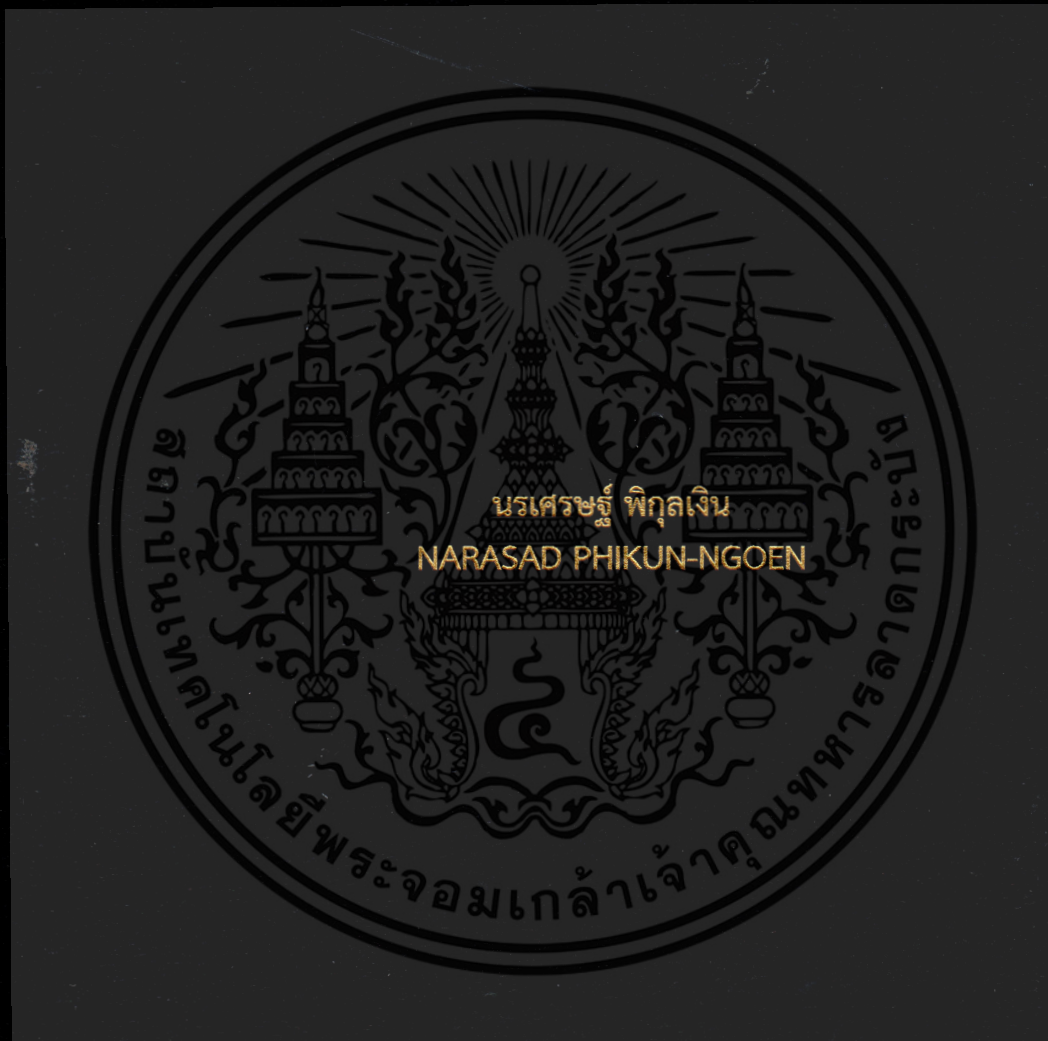


ผลกระทบของสัดส่วนการป้อนอากาศต่อสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิง
ชีวมวลชนิดฝุ่น

EFFECT OF AIR RATIO ON PERFORMANCE OF PULVERIZED BIOMASS
COMBUSTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-030-104

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลกระทบของสัดส่วนการป้อนอากาศต่อสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิง
ชีวมวลชนิดฝุ่น

EFFECT OF AIR RATIO ON PERFORMANCE OF PULVERIZED BIOMASS
COMBUSTOR



เลขที่
เลขทะเบียน 148689
พิมพ์เดือนปี 14 7 119 2560

b.00265052
l.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-EN-M-030-104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF AIR RATIO ON PERFORMANCE OF PULVERIZED BIOMASS
COMBUSTOR



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-030-104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของสัดส่วนการป้อนอากาศต่อสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น
Thesis Title Effect of Air Ratio on Performance of Pulverized Biomass Combustor
นักศึกษา นายนครเศรษฐ์ พิกุลเงิน
รหัสประจำตัว 58601119
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ณัตวิภา เจียรระโนวชิระ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-030-104

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ประसान	สถิตย์เรืองศักดิ์	
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
ผศ.ดร.สุตาภัทร	แคว้นเขาเม็ง	
ผศ.ดร.ณัตวิภา	เจียรระโนวชิระ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของเอกสารที่ส่งมาให้
วันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของสัดส่วนการปนื้ออากาศต่อสมรรถนะของหัวเผา เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น
ชื่อนักศึกษา	นายนรเศรษฐ์ พิกุลเงิน
รหัสประจำตัว	58601119
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ณัตวิภา เจียรระโนวชิระ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.จรรูวัตร เจริญสุข

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนการปนื้ออากาศให้หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น ซึ่งมีอากาศสามส่วนคือ อากาศปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และตติยภูมิ วิธีการศึกษาคือการนำเอาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นและเทียบเคียงกับผลการทดลองที่กำลังความร้อน 300 กิโลวัตต์ มีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ และมุมมองคาของใบพัดเท่ากับ 100 องศา และทำการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนเชิงมวลของอากาศเพื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะใน 6 เงื่อนไขที่แตกต่างกันไป จากผลของการศึกษาทั้ง 5 เงื่อนไขเทียบกับเงื่อนไขเปรียบเทียบ (Base case $\frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_s} = 0.2307$) พบว่าที่ 2 เงื่อนไขแรก (Case P1 - Case P2) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ปรับเปลี่ยนอากาศปฐมภูมิโดยให้อากาศทุติยภูมิคงที่ ($\frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_s} = 0.30769$ และ 0.38461) การเพิ่มขึ้นของโมเมนต์ของอากาศปฐมภูมิ ทำให้การเผาไหม้มีสมรรถนะด้อยลงเนื่องจาก IRZ ถูกทำลายและเชื้อเพลิงชีวมวลมี Residence time ต่ำ และจาก 3 เงื่อนไขต่อมา เป็นการให้อัตราการไหลอากาศปฐมภูมิคงที่และปรับเปลี่ยนอากาศอากาศทุติยภูมิ ($\frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_s} = 0.21428, 0.20000$ และ 0.18750) พบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือเงื่อนไขที่มีอัตราส่วนเชิงมวลเป็น 0.18750 สามารถทำให้สมรรถนะของการเผาไหม้เพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิแนวแกนสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณ 8 % มีอนุภาคคาร์บอนเหลือ 17.72 % และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจากเงื่อนไขเปรียบเทียบ (Base case) 88 % แต่การที่อัตราส่วนของอากาศตติยภูมิที่น้อยเกินไปจะส่งผลต่อความปลอดภัยและอายุการใช้งานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นนี้ ดังนั้นอัตราส่วนเชิงมวลที่เหมาะสมในการดำเนินการที่สุดจึงเท่ากับ 0.20000 ซึ่งอุณหภูมิแนวแกนสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณ 1.6 % มีอนุภาคคาร์บอนเหลือ 22.84 % ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจากเงื่อนไขเปรียบเทียบ (Base case) 78 % และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้เป็น 97.98 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effect of air ratio on performance of pulverized biomass combustor
Student	Mr. Narasad Phikun-ngoen
Student ID.	58601119
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Nuthvipa Jayranaiwachira
Co - Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk

ABSTRACT

This research aims to study the effect of air ratio on performance of pulverized biomass combustor. The air system in pulverized biomass burner is separated into three parts: primary, secondary and tertiary air. The coal combustion simulation model was applied to explain the effect from air ratio and validated with experimental result at 300 kW, 15 % excess air and 100 degrees of swirl blade angles. The experiments with different mass ratios were performed for 5 cases and compared with the base case ($\frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_s} = 0.2307$). Among five cases of mass ratio, case P1 and case P2 ($\frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_s} = 0.30769$ and 0.38461) were achieved by adjustment of the primary air while maintaining the secondary air mass flow rate. It was found that increasing primary air led to a decrease in combustion performance as the IRZ was broken down and insufficient residence time. Then, the primary air was fixed following with adjustment of the secondary air mass flow rate ($\frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_s} = 0.21428, 0.20000$ and 0.18750). It was found that at the mass ratio of 0.18750, combustion performance was maximum with axial temperature increase for around 8 %. At this case the remaining char unburned was 17.72 % when the particles left the combustion domain. It also provides a decrease in carbon monoxide for 88 % from the base case. However, too small amount of tertiary air mass flow rate shall be avoided in real situation in order to prevent thermal deterioration of pulverized biomass burner. Thus, the recommended mass ratio for operation is 0.20000, it could

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

provide better combustion performance than the base case as the maximum axial temperature increased around 1.6 %, with 22.84 % of unburnt char. Moreover, carbon monoxide concentration in flue gas had decreased for 78 % and the combustion efficiency was up to 97.98 %



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความกรุณา คำแนะนำ และการถ่ายทอดวิชาความรู้จาก รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข ผู้ทำวิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และความทุ่มเทให้กับลูกศิษย์คนนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ณัฏวิภา เจียรโนวชิระ ที่ได้แนะนำและให้คำปรึกษา สนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาตลอด รวมทั้งคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. และนักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ คำติชมในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ นาย สมศักดิ์ พิกุลเงิน ผู้เป็นบิดา นางสาวนงศ์ลักษณ์ ทองจันทร์ ผู้เป็นมาตา และบุคคลในครอบครัวทุกคนเป็นอย่างยิ่ง ที่เฝ้าเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และให้ทุนทรัพย์ในการศึกษาเล่าเรียน รวมทั้งเป็นกำลังใจในการแก้ไขปัญหา และอุปสรรคต่างๆเสมอมา และอีกคนคือขอขอบคุณนางสาว ยูวดี คำแหง ที่คอยอยู่ใกล้ๆและเป็นอีกแรงผลักดันในยามท้อแท้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จได้ด้วยดีถ้าไม่มีบุคคลที่เอ่ยนามมานี้คอยเอาใจใส่ให้ความสำคัญ และถ้าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีคุณค่าและประโยชน์กับบุคคลหรือหน่วยงานใด ผู้วิจัยขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอวยพรให้ทุกท่านมีแต่ความสุข ความเจริญ

นเรศเรขฐ์ พิกุลเงิน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา และขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
3.1 นิยามของการเผาไหม้.....	8
3.2 เชื้อเพลิงแข็ง.....	8
3.2.1 ประเภท และลักษณะของเชื้อเพลิงแข็ง.....	9
3.2.2 การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็ง.....	15
3.2.3 สมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิง.....	16
3.3 การเผาไหม้ (Combustion).....	18
3.3.1 สตอยชิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion Stoichiometry).....	19
3.3.2 Enthalpy of Combustion และค่าความร้อน (Heating values).....	20
3.3.3 อุณหภูมิเปลว Adiabatic (Adiabatic Flame Temperatures).....	22
3.3.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้.....	23
3.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuel Combustion).....	24
3.4.1 การทำแห้งของเชื้อเพลิงแข็ง (Drying).....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และส่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization).....	25
3.4.3 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Burning of Carbon).....	26
3.5 การปล่อยมลพิษและการควบคุม (Pollutants Emission and Control).....	31
3.5.1 บทนำ.....	31
3.5.2 ผลกระทบของมลพิษ.....	31
3.5.3 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO _x).....	32
3.5.4 คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide).....	38
3.5.5 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO _x).....	38
3.6 Aerodynamics of Jet Flow.....	40
3.7 Flame Stabilization.....	43
3.8 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (Radiation Heat Transfer).....	45
3.9 Computational fluid dynamics (CFD).....	46
3.9.1 ขั้นตอนการทำงานโดยสังเขปของวิธีคำนวณด้วยโปรแกรมทางด้าน CFD.....	47
3.9.2 สมการควบคุมการไหลของแก๊ส.....	48
3.9.3 สมการในแบบจำลองอนุภาค.....	54
3.9.4 แบบจำลอง Discrete Ordinates (DO).....	64
3.9.5 สมการ Species Transport.....	66
3.9.6 The Generalized Finite-Rate Formulation for Reaction Modeling.....	67
บทที่ 4 อุปกรณ์ การคำนวณ และออกแบบการทดลอง.....	70
4.1 อุปกรณ์การทดลองและรายละเอียด.....	70
4.1.1 อุปกรณ์การทดลองเชิงโครงสร้าง.....	70
4.1.2 อุปกรณ์การทดลองเชิงการวัดและการควบคุม.....	82
4.1.3 การเก็บภาพถ่ายและวิดีโอในการทดลอง.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VPI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การคำนวณและออกแบบการทดลอง.....	86
บทที่ 5 การจำลองเชิงคณิตศาสตร์ และผลการจำลอง.....	102
5.1 รูปแบบของการจำลอง.....	102
5.2 Mesh independent.....	103
5.3 การกำหนดเงื่อนไขการจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	105
5.3.1 การกระจายตัวของขนาดเชื้อเพลิง (Particle size distribution).....	105
5.3.2 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition).....	106
5.4 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์และการอภิปราย.....	107
5.4.1 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Base Case.....	107
5.4.2 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Case P1 และ Case P2.....	112
5.4.3 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Case S1 Case S2 และ Case S3.....	123
5.4.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้จากผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	133
บทที่ 6 ผลการทดลอง และการอภิปรายผล.....	135
6.1 การอู่นระบบหรือการ Start up ระบบ.....	135
6.2 ผลการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	138
6.2.1 การตรวจสอบรูปแบบของ Base case	138
6.2.2 การตรวจสอบรูปแบบของ Case P1.....	139
6.2.3 การตรวจสอบรูปแบบของ Case P2.....	140
6.2.4 การตรวจสอบรูปแบบของ Case S1.....	141
6.2.5 การตรวจสอบรูปแบบของ Case S2.....	141
6.2.6 การตรวจสอบรูปแบบของ Case S3.....	142
6.3 ผลการทดลองของ Case P1 และ Case P2 เทียบกับ Base case.....	143
6.4 ผลการทดลองของ Case S1 Case S2 และ Case S3 เทียบกับ Base case.....	145
6.5 ผลการวัดองค์ประกอบของ Flue gas.....	147
6.6 ประสิทธิภาพการเผาไหม้จากผลการทดลอง.....	148

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุป และข้อเสนอแนะ.....	149
7.1 สรุป.....	149
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	151
เอกสารอ้างอิง.....	152
ภาคผนวก.....	156
ภาคผนวก ก. การหาประสิทธิภาพการเผาไหม้.....	157
ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิง.....	161
ภาคผนวก ค. มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	163
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	170
ประวัติผู้เขียน.....	182

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และทั้งนี้ยังอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการป้อนอากาศให้หัวเผา.....	7
3.1 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่างๆ.....	9
3.2 ลักษณะของถ่านหิน.....	10
3.3 ตัวอย่างเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างไม้สนกับถ่านหินบิทูมินัส.....	10
3.4 การแบ่งชนิดของถ่านหินโดยศักดิ์ของถ่านหิน (หลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า).....	11
3.5 ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของ RDF และเชื้อเพลิงต่างๆ (หลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า).....	15
3.6 จุดวาบไฟและจุดติดไฟด้วยตัวเองของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ.....	15
4.1 สรุปหน้าที่การทำงานหลักๆของอากาศแต่ละส่วน.....	81
4.2 องค์ประกอบธาตุของชีวมวลไม้ยางพาราฝุ่นวิเคราะห์โดย TISTR.....	87
4.3 ผลจากการหาค่าตัวแปร สมดุลสมการการเผาไหม้ และสมการที่ 4.2.....	89
4.4 ผลการหาสภาวะอากาศในสภาวะการเผาไหม้จริง.....	90
4.5 สภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลอง.....	90
4.6 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาทดลอง.....	91
4.7 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาทดลอง (ติดตั้ง Bluff body).....	101
5.1 รูปแบบ Mesh สำหรับการทำให้ Mesh independent.....	103
5.2 Particle size distribution.....	105
5.3 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	106
5.4 % การ Burn out ของอนุภาคคาร์.....	133
5.5 ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ของแต่ละ Case จากการจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	134
6.1 พารามิเตอร์ควบคุมสำหรับการอนุรักษ์.....	136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IX อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงอิทธิพลของอากาศหมุนควงต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) และคาร์บอน (CFA) ที่ปนไปกับไอเสีย.....	5
3.1 ชีวมวลในประเทศไทย.....	12
3.2 ห้องปฏิกรณ์ที่มีการไหลสม่ำเสมอเพื่อใช้ในการหาค่าความร้อนจากการเผาไหม้.....	20
3.3 Enthalpy of combustion ของมีเทน - อากาศ ที่สภาวะ Stoichiometric ซึ่งนำไปในผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้อยู่ในสถานะไอ.....	21
3.4 กราฟแสดงการหาค่าอุณหภูมิเปลว Adiabatic ในแกนอ้างอิง.....	23
3.5 กลไกการเผาไหม้สำหรับอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็ก.....	24
3.6 เปรียบเทียบโปรไฟล์ และตามแนวรัศมีของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งธรรมดาระหว่างการเผาไหม้ที่ถูกรักษาโดยการแพร่และการเผาไหม้ที่ถูกรักษาโดยจลนทางเคมี.....	27
3.7 เปรียบเทียบอัตราการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งธรรมดาที่มีลักษณะการเผาไหม้ที่ถูกรักษาโดยการแพร่ และโดยจลนทางเคมี.....	28
3.8 รูปแบบทั่วไปสำหรับกระบวนการเผาไหม้บริเวณผิวของอนุภาคคาร์บอน.....	28
3.9 ความเข้มข้นที่สมดุลของ NO ₂ ที่มีส่วนประกอบของออกซิเจนในแก๊สที่แตกต่างกัน.....	33
3.10 ผลการคำนวณ และผลการทดลองหาค่า Thermal NO และ Prompt NO ของเปลวไฟมีเทนกับอากาศในเตาเผาไหม้แบบถาวร λ หมายถึงอัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศทางทฤษฎี.....	36
3.11 การเกิด NO จากไนโตรเจนในเชื้อเพลิง.....	37
3.12 โครงสร้างการไหลแบบ Jet.....	40
3.13 การกระจายความเข้มข้น Reyleigh ของเปลวไฟจากความต่างของเลขเรย์โนลด์ (Re) (3800, 7600, 15200 และ 22800) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 8 mm.....	41
3.14 หัวเผาที่ติดตั้ง Bluff body (ซ้าย) และลักษณะของสนามการไหลบริเวณ Bluff body ทรงกระบอก (ขวา).....	42
3.15 เวกเตอร์ความเร็วและตำแหน่งของเปลวไฟ (a) Flashback และ (b) Liftoff.....	43
3.16 แผนภาพความเสถียรภาพในรูปแบบของ Flashback และ Liftoff (a) แก๊สธรรมชาติ และ (b) แก๊สจากผู้ผลิตรายหนึ่ง.....	44
3.17 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ของโรงจักรผลิตกำลังแห่งหนึ่ง.....	46
3.18 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหัวเผาของโรงจักรผลิตกำลังแห่งหนึ่ง.....	46
4.1 รายละเอียดภายนอกและภาพถ่ายของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และส่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 แสดงลักษณะของการติดตั้งหัวแก๊ส LPG และหัวเทียนที่ถูกติดตั้งไปที่ท่อสำหรับใส่หัวแก๊ส LPG.....	71
4.3 แสดงรายละเอียดภายในของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น.....	71
4.4 แสดงความเข้มข้นของความปั่นป่วนภายใน Pre-chamber และ Furnace สำหรับมุมทางออกที่แตกต่างกันของ Pre-chamber.....	72
4.5 แสดงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์บอนใน Pre-chamber และ Furnace สำหรับมุมทางออกของ Pre-chamber เป็น 135 องศา.....	73
4.6 แสดงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์บอนใน Pre-chamber และ Furnace สำหรับมุมทางออกของ Pre-chamber เป็น 90 องศา.....	73
4.7 แสดงรูปแบบการเกิดกระแสวนอากาศหมุนวนภายใน Pre-chamber.....	74
4.8 แสดงรูปถ่ายจากการทดลองเพื่อยืนยันว่าเกิดกระแสวนอากาศหมุนวนภายใน Pre-chamber จริง.....	74
4.9 ลักษณะและภาพถ่ายจริงของไบบิต.....	75
4.10 การอ้างอิงมุมของไบบิต.....	75
4.11 ลักษณะการติดตั้งไบบิตเข้ากับหัวเผา.....	75
4.12 ลักษณะของปูนทนไฟ ณ บริเวณผนังทางออกของ Pre-chamber.....	76
4.13 ลักษณะการไหลของอากาศทุติยภูมิในช่องว่างระหว่างปูนทนไฟกับผิวภายนอกของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น.....	76
4.14 ลักษณะของห้องเผาไหม้หลักและระบบลำเลียงถ่านหิน.....	77
4.15 ลักษณะของถังบำบัดไอเสีย และการทำงานของหัวฉีดน้ำสำหรับลดอุณหภูมิไอเสียและดักถ่านลอย.....	78
4.16 ลักษณะของพัดลมดูดไอเสีย บ่อตกตะกอนที่ 1 และบ่อตกตะกอนที่ 2	78
4.17 รายละเอียดของระบบลำเลียงเชื้อเพลิง.....	79
4.18 แผนภาพ และภาพถ่ายของระบบลำเลียง LPG.....	80
4.19 ลักษณะการป้อนอากาศเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น.....	80
4.20 แผนภาพรวมของระบบผลิตความร้อนจากชีวมวลฝุ่น.....	81
4.21 แผนภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของระบบ.....	82
4.22 Thermocouples type k และ Data logger รุ่น GL820.....	82
4.23 Testo 350XL gas analyze และอุปกรณ์สำหรับหล่อเย็น Flue gas.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามและตีพิมพ์อย่างเป็นทางการเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมเห็นจำเป็นต้องใช้ประโยชน์ด้านการการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ **xi** อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 การติดตั้ง Differential pressure transmitter สำหรับวัดความดันภายในระบบ.....	83
4.25 PLC ยี่ห้อ Siemens รุ่น Simatic s7-300 และการแสดงผลค่าความดันภายในระบบในจอคอมพิวเตอร์.....	84
4.26 ลักษณะการติดตั้งแผ่น Orifice และ Differential pressure transmitter สำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศทั้งสามส่วน วาล์วปีกผีเสื้อ และชุดควบคุม.....	85
4.27 อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Winner รุ่น WIN-V63 [33] สำหรับควบคุมความเร็วของ ID Fan.....	86
4.28 ลักษณะรูที่มีไว้ใส่ UV sensor ที่อยู่บริเวณด้านหลังหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นนี้.....	86
4.29 รูปถ่ายของเชื้อเพลิงชีวมวลไม้ยางพาราอัดเม็ดก่อนทำการบด.....	87
4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้กับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ควบคุมสกรูสำหรับป้อนเชื้อเพลิงฝุ่นให้หัวเผา.....	88
4.31 ภาพถ่ายเปลวไฟภายใน Pre-chamber จากการทดลองของ นาย ชินภัทร ชูระการ (Excess air = 15 %, 10 ต่อ 65 ต่อ 25 % ของอัตราส่วนอากาศ, ความร้อน 300 kW และ 100 องศาเซลเซียส).....	90
4.32 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของการกระจายตัวอุณหภูมิ C° (Ref. case).....	92
4.33 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิตามแนวแกน C° (Ref. case).....	92
4.34 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของการกระจายตัวสัดส่วนเชิงมวลของสารระเหย (Mass fraction of volatile; Ref. case).....	93
4.35 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของสัดส่วนเชิงมวลของสารระเหยตามแนวแกน (Axial mass fraction of volatile; Ref. case).....	93
4.36 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของความเร็วตามแนวแกน m/s (Ref. case).....	94
4.37 ภาพถ่ายเปลวไฟภายใน Pre-chamber (Ref. case).....	95
4.38 ภาพถ่ายผลจากการวัดองค์ประกอบของ Flue gas (Ref. case).....	95
4.39 ลักษณะรูปทรงของ Bluff body ก่อนที่จะถูกติดตั้ง ซึ่งจะถูกเชื่อมติดกับฐานตัวเอ็ก.....	97
4.40 ลักษณะของท่อพ่นเชื้อเพลิงฝุ่นก่อนติดตั้ง Bluff body.....	97
4.41 ลักษณะการติดตั้ง Bluff body ลงไปที่ท่อพ่นเชื้อเพลิงฝุ่น และภาพถ่ายจากของจริง.....	98
4.42 ลักษณะของเส้นทางเดินอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุดของกรณีพื้นฐาน และกรณีใส่ Bluff Body.....	99
4.43 การกระจายตัวการปลดปล่อยสารระเหยของกรณีพื้นฐาน และกรณีใส่ Bluff body.....	99
4.44 การกระจายตัวสัดส่วนโดยโมลออกซิเจนของกรณีพื้นฐาน และกรณีใส่ Bluff body.....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XIA อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45 การกระจายตัวอุณหภูมิ C° ของกรณีพื้นฐาน และกรณีใส่ Bluff body.....	100
5.1 ลักษณะของรูปแบบของการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ประกอบด้วย โดเมนของไหล (ไม่แรงงา) และโดเมนผนังปูน (แรงงาสีเขียว).....	102
5.2 ลักษณะของ Coarse mesh และ Fine mesh.....	103
5.3 กราฟการเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่าง Coarse mesh กับ Fine mesh.....	104
5.4 กราฟการเปรียบเทียบความเร็วตามแนวแกนระหว่าง Coarse mesh กับ Fine mesh....	104
5.5 กราฟอุณหภูมิตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวอุณหภูมิของ Base case.....	108
5.6 กราฟสัดส่วนเชิงมวลของสารระเหยตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วนเชิงมวล สารระเหยของ Base case.....	108
5.7 กราฟสัดส่วนเชิงมวลของออกซิเจนตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วนเชิงมวล ออกซิเจนของ Base case.....	109
5.8 กราฟสัดส่วนเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัว สัดส่วนเชิงมวลคาร์บอนไดออกไซด์ของ Base case.....	109
5.9 กราฟความเร็วแก๊สตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวความเร็วและเวกเตอร์แก๊ส (m/s) ของ Base case.....	110
5.10 การกระจายเวกเตอร์แก๊ส (m/s) ภายใน Pre-chamber ของ Base case.....	111
5.11 กราฟความเข้มข้นความปั่นป่วนตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวความเข้มข้น ปั่นป่วนของ Base case.....	111
5.12 เส้นทางเดินในรูปแบบสัดส่วนเชิงมวลอนุภาคคาร์บอนของ Base case.....	112
5.13 กราฟอุณหภูมิตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวอุณหภูมิของ Base case, Case P1 และ Case P2.....	114
5.14 กราฟสัดส่วนโดยมวลสารระเหยตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วนโดยมวล สารระเหยของ Base case, Case P1 และ Case P2.....	115
5.15 กราฟสัดส่วนโดยมวลออกซิเจนตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วนโดยมวล ออกซิเจนของ Base case, Case P1 และ Case P2.....	116
5.16 กราฟสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วน โดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ของ Base case, Case P1 และ Case P2.....	117
5.17 กราฟความเร็วแก๊สตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวความเร็วแก๊สของ Base case, Case P1 และ Case P2.....	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XIII อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 กราฟความเร็วแก๊สตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวทิศทางความเร็วแก๊สของ Base case, Case P1 และ Case P2.....	119
5.19 การกระจายตัวทิศทางความเร็วแก๊สของ Base case, Case P1 และ Case P2.....	120
5.20 กราฟความเข้มข้นความปั่นป่วนตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวความเข้มข้นความปั่นป่วนของ Base case, Case P1 และ Case P2.....	121
5.21 เส้นโคจรในแบบสัดส่วนเชิงมวลอนุภาคคาร์บอนของ Base case, case P1 และ case P2....	122
5.22 กราฟพอลิโนเมียลตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวพอลิโนเมียลของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3.....	124
5.23 กราฟสัดส่วนโดยมวลสารระเหยตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วนโดยมวลสารระเหยของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3.....	125
5.24 กราฟสัดส่วนโดยมวลออกซิเจนตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วนโดยมวลออกซิเจนของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3.....	126
5.25 กราฟสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3.....	127
5.26 กราฟความเร็วแก๊สตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวความเร็วแก๊สของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3.....	128
5.27 กราฟความเร็วแก๊สตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวทิศทางความเร็วแก๊สของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3.....	129
5.28 การกระจายตัวทิศทางความเร็วแก๊ส Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3....	130
5.29 กราฟความเข้มข้นความปั่นป่วนตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวความเข้มข้นความปั่นป่วนของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3.....	131
5.30 เส้นโคจรในแบบสัดส่วนเชิงมวลอนุภาคคาร์บอนของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3.....	132
5.31 กราฟเปรียบเทียบการ Burn out ของอนุภาคคาร์บอนระหว่าง Base case และ Case P1 ถึง Case S3 ตามลำดับ.....	133
6.1 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ขณะอุณหภูมิที่เพียว LPG.....	136
6.2 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ขณะอุณหภูมิที่ 100 kW.....	136
6.3 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ขณะอุณหภูมิที่ 150 kW.....	137
6.4 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ขณะอุณหภูมิที่ 200 kW.....	137

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XIV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.5 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ขณะอุณหภูมิที่ 250 kW.....	137
6.6 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ขณะอุณหภูมิที่ 300 kW (ยังไม่ปิด LPG).....	138
6.7 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ขณะอุณหภูมิที่ 300 kW (ปิด LPG แต่ยังไม่เลื่อนท่อ แก๊สออก).....	138
6.8 การเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองเชิง คณิตศาสตร์ของ Base case.....	139
6.9 การเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองเชิง คณิตศาสตร์ของ Case P1.....	139
6.10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองเชิง คณิตศาสตร์ของ Case P2	140
6.11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองเชิง คณิตศาสตร์ของ Case S1.....	141
6.12 การเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองเชิง คณิตศาสตร์ของ Case S2.....	142
6.13 การเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองเชิง คณิตศาสตร์ของ Case S3.....	142
6.14 อุณหภูมิตามแนวแกนผลการทดลอง Case P1 และ Case P2 เทียบกับ Base case.....	143
6.15 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ของ Base case.....	144
6.16 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ของ Case P1.....	144
6.17 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ของ Case P2.....	145
6.18 อุณหภูมิตามแนวแกนจากผลการทดลองของ Case S1 Case S2 และ Case S3 เทียบ กับ Base case.....	145
6.19 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ของ Case S1.....	146
6.20 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ของ Case S2.....	146
6.21 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ของ Case S3.....	147
6.22 ผลการวัดองค์ประกอบของ Flue gas.....	147

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของพลังงานทดแทนที่เราใช้ในการศึกษานี้ ก็คือพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฟืน วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย สมมติฐานของการศึกษาระดับต้นของการศึกษา และประโยชน์ของวิทยานิพนธ์นี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าความต้องการทางด้านการใช้พลังงานของประเทศมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากในการขับเคลื่อนภาคเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมนั้นจำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานที่เพียงพอ ซึ่งพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้จะเป็นพลังงานจากแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ ถ่านหิน ปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานเหล่านี้กำลังลดลงอย่างต่อเนื่องแปรผันตรงกับปริมาณการใช้ ประกอบกับการเกิดวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ความตระหนักในสภาวะโลกร้อน และปัญหาสิ่งแวดล้อม ทำให้ทั้งภาครัฐ และเอกชนพยายามมองหาแหล่งพลังงานใหม่ๆมาใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิล เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานคลื่นมหาสมุทร เป็นต้น แต่พลังงานในรูปแบบดังกล่าวจะต้องนำมาผ่านกระบวนการผลิตที่ค่อนข้างยุ่งยาก ต้องใช้เครื่องมือที่ทันสมัย จึงทำให้ยากที่จะนำพลังงานเหล่านี้มาใช้เนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างสูง พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) จึงเป็นกลายเป็นที่น่าสนใจที่จะนำมาทดแทนแหล่งพลังงานที่มีราคาสูงเหล่านี้ สืบเนื่องจากการกำหนดนโยบายในการพัฒนาประเทศที่มีการสนับสนุนให้มีการหาพลังงานทดแทนต่างๆรวมถึงหญ้าเนเปียร์ [1]

สำหรับประเทศไทยซึ่งประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม พลังงานจากชีวมวลยิ่งได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากมีชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรในปริมาณมาก โดยเฉพาะชีวมวลของแข็ง (Solid biomass) อาทิเช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด แกลบ ชี้อเลื่อย และเปลือกไม้ชนิดต่างๆ เป็นต้น แต่ทว่าชีวมวลของแข็งที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยมากมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก ทำให้มีความหนาแน่นของพลังงานต่ำ การลำเลียงเพื่อจำหน่ายจ่ายแจกก็เป็นไปได้ยากลำบากและไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งนำไปสู่ต้นทุนด้านการขนส่งและเก็บรักษาที่สูง การแปรรูปชีวมวลของแข็งเหล่านี้ให้มีรูปร่างสม่ำเสมอ และมีความหนาแน่นของพลังงานสูงขึ้น เช่น การอัดแท่ง (Pelletization) เป็นต้น เป็นวิธีการหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิง เพื่อให้การใช้เชื้อเพลิงมีความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ ชีวมวลของแข็งที่ผ่านการแปรรูปดังกล่าวแล้วจะอยู่ในรูปของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิงอัดแท่ง (Pellet) หรือหากชีวมวลของแข็งนั้นได้มาจากส่วนประกอบของไม้ก็จะเรียกว่า เชื้อเพลิงไม้อัดแท่ง (Wood pellet)

ในการที่จะนำไม้อัดแท่งมาเป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการผลิตแก๊สร้อน จำเป็นต้องหาสภาวะการดำเนินการของหัวเผาให้เหมาะสม ซึ่งการป้อนอากาศนั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากที่จะกำหนดสภาวะการดำเนินการของหัวเผา สังเกตได้จากงานวิจัยของท่านอื่น เช่น Jianping Jing และคณะ [2] พบว่าการป้อนอากาศมีผลอย่างป็นนัยสำคัญกับอุณหภูมิ และความเข้มข้นของแก๊สที่มาจากกระบวนการเผาไหม้ของหัวเผา CFR ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงให้ความสนใจที่จะศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดจากการป้อนอากาศให้กับหัวเผาเชื้อเพลิงแข็งชนิดฝุ่น (pulverized burner) ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะนำไปสู่สมรรถนะการเผาไหม้ที่ดีขึ้น และเหมาะสมภายในหัวเผา (burner) โดยจะเป็นการศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลข และการศึกษาเชิงทดลองที่ 300 kW

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มาประยุกต์เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการเผาไหม้ภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นเทียบเคียงกับผลจากการทดลอง
2. เพื่อศึกษาถึงปรากฏการณ์ที่เกิดจากการป้อนอากาศที่มีผลต่อสมรรถนะด้านต่างๆของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น ได้แก่ กระบวนการในการเกิดการเผาไหม้ อิทธิพลของการไหลของอากาศภายในระบบที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ และการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 15 % และที่ 300 kW ซึ่งจะนำไปสู่สมรรถนะการเผาไหม้ที่ดีขึ้นกับการทำงานของหัวเผานี้
3. ทำการทดลองเพื่อหาองค์ประกอบของแก๊สไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นนี้ เพื่อเทียบเคียงกับค่ามาตรฐานอุตสาหกรรม

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. ถ้ามีการป้อนอากาศในส่วนปฐมภูมิ (Primary air) ให้มากขึ้น จะเป็นการเพิ่มโมเมนต์ของการไหลของเชื้อเพลิง คาดว่าจะส่งผลให้เวลาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายใน Pre-chamber น้อยลง ซึ่งจะทำให้ให้อุณหภูมิภายใน Pre-chamber และ Furnace ลดลง ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ใน Flue gas มีค่ามาก สมรรถนะของการเผาไหม้ต่ำลง
2. ถ้ามีการป้อนอากาศในส่วนทุติยภูมิ (Secondary air) มากขึ้นโดยให้อากาศ Primary คงที่ จะช่วยเพิ่มกระแสลมหมุนควงภายใน Pre-chamber ให้มากขึ้น จะทำให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น ซึ่งคาดว่าจะสามารถเพิ่มสมรรถนะและประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้อุณหภูมิภายใน Pre-chamber และ Furnace สูงมากขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นคาร์บอนมอนอกไซด์ใน Flue gas ต่ำลง แต่ออกไซด์ของไนโตรเจนจะเพิ่มขึ้นด้วย Thermal NO_x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. กำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัย
2. สืบค้น และศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการป้อนอากาศให้กับหัวเผา
3. ศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้ หลักการทำงาน หัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น และแบบจำลองการไหลในรูปแบบต่างๆที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย
4. ทำการคำนวณหาอัตราส่วนการป้อนอากาศที่กำหนดไว้ในขอบเขตของการศึกษา สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่ให้การทดลอง และออกแบบเงื่อนไขกรณีต่างๆ สำหรับการศึกษาผลกระทบ
5. ทำการจำลองเชิงตัวเลขในแต่ละเงื่อนไข เพื่อดูลักษณะความเหมาะสมของการป้อนอากาศคร่าวๆ ก่อนการทดลองจริง
6. ดำเนินการร่วมกับทีมวิจัยทางด้านเครื่องมือวัด เพื่อทำการสอบเทียบ (calibrate) และติดตั้งชุดเครื่องมือวัดสำหรับการทดลอง
7. ตรวจสอบความพร้อมของชุดอุปกรณ์ทดลอง และปรับปรุงข้อผิดพลาดของระบบต่างๆ
8. ทำการทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะของหัวเผาตามสมมติฐาน และขอบเขตที่กำหนดไว้
9. วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนา และปรับปรุง พร้อมทั้งสรุปผลการดำเนินโครงการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการนำเชื้อเพลิงพลังงานทางเลือกที่เป็นพลังงานหมุนเวียน ซึ่งหาได้ง่ายจากวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรมาใช้ ซึ่งตอบสนองความต้องการด้านพลังงานในปัจจุบัน
2. เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง ใช้เชื้อเพลิงให้เกิดความคุ้มค่าอย่างสูงสุด และในทางตรงข้ามที่ต้องให้เกิดมลพิษทางอากาศน้อยที่สุด
3. ทราบถึงผลกระทบจากการป้อนอากาศอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์กับเงื่อนไขการดำเนินการของหัวเผาได้

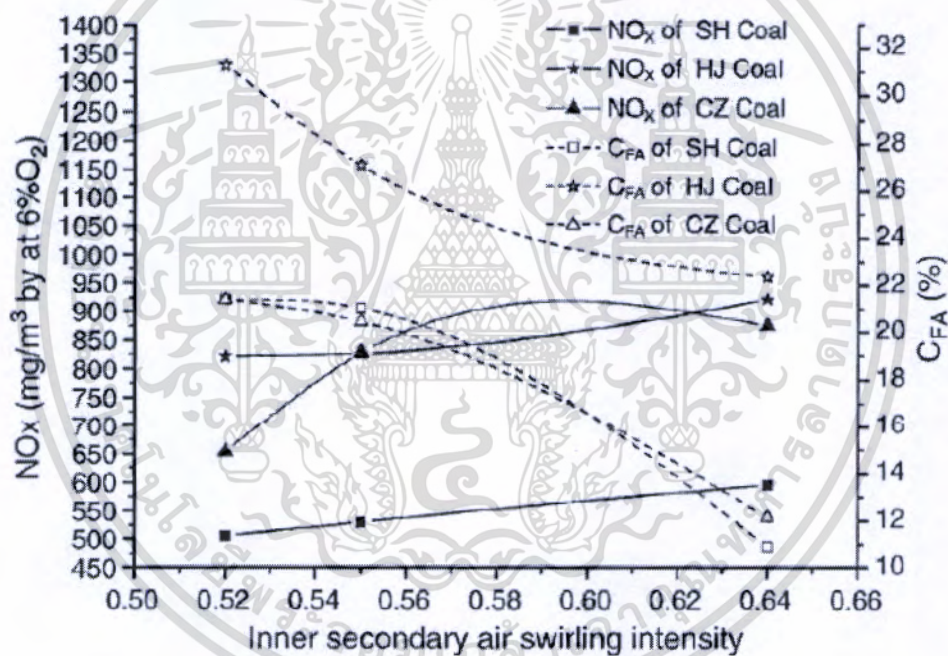
บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

จากบทที่หนึ่งได้ทราบแล้วว่าวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นในด้านการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดจากการป้อนอากาศให้กับหัวเผา เพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งบดละเอียด (Pulverized wood pellet) โดยวิธีการจำลองเชิงคณิตศาสตร์และการทดลอง ดังนั้นจำเป็นต้องทำการศึกษาถึงหลักการทำงานของหัวเผา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งต้องศึกษางานวิจัยที่มีผู้ทำมาก่อน ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันนี้มีนักวิจัยทั้งใน และต่างประเทศได้ศึกษาในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่ว่าผู้วิจัยกำลังศึกษามากมาย อาทิเช่น

Sharfi and Boroomand M. [3] ได้ทำการตรวจสอบผลการจำลองเชิงตัวเลข (CFD) และการทดลองของ thermo-compressor และพวกเขาได้ผลออกมาว่าค่าความแตกต่างสูงสุดระหว่างผลการจำลองเชิงตัวเลขและการทดลองประมาณ 11 % จากงานวิจัยสามารถบอกได้ว่า CFD สามารถนำมาใช้เพื่อคาดการณ์ปรากฏการณ์ต่างๆที่จะเกิดขึ้นภายในหัวเผาก่อนที่จะทำการทดลองได้เพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณ เวลา ความยุ่งยากในการทดลอง มากไปกว่านั้นยังสามารถให้ความปลอดภัยได้เนื่องจากสามารถวิเคราะห์อันตรายที่จะเกิดขึ้นก่อนที่จะทำการทดลองอีกด้วย Dong-Fang Z. [4] และคณะ ได้ทำการหาพารามิเตอร์เชิงเรขาคณิตที่เหมาะสมของหัวฉีดภายในหัวเผาทรงกระบอกชนิดผสมอากาศก่อนเผาไหม้ เพื่อให้ได้มลพิษออกจากการเผาไหม้ต่ำที่สุด โดยวิธีที่ใช้ นั่นคือ CFD และความแตกต่างสูงสุดระหว่างผลจาก CFD กับการทดลองอยู่ที่ประมาณ 3.1 % และยังได้อธิบายถึงเหตุผลที่ทำให้เกิดความแตกต่างนี้ขึ้น ว่าอาจเกิดจาก การประมาณค่าของโมเดล ความผิดพลาดเล็กน้อยจากอุปกรณ์การวัด สิ่งแวดล้อมในการทดลองที่แตกต่างจากการกำหนดในการจำลอง รวมทั้งผู้ที่ทำการดำเนินการก็มีผลทำให้เกิดความแตกต่างนี้ได้ด้วยเช่นกัน ธนภัทร์ ภักดีรวงศ์ [5] ได้ทำงานวิจัยเรื่องการจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง โดยเขาได้นำแบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผงมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น และผลการจำลองก็ออกมาเป็นที่น่าพอใจเมื่อเทียบกับผลการทดลอง สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ก็ได้อธิบายพารามิเตอร์บางส่วนจากโมเดลที่เขาใช้ในการจำลองมาใช้กับโมเดลของเราด้วย นอกจากนี้เขายังพบอีกว่าที่มุมผนังบริเวณทางออกของ Pre-Chamber เป็น 135 องศา ไม่สามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ลักษณะที่เรียกว่าการเป่าดับ (Blow-Off) แต่เมื่อทำการเปลี่ยนมุมผนังบริเวณทางออกเท่ากับ 90 องศา ทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการฟุ้งกระจายที่มากขึ้นภายในห้องเผาไหม้ Pre-Chamber ส่งผลให้อนุภาคสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง จากอิทธิพลนี้จึงนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเผาไหม้ (Residence Time) ภายในห้องเผาไหม้ของ Pre-Chamber ในทำนองเดียวกันนั้นสามารถคงความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ Shan Xue และคณะ [6] ได้ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อ การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ และปริมาณคาร์บอนคงเหลือในถ่านลอย ของการเผาไหม้ถ่านหินภายในเตาขนาด 1 MW พบว่าอัตราส่วนอากาศ ปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ swirl number และองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ล้วนส่งผลกระทบต่อ การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ และคาร์บอนคงเหลือทั้งสิ้น แต่เมื่อพิจารณา รูปที่ 2.1 อิทธิพลของอากาศหมุนควงต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) และคาร์บอน (CFA) ที่ปนไปกับไอเสีย พบว่าเมื่อความรุนแรงของอากาศหมุนควงเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณคาร์บอน (CFA) ที่ปนไปกับไอเสียลดน้อยลง เนื่องจากความรุนแรงของอากาศที่หมุนควงที่เพิ่มขึ้น จะเหนี่ยวนำให้เกิดพฤติกรรม การหมุนวนของแก๊สร้อนความปั่นป่วน และการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศในอัตราที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ จึงทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามกลับทำให้ไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจาก thermal NOx



รูปที่ 2.1 แสดงอิทธิพลของอากาศหมุนควงต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) และคาร์บอน (CFA) ที่ปนไปกับไอเสีย [6]

อิติพัทธ์ ลิ้มกุล และคณะ [7] พบว่าลักษณะพฤติกรรม การไหลของอากาศที่เกิดจากการใช้หลักการหมุนควง ส่งผลดีต่อปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงขึ้น เนื่องจากลักษณะการไหลแบบหมุนควงของอากาศและเชื้อเพลิง ทำให้มีระยะทางในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาที่อากาศและเชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาที่มากขึ้นเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้นานขึ้น เมื่ออากาศและเชื้อเพลิงสามารถเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้นานขึ้น ย่อมส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาสูงขึ้น และสูงพอที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นใบแจ้งประโยชน์ที่นำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ลักษณะการไหลแบบหมุนควงของอากาศและเชื้อเพลิง จะช่วยเพิ่ม ความรุนแรงของความปั่นป่วนของกระแสการไหล ซึ่งจะกระตุ้นให้แก๊สที่เกาะอยู่ที่ผิวด้านนอกของเชื้อเพลิง หลุดออกทำให้อากาศสามารถเข้าทำปฏิกิริยาด้านในของเชื้อเพลิงได้ ช่วยให้การเผาไหม้มีความ สมบูรณ์มากขึ้น Norbert Modlinski [8] ที่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบมุมมองของใบบิตต่อ พฤติกรรมการเผาไหม้ถ่านหินผง ซึ่งพบว่าอากาศหมุนควงจะส่งผลต่อเสถียรภาพของเปลวไฟบริเวณ หัวฉีดเชื้อเพลิง เมื่อมุมของใบบิตเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การลุกติดไฟของเชื้อเพลิงเกิดเร็วขึ้น ซึ่ง ปรากฏการณ์ดังกล่าวยังส่งผลต่อตำแหน่งของฐานเปลวไฟ โดยอิทธิพลของอากาศที่หมุนควงจะ เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนของแก๊สร้อนบริเวณใกล้หัวฉีด ซึ่งส่งผลให้อนุภาคของเชื้อเพลิงที่ถูก พ่นออกมาจากหัวฉีดเกิดการผสมกับกระแสของแก๊สร้อนสารระเหยจะถูกปลดปล่อยออกมาจาก อนุภาคเชื้อเพลิง และเกิดการติดไฟในที่สุด จึงทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ชินภัทร จรุงการ [9] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของการเผาไหม้ของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น จากความ แตกต่างขององศามุมใบบิต (Swirl blades) 3 มุม ได้แก่ 60 85 และ 100 องศา เมื่ออากาศหตุยภูมิมี การเคลื่อนที่ผ่านใบบิตในแนวเดือนแล้วจะเกิดการหมุนควงเขาไปใน Pre-chamber ทำให้เกิดการ ไหลย้อนกลับหรือกระแสหมุนวนภายใน Pre-chamber ซึ่งจะช่วยในส่วนของการคลุกเคล้ากัน ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง และเขาพบว่าที่องศาใบบิตเป็น 100 องศา จะทำให้เกิดกระแสหมุนวนที่ สามารถทำให้การเผาไหม้เป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถดำเนินการที่ 300 -500 kW ได้ โดยไม่ เกิดการเป่าดับ หากแต่งงานของชินภัทร ใช้เชื้อเพลิงที่มีขนาดอนุภาคเล็กไม่เกิน 500 ไมครอน

จากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการป้อนอากาศให้หัวเผาที่ได้รับการตีพิมพ์ พบว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล ความเร็วการไหล หรือ การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง เช่น ขนาดท่อ การนำวัตถุหรือใบบิตมาขวางการไหล และ การไหลเข้าแบบเดือน แบบตรง หรือแบบอื่นๆ ล้วนแต่ เป็นความแตกต่างของการป้อนอากาศให้กับหัวเผา ซึ่งส่งผลอย่างมีนัยสำคัญที่ทำให้ปรากฏการณ์ที่ เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้เปลี่ยนไป ต่อไปได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมและสรุปโดยย่อออกมาเป็นตารางที่ 2.1 ในหน้าถัดไป

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการป้องกันอากาศให้หัวเผา

ชื่อผู้เขียน	ชนิดของเชื้อเพลิง	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	กำลังความร้อน	ชนิดหรือลักษณะของห้องเผาไหม้	ปรากฏการณ์ที่ศึกษาเกี่ยวกับการป้องกันอากาศให้หัวเผา	วิธีการศึกษา
Jiangping Jing และคณะ [2]	ถ่านหินผง	-	300 MW	หัวเผาถ่านหินผงชนิดมีใบพัด	ผลกระทบจากอัตราส่วนอากาศ Primary	ทดลอง
Dong Fang Z. และคณะ [4]	แก๊สธรรมชาติ	-	27 kW	ผสมอากาศก่อนเผาไหม้	ผลกระทบจากการวางตำแหน่งของหัวฉีดแก๊สที่ทางเข้าอากาศ	CFD และ ทดลอง
ฉันทิพร ภัคศิริวรรณท์ [5]	ชีวมวลฝุ่น	0 - 75	1 MW	หัวเผาชีวมวลฝุ่นชนิดห้องเผาไหม้ช่วย	อิทธิพลของมุมเส้นทางออก 135 และ 90 องศา	CFD
Shan Xue และคณะ [6]	ถ่านหินผง	-	1 MW	หัวเผาถ่านหินผง	ผลกระทบจากอัตราส่วนอากาศ Primary และ Secondary	ทดลอง
ฉัตรพัทธ์ ลิ้มกุล และคณะ [7]	เชื้อเพลิงแข็ง	-	-	แบบ Fluidized Bed และ Vortex	การประยุกต์ใช้อากาศหมุนวนกับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง	ศึกษา
Norbert Modlinski [8]	ถ่านหินผง	-	300 - 315 MW	หัวเผาถ่านหินผง	ผลกระทบของมุมใบพัดที่เพิ่มเข้าไปเกิดอากาศหมุนวน	CFD
ฉันทิพร ฐิธการ [9]	ชีวมวลฝุ่น	0 - 500	300 - 500 kW	หัวเผาชีวมวลฝุ่นชนิดมีห้องเผาไหม้ช่วย	ผลกระทบของความต่างมุมใบพัดที่เพิ่มเข้าไปเกิดอากาศหมุนวน	CFD และ ทดลอง
นรเศรษฐ์ พิภกุลเงิน และคณะ [10]	ชีวมวลฝุ่น	0 - 500	500 kW	หัวเผาชีวมวลฝุ่นชนิดมีห้องเผาไหม้ช่วย	ผลกระทบของสัดส่วนการป้องกันอากาศ Primary ต่อ Secondary	CFD และ ทดลอง
Li Zhengqi และคณะ [11]	เชื้อเพลิงฝุ่น	0.5 - 1000	-	หัวเผาเชื้อเพลิงฝุ่นชนิดมีใบพัด	ผลกระทบจากความเร็วการไหลอากาศ Primary ต่อการกระจายตัวของอนุภาคภายในหัวเผา	ทดลอง
Jiangping Jing และคณะ [12]	ถ่านหินผง	-	300 MW	หัวเผาถ่านหินผงชนิดมีใบพัด	ผลกระทบของความต่างมุมใบพัดที่เพิ่มเข้าไปเกิดอากาศหมุนวน (25, 30, 35 และ 40 องศา)	ทดลอง
Subo Fan และคณะ [13]	ถ่านหินผง	-	300 MW	หัวเผาถ่านหินผงชนิดมีใบพัด	ผลกระทบของความต่างมุมใบพัดที่เพิ่มเข้าไปเกิดอากาศหมุนวน (25, 32.5 และ 50 องศา)	ทดลอง
Jiangping Jing และคณะ [14]	ถ่านหินผง	0 - 418.94	200 MW	หัวเผาถ่านหินผงชนิดมีใบพัด	ผลกระทบของอัตราการไหลอากาศ Secondary ต่อการไหลของอนุภาคภายในหัวเผา	ทดลอง
Yasir M. และคณะ [15]	-	-	-	หัวเผาเชื้อเพลิงฝุ่นชนิดมี Bluff body	ลักษณะกระแสหมุนวนและสนามการไหลภายในห้องเผาไหม้	ทดลอง
R. P. van der Lans และคณะ [16]	-	-	-	หัวเผาเชื้อเพลิงฝุ่น	การกระจายตัวของ Residence time และกระแสหมุนวนภายในหัวเผา	ทดลอง
R. K. CHENG [17]	มีเทน และ เอทิลีน	-	30 kW	ผสมอากาศก่อนเผาไหม้	เสถียรภาพของเปลวไฟจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วการป้อนอากาศ	ทดลอง
Ying Huang [18]	แก๊สธรรมชาติ	-	80 kW	ผสมอากาศก่อนเผาไหม้ชนิดมีใบพัด	ผลกระทบของอากาศหมุนวนต่อเสถียรภาพของการเผาไหม้	CFD

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 นิยามของการเผาไหม้

นิยามของการเผาไหม้ในหนังสือเรื่อง An Introduction to Combustion (Concepts and Application second edition) [19] คือ “การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรวดเร็วทำให้เกิดความร้อน หรือก่อเกิดทั้งความร้อนและแสงสว่าง ในทำนองเดียวกันถ้าปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดในอัตราที่ช้าจะก่อให้เกิดความร้อนในปริมาณที่น้อยและไม่มีแสงสว่างเกิดขึ้น” ซึ่งพลังงานความร้อนและแสงที่เกิดขึ้นมาจากการเผาไหม้นั้น เกิดจากการเปลี่ยนรูปมาจากพลังงานที่ใช้ยึดเหนี่ยวพันธะทางเคมี สำหรับการจำแนกประเภทของการเผาไหม้ตามชนิดเชื้อเพลิงสามารถแบ่งได้ 3 แบบ ได้แก่ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแก๊ส ตามลำดับ และสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำวิจัยโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็ง เพราะฉะนั้นในบทนี้จะพูดถึงเฉพาะในส่วน of เชื้อเพลิงแข็งเท่านั้น

3.2 เชื้อเพลิงแข็ง [20, 21]

เชื้อเพลิงแข็งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติได้แก่ ไม้ ชีวมวล พีต ถ่านหิน ขยะจากที่อยู่อาศัย และจากอุตสาหกรรมบางประเภทก็จัดว่าเป็นเชื้อเพลิงแข็งเช่นเดียวกัน องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งนอกจากจะประกอบด้วยคาร์บอน และไฮโดรเจนเป็นส่วนมากแล้วยังประกอบด้วยออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน น้ำ และเถ้าอีกด้วย ตัวอย่างเช่นไม้มีออกซิเจนอยู่ถึง 45% (โดยมวลและไม่รวมน้ำกับเถ้า) ในขณะที่ถ่านหินแอนทราไซต์มีอยู่เพียง 2% เท่านั้นดังแสดงในตารางที่ 3.1

ความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งปรากฏอยู่สองรูปแบบ รูปแบบแรกเป็นน้ำอิสระ (Free water) แทรกตัวอยู่ระหว่างผนังเซลล์ของไม้ หรือในรูพรุนเล็กๆของถ่านหิน ซึ่งน้ำจะถูกดูดซับเข้าไปโดยอิทธิพลของความตึงผิว (Capillary effect) รูปแบบที่สองเป็นน้ำที่ถูกดูดกลืนไว้อย่างเชิงกายภาพ (Physical absorption หรือ Bound water) ความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งมีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการเผาไหม้และประสิทธิภาพโดยรวมของการเผาไหม้

เถ้าในเชื้อเพลิงแข็งคือสารอนินทรีย์ที่เหลืออยู่หลังจากที่เชื้อเพลิงเผาไหม้หมดแล้ว ไม่มีเถ้าเถ้ามาก ในขณะที่ถ่านหินมีสูงถึง 10% หรือมากกว่า คุณลักษณะของเถ้ามีความสำคัญอย่างมากในการออกแบบอุปกรณ์เผาไหม้ และอุปกรณ์การถ่ายโอนความร้อน ทั้งนี้เพื่อหาทางลดปัญหาจากการเกิดเป็นสแลก (Slag fouling) การกัดกร่อน (Erosion) และการผุกร่อน (Corrosion) ลงได้

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่างๆ

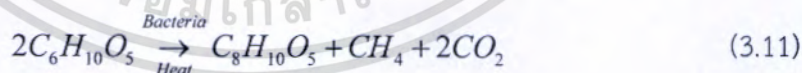
เชื้อเพลิง	ออกซิเจน, % (หลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า)	ความชื้น, % (ไม่คิดเถ้า)	เถ้า, % (หลักอ้างอิงแห้ง)
ไม้	45	15-50	0.1-1.0
พีต	35	90	0.1-10
ถ่านหินลิกไนต์	25	30	> 5
ถ่านหินบิทูมินัส	5	5	> 5
ถ่านหินแอนทราไซต์	2	4	> 5
เชื้อเพลิงจากขยะ	40	24	10-15

องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งจะถูกรายงานในลักษณะตามที่ได้รับมา (As-received basis) หรือในลักษณะหลักอ้างอิงแห้ง (Dry basis) หรือในลักษณะหลักอ้างอิงแห้ง และไม่คิดเถ้า (Dry, ash-free basis) ดังนั้นการระบุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งต้องระบุเงื่อนไขให้ถูกต้องเพราะเกี่ยวข้องกับการคำนวณหาค่าความร้อนทางสูง และทางต่ำโดยตรง ทำให้ช่วยพิจารณาได้อย่างถูกต้องว่าความร้อนแฝงของน้ำที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นอิสระ หรือน้ำที่ถูกดูดกลืนในเชื้อเพลิง หรือน้ำที่เกิดจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง

3.2.1 ประเภท และลักษณะของเชื้อเพลิงแข็ง

3.2.1.1. พีต (Peat)

พีตเกิดจากไม้หรือเซลลูโลสที่อยู่ในบริเวณอับอากาศ และหมักหมมเป็นเวลานานจนเกิดการเน่าสลายทางเคมีโดยแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการ



ซึ่งพีตจะมีสีดำปนน้ำตาล มีรูพรุนและความชื้นสูงถึง 80-90% จึงจำเป็นต้องตากแห้งหรือผ่านกระบวนการอบแห้งก่อนนำมาใช้

3.2.1.2. ถ่านหิน (Coal)

ถ่านหินเกิดจากไม้ และชีวมวลชนิดอื่นๆที่ทับถมกัน และอัดแน่นเป็นเวลานานมากจนกระทั่งกลายเป็นหิน โดยเริ่มจากพีตในที่สูงและ อับอากาศแล้วเกิดการสลายตัวทางเคมีชีวภาพ (Biochemical decomposition) พร้อมกับมีการทับถมกันของพีชชนิดต่างๆเพิ่มเติมเข้ามาจนมีความลึกมากขึ้นเรื่อยๆทำให้พีตมีความชื้น ความพรุน (Porosity) ปริมาณสารระเหย (Volatile

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ที่ใดก็ตามที่เป็นลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

matter content) พร้อมกับปริมาณของออกซิเจน และไฮโดรเจนลดลง ในขณะที่มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น พีตจะเปลี่ยนเป็นถ่านหินที่มีศักดิ์ (Rank of coal) สูงขึ้นตามลำดับ คือ ลิกไนต์ บิทูมินัส และแอนทราไซท์ในที่สุด เรียกกระบวนการเปลี่ยนแปลงนี้ว่าการเกิดถ่านหิน (Coalification) ถ่านหินมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และสารอนินทรีย์อื่นๆในปริมาณเล็กน้อย ที่จะกลายเป็นแก๊สหลังการเผาไหม้ เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม แมงกานีส ฟอสฟอรัส และออกไซด์ของซิลิกอน เป็นต้น ตารางที่ 3.3 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างองค์ประกอบทางเคมีของไม้สน (Pine) กับของถ่านหินบิทูมินัส

คุณภาพของถ่านหินแบ่งเป็นสองแบบคือ แบ่งตามศักดิ์ของถ่านหิน กับแบ่งตามเกรดของถ่านหิน (Grade of coal) ศักดิ์ของถ่านหินพิจารณาจากค่าความร้อนของถ่านหิน และจากปริมาณคาร์บอนคงตัวภายใต้เงื่อนไขหลักอ้างอิงแห้ง และไม่คิดเถ้า (Dry, free ash basis) ตารางที่ 3.4 แสดงการแบ่งชนิดของถ่านหิน โดยศักดิ์ของถ่านหิน สำหรับเกรดของถ่านหินพิจารณาจากปริมาณเถ้า จุดหลอมของเถ้า (Ash fusion temperature) ปริมาณกำมะถัน และสารประกอบคุณภาพต่างๆ ซึ่งเป็นหลักที่ไม่เกี่ยวกับศักดิ์ของถ่านหินแต่ประการใด การเพิ่มเกรดของถ่านหินทำได้หลายวิธีทั้งทางกล และทางเคมีเพื่อลดปริมาณสิ่งต่างๆที่ได้กล่าวมาให้น้อยลง เช่น โดยการบดถ่านหินให้ป่นเป็นผงขนาด 10 mm แล้วล้างด้วยน้ำก็สามารถลดปริมาณเถ้าให้เหลือน้อยกว่า 1% ได้ หรือใช้วิธีแยกตามความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ (Gravity separation) เพื่อให้สิ่งเจอบนที่มีน้ำหนักมากกว่าถ่านหินตกตะกอนแยกออกมาจากถ่านหิน เป็นต้น

ตารางที่ 3.2 ลักษณะของถ่านหิน

ประเภท	ความหนาแน่น [g/cm ³]	ความร้อนจำเพาะ	อุณหภูมิติดไฟ [°C]	ค่าความร้อน [kJ/kg]
ลิกไนต์	0.8-1.5	0.26-0.28	250-300	23020-31400
บิทูมินัส	1.2-1.7	0.24-0.28	300-400	31400-36840
แอนทราไซท์	1.5-1.8	0.22-0.24	400-450	34330-35580

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างไม้สนกับถ่านหินบิทูมินัส

ธาตุ	ถ่านหินบิทูมินัส [ppm]	ไม้สน [ppm]
Ca	760	>5000
Na	28	200-5000
K	39	200-5000
Mg	110	200-5000
Mn	97	6-210
Fe	10	>5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P	40	10-340
Si	-	>5000
Al	6	>5000
Cl	48	200-1000

ตารางที่ 3.4 การแบ่งชนิดของถ่านหินโดยศักดิ์ของถ่านหิน (หลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า)

ศักดิ์ของถ่านหิน	คาร์บอนคงตัว [%]	ค่าความร้อนทางสูง [MJ/kg]
เมตา-แอนทราไซต์	>98	
แอนทราไซต์	92-98	
เซมิแอนทราไซต์	86-92	
บิทูมินัสสารระเหยต่ำ	78-86	
บิทูมินัสสารระเหยปานกลาง	69-78	
บิทูมินัสสารระเหยสูง A		>32
บิทูมินัสสารระเหยสูง B		30-32
บิทูมินัสสารระเหยสูง C		27-30
ซับบิทูมินัส A		24-27
ซับบิทูมินัส B		22-24
ซับบิทูมินัส C		19-22
ลิกไนต์ A		15-19
ลิกไนต์ B		<15

3.2.1.3. เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) [22]

ชีวมวลหมายถึงสิ่งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต หรือสารอินทรีย์ที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้โดยรวมถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่างๆเช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย ทะลายปาล์ม เศษไม้ และมูลสัตว์ เป็นต้น โดยเชื้อเพลิงชีวมวลโดยส่วนใหญ่จะมียังประกอบเป็นเซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$) และ ลิกนิน ($C_{40}H_{44}O_6$) ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเท่านั้น จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรในปีเพาะปลูก พ.ศ. 2549-2550 พบว่า



กากใยปาล์ม

ไม้พืน

ซังข้าวโพด

เหง้ำมันสำปะหลัง

กะลามะพร้าว

แกลบ

รูปที่ 3.1 ชีวมวลในประเทศไทย

ชีวมวลจากข้าว

แกลบ จากข้อมูลพบว่ามีปริมาณการผลิตข้าวทั้งประเทศเท่ากับ 28.61 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณแกลบเท่ากับ 3.95 ล้านตัน โดยมีการนำแกลบเหล่านี้มาใช้งานคิดเป็นปริมาณรวม 0.86 ล้านตันหากนำปริมาณแกลบคงเหลือดังกล่าวมาหักด้วยปริมาณการสูญเสียของแกลบที่เกิดจากการขัดสี การฟุ้งกระจายทั้งในระหว่างกระบวนการต่างๆ และการขนส่ง ดังนั้นปริมาณแกลบคงเหลือที่สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.09 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 843 ktoe

ฟางข้าว จากข้อมูลสามารถประเมินปริมาณฟางข้าวเท่ากับ 34.04 ล้านตันเมื่อนำมาคิดปริมาณที่เก็บรวบรวมได้ (ฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม 10%) ปริมาณฟางข้าวคงเหลือที่สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.40 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 926.10 ktoe

ชีวมวลจากข้าวโพด

ซังข้าวโพด พบว่ามีปริมาณการผลิตข้าวโพดทั้งประเทศเท่ากับ 4.40 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณซังข้าวโพดเท่ากับ 0.84 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้ในภาคต่างๆคิดเป็นปริมาณรวม 74,000 ตัน ทำให้ปริมาณชีวมวลคงเหลือมีค่าเท่ากับ 0.43 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 124.6 ktoe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชีวมวลจากอ้อย

ยอดและใบอ้อย จากข้อมูลพบว่ามีปริมาณการผลิตอ้อยทั้งประเทศเท่ากับ 70 ล้านตัน คิดเป็นชีวมวลประเภทยอดและใบอ้อยเท่ากับ 16.8 ล้านตัน เมื่อนำมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40 %) จะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 6.72 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 1,935.7 ktoe

กากอ้อย จากข้อมูลสามารถประเมินปริมาณกากอ้อยเท่ากับ 21 ล้านตัน ชีวมวลประเภทนี้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม โดยปัจจุบันได้ถูกแปรไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อนในโรงงานผลิตน้ำตาล และบางโรงงานนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า จึงทำให้ชีวมวลประเภทนี้หมดไปกับการใช้ในโรงงานเป็นหลัก แม้แต่มีความต้องการใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอื่นๆ แต่ก็ไม่มีวัตถุดิบมาป้อน หลายโรงได้เริ่มเสาะหาเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆ มาใช้ร่วมกับกากอ้อยเนื่องจากภาวะขาดแคลนของกากอ้อย

ชีวมวลจากลำต้นมันสำปะหลัง

ลำต้นมันสำปะหลัง จากข้อมูลพบว่ามีปริมาณการผลิตมันสำปะหลังทั้งประเทศเท่ากับ 17.6 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณลำต้นมันสำปะหลัง 2.11 ล้านตัน เมื่อนำปริมาณชีวมวลคงเหลือดังกล่าวมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 0.84 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 198 ktoe

เหง้ามันสำปะหลัง จากข้อมูลผลผลิตเหง้ามันสำปะหลังสามารถประเมินปริมาณเหง้ามันได้เท่ากับ 1.76 ล้านตัน เมื่อนำปริมาณชีวมวลคงเหลือดังกล่าวมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 0.7 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 131 ktoe ปัจจุบันแทบไม่มีการนำเอาเหง้ามันสำปะหลังมาใช้ผลิตพลังงาน เนื่องจากการเก็บรวบรวมมีความยากลำบาก และต้นทุนการขนส่งสูง

ชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน

ทางใบและก้านปาล์ม จากข้อมูลพบว่ามีปริมาณการผลิตปาล์มน้ำมันทั้งประเทศเท่ากับ 8.75 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณทางใบและก้านเท่ากับ 2.36 ล้านตัน เมื่อคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (65%) และการนำไปใช้ประโยชน์จะมีปริมาณชีวมวลคงเหลือสุทธิ 1.54 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 481 ktoe

กากใบปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตของกรมส่งเสริมการเกษตร ปาล์มน้ำมันมีปริมาณของกากใบปาล์มที่ได้เท่ากับ 1.31 ล้านตัน โดยชีวมวลประเภทนี้จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม เมื่อหักปริมาณที่ถูกใช้งานออกจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 0.23 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 81.3 ktoe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กะลาปาล์ม จากข้อมูลสามารถประเมินปริมาณกะลาปาล์มได้เท่ากับ 0.53 ล้านตัน โดยมีการใช้ชีวมวลประเภทนี้ในภาคอุตสาหกรรมเพื่อเป็นเชื้อเพลิงคิดเป็นปริมาณรวม 18,000 ตัน และใช้ในประเภทอื่นๆ 147,000 ตัน ดังนั้นจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 0.31 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 114 ktoe

ทะลายปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตปาล์มน้ำมันของกรมส่งเสริมการเกษตร สามารถประเมินปริมาณของทะลายปาล์มได้เท่ากับ 2.01 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลประเภทนี้ถูกนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าคิดเป็นปริมาณรวม 80,000 ตัน และใช้ในประเภทอื่นๆเช่น ทำปุ๋ย และเพาะเห็ดคิดเป็นปริมาณ 160,000 ตัน ดังนั้นจะมี ชีวมวลคงเหลือสุทธิ 1.13 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 385 ktoe

ชีวมวลจากไม้ยางพารา

ซีเลื้อยและเศษไม้ยางพารา จากรายงานของสถาบันวิจัยยางพาราทำให้ทราบว่าในแต่ละปีจะมีต้นยางพาราที่มีอายุเกิน 25 ปี ซึ่งครบรอบที่จะต้องทำการตัด คิดเป็นพื้นที่ยางพาราที่ถูกตัดฟัน 500,000 ไร่ต่อปี จะได้ปริมาณของไม้ยางพารา 200 ล้านตัน ซึ่งไม้ยางพาราที่ถูกตัดจะนำไปเข้ากระบวนการแปรรูปไม้เพื่อผลิตเฟอร์นิเจอร์ ดังนั้นจะมีชีวมวลที่ได้ภายหลังกระบวนการผลิตคิดเป็นเศษไม้ 3.6 ล้านตัน และซีเลื้อย 8 ล้านตัน เมื่อหักปริมาณที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์จะมีเศษไม้คงเหลือ 3.55 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 1,862 ktoe ในส่วนของซีเลื้อยจะมีปริมาณคงเหลือ 1,037 ktoe

ชีวมวลที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัส

ไม้ยูคาลิปตัสจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเป็นส่วนใหญ่ โดยผลผลิตของไม้ยูคาลิปตัสทั้งประเทศมีปริมาณรวม 6.8 ล้านตันต่อปี มีชีวมวลเกิดขึ้นคือไม้ฟืนและเปลือกไม้ โดยไม้ฟืนจะถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า สำหรับเปลือกไม้จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน เมื่อประเมินจำนวนของชีวมวลคงเหลือพบว่าจะมีไม้ฟืนคงเหลือเท่ากับ 0.57 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 167 ktoe และพลังงานไฟฟ้า 63.5 MW สำหรับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีปริมาณคงเหลือ 0.61 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 186 ktoe

ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของ RDF และเชื้อเพลิงต่างๆ (หลังอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า)

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	6	6	5	5	7
คาร์บอน	50	55	68	78	52
กำมะถัน	0.1	0.4	1	2	0.3
ไนโตรเจน	0.1	1	1	2	0.6
ออกซิเจน	44	38	25	13	40
ค่าความร้อนทางสูง (HHV), (MJ/kg)	20	22	23	33	22

3.2.2 การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็ง

การวิเคราะห์ และทดสอบเชื้อเพลิงแข็งสามารถทำได้โดยใช้วิธีการตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึงแต่เฉพาะที่เห็นว่าสำคัญๆ เช่น การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ค่าความร้อน และอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้า (Ash fusion temperature) เป็นต้น

การวิเคราะห์โดยประมาณ ตามมาตรฐาน ASTM D3172 จะระบุปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหยที่เผาไหม้ได้ (Volatile combustible matter) ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า ในการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว ถ่านหินจะถูกบดเป็นผง และนำไปอบให้แห้งในเตาอบภายใต้อุณหภูมิประมาณ 105-110 °C จนได้น้ำหนักคงที่ น้ำหนักส่วนที่หายไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักเดิมคือปริมาณความชื้น จากนั้นถ่านหินที่แห้งแล้วจะถูกทำให้ร้อนในภาชนะปิด (เพื่อป้องกันการเกิด ออกซิเดชัน) ภายใต้อุณหภูมิ 900 °C เพื่อไล่สารระเหยที่เผาไหม้ได้จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ น้ำหนักส่วนที่หายไป คือปริมาณสารระเหยที่เผาไหม้ได้นั่นเอง จากนั้นนำถ่านหินที่ได้ไปอบในภาชนะเปิดภายใต้อุณหภูมิ 750 °C เพื่อให้เกิดการเผาไหม้จนได้น้ำหนักที่เหลือคงที่ และเป็นน้ำหนักของเถ้า ในขณะที่น้ำหนักส่วนที่หายไปคือปริมาณของคาร์บอนคงตัวนั่นเอง การวิเคราะห์โดยประมาณมีประโยชน์ในการเปรียบเทียบเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ตามมาตรฐาน ASTM D3176 เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ผลระบุถึงปริมาณธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น โดยระบุในลักษณะหลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า ปริมาณคาร์บอนและปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงถูกกำหนดโดยการเผาเชื้อเพลิงตัวอย่างในภาชนะปิดที่บรรจุออกซิเจนไว้อย่างเพียงพอแล้ววัดองค์ประกอบของไอเสียเพื่อคำนวณย้อนกลับไปหาปริมาณคาร์บอนและปริมาณไฮโดรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงนั้น ไนโตรเจนและกำมะถันจะถูกกำหนดโดยอาศัยวิธีการทางเคมี ในขณะที่ออกซิเจนจะถูกระบุโดยค่า 100 ลบด้วยปริมาณของธาตุ C H N และ S

การกำหนดค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (ASTM D2105) ทำได้โดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ซึ่งจะได้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ค่าปริมาตรคงที่ ซึ่งจะแตกต่างไปจากค่าที่ความดันคงที่

การกำหนดอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้า (ASTM D1857) โดยการนำเถ้าของถ่านหินที่พิจารณาเหมาะสมกับสารละลายของ Dextrin เพื่อทำให้เป็นของเหลวหนืด แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์มาตรฐานตามที่กำหนดเพื่อทำให้เป็นรูปกรวยตันแหลม จากนั้นไปทำให้ร้อนขึ้นอย่างช้าๆในเตาอบแบบเปิดสู่อากาศ (Oxidizing) หรือแบบลดอากาศ (Reducing) ก็ได้แล้วแต่กำหนด แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกรวยของเถ้า อุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าจะมีหลายค่า กล่าวคือ อุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าคืออุณหภูมิที่ค่าต่างๆกัน (จากน้อยไปหามาก) ที่ทำให้เถ้าเริ่มเปลี่ยนรูปร่างเป็นแบบต่างๆกันตามลำดับ คือ กรวยปลายมนเล็กน้อย หลอมเป็นแท่งทรงกระบอกปลายมน หลอม เป็นรูปครึ่งทรงกลม และสุดท้ายหลอมละลายแบนราบติดกับพื้น อุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเถ้า เช่น เถ้าที่ประกอบด้วย SiO_2 Al_2O_3 และ TiO_2 จะมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูง ในขณะที่เถ้าที่ประกอบด้วยออกไซด์มูลฐาน เช่น Fe_2O_3 CaO MgO Na_2O และ K_2O เป็นต้น จะมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าจะต่ำกว่าอุณหภูมิของเปลวไฟแต่จะสูงกว่าอุณหภูมิของไอน้ำและผนังเตา

3.2.3 สมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิง

3.2.3.1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง คือค่าปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิงที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ในสภาวะเริ่มต้นที่ 25 °C ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับออกซิเจนได้สารผลิตภัณฑ์ที่เย็นตัวลงมาที่ 25 °C ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีสองค่าคือค่าความร้อนทางสูง (Higher heating value, HHV) หรือ Gross calorific value (gross C.V) ซึ่งเกิดขึ้นกรณีที่ไอน้ำในสารผลิตภัณฑ์การเผาไหม้กลั่นตัวเป็นน้ำ และค่าทางความร้อนต่ำ (Lower heating value, LHV) หรือ Net calorific value (net C.V.) เกิดในกรณีที่ไอน้ำไม่กลั่นตัว ค่าความร้อนทางต่ำสามารถหาได้จากค่าความร้อนทางสูงโดยการหักค่าความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำในสารผลิตภัณฑ์ออกจากค่าความร้อนทางสูง ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$LHV = HHV - \left(\frac{m_{H_2O}}{m_{fuel}} \right) h_{fg} \quad (3.12)$$

เมื่อ h_{fg} คือค่าความร้อนแฝงในการระเหยของน้ำที่ 25 °C มีค่าเท่ากับ 2,440 kJ/kg m_{H_2O} คือมวลของน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้โดยรวมถึงน้ำที่มาจากความชื้นในเชื้อเพลิง และที่เกิดจากปฏิกิริยากับไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง m_{fuel} คือมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงหาได้จากการทดลองโดยชุดอุปกรณ์ที่เรียกว่าแคลอรีมิเตอร์ หรือคำนวณหาโดยวิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์เมื่อทราบส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงนั้น

3.2.3.2 ความสามารถในการระเหย (Volatility) บอกให้ทราบถึงการระเหยของเชื้อเพลิงเหลวว่ายากหรือง่ายเพียงใด ระบุโดยค่าความดันไอ และมวลระเหยออกเป็นไอที่อุณหภูมิต่างๆ

3.2.3.3 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, (Sp.Gr)) คือการเปรียบเทียบความหนาแน่นหรือความหนักเบาของเชื้อเพลิงเหลวเมื่อเทียบกับน้ำที่ปริมาตร และอุณหภูมิเดียวกันคือ 15 °C

$$Sp.Gr = \left(\frac{\rho_{oil}}{\rho_{water}} \right)_{@15^\circ C} \quad (3.13)$$

3.2.3.4 ความหนืด (Viscosity) คือความต้านทางการไหลของเชื้อเพลิงเหลว มีอิทธิพลต่อการส่งเชื้อเพลิงเหลวให้ไหลไปตามท่อ ขณะเดียวกันก็มีผลต่อกระบวนการแตกตัวเป็นละอองด้วยความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นหลัก ดังนั้นในการกำหนดค่าความหนืดจึงมักจะต้องบอกถึงอุณหภูมิกำกับด้วย โดยทั่วไปเชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงจะมีความหนืดสูง ส่วนเชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำจะมีความหนืดต่ำและจะเผาไหม้ได้ง่ายกว่า

3.2.3.5 จุดน้ำมันเป็นผ้า คืออุณหภูมิที่เริ่มเกิดฝ้าขุ่นมัวในเนื้อน้ำมัน เนื่องจากเริ่มเกิดผลึกซีผึ้งหรือไขน้ำมันเมื่ออุณหภูมิน้ำมันต่ำลง เป็นสาเหตุทำให้ไส้กรองน้ำมันอุดตันได้

3.2.3.6 จุดไหล (Pour point) คืออุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงเหลวจะไหลได้ จุดไหลเป็นสมบัติของเชื้อเพลิงเหลวที่สำคัญ เพราะถ้าอุณหภูมิของเชื้อเพลิงเหลวต่ำกว่าจุดไหล เชื้อเพลิงเหลวจะไหลยากซึ่งอาจส่งผลให้ระบบส่งเชื้อเพลิงเหลวอุดตันได้

3.2.3.7 จุดวาบไฟ (Flash point) คืออุณหภูมิต่ำสุดที่ไอระเหยของเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งระเหยผสมกับอากาศแล้วทำให้เกิดการติดไฟได้เมื่อสัมผัสกับเปลวไฟจากภายนอก เชื้อเพลิงเหลวที่มีจุดวาบไฟต่ำต้องได้รับการดูแลเป็นพิเศษ การทราบค่าจุดวาบไฟทำให้ทราบว่าควรอุ่นเชื้อเพลิงเหลว

ให้ร้อนได้ถึงระดับใดเพื่อลดความหนืด อุณหภูมิของเชื้อเพลิงเหลวที่ใช้ควรจะต่ำกว่าจุดวาบไฟ ประมาณ 4-5°C เพื่อความปลอดภัย

3.2.3.8 จุดติดไฟ คืออุณหภูมิที่สูงกว่าจุดวาบไฟเล็กน้อยที่เมื่อมีเปลวไฟจากแหล่งภายนอกมาสัมผัสกับไอน้ำมันทำให้เกิดการติดไฟ และการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง

3.2.3.9 จุดติดไฟด้วยตัวเอง (Auto-ignition temperature) คืออุณหภูมิต่ำสุดของเชื้อเพลิงที่ยังคงทำให้เกิดการติดไฟ และการเผาไหม้ขึ้นด้วยตัวเองได้ ภายในภาชนะมาตรฐานและความดันปกติ โดยไม่มีการสปาร์กด้วยไฟฟ้า หรือเปลวไฟจากแหล่งภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง

ตารางที่ 3.6 จุดวาบไฟและจุดติดไฟด้วยตัวเองของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

สารประกอบ	สูตรทางเคมี	จุดวาบไฟ [°C]	จุดติดไฟด้วยตัวเอง [°C]
คาร์บอนมอนอกไซด์	CO	-	609
ไฮโดรเจน	H ₂	-	400
พาราฟินส์			
มีเทน	CH ₄	-188	537
อีเทน	C ₂ H ₆	-135	472
โพรเพน	C ₃ H ₈	-104	470
นอร์มอลบิวเทน	C ₄ H ₁₀	-60	365
นอร์มอลออกเทน	C ₈ H ₁₈	10	206
ไอโซออกเทน		-12	418
นอร์มอลซีเทน		135	205
อะซีทีลีน			
อะซีทีลีน	C ₂ H ₂	-	305
แอลกอฮอล์			
เมทานอล	CH ₃ OH	11	385
เอทานอล	C ₂ H ₅ OH	12	365

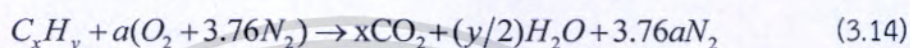
3.3 การเผาไหม้ (Combustion) [19, 20, 23, 24]

ในข้างต้นนิยามของการเผาไหม้ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.1 ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาที่เป็นลักษณะของการคำนวณในเชิงของการเผาไหม้ ซึ่งมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 สตอยซิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion Stoichiometry)

การเผาไหม้ที่ Stoichiometry เป็นการคำนวณปริมาณออกซิโดเซอร์ที่พอดีในการเผาไหม้ อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นถ้าปริมาณออกซิโดเซอร์มากกว่าที่สภาวะ Stoichiometry นั้นหมายถึงการเผาไหม้นั้นมีส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงแบบบาง (Fuel lean) ในทางกลับกัน เมื่อมีปริมาณออกซิโดเซอร์น้อยกว่าที่สภาวะ Stoichiometry หมายถึงมีส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงแบบหนา (Fuel rich) การหาความสัมพันธ์แบบ Stoichiometry ทำได้โดยการเขียนสมการเผาไหม้ สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) จะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ได้ดังนี้



เมื่อ
$$a = x + y/4 \quad (3.15)$$

สัดส่วนของปริมาณออกซิเจนในอากาศซึ่งมักนิยมพิจารณาให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ เป็นอากาศแห้งประกอบไปด้วยออกซิเจน 21% โดยปริมาตร และไนโตรเจน 79% โดยปริมาตร นั่นคือแต่ละโมลของออกซิเจนมีไนโตรเจน 3.76 โมล ซึ่งการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ตามทฤษฎีหรือตาม Stoichiometry สามารถหาได้จาก

$$(A/F)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right) = \frac{7.76a}{1} \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}} \quad (3.16)$$

เมื่อ MW_{air} และ MW_{fuel} เป็นน้ำหนักโมเลกุลของอากาศ และเชื้อเพลิงตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีปริมาณอื่นๆที่เกี่ยวข้อง อัตราส่วนสมมูล (Equivalent ratio, Φ) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกว่าส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นแบบ Stoichiometry หนา หรือบาง ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\Phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{stoic}} \quad (3.17)$$

จากนิยามจะเห็นได้ว่า สำหรับส่วนผสมหนา จะมีค่า $\Phi > 1$ ส่วนผสมบางจะมี $\Phi < 1$ และสำหรับ Stoichiometry จะมี $\Phi = 1$ ซึ่งอัตราส่วนสมมูลนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่มีประโยชน์มากในการบ่งบอกสมรรถนะของพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ % Stoichiometry air คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้คิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศตามทฤษฎี ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนสมมูลดังนี้

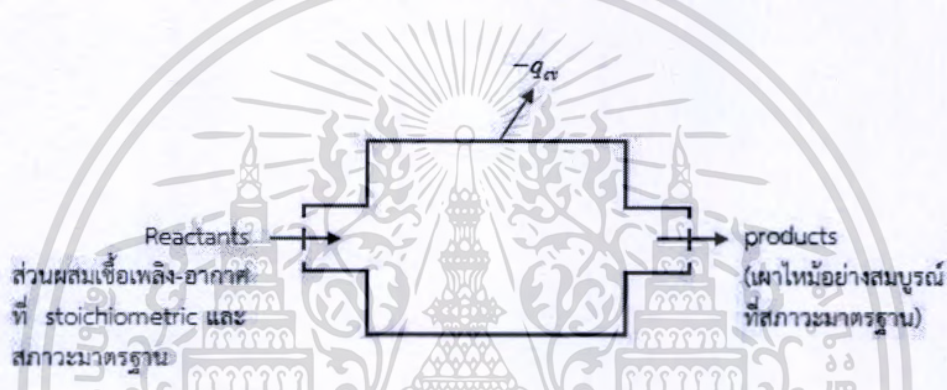
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\%stoichiometry\ air = \frac{100\%}{\Phi} \quad (3.18)$$

และเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (% Excess air) คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินกี่เปอร์เซ็นต์โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100

$$\%excess\ air = \frac{(1-\Phi)}{\Phi} \cdot 100\% \quad (3.19)$$

3.3.2 Enthalpy of Combustion และค่าความร้อน (Heating values)



รูปที่ 3.2 ห้องปฏิกรณ์ที่มีการไหลสม่ำเสมอเพื่อใช้ในการหาค่าความร้อนจากการเผาไหม้

พิจารณาห้องปฏิกรณ์ (Reactor) ที่มีการไหลแบบสม่ำเสมอแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งของผสมที่เป็นสารตั้งต้น (Reactants) ในสภาวะ stoichiometric ไหลเข้า และมีสารผลิตภัณฑ์ (Product) ไหลออก โดยทั้งคู่อยู่ในสภาวะมาตรฐาน (25°C และ 1 atm) หากสมมติว่ากระบวนการเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ นั่นคือ เชื้อเพลิงคาร์บอนทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และเชื้อเพลิงไฮโดรเจนทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นน้ำ (H_2O) ถ้าสารผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ไหลออกมาตรงทางออกมีอุณหภูมิเดียวกันกับสารตั้งต้นที่ไหลเข้า ดังนั้นความร้อนจะไหลออกจากปฏิกรณ์ ปริมาณความร้อนที่ไหลออกจะสัมพันธ์กับ Standardized enthalpies ของสารตั้งต้น และสารผลิตภัณฑ์ หากใช้กฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์สำหรับการไหลแบบสม่ำเสมอ จะได้สมการ

$$q_{cv} = h_o - h_i = h_{prod} - h_{reac} \quad (3.20)$$

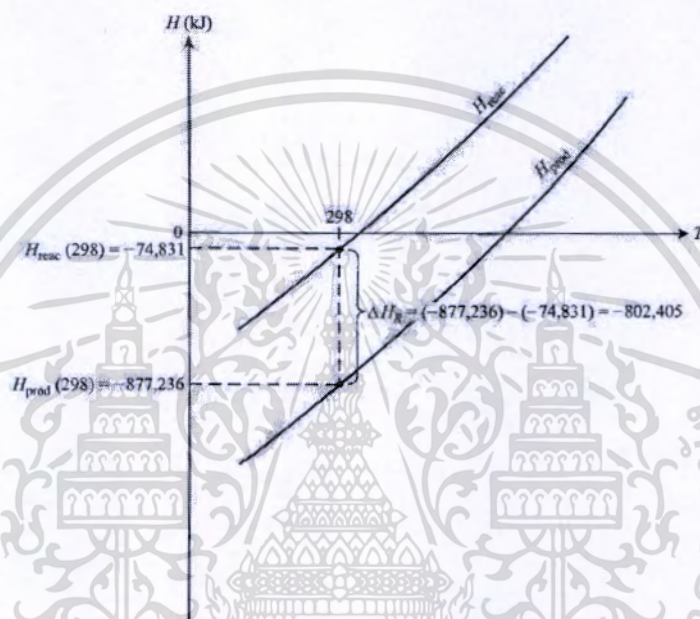
ซึ่งสามารถให้นิยามของ Enthalpy of reaction หรือ Enthalpy of combustion, Δh_R (ต่อมวลของของผสม) ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta h_R \equiv q_{cv} = h_{prod} - h_{react} \quad (3.21)$$

หรือในเทอมของคุณสมบัติ Extensive จะได้

$$\Delta H_R = H_{prod} - H_{react} \quad (3.22)$$



รูปที่ 3.3 Enthalpy of combustion ของมีเทน - อากาศ ที่สภาวะ Stoichiometric ซึ่งน้ำในผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้อยู่ในสถานะไอ [19]

ค่า Enthalpy of combustion สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 เนื่องจากความร้อนไหลออกจากระบบจึงมีค่าติดลบ และทำให้ Absolute enthalpy ของสารผลิตภัณฑ์อยู่ต่ำกว่าของสารตั้งต้น ซึ่งจะพบว่า Enthalpy of combustion ของปฏิกิริยาดังกล่าวมีค่าเท่ากับ -802,405 KJ/kmol of fuel โดยสามารถเปลี่ยนค่าดังกล่าวให้เป็นต่อหน่วยมวลของเชื้อเพลิงได้ดังนี้

$$\Delta h_R \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{fuel}} \right) = \frac{\Delta H_R}{MW_{fuel}} \quad (3.23)$$

ค่าดังกล่าวสามารถเปลี่ยนให้คิดต่อหน่วยมวลของของผสมได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta h_R \left(\frac{kJ}{kg_{mix}} \right) = \Delta h_R \left(\frac{kJ}{kg_{fuel}} \right) \frac{m_{fuel}}{m_{mix}} \quad (3.24)$$

โดยที่

$$\frac{m_{fuel}}{m_{mix}} = \frac{m_{fuel}}{m_{air} + m_{fuel}} = \frac{1}{(A/F)+1} \quad (3.25)$$

ซึ่งค่า Enthalpy of combustion จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่พิจารณา เนื่องจากทั้งค่า Enthalpy ของสารตั้งต้น และสารผลิตภัณฑ์ ต่างก็เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

ค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Heat of combustion หรือ Heating values) หรือ Δh_c มีค่าเท่ากับ Enthalpy of combustion เพียงแค่คิดเครื่องหมายเป็นบวก สามารถแบ่งค่าความร้อนของการเผาไหม้ได้เป็น ค่าความร้อนสูง (Higher heating value, HHV) และค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value, LHV) โดยค่าความร้อนสูงเป็นค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ โดยสมมติว่าน้ำทั้งหมดในสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้นั้นควบแน่นเป็นของเหลว ซึ่งจะทำปฏิกิริยามีการปลดปล่อยพลังงานออกมาทั้งหมด ในขณะที่ค่าความร้อนต่ำนั้น น้ำในสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้จะไม่มีการควบแน่น สำหรับ CH_4 ค่าความร้อนสูงจะมีค่ามากกว่าค่าความร้อนต่ำอยู่ประมาณ 11 %

3.3.3 อุณหภูมิเปลว Adiabatic (Adiabatic Flame Temperatures)

อุณหภูมิเปลว Adiabatic คืออุณหภูมิสุดท้ายภายหลังจากไอดีเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน และไอดีจะเข้าสู่สมดุลทางเคมี ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ อุณหภูมิเปลว Adiabatic สำหรับการเผาไหม้แบบความดันคงที่ และสำหรับการเผาไหม้แบบปริมาตรคงที่

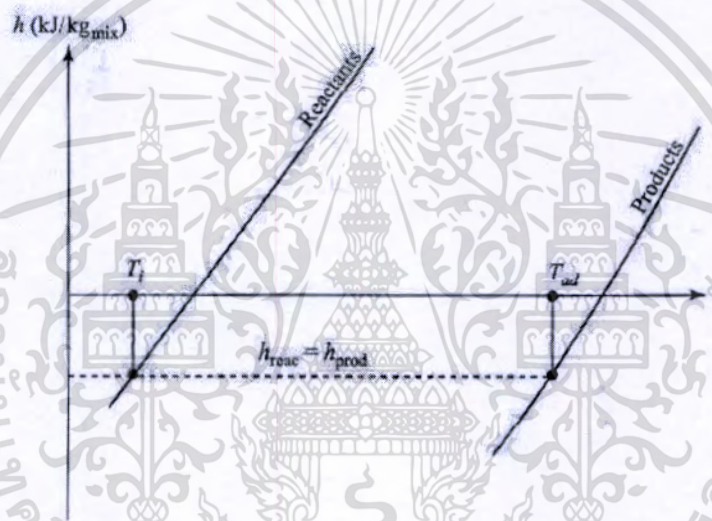
ถ้าสารผสมเชื้อเพลิง-อากาศเกิดการเผาไหม้ในสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนแบบความดันคงที่ จะส่งผลให้ค่า Absolute enthalpy ของสารตั้งต้นดังกล่าว ณ สภาวะเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับ Absolute enthalpy ของสารผลิตภัณฑ์ ณ สภาวะสุดท้าย ดังสมการ

$$H_{react}(T_i, P) = H_{prod}(T_{ad}, P) \quad (3.26)$$

ค่า T_{ad} ที่ปรากฏในสมการที่ 3.26 จะเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการเผาไหม้ และเรียกอุณหภูมิเปลว Adiabatic แบบความดันคงที่ (Constant pressure adiabatic flame temperature) และสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.4 ซึ่งตัวอย่างของกระบวนการเผาไหม้แบบความดันคงที่ ได้แก่ การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แก๊สเทอร์โบ หรือในเครื่องกำเนิดไอน้ำ เป็นต้น

จากที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้วว่าอุณหภูมิเปลว Adiabatic เป็นอุณหภูมิสูงสุดของระบบที่จะทำได้ภายใต้เงื่อนไขในอุดมคติ (ไม่มีการสูญเสียความร้อน และการเผาไหม้เกิดขึ้นเร็วมาก) แต่ในความเป็นจริงแล้วอุณหภูมิเปลวไฟจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเปลว Adiabatic มากเนื่องจาก

- ระบบไม่ได้เป็น Adiabatic จึงมีการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศรอบข้าง มีงานกระทำต่อสิ่งแวดล้อม และกระบวนการเผาไหม้มีความเร็วที่จำกัด
- การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้มีสารตั้งต้นบางส่วนซึ่งยังไม่ถูกเผาไหม้
- มีสารเจือจาง (Diluents) เช่น N_2 ในอากาศซึ่งไม่มีส่วนช่วยในการผลิตความร้อนแต่ประการใด แต่กลับทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มภาระความร้อน (ρC_p) ให้กับระบบ ส่งผลให้อุณหภูมิสุดท้ายของระบบต่ำลง



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงการหาอุณหภูมิเปลว Adiabatic ในแกนอ้างอิง $h-T$ [19]

3.3.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้

3.3.4.1 ปริมาณอากาศที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ (Sufficient air to combustion) ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้สมบูรณ์จำเป็นต้องมีสัดส่วนของอากาศหรือออกซิเจนที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ โดยปริมาณอากาศที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์เรียกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี ซึ่งสามารถคำนวณได้จากหัวข้อที่ผ่านมา

3.3.4.2 ระยะเวลาในการเผาไหม้ (Burning time) เนื่องจากการทำปฏิกิริยาจำเป็นต้องอาศัยเวลาเพื่อที่จะทำให้ได้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งหากระยะเวลาในการเผาไหม้ไม่เพียงพอจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงต่ำ และนับว่าเป็นการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงด้วย

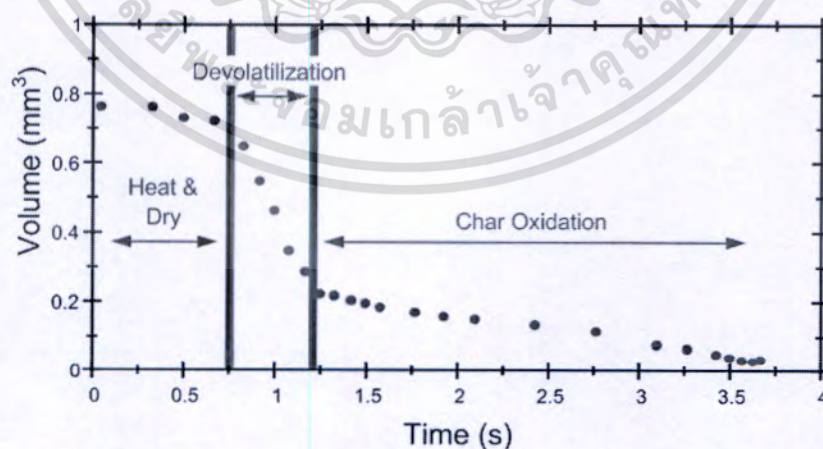
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.3 อุณหภูมิของการเผาไหม้ (Combustion Temperature) เป็นที่ทราบกันดีว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งความเร็วของการเกิดปฏิกิริยานั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยานั้นเป็นสำคัญด้วย โดยหากอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าสูง ความเร็วของการเผาไหม้ก็จะมีค่ามาก

3.3.4.4 ความปั่นป่วนระหว่างการเผาไหม้ (Turbulent) เนื่องจากในการเผาไหม้นั้นเป็นการทำปฏิกิริยาของเชื้อเพลิง และออกซิเจนในอากาศ ซึ่งหากระหว่างการเผาไหม้มีความปั่นป่วนเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการคลุกเคล้ากันอย่างดีของเชื้อเพลิงและออกซิเจน ทำให้โอกาสที่ออกซิเจนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง และเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มีมากขึ้น

3.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuel Combustion)

เมื่อเชื้อเพลิงอยู่ท่ามกลางกระแสการไหลของอากาศร้อน เชื้อเพลิงจะเกิดการสูญเสียมวลในสามช่วงได้แก่ (i) การทำแห้ง (Drying) จากนั้นอนุภาคจะได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่สามารถเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) (ii) การปล่อยสารระเหย (Devolatilization) อนุภาคเชื้อเพลิงเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน ได้สารระเหยอินทรีย์ที่เผาไหม้ได้ และถ่านชาร์ (Char) เป็นผลิตภัณฑ์ (iii) การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Char combustion) เกิดขึ้นหลังจากการแยกสลายด้วยความร้อนสิ้นสุดลง โดยที่สารระเหยจะถูกเผาไหม้พร้อมๆกันกับกระบวนการเผาไหม้ถ่านชาร์ ความสำคัญของแต่ละช่วงต่อการสูญเสียมวลจะขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบของเชื้อเพลิงว่ามี ความชื้น สารระเหยอินทรีย์ ถ่านคงตัว และเศษเถ้าอยู่มากน้อยเพียงใด สำหรับอนุภาคขนาดเล็กกระบวนการทั้งสามจะเกิดขึ้นตามลำดับกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กลไกการเผาไหม้สำหรับอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็ก [25]

3.4.1 การทำแห้งของเชื้อเพลิงแข็ง (Drying)

ความชื้นมีอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งได้ 2 รูปแบบ คือ น้ำอิสระอยู่ภายในช่องว่างเล็กๆในเชื้อเพลิง และน้ำยึดเหนี่ยว ซึ่งเป็นน้ำที่ถูกดูดซับไว้บนโครงสร้างพื้นผิวภายในของเนื้อเชื้อเพลิง พิจารณาอนุภาคเชื้อเพลิงขนาดเล็กที่อยู่ภายใต้แก๊สร้อน จะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา และการแผ่รังสีไปยังพื้นผิวของอนุภาคเชื้อเพลิง ส่งผลให้อุณหภูมิของอนุภาคสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำ จนน้ำเกิดการระเหย และถูกไล่ออกมาภายนอก

3.4.2 การปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization)

เมื่อการทำแห้งสิ้นสุดลง ในขณะที่อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เชื้อเพลิงจะเริ่มการย่อยสลายด้วยความร้อน ในกระบวนการนี้จะมีสารระเหยอินทรีย์ออกมาภายนอกเชื้อเพลิง กระบวนการปลดปล่อยสารระเหยนี้จึงอาจถูกเรียกว่าเป็นช่วงไพโรไลซิส (Pyrolysis) อัตราการปลดปล่อยสารระเหยและผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และชนิดของเชื้อเพลิง สารระเหยที่ปล่อยออกมาจะผสมกับอากาศที่แพร่เข้ามารอบๆ เมื่ออุณหภูมิถึงจุดติดไฟก็จะเกิดเป็นเปลวไฟขึ้นรอบๆอนุภาคเชื้อเพลิงแข็ง เปลวไฟที่เกิดขึ้นก็ให้ความร้อนกับไปยังเชื้อเพลิง ส่งเสริมให้การปลดปล่อยสารระเหยดีขึ้น สำหรับเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ ความชื้นจะถูกขับออกมาพร้อมกับสารระเหย ความชื้นนี้จะส่งผลให้อุณหภูมิของเปลวไฟที่เกิดขึ้นรอบๆเชื้อเพลิงต่ำลง

อัตราการปลดปล่อยสารระเหย หรือการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสอาจอธิบายได้อย่างง่ายด้วยสมการปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง ดังนี้

$$\frac{dm_v}{dt} = -m_v k_{pr} \quad (3.27)$$

โดยที่ $k_{pr} = -k_0 \exp(-E_{pr} / RT_p)$ และ $m_v = m_p - m_c - m_a$ มวลของสารระเหยเท่ากับมวลของอนุภาคเชื้อเพลิงลบออกด้วยมวลของถ่านชาร์ และของเศษเถ้า อัตราการเกิดไพโรไลซิสจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของเชื้อเพลิงหากอุณหภูมิของอนุภาคเชื้อเพลิงคงที่ ค่าพลังงานกระตุ้น และค่าคงที่หน้า Exponential ต้องมาจากการทดลอง สำหรับเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ จะใช้เวลามากในการรับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการปลดปล่อยสารระเหย และกระบวนการไพโรไลซิสจะเริ่มจากผิวนอก แล้วค่อยๆ เคลื่อนเข้าไปด้านในของเชื้อเพลิง หากมีการให้ความร้อนต่อเชื้อเพลิงในอัตราที่สูงกว่าปกติ อัตราการปลดปล่อยสารระเหยที่ได้อาจจะมีความชันตามไปด้วย

การจุดติดไฟของเชื้อเพลิงแข็งสามารถเกิดขึ้นได้กับ การจุดติดไฟของถ่านชาร์บนผิวของเชื้อเพลิง และการจุดติดไฟของสารระเหยบนชั้นขีดขอบรอบๆผิวของเชื้อเพลิง แบบใดจะเกิดก่อนขึ้นอยู่กับอัตราการพา และการแผ่รังสีความร้อนไปยังเชื้อเพลิงแข็ง ถ้าการแผ่รังสีความร้อนมีค่าสูง ผิวของเชื้อเพลิงก็จะร้อนขึ้นเร็ว แต่สารระเหยที่ปล่อยออกมาจะถูกพัดออกไปก่อนที่จะมีส่วนผสมที่เผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหม้ได้เกิดขึ้น การติดไฟจึงเกิดขึ้นที่ผิวก่อน ถ้าอัตราการให้ความร้อนที่ผิวของเชื้อเพลิงต่ำ สารระเหยจะจุดติดไฟได้ก่อน เพราะสารระเหยมีอุณหภูมิจุดติดไฟต่ำกว่าซาร์ สารระเหยเหล่านี้เผาไหม้รวดเร็วและให้พลังงานความร้อนออกมาเมื่อเทียบกับคาร์บอนคงตัว หรือถ่านซาร์ที่เหลืออยู่หลังกระบวนการปล่อยสารระเหย โดยที่เวลาล่าช้าในการจุดติด (Ignition time delay) จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค การแพร่ทางความร้อน อัตราการให้ความร้อน และอัตราการเกิดไฟโรไลซิส เป็นต้น

3.4.3 การเผาไหม้ถ่านซาร์ (Burning of Carbon)

ขั้นตอนสุดท้ายของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง คือการเผาไหม้ถ่านซาร์ ลักษณะของถ่านซาร์จะมีความพรุน (Porous) สูงมาก ส่งผลให้พื้นที่ผิวภายในมากในระดับ 100 ตารางเมตรต่อกรัมสำหรับซาร์จากถ่านหิน และ 10,000 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับถ่านซาร์จากไม้ เมื่อไม่มีสารระเหยปล่อยออกมาแล้ว ออกซิเจนในอากาศก็สามารถแพร่เข้าไปด้านในของถ่านซาร์ได้ การเผาไหม้ของถ่านซาร์แบบนี้เป็นกระบวนการเผาไหม้พื้นผิวสัมผัส (Surface burning) ระหว่างสองสถานะที่ไม่เหมือนกัน หรืออาจจะเรียกว่าการเผาไหม้แบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous combustion) ซึ่งมีขั้นตอนสำคัญดังนี้

- ก. การขนส่งออกซิเจนไปยังพื้นผิวของเชื้อเพลิงด้วยการพา หรือการแพร่
- ข. การดูดซับโมเลกุลออกซิเจนไว้บนผิวเชื้อเพลิง
- ค. ออกซิเจนที่ถูกดูดกลืนไว้ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้สารผลิตภัณฑ์ และถูกดูดกลืนไว้ที่ผิวเชื้อเพลิง
- ง. สารผลิตภัณฑ์ถูกปล่อยออกมาที่ผิวเชื้อเพลิง
- จ. สารผลิตภัณฑ์แพร่ออกจากผิวเชื้อเพลิง

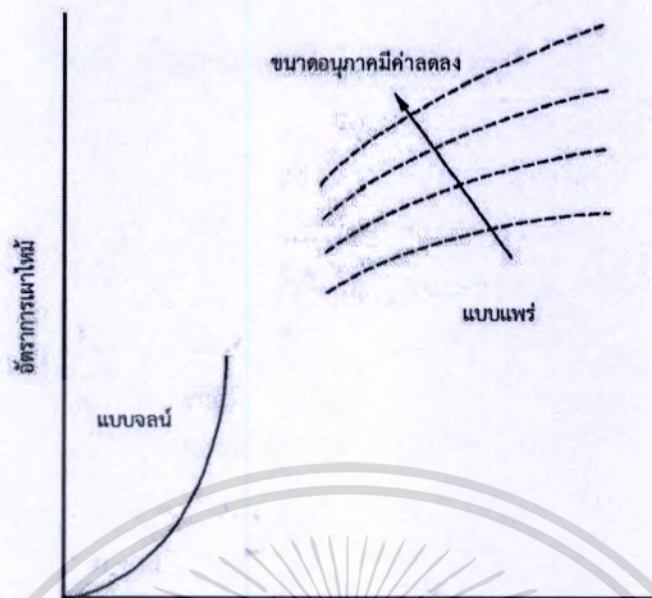
ขั้นตอนเหล่านี้เกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับ ขั้นตอนไหนเกิดขึ้นช้าที่สุดจะเป็นตัวกำหนดอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงนั้น ยกตัวอย่าง เช่น ถ่านอนุภาคมีขนาดเล็ก อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ และการไหลของของไหลรอบอนุภาคเป็นไปอย่างช้าๆ จะพบว่าขั้นตอน ค. (ปฏิกิริยาการเผาไหม้) จะเกิดขึ้นช้ากว่าขั้นตอน จ. (การแพร่ออกไปจากผิวเชื้อเพลิงของสารผลิตภัณฑ์) ดังนั้นอัตราการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยอัตราจลน์ทางเคมี (Chemical kinetics หรือ kinetically control) เป็นหลัก ซึ่งอัตราการเผาไหม้ขึ้นกับอุณหภูมิ Exponential โดยไม่ขึ้นกับขนาดอนุภาค และการไหลแต่อย่างใด นอกจากนี้ จากการศึกษาอัตราการแพร่สูงกว่าอัตราการเผาไหม้ ทำให้ความเข้มข้นของการเผาไหม้ที่ผิวเชื้อเพลิงไม่ได้แตกต่างจากบริเวณกระแสอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิวเชื้อเพลิงมากนัก รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบโปรไฟล์เศษส่วนมวลของออกซิเจน $Y_o(r)$ และอุณหภูมิ $T(r)$ ตามรัศมีของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งธรรมดาที่มีลักษณะการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยจลน์ทางเคมี และถูกควบคุมโดยการแพร่ ในส่วนรูปที่ 3.7 แสดงอัตราการเผาไหม้ของอนุภาคดังกล่าว ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

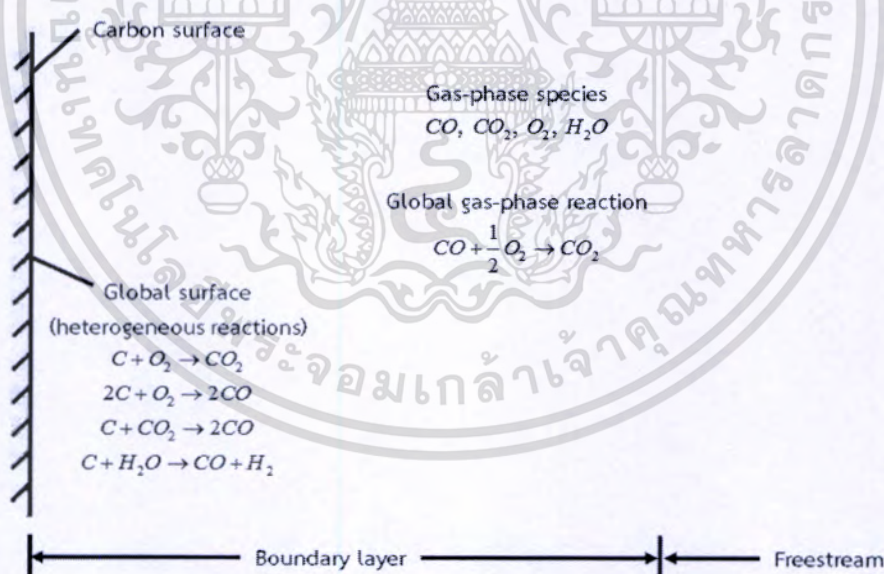
ในทางตรงกันข้าม ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง และการไหลโดยรอบอนุภาคเป็นไปอย่างรวดเร็ว จะได้ว่าขั้นตอน ค. (ปฏิกิริยาการเผาไหม้) จะเกิดเร็วกว่าขั้นตอน ก. และ จ. มาก (การแพร่เข้าหาผิวเชื้อเพลิงของออกซิเจน และการแพร่ออกไปจากผิวเชื้อเพลิงของสารผลิตภัณฑ์) ดังนั้น อัตราการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ผิวของเชื้อเพลิง (Diffusion control) เป็นหลัก ซึ่งอัตราการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคมากกว่าขึ้นกับอุณหภูมิ นอกจากนี้ จากการที่อัตราการเผาไหม้สูงกว่าอัตราการแพร่จะส่งผลให้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ผิวเชื้อเพลิงมีค่าน้อยมากจนอาจตัดทิ้งได้ เพราะถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้ที่ผิวเชื้อเพลิงเกือบหมดนั่นเอง เมื่อพิจารณารูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 ตามลำดับ จะพบว่าลักษณะการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ผิวของเชื้อเพลิง (เส้นประ) อัตราการเผาไหม้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง และขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ทั้งนี้เพราะถ้าอุณหภูมิเชื้อเพลิงต่ำ การเผาไหม้จะเปลี่ยนไปเป็นลักษณะที่ถูกกำหนดด้วยจลน์ทางเคมี ทำให้อนุภาคสูญเสียความร้อนอย่างมาก และรวดเร็วจนเกิดปรากฏการณ์เป่าดับได้ในที่สุด



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบโปรไฟล์ $Y_0(r)$ และ $T(r)$ ตามแนวรัศมีของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งธรรมดาระหว่างการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการแพร่และการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยจลน์ทางเคมี [9]



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบอัตราการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งธรรมดาที่มีลักษณะการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ และโดยจลน์ทางเคมี [9]



รูปที่ 3.8 รูปแบบทั่วไปสำหรับกระบวนการเผาไหม้บริเวณผิวของอนุภาคคาร์บอน [9]

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.8 ที่แสดงถึงการเผาไหม้บริเวณผิวของอนุภาคคาร์บอน จะพบว่า ปฏิกิริยาบนผิวระหว่างคาร์บอนของถ่านชาร์กับออกซิเจนจะได้ CO ออกมาเป็นหลัก แล้วจะทำปฏิกิริยากายนอกให้กลายเป็น CO₂ ในที่สุด สำหรับการเผาไหม้บริเวณพื้นผิวของถ่านชาร์ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรยากาศที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนเป็น ρm_∞ ที่อัตรามวลคงที่โดยความเข้มข้นของออกซิเจนบริเวณผิวเป็น ρm_s ดังนั้นอัตราการเผาไหม้ผ่านซาร์ ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวสัมผัสตามจลน์เคมีระดับที่หนึ่ง ซึ่งหาได้จาก

$$\frac{dm_c}{dt} = -i \left(\frac{M_c}{M_{O_2}} \right) A_p k_c \rho m_s \quad (3.28)$$

โดยที่ i คืออัตราส่วนโดยมวลของคาร์บอนต่อออกซิเจน, M คือมวลโมเลกุล, A_p เป็นพื้นที่ผิวภายนอกของอนุภาค, k_c คือค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้เมื่อมีการเผาไหม้พื้นผิวสัมผัสที่เป็นแบบต่างสถานะกัน เราจำเป็นต้องพิจารณาว่าอัตราการแพร่ หรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวสัมผัส ที่เป็นตัวควบคุมอัตราการเผาไหม้โดยรวมของเชื้อเพลิง แต่ในหลายๆกรณี เราไม่สามารถสันนิษฐานให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวสัมผัสเกิดขึ้นได้รวดเร็ว เมื่อเทียบกับอัตราการแพร่ของออกซิเจน เนื่องจากโดยปกติแล้วเราจะไม่ทราบอุณหภูมิที่ผิว แต่เรารู้ว่าอัตราการใช้ออกซิเจนในปฏิกิริยา จะต้องเท่ากับการแพร่ของออกซิเจนไปยังพื้นผิวของอนุภาคซาร์ ฉะนั้นถ้าเราให้ h_D เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลแบบการพาโดยรวม จะได้

$$A_p k_c \rho m_s = A_p h_D \rho (m_\infty - m_s) \quad (3.29)$$

จะได้

$$m_s = \left(\frac{h_D}{k_c + h_D} \right) m_\infty \quad (3.30)$$

$$\frac{dm_c}{dt} = -i \left(\frac{M_c}{M_{O_2}} \right) A_p K \rho m_\infty \quad (3.31)$$

เมื่อ

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_c} + \frac{1}{h_D} \quad (3.32)$$

จะเห็นได้ว่า ถ้าอัตราเคมีจลน์มีค่ามากๆ เมื่อเทียบกับการแพร่ $K \rightarrow h_D$
แต่ถ้าหากอัตราการแพร่มีค่ามากๆ เมื่อเทียบกับอัตราเคมีจลน์ $K \rightarrow k_c$

h_D ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลแบบการพา ซึ่งสามารถหาได้จากการใช้สมการสหสัมพันธ์ที่เชื่อมโยง เช่น เลขเซอร์วูด ($Sh = h_D d / D$) โดยที่ d เป็นขนาดของอนุภาค และ D เป็นความสามารถในการแพร่เชิงมวลของแก๊ส ซึ่งพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Sh = (2 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3}) \phi \quad (3.33)$$

โดยที่ S_c ประมาณ 0.73 และ ϕ สำหรับถ่านซาร์มีค่าประมาณ 0.9

จากสมการที่ 3.31 ให้ CO เกิดขึ้นที่ผิว และใช้ความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศรอบๆ อัตราการเผาไหม้ซาร์รวมสามารถหาได้จาก

$$\frac{dm_c}{dt} = -\left(\frac{3}{4}\right) \pi d^2 K \rho m_\infty \quad (3.34)$$

พิจารณา

- I. กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคคงที่ (ความหนาแน่นลดลง) เราสามารถอินทิเกรตสมการที่ 3.34 ได้เลย ซึ่งจะได้เวลาในการเผาไหม้หมดเป็น

$$t_c = \frac{\rho_c d_i}{4.5 K \rho m_\infty} \quad (3.35)$$

- II. กรณีความหนาแน่นของอนุภาคคงที่ (เส้นผ่านศูนย์กลางลดลง)

$$d = \left(\frac{6m_c}{\rho_c \pi}\right)^{1/3} \quad (3.36)$$

ภายใต้สภาวะการแพร่เป็นกลไกจำกัดอัตรา ($k_c \gg h_D$) เช่น อุณหภูมิการเผาไหม้สูง อนุภาคมีขนาดใหญ่ จะได้เวลาในการเผาไหม้หมดเป็น

$$t_c = \frac{\rho_c d_i^2}{6D \rho m_\infty} \quad (3.37)$$

ภายใต้สภาวะเคมีจลน์เป็นกลไกจำกัดอัตรา ($h_D \gg k_c$) เช่น อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำ อนุภาคมีขนาดเล็ก จะได้เวลาในการเผาไหม้หมดเป็น

$$t_c = \frac{\rho_c d_i}{1.5 k_c \rho m_\infty} \quad (3.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การปล่อยมลพิษและการควบคุม (Pollutants Emission and Control) [23]

3.5.1 บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าสารมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน เป็นสาเหตุหลักของการทำลายสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ยิ่งปริมาณการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นเท่าไรก็จะยิ่งทำลายมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นการเปลี่ยนรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนโดยการเผาไหม้เพื่อการดำรงอยู่ของมนุษย์จะไม่มี ความหมายเลยถ้ามนุษย์ไม่ตระหนักถึงผลกระทบจากมลพิษที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

แม้ว่าแก๊สส่วนใหญ่ที่เกิดจากการเผาไหม้คือคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) ซึ่งไม่เป็นพิษ ในปัจจุบันแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้กลายเป็นสาเหตุหลักของการเกิดสภาวะเรือนกระจก ดังนั้นจึงเป็นประเด็นสำคัญที่จะต้องหาทางควบคุมการปล่อยปริมาณแก๊สดังกล่าว ซึ่งได้รับการยอมรับจากหลายประเทศทั่วโลกจนนำไปสู่ข้อตกลงในพิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) เมื่อปี ค.ศ.1995 นอกจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว ยังมีแก๊สอื่นๆที่เกิดจากการเผาไหม้ และเป็นมลพิษอย่างมากคือ ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) ฝุ่นเขม่า และออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) ประเด็นสำคัญคือแก๊สเหล่านี้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างไร มีกลไกการเกิดขึ้นได้อย่างไร จะลดปริมาณให้น้อยลงได้อย่างไร นับได้ว่าเป็นหัวข้อที่มีความสำคัญอย่างยิ่งเกี่ยวกับการเผาไหม้ ดังที่จะได้กล่าวโดยละเอียดต่อไป

3.5.2 ผลกระทบของมลพิษ [23]

ตัวอย่างผลกระทบที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เช่น

3.5.2.1 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางลบของสภาพแวดล้อมทางอากาศ การเพิ่มขึ้นของปัญหาหมอกควัน บดบังปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ส่องมายังพื้นดิน ทัศนวิสัยลดลง และมีผลต่อสภาพบรรยากาศโลกโดยรวม

3.5.2.2 ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการเจ็บป่วย และการเสียชีวิตของมนุษย์ที่ได้รับมลพิษทั้งทางตรงและทางอ้อม

3.5.2.3 เป็นอันตรายต่อเหล่าพืชพันธุ์ พื้นที่ป่า ท้องทุ่ง แนวปะการัง และแหล่งนิเวศวิทยาอื่นๆ เนื่องจากมีสารเป็นพิษจำพวก SO_2 PAN และ C_2H_4 เป็นต้น ที่เป็นอันตรายต่อระบบสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช

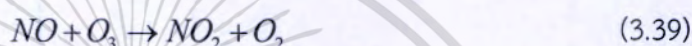
3.5.2.4 การตกสัมผัสหรือฝังตัวของมลพิษบนพื้นผิวสิ่งปลูกสร้าง อนุสรณ์สถาน วัสดุต่างๆ ทำให้เสื่อมสภาพ และอาจสึกกร่อนได้ ดูไม่สวยงาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)

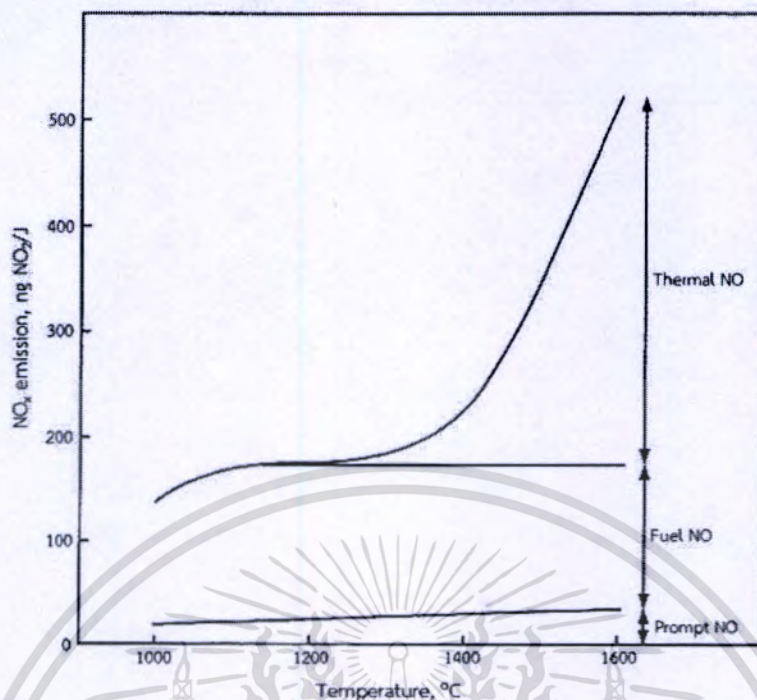
ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนนั้นได้รับการพิจารณาว่าเป็นสาเหตุของการเกิดหมอกทางโฟโตเคมี หรือแก๊สโอโซนในระดับต่ำ (Ground level ozone) ซึ่งเกิดจาก NO_x และ HC ที่มาจากไอเสียของรถยนต์เป็นส่วนใหญ่ มาทำปฏิกิริยากันในวันที่มีแสงแดดจ้า จนเกิดเป็นโอโซน O₃ ซึ่งมักก่อตัวในบริเวณที่มีอากาศนิ่งเหนือเมืองใหญ่ๆที่มีการจราจรหนาแน่น โดยหมอกทางโฟโตเคมีจะทำให้มีปัญหาเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ และไปลดหน้าที่ของเม็ดเลือดแดงในการนำออกซิเจนไปเลี้ยงสมอง เป็นต้น

NO_x นอกจากจะเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโอโซนในระดับต่ำที่เป็นพิษแล้ว ยังเป็นตัวทำลายโอโซนที่เป็นประโยชน์ซึ่งอยู่ในระดับชั้นบรรยากาศ Stratosphere ของโลกอีกด้วย ดังสมการ



สังเกตเห็นได้ว่า NO เพียงโมเลกุลเดียวมีผลต่อการทำลาย O₃ อย่างต่อเนื่องโดยปฏิกิริยารีดอกซ์ เพราะ NO₂ ที่เกิดจากสมการ 3.39 จะถูกรีดิวซ์มาเป็น NO ตามสมการ 3.40 เพื่อย้อนกลับไปทำลาย O₃ ให้เป็น O₂ ต่อไปตามสมการ 3.39 ซึ่งเกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่เช่นนี้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม โอโซนในระดับสูงเป็นประโยชน์ต่อมนุษย์ในการลดความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) จากดวงอาทิตย์ที่ส่องสู่ผิวโลก ช่วยลดการเป็นโรคมะเร็งผิวหนังได้

ดังนั้นการหาวิธีลดปริมาณการปล่อย NO_x สู่บรรยากาศจึงได้กลายเป็นหัวข้อที่สำคัญที่สุดของการเผาไหม้ การที่จะกระทำเช่นนั้นได้ต้องอาศัยความเข้าใจอย่างถ่องแท้ถึงกลไกจลน์ทางเคมีของการเกิด NO_x พร้อมทั้งเข้าใจถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างจลน์ทางเคมีกับพลศาสตร์ของไหลด้วยเช่นกัน สิ่งเหล่านี้จะเป็นตัวชี้นำไปสู่การค้นพบวิธีการใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณการปล่อย NO_x จากการเผาไหม้ได้ ซึ่ง NO_x ที่พบในแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้แบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลักๆคือ Thermal NO_x, Prompt NO_x, Fuel nitrogen oxides และ N₂O

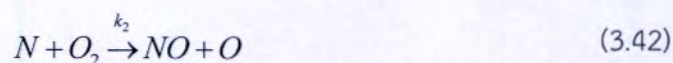
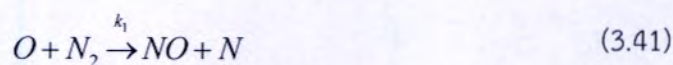


รูปที่ 3.9 ความเข้มข้นที่สมดุลของ NO_2 ที่มีส่วนประกอบของออกซิเจนในแก๊สที่แตกต่างกัน [9]

รูปที่ 3.9 แสดงค่าประมาณของการเกิด Thermal NO_x , Prompt NO_x และ Fuel NO_x ที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ถ่านหินซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ จะพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า $1300\text{ }^\circ\text{C}$ กลไกการเกิด Thermal NO_x จะน้อยมากเมื่อเทียบกับอีกสองชนิด ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น Thermal NO_x ก็จะเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากกลไกการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนทั้งสามชนิดมีจลนเคมีที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีอัตราการเกิดที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะได้แยกพิจารณาการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนทั้งสามชนิดดังกล่าว

3.5.3.1 Thermal NO_x

Thermal NO_x หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Zeldovich NO_x มีสมการพื้นฐานดังนี้



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

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

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

สาเหตุที่ได้ชื่อว่า Thermal NO_x เพราะว่า NO ที่เกิดจากสมการที่ 3.41 นั้นต้องใช้พลังงานกระตุ้นที่สูงมากเมื่อเทียบกับสมการที่ 3.40 ทั้งนี้เพราะต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของ N_2 ซึ่งเป็นแบบไตรพันธะ (Triple bond) ขณะเดียวกันสมการที่ 3.41 จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้ต่อเมื่ออุณหภูมิสูงเท่านั้น ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นตัวควบคุมการเกิด NO ตามสมการที่ 3.41 ผ่านค่าคงตัวของปฏิกิริยา k_1 ซึ่งแปรผกผันกับ $1/T$ ในการทำนายปริมาณการเกิด NO_x ในปฏิกิริยาการเผาไหม้ ไม่ควรใช้วิธีการทำสมดุลเคมีเหมือนการหาปริมาณ H_2O หรือ CO_2 เพราะจะเกิดความผิดพลาดอย่างมาก เนื่องจากสมดุลเคมีจะเกิดขึ้นได้นั้นต้องใช้เวลาที่ค่อนข้างนาน และนานกว่าเวลาที่อยู่ในเปลวไฟอุณหภูมิสูงเสียอีก สามารถหาอัตราการเกิด NO_x ได้คือ

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = k_1[\text{O}][\text{N}_2] + k_2[\text{N}][\text{O}_2] + k_3[\text{N}][\text{OH}] \quad (3.44)$$

เนื่องจากว่าอัตราการเกิดอะตอมของไนโตรเจนขณะเกิดปฏิกิริยา ในสภาวะเสถียรคือ

$$\frac{d[\text{N}]}{dt} = k_1[\text{O}][\text{N}_2] + k_2[\text{N}][\text{O}_2] + k_3[\text{N}][\text{OH}] \approx 0 \quad (3.45)$$

ดังนั้นได้อัตราการเกิด NO คือ

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_1[\text{O}][\text{N}_2] \quad (3.46)$$

จะเห็นได้ว่าการที่จะลดปริมาณ Thermal NO_x ได้นั้นมีเพียงสองวิธีคือ ลด $[\text{N}_2]$ และ $[\text{O}]$ หรือลด k_1 ซึ่งมีความหมายคือต้องลดอุณหภูมิในการเผาไหม้นั่นเอง

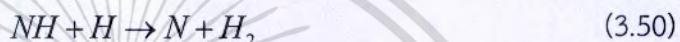
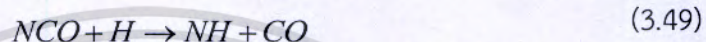
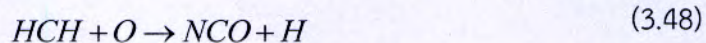
3.5.3.2 Prompt NO_x (Fermore NO_x)

เมื่อทำการวัดหาปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ของเปลวไฟแบบราบเรียบจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน จากจุดที่ห่างจากปลายของเปลวไฟเข้าหาแนวของเปลวไฟพบว่าปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ไม่ได้มีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์แต่ประการใดเหมือนที่ทำนายโดยกลไกของ Zeldovich แต่กลับพบว่าไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด (Promptly) ที่บริเวณใกล้แนวของเปลวไฟซึ่ง มีความซับซ้อนมากกว่า Thermal NO_x ทั้งนี้เพราะว่า Prompt NO_x

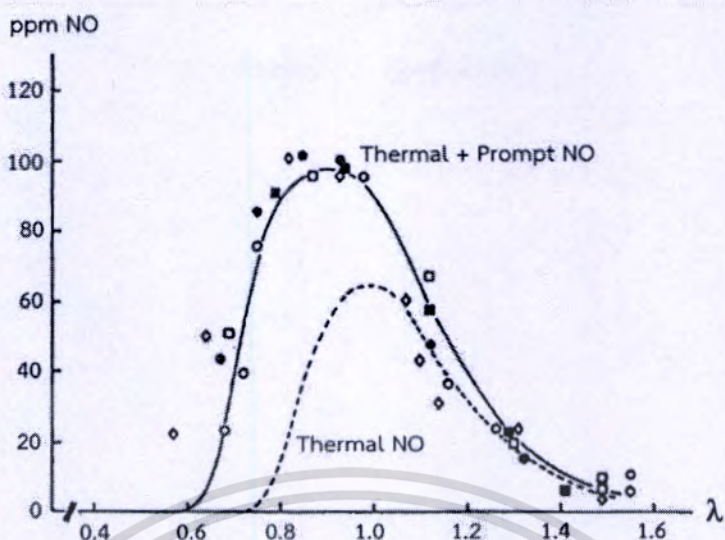
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดจากอนุมูลอิสระ CH ที่เกิดขึ้นในลักษณะเป็นสารชั้นกลางที่บริเวณแนวของเปลวไฟ จากนั้น CH จะทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนในอากาศ ทำให้ได้กรดไฮโดรไซยานิค (HCN) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไปจนเกิด NO ดังสมการต่อไปนี้



Prompt NO_x มักเกิดในสภาวะการเผาไหม้แบบผสมก่อนเท่านั้น ทั้งนี้เพราะอนุมูลอิสระ CH จะเกิดจากอะซีทีลีน (C_2H_2) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารที่เกิดก่อนหน้า ดังนั้น Prompt NO_x จะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า Thermal NO_x เพราะปฏิกิริยาต้องใช้พลังงานกระตุ้นที่น้อยกว่า ที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำประมาณ 1000 K เท่านั้น รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณ และผลการทดลองหาค่า Thermal NO_x และ Prompt NO_x ของเปลวไฟมีเทนกับอากาศในเตาเผาแบบกวน (Well-stirred reactor) ผลการคำนวณกระทำในสองลักษณะคือ จำนวนโดยกลไกทางความร้อน (Zeldovich mechanism) อย่างเดียว และจำนวนโดยกลไกผสมระหว่าง Zeldovich + Fernimore จะเห็นได้ว่าส่วนต่างระหว่าง Thermal-prompt NO_x กับ Thermal NO_x ก็คือ Prompt NO_x นั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองนี้

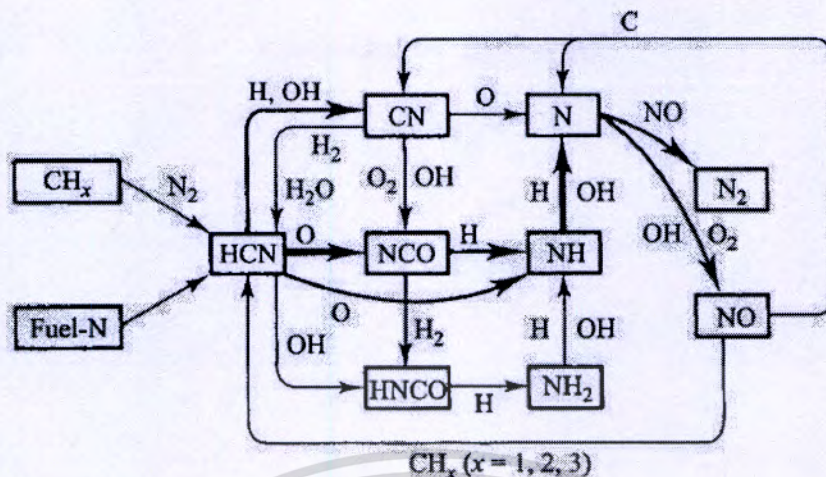


รูปที่ 3.10 ผลการคำนวณ และผลการทดลองหาค่า Thermal NO และ Prompt NO ของเปลวไฟ มีเทนกับอากาศในเตาเผาไหม้แบบกวน λ หมายถึงอัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศ ทางทฤษฎี [9]

3.5.3.3 Fuel NO_x [23]

สำหรับเชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบได้แก่ เชื้อเพลิงชีวมวล และถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งถ่านหินอาจมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบได้ถึงร้อยละ 2 ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปเป็น HCN ในเปลวไฟซึ่งจะเปลี่ยนต่อไปเป็น NH หรือ NH_2 จากนั้นทั้งคู่ก็จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และทำให้เกิด $\text{NO} + \text{H}_2\text{O}$ หรืออาจทำปฏิกิริยากับ NO แล้วเปลี่ยนเป็น N_2 และ H_2O ดังนั้น สัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่หลุดออกมาจากเปลวไฟกลายเป็น NO นั้นจะเป็นอิสระต่ออัตราส่วนระหว่าง NO/O_2 ในเปลวไฟ นั่นคือหากรักษาให้สัดส่วนของออกซิเจนในแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงในเปลวไฟให้ต่ำไว้ ก็จะทำให้ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเปลี่ยนไปเป็น NO น้อยลงตามไปด้วย

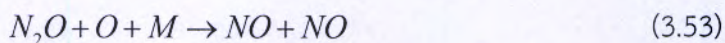
สัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนเป็น NO_x ในแก๊สไอเสียนั้นประมาณได้ว่า มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 20 ถึง 50 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะของเตาเผา และอาจขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของไนโตรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงอีกด้วย จะเห็นได้ว่าแม้จะทำกรวิเคราะห์และศึกษาหลักการเกิด NO แต่ละประเภทแยกออกจากกัน แต่ทั้ง Thermal NO_x , Prompt NO_x และ Fuel NO_x ต่างก็เกิดขึ้นพร้อมๆกัน และมีกลไกการเกิดร่วมกัน



รูปที่ 3.11 การเกิด NO จากไนโตรเจนในเชื้อเพลิง [24]

3.5.3.4 NO_x ที่เกิดจาก N_2O

Thermal NO_x เกิดขึ้นได้ดีภายใต้สภาวะการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง ($>1700\text{ K}$) ในขณะที่ Prompt NO_x เกิดขึ้นได้ดีภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบผสมหนา แต่สำหรับไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดผ่าน N_2O จะเกิดได้ดีที่สภาวะการเผาไหม้แบบผสมบาง และอุณหภูมิต่ำ เช่นในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันแก๊สที่มีอุณหภูมิต่ำพอที่จะส่งผลให้เกิด Thermal NO_x ขณะเดียวกันการเผาไหม้ที่สภาวะส่วนผสมบางยังป้องกันไม่ให้เกิดอนุมูลอิสระของ CH ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการป้องกันการเกิด Prompt NO_x โดยอัตโนมัติ ดังนั้นไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดผ่าน N_2O นี้จะมีความคล้ายคลึงกับการเกิด Thermal NO_x ในแง่ที่ว่าอะตอมของออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโมเลกุลของไนโตรเจน แต่ต้องอาศัยโมเลกุลที่สาม (M) เป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิด N_2O จากนั้น N_2O จะทำปฏิกิริยากับอะตอมของออกซิเจนต่อไปจนเกิดเป็น NO ตามสมการดังนี้



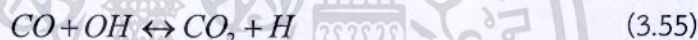
ยิ่งความดันการเผาไหม้มีค่าสูงเท่าไร NO ที่เกิดขึ้นก็จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น เพราะไม่เพียงแต่มีพลังงานกระตุ้นที่ต่ำแล้ว อุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำก็ไม่ได้มีผลต่อการยับยั้งการเกิด NO เหมือนเช่น Thermal NO_x อีกต่อไป ดังนั้น NO ที่เกิดผ่าน N_2O จึงเป็นสาเหตุหลักของการเผาไหม้ที่ส่วนผสมบางที่ถูกเจือจางด้วยอากาศมากๆ

3.5.4 คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) [23]

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้มีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น สถานะการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป การผสมคลุกเคล้ากันไม่ดีพอ ปริมาณอากาศไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงจนทำให้เกิดการแตกสลายของ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มาเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ได้ดังสมการ



สาเหตุที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้เกิด CO คือการมีเวลาสั้นเกินไปในโซนการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากต้องระบายไอเสียออกทันที อุณหภูมิ และความดันเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ดังนั้น CO จะอยู่ในสถานะสมดุลบางส่วนมากกว่าที่จะอยู่ในสถานะสมดุลอย่างสมบูรณ์ ทำให้การเปลี่ยนแปลงจาก CO เป็น CO₂ เกิดขึ้นไม่เต็มที่ เพราะถูกจำกัดด้วยการแย่งเข้าทำปฏิกิริยาของ OH กับ H



ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถควบคุมได้จากอัตราส่วนผสม หรือปริมาณออกซิเจนในปฏิกิริยาการเผาไหม้ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และเป็นพิษต่อร่างกายอย่างมาก เมื่อร่างกายได้รับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะทำให้ร่างกาย สมอง และกล้ามเนื้อได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ ปฏิกิริยาการตอบสนองของร่างกายจะช้าลง และขาดการตัดสินใจที่ดี เมื่อได้รับแก๊สชนิดนี้เข้าไปในปริมาณมากๆ สามารถทำให้เสียชีวิตได้

3.5.5 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x)

เป็นที่ทราบกันดีว่าออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) นอกจากจะมีผลต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังสามารถทำลายอุปกรณ์การเผาไหม้ และอุปกรณ์อื่นๆ ให้ผุกร่อนเสียหายได้ ออกไซด์ของซัลเฟอร์มีที่มาจากซัลเฟอร์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ในระหว่างการเผาไหม้ โดยจะได้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) เป็นสารประกอบหลัก มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) อยู่เล็กน้อย และอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) คาร์บอนิลซัลไฟด์ (COS) ซึ่งเรียกรวมกันว่า SO_x ซึ่งเชื้อเพลิงเกือบทั้งหมดที่ใช้โดยมนุษย์ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ ไม้ และสารอินทรีย์อื่นๆ เป็นต้น ล้วนมีซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบ เชื้อเพลิงไม้อาจมีอยู่ในปริมาณน้อยเพียงร้อยละ 0.1 ในขณะที่ถ่านหิน

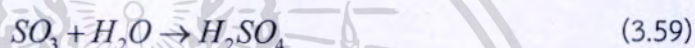
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อวัตถุประสงค์อื่นใด เมื่อผู้ใช้เห็นใบแจ้งหรือแจ้งให้ทราบ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกือบทุกชนิดอาจมีอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 0.5 ถึง ร้อยละ 3 ในขณะที่น้ำมันโดยทั่วไปจะมีซัลเฟอร์มากกว่าไม้แต่จะน้อยกว่าที่มีในถ่านหิน ถ้าทำการเผาไหม้ไม้ ซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในไม้เกือบทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ดังสมการต่อไปนี้

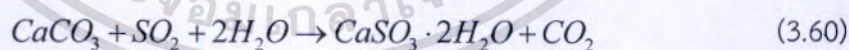


ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วกลายเป็นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดฝนกรด

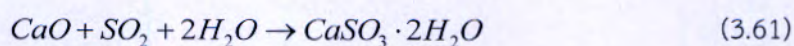


ซึ่งน้ำที่ทำปฏิกิริยากับ SO_3 คือน้ำที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ และมีอยู่แล้วในแก๊สไอเสียพร้อมกับ SO_3 นั่นเอง SO_2 ที่เกิดจากการเผาไหม้จะมีปริมาณมากกว่าแก๊ส SO_3 ดังนั้น SO_2 จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็น SO_3 โดยอนุมูลของ OH ก่อนทำปฏิกิริยากับ H_2O เป็นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ต่อไป ซึ่งวิธีการทั่วไปที่ใช้กำจัด SO_x จากแก๊สไอเสียคือใช้หินปูน (Limestone, $CaCO_3$) หรือใช้ปูนขาว (Lime, CaO) ผสมน้ำจนเป็นโคลนเหลวแล้วพ่นเข้าไปในท่อที่แก๊สไอเสียไหลผ่าน ซึ่ง SO_x จะถูกกำจัด ดังสมการต่อไปนี้

กรณีใช้โคลนเหลวของหินปูน (Aqueous slurry of limestone)



กรณีใช้โคลนเหลวของหินขาว (Aqueous slurry of lime)



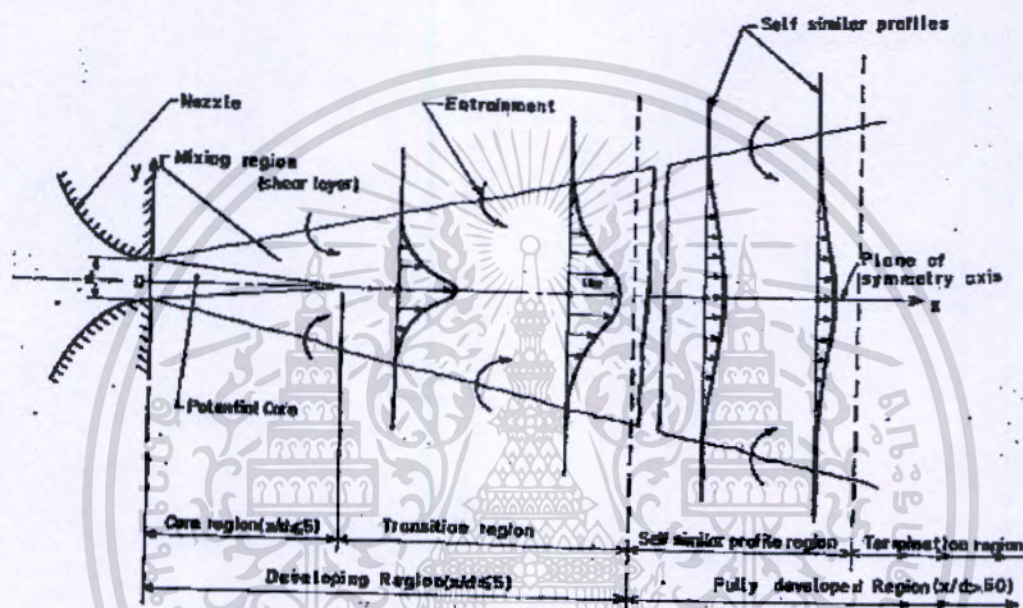
นอกจากการใช้หินปูนหรือปูนขาวผสมน้ำ (แบบเปียก) กำจัด SO_2 ได้แล้ว ยังสามารถกำจัด SO_2 ด้วยหินปูนหรือปูนขาวในรูปแบบผง (แบบแห้ง) ได้อีกด้วย ซึ่งกรณีแบบเปียกต้องรอให้ Calcium sulfite dihydrate ($CaSO_3 \cdot 2H_2O$) ตกตะกอนในถังพักเสียก่อนแล้วค่อยแยกน้ำออกเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนย้ายออกไปกำจัดโดยการฝังต่อไป ส่วนในกรณีแบบแห้งนั้นใช้เครื่องแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อแยกผง CaSO_3 ออกไปเสียก่อนแล้วจึงนำไปกำจัดต่อไป

3.6 Aerodynamics of Jet Flow

การไหลแบบ Jet เกิดจากมวลของของไหล ไหลไปสู่บริเวณการไหลที่กว้างมีระยะเป็นอนันต์ของของไหลรอบๆ โดยโครงสร้างการไหลแบบ Jet จะแบ่งออกเป็น 4 บริเวณ [26] ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 โครงสร้างการไหลแบบ Jet [26]

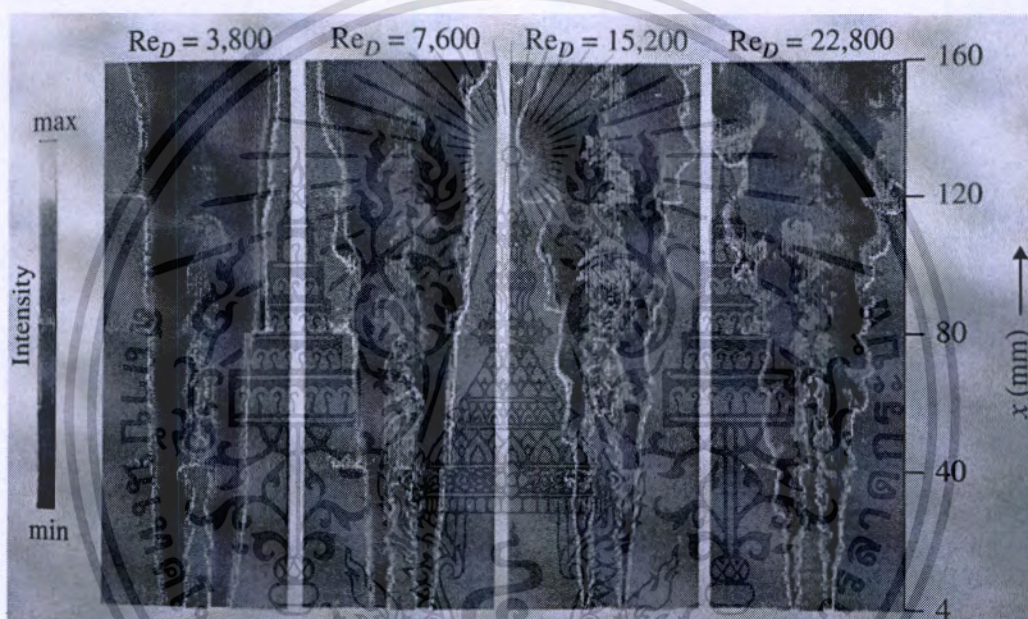
บริเวณที่ 1 บริเวณที่มีการไหลมาบรรจบกัน (The convergent zone) บริเวณนี้เรียกว่า Potential core โดยจะมีความเร็วตามแนวแกนเท่ากับความเร็วที่ปลายของหัวฉีด และเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลปกติสามารถขยายได้ถึง 4 ถึง 6 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกของหัวฉีด บริเวณที่ 2 เป็นบริเวณที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงทาง Dynamics โดยความเร็วตามแนวแกนจะเริ่มลดลง และจะเพิ่มขึ้นตามแนวรัศมี จนกระทั่งเข้าสู่บริเวณที่ 3 ซึ่งความเร็วตามแนวแกนจะลดลงอย่างมากโดยที่จะมีรัศมีการไหลเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน สำหรับบริเวณที่ 4 (The termination zone) ความเร็วของแกนกลางจะเข้าใกล้ 0 และการไหลแบบ Jet จะสิ้นสุดลงในบริเวณนี้ ในงานวิศวกรรม การประยุกต์ใช้การไหลแบบ Jet จะพิจารณาในสามบริเวณแรกเท่านั้น ทั้งนี้เพราะว่าสามบริเวณนี้มีความแตกต่างกันของความเร็วค่อนข้างสูงระหว่างความเร็วของ Jet และของไหลรอบๆ สำหรับอิทธิพลที่มีผลต่อการไหลแบบ Jet มากที่สุดคือความเร็วของของไหลที่ทางออกและขนาดของเส้นผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์กลางของหัวฉีด ซึ่งเมื่อนำไปประยุกต์ในงานด้านการเผาไหม้จึงกลายเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากต่อลักษณะของเปลวไฟ (Jet flame)

ผลกระทบของความเร็วการไหลแบบ Jet ต่อ ลักษณะเปลวไฟ

Kenneth K. Kuo ได้ยกตัวอย่างปรากฏการณ์นี้ไว้ในหนังสือ Fundamentals of Turbulent and Multiphase Combustion [27] ว่ามีความแตกต่างกันของความเร็วการไหลของ Jet 4 ค่า คือ 10.5, 21, 42 และ 63 ซึ่งมีเลขเรย์โนลด์เป็น 3800, 7600, 15200 และ 22800 ตามลำดับ แสดงในภาพประกอบรูปที่ 3.13



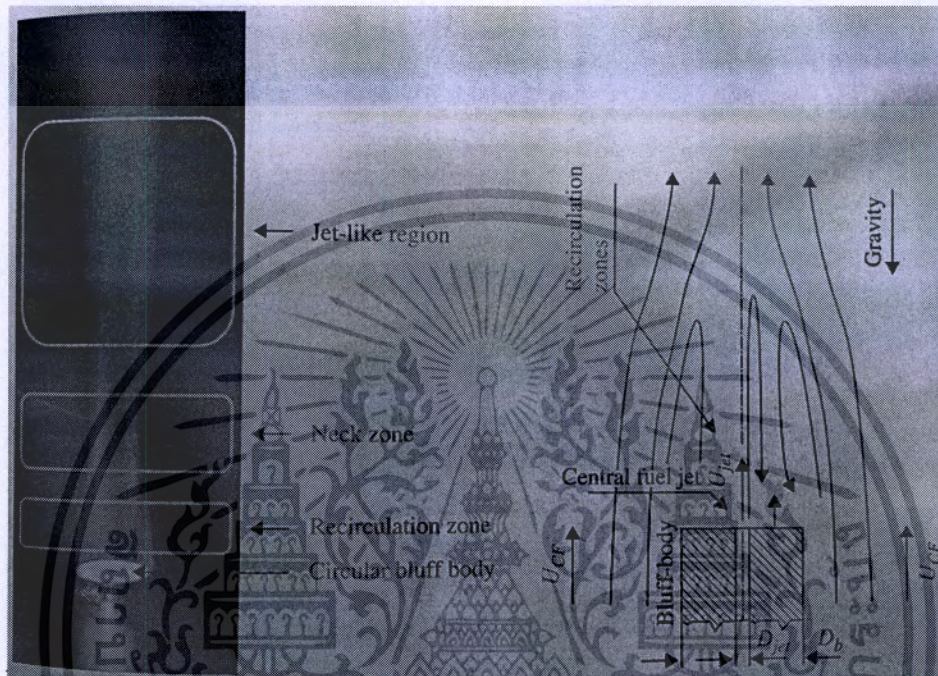
รูปที่ 3.13 การกระจายความเข้มข้น Reyleigh ของเปลวไฟจากความต่างของเลขเรย์โนลด์ (Re) (3800, 7600, 15200 และ 22800) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 8 mm. [27]

จากรูปที่ 3.13 เวลาของการแพร่ของโมเลกุลเชื้อเพลิงจะมีมากในกรณีที่มีความเร็วของ Jet ต่ำ สำหรับ Re เป็น 22800 มีแนวโน้มที่จะสามารถรักษารูปร่างของเปลวที่บริเวณใกล้ทางออกของหัวฉีดได้ สังเกตที่บริเวณ $X < 20$ mm. แต่ที่ระยะไกลออกไปจะมีความปั่นป่วนของการแพร่โมเลกุลของเชื้อเพลิงสูงทำให้บริเวณนี้เปลวไฟจะมีความกว้างมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ นาย นรเศรษฐ์ พิกุลเงิน และคณะ [10] คือเมื่อลดอัตราการไหลของอากาศ Primary ลงรูปร่างของเปลวไฟจะมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเหมือนกับรูปที่ 3.13 สำหรับลักษณะการแพร่ของโมเลกุลที่ขอบของสนามการไหลแบบ Jet ซึ่งล้อมรอบไปด้วยด้วยอากาศ จะส่งผลกับรูปร่างของเปลวไฟ สำหรับที่ Re เท่ากับ 3800 บริเวณขอบของเปลวไฟนั้นจะราบเรียบจนไปถึงที่ $X = 160$

mm. ต่อมาสำหรับที่ Re เท่ากับ 7600 ความราบเรียบของขอบเปลวจะลดลงโดยจะเริ่มบิดเบี้ยวไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแต่ $X = 80$ mm. ที่ Re เท่ากับ 15200 ความราบเรียบของของจะเห็นถึงแค่ $X = 40$ mm. ส่วน Re เท่ากับ 22800 จะอยู่แค่ที่ $X = 20$ mm.

เปลวไฟจากการไหลแบบ Jet โดยมีวัตถุขวางขวางการไหล (Bluff body flames)



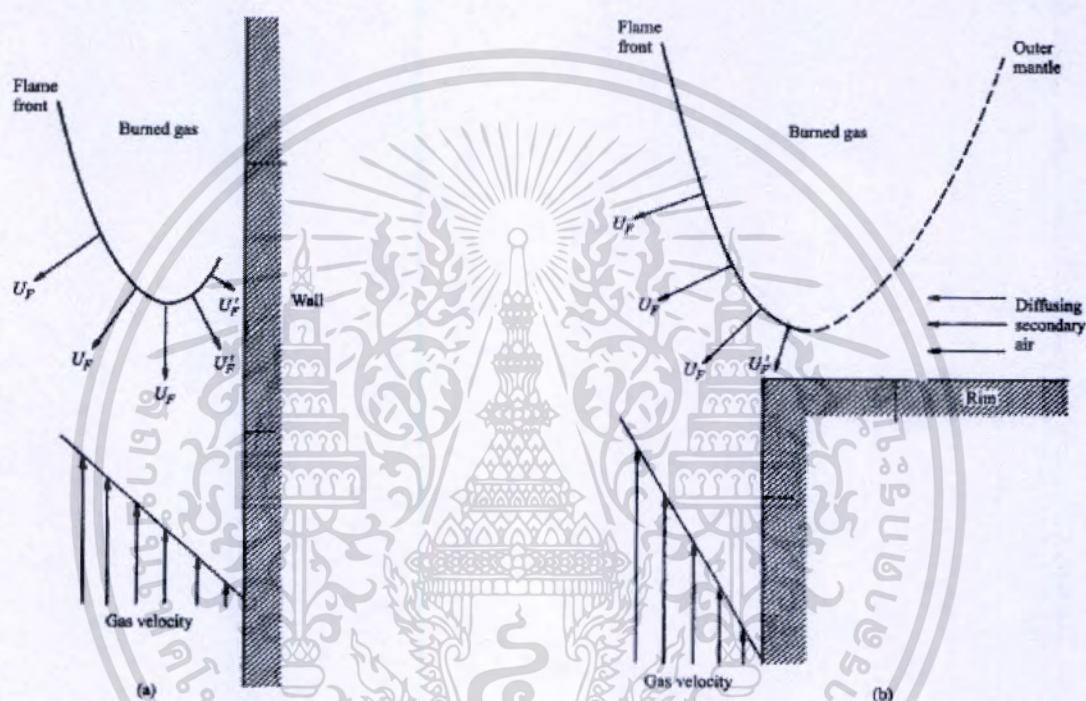
รูปที่ 3.14 หัวเผาที่ติดตั้ง Bluff body (ซี่) และลักษณะของสนามการไหลบริเวณ Bluff body ทรงกระบอก (ขวา) [27]

จากรูปที่ 3.14 เป็นการยกตัวอย่างจาก Fundamentals of Turbulent and Multiphase Combustion [27] โดยใช้หัวเผาที่มีรูปทรงที่ง่าย มีขอบเขตที่แน่นอน และมีความเสถียรภาพของเปลวไฟภายใต้การไหลของอากาศรอบๆ (Coflow) และสภาวะการไหลแบบ Jet จากรูปที่ 3.14 Bluff body จะทำให้เกิดกระแสไหลหมุนวนกลับที่บริเวณด้านหน้าของตัวมัน กระแสวนกลับนี้เพียงพอสำหรับการผสมและเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ด้วยเปลวไฟที่มีเสถียรภาพ ต่อมาเมื่อเชื้อเพลิงได้วิ่งผ่านบริเวณที่มีกระแสไหลย้อนกลับแล้วก็จะถึงบริเวณที่เรียกว่า Neck ซึ่งเปลวไฟอาจเกิดการดับได้ที่บริเวณนี้เนื่องจากผลกระทบที่มีนัยสำคัญจากความปั่นป่วนและอัตราทางเคมี และถ้าเกิดการดับที่บริเวณ Neck เปลวไฟอาจจะติดขึ้นมาอีกครั้งที่บริเวณ Jet-like เมื่อมีการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศหรือแก๊สร้อนด้วยความปั่นป่วนที่มีค่าน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเปลวไฟจากการที่มี Bluff body จะมีอยู่ 3 โซน ได้แก่ โซนที่มีเสถียรภาพ โซนที่อาจเกิดการดับ และโซนที่อาจมีการจุดติดใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 Flame Stabilization [19]

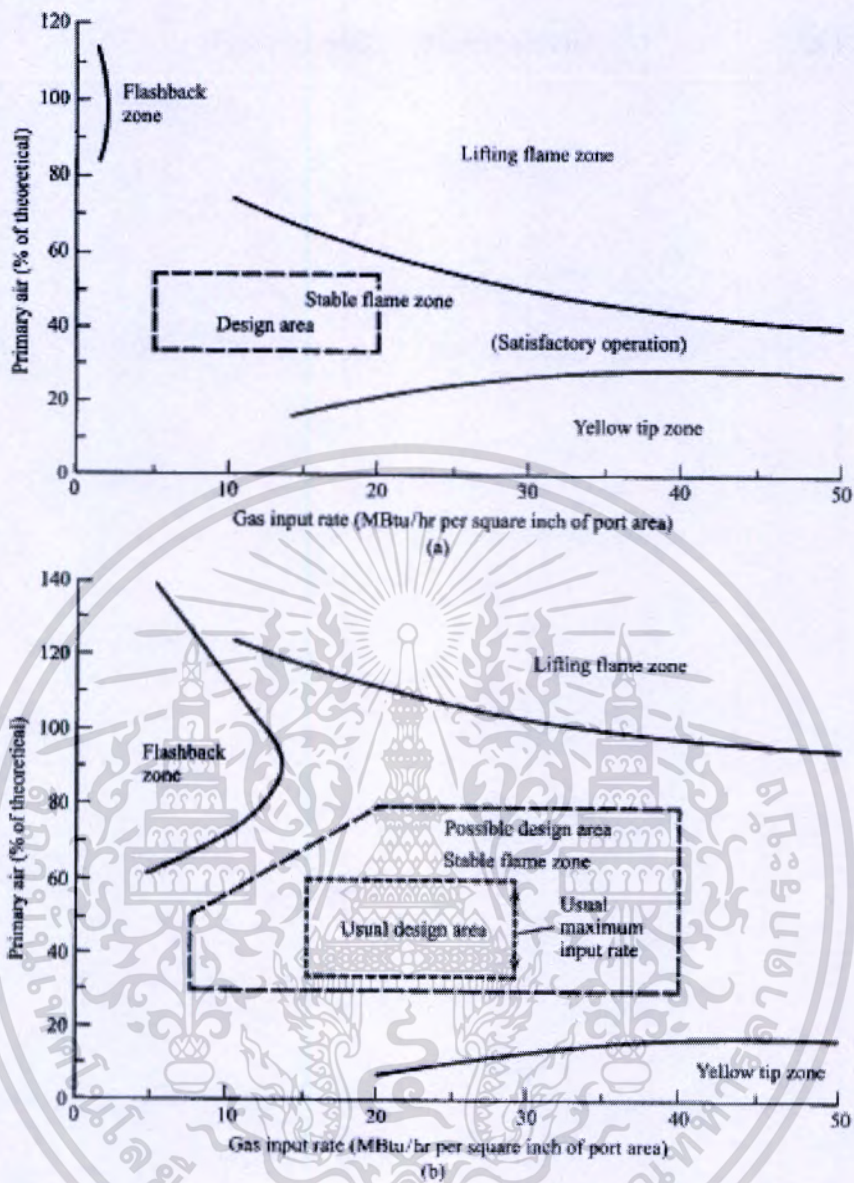
การพิจารณาว่าเปลวไฟมีเสถียรภาพหรือไม่ หลักๆแล้วจะมีอยู่ 2 ปรากฏการณ์ที่จะถูกคำนึงถึง คือ Flashback และ Lutoff ซึ่ง Flashback นั้นเกิดขึ้นเมื่อเปลวไฟมีการลามกลับเข้าไปในท่อหรือทางออกของหัวเผาโดยปราศจากการดับ ขณะที่ Lutoff สภาวะที่เปลวไฟไม่แนบติดกับท่อหรือทางออกของหัวเผาแต่กรณีนี้อาจจะมีเสถียรภาพที่ระยะหนึ่ง การเกิด Flashback เป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ มากไปกว่านั้นมันยังไม่มีความปลอดภัยอีกด้วย



รูปที่ 3.15 เวกเตอร์ความเร็วและตำแหน่งของเปลวไฟ (a) Flashback และ (b) Lutoff [19]

ปรากฏการณ์ Flashback และ Lutoff ทั้งคู่จะสัมพันธ์กับความเร็วของเปลวไฟกับความเร็วการไหล สภาวะทั้งคู่แสดงอยู่ในรูปที่ 3.15 การเกิด Flashback โดยทั่วไปแล้วจะขึ้นกับเวลาและเกิดขึ้นจากการที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงมีค่าลดลงหรือมีค่าเป็น 0 และเมื่อความเร็วของเปลวไฟมีค่ามากกว่าความเร็วการไหล และเมื่อการไหลของเชื้อเพลิงหยุดไป ดังนั้นการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อป้องกันการเกิด Flashback อาทิเช่น ชนิดของเชื้อเพลิง อัตราส่วน Equivalence ความเร็วการไหล และรูปทรงของหัวเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แผนภาพความเสถียรภาพในรูปแบบของ Flashback และ Liftoff (a) แก๊สธรรมชาติ และ (b) แก๊สจากผู้ผลิตรายหนึ่ง [19]

จากรูปที่ 3.16 แสดงแผนภาพความเสถียรภาพในรูปแบบของ Flashback สำหรับหัวเผาหนึ่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่าหนึ่ง ซึ่ง (a) แก๊สธรรมชาติ และ (b) แก๊สจากผู้ผลิตรายหนึ่ง จะเห็นว่าการเกิด Flashback จะเกิดขึ้นที่บริเวณความเร็วการไหลต่ำๆและสภาวะที่ทั้งคู่จะค่อนข้างที่จะเป็น Rich stoichiometries เล็กน้อย ซึ่งมันสามารถเกิด Flashback ได้ง่าย จากการเปรียบเทียบแก๊สธรรมชาติ ซึ่งประกอบไปด้วยแก๊สมีเทนเป็นส่วนใหม่ จะมีเสถียรภาพในด้านของการเกิด Flashback มากกว่าแก๊สจากผู้ผลิต ซึ่งหลักๆจะประกอบไปด้วยไฮโดรเจนทำให้เปลวไฟจากการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงนี้มีความเร็วสูง (ความเร็วเปลวไฟของไฮโดรเจนมากกว่าของมีเทนประมาณ 5 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนักเรียนเห็นใบเซอร์ใบนี้ควรแจ้งเจ้าหน้าที่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการยกตัวของเปลวจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเปลวและคุณสมบัติการไหลใกล้ๆบริเวณขอบของท่อพ่นเชื้อเพลิงของหัวเผา เมื่อพิจารณาเสถียรภาพของเปลวไฟ ที่ความเร็วการไหลต่ำๆ ผิวของเปลวไฟค่อนข้างที่จะใกล้กับขอบของท่อพ่นเชื้อเพลิงจนสามารถเรียกว่าติดกันได้ แต่เมื่อความเร็วการไหลเพิ่มมากขึ้น มุมฐานเปลวไฟจะลดลงและจะขยับห่างออกจากผิวท่อพ่นเชื้อเพลิงไปยังทางปลายการไหล (Downstream) อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของความเร็วการไหลจนถึงค่าวิกฤต ทำให้เปลