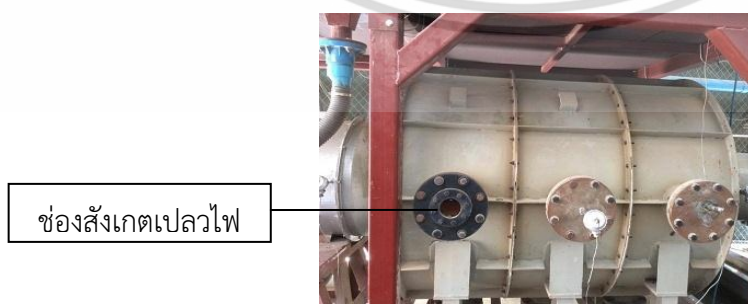
หมายเลข 12 คือ เตาเผา แสดงดังรูปที่ 5.9 เป็นบริเวณที่รับความร้อนจากปฏิกิริยาเผาไหม้ของเชื้อเพลิง



รูปที่ 5.7 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น และตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี



รูปที่ 5.8 พัดลมอากาศปฐมภูมิ



รูปที่ 5.9 เตาเผา

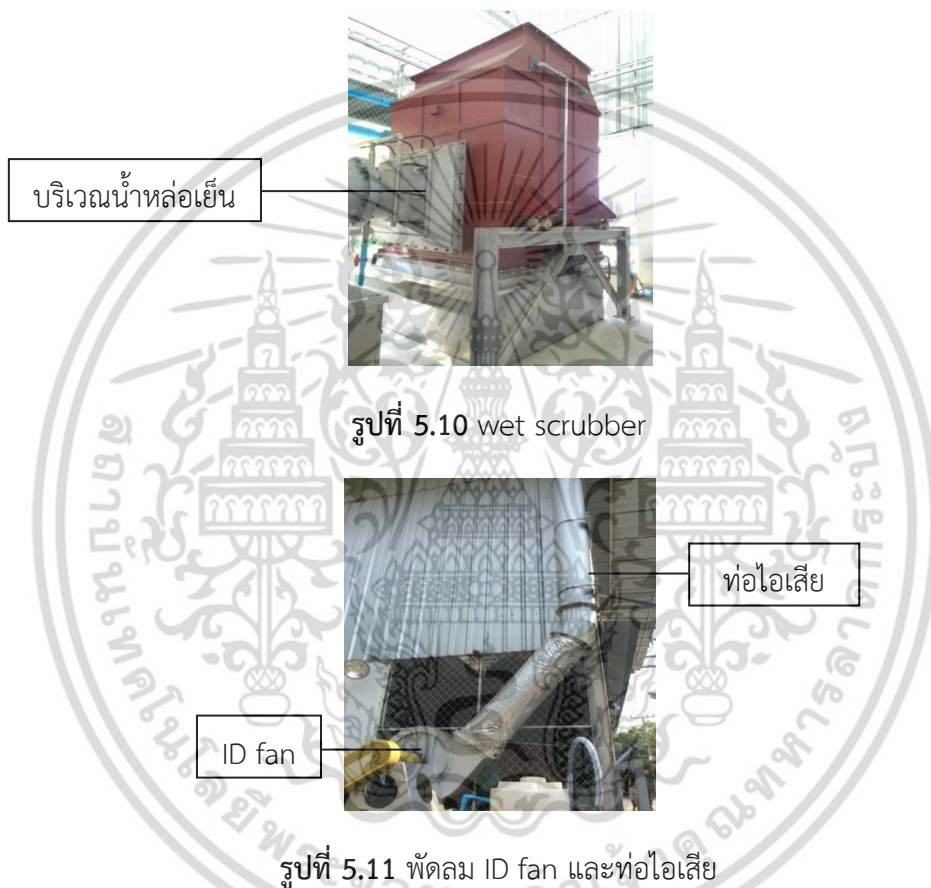
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 13 คือระบบบำบัดอากาศแบบเปียก (wet scrubber) แสดงดังรูปที่ 5.10 ทางเข้าที่เชื่อมต่อกับเตาเผาจะมีน้ำหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อน ด้านบนมีหัวฉีดน้ำเป็นละอองดักจับอนุภาคที่เป็นเถ้าลอย (fly ash) ตกกลงสู่อ่างน้ำด้านล่าง น้ำที่อ่างด้านล่างจะถูกดูดไปบำบัดที่ถังบำบัดน้ำ

หมายเลข 14 พัดลมดูด หรือ ID fan แสดงดังรูปที่ 5.11 ทำหน้าที่สร้างแรงดูดเพื่อให้ความดันในระบบเป็นลบตลอดเวลา และดูดอากาศที่ผ่านการบำบัดออกสู่ปล่องควันของท่อไอเสีย

หมายเลข 15 คือท่อไอเสีย แสดงดังรูปที่ 5.11

หมายเลข 16 คือถังบำบัดน้ำ แสดงดังรูปที่ 5.12 เมื่อน้ำที่ดักอนุภาคตกลงสู่อ่างด้านล่างของ wet scrubber แล้ว จะถูกดูดเพื่อไปบำบัด น้ำที่ผ่านการบำบัดจะถูกนำไปใช้ใหม่



รูปที่ 5.12 ระบบบำบัดน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการจำลอง และการทดลอง

5.2.1 อัตราการไหลของเชื้อเพลิง

วิทยานิพนธ์นี้ใช้เชื้อเพลิงไม้ยางพารา ที่ผ่านการบดแล้วถูกคัดแยกขนาดหยาบและละเอียดจากไซโคลน เชื้อเพลิงที่มีขนาดหยาบจะนำไปร่อนผ่านตะแกรง โดยเครื่อง sieve analysis เพื่อหาการกระจายขนาดของอนุภาค (size distribution) [23] แสดงได้ดังตารางที่ 5.1 และนำไปวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุ [23] แสดงได้ดังตารางที่ 5.2 ดังนั้นสามารถคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (\dot{m}_{fuel}) เทียบเท่ากับกำลังความร้อนได้จากสมการ

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Q}{LHV} \quad (\text{kg/s}) \quad (5.1)$$

อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเทียบเท่ากับกำลังความร้อน 300 kW มีค่าเท่ากับ 0.0186 kg/s ในการจำลองจะต้องกำหนดขนาดอนุภาค และอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงทำการเฉลี่ยขนาดของอนุภาคที่ค้ำตะแกรง แล้วนำมาหาอัตราการไหลเชิงมวลของแต่ละอนุภาค เทียบเท่ากับกำลังความร้อน 300 kW แสดงดังตารางที่ 5.3 ในส่วนของการทดลอง อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคจะถูกควบคุมด้วย ความถี่กระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ (inverter) ที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราขนถ่ายของสกรูดังสมการที่ (5.2) [25]

$$\text{ความถี่กระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ (Hz)} = 0.007(\dot{m}_{fuel}) + 0.001 \quad (5.2)$$

ตารางที่ 5.1 การกระจายขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิง (1 kg) ที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1

ขนาดของอนุภาค (μm)	จำนวน (%)
≥ 425	35.8
≥ 355	9.4
≥ 300	9.8
≥ 180	18.4
≥ 150	9.4
≥ 75	8.1
≤ 75	9.2
รวม	100.0

ตารางที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์แบบปริมาณและแยกธาตุของเชื้อเพลิง [1]

คุณสมบัติ	สภาพน้ำส่ง (%)	สภาพน้ำหนักแห้ง (%)
ความชื้น	5.81	-
สารระเหย	76.68	81.41
ถ่านคงตัว	15.23	16.16
เถ้า	2.28	2.43
ไฮโดรเจน	6.31	6.01
คาร์บอน	45.42	48.22
ไนโตรเจน	0.45	0.48
ออกซิเจน	45.54	42.86
ซัลเฟอร์	0.00	0.00
ค่าความร้อนสูง (kcal/kg)	4,180	4,440
ค่าความร้อนต่ำ (kcal/kg)	3,860	4,100

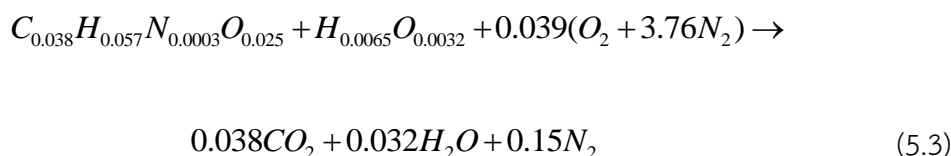
ตารางที่ 5.3 การคำนวณหาอัตราการไหลของแต่ละอนุภาค

ขนาดของอนุภาค (μm)	จำนวน (%)	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
712.5	35.8	0.006656
390.0	9.4	0.001745
327.5	9.8	0.001814
240.0	18.4	0.003424
165.0	9.4	0.001745
112.5	8.1	0.001508
37.5	9.2	0.001709
รวม	100.0	0.0186

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 อัตราการไหลของอากาศ

การคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศทั้งสามส่วน ต้องทำการดุลสมการสโตยซิโอมेटรีของการเผาไหม้ เมื่อทราบองค์ประกอบของธาตุในเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุดังตารางที่ 5.2 แล้ว จากสมการที่ (3.1) สโตยซิโอมेटรีของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นคือ



ทำการคำนวณหาอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงตามทฤษฎี $((A/F)_{stoic})$ จากสมการที่ (3.3) จะได้ $(A/F)_{stoic} = 5.41$

การจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้อากาศส่วนเกินตามทฤษฎีที่ 15% และการทดลองจะใช้ 15 และ 50% เมื่อทราบอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงตามทฤษฎี และอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงที่กำลังความร้อน 300 kW แล้วนำไปคำนวณหาอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง (Φ_{fuel}) ตามสมการที่ (3.4) จะสามารถหาอัตราการไหลเชิงมวลได้จากสมการที่ (3.3) อัตราการไหลเชิงมวล และอัตราการไหลเชิงปริมาตร ของอากาศแสดงได้ดังตารางที่ 5.4 อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ ทุดิยภูมิ และตติยภูมิ ในการจำลองและการทดลอง จะควบคุมอัตราส่วนที่ร้อยละ 15 65 และ 20 ตามลำดับ อ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ของชินภัทร [1] อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้งสามส่วน ที่สัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินตามทฤษฎีแสดงได้ดังตารางที่ 5.5

ในส่วนของการทดลอง จะใช้พัดลมเป็นตัวสร้างอัตราการไหลของอากาศทั้งสามส่วน ซึ่งถูกควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วปีกผีเสื้อ (butterfly valve) โดยใช้ differential transmitter เป็นอุปกรณ์วัดความดันตกคร่อมแผ่นออริฟิส (orifice plate) ผ่านการเขียนโปรแกรมควบคุม ดังรูปที่ 5.13 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแต่ละส่วนที่สัมพันธ์กับความดันตกคร่อมแผ่นออริฟิส คำนวณได้จากสมการที่ (5.4) และ (5.5) สำหรับอากาศปฐมภูมิและตติยภูมิ

$$m_{air} = 0.022879\sqrt{\Delta p} \quad (5.4)$$

สำหรับอากาศตติยภูมิ

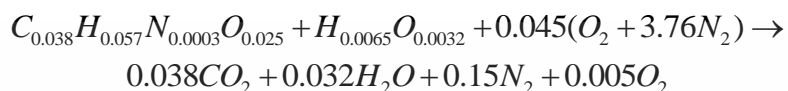
$$m_{air} = 0.039694\sqrt{\Delta p} \quad (5.5)$$

รายละเอียดของ การสอบเทียบเครื่องมือวัด และการได้มาของสมการข้างต้น สามารถศึกษาได้จากวิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ของ นันทพล จันคง [25] ซึ่งเป็น 1 ในผู้ร่วมทำวิจัย

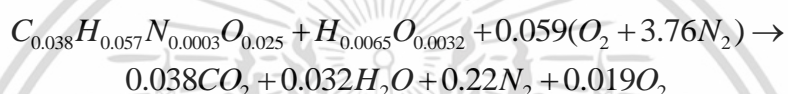
ตารางที่ 5.4 อัตราการไหลของอากาศ (ความหนาแน่นของอากาศ = 1.18 kg/m^3)

เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินตามทฤษฎี (%)	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)	อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s)
15	0.11572	0.1366
50	0.15094	0.1781

*เมื่อ สมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่อากาศส่วนเกิน 15% คือ

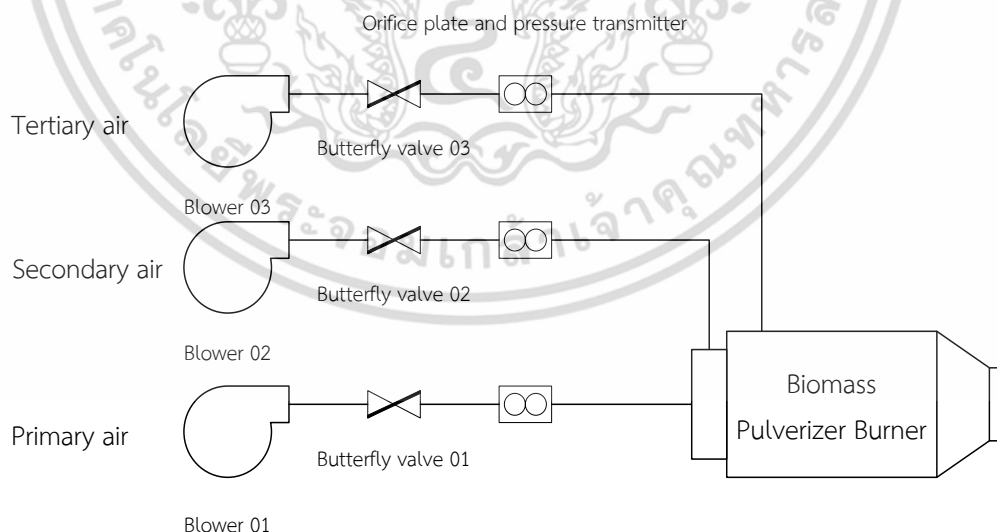


และ สมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่อากาศส่วนเกิน 50% คือ



ตารางที่ 5.5 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้งสามส่วน

เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินตามทฤษฎี (%)	อากาศปฐมภูมิ (kg/s) (15%)	อากาศทุติยภูมิ (kg/s) (65%)	อากาศตติยภูมิ (kg/s) (25%)
15	0.017	0.075	0.023
50	0.023	0.098	0.030



รูปที่ 5.13 ระบบควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลอง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 การคำนวณตัวเลขการหมุนควง (swirl number)

จากรูปที่ 5.7 ตัวสร้างการหมุนควงที่ติดตั้งในกล่องลมภายในหัวเผา เป็นชนิดตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี ในการจำลองและการทดลองจะปรับมุมของใบพัดของตัวสร้างการหมุนควงไว้ที่ 105° ซึ่งกลไกของอุปกรณ์ปรับมุมจะเป็นการปรับจากด้านหลัง การอ้างอิงมุมของใบพัดแสดงได้ดังรูปที่ 5.14 (ก) ในขณะที่การคำนวณตัวเลขการหมุนควงต้องอ้างอิงขนาดจากด้านหน้าดังรูปที่ 5.14 (ข)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ (3.41) และ (3.44) แล้วนำไปแทนในสมการที่ (3.43) จะได้ความสัมพันธ์ของตัวเลขการหมุนควง ที่อยู่ในรูปความสัมพันธ์กับองค์ประกอบความเร็วตามแนวสัมผัส และองค์ประกอบความเร็วตามแนวแกนเฉลี่ย ดังสมการที่ (5.6) วิธีการอินทิเกรตแสดงได้ดังตารางที่ 5.7

จาก

$$S' = \frac{2}{3} \left(\frac{\bar{W}_1}{\bar{U}_1} \right) \quad (5.6)$$

เมื่อ

\bar{W}_1 = องค์ประกอบความเร็วตามแนวสัมผัสเฉลี่ยที่ช่องทางออก R_1

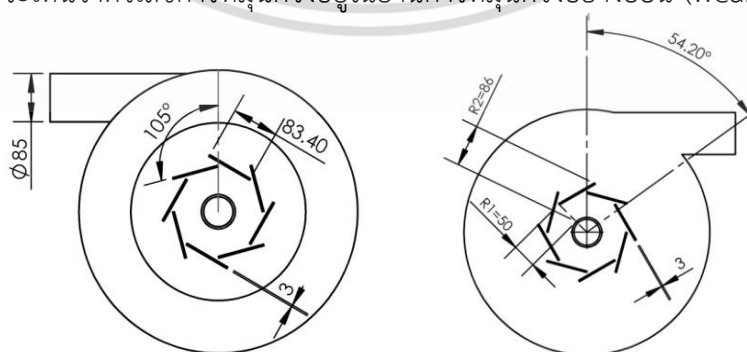
\bar{U}_1 = องค์ประกอบความเร็วตามแนวแกนเฉลี่ยที่ช่องทางออก R_1

โดยสามารถหา \bar{W}_1 ได้จากสมการที่ (3.47) เมื่อพลักซ์ของโมเมนตัมเชิงมุม G_θ หาได้จากโครงสร้างของตัวสร้างการหมุนควง ตามสมการที่ (3.45) (3.49) และ (3.50) การหา \bar{U}_1 จำเป็นต้องทราบ \bar{V}_1 ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.48) แล้วนำมาหาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบความเร็วจากสมการ

$$|\bar{V}| = \sqrt{\bar{U}_1^2 + \bar{V}_1^2 + \bar{W}_1^2} \quad (5.7)$$

เมื่อ $|\bar{V}|$ = ขนาดของความเร็ว = $\frac{\dot{m}}{\rho\pi R_1^2}$

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณตัวเลขการหมุนควง และผลการคำนวณตัวเลขการหมุนควง แสดงได้ดังตารางที่ 5.6 จะเห็นว่าตัวเลขการหมุนควงอยู่ในย่านการหมุนควงอย่างอ่อน (weak swirl)



(ก) ภาพตัดมองจากด้านหลัง

(ข) ภาพตัดมองจากด้านหน้า

รูปที่ 5.14 ขนาดของตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณตัวเลขการหมุนควง และผลการคำนวณตัวเลขการหมุนควง ($\rho = 1.18 \text{ kg/m}^3$)

ตัวแปร	ค่าของตัวแปร
α ($^{\circ}$)	54.20
z (number of vane)	8
s (mm)	3
B (mm)	140
R_1 (mm)	50
R_2 (mm)	86
ψ (-)	0.13
σ (-)	1.58
\dot{m}_{air} (kg/s)	0.075
G_{ϕ} ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$)	0.00856
\bar{W}_1 (m/s)	2.28
\bar{V}_1 (m/s)	1.45
$ \bar{V} $ (m/s)	8.09
\bar{U}_1 (m/s)	7.63
S' (-)	0.20

5.2.4 การคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold's number)

จากรูปที่ 5.15 แสดงขนาดของช่องทางออกของอากาศส่วนที่ 2 ซึ่งจะทำให้การคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ จากสมการที่ (5.8) ค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องแสดงได้ดังตารางที่ 5.8

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (5.8)$$

เมื่อ $D = D_s - D_p$

ตารางที่ 5.8 ค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์

ตัวแปร	ค่าของตัวแปร
ρ (kg/m^3)	1.18
V (m/s) (จากตารางที่ 5.6)	8.09
μ ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$) ที่อุณหภูมิ 30 $^{\circ}\text{C}$	1.86×10^{-5}
D (m)	0.085
Re (-)	43,625

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 การอินทิเกรตหาตัวเลขการหมุนควง

โมเมนต์เชิงมุม	โมเมนต์ตามแนวแกน
จากสมการที่ (3.41) ประยุกต์กับรูปที่ 5.14 (ข) $G_\phi = \int_{R_1}^{R_2} UW \rho 2\pi r^2 dr$ $= UW \rho 2\pi \int_{R_1}^{R_2} r^2 dr$ $= \frac{2}{3} UW \rho \pi (R_2 - R_1)^3$	จากสมการที่ (3.44) ประยุกต์กับรูปที่ 5.14 (ข) $G'_x = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} \rho U^2 r dr$ $= 2\pi \rho U^2 \int_{R_1}^{R_2} r dr$ $= \pi \rho U^2 (R_2 - R_1)^2$
นำผลการอินทิเกรตโมเมนต์เชิงมุม และโมเมนต์ตามแนวแกนที่ได้ มาแทนในสมการที่ (3.43) จะได้ตัวเลขการหมุนควงที่ไม่ขึ้นกับรัศมีทางออก [26] $S' = \frac{G_\phi}{G'_x R}$ $= \frac{G_\phi}{G'_x (R_2 - R_1)}$ $S' = \frac{2}{3} \left(\frac{\bar{W}_1}{U_1} \right)$	



รูปที่ 5.15 ขนาดช่องทางออกของอากาศทุติยภูมิ (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

วิธีการจำลองเชิงตัวเลข และวิธีการทดลอง

6.1 วิธีการจำลองเชิงตัวเลข

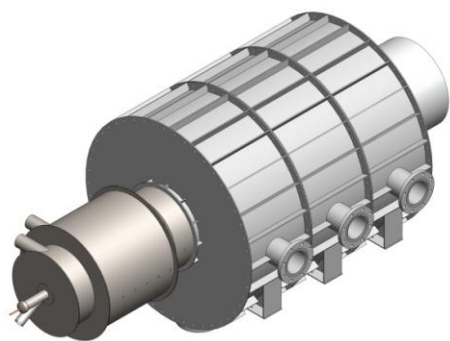
โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองคือ ANSYS Fluent ver.12.0 [15] ด้วยพิกัดทรงกระบอก 3 มิติ ในการจำลองจะเริ่มต้นจากการจำลองกรณีของซินิภัทรที่ใช้ตะแกรง 0.5 mm ซึ่งผลการทดลองของเขา พบว่าเมื่อปรับมุมของใบพัดของตัวสร้างการหมุนควงไว้ที่ 100° สามารถทำให้เปลวไฟเสถียรที่กำลังความร้อน 300 kW ที่อากาศส่วนเกินตามทฤษฎี 15% โดยเราจะเรียกว่ากรณีของซินิภัทร สำหรับกรณีต่างๆที่จะทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ จะเหมือนกันกับกรณีของซินิภัทรทุกประการ เพียงแต่จะเปลี่ยนขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงมาใช้อนุภาคที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm โดยแบ่งเป็น 4 กรณีได้แก่

1. กรณีพื้นฐาน คือกรณีที่ยังไม่ติดตั้งอุปกรณ์ใดๆเข้ากับระบบ ซึ่งก็คือกรณีเดิมของซินิภัทร แต่เป็นการเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm
2. กรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหล คือกรณีที่ทำกรติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลเข้ากับท่ออากาศปฐมภูมิ
3. กรณีติดตั้งแผ่นปิด คือกรณีที่ติดตั้งแผ่นปิดเข้ากับช่องทางออกของอากาศทุติยภูมิ
4. กรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด คือกรณีที่ติดตั้งทั้งข้อ 2 และ 3 ร่วมกัน

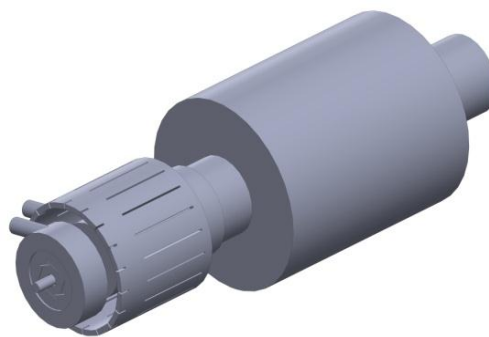
เมื่อเข้าใจนิยามของกรณีต่างๆแล้วหัวข้อย่อถัดไปจะเป็นการอธิบายโครงสร้างของระบบที่ใช้จำลองของกรณีต่างๆ

6.1.1 โครงสร้าง (geometry) ของระบบที่ใช้จำลองกรณีของซินิภัทร และกรณีพื้นฐาน (base case)

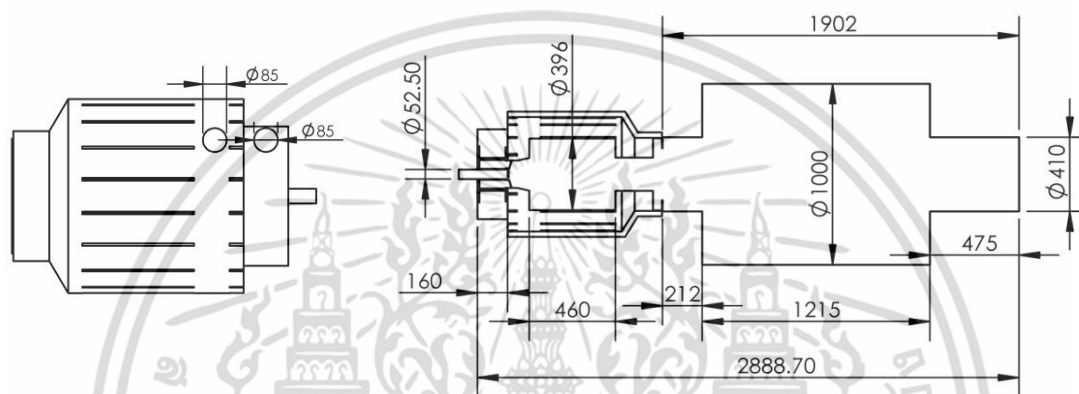
จากรูปที่ 5.1 ในกรอบเส้นปะ คือระบบที่นำมาใช้จำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น ซึ่งประกอบด้วย หัวเผา อากาศทั้งสามส่วน เตาเผา และช่องทางออก ระบบที่ใช้จำลองจะอ้างอิงขนาดจากอุปกรณ์จริงโดยทำการจำลองแบบ 3 มิติ โครงสร้างของอุปกรณ์จริงแสดงดังรูปที่ 6.1(ก) โครงสร้างและขนาดของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 6.1(ข) และ 6.1(ค) ตามลำดับ ซึ่งเป็นโครงสร้างของช่องไหลที่อยู่ภายใน (fluid domain) แบบจำลองกรณีของซินิภัทรที่ใช้ตะแกรง 0.5 mm และกรณีพื้นฐานจะไม่มีกรติดตั้งอุปกรณ์ใดๆเพิ่มเติมเข้ากับระบบ ซึ่งจะแตกต่างกันที่กรณีของซินิภัทร ใช้อนุภาคเชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 0.5 mm ส่วนกรณีพื้นฐานจะเป็นการใช้อนุภาคเชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm



(ก) โครงสร้างอุปกรณ์จริง



(ข) โครงสร้างในแบบจำลอง

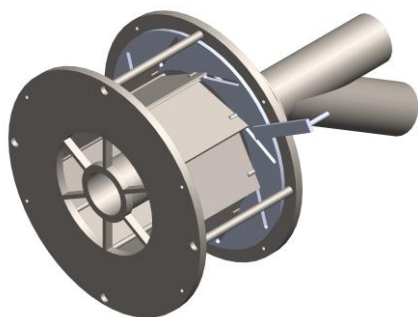


(ค) ขนาดโครงสร้างในแบบจำลอง (mm)

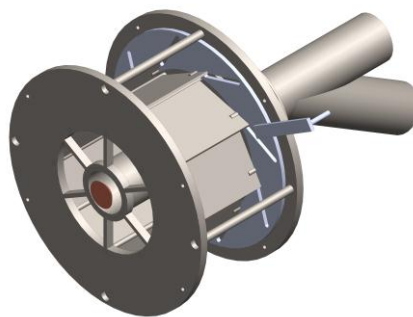
รูปที่ 6.1 โครงสร้างและขนาดของแบบจำลอง

6.1.2 โครงสร้างที่ใช้จำลองกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body) หรือ แผ่นปิด (swirl plate)

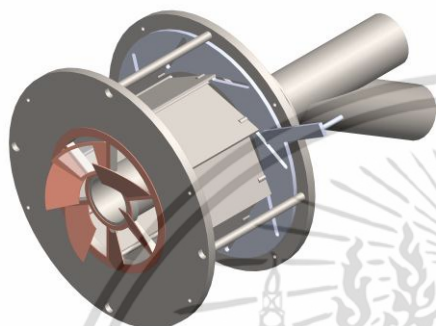
โครงสร้างที่ใช้จำลองกรณี ติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือแผ่นปิด จะเหมือนกันกับกรณีของซินกัทร์ และกรณีพื้นฐาน แต่จะติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลที่ช่องทางออกของท่ออากาศปฐมภูมิ หรือ ติดตั้งแผ่นปิดที่ช่องทางออกของกล่องลม และใช้เชื้อเพลิงที่ถูกกดผ่านตะแกรง 1 mm กรณีติดตั้งแบบต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 6.2



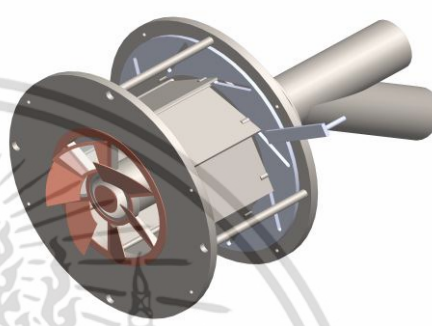
(ก) กรณีของซินภัทร (0.5mm) และกรณีพื้นฐาน



(ข) ติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล



(ค) ติดตั้งแผ่นปิด

(ง) ติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล
ร่วมกับแผ่นปิด

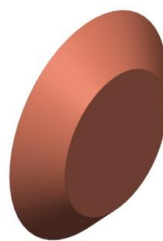
รูปที่ 6.2 โครงสร้างกรณีที่ใช้จำลองแบบต่างๆ

6.1.2.1 แผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body)

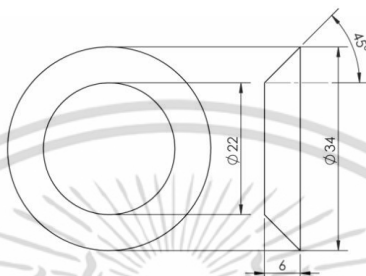
จากทฤษฎีในบทที่ 3 ถ้า blockage ratio เท่ากัน แผ่นขวางกั้นช่องการไหลรูปจานสามารถสร้างบริเวณที่เกิดกระแสไหลวน กว้างและยาวกว่าแผ่นรูปทรงอื่น และทำให้เกิดกระแสนย้อนกลับสูงกว่า วิทยานิพนธ์นี้จึงนำแผ่นขวางกั้นช่องการไหลมาใช้ ซึ่งนอกจากการกำหนดให้แผ่นขวางกั้นช่องการไหลเป็นรูปจาน เพื่อใช้ประโยชน์จากกระแสนย้อนกลับแล้ว แผ่นขวางกั้นช่องการไหลจะทำมุมเงยเท่ากับ 45° มุมนี้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Minghou Xu [6] และ Bing Liu [7] ที่ศึกษาการนำแผ่นขวางกั้นช่องการไหลมาใช้กับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น เพื่อให้อนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่เปียงเบนไปยังผนังของห้องเผาไหม้ช่วย ได้รับรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากผนัง และมีเวลาในการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้นานขึ้น ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะรวมกลุ่มกันอยู่ที่บริเวณ wake ของแผ่นขวางกั้นช่องการไหล สำหรับแผ่นรูปจานที่ใช้มีค่า blockage ratio เท่ากับ 0.42 โดยคำนวณจากสมการ (3.38) ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่านี้เป็นการศึกษาเนื่องจากมีค่าในระดับสูง ซึ่งรัศมีของแผ่นขวางกั้นช่องการไหลมีค่า 3 ใน 5 ของรัศมีท่ออากาศปฐมภูมิ ซึ่งหากเพิ่มให้มีค่าสูงกว่านี้ อาจเกิดการตันของท่อเชื้อเพลิง โครงสร้างและขนาดของแผ่นขวางกั้นช่องการไหลแสดงได้ดังรูปที่ 6.3



(ก) แผ่นขวางกั้นช่องการไหลที่ใช้ทดลองจริง



(ข) โครงสร้างจำลองแผ่นขวางกั้นช่องการไหล

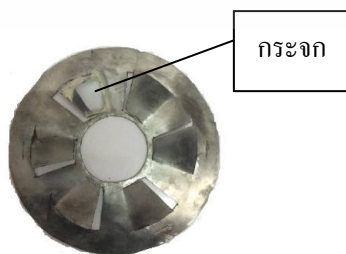
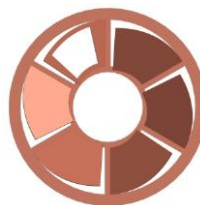


(ค) ขนาดของแผ่นขวางกั้นช่องการไหล (mm)

รูปที่ 6.3 โครงสร้างและขนาดของแผ่นขวางกั้นช่องการไหล

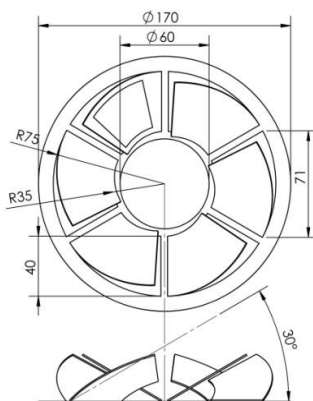
6.1.2.2 แผ่นบิด (swirl plate)

แผ่นบิดที่สร้างขึ้นมีลักษณะเหมือนกับ ตัวสร้างการหมุนควงตามแนวแกนตามทฤษฎี ในบทที่ 3 มีจำนวนแผ่นบิด 6 แผ่น เท่ากับช่องทางออกของกล่องลม และทำมุม 30° ตัวเลขการหมุนควงที่คำนวณจากโครงสร้างของแผ่นบิด โดยใช้สมการที่ (3.56) จะไม่ขึ้นกับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแต่ขึ้นอยู่กับมุมตรงข้าม ซึ่งกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 60° ซึ่งทำให้ตัวเลขการหมุนควงที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 1.16 ซึ่งอยู่ในย่านการหมุนควงอย่างเข้ม (strong swirl) ตามงานวิจัยของ Sung [2] ที่กำหนดมุมไว้ 60° เช่นเดียวกันเมื่อทำการทดลองพบว่าสามารถทำให้เปลวไฟของถ่านหินฝุ่นมีเสถียรภาพ ซึ่งตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold number) ของกรณีติดตั้งแผ่นบิดในวิทยานิพนธ์นี้จากตารางที่ 5.8 กับกรณีของ Sung [2] มีค่าเท่ากับ 43,625 และ 289 ตามลำดับ แต่จากงานวิจัยของ H.J. Sheen [26] พบว่าการเปลี่ยนตัวเลขเรย์โนลด์จะไม่มีผลมากนักต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวเลขการหมุนควง และการไหลหมุนควงจะมีความปั่นป่วนอิสระ โดยไม่ขึ้นกับตัวเลขเรย์โนลด์ [4] โครงสร้างของแผ่นบิดแสดงได้ดังรูปที่ 6.4

(ก) โครงสร้างแผ่นบิด
ที่ใช้ทดลองจริง

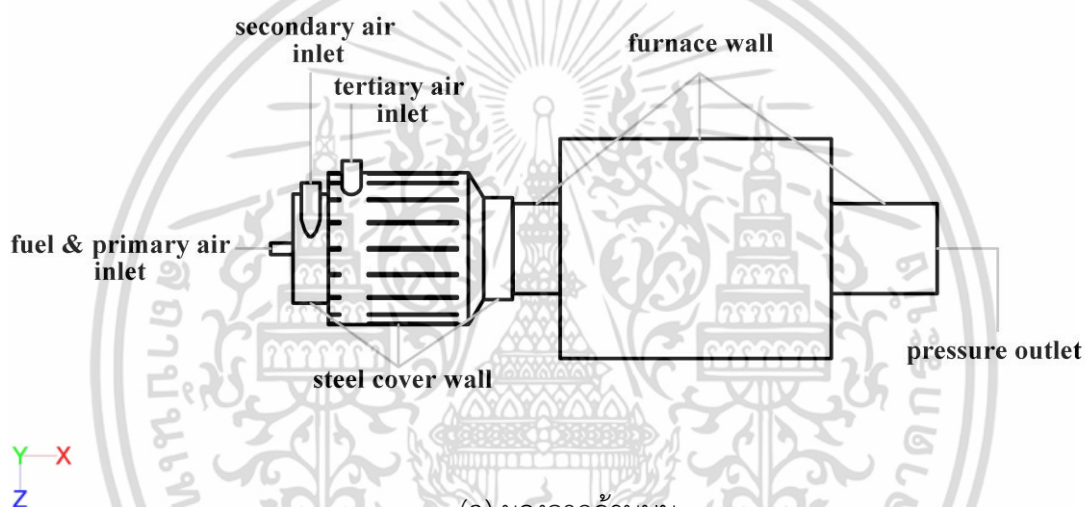
(ข) โครงสร้างจำลองแผ่นบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

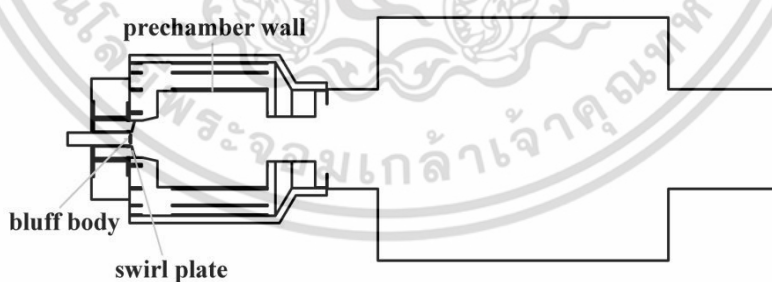


(ค) ขนาดของแผ่นบิด (mm)

รูปที่ 6.4 โครงสร้างและขนาดของแผ่นบิด



(ก) มองจากด้านบน



(ข) ภาพตัดแกนกลาง

รูปที่ 6.5 ขอบเขตของแบบจำลอง

6.1.3 ขอบเขตของการจำลอง (boundary condition)

จากรูปที่ 6.5 แสดงของเขตของระบบ การจำลองสมมติว่าผนังของห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber wall) เป็นผนังแบบ adiabatic สำหรับตัวแปรที่ต้องกำหนดให้กับระบบ ได้แก่

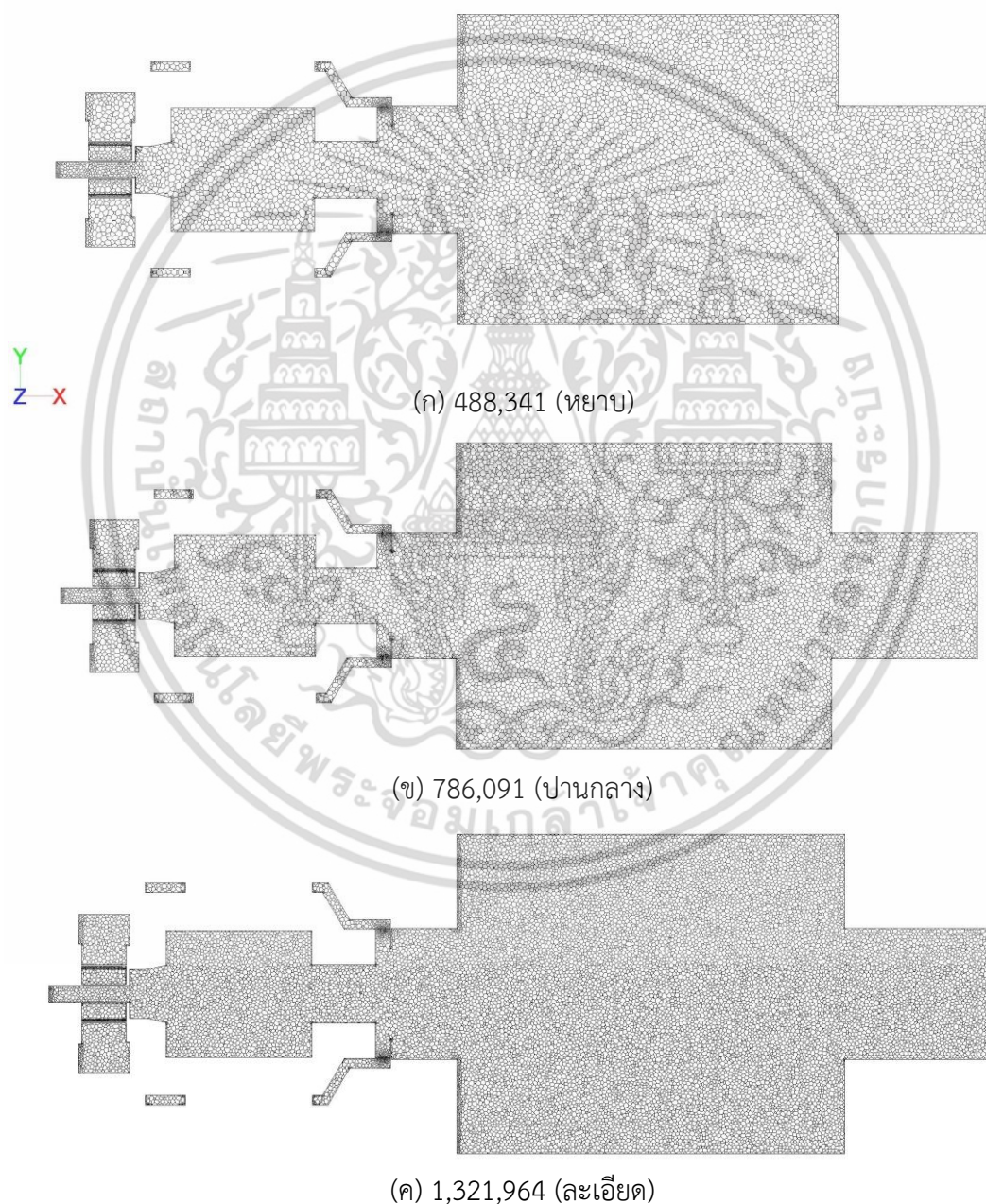
1. อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้งสามส่วน
3. อุณหภูมิที่ผนังของเตาเผา (furnace wall) และโครงเหล็กที่ห่อหุ้มหัวเผา (steel cover wall)
4. ความดันที่ท่อทางออก

6.1.4 โครงสร้างและจำนวนกริด (Geometry and mesh structure)

โครงสร้างกริดที่ใช้เป็นรูปทรง polyhedral แสดงดังรูปที่ 6.6 ทำการกำหนดจำนวนกริด 3 ขนาดได้แก่ 488,341 (หยาบ) 786,091 (ปานกลาง) และ 1,321,964 (ละเอียด) การหาความแตกต่างของผลลัพธ์เมื่อเลือกใช้จำนวนกริดแตกต่างกัน จะนำเสนอในบทที่ 7



รูปที่ 6.6 จำนวนกริดที่ใช้ในระบบ (ภาพตัดแกนกลาง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.5 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น จะทำการจำลองที่สภาวะคงตัว (steady state) ภายใต้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ 9.81 m/s^2 ในทิศทาง $-y$ และ อุณหภูมิเริ่มต้นของเชื้อเพลิงเท่ากับ 30°C (303K) องค์ประกอบของเชื้อเพลิง ค่าความร้อน และการกระจายขนาดของอนุภาค ดูได้ดังตารางที่ 5.2 และ 5.3 ตัวแปรต่างๆของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงได้ดังตารางด้านล่าง

ตารางที่ 6.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการปลดปล่อยสารระเหย [9]

แบบจำลองการปลดปล่อยสารระเหย	Single rate
Pre-Exponential factor	382,000
Activation Energy (J/kmol)	6.8×10^{-7}

ตารางที่ 6.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านชาร์ [9]

แบบจำลองการเผาไหม้ถ่านชาร์	Kinetics/diffusion-limited
Mass diffusion limited rate constant	1.25e-11
Kinetic-limited rate Pre-exponential factor	0.005
Kinetics-limited rate Activation energy (J/kmol)	7.9e+07
Shape factor	0.6
Swelling coefficient	1.1

ตารางที่ 6.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของเชื้อเพลิง [9]

Density (kg/m ³)	373
Specific heat (J/kg K)	2,310
Thermal conductivity (W/m K)	0.173
Latent heat (J/kg)	0
Vaporization temperature (K)	400
Volatile component fraction (%)	81.41
Binary diffusivity (m ² /s)	4×10^{-5}
Particle emissivity	0.9
Particle scattering factor	0.15
Swelling coefficient	1.1
Burnout stoichiometric ratio	1.332
Combustible fraction (%)	16.16
Heat of reaction for burnout (J/kg)	9,200,000
React. Heat fraction absorbed by solid (%)	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของน้ำ ในสถานะของเหลว [9]

Density (kg/m ³)	998.2
Specific heat (J/kg K)	4,182
Thermal conductivity (W/m K)	0.6
Latent heat (J/kg)	2263073
Vaporization temperature (K)	284
Boiling point (K)	373
Volatile component fraction (%)	100
Binary diffusivity (m ² /s)	3.05×10^{-5}
Saturation vapor pressure (Pa)	2658
Particle emissivity	1
Particle scattering factor	1
Heat of pyrolysis (J/kg)	0

6.2 วิธีการทดลอง

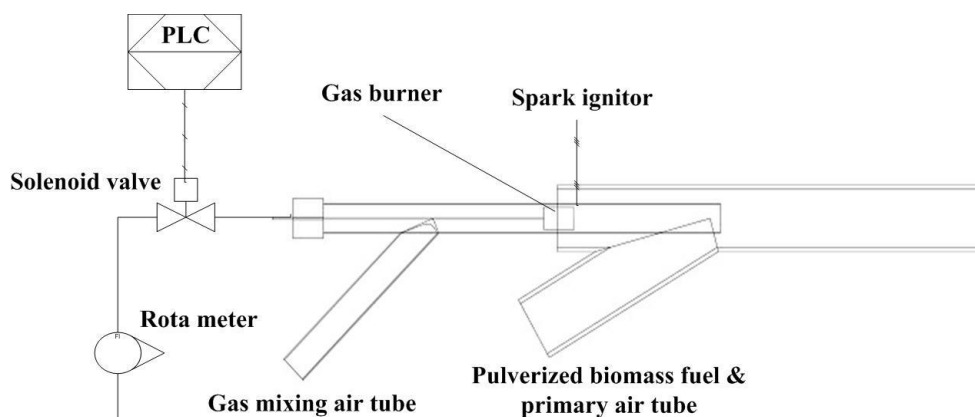
การทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 กรณีเหมือนกับการจำลอง ได้แก่กรณีพื้นฐาน กรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหล กรณีติดตั้งแผ่นบิต และ กรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิต วิธีการทดลองมีขั้นตอนหลักดังนี้

1. การเตรียมระบบ
2. การอุ่นห้องเผาไหม้ด้วยแก๊ส LPG
3. การอุ่นห้องเผาไหม้ด้วยแก๊ส LPG ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น
4. การเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศทั้งสามส่วน
5. การหยุดระบบแก๊สเพื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นอย่างเดียว
6. การบันทึกภาพ เก็บผลการวัดอุณหภูมิ และแก๊สไอเสีย

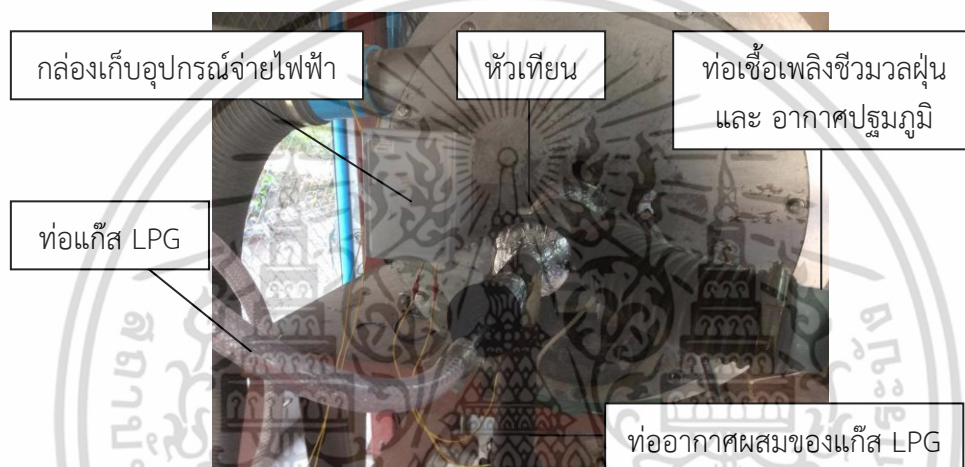
6.2.1 การเตรียมระบบ

ก่อนการทดลองการเผาไหม้ การเตรียมระบบและเครื่องมือวัดมีความสำคัญเพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดในการทดลอง ระบบที่ต้องเตรียมพร้อมก่อนการทดลองการเผาไหม้ ได้แก่

1. ระบบลำเลียงอากาศทั้งสามส่วน โดยพัดลมต้องทำงานปกติ วาล์วต้องทำงานได้ถูกต้องตามการเขียนโปรแกรม และข้อต่อต่างๆต้องไม่มีการรั่วไหลของอากาศ
2. ระบบบำบัด ต้องทำการตรวจสอบปั้มน้ำที่เกี่ยวข้องทุกตัวว่าทำงานปกติ ระบบไหลเวียนน้ำหล่อเย็น และน้ำบำบัด ต้องพร้อมก่อนทำการทดลองเผาไหม้
3. ระบบควบคุมแก๊ส และการจุดไฟ ระบบควบคุมแก๊ส LPG แสดงดังรูปที่ 6.7 ระบบจะต้องพร้อมต่อการเปิดหรือปิดแก๊ส
4. เปิดพัดลมดูด ID fan เพื่อสร้างความดันลบให้กับระบบก่อนการทดลอง



รูปที่ 6.7 แผนภาพระบบจุดและจ่ายแก๊ส LPG



รูปที่ 6.8 ระบบจุดและจ่ายแก๊ส LPG ที่ใช้ในการทดลอง

6.2.2 การอุ่นห้องเผาไหม้ช่วยด้วยแก๊ส LPG

ในการทดลองจะควบคุมการใช้แก๊สที่ 4 l/min ในการอุ่น จากรูปที่ 6.7 และ 6.8 เมื่อสั่งเปิดระบบจุดไฟ อุปกรณ์จ่ายไฟจะทำงานเพื่อจุดหัวเทียน จากนั้น solinoid valve จึงเปิดตามมา แก๊สที่ไหลผ่านประกายไฟจากหัวเทียนจะลุกติดในห้องเผาไหม้ ระยะเวลาการอุ่นแต่ละครั้งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ หรืออุณหภูมิที่ผนัง [25]

6.2.3 การอุ่นห้องเผาไหม้ช่วยด้วยแก๊ส LPG ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น

เพื่อให้ประหยัดต่อแก๊ส LPG ระบบถูกออกแบบให้สามารถใช้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น ช่วยในการอุ่นที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น 100 kW จากรูปที่ 6.8 เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวล และอากาศปฐมภูมิไหลผ่านเปลวไฟที่มาจากแก๊ส เชื้อเพลิงจะเริ่มติดเป็นสะเก็ดไฟ เมื่ออุณหภูมิที่ผนังและห้องเผาไหม้สูงพอ สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคมีความเข้มข้นสูงขึ้น เปลวไฟจึงลุกติด

6.2.4 การเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศทั้งสามส่วน

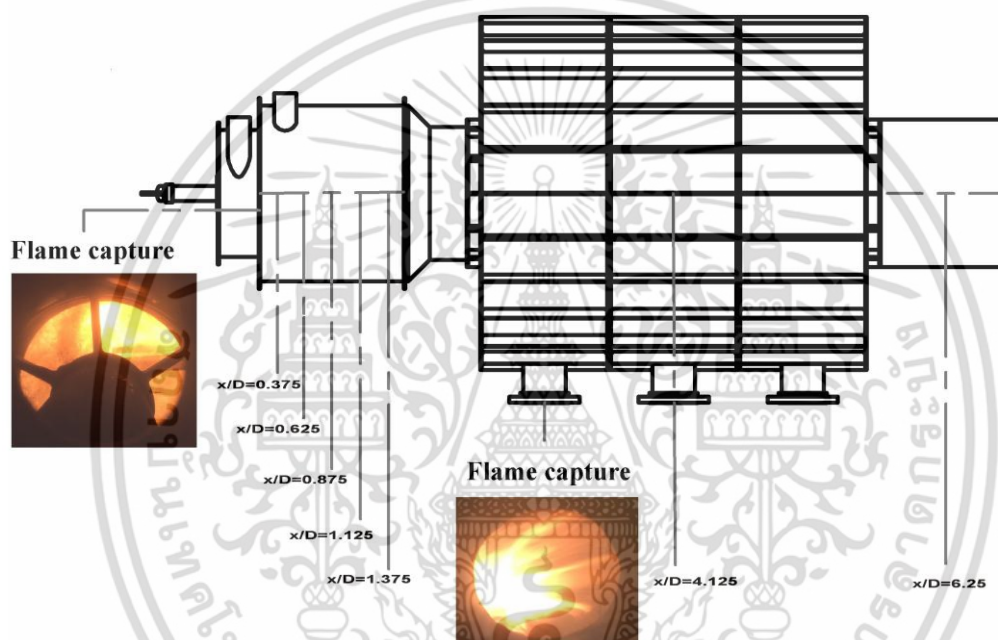
เป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องจาก การอุ่นห้องเผาไหม้ช่วยด้วยแก๊ส LPG ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น เมื่อเปลวไฟลุกติดจนห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงสามารถเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิงถึงขั้นตอนนี้ จะเริ่มใช้อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิ ด้วยอัตราการไหลเทียบเท่ากับเปอร์เซ็นต์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศส่วนเกินตามทฤษฎีที่คำนวณจากอัตราการไหลเชื้อเพลิงในขณะนั้น การเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิง จะเพิ่มขึ้นครึ่งละเทียบเท่ากับกำลังความร้อนที่ 100 kW

6.2.5 การหยุดระบบแก๊สเพื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นอย่างเดียว

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิง จนเทียบเท่า 300 kW จึงทำการหยุดระบบแก๊สเพื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นเพียงอย่างเดียว หลังจากแก๊สดับจนอุณหภูมิของระบบคงที่ในแต่ละกรณีของการทดลอง ถ้าเปลวไฟเสถียรแล้วเชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง จึงทำการเก็บผลการวัดอุณหภูมิ และแก๊สไอเสีย (flue gas) ที่ทางออกได้

6.2.6 การบันทึกภาพ การวัดอุณหภูมิ และแก๊สไอเสีย

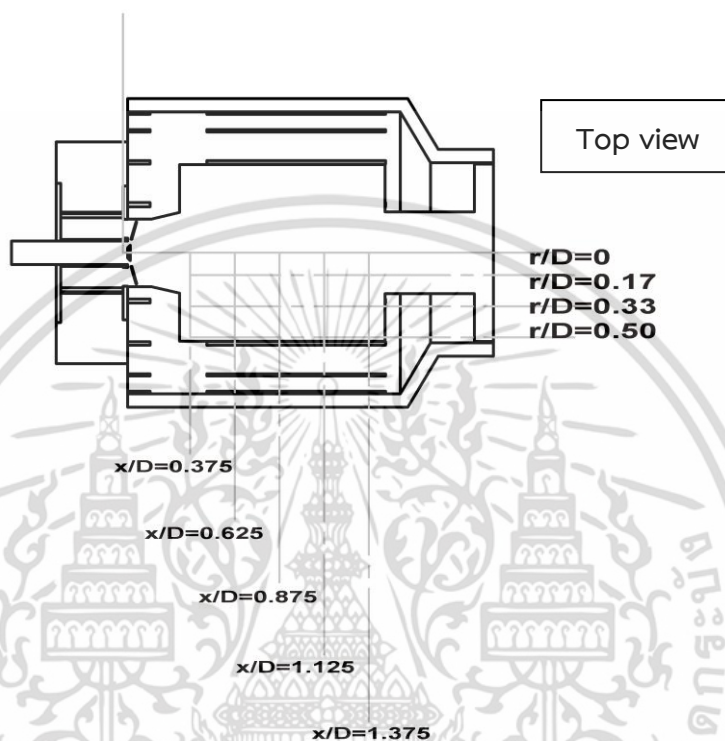


รูปที่ 6.9 จุดบันทึกภาพเปลวไฟ ตำแหน่งวัดอุณหภูมิตามแกนกลาง และแก๊สไอเสีย

จากรูปที่ 6.9 บริเวณที่ทำการบันทึกภาพมีสองจุด จุดที่หนึ่งอยู่ที่ด้านหลังของหัวเผา ซึ่งจะมองเห็นปรากฏการณ์ภายในห้องเผาไหม้ช่วย จุดที่สองอยู่ที่ส่วนต้นของเตาเผาสามารถสังเกตเห็นความยาวของเปลวไฟ การวัดอุณหภูมิตามแนวแกนจะวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K และแสดงผลด้วยเครื่องแสดงผล YOKOGAWA รุ่น XL 100 ดังรูปที่ 6.10 อุณหภูมิถูกวัดทั้งหมด 7 จุดตามแนวแกนที่ตำแหน่ง x/D ต่างๆ เมื่อ x คือตำแหน่งตามแนวแกน และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ ($D=0.4\text{m}$) นอกจากนี้จะทำการวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี r/D ภายในห้องเผาไหม้ เมื่อ r คือตำแหน่งตามแนวรัศมีภายในห้องเผาไหม้ และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ ($D=0.4\text{m}$) ตำแหน่งการวัดแสดงได้ดังรูปที่ 6.11 ในส่วนของการวัดแก๊สไอเสียจะวัดที่บริเวณ $x/D=6.25$ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย Testo รุ่น 350 XL แสดงดังรูป 6.12



รูปที่ 6.10 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K และเครื่องแสดงผล YOKOGAWA XL 100



รูปที่ 6.11 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย



รูปที่ 6.12 เครื่องวัดแก๊สไอเสีย Testo รุ่น 350 XL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

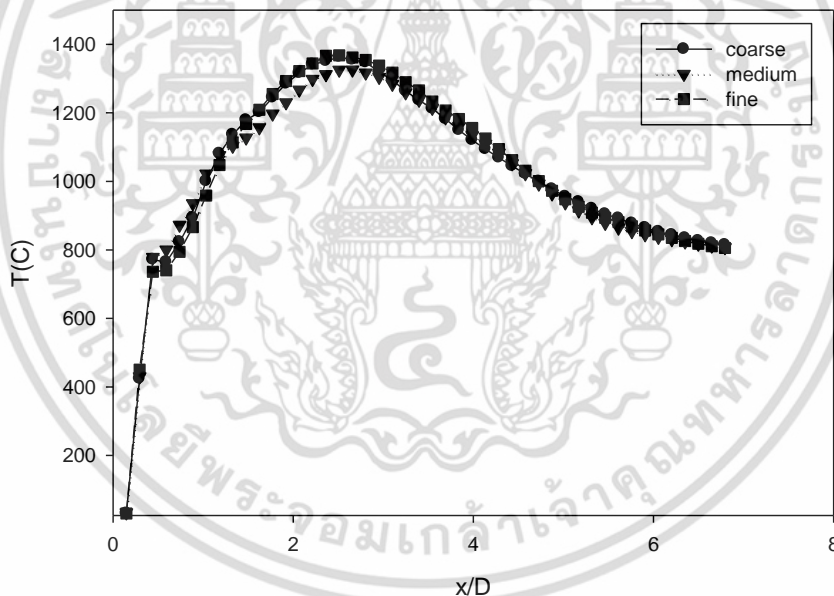
บทที่ 7

ผลการจำลองเชิงตัวเลข ผลการทดลอง และการอภิปราย

บทนี้จะนำเสนอผลการจำลองเชิงตัวเลขของกรณีต่างๆ ควบคู่กับผลการทดลองที่ได้ และการอภิปรายผล

7.1 การเลือกใช้จำนวนกริดที่เหมาะสม

จากหัวข้อที่ 6.1.4 ได้ทำการกำหนดจำนวนกริดไว้ที่ 488,341 786,091 และ 1,321,964 ตามลำดับ ทำการเลือกกรณีพื้นฐาน เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ เมื่อนำจำนวนกริดทั้ง 3 มาทำการเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 7.1 แสดงให้เห็นว่า การเลือกใช้จำนวนกริดทั้ง 3 ขนาด ให้ผลลัพธ์แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้มีโครงสร้างการจำลองหลายแบบ หากใช้กริดหยาบอาจจะให้ผลลัพธ์ไม่ดีในบางกรณี การจำลองกรณีต่างๆจึงเลือกใช้จำนวนกริดที่ประมาณ 800,000 เพราะมีความละเอียดอยู่ในระดับปานกลาง และใช้เวลาในการคำนวณเร็วกว่า 1,000,000 กริด



รูปที่ 7.1 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนกรณีพื้นฐานเมื่อเลือกใช้จำนวนกริดแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 กรณีของซินกัทร์ และกรณีพื้นฐาน (Base case)

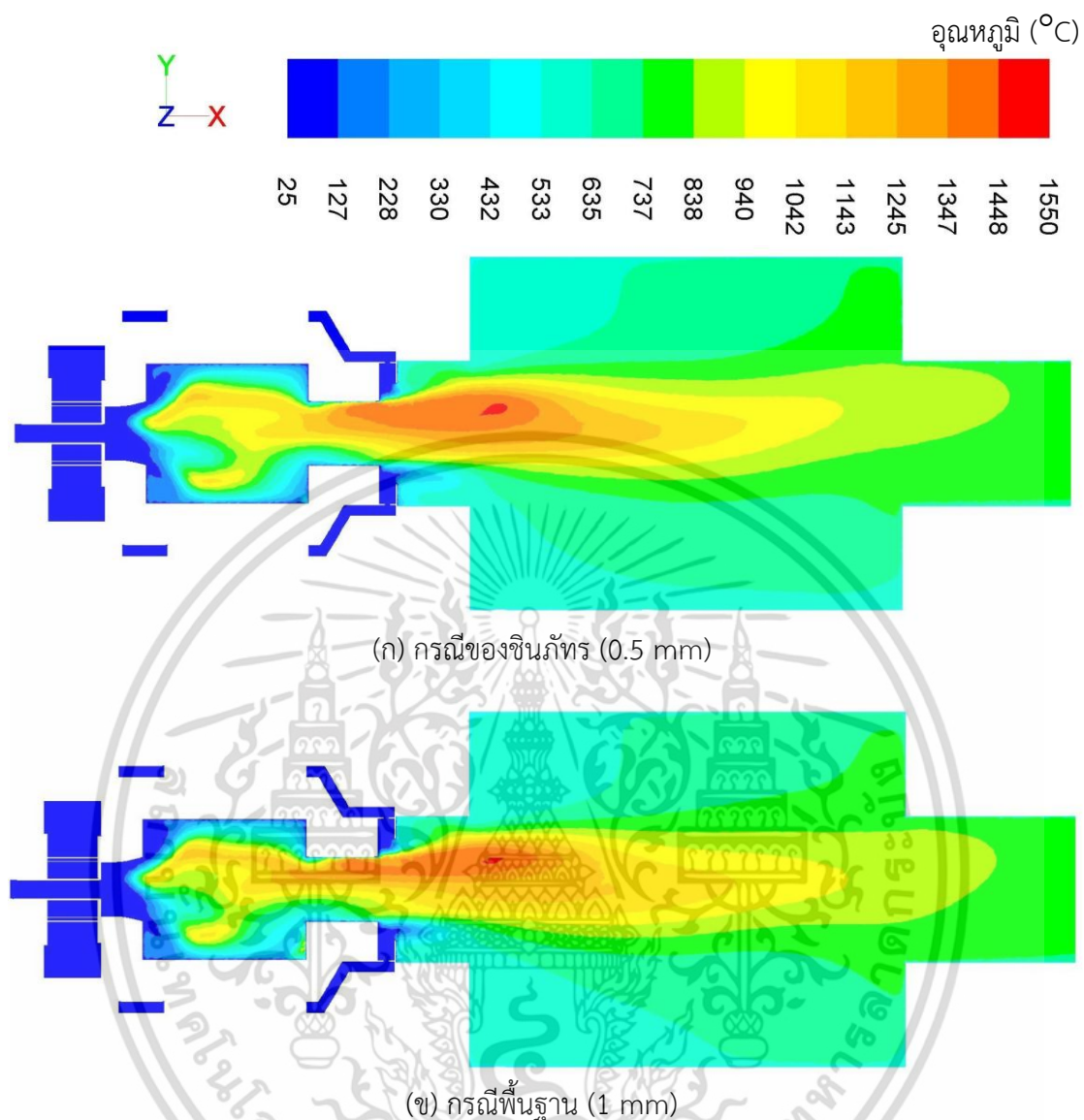
กรณีของซินกัทร์ และกรณีพื้นฐาน จะนำเสนอผลการจำลองการเผาไหม้ เปรียบเทียบระหว่างการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่บดผ่านตะแกรง 0.5 mm กับ 1 mm ในส่วนการทดลองการเผาไหม้ จะใช้เชื้อเพลิงที่บดผ่านตะแกรง 1 mm เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีของ ซินกัทร์ ธูการ [1] ที่ตะแกรง 0.5 mm จากรูปที่ 6.2 (ก) แสดงโครงสร้างของกรณีพื้นฐาน ที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ใดๆเพิ่มเติม เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้จำลองแสดงได้ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 เงื่อนไขขอบเขตการจำลองของกรณีพื้นฐาน

อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเทียบเท่ากำลังความร้อน 300kW (kg/s)	0.0186
อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (kg/s)	0.017
อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (kg/s)	0.075
อัตราการไหลของอากาศตติยภูมิ (kg/s)	0.023
อุณหภูมิเริ่มต้นของอากาศทั้งสามส่วน (K)	303
อุณหภูมิเริ่มต้นของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น (K)	303
อุณหภูมิของผนังเตา (K)	773
ความดันที่ท่อทางออก (Pa)	-1500

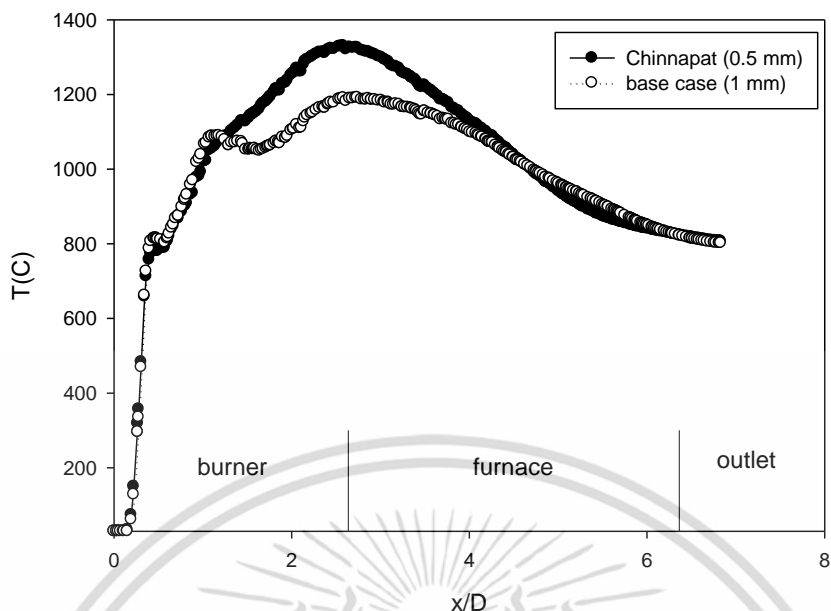
7.2.1 ผลการจำลองกรณีของซินกัทร์ และกรณีพื้นฐาน

ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ และ กราฟผลการจำลองอุณหภูมิตามแนวแกนกลางของระบบ แสดงดังรูปที่ 7.2 และ 7.3 ตามลำดับ จะเห็นว่ากรณีของซินกัทร์ที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่บดผ่านตะแกรง 0.5 mm การเผาไหม้มีการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย และเตาเผาสูงกว่ากรณีพื้นฐานที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่บดผ่านตะแกรง 1 mm ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการปลดปล่อยสารระเหยภายในห้องเผาไหม้ช่วยดังรูปที่ 7.4 โดยกรณีของซินกัทร์ (0.5 mm) จะมีสัดส่วนการปลดปล่อยสารระเหยสูงกว่ากรณีพื้นฐาน (1 mm) นอกจากนี้ ยังมีการกองของเชื้อเพลิงที่มุมด้านล่างของห้องเผาไหม้ช่วยน้อยกว่า ซึ่งสังเกตได้จากผลการจำลองสัดส่วนของออกซิเจนในห้องเผาไหม้ช่วยดังรูปที่ 7.5 (ข) กรณีของซินกัทร์ มีสัดส่วนของออกซิเจนในห้องเผาไหม้ช่วยต่ำกว่ากรณีพื้นฐาน แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 0.5 mm จะมีสัดส่วนของออกซิเจนที่ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงสูงกว่า ถ้าพิจารณาเส้นทางเดินของอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุด ดังรูปที่ 7.6 พบว่าทั้งสองกรณี ลำของเชื้อเพลิงจะเลี้ยวเบนลงตามแรงโน้มถ่วง ไปปะทะกับผนังด้านล่างของห้องเผาไหม้ช่วยบริเวณที่เกิดการกองของเชื้อเพลิง แต่ในกรณีเชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 0.5 mm อนุภาคจะมีการพุ่งกระจายไปที่ผนังของห้องเผาไหม้ช่วยมากกว่า ซึ่งเป็นผลดีเพราะอนุภาคจะได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีของผนังห้องเผาไหม้ช่วย และมีระยะเวลาในการเผาไหม้นานขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีพื้นฐานที่ใช้เชื้อเพลิงที่บดผ่านตะแกรง 1 mm

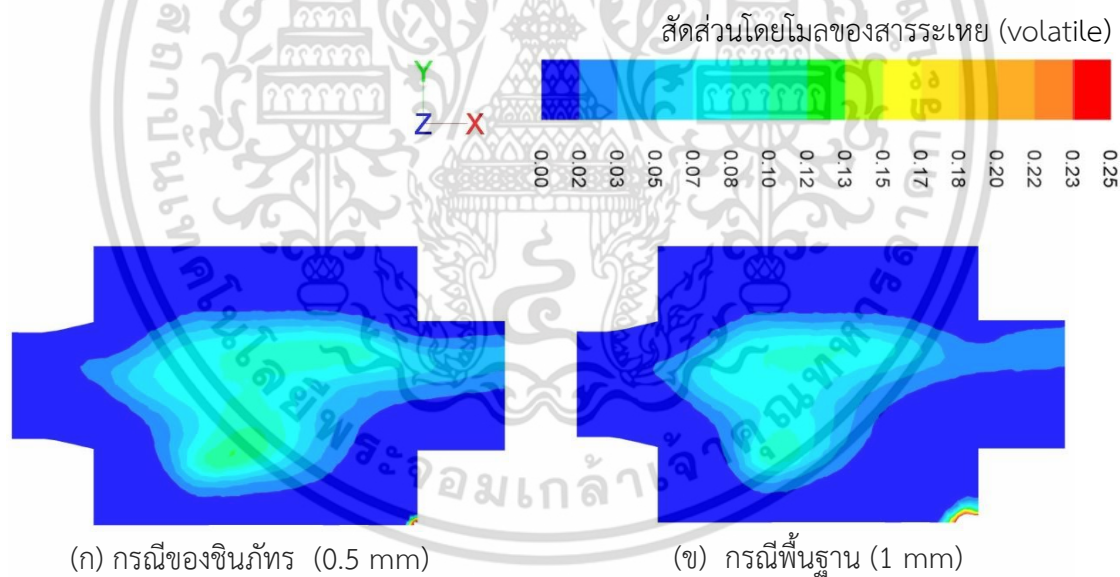


รูปที่ 7.2 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ กรณีของชินภัทร (0.5 mm) และกรณีพื้นฐาน (1 mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.3 กราฟผลการจำลองอุณหภูมิตามแนวแกนกลางของระบบ กรณีของซินภัท (0.5 mm) และกรณีพื้นฐาน (1 mm)

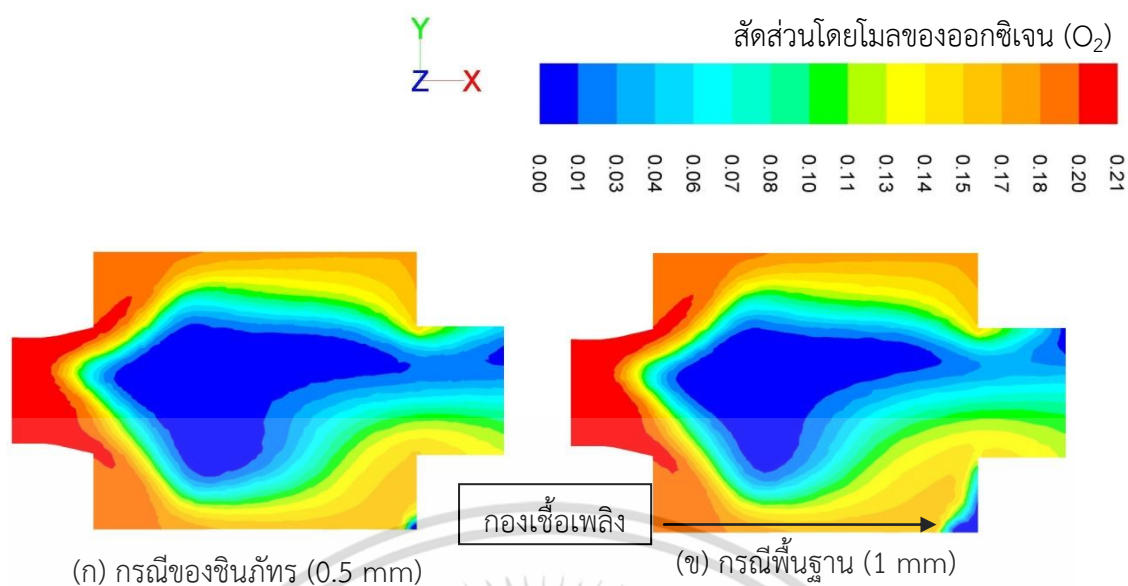


(ก) กรณีของซินภัท (0.5 mm)

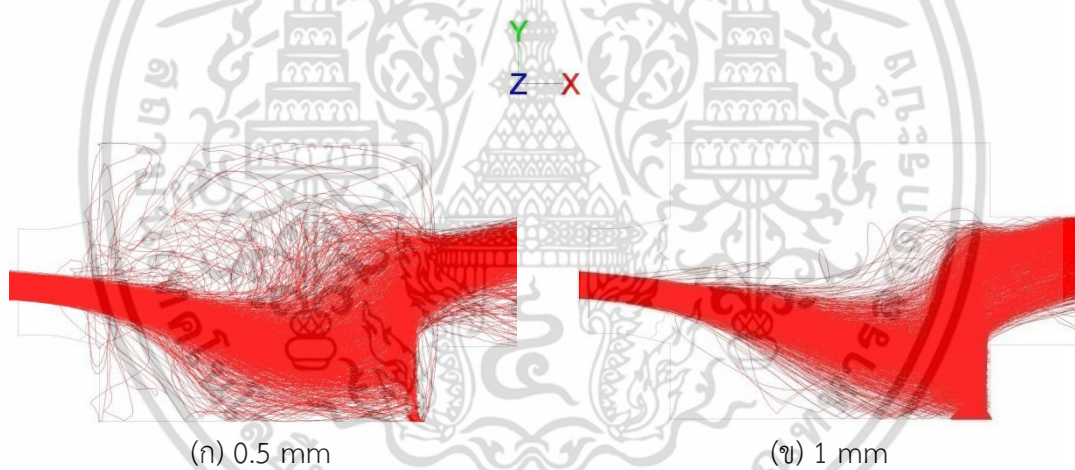
(ข) กรณีพื้นฐาน (1 mm)

รูปที่ 7.4 ผลการจำลองการปลดปล่อยสารระเหยภายในห้องเผาไหม้ช่วย กรณีของซินภัท (0.5 mm) และกรณีพื้นฐาน (1 mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.5 ผลการจำลองสัดส่วนของออกซิเจนในห้องเผาไหม้ช่วย กรณีของชินภัทร (0.5 mm) และ กรณีพื้นฐาน (1 mm)



รูปที่ 7.6 ผลการจำลองเส้นทางเดินของอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุด กรณีของชินภัทร (0.5 mm) และ กรณีพื้นฐาน (1 mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.2 ผลการทดลองกรณีพื้นฐาน

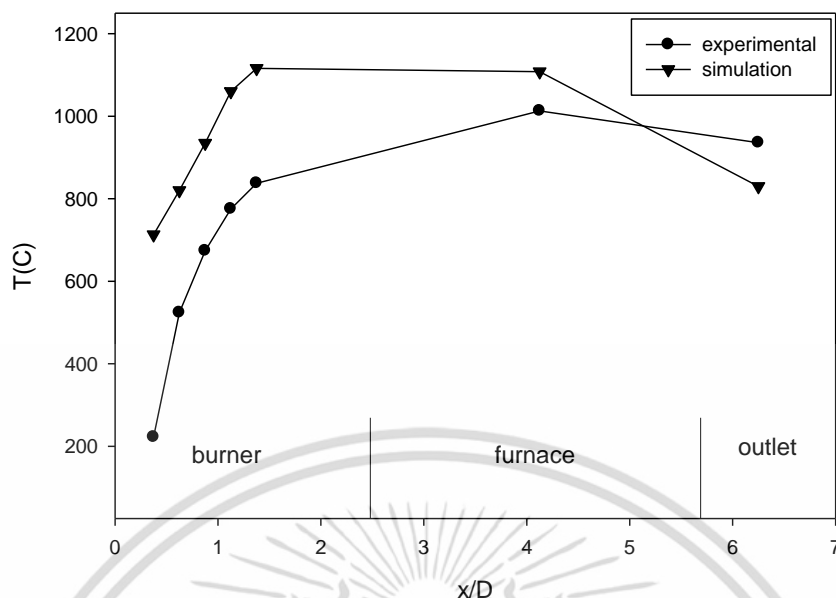
ผลการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นกรณีของซินภัทร (0.5 mm) [1] และ กรณีพื้นฐาน (1 mm) แสดงได้ดังรูปที่ 7.7(ก) และ 7.7(ข) ตามลำดับ โดยการทดลองของซินภัทร พบว่าเมื่อหยุดการใช้แก๊ส LPG เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นยังคงเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง รูปที่ 7.7 (ก) ถ่ายเมื่อทำการหยุดการใช้แก๊ส LPG แล้ว ในขณะที่การทดลองกรณีพื้นฐาน เมื่อหยุดการใช้แก๊ส LPG แล้วทำให้เปลวไฟค่อยๆดับ รูปที่ 7.7(ข) ถ่ายในขณะที่ใช้แก๊ส LPG ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น จะสังเกตเห็นว่าแม้จะใช้แก๊ส LPG ช่วยในการเผาไหม้แล้ว แต่อุณหภูมิบางส่วนยังคงเป็นสะเก็ดไฟที่ไม่ลุกติดไฟเหมือนกรณีของซินภัทร สอดคล้องกับผลการจำลองการปลดปล่อยสารระเหยในห้องเผาไหม้ช่วย และการกระจายอนุภาคน้ำมัน ซึ่งกรณีพื้นฐาน มีสัดส่วนการปลดปล่อยสารระเหยและการกระจายอนุภาคน้ำมันที่ต่ำกว่ากรณีของซินภัทร ในการทดลองของทั้งสองกรณี พบว่าฝุ่นของอนุภาคเชื้อเพลิงพุ่งไปที่ด้านหน้าด้วยความเร็วสูง เนื่องจากอิทธิพลของอากาศปฐมภูมิ กรณีของซินภัทรที่ใช้ตะแกรง 0.5 mm อนุภาคมีขนาดเล็ก จึงใช้เวลาในการลุกติดไฟเร็วกว่า กรณีพื้นฐานที่ใช้ตะแกรง 1 mm รวมถึงมีการพุ่งกระจายไปที่ผนังของห้องเผาไหม้ช่วยมากกว่า เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ทำให้ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีของผนังมากกว่า และมีกระแสนวนกลับของแก๊สร้อน การทดลองจึงพบว่าเปลวไฟยังคงเสถียรหลังดับแก๊ส LPG ส่วนกรณีใช้พื้นฐานเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่ กระแสนวนกลับไม่สามารถเอาชนะอิทธิพลของอากาศปฐมภูมิ กลุ่มของอนุภาคเชื้อเพลิงจากผลการจำลองดังรูปที่ 7.6(ข) จึงไม่มีการพุ่งกระจายไปที่ผนังของห้องเผาไหม้ช่วย ดังนั้นเมื่อหยุดการใช้แก๊ส LPG เปลวไฟจึงเริ่มดับ นอกจากนี้ในการทดลองยังพบกองเชื้อเพลิงที่ปะทะกับผนังด้านล่างของห้องเผาไหม้ช่วย ที่บริเวณเดียวกัน กับผลการจำลอง การที่ผลจำลองเส้นทางเดินอนุภาคมีการเลี้ยวเบนลง เนื่องจากในแบบจำลองกำหนดค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ($g=9.81 \text{ m/s}^2$) ในทิศ $-y$

จะเห็นว่าการเปลี่ยนมาใช้อนุภาคเชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm ของกรณีพื้นฐาน ไม่สามารถทำการเผาไหม้ได้ จึงต้องมีการปรับปรุงอิทธิพลของการไหลหมุนควงให้รุนแรงขึ้น หรือทำให้ลำของอนุภาคที่มากับอากาศปฐมภูมิ มีความเร็วลดลง อาจต้องติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือแผ่นปิด ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อที่ 7.3



(ก) กรณีของซินภัทร (0.5 mm) (ถ่ายจากช่อง ด้านบน) [1] (ข) กรณีพื้นฐาน (1 mm) (ถ่ายจากช่องด้านล่าง)

รูปที่ 7.7 ภาพถ่ายการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น กรณีของซินภัทร (0.5 mm) และกรณีพื้นฐาน (1 mm)



รูปที่ 7.8 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง
กรณีของซินภัทร [1]

7.2.3 การอภิปรายผลการจำลอง และการทดลองกรณีของซินภัทร และกรณีพื้นฐาน

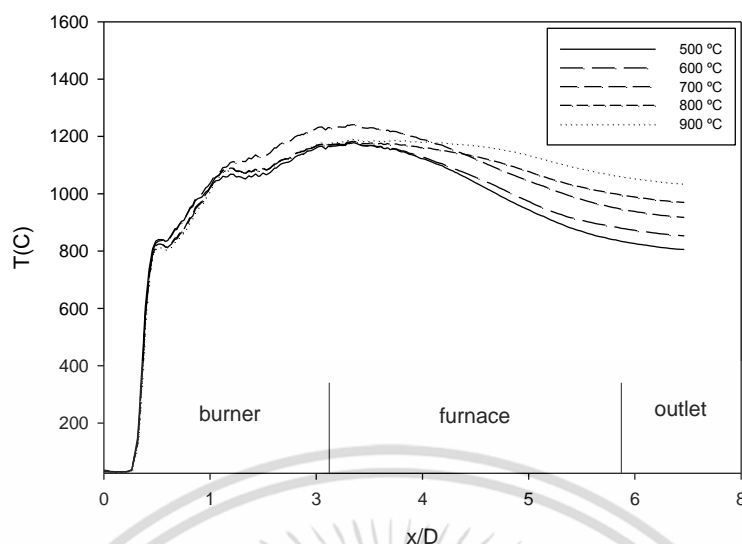
จากรูปที่ 7.8 จะเห็นว่าอุณหภูมิจากผลการจำลองมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองสูง โดยเฉพาะบริเวณภายในห้องเผาไหม้ช่วย แต่แนวโน้มของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ตามตำแหน่งในห้องเผาไหม้ช่วย เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลอง ซึ่งความคลาดเคลื่อนอาจเกิดได้หลายปัจจัย เช่น ความถูกต้องของแบบจำลอง หรือความแม่นยำของเครื่องมือวัดในการทดลอง แต่จากผลการจำลองที่ได้ ก็เป็นที่น่าพอใจเพราะเมื่อทำการทดลองแล้ว ได้สังเกตเห็นปรากฏการณ์หลายอย่างที่สอดคล้องกัน ได้แก่ กองเชื้อเพลิง เปลวไฟที่ดับเมื่อใช้เชื้อเพลิงที่บิดผ่านตะแกรง 1 mm (กรณีพื้นฐาน) ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองเส้นทางเดินของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีการฟุ้งกระจายไปที่ผนังน้อยมาก การปลดปล่อยสารระเหยในระดับต่ำ และการกระจายอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ในขณะที่เมื่อใช้เชื้อเพลิงที่บิดผ่านตะแกรง 0.5 mm (กรณีของซินภัทร) เปลวไฟมีความเสถียร แต่หากเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิง และอากาศเทียบเท่ากับกำลังความร้อนที่สูงกว่า 300 kW เปลวไฟอาจดับได้เนื่องจากอิทธิพลของความเร็วสูงจากอากาศปฐมภูมิ และกระแสไหลย้อนกลับจากอากาศทุติยภูมิไม่เพียงพอ ทำให้เชื้อเพลิงมีระยะเวลาในการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ช่วยไม่เพียงพอ

7.3 กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body) หรือแผ่นบิด (swirl plate)

จากหัวข้อที่ 7.2 เราได้ทราบว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น กรณีพื้นฐาน ที่เชื้อเพลิงถูกกดผ่านตะแกรง 1 mm ไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟได้ ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการจำลองที่ได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้ จะทำการจำลองกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือแผ่นบิด ซึ่งได้อธิบายถึงคุณสมบัติ และข้อดี ในบทที่ผ่านมา โดยจะใช้เชื้อเพลิงที่ถูกกดผ่านตะแกรง 1 mm เช่นเดียวกันกับกรณีพื้นฐาน จากรูปที่ 6.2 โครงสร้างที่ใช้จำลอง แบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล กรณีติดตั้งแผ่นบิด และ กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิด เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้จำลองแสดงได้ดังตารางที่ 7.2 จะเห็นว่าค่าต่างๆเหมือนกับการจำลองกรณีพื้นฐาน ยกเว้นอุณหภูมิที่ผนังเตา โดยกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิด จะใช้อุณหภูมิผนังเตา ประมาณ 900°C เนื่องจาก พบว่าที่อุณหภูมินี้ทำให้ผลการจำลอง บริเวณเตาเผาและท่อทางออก ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าที่อุณหภูมิ 500°C การที่กำหนดอุณหภูมิแตกต่างกันนี้ ไม่ทำให้ผลการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ช่วยของทุกกรณีเปลี่ยน พิจารณาได้จากรูปที่ 7.9 ระยะของห้องเผาไหม้ช่วย $x/D=0.375-1.375$ บริเวณนี้มีอุณหภูมิตามแนวแกนไม่แตกต่างกันมาก เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิที่ผนังตั้งแต่ $500-900^{\circ}\text{C}$ จากการจำลองจะพบว่า เงื่อนไขทางเข้ามีผลต่อปรากฏการณ์ในห้องเผาไหม้ช่วยมากกว่าอุณหภูมิของเตาเผาที่มีผลกระทบเพียงปรากฏการณ์ช่วงเตาเผาและท่อทางออก ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้พิจารณา ปรากฏการณ์ในห้องเผาไหม้ช่วยมากกว่า

ตารางที่ 7.2 เงื่อนไขขอบเขตการจำลองของกรณี ติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือแผ่นบิด

อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเทียบเท่ากำลังความร้อน 300kW (kg/s)	0.0186
อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (kg/s)	0.017
อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (kg/s)	0.075
อัตราการไหลของอากาศตติยภูมิ (kg/s)	0.023
อุณหภูมิเริ่มต้นของอากาศทั้งสามส่วน (K)	303
อุณหภูมิเริ่มต้นของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น (K)	303
อุณหภูมิของผนังเตา (K) ของกรณีติดตั้งแผ่นบิด	773
อุณหภูมิของผนังเตา (K) ของกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิด	1173
ความดันที่ท่อทางออก (Pa)	-1500



รูปที่ 7.9 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองอุณหภูมิตามแนวแกน เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิผนังเตา 500 -900 °C

7.3.1 ผลการจำลอง กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือ แผ่นปิด

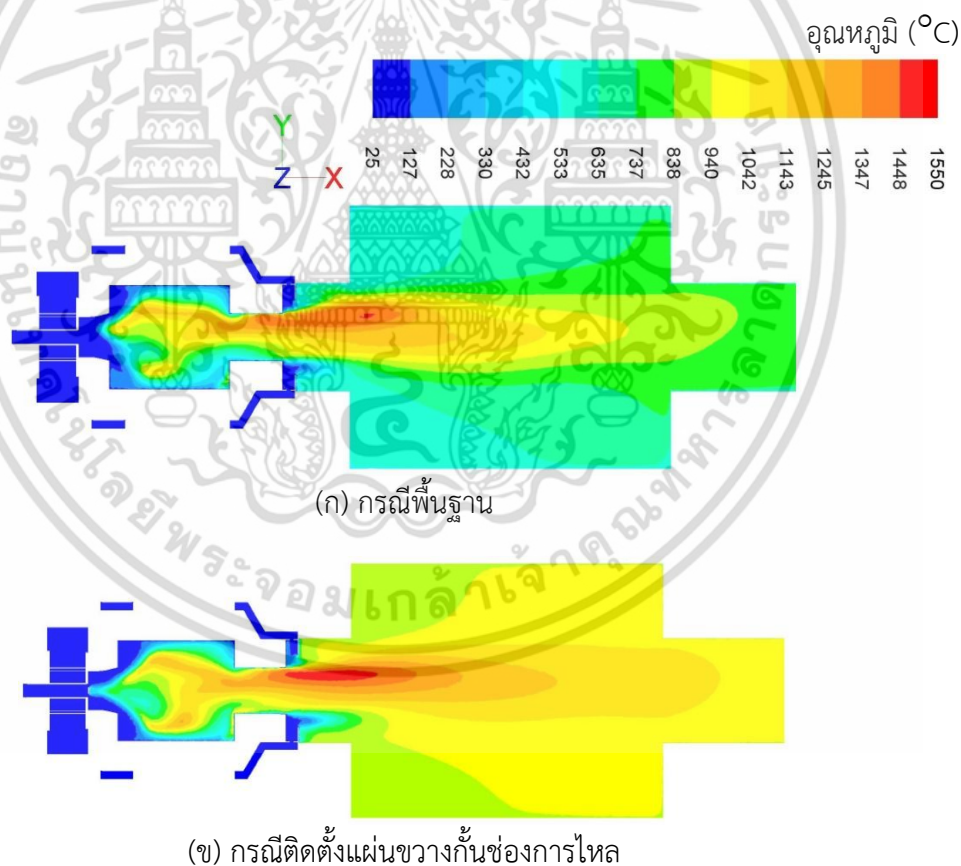
พิจารณาผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ และกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนควบคู่กัน ของกรณีต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 7.10 และ 7.11 ตามลำดับ พบว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล มีแนวโน้มให้อุณหภูมิภายในบริเวณห้องเผาไหม้ช่วย สูงกว่าทุกกรณี รองลงมาคือกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด ซึ่งทั้งคู่มีการกระจายอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน แต่กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลนั้น ให้อุณหภูมิสูงขึ้นตั้งแต่บริเวณ wake และให้อุณหภูมิสูงรองลงมาคือกรณีพื้นฐานและสุดท้ายคือกรณีติดตั้งแผ่นปิด เมื่อพิจารณาผลการจำลองการปลดปล่อยสารระเหยในห้องเผาไหม้ช่วย ดังรูปที่ 7.12 พบว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล กับกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิดนั้น มีความเข้มข้นของสารระเหยสูง คลอบคลุมพื้นที่มากกว่ากรณีติดตั้งแผ่นปิด และกรณีพื้นฐาน รวมถึง การปลดปล่อยสารระเหยนั้นเกิดขึ้นเร็วกว่า พิจารณาได้จากความเข้มข้นของสารระเหย ที่เริ่มก่อตัวตั้งแต่ส่วนต้นของห้องเผาไหม้ช่วย ในขณะที่กรณีติดตั้งแผ่นปิด และกรณีพื้นฐาน มีความเข้มข้นของสารระเหยในห้องเผาไหม้ช่วยในระดับใกล้เคียงกัน ซึ่งการทดลองกรณีพื้นฐานในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าเปลวไฟจะค่อยๆดับขณะหยุดการใช้แก๊ส LPG ดังนั้นเมื่อประเมินผลการจำลองเทียบกับผลการทดลองแล้ว อาจกล่าวได้ว่า กรณีติดตั้งแผ่นปิดอาจเกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกันกับกรณีพื้นฐาน นั่นคือจะมีปัญหาด้านเสถียรภาพของเปลวไฟได้

หากพิจารณาผลการจำลองสัดส่วนของออกซิเจนในห้องเผาไหม้ช่วยดังรูปที่ 7.13 พบว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด ทำให้เกิดบริเวณที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำมากกว่า ทั้งของกรณีพื้นฐานและกรณีติดตั้งแผ่นปิดอย่างเดียว ซึ่งบ่งบอกว่าเชื้อเพลิงกับออกซิเจนมีการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ออกซิเจนจะเริ่มทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงตั้งแต่บริเวณ wake ของแผ่น ซึ่งเป็นบริเวณที่มีกระแสไหลวนเกิดขึ้น บริเวณนี้จะมีกระแสย้อนกลับ ซึ่งทำให้เกิดความเร็วต่ำในห้องเผาไหม้ช่วย พิจารณาผลการจำลองการกระจายความเร็วในห้องเผาไหม้ช่วย ดังรูปที่ 7.14 กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด ทำให้

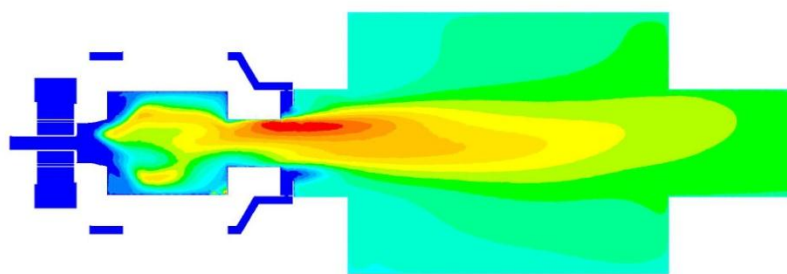
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดบริเวณที่มีความเร็วต่ำในห้องเผาไหม้ช่วย คลอบคลุมบริเวณกว้างกว่ากรณีพื้นฐาน และกรณีติดตั้งแผ่นบิต เมื่อพิจารณาผลการจำลองเส้นทางเดินของอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุดในห้องเผาไหม้ช่วย ดังรูปที่ 7.15 พบว่า ทั้งกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิต อนุภาคมีการกระจายตัวไปที่ผนังของห้องเผาไหม้สูงมาก และมีบางส่วนถูกสะท้อนไปยังผนังส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ช่วย สิ่งนี้ถ้าเกิดขึ้นในการทดลองจะเป็นการทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงมีระยะเวลาในการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ช่วยได้นานขึ้น และได้รับการแผ่รังสีความร้อนจากผนัง ทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพไม่เกิดการดับ ในขณะที่กรณีพื้นฐาน และกรณีติดตั้งแผ่นบิต อิทธิพลของอากาศปฐมภูมิพัดพาให้อนุภาคพุ่งออกไปตรงๆ มีเพียงผนังส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ช่วยที่ชะลอความเร็วของอนุภาค ทำให้อนุภาคมีเวลาในการเผาไหม้น้อย

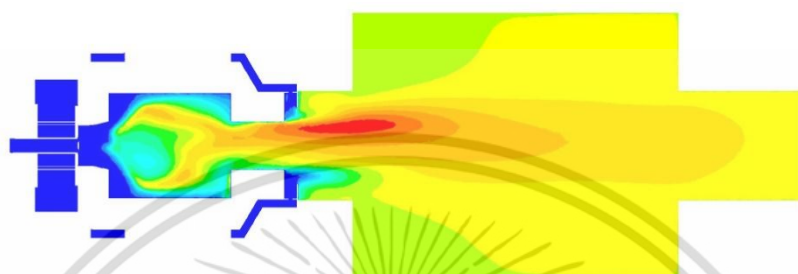
ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ เมื่อประเมินผลการจำลองที่อธิบายไปข้างต้น ร่วมกับผลการทดลอง คาดว่ากรณีติดตั้งแผ่นบิตเพียงอย่างเดียวมีความเสี่ยงในการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟได้ เช่นเดียวกับกรณีพื้นฐาน หากแต่ในกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิต ผลการจำลองของอุณหภูมิ สัดส่วนเชิงมวลของออกซิเจน และสารระเหยเป็นสิ่งบ่งชี้ให้เห็นและสนับสนุนให้เห็นว่าเปลวไฟมีความเสถียรไม่เกิดการดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

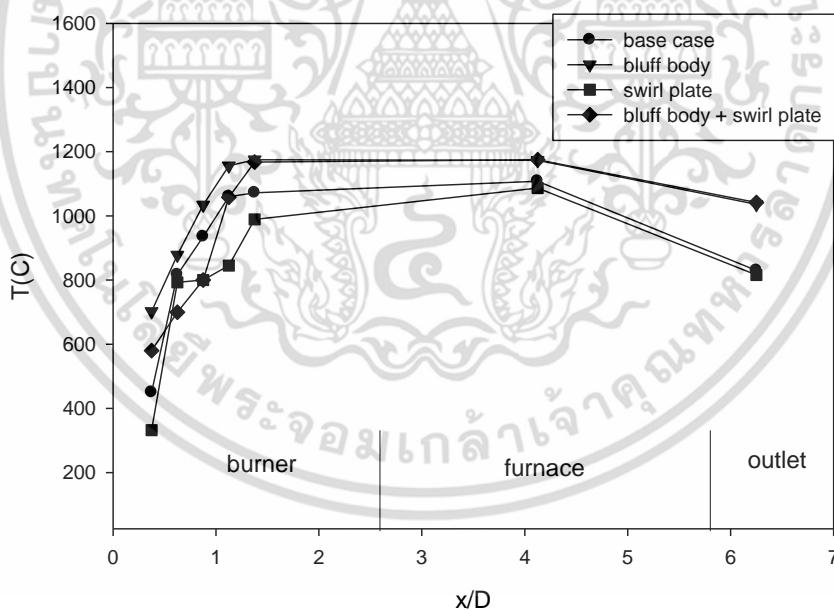


(ค) กรณีติดตั้งแผ่นปิด



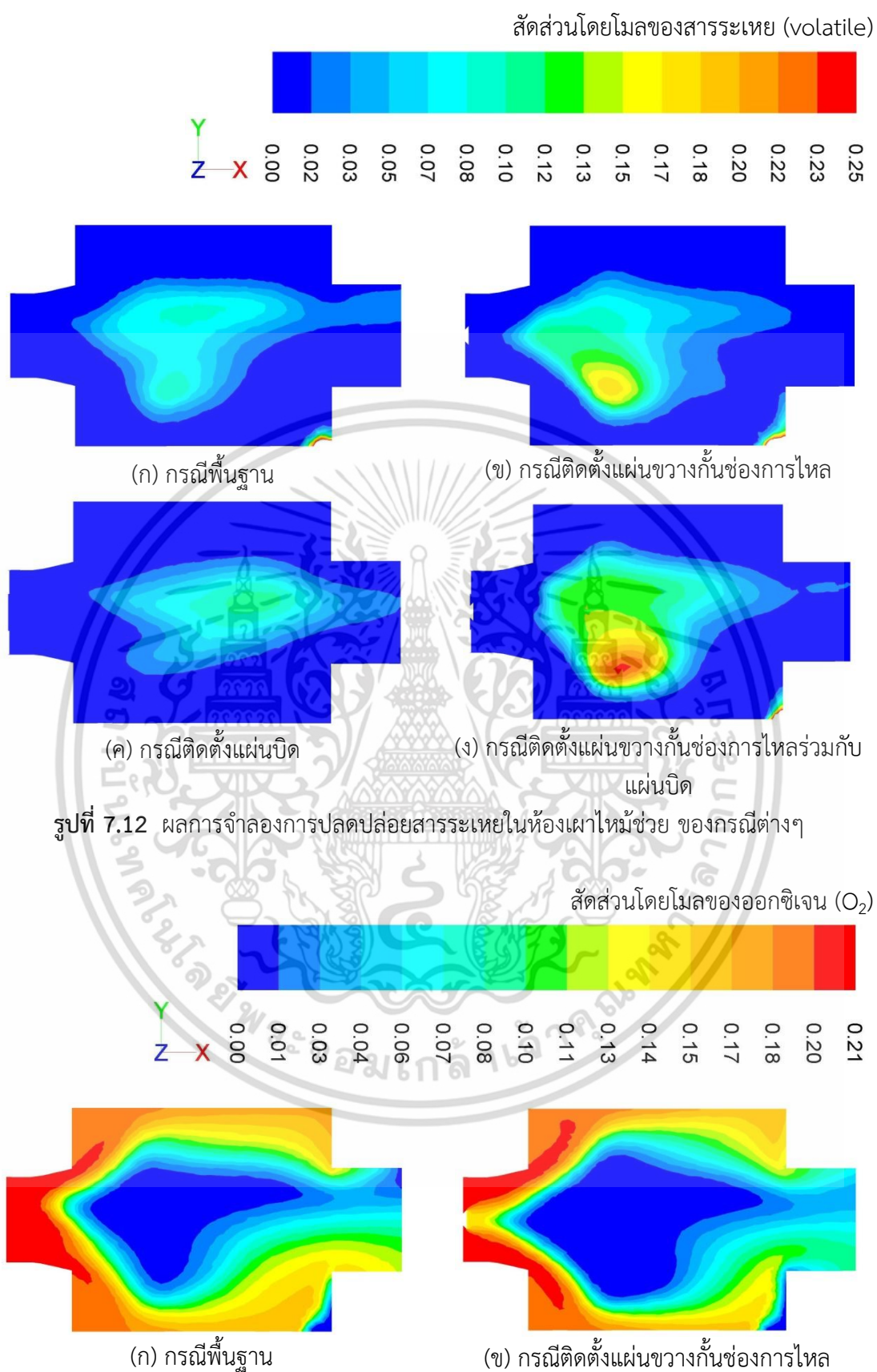
(ง) กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด

รูปที่ 7.10 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ ของกรณีต่างๆ

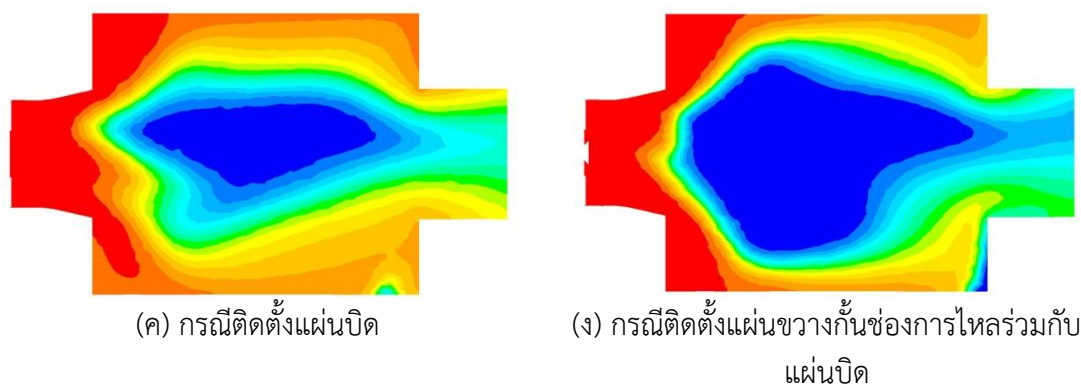


รูปที่ 7.11 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองอุณหภูมิตามแนวแกน ของกรณีต่างๆ

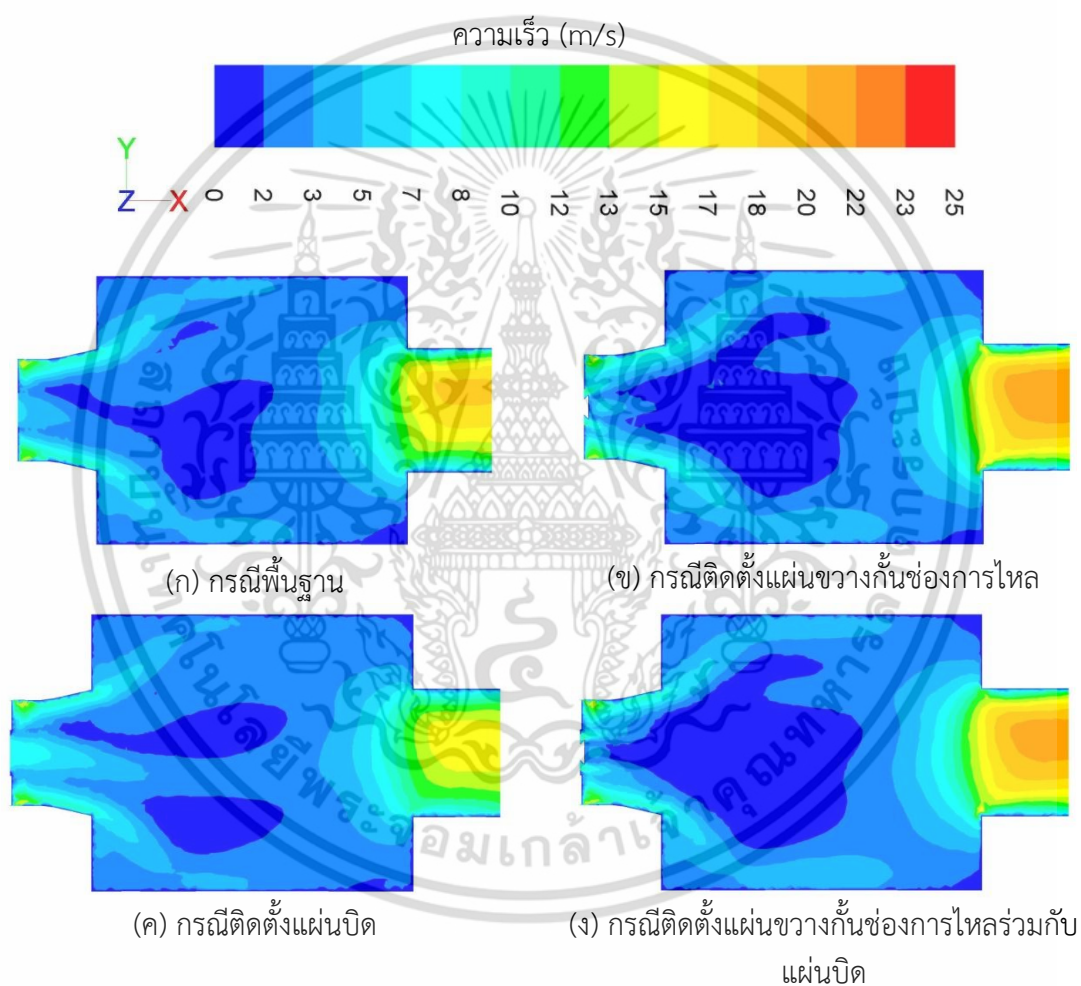
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



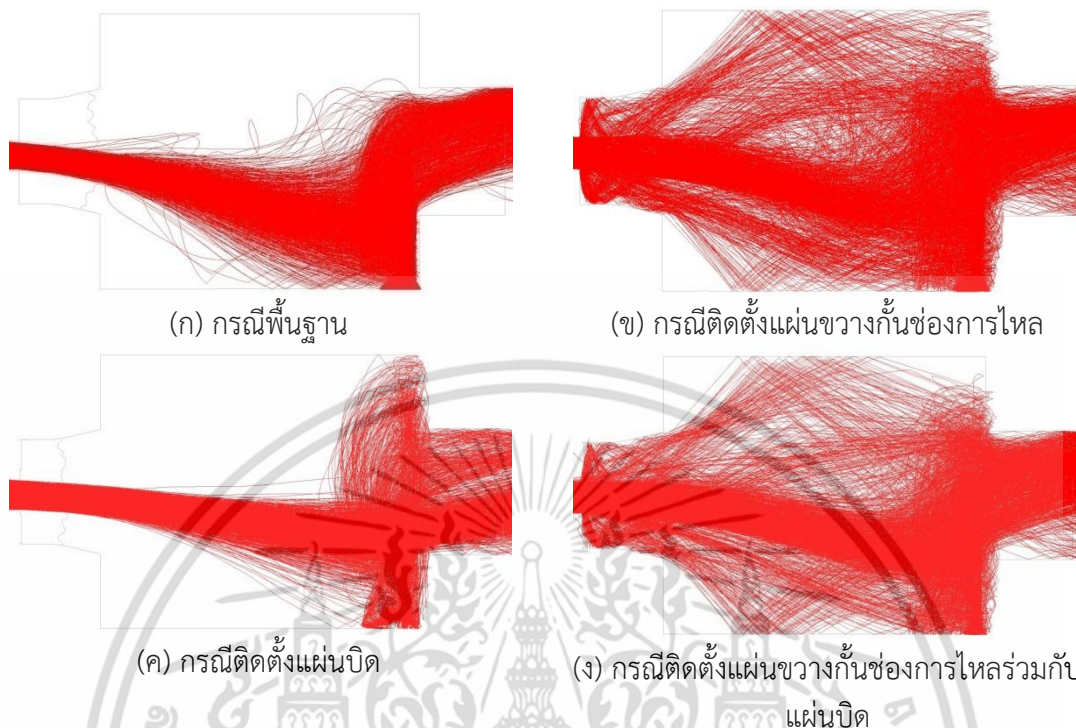
รูปที่ 7.13 ผลการจำลองสัดส่วนของออกซิเจน (O_2) ในห้องเผาไหม้ช่วย ของกรณีต่างๆ



รูปที่ 7.14 ผลการจำลองการกระจายความเร็วในห้องเผาไหม้ช่วย ที่สภาวะการเผาไหม้ กรณีติดตั้งแผ่นวางกั้นช่องการไหล หรือ แผ่นปิด เปรียบเทียบกับกรณีพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Y
Z—X



รูปที่ 7.15 ผลการจำลองเส้นทางเดินของอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุด ของกรณีต่างๆ ในห้องเผาไหม้ช่วย

7.3.2 ผลการทดลอง กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือ แผ่นบิด

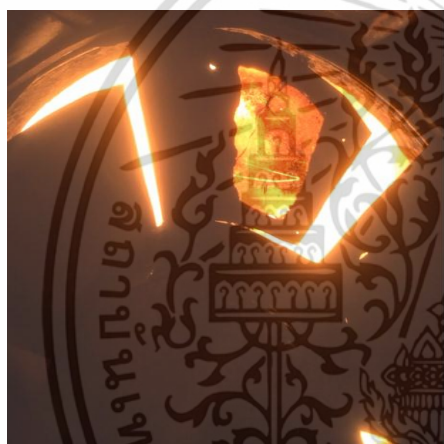
ผลการทดลองพบว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และกรณีติดตั้ง แผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิด เมื่อทำการหยุดการใช้แก๊ส LPG แล้วเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นยังคงเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง ไม่เกิดการดับ รูปถ่ายเปลวไฟ ของทั้ง 2 กรณีแสดงได้ดังรูปที่ 7.16 และ 7.17 ตามลำดับ ในขณะที่การทดลองกรณีติดตั้งแผ่นบิดเพียงอย่างเดียว เมื่อหยุดแก๊ส LPG แล้วพบว่าเปลวไฟค่อยๆดับ รูปที่ 7.18 แสดงรูปถ่ายเปลวไฟของกรณีติดตั้งแผ่นบิด หลังจากหยุดแก๊ส LPG ช่วงที่เปลวไฟเริ่มดับ จะสังเกตเห็นอนุภาคฝุ่นที่พุ่งไปยังด้านหน้าด้วยความเร็วสูง จากอิทธิพลของอากาศปฐุมภูมิ เมื่อพิจารณากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิด เปลวไฟในห้องเผาไหม้ช่วยมีความเสถียร ลูกท่อมห้องเผาไหม้ช่วย เพราะอนุภาคมีการกระจายไปที่ผนังอย่างมาก ความยาวของเปลวไฟที่มองจากด้านข้างของเตาเผา ของทั้งสองกรณี ถ้าวัดจากทางออกของหัวเผา เปลวไฟจะมีความยาวมากกว่า 0.3 m สังเกตได้จากเปลวไฟเลยตำแหน่งที่ทำการถ่ายรูป ดังรูปที่ 7.19



(ก) รูปถ่ายจากด้านหลังของหัวเผา

(ข) รูปถ่ายด้านข้างของเตาเผา (บริเวณส่วนต้น)

รูปที่ 7.16 รูปถ่ายเปลวไฟจากการทดลอง กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล



(ก) รูปถ่ายจากด้านหลังของหัวเผา

(ข) รูปถ่ายด้านข้างของเตาเผา (บริเวณส่วนต้น)

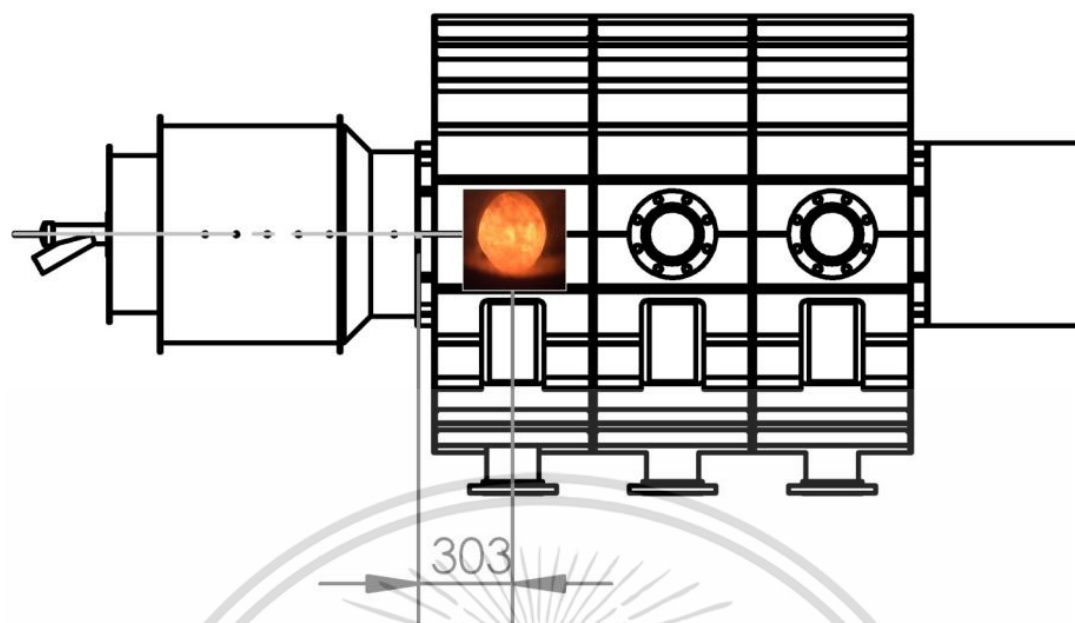
รูปที่ 7.17 รูปถ่ายเปลวไฟจากการทดลอง กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ร่วมกับแผ่นปิด



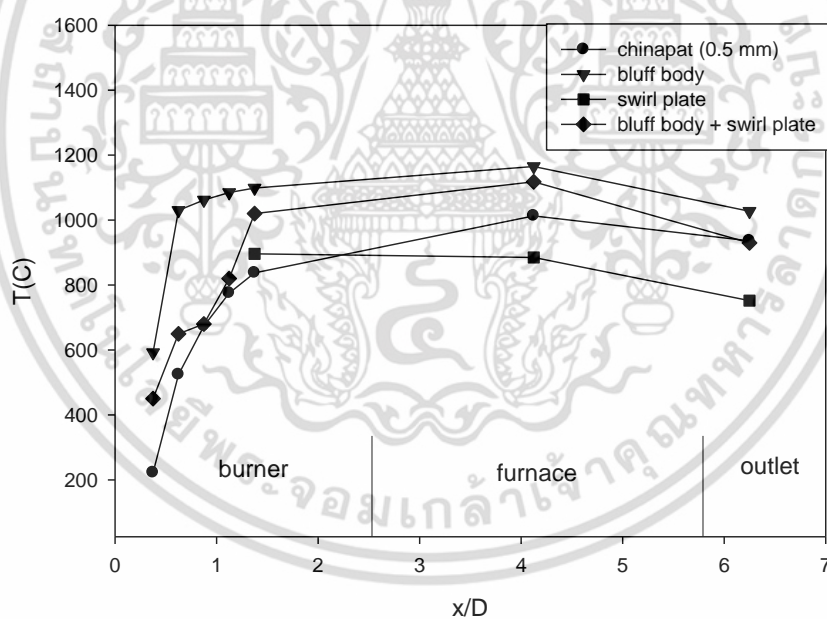
อนุภาคฝุ่น

รูปที่ 7.18 รูปถ่ายเปลวไฟจากการทดลอง (ด้านหลังของหัวเผา) กรณีติดตั้งแผ่นปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.19 รูปแสดงระยะของเปลวไฟ ที่วัดจากทางออกของหัวเผา (mm)



รูปที่ 7.20 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกน จากการทดลองของกรณีต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.2.1 อุณหภูมิตามแนวแกน

จากรูปที่ 7.20 แสดงผลการทดลองวัดอุณหภูมิตามแนวแกนของกรณีต่างๆ พบว่า กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลมีอุณหภูมิตามแนวแกนในห้องเผาไหม้ช่วยสูงที่สุด รองลงมาคือ กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิต และ สุดท้ายคือกรณีติดตั้งแผ่นบิต ซึ่งกรณีติดตั้งแผ่นบิตเป็นการวัดขณะหยุดใช้แก๊ส LPG แล้วเปลวไฟจึงค่อยๆดับ จึงวัดได้เพียง 3 จุด จากผลการทดลองซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลอง โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นตั้งแต่ส่วนต้นของห้องเผาไหม้ ($x/D=0.375$) ของกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลนั้น เกิดจากการที่มีอนุภาคติดไฟบริเวณ wake ของแผ่น นอกจากนี้ห้องเผาไหม้มีบริเวณที่มีความเร็วต่ำครอบคลุมบริเวณกว้างจากผลการจำลอง ทำให้มีการปลดปล่อยสารระเหยครอบคลุมบริเวณกว้าง อนุภาคภาคมีการแพร่กระจายไปยังผนังห้องเผาไหม้ช่วยอย่างมาก ออกซิเจนทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงครอบคลุมบริเวณกว้าง ทำให้ อุณหภูมิบริเวณกลางห้องเผาไหม้ช่วย ($x/D=0.625-1.125$) มีอุณหภูมิสูงกว่าทุกกรณี สำหรับกรณีติดตั้งแผ่นบิตที่ผลการจำลองมีความใกล้เคียงกับกรณีพื้นฐาน ซึ่งทั้ง 2 กรณีไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟได้ในการทดลอง ส่วนกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิต ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีการกระจายอุณหภูมิที่ต่ำลงเมื่อติดตั้งแผ่นบิตเข้าไป แต่ยังคงรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟได้ ซึ่งอุณหภูมิจากผลการจำลองและการทดลองบริเวณ wake ให้ผลสอดคล้องกันคือมีค่าต่ำกว่า กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลเพียงอย่างเดียว ส่วนกรณีของซินท์ที่ใช้ตะแกรง 0.5 mm พบว่ามีการกระจายอุณหภูมิที่ต่ำกว่าของกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิต ซึ่งก็สอดคล้องกับการจำลองที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วยมีความเร็วสูง อนุภาคแพร่ไปยังผนังน้อยมาก ทำให้มีเวลาในการเผาไหม้สั้นกว่า

7.3.2.2 อุณหภูมิตามแนวรัศมี

ผลการทดลองวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมีของกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และ กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิต แสดงได้ดังรูปที่ 7.21 ที่ $x/D=0.375$ ของกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ที่ $r/D=0$ มีอุณหภูมิสูงกว่าของกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิต ซึ่งบ่งบอกว่ามีอนุภาคเชื้อเพลิงบางส่วนเผาไหม้ที่บริเวณ wake ของแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ขณะเดียวกันที่ระยะ $r/D=0.17$ และ $r/D=0.33$ อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นตามตำแหน่ง $x/D=0.625$, $x/D=0.875$ และ $x/D=1.125$ ซึ่งสูงกว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิต บริเวณดังกล่าวถ้าพิจารณาจากผลการจำลองการกระจายความเร็วดังรูปที่ 7.14 (ข) คาดว่าน่าจะเป็นบริเวณที่เกิดกระแสไหลวนภายใน (internal recirculation zone, IRZ) เพราะมีความเร็วต่ำ และอยู่บริเวณส่วนกลางของห้องเผาไหม้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลทำให้เกิดบริเวณที่มีกระแสไหลวนภายใน เข้มข้นกว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิต สำหรับกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิต ระยะ $r/D=0$, $r/D=0.33$ และ $r/D=0.5$ ที่ตำแหน่ง $x/D=0.375$ มีอุณหภูมิสูงกว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลเพียงอย่างเดียว บริเวณนี้เป็นผนังส่วนต้นของห้องเผาไหม้ ซึ่งสำหรับเจ็ทที่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทรงกระบอก (confined jet) จะทำให้เกิดกระแสหมุนวนภายนอกที่เรียกว่า (external recirculation zone, ERZ) [4] เกิดขึ้นบริเวณผนังส่วนต้นของห้องเผาไหม้ ดังนั้นจึงคาดว่าบริเวณนี้มีกลุ่มของอนุภาคขนาดเล็กหมุนวนและเผาไหม้จนมีอุณหภูมิสูง แต่สำหรับกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลเพียงอย่างเดียว นั้น อนุภาคจะเผาไหม้ที่บริเวณ IRZ เป็นหลัก จึงพบว่าบริเวณ ERZ จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าของกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการ

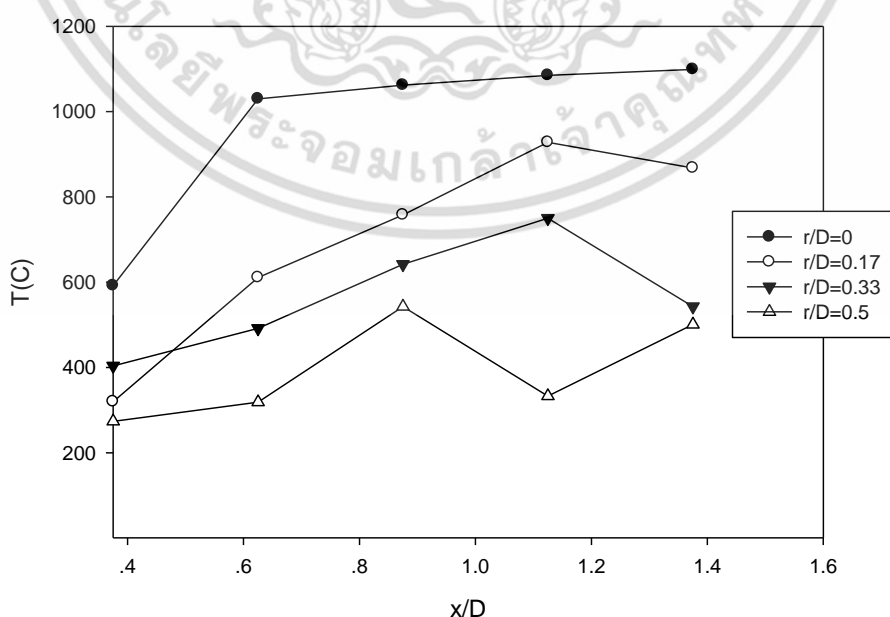
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลร่วมกับแผ่นปิด สำหรับตำแหน่ง $x/D=1.375$ ซึ่งเป็นบริเวณส่วนปลายของห้องเผาไหม้พบว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิดมีอุณหภูมิตามแนวรัศมีสูงกว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลเพียงอย่างเดียว สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่า มีอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ออกไปสู่เตาเผา

จากผลการทดลองวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี สรุปได้ว่า กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล คาดว่าบริเวณที่มีกระแสไหลวนภายใน (IRZ) มีความกว้างและเข้มข้นกว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด สำหรับกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด อนุภาคบางส่วนจะเผาไหม้ที่บริเวณที่มีกระแสไหลวนภายนอก (ERZ) แต่บริเวณที่มีกระแสไหลวนภายใน (IRZ) ซึ่งเป็นบริเวณห้องเผาไหม้หลัก มีความเข้มข้นน้อย จึงมีอนุภาคบางส่วนที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ออกไปสู่เตาเผา

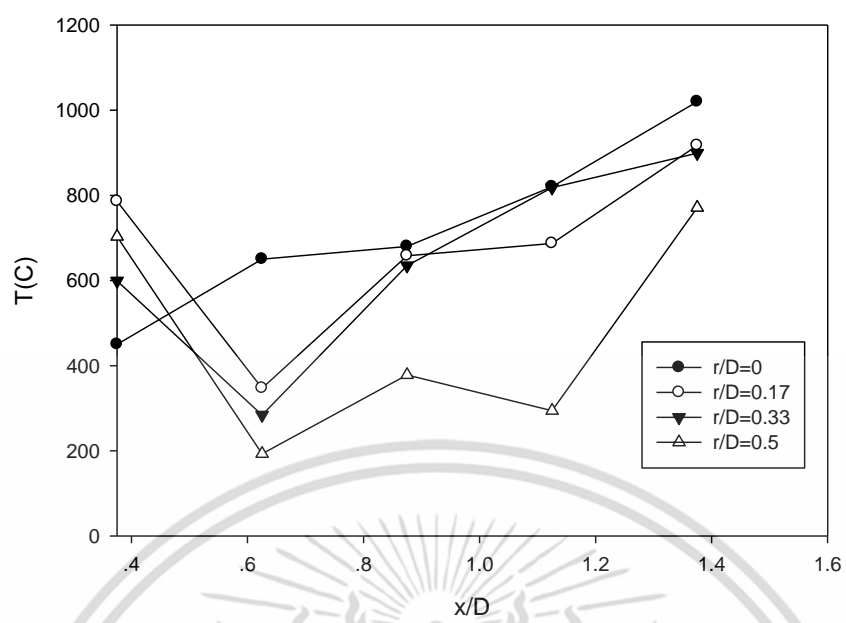
7.3.2.3 ความเสถียรของเปลวไฟ กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด

จากหัวข้อที่ผ่านมา เราทราบจากการทดลองว่า กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด สามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ ซึ่งเป็นการทดลองที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 15% เมื่อทำการเพิ่มเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินเป็น 50% ในการทดลองครั้งเดียวกัน พบว่าเปลวไฟยังคงเสถียรไม่เกิดการดับ แต่มีการลดลงของอุณหภูมิของทั้ง 2 กรณีเมื่อเทียบอากาศส่วนเกิน 15% เพราะภาวะจากอากาศเย็นที่เพิ่มขึ้น ผลการวัดอุณหภูมิตามแนวแกนแสดงได้ดังรูปที่ 7.22 กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลยังคงมีอุณหภูมิตามแนวแกน สูงกว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอนุภาคมีการคลุกเคล้ากับอากาศได้ดีกว่าในห้องเผาไหม้ และ การเพิ่มเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินเป็น 50% ส่งผลให้กรณีทั้งสอง มีอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยลดลง แต่มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นที่เตาเผา แสดงได้ดังรูปที่ 7.23 และ 7.24 ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่เชื้อเพลิงเผาไม่ ไม่สมบูรณ์ในหัวเผา จนมีเชื้อเพลิงออกไปเผาไหม้ที่เตาเผามากขึ้นกว่ากรณีใช้อากาศส่วนเกิน 15%



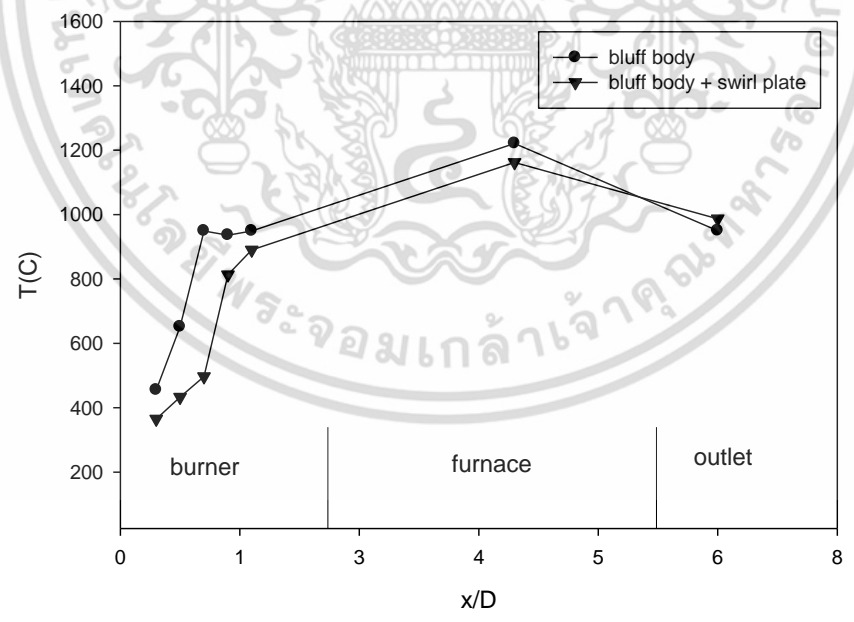
(ก) กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



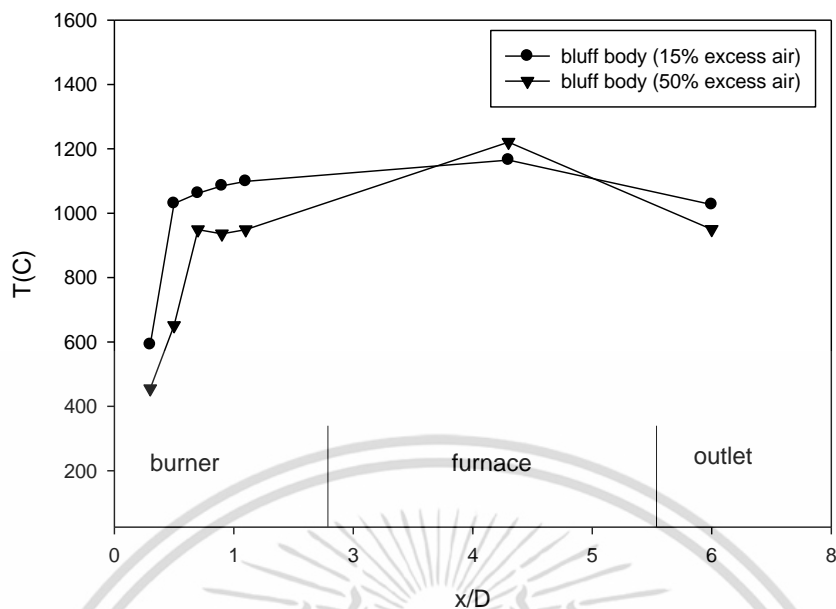
(ข) กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด

รูปที่ 7.21 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวรัศมีในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่งต่างๆจากผลการทดลอง เปรียบเทียบระหว่างกรณี ติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล กับ กรณี ติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด

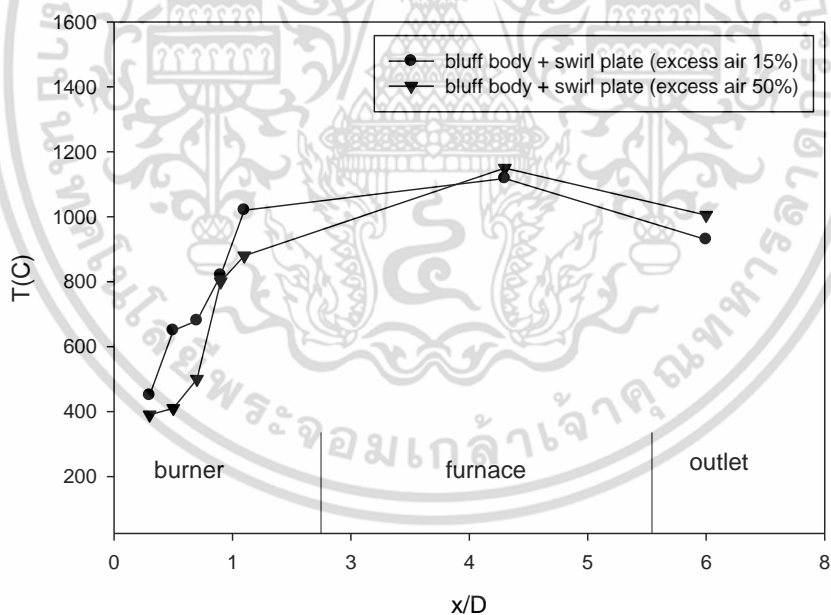


รูปที่ 7.22 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกน จากการทดลองกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล กับกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

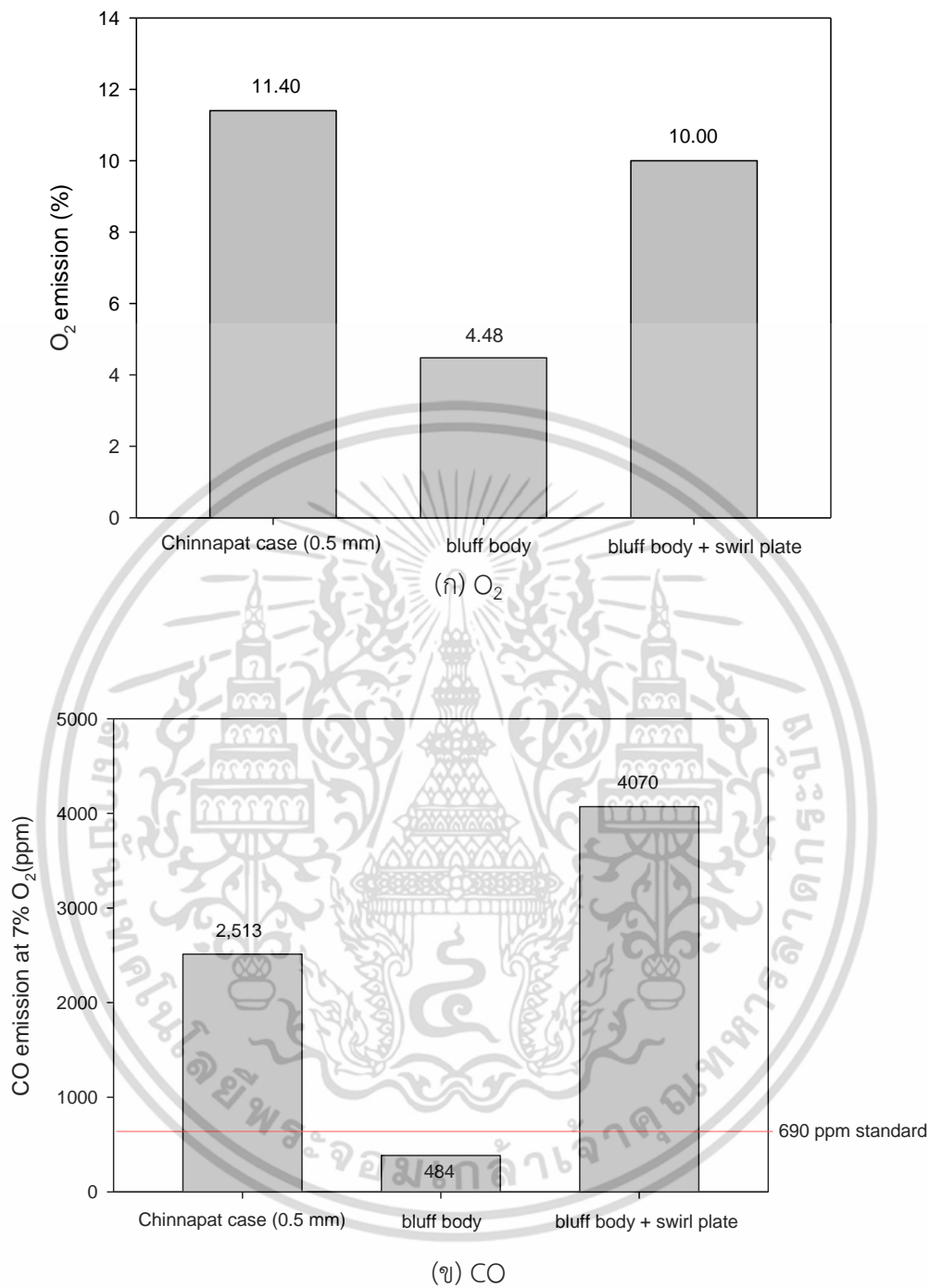


รูปที่ 7.23 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกน จากการทดลองกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 15 และ 50%

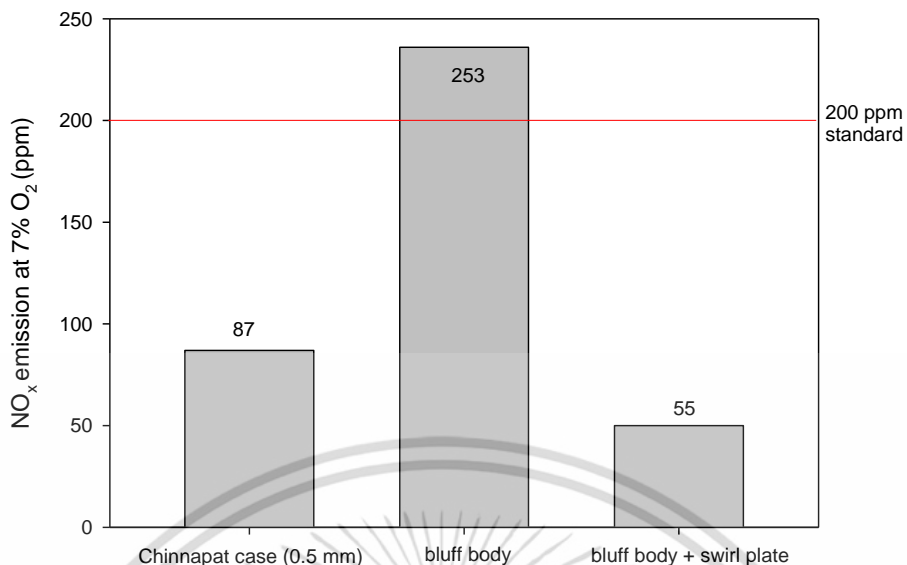


รูปที่ 7.24 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกน จากการทดลองกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นบิด ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 15 และ 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

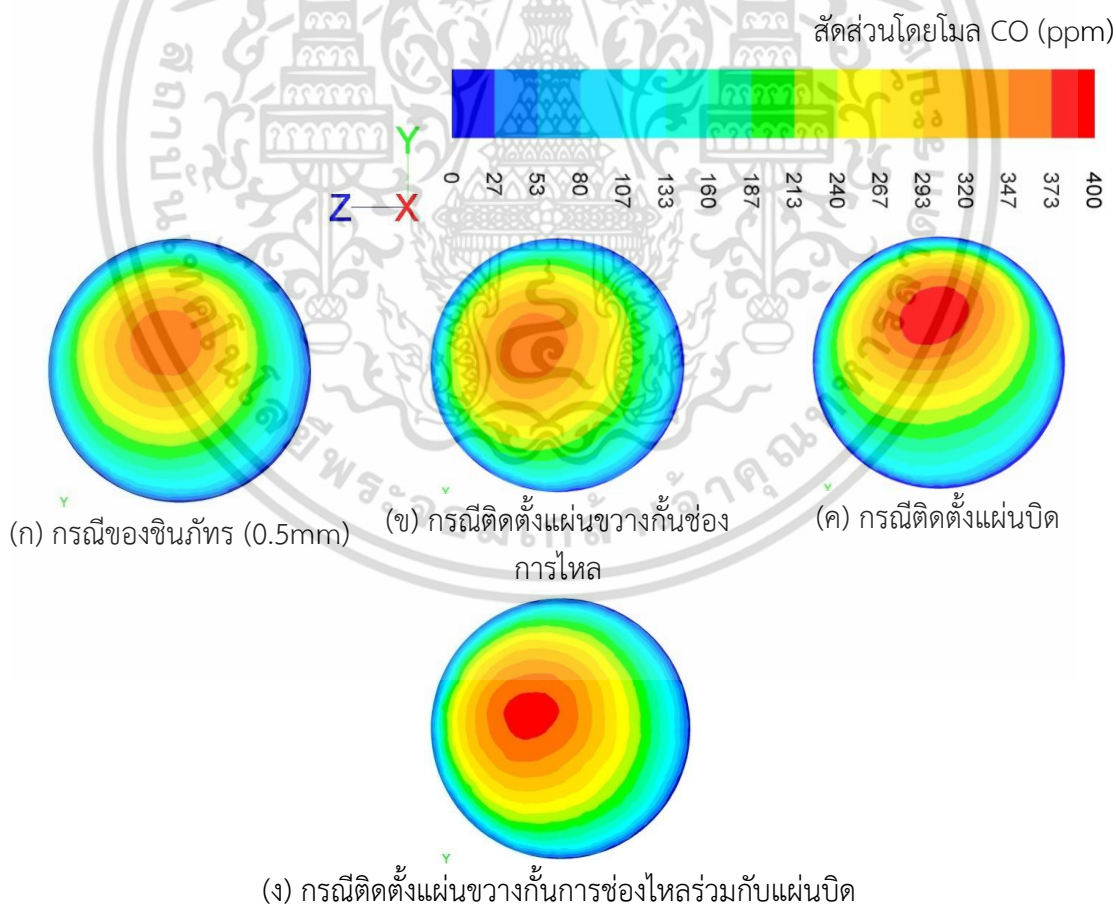


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) NO_x

รูปที่ 7.25 ผลการวัดแก๊สไอเสียของกรณีต่างๆที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 15% เมื่อ O₂=7%



รูปที่ 7.26 ผลการจำลองการกระจาย CO บริเวณจุดวัดแก๊สไอเสียที่ท่อทางออกของกรณีต่างๆที่อากาศส่วนเกิน 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

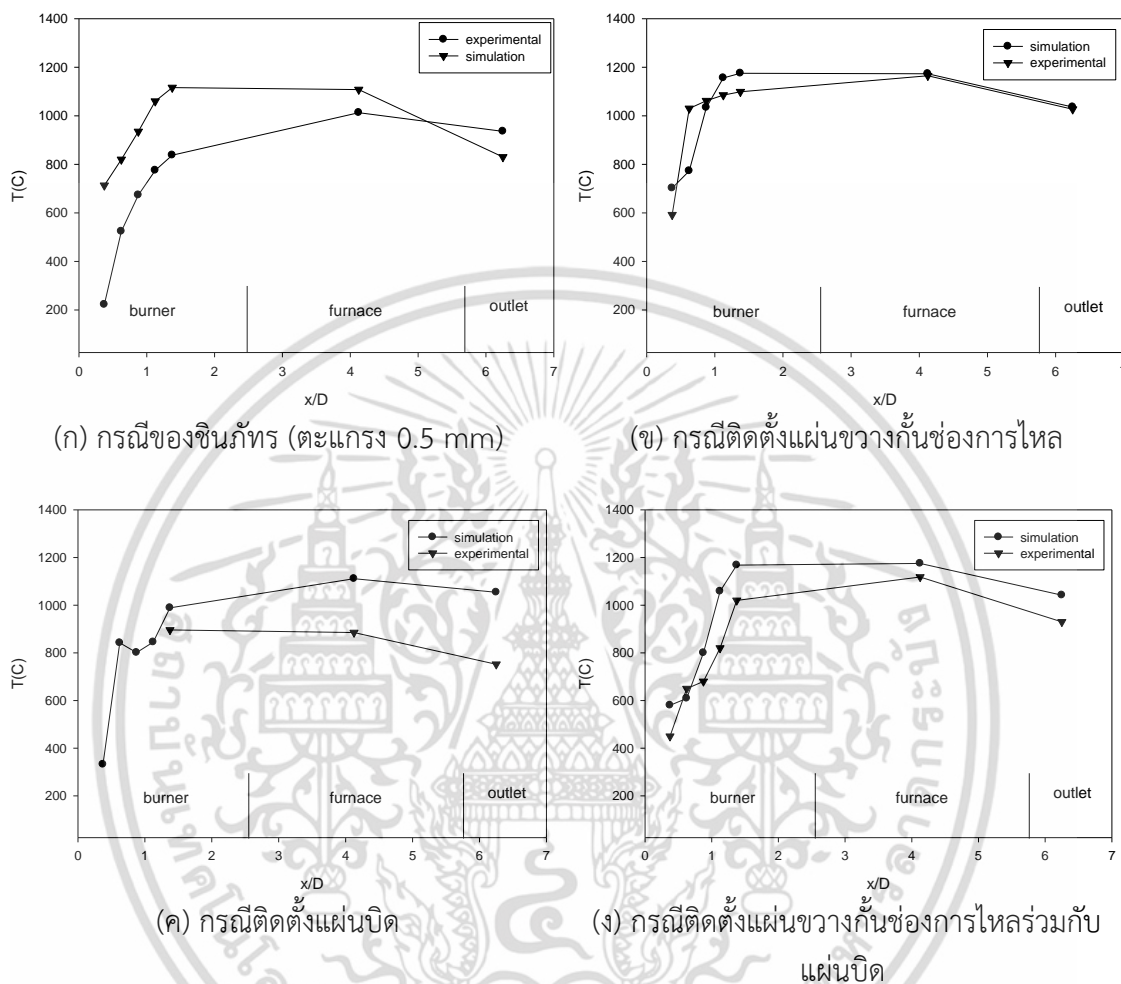
7.3.2.4 การปลดปล่อยแก๊สไอเสียของกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหล และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด

หัวข้อนี้จะนำเสนอผลการวัดแก๊สไอเสีย กรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหล และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด ซึ่งกรณีพื้นฐาน และกรณีติดตั้งแผ่นปิด ไม่ได้ทำการวัด เนื่องจากเปลวไฟดับหลังการหยุดใช้แก๊ส LPG ส่วนกรณีของซินิภัทรที่เชื้อเพลิงถูกบดผ่านตะแกรง 0.5mm จะนำมาเปรียบเทียบกับที่ 7% ของ O_2 ตามมาตรฐานกรมอุตสาหกรรมกำหนด จากผลการวัดแก๊สไอเสีย รูปที่ 7.25 (ก) พบว่า $\%O_2$ ของกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งแสดงถึง O_2 ได้ทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงจนเหลืออยู่เพียงเล็กน้อย ขณะที่กรณีของซินิภัทร และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด มี $\%O_2$ ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ในปริมาณมาก ซึ่งถ้าพิจารณาการปลดปล่อย CO ในรูปที่ 7.25 (ข) ที่พบว่าทั้งสองกรณีมีการปลดปล่อย CO ในระดับสูง ซึ่งบ่งชี้ว่าอากาศกับเชื้อเพลิงคลุกเคล้ากันไม่ดีพอในห้องเผาไหม้พิจารณากรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลมีการปลดปล่อย CO ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งต่ำกว่ากรณีของซินิภัทร (0.5mm) และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด อย่างมาก และกรณีของซินิภัทร (0.5 mm) มีการปลดปล่อย CO น้อยกว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด ผลการจำลองการกระจาย CO บริเวณจุดวัดแก๊สไอเสียที่ท่อทางออก จากรูปที่ 7.26 พบว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหล ความเข้มข้นของ CO จากผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ส่วนกรณีของซินิภัทร ที่เชื้อเพลิงถูกบดผ่านตะแกรง 0.5mm และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด ผลการจำลองกับผลการทดลองมีค่าต่างกันมาก แต่แสดงให้เห็นว่ากรณีติดตั้งแผ่นปิด รูป 7.26 (ค) และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด รูป 7.26 (ง) มีสัดส่วน CO ในปริมาณที่สูงกว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหล และกรณีของซินิภัทรที่เชื้อเพลิงถูกบดผ่านตะแกรง 0.5 mm จากผลการจำลองและการทดลองวัดค่า CO แสดงให้เห็นว่า กรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลที่มีการปลดปล่อย CO ในระดับต่ำนั้น สอดคล้องกับผลการจำลองและการกระจายอุณหภูมิที่สูงกว่า กรณีของซินิภัทรที่ใช้ตะแกรง 0.5 mm และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด ในส่วนของค่า NO_x จากรูปที่ 7.25 (ค) พบว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหล มีการปลดปล่อยสูงสุด ซึ่งเกินกว่าค่ามาตรฐาน ส่วนกรณีของซินิภัทรที่ใช้ตะแกรง 0.5 mm กับกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด มีการปลดปล่อย NO_x ต่ำกว่ามาตรฐาน แสดงให้เห็นว่า NO_x ที่เกิดขึ้นกับกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลซึ่งมีปริมาณมาก เกิดจาก Thermal NO_x ดังสมการที่ (3.23) ซึ่งตัดประเด็นเรื่อง fuel NO_x เนื่องจากเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบ N ต่ำ นอกจากนี้ การเกิด Thermal NO_x อาจพิจารณาควบคู่กับผลการทดลองวัดอุณหภูมิตามแนวแกนดังรูปที่ 7.20 ซึ่งกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลมีอุณหภูมิตามแนวแกนทั้งในส่วนของห้องเผาไหม้ช่วย เตาเผา และท่อทางออก สูงกว่าทุกกรณี และน่าจะสูงถึง $1,300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างหัวเผากับเตาเผา ซึ่งในการทดลองไม่ได้ทำการวัดที่ตำแหน่งนี้ แต่ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิสื่อให้เห็นว่าบริเวณนี้น่าจะมีอุณหภูมิสูงถึง $1,300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้กลไกของการเกิด Thermal NO_x หรือ Zeldovich-NO เกิดขึ้นได้ ในขณะที่กรณีของซินิภัทรที่ใช้ตะแกรง 0.5 mm และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด มีการกระจายอุณหภูมิต่ำกว่า จึงพบว่าการปลดปล่อย NO_x ในระดับที่ต่ำกว่า

สำหรับกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหล ซึ่งมีการปลดปล่อย NO_x เกินกว่าค่ามาตรฐาน ในการนำหัวเผาไปเดินเครื่องจริงในโรงงานอุตสาหกรรม ก็จะต้องมีระบบบำบัด NO_x ก่อนปล่อยออกสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรยากาศ ในขณะที่ผลการวัด CO มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน แสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ แม้จะใช้เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่กว่าของซินท์รทำการเผาไหม้ แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของแผ่นขวางกั้นช่องการไหลที่สามารถเพิ่มสมรรถนะของหัวเผาได้



รูปที่ 7.27 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนจากผลการจำลองกับผลการทดลองของกรณีต่างๆ

7.3.3 อภิปรายผลการจำลอง และการทดลองกรณี ติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body) หรือ แผ่นปิด (swirl plate)

จากรูปที่ 7.27 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนจากผลการจำลองกับการทดลอง ของกรณีต่างๆ จะเห็นว่าผลการจำลองของแต่ละกรณี มีอุณหภูมิสูงกว่าการทดลอง เนื่องจาก การจำลองสมมติว่าผนังในห้องเผาไหม้ช่วยเป็นผนังอะเดียบาติก อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันโดยเฉพาะกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด ซึ่งการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ มีการสอบเทียบ เครื่องมือวัดละเอียดขึ้น [24] เมื่อเทียบกับการทดลองกรณีของซินท์รที่เชื้อเพลิงถูกปัดผ่านตะแกรง 0.5 mm [1] ผลการจำลองจึงมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 7.3 เมื่อพิจารณาผลการจำลองการกระจายความเร็วในห้องเผาไหม้ของกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่อง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหล ซึ่งทำให้เกิดบริเวณที่มีความเร็วต่ำกว้างขึ้นอย่างมากภายในห้องเผาไหม้ช่วย ทำให้มีการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็วและครอบคลุมพื้นที่กว้าง อีกทั้งเชื้อเพลิงจะเริ่มทำปฏิกิริยากับ O_2 ที่บริเวณ wake ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองวัดอุณหภูมิตามแนวแกน ซึ่งอุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นตั้งแต่ส่วนต้นของห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง $x/D=0.375$

การที่กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล สามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟได้ เกิดจากการกระจายของอนุภาคไปที่ผนังของห้องเผาไหม้ ซึ่งพบได้ทั้งแบบจำลองและการทดลอง ทำให้ได้รับอิทธิพลจากการแผ่รังสี นอกจากนี้ยังมีกระแสไหลวน ที่ทำให้เกิดบริเวณที่มีความเร็วต่ำ ทำให้แก๊สร้อนย้อนกลับมาเผาไหม้เชื้อเพลิงใหม่ สารระเหยจึงถูกปลดปล่อยออกมาเร็วมาก บริเวณที่มีความเร็วต่ำนี้คาดว่า น่าจะเกิดจากกระแสไหลวนของตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี ที่ติดตั้งอยู่แล้วในกล่องลม ผสมกับกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นบริเวณ wake ทำให้เกิดบริเวณที่มีความเร็วต่ำครอบคลุมบริเวณกว้าง เชื้อเพลิงจึงมีเวลาอยู่ในห้องเผาไหม้นาน ในส่วนของกรณีติดตั้งแผ่นปิด ไม่มีแผ่นขวางกั้นช่องการไหล อิทธิพลของอากาศปฐมภูมิพัดพาเชื้อเพลิงพุ่งออกจากห้องเผาไหม้ ทำให้เชื้อเพลิงมีเวลาในการเผาไหม้น้อย มีการปลดปล่อยสารระเหยความเข้มข้นต่ำจากผลการจำลอง จึงพบว่าในการทดลองเมื่อทำการหยุดการใช้แก๊ส LPG อุณหภูมิจึงเริ่มตกลงอย่างต่อเนื่อง จนในที่สุดทำให้เปลวไฟดับ ซึ่งจากทฤษฎี การติดตั้งแผ่นปิด จะทำให้ตัวเลขการหมุนควงอยู่ในระดับเข้ม กระแสย้อนกลับในห้องเผาไหม้ควรมีค่าสูง และการเผาไหม้น่าจะมีเสถียรภาพ จากข้อสงสัยนี้ จึงทำการคำนวณตัวเลขการหมุนควงซ้ำอีกครั้ง โดยใช้องค์ประกอบความเร็วที่ได้จากผลการจำลอง ซึ่งน่าจะมีความถูกต้องกว่าการคำนวณด้วยโครงสร้าง การคำนวณจะทำการเฉลี่ยองค์ประกอบความเร็วตามแนวแกน (\bar{U}) และความเร็วตามแนวสัมผัส (\bar{W}) บริเวณระนาบช่องทางออกของอากาศทุติยภูมิ แสดงดังรูป 7.28 จากนิยามของตัวเลขการหมุนควงที่ลดรูปได้ดังสมการที่ (5.6) ซึ่งแสดงวิธีการคำนวณไว้ในตารางที่ 5.7 ผลการคำนวณตัวเลขการหมุนควงจากผลการจำลอง และค่าองค์ประกอบความเร็วแสดงได้ดังตารางที่ 7.4 จะเห็นว่า ผลการคำนวณตัวเลขการหมุนควงจากผลการจำลองของกรณีพื้นฐาน มีค่าเป็น 0.74 ซึ่งเป็นตัวเลขการหมุนควงในระดับเข้ม เมื่อเทียบกับการคำนวณจากโครงสร้าง ซึ่งมีค่าเพียง 0.2 อยู่ในระดับการหมุนควงต่ำ มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 114.89 % ขณะที่กรณีติดตั้งแผ่นปิด เมื่อคำนวณตัวเลขการหมุนควงจากผลการจำลอง มีค่าเพียง 0.59 ซึ่งจัดเป็นการหมุนควงในระดับปานกลาง เมื่อเทียบกับผลการคำนวณจากโครงสร้าง ซึ่งมีค่า 1.16 จัดอยู่ในระดับการหมุนควงอย่างเข้ม และมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 65.14% อย่างไรก็ตาม จากการศึกษางานวิจัย พบว่าการคำนวณตัวเลขการหมุนควงโดยโครงสร้าง มีความคลาดเคลื่อนกับการทดลองพอสมควร พิจารณาได้จากรูปที่ 3.5 และ 3.6 โดยการคำนวณตัวเลขการหมุนควงของตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี ถ้าอัตราส่วนขององค์ประกอบความเร็วตามแนวสัมผัส กับองค์ประกอบความเร็วตามแนวรัศมี เฉลี่ย (σ) ที่คำนวณได้จากโครงสร้าง มีค่ามากเกินไป 1.0 จะทำให้เกิด ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองอย่างมาก ซึ่งในกรณีพื้นฐานพบว่า $\sigma = 1.58$ ดังนั้นจะเห็นว่าผลการคำนวณตัวเลขการหมุนควงจากแบบจำลองมีแนวโน้มน่าเชื่อถือมากกว่า การคำนวณจากโครงสร้าง เนื่องจากผลการจำลอง และการทดลองที่สอดคล้องกันหลายอย่าง จากกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด ทำให้เกิดการกระจายอุณหภูมิต่ำกว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลเพียงอย่างเดียว ซึ่งพิจารณาได้จากผลการจำลอง และการทดลองที่ผ่านมา นั้นแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งแผ่นปิด แท้จริงแล้ว อาจมีตัวเลขการหมุนควงอยู่ในย่าน การหมุนควงระดับปานกลาง ดังที่คำนวณได้จากผลการจำลอง ซึ่งไม่ได้อยู่ในย่านการหมุนควงอย่างเข้ม แบบสมมติฐาน ซึ่งอาจเกิดจากเป็นการติดตั้งซ้อนกันระหว่างแผ่นปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี ที่อยู่ในกล่องลม ซึ่งทำให้ค่าองค์ประกอบความเร็วตามแนวสัมผัส \bar{W} ดังตารางที่ 7.4 มีค่าลดลงจากกรณีพื้นฐาน 3.94 m/s เหลือ 3.70 m/s และองค์ประกอบความเร็วตามแนวแกนเพิ่มขึ้นจากเดิม 3.59 m/s เป็น 4.20 m/s ส่งผลให้ตัวเลขการหมุนควงมีค่าต่ำลง

จากผลการจำลอง และการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า การติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลเพียงอย่างเดียว เข้ากับระบบเดิมซึ่งมีตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมีอยู่แล้ว ก็สามารถทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ ซึ่งพิสูจน์ด้วยการเพิ่มเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินไปที่ 50% จาก 15% เปลวไฟยังคงอยู่ได้ แม้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้จะช่วยจะลดลง ไม่จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงที่ถูกรีดผ่านตะแกรง 0.5 mm ก็สามารถทำการเผาไหม้ได้ และมีการปลดปล่อยแก๊สไอเสียในระดับต่ำ ดังนั้นจึงช่วยประหยัดพลังงานในการบดเชื้อเพลิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

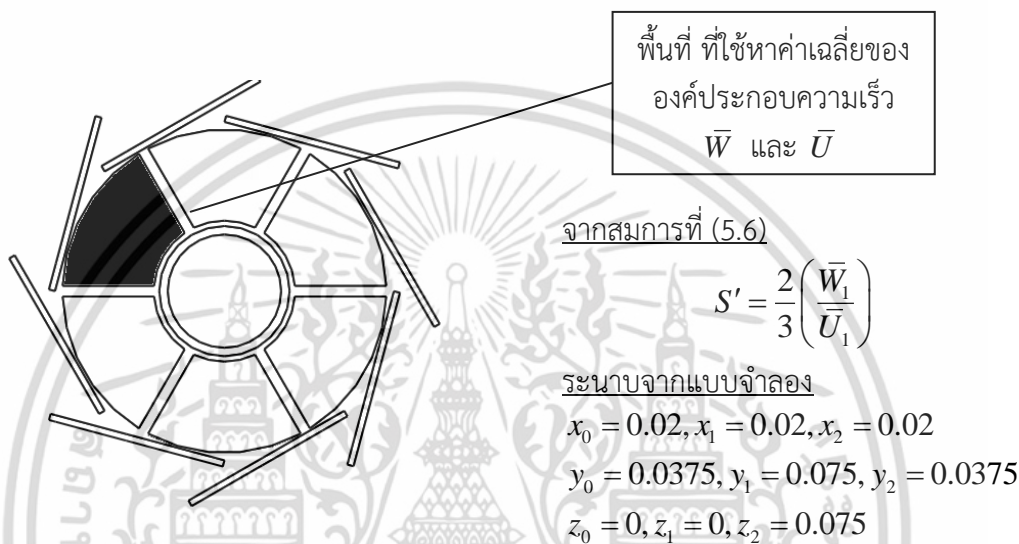
ตารางที่ 7.3 สรุปผลการจำลองของกรณี ติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหล หรือแผ่นปิด

กรณี	ผลการจำลอง					
	การกระจาย อุณหภูมิ ในห้องเผา ไหม้ช่วย	การ ปลดปล่อย สารระเหย	สัดส่วนของ O ₂ ในห้อง เผาไหม้ช่วย	การกระจาย ความเร็ว	เส้นทาง เดินของ อนุภาค ขนาดใหญ่ ที่สุด	การ ปลดปล่อย CO
1. ติดตั้ง แผ่นขวาง กันช่อง การไหล	สูงที่สุด	ความเข้มข้น สูงตลอด คลุมบริเวณ กว้าง และ ปลดปล่อย เร็ว	ทำปฏิกิริยา กับเชื้อเพลิง ครอบคลุม บริเวณ กว้าง และ เริ่มต้นจาก บริเวณ wake	เกิดบริเวณที่มี ความเร็วต่ำ เป็นวงกว้าง ในห้องเผา ไหม้ช่วย ครอบคลุม บริเวณตั้งแต่ ส่วนต้น	อนุภาค กระจายไป ที่ผนังห้อง เผาไหม้ ช่วยอย่าง มาก	ต่ำ
2. ติดตั้ง แผ่นปิด	ต่ำที่สุด	ความเข้มข้น ต่ำเริ่ม ปลดปล่อย ช้า คล้ายกับ กรณีพื้นฐาน	ทำปฏิกิริยา กับเชื้อเพลิง ครอบคลุม บริเวณแคบ คล้ายกับ กรณี พื้นฐาน	บริเวณที่มี ความเร็วต่ำ แคบ ถูก อากาศปฐม ภูมิเอานะที่ ลำตรงกลาง	อากาศปฐม ภูมิพัดพา เชื้อเพลิง พุ่งไป ด้านหน้า ไม่มีการ กระจายไป ที่ผนัง ด้านข้าง	สูงกว่า กรณีที่ 1
3. ติดตั้ง แผ่นขวาง กันช่อง การไหล ร่วมกับ แผ่นปิด	ใกล้เคียงกับ กรณีที่ 1	ความเข้มข้น สูงตลอด คลุมบริเวณ กว้าง	ทำปฏิกิริยา กับเชื้อเพลิง ครอบคลุม บริเวณ กว้าง	เกิดบริเวณที่มี ความเร็วต่ำ เป็นวงกว้าง ในห้องเผา ไหม้ช่วย คล อบคลุม บริเวณตั้งแต่ ส่วนต้น	อนุภาค กระจายไป ที่ผนังห้อง เผาไหม้ ช่วยอย่าง มาก	สูงกว่า กรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.4 ผลการคำนวณตัวเลขการหมุนควง จากผลการจำลอง และจากโครงสร้าง

กรณีพื้นฐาน	\bar{U} (m/s)	\bar{W} (m/s)	S (-)	ความแตกต่าง (%)
คำนวณโดยโครงสร้าง	7.63	2.28	0.20	114.89
คำนวณจากผลการจำลอง	3.59	3.94	0.74	
กรณีติดตั้งแผ่นบิด				
คำนวณโดยโครงสร้าง	2.71	4.69	1.16	65.14
คำนวณจากผลการจำลอง	4.20	3.70	0.59	



รูปที่ 7.28 บริเวณช่องทางออก ที่ทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบความเร็ว จากผลการจำลองและสูตรคำนวณตัวเลขการหมุนควง ตามสมการที่ (5.6) ที่ไม่ขึ้นกับรัศมีของช่องทางออก

7.4 การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้

ผลการจำลองและการทดลองที่ผ่านมาเราทราบแล้วว่า กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล เป็นกรณีที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถใช้ทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm ให้มีความเสถียร และปลดปล่อย CO ในระดับต่ำ (เมื่อไม่พิจารณาการปลดปล่อย NO_x) สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบการหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ของกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล เทียบกับกรณีของซินภัทรที่ใช้ตะแกรง 0.5 mm และกรณีอื่นๆ สำหรับการวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ นอกจากการวัดแก๊สไอเสีย จะต้องมีการเก็บตัวอย่างอนุภาคคาร์ที่ปนมากับเถ้า เพื่อคำนวณปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับองค์ประกอบที่ไม่เผาไหม้ เนื่องจากอุปกรณ์ในการทดลองปัจจุบันไม่มีการเก็บตัวอย่างเถ้าแบบแห้ง ดังนั้นในการคำนวณประสิทธิภาพจะเป็นการใช้ผลการจำลองอนุภาคคาร์ที่เหลือจากการเผาไหม้มาคำนวณ เพื่อเป็นเครื่องมือในการประเมินประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\text{Combustion Efficiency } (\eta_{\text{comb}}) = 100 - \frac{\text{flue gas heat losses}}{\text{fuel heating value}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $flue\ heat\ losses = \dot{m}_{unburn} \times H_{burnout}$

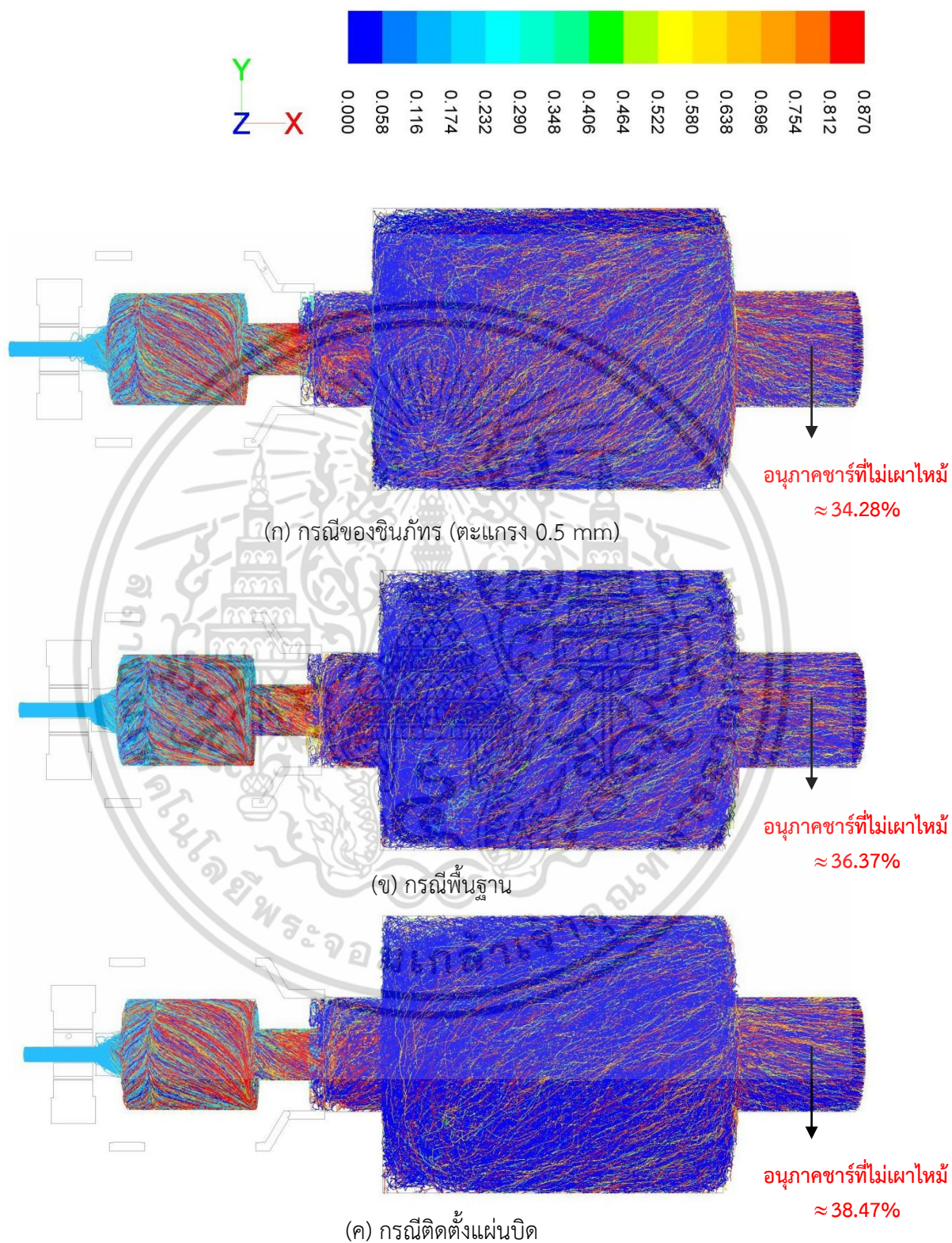
$fuel\ heating\ value = 300\ kW$

$H_{burnout}$ = ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ซาร์ = 32.8 MJ/kg [27]

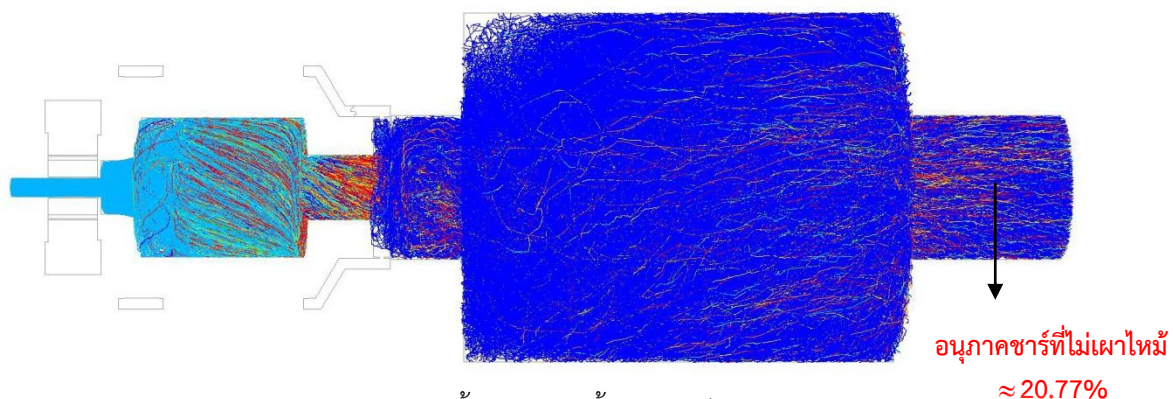
สำหรับค่า \dot{m}_{unburn} หาได้จากแบบจำลองอนุภาคซาร์ที่เหลือจากการเผาไหม้ โดยอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่กำลังความร้อน 300 kW จะเท่ากับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง 0.0186 kg/s และจากตารางที่ 5.2 เชื้อเพลิงจะมีซาร์เป็นองค์ประกอบอยู่เท่ากับ 15.23% ดังนั้นอัตราการก่อกำเนิดซาร์เท่ากับ 2.833×10^{-3} kg/s และ $\dot{m}_{unburn} = 2.833 \times 10^{-3} \times$ สัดส่วนของอนุภาคซาร์ที่ไม่เผาไหม้ จากรูปที่ 7.29 แสดงผลการจำลองอนุภาคซาร์ในระบบ และสามารถหาเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคซาร์ที่เหลือจากกรณีของซินภัทร (ตะแกรง 0.5 mm) และกรณีต่างๆ โดยแสดงผลการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ของแต่ละกรณีได้ดังตารางที่ 7.5 จากผลการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ จะเห็นว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหล แม้จะใช้เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่กว่า แต่มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงกว่าของกรณีซินภัทร ที่ใช้ตะแกรง 0.5 mm ขณะที่กรณีพื้นฐานและกรณีติดตั้งแผ่นปิด พบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำ ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาทั้งสองกรณีไม่สามารถรักษาเสถียรภาพการเผาไหม้ได้ ส่วนกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด มีประสิทธิภาพการเผาไหม้แตกต่างกับกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลเพียงอย่างเดียวเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามในการทดลองพบว่าการปลดปล่อย CO ในปริมาณสูงซึ่งแสดงถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ได้จากผลการจำลองเป็นค่าประมาณ ซึ่งยังไม่รวมสัดส่วนของ CO ไว้ในสูตร ถ้าจะให้มีความแม่นยำ ต้องออกแบบชุดเก็บตัวอย่างเถ้าในระบบสำหรับงานวิจัยในอนาคต เพื่อคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยตรงจากการทดลอง

เมื่อพิจารณาผลการทดลอง กรณีของซินภัทรที่ใช้ตะแกรง 0.5 mm อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าประมาณ 9.72 MJ/kg ที่อัตราบดเชื้อเพลิงประมาณ 1 MW ความร้อน เมื่อประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่า 89.38 เมื่อค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงเท่ากับ 16.14 MJ/kg ดังนั้นเชื้อเพลิงเมื่อทำการเผาไหม้ สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้เท่ากับ 14.43 MJ/kg ซึ่งจะต้องใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงประมาณ 67.38% ของพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น สำหรับการวัดกำลังไฟฟ้าจากระบบเตรียมเชื้อเพลิงที่บดผ่านตะแกรง 1 mm จากวิทยานิพนธ์ของ พีรพัฒน์ เทพลีป [24] พบว่าเครื่องบดและระบบขนส่งเชื้อเพลิงทำงานได้อย่างต่อเนื่องที่ขีดจำกัดของอัตราบดเชื้อเพลิงประมาณ 1 MW ความร้อนดังรูปที่ 7.30 และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะลดลง ถ้าอัตราการบดเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 7.31 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าประมาณ 320 kJ/kg เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการเผาไหม้ของกรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลที่มีค่าประมาณ 93.57% เมื่อค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงเท่ากับ 16.14 MJ/kg ดังนั้นเชื้อเพลิงเมื่อทำการเผาไหม้ สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้เท่ากับ 15.10 MJ/kg นั่นคือ พลังงานที่ใช้ในการเตรียมเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 2.12 % ของพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น จะเห็นว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลเข้ากับระบบเดิม สามารถเพิ่มสมรรถนะของหัวเผาไหม้ โดยมีการเผาไหม้ที่มีเสถียรภาพ ทั้งยังช่วยลดการใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงอย่างมีนัยสำคัญ

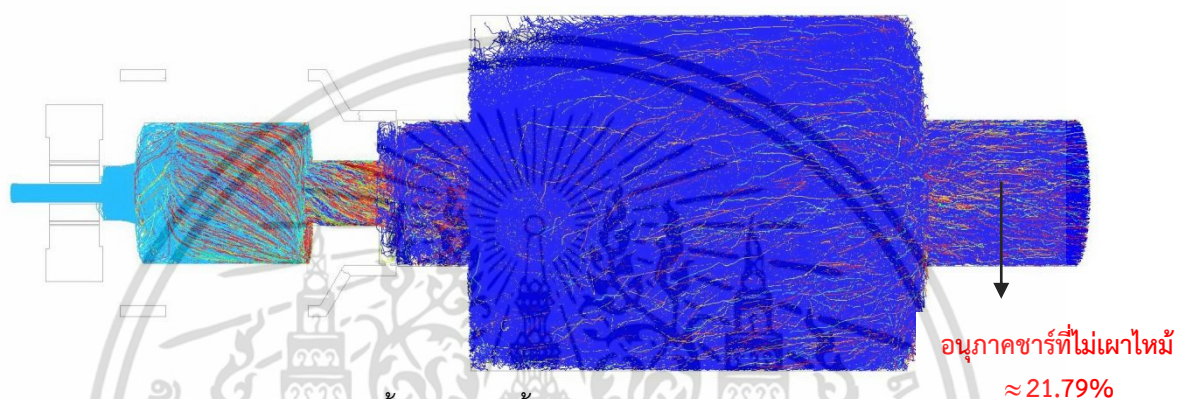
สัดส่วนของอนุภาคคาร์บอนในเชื้อเพลิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล

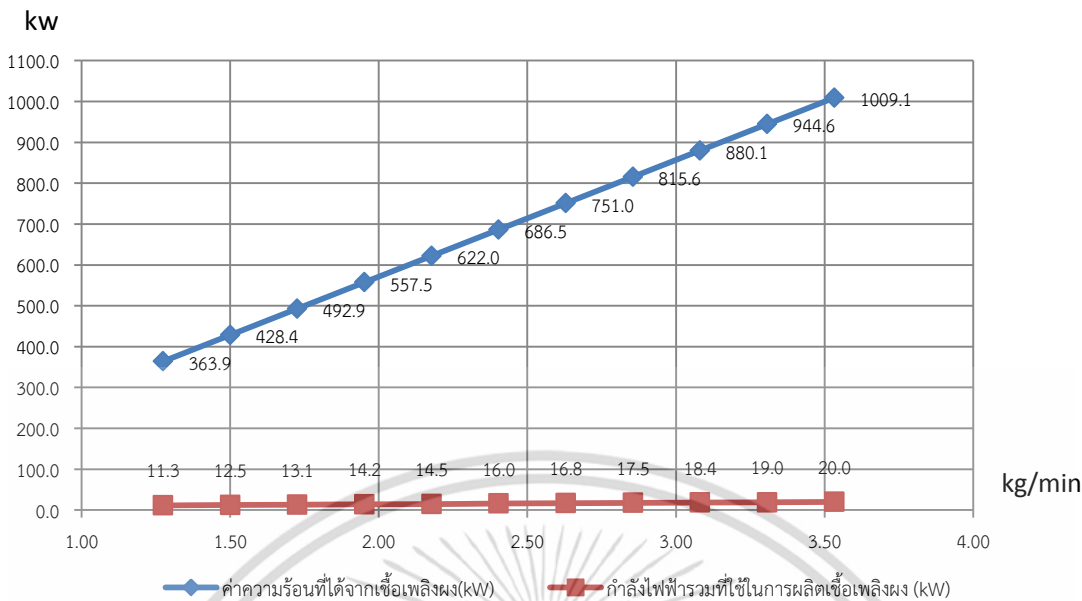


(จ) กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิดรูปที่ 7.29 ผลการจำลองอนุภาคคาร์บอนในระบบของกรณีต่างๆ

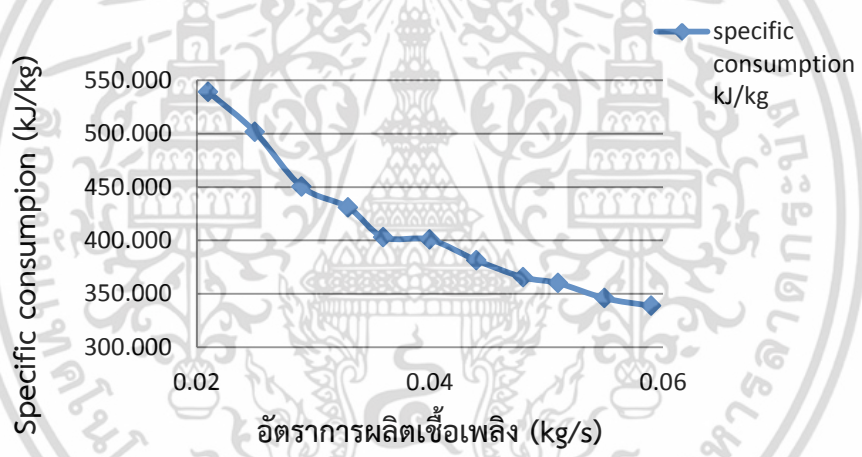
ตารางที่ 7.5 ผลการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้

กรณี	อนุภาคคาร์บอนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ (\dot{m}_{unburn}) (kg/s)	ประสิทธิภาพการเผาไหม้
ซินกัทธ (ตะแกรง 0.5 mm)	9.712×10^{-4}	89.38%
กรณีพื้นฐาน	1.030×10^{-3}	88.74%
ติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล	5.884×10^{-4}	93.57%
กรณีติดตั้งแผ่นปิด	1.090×10^{-3}	88.09%
กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลร่วมกับแผ่นปิด	6.17×10^{-4}	93.26%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.30 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมเชื้อเพลิงที่กำลังความร้อนต่างๆ[24]



รูปที่ 7.31 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการเตรียมเชื้อเพลิง[24]

7.5 อภิปรายข้อดี ข้อเสีย ของการติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล

เมื่อย้อนกลับไปที่ปัญหาเริ่มต้น ที่เครื่องบด pin mill แบบเก่าที่ชินภัทรใช้บดเชื้อเพลิงผ่านตะแกรง 0.5 mm ซึ่งมีอัตราการผลิตต่ำ และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการเตรียมเชื้อเพลิงสูง ไม่สามารถตอบสนองต่อการนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เพราะนอกจากจะบดเชื้อเพลิงไม่ทันใช้แล้วยังสิ้นเปลืองพลังงานอีก ซึ่งปัจจุบันการใช้เครื่องบดแบบใหม่ชนิด hammer mill สามารถบดเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่องที่ขนาดตะแกรง 1 mm โดยที่อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการเตรียมเชื้อเพลิงต่ำกว่าอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามหากนำเชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm มาทำการเผาไหม้โดยไม่มีกรติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ต้องแลกมากับการที่ไม่สามารถทำการเผาไหม้ได้ ซึ่งได้นำเสนอไปแล้วในผลการทดลองของกรณีพื้นฐาน แต่เมื่อทำการติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล สามารถทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่าเดิม ซึ่งพลังงานจากการเตรียมเชื้อเพลิง มีค่าเพียง 2.12% เมื่อเทียบกับความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

แผ่นขวางกั้นช่องการไหลส่งผลอย่างไรต่อระบบลำเลียงอากาศ

แผ่นขวางกั้นช่องการไหลส่งผลโดยตรงต่อระบบลำเลียงอากาศปฐมภูมิ จากรูปที่ 5.13 พัฒมทำงานเต็มกำลัง 100% อากาศจะไหลผ่านวาล์วปีกผีเสื้อ ที่มี differential transmitter วัดความดันตกคร่อมแผ่นออริฟิส ซึ่งอัตราการไหลของอากาศสัมพันธ์กับสมการที่ (5.4) เมื่อติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ทำให้ความดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อรักษาอัตราการไหลของอากาศให้มีค่าเดิม วาล์วจะทำการเปิดเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่ได้ส่งผลต่อพลังงานของพัฒม สำหรับวาล์วปีกผีเสื้อที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ พบว่าหากเปิดขึ้นถึง 70% จะไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ เนื่องจากที่ 70% วาล์วจะเท่ากับเปิด 100% แต่สำหรับการทดลองปัจจุบันไม่พบปัญหานี้ เนื่องจากทดลองที่กำลังความร้อน 300 kW พบว่า %วาล์วไม่เปลี่ยนแปลงมากจากกรณีที่ไม่ติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล นอกจากนี้ อากาศปฐมภูมิมีย่อตราส่วนเพียง 15% ของอากาศรวมทั้งหมด แต่อากาศหากมีผู้วิจัยเรื่องการเพิ่ม Blockage ratio ของแผ่นขวางกั้นช่องการไหล การเพิ่มสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ หรือเดินเครื่องที่กำลังความร้อนสูงขึ้นกว่านี้ อาจจะต้องปรับปรุงระบบลำเลียงเชื้อเพลิงใหม่ เพราะอาจเกิดการตันของท่อลำเลียงเชื้อเพลิง หรือไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิได้

แผ่นขวางกั้นช่องการไหลส่งผลอย่างไรต่อพัฒม ID fan

ในส่วนของพัฒม ID fan จะทำงานคงที่ โดยใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมรอบความถี่กระแสไฟฟ้าที่ 10 Hz ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้ศึกษาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนความถี่กระแสไฟฟ้าของ ID fan ที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ สำหรับแผ่นขวางกั้นช่องการไหล มีขนาดสเกลที่เล็กมากหากเทียบกับพัฒม ID fan ที่สร้างความดันลบให้ทั้งระบบ ดังนั้นสิ่งที่น่าคำนึงถึงมากกว่าคือระบบลำเลียงเชื้อเพลิง

บทที่ 8

สรุป และข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ ศึกษาการนำแผ่นปิด (swirl plate) และแผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body) มาใช้ในการทำให้เปลวไฟของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น ที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm ขนาดกำลังความร้อน 300kW มีความเสถียร ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 15% โดยที่เปลวไฟไม่ดับ เพื่อลดการใช้พลังงานจากการบดเชื้อเพลิงผ่านตะแกรง 0.5 mm แบบเดิมที่ซินภัทร ชูการทำการทดลอง โดยวิธีการวิจัย แบ่งออกเป็น การจำลองด้วยวิธีการเชิงตัวเลข และการทดลองการเผาไหม้จริง กรณีที่ทำการศึกษาคือ กรณีพื้นฐาน โดยทำการจำลองและทดลอง การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm เปรียบเทียบกับการจำลองเมื่อเชื้อเพลิงถูกบดผ่านตะแกรง 0.5 mm (กรณีของซินภัทร) และเปรียบเทียบกับ การทดลองของซินภัทร ต่อมาก็คือ กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล หรือแผ่นปิด ทำการจำลองและการทดลองโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm

ผลการจำลอง และการทดลองกรณีพื้นฐาน

ผลการคำนวณตัวเลขการหมุนควงจากโครงสร้าง มีค่า 0.2 ซึ่งอยู่ในย่านการหมุนควงอย่างอ่อน ภายหลังจากการคำนวณจากผลการจำลองพบว่าตัวเลขการหมุนควงมีค่า 0.74 อยู่ในย่านการหมุนควงระดับเข้ม มีความน่าเชื่อถือกว่า เนื่องจากค่า σ ของตัวโครงสร้างมีค่า 1.58 ซึ่งหากเกิน 1 จะมีความคลาดเคลื่อน สำหรับผลการจำลองกรณี พื้นฐานได้เสนอว่า ถ้าจะใช้กรณีนี้ทำการเผาไหม้ ต้องใช้เชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 0.5 mm (กรณีของซินภัทร) เพราะมีการกระจายอนุภาคน้อยกว่ากรณีใช้เชื้อเพลิง 1 mm มีการปลดปล่อยสารระเหยสูงกว่า และมีการกระจายของอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุด ไปที่ผนัง ในส่วนของการทดลอง พบว่าการใช้เชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm เมื่อหยุดการใช้แก๊ส LPG เปลวไฟไม่มีเสถียรภาพ เนื่องจากอิทธิพลของอากาศปฐมภูมิพัดพาเชื้อเพลิงออกจากห้องเผาไหม้ช่วย อย่างรวดเร็ว ทำให้เชื้อเพลิงมีช่วงเวลาในการเผาไหม้น้อย เปลวไฟจึงดับ สอดคล้องกับผลการจำลอง ในขณะที่ การทดลองการใช้เชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 0.5 mm ของซินภัทร ชูการ เปลวไฟหลังการหยุดแก๊ส LPG ยังคงเผาไหม้ต่อไปได้ ดังนั้น ในกรณีพื้นฐาน ซึ่งมีตัวเลขการหมุนควงอยู่ในย่านการหมุนควงอย่างเข้ม การใช้ประโยชน์จากกระแสไหลวน อาจใช้ได้กับ เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่มีขนาดเล็ก

ผลการจำลอง และการทดลองกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล

ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้แผ่นขวางกั้นช่องการไหลรูปจาน มีที่ค่า blockage ratio เท่ากับ 0.42 และมีมุมขวางกั้น $\alpha = 45^\circ$ เพื่อใช้ประโยชน์จากกระแสไหลวน และเบี่ยงเบนให้เชื้อเพลิง กระจายไปที่ผนังของห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้น จากผลการจำลองได้เสนอว่า การติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ทำให้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ช่วย มีอนุภาคน้อยกว่ากรณีพื้นฐาน ซึ่งเกิดจากการปลดปล่อยสารระเหย ที่มีความเข้มข้นสูงอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่บริเวณ wake ของแผ่น มีออกซิเจนที่ทำให้ปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงครอบคลุมบริเวณกว้าง และมีการกระจายของอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุด ไปที่ผนังของห้องเผาไหม้ช่วย นอกจากนี้ ผลการจำลองกระจายความเร็วในห้องเผาไหม้ช่วย พบว่ามีบริเวณที่มีความเร็วต่ำเป็นวงกว้างกว่ากรณีพื้นฐานอย่างมาก เป็นผลจากกระแสนอนกลับที่มีค่าสูง ซึ่งเกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลของกระแสไหลวน จากตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี ผสมกับกระแสไหลวนที่เกิดจากแผ่นขวางกั้นช่องการไหล จากการทดลองพบว่า การติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล สามารถทำให้เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นเพียงอย่างเดียว มีความเสถียร ที่อากาศส่วนเกิน 15 % และสามารถเพิ่มเป็น 50% ได้โดยที่เปลวไฟนั้น ยังคงเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง ระหว่างการทดลองสังเกตเห็นอนุภาคมีการกระจายไปที่ผนังของห้องเผาไหม้ในปริมาณมาก เปลวไฟสว่างลุกท่วมห้องเผาไหม้ ความยาวของเปลวไฟที่วัดจากทางออกของหัวเผา มีความยาวมากกว่า 0.3 m มีการปลดปล่อย CO ที่ท่อทางออก ในระดับต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองที่ได้ นอกจากนี้มีการปลดปล่อย NO_x ในระดับสูงซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิที่สูงดังกล่าว และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่คำนวณจากการใช้ผลจำลองอนุภาคคาร์บอนในระบบถึง 93.57% เมื่อเทียบกับกรณีของซินกัทร์ ที่มีประสิทธิภาพการเผาไหม้เพียง 89.38% ดังนั้นการใช้แผ่นขวางกั้นช่องการไหลติดตั้งเข้ากับระบบเดิมก็เพียงพอที่จะทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิง ที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm มีความเสถียร และลดการใช้พลังงานจากการบดเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็ก

กรณีติดตั้งแผ่นบิต

แผ่นบิตมีลักษณะเป็นตัวสร้างการหมุนควงตามแนวแกน มุมตรงข้ามปะทะการไหลเท่ากับ 60° มีจำนวนใบบิตเท่ากับ 6 ใบ ถูกติดตั้งไว้ที่ช่องทางออกของกล่องลม จากการคำนวณตัวเลขการหมุนควงโดยโครงสร้าง มีค่าเท่ากับ 1.16 ซึ่งอยู่ในย่านการหมุนควงอย่างเข้ม ภายหลังทำการคำนวณจากผลการจำลอง พบว่าตัวเลขการหมุนควงมีค่าเพียง 0.59 ผลการจำลองพบว่า การติดตั้งแผ่นบิต มีการปลดปล่อยสารระเหยในระดับต่ำกว่าทุกกรณี ออกซิเจนที่ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ช่วยคลอบคลุมบริเวณแคบ มีการกระจายความเร็วต่ำ ทำให้มีการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าการปลดปล่อย CO ในระดับที่สูงกว่า กรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล อีกด้วย จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการหยุดการใช้แก๊ส LPG เปลวไฟค่อยๆดับ เนื่องจากอุณหภูมิตกลงอย่างต่อเนื่อง และก่อนเปลวไฟดับ สังเกตเห็นฝุ่นของอนุภาคพุ่งไปยังด้านหน้าด้วยความเร็วสูง เนื่องจากอิทธิพลของอากาศปฐมภูมิ ย้อนกลับมาที่ตัวเลขการหมุนควงของกรณีติดตั้งแผ่นบิต อาจมีตัวเลขการหมุนควงอยู่ในย่าน การหมุนควงระดับปานกลาง ดังที่คำนวณได้จากผลการจำลอง ซึ่งไม่ได้ อยู่ในย่านการหมุนควงอย่างเข้ม แบบสมมติฐาน ซึ่งอาจเกิดจากเป็นการติดตั้งซ้อนกันระหว่างแผ่นบิตกับตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี ที่อยู่ในกล่องลม ซึ่งทำให้ค่าองค์ประกอบความเร็วตามแนวสัมผัส \bar{W} มีค่าลดลงจากกรณีพื้นฐาน 3.94 m/s เหลือ 3.70 m/s และองค์ประกอบความเร็วตามแนวแกนเพิ่มขึ้นจากเดิม 3.59 m/s เป็น 4.20 m/s

กรณีติดตั้งแผ่นบิตร่วมกับแผ่นขวางกั้นช่องการไหล

จากผลการจำลองที่ได้ มีความใกล้เคียงกันกับกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล แต่มีการกระจายอุณหภูมิต่ำกว่า และมีการปลดปล่อย CO สูงกว่า ในการทดลองพบว่า สามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟที่อากาศส่วนเกิน 15 % และสามารถเพิ่มเป็น 50% ได้โดยที่เปลวไฟนั้น ยังคงเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง เช่นเดียวกันกับกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และมีการกระจายอุณหภูมิต่ำกว่า และการปลดปล่อย CO สูงกว่า เช่นเดียวกันกับผลการจำลอง การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของกรณีนี้ คาดว่าเกิดจากการติดตั้งแผ่นบิตร่วมด้วย ทำให้บริเวณที่มีกระแสไหลวนแคบลง ทำให้กระแสน้อนกลับลดลงจากกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหลเพียงอย่างเดียว เชื้อเพลิงจึงคลุกเคล้า

ในห้องเผาไหม้ได้ไม่ตีพอสั่งสอดคล้องกับ %O₂ที่มากกว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกันช่องการไหลเพียงอย่างเดียว

8.2 ข้อเสนอแนะ

หัวข้อนี้จะนำเสนอ ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการจำลอง และการทดลอง เพื่อประโยชน์ในการทำวิจัยของผู้ที่จะนำไปศึกษาต่อ

การจำลอง

ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการจำลองมีดังนี้

1. กำหนดให้มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างห้องเผาไหม้ช่วยกับผนัง เพื่อให้ผลลัพธ์มีความถูกต้องมากขึ้น
2. ทำการศึกษาแผ่นขวางกันช่องการไหล ทางด้านการออกแบบโครงสร้าง (geometry design) เช่น ค่า blockage ratio เพื่อจำลองการเผาไหม้เปรียบเทียบกับหลายๆกรณี และเพิ่มขนาดกำลังความร้อนมากกว่า 300kW
3. ทำการเปลี่ยนมุมของแผ่นปิด แล้วทำการจำลองเพื่อเปรียบเทียบตัวเลขการหมุนควง หากยังมีค่าต่ำกว่ากรณีพื้นฐาน ควรศึกษาแผ่นปิดรูปทรงอื่น หรือ ศึกษาจำนวนช่องของแผ่นปิด

การทดลอง

เนื่องจากความขึ้นของเชื้อเพลิงเปลี่ยนไปตามสภาพภูมิอากาศในการทดลอง อาจส่งผลต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ต่ำลงได้ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ยาก และค่าใช้จ่ายที่ส่งเชื้อเพลิงไปวิเคราะห์แต่ละครั้งมีต้นทุนสูง ดังนั้นผู้วิจัยในอนาคตอาจเลี่ยงปัญหาดังกล่าวด้วยการวางแผนการทดลองให้มีประสิทธิภาพ โดยนำเชื้อเพลิงที่ได้มาวัดและทดลองในเวลาเดียวกันในเดือนที่ไม่มีฝนตก หรือการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศมากนัก

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชินภัทร ชูการ. การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม. ปรินญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [2] Yonmo SUNG et al . “Effectiveness between swirl intensity and air staging on NOx emissions and burnout characteristics in a pulverized coal fired furnace.” Fuel processing technology 139. 2015. pp. 15-24.
- [3] Ying Huang, Vigor Yang. “Effect of swirl on combustion dynamics in a lean premixed swirl-stabilized combustor.” Proceedings of the Combustion Institute 30, 2005. pp. 1775-1782
- [4] J.M. Beer, N.A. Chigier. **Combustion aerodynamics**. Fuel and energy science series, University of Sheffield. Applied science. 1972.
- [5] N. Syred and J. M. Beer. “Combustion in swirling flow : A review.” Combustion and flame 23, 1974. pp. 143-201.
- [6] Minghou Xu et al. “Investigation of particle dynamics and pulverized coal combustion in a cavity bluff-body burner.” Fuel 74. 1995. pp. 1913-1917.
- [7] Bing Liu et al. “Improvement of ignition prediction for turbulent pulverized coal combustion with EDC extinction model.” Fuel 181. 2016. pp. 1265-1272
- [8] Jun Li et al. " Flame characteristics of pulverized torrefied-biomass combusted with high-temperature air." Combustion and Flame 160. 2013. pp.2585-2594.
- [9] ธนภัทร ภัคตีรวรงค์. "การจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556."
- [10] Sjaak van Loo, Jaap Koppejan. “The handbook of biomass combustion & co-firing.” Earthscan. 2008
- [11] สมรัฐ เกิดสุวรรณ. การเผาไหม้และการควบคุมมลพิษ. ปทุมธานี. สกายบุ๊กส์. 2549.
- [12] Stephen R. Turns. **An Introduction to Combustion Concept and Applications**. third edition. Singapore. Mc Graw Hill. 2012.
- [13] สำเร็จ จักรใจ. การเผาไหม้ (Combustion). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.
- [14] H K Versteeg and W Malalasekera. “An introduction to combustional fluid dynamics, The finite volume method.” second edition. Pearson Education. 2007.
- [15] ANSYS FLUENT ver.12.0. Theory guide.
- [16] K.B. Lee et al. Combustion and flame 6, 1962. pp. 137-145.
- [17] B.F. Magnussen and B.H Hjertager. “On mathematical models of turbulent

combustion with special emphasis on soot formation and combustion.” The combustion institute. 1976.

[18] M.M Baum and P.J. street. “Predicting the combustion behavior of coal particles”, Combustion science tech, 1972. pp. 231-243

[19] K.K Pillai. “Influence of coal type on devolatilization and combustion behavior of coal particles”, Combustion science tech, 1972. pp. 237-252

[20] “Rate of combustion of size-Graded fractions of char from a low rank coal between 1200k-2000k.” combustion and flame 13. 1969. pp. 237-252

[21] W.E. Ranz et al. “Evaporation of drops.” Part I. Chem.Eng.Prog 48(3). 1952. pp. 141-146.

[22] H. Ounis et al. “Mechanism Brownian diffusion of sub micrometer particles in the viscous sub layer.”, Colloid and interface science 143(1). 1999. pp. 266-277.

[23] สิริธิดา สุขทั่ว. “การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลและเส้นทางเดินอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลผง ในเครื่องบดคัดแยกอนุภาคแบบไซโคลน.” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[24] พีรพัฒน์ เทพลีป. “การพัฒนาระบบควบคุมการไหลของอากาศ และเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงแข็งชนิดผง ขนาด 1 MW.” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

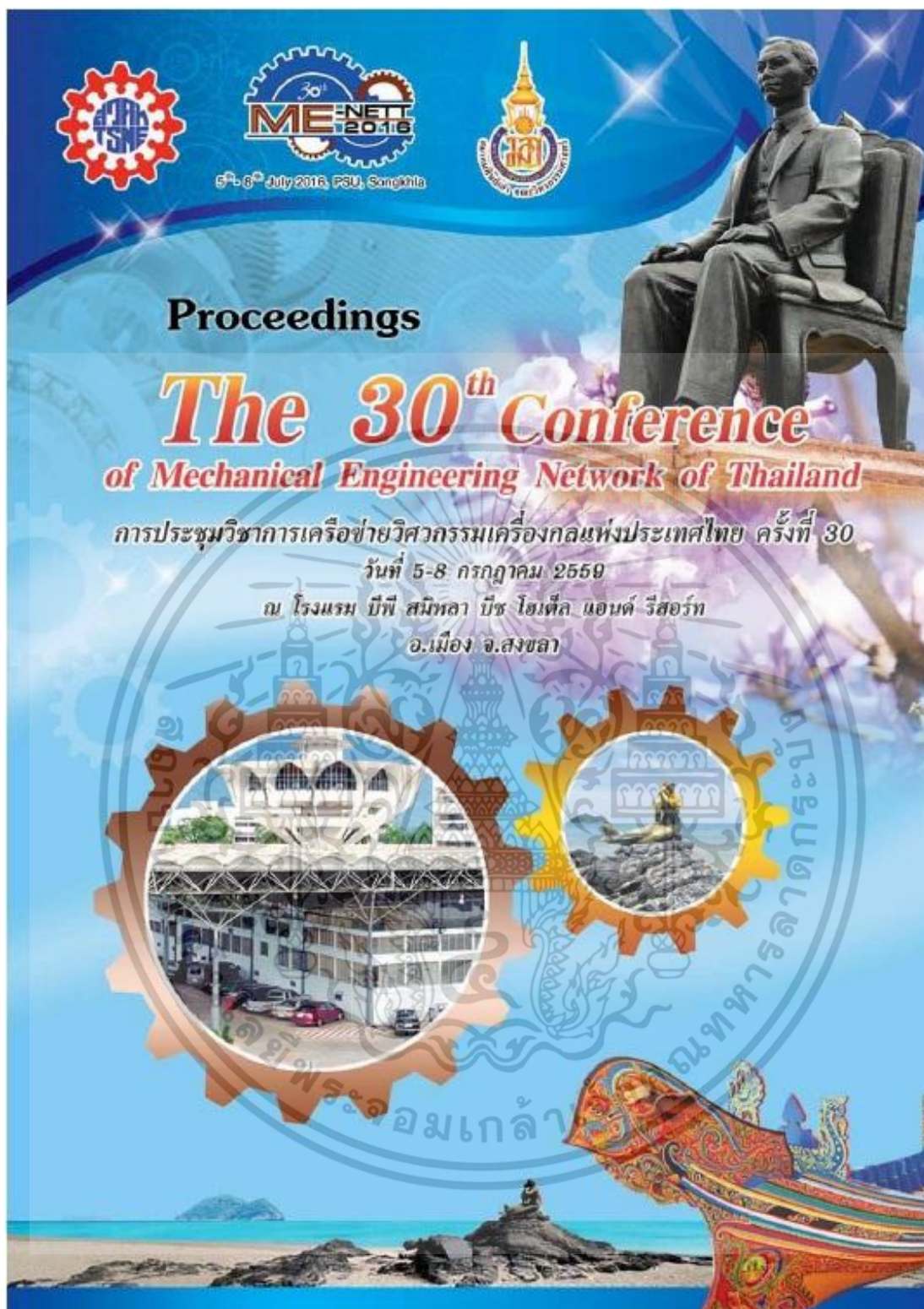
[25] นันทพล จันคง. “การพัฒนาระบบควบคุมและตรวจจับสัญญาณการเผาไหม้สำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง.” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[26] H.J. Sheen et al. “Correlation of swirl number for a radial-type swirl generator.” Experiment thermal and fluid science 12. 1996. pp. 444-451.



ภาคผนวก ก.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST0004

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



การตรวจสอบอิทธิพลของการไหลหมุนควงในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง
สำหรับหม้อไอน้ำในอุตสาหกรรมด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลข
Investigation on Effect of Swirling Flow in the Pulverized Biomass Burner for
Industrial Boiler by Using Numerical Simulation

พงษ์พันธ์ แก่นพรม, นิวัฒน์ สุขสาม, จารุวัตร เจริญสุข และ ณัฏวิภา เข็ชะโนวชระ*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
*ติดต่อ: โทรศัพท์ : 023 264 197 , โทรสาร : 023 264 198, E-mail : kjyipap@mit.lac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการตรวจสอบอิทธิพลของการไหลหมุนควงด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ ที่กำลังความร้อน 500 kW โดยการเปลี่ยนมุมของใบพัดของตัวสร้างการหมุนควงแบบรัศมี ขนาดมุม 60, 80 และ 100 องศา และทำการดัดแปลงการจำลองโดยการเปลี่ยนเงื่อนไขเริ่มต้น ผลการจำลองทั้งสองแบบพบว่ามีเพียงมุม 100 องศาเท่านั้นที่ให้ผลลัพธ์เข้าสู่สภาวะ สอดคล้องกับกราฟทดลองของ ชินนัพัต สุรการ และคณะ ที่พบว่าเมื่อมุมของใบพัดเท่ากับ 60 และ 80 องศาการไหลหมุนควงมีความรุนแรงน้อยจนไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ เมื่อทำการคำนวณตัวเลขการหมุนควงพบว่ามุม 60, 80 และ 100 องศา มีค่าเท่ากับ 0.15, 0.48, และ 0.94 ตามลำดับ จากนั้นทำการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสองโดยใช้มุมของใบพัดเท่ากับ 100 องศาพบว่าตัวเลขการหมุนควงเพิ่มขึ้นเป็น 51.06% ทำให้การเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงและปฏิกิริยาการเผาไหม้สิ้นสุดภายในเตาเผา

คำหลัก: การไหลหมุนควง; เชื้อเพลิงชีวมวล; การจำลองการเผาไหม้

Abstract

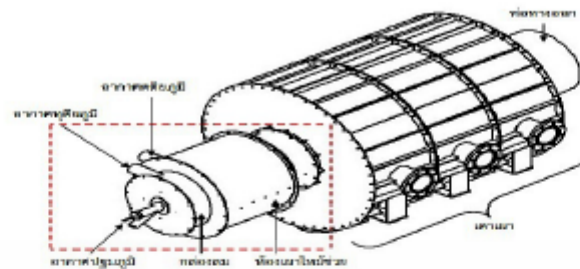
This research aims at the investigation on effect of swirling flow with 3D numerical simulations of 500 kW thermal throughput biomass combustor by changing the angle of blade in the radial-type swirl generator with 60, 80 and 100 degrees. The model was then modified at inlet for simplicity and reduction of computer resource while maintaining predictive quality at acceptable level. The simulation results showed that only 100 degree angle that gives the result converges to answer in accordance with the experimental by Chinnapat Turakarn et al where it had been reported that when the angle is 60 and 80 degrees swirling flow is less and unable to stabilize the flame. When calculating the swirl number, it was found that for 60, 80 and the 100 degree angles, the swirl number were at 0.15, 0.48 and 0.94, respectively. The installation of the second swirler at 100 degree resulted in an increase in swirl number for 51.06%. Consequently, higher temperature was evident and the reaction was completed inside a furnace.

Keywords: Swirling flow; Biomass; Combustion simulation

1. บทนำ

การใช้พลังงานทดแทนในประเทศไทยมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลมาจากนโยบายส่งเสริมการผลิตการใช้พลังงานทดแทน โดยใช้ฐานอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพ

จากข้อมูลของกระทรวงพลังงาน [1] พบว่าการใช้พลังงานทดแทน จะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนมากที่สุด โดยมีการนำเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (wood pellets) มาใช้กันอย่างแพร่หลาย ในส่วนของการผลิตพลังงานไฟฟ้า ยุทธศาสตร์ที่ไทยเปิดปฏิรูปการเผาไหม้ของ



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของระบบ

เชื้อเพลิงคือ หัวเผา (burner) ซึ่งนำความร้อนที่ได้ไปผลิตไอน้ำ ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดี หัวเผาจะต้องพัฒนาให้เหมาะสมกับขนาดกำลังความร้อนที่ใช้ ในส่วนของการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ อิทธิพลการไหลหมุนควงของอากาศเป็นตัวแปรสำคัญอย่างหนึ่งที่ทีมวิจัยเลือกทำการศึกษา

สำหรับการศึกษาในอดีต ชินภัทร ชูธรรม และคณะ [2] ทำการจำลองการเผาไหม้ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขแบบ 2 มิติ และทำการทดลองหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบคูลงที่มีห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ขนาด 500 kW พบว่าที่อัตราส่วนอากาศเท่ากับ 1 ผลของใบพัดของตัวสร้างการหมุนควงการเผาไหม้ที่ 100 องศา ก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ดี และรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟไม่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เป่าดับ (blow off) เมื่อเทียบกับผลที่ได้ดีกว่า

งานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นจากการนำเงื่อนไขการทดลองการเผาไหม้ 500 kW ของ ชินภัทร ชูธรรม [2] และคณะ มาทำการจำลองด้วยวิธีการเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ โดยกำหนดมุมของใบพัดเท่ากับ 60, 80 และ 100 องศา จากนั้นนำผลการจำลองที่ได้ในรูปของความเร็วตามแนวแกน (axial velocity) และความเร็วตามแนวสัมผัส (tangential velocity) มาคำนวณหาตัวเลขการหมุนควง (swirl number) ตามที่ H.J. Sheen และคณะ [3] ได้นำเสนอวิธีการคำนวณตัวเลขการหมุนควงของตัวสร้างการหมุนควงแบบรัศมี (radial type swirl generator) จากนั้นนำค่าองค์ประกอบความเร็ว (velocity component) ที่ได้มาจำลองใหม่เพื่อการเข้าสู่เซลล์ที่เร็วขึ้น ทีมวิจัยคิดว่า หากสามารถเพิ่มตัวเลขการหมุนควงการไหลของอากาศทุติยภูมิ (secondary air) จะ

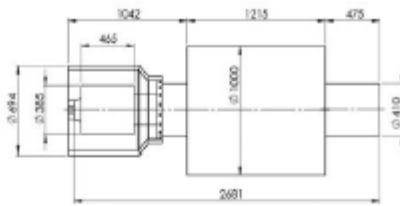
สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ดีขึ้น เนื่องจากก่อให้เกิดกระแสไหลวนกลับ [4] ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ ตลอดจนรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟและมีการเผาไหม้ที่รุนแรงขึ้น [5-6] ดังนั้นทีมวิจัยจึงทำการจำลองนำตัวสร้างการหมุนควงลำดับสอง ที่มีมุมของใบพัดเท่ากับ 30 องศา มาติดตั้งที่ช่องทางออกของลมกล่อลม จากนั้นนำผลการจำลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้ง

2. ส่วนประกอบของระบบ

จากรูปที่ 1 ส่วนที่อยู่ในกรอบเส้นประคือหัวเผา ซึ่งประกอบไปด้วยท่อทางเข้าอากาศสามส่วน กลังลม (wind box) และห้องเผาไหม้ช่วย สำหรับอากาศทั้งสามส่วนประกอบด้วยอากาศปฐมภูมิ (primary air) อากาศทุติยภูมิ (secondary air) และ อากาศตติยภูมิ (tertiary air) โดยอากาศปฐมภูมิ ทำหน้าที่ลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่หัวเผา อากาศทุติยภูมิทำหน้าที่ลำเลียงอากาศเข้าสู่กลังลม ซึ่งภายในติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงการเผาไหม้แบบรัศมี สามารถปรับมุมของใบพัดได้ตั้งแต่ 60 - 100 องศา ทำให้เกิดการหมุนควงการไหลของอากาศ ส่วนอากาศตติยภูมิจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างผนังด้านนอกของปูนทนไฟกับโครงเหล็กที่ครอบอยู่ แล้วไหลออกบริเวณรอยต่อของห้องเผาไหม้ช่วยกับเตาเผา เพื่อหล่อเย็นห้องเผาไหม้ช่วย และทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ช่วย บริเวณเตาเผารูปทรงกระบอกนั้น ภายในจะได้รับความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ ที่ส่วนท้ายของเตาเผาคือช่องทางออกที่เชื่อมต่อกับระบบบำบัดที่มีพัดลมดูดเพื่อสร้างความดันลบ หรือ ID fan สำหรับขนาดของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 2

CST0004

การปฏิรูปวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



รูปที่ 2 ขนาดของระบบในหน่วยมิลลิเมตร (mm)

3. การจำลองด้วยวิธีการเชิงตัวเลข

งานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 12.0 ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยใช้พิกัดทรงกระบอก r, θ, z เป็นพิกัดอ้างอิง 3 มิติ แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลกับของแข็งเลือกใช้รูปแบบ discrete phase model แบบจำลองการเผาไหม้เลือกใช้ eddy-dissipation model และรูปแบบการไหลปั่นป่วนเลือกใช้สมการ $k-\epsilon$ มาตรฐาน สำหรับตัวแปรควบคุมในการจำลองแสดงได้ดังตารางที่ 1

การเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม ได้ใช้กริดรูปทรงหลายหน้า (polyhedra) ที่มีจำนวน 485,965, 603,046, 1,438,786 กริด โดยพบว่าจำนวนกริดที่ 603,046 กริด ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการทดลอง เมื่อเทียบกับจำนวน 485,965 และ 1,438,786 กริด ซึ่งไม่สามารถให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกับการทดลอง ดังนั้นจึงใช้กริดที่มีจำนวนเท่ากับ 603,046 กริดในการจำลอง

ตารางที่ 1 ตัวแปรควบคุมในการจำลอง

ตัวแปรควบคุม	ปริมาณ
อัตราป้อนเชื้อเพลิง (kg/s)	0.0317
อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (kg/s)	0.0223
อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (kg/s)	0.1449
อัตราการไหลของอากาศตติยภูมิ (kg/s)	0.0557
อากาศส่วนเกินความเฉื่อย (%)	15
มุมของใบพัด (°)	60,80,100
อุณหภูมิทางเข้าของหัวเผา (K)	313
อุณหภูมิผนังเตา (K)	773
ความดันบรรยากาศ (Pa)	101325
ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)	-9.81

3.1 ผลการจำลองการเผาไหม้เมื่อเปลี่ยนมุมของใบพัด

ลักษณะการอ้างอิงมุมของใบพัดแสดงได้ดังรูปที่ 3 สำหรับการคำนวณตัวเลขการหมุนควง [3] สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S = \frac{\int_0^R \bar{U} \bar{W}^2 r dr}{R \int_0^R \bar{U}^2 r dr} \quad (1)$$

เมื่อ S คือตัวเลขการหมุนควง, \bar{U} คือความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน, \bar{W} คือความเร็วเฉลี่ยตามแนวสัมผัส, r คือตำแหน่งตามแนวรัศมี, R คือรัศมีช่องทางออกของลมทุติยภูมิ การคำนวณองค์ประกอบความเร็วสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\bar{V}_z = \frac{\bar{U}}{\sqrt{\bar{U}^2 + \bar{W}^2}} \quad (2)$$

$$\bar{V}_r = \frac{\bar{W}}{\sqrt{\bar{W}^2 + \bar{U}^2}} \quad (3)$$

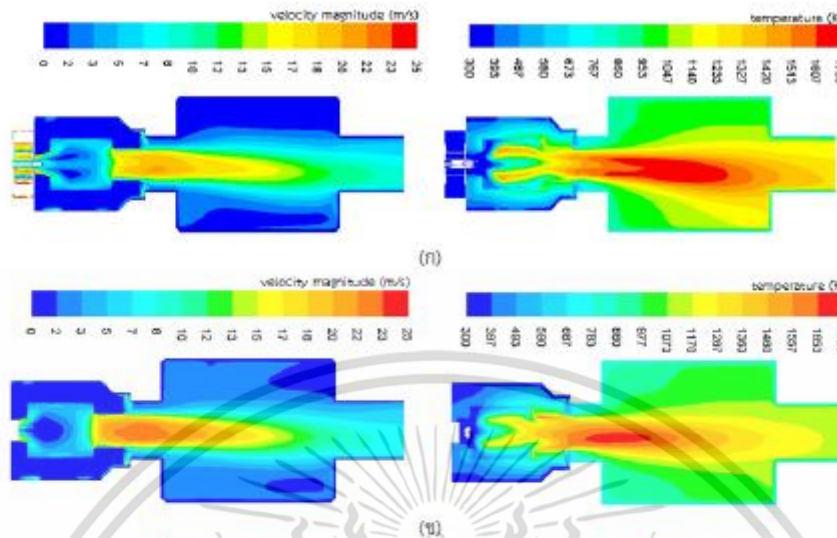
เมื่อ \bar{V}_z และ \bar{V}_r คือองค์ประกอบความเร็วตามแนวแกนและองค์ประกอบความเร็วตามแนวสัมผัสตามลำดับโดย $\sqrt{\bar{V}_z^2 + \bar{V}_r^2} = 1$

ผลการจำลองพบว่ามุมของใบพัดเท่ากับ 60 และ 80 องศาไม่เข้าสู่ค่าสอบ เกิดจากการไหลหมุนควงในหัวเผาไม่เพียงพอ ทำให้ความร้อนถูกเป่าออกไป ซึ่งไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟไว้ได้ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ ซินทิธา สุวการ และคณะ [2] ที่พบว่าเมื่อมุมของใบพัดเท่ากับ 60 องศาการไหลหมุนควงในท้องเผาไหม้มีความรุนแรงน้อยกว่าจนไม่สามารถสร้างกระแสความปั่นป่วนในท้องเผาไหม้ช่วยได้ ในขณะที่มุม 80 องศาความรุนแรงของการไหลหมุนควงยังคงน้อยกว่ามุม 100 องศาซึ่งเสียต่อการเป่าดับของเปลวไฟ ขณะที่ผลการจำลองมุมของใบพัดเท่ากับ 100 องศาเข้าสู่ค่าสอบ โดยมีการกระจายความเร็วและการกระจายอุณหภูมิในท้องเผาไหม้แสดงได้ดังรูปที่ 4 (ก)



รูปที่ 3 การวัดขนาดมุมของใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 ผลการจำลองการกระจายความเร็ว และการกระจายอุณหภูมิในท้องเผาใหม่ ที่มุมของใบพัดเท่ากับ 100 องศา (ก) การจำลองปกติ (ข) การจำลองโดยตัดแปลงเงื่อนไขที่ทางเข้า

ผลการจำลองจะแสดงเพียงการจำลองที่ใช้มุมของใบพัดเท่ากับ 100 องศา ซึ่งเป็นกรณีเดียวที่ใส่เข้าสู่ค่าคอม ใน ส่วนของมุม 60 และ 80 องศา จะนำเลขเพียงตัวเลข การหมุนควงที่ไฟให้เห็นว่ามีความค่าสูงกว่า 100 องศา อย่างมาก

3.2 ผลการจำลองการเผาใหม่เมื่อทำการตัดแปลงเงื่อนไขที่ทางเข้า

ทำการเปลี่ยนเงื่อนไขทางเข้าของการจำลองด้วยการลดภาวะการคำนวณในส่วนของกล้องโดยใช้ค่าความเร็วจากผลการจำลองเดิมช่วงต้นน้ำ (upstream) ที่มีความถูกต้องมาทำการคำนวณหาค่าประกอบความเร็วตามสมการที่ (2) กับ (3) และคำนวณหาตัวเลขการหมุนควงตามสมการที่ (1) ผลการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 2 จากนั้นนำองค์ประกอบความเร็วที่ได้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นเข้าสู่การจำลองการเผาใหม่อีกครั้ง ผลการคำนวณที่แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าที่มุมของใบพัดเท่ากับ 60 และ 80 องศา มีความตัวเลขการหมุนควงเพียง 0.15 และ 0.48 ตามลำดับ ในขณะที่มุม 100 องศา มีความตัวเลขการหมุนควงเท่ากับ 0.94 ผลการจำลองพบว่าที่มุมของใบพัดเท่ากับ 60 และ 80 องศา ไม่เข้าสู่ค่าตอบน สาเหตุเกิดจากการ

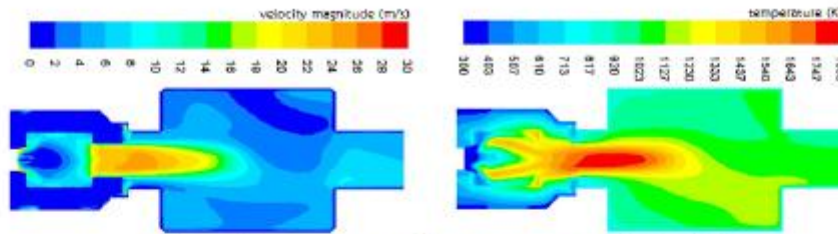
ไหลหมุนควงในท้องเผาใหม่มีความรุนแรงน้อย ในขณะที่มุมของใบพัดเท่ากับ 100 องศาจึงให้ผลลัพธ์เข้าสู่ค่าตอบนซึ่งสอดคล้องกับวิธีการจำลองปกติที่ผ่านมาโดยมีผลการจำลองการกระจายความเร็วและอุณหภูมิแสดงได้ดังรูปที่ 4 (ข) จะเห็นว่าข้อดีของการตัดแปลงเงื่อนไขที่ทางเข้าของการจำลองคือ เราสามารถกำหนดตัวเลขการหมุนควงในรูปขององค์ประกอบความเร็ว เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลองได้ โดยไม่ต้องทราบความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัสที่สามารถคำนวณได้จากโปรแกรมเมื่อทำการจำลองที่สภาวะการไหลอย่างเฉื่อย (cold flow) ซึ่งจะมีวิธีการนี้ไปใช้ในหัวข้อที่ 3.3 ที่ทำการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงสำหรับคำนวณ

วิธีนี้เพียงแค่ลดเวลาในการคำนวณ ในส่วนของการคำนวณจะต้องทำการอธิบายในหัวข้อที่ 4 ต่อไป

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณตัวเลขการหมุนควง

มุม	\bar{U}	\bar{V}	\bar{V}_r	\bar{V}_t	S
60	8.31	1.90	0.98	0.22	0.15
80	6.60	4.71	0.81	0.58	0.48
100	6.11	8.55	0.58	0.81	0.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 ผลการจำลองการกระจายความเร็ว และการกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่มีมุมของใบพัดเท่ากับ 100 องศา เมื่อทำการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสอง

3.3 ผลการจำลองการเผาไหม้เมื่อทำการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสอง

จากผลการจำลองการเผาไหม้ เมื่อใช้มุมของใบพัดทั้งหมด พบว่าเมื่อทำการจำลองปกติและการจำลองแบบติดตั้งปล่องไอโซโทปทางเข้าโดยลบส่วนกลองลมออก มีเพียงมุม 100 องศาเท่านั้นที่ผลการจำลองเข้าสู่ค่าตอบ และมีตัวเลขการหมุนควงสูงสุด ดังนั้นจึงทำการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสองที่มีองศาที่บริเวณทางออกของกลองลม เพื่อเพิ่มอิทธิพลการไหลหมุนควงในรูปของตัวเลขการหมุนควง ลักษณะของตัวสร้างการหมุนควงลำดับสองแสดงได้ดังรูปที่ 6 โดยมีช่องเปิดให้อากาศไหลผ่านจำนวน 6 ช่อง ซึ่งมีจำนวนเท่ากับช่องทางออกของกลองลม มีใบพัดทั้งหมด 30 องศาที่ช่องเปิด การจำลองจะใช้โมดูลที่ 3.2 จากข้อสี่ที่กล่าวไปแล้ว สำหรับการคำนวณองค์ประกอบความเร็วและตัวเลขการหมุนควงเมื่อติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสองแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณตัวเลขการหมุนควงเมื่อใช้ตัวสร้างการหมุนควงลำดับสอง

มุม	\bar{U}	\bar{V}	\bar{U}_z	\bar{V}_z	S
30	7.21	15.30	0.43	0.91	1.42



รูปที่ 6 ตัวสร้างการหมุนควงลำดับสอง

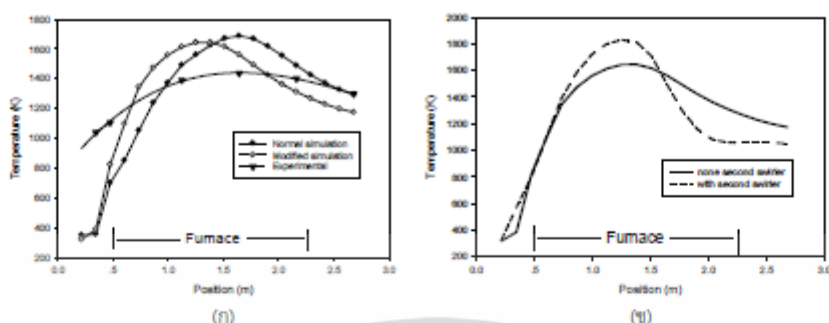
โดยพบว่าตัวเลขการหมุนควงมีค่าเท่ากับ 1.42 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ถูกติดตั้ง 51.06 % และผลการจำลองการกระจายความเร็วและอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้แสดงได้ดังรูปที่ 5 จะเห็นว่าเมื่อติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสอง ส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้น และมีการกระจายความเร็วที่ต่ำกว่า กรณีไม่ติดตั้ง

งานวิจัยในอนาคตจะทำการศึกษอิทธิพลของการปรับเพิ่มหรือลดขนาดมุมของใบพัดของตัวสร้างการหมุนควงลำดับสอง ซึ่งจะช่วยให้สามารถควบคุมตัวเลขการหมุนควงได้ตรงที่ต้องการเพื่อนำไปใช้จำลองก่อนการทดลองการเผาไหม้จริง

4. อภิปรายผลการจำลอง

4.1 เปรียบเทียบผลการจำลองการเผาไหม้ปกติกับวิธีติดตั้งปล่องไอโซโทปทางเข้า

การจำลองการเผาไหม้เมื่อทำการปรับมุมของใบพัดเท่ากับ 100 องศาปกติเปรียบเทียบกับเมื่อทำการติดตั้งปล่องไอโซโทปทางเข้าในการคำนวณ โดยลบในส่วนของกลองลมออก จากรูปที่ 7 (ก) แสดงกราฟระหว่างอุณหภูมิที่แกนกลางของระบบ ที่มีจุดเริ่มต้นตรงทางออกของกลองลม ฝั่งท่อทางออกที่เชื่อมต่อกับระบบปั๊ม จะเห็นว่าแม้ทำการติดตั้งปล่องทางเข้าของอากาศหตุยอุณหภูมิไม่มีความซับซ้อนน้อยลงแล้ว บริเวณใกล้หัวเผาก็ยังมียุณหภูมิใกล้เคียงกับการจำลองแบบปกติ ที่รวมกลองลมเข้าไว้ใน การคำนวณ แต่เมื่อพิจารณาบริเวณเตาเผาฝั่งท่อทางออก อุณหภูมิมีค่าแตกต่างกัน โดยบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงจะอยู่ตรงส่วนต้นของเตา ขณะที่การจำลองปกตินั้น บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงจะอยู่ที่ตรงกลางฝั่งส่วนท้ายของเตา แสดงให้เห็นว่าการปรับรูปร่างการจำลองมีความคลาดเคลื่อน แต่มีข้อสังเกตคือบริเวณอุณหภูมิสูง มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่า

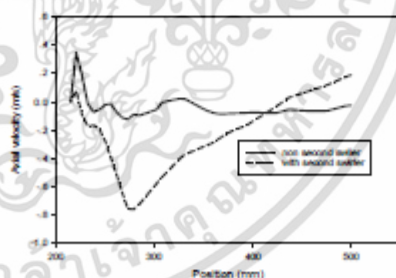


รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งแกนกลางของระบบ
(ก) เปรียบเทียบการจำลองกับการทดลอง (ข) เปรียบเทียบเมื่อติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสอง

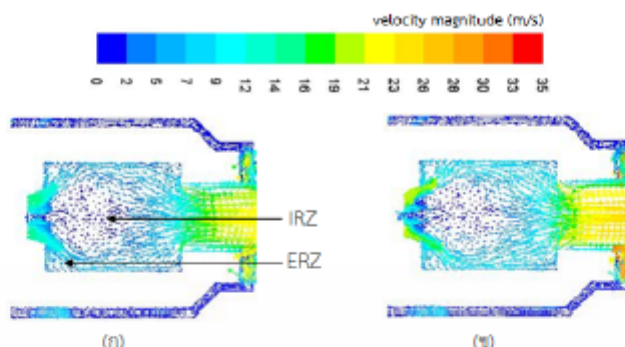
ประมาณ 1,600-1,700 K หรือกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่ทางเข้าให้สูงขึ้นโดยการนำส่วนของกลองลมออกนั้นทำให้บริเวณที่มีอุณหภูมิสูง เคลื่อนตัวเข้ามาใกล้ทางออกที่เชื่อมต่อกับห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองทั้งแบบกับการทดลอง การเผาไหม้ของ ซินทิทอร์ อูร์คาร์ และคณะ [2] วัตถุประสงค์ตามแนวแกน 7 จุด พบว่าการติดตั้งอุณหภูมิที่ทางเข้าของการจำลอง มีการกระจายอุณหภูมิใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าแบบปกติ

4.2 การเพิ่มพื้นที่ของอุณหภูมิเมื่อทำการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสอง
เมื่อทำการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสอง จากรูปที่ 5 พบว่าการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าสูงกว่าตอนไม่ติดตั้งและมีการกระจายความเร็วที่ต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสองสามารถสร้างกระแสไหลวนกลับที่สูงกว่าแบบไม่ติดตั้ง จึงทำให้เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ได้ดีกว่าและมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากรูปที่ 7(ข) จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสอง อุณหภูมิที่ตำแหน่งภายในหัวเผา จะมีค่าสูงกว่าแบบไม่ติดตั้งและอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แล้วค่อยๆ ลดลงที่ตรงกลางเตาเผาจนเริ่มคงที่ที่บริเวณก่อนเข้าท่อทางออกซึ่งบ่งบอกว่าเชื้อเพลิงได้เผาไหม้จนหมดก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด ซึ่งตอนไม่ติดตั้งจะเห็นว่าอุณหภูมิก่อนเข้าสู่ท่อทางออกยังไม่คงที่หรือเชื้อเพลิงยังเผาไหม้ไม่หมดนั่นเอง เมื่อทำการพิจารณาเสถียรภาพของเปลวไฟจากรูปที่ 9(ข) พบว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวสร้าง

การหมุนควงลำดับสอง สามารถทำให้เกิดการหมุนวนของกระแสอากาศบริเวณของห้องเผาไหม้ช่วย (internal recirculation zone, IRZ) และการหมุนวนของกระแสอากาศภายนอกแกนกลางของเตาเผา (external recirculation zone, ERZ) เหมือนกับแบบไม่ติดตั้ง จากรูปที่ 9(ก) ซึ่งจากการทดลองของ ซินทิทอร์ อูร์คาร์ และคณะ [2] ได้สังเกตเห็นปรากฏการณ์นี้ในการทดลอง กระแสหมุนวนทั้งสองบริเวณนี้ส่งผลให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงที่ติดไฟถูกให้อยู่กับมาชนกลับกลืนหมอก้อนนอกที่เข้ามาใหม่ ทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ นำไปสู่การเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ และจากรูปที่ 8 พบว่าเมื่อติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสองทำให้บริเวณ IRZ มีความเร็วที่ลดลงมากกว่ากรณีไม่ติดตั้ง ซึ่งพบวิจัยจะทำการทดลองในอนาคต เพื่อยืนยันปรากฏการณ์นี้



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตามแนวแกนกับตำแหน่งภายในห้องเผาไหม้ช่วย



รูปที่ 9 ผลการจำลองการกระจายความเร็ว และการไหลของมวลของกระแสอากาศภายในห้องเผาไหม้ช่วย (ก) ไม่ติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสอง (ข) ติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสอง

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการจำลองการเผาไหม้ 3 มิติที่กำลังความ
ร้อน 500 MW โดยกำหนดอัตราส่วนอากาศทั้งสามครั้งที่
เมื่อทำการเปลี่ยนมุมของใบพัด 60,80 และ 100 องศา
ตามลำดับพบว่าเมื่อเพิ่มมุม 100 องศาเท่านั้นที่เข้าสู่
ค่าตอบ เมื่อทำการคำนวณตัวเลขการหมุนควง พบว่ามุม
ของใบพัดที่ 60 และ 80 องศา มีค่าเพียง 0.15 และ 0.48
ตามลำดับ ในขณะที่มุม 100 องศา มีตัวเลขการหมุนควง
0.94 เมื่อทำการตัดแปลงการจำลองโดยการเปลี่ยน
เงื่อนไขที่ทางเข้า โดยการลบส่วนของท่อส่งออกพบว่า
มีเพียงมุม 100 องศาเท่านั้นที่เข้าสู่ค่าตอบเช่นเดียวกับ
การจำลองแบบปกติ แสดงให้เห็นว่าการจำลองทั้งสอง
แบบนี้แนวโน้มการคำนวณที่ผิดพลาดมีในทางเดียวกัน
เมื่อนำผลลัพธ์การกระจายอุณหภูมิจากการจำลองทั้งสอง
แบบมาเปรียบเทียบ พบว่าการตัดแปลงเงื่อนไขทางเข้า
ของการจำลอง ส่งผลให้บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงเคลื่อนตัว
เข้ามาใกล้ทางออกที่เชื่อมกับห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้น
และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ของ ซินทิพร
ธูการ และคณะ [2] พบว่าการตัดแปลงเงื่อนไขทางเข้า
ของการจำลอง ให้ผลใกล้เคียงกว่าการจำลองแบบปกติ

เมื่อทำการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสองที่
ทางออกของท่อส่งลม ผลการคำนวณพบว่า มีตัวเลขการ
หมุนควงสูงถึง 1.42 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ติดตั้ง
51.06% มีการกระจายอุณหภูมิที่สูงและการกระจาย
ความเร็วที่ต่ำกว่ากรณีไม่ติดตั้งส่งผลให้อุณหภูมิเชื้อเพลิง
เกิดการเผาไหม้จนหมดก่อนเข้าสู่ระบบใบพัด เมื่อ
พิจารณาการรักษาสีเขียวภาพของเปลวไฟ พบว่าการ

ติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงลำดับสอง ความรุนแรงของ
การไหลหมุนควงส่งผลให้เกิดการหมุนวนของอากาศ
บริเวณห้องเผาไหม้ช่วย (IRZ) และการหมุนวนของ
กระแสอากาศภายนอกแกนกลางของเตาเผา (ERZ) อีก
ทั้งยังพบความเร็วลมที่บริเวณ IRZ มีค่าสูงกว่ากรณีไม่
ติดตั้ง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ ซินทิพร ธูการ
และคณะ [2] ที่สังเกตเห็นปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นกับการ
ทดลองการเผาไหม้ปกติ ส่งผลให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงที่ติดไฟ
ถูกเหวี่ยงกลับมานอกกลุ่มหมอกก่อนเผาที่เข้ามาใหม่
ทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ นำไปสู่การเผาไหม้อย่าง
ต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามจะต้องมีการทดลองการเผาไหม้
จริงเพื่อยืนยันปรากฏการณ์นี้

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่ออิทธิพลการไหลหมุน
ควงเพิ่มขึ้น จะก่อให้เกิดปัญหาการเผาไหม้ที่ดีขึ้น
ในขณะที่อิทธิพลการไหลหมุนควงมีค่าต่ำทำให้เปลวไฟ
ขาดเสถียรภาพ และไม่ก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี สำหรับ
งานวิจัยในอนาคตควรมีการศึกษาการเพิ่มหรือลดขนาด
มุมของตัวสร้างการหมุนควงลำดับสองที่ส่งผลต่อการเผา
ไหม้หรือทำการเปลี่ยนเงื่อนไขของอัตราส่วนอากาศที่
แตกต่างกันออกไป เพื่อที่จะสามารถทราบจุดที่หัวเผา
ทำงานได้ดีที่สุดก่อนที่จะทำการทดลอง อย่างไรก็ตาม
วิธีการตัดแปลงการจำลองโดยเปลี่ยนเงื่อนไขทางเข้า
แม้ว่าจะให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่า
การจำลองแบบปกติ แต่ก็ไม่ได้อินทิ้วว่ามีความถูกต้อง
กว่าการจำลองแบบปกติ เพียงแต่ใช้เวลาในการคำนวณที่
ต่ำกว่าเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สถานการณ์พลังงานปี 2558 และแนวโน้ม ปี2559. สำนักงานนโยบายแผนพลังงาน (2558) URL: www.eppo.go.th/energysituation/Energy2015-Forecast2016.pdf
- [2] การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำ อุตสาหกรรม.วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558.
- [3] H. J. Sheen, W.J. Chen, S. Y. Jeng, T. L. Huang (1995). Institute of Applied Mechanics, National Taiwan University, Taipei, Taiwan. Correlation of Swirl Number for a Radial-Type Swirl Generator, Experimental Thermal and Fluid Science 1996; vol. 12(444-451)
- [4] Y. Huang, V. Yang (2005), The Pennsylvania State University, University Park. Effect of swirl on combustion dynamics in lean-premixed swirl-stabilized combustor, Proceedings of Combustion Institute 30(1775-1782), (2005)
- [5] Y. Huang, V. Yang (2005), The Pennsylvania State University, University Park. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion, Energy and combustion science 35(293-364), (2009)
- [6] N. Syred, J.M Beer, Department of Chemical Engineering and Fuel Technology, Sheffield University, England. Combustion in swirling flow: A review, Combustion and Flame vol.23(143-201), (1974)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายพงศนันท์ แก่นพรม
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 20 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2535 ที่นครราชสีมา
ที่อยู่	131 ม.1 ต.ผักปัง อ.ภูเขียว จ.ชัยภูมิ
ประวัติการศึกษา	2556 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2557-2558 ตำแหน่งพนักงานควบคุมการผลิต ประจำแผนก Clinker product ฝ่ายผลิต บริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้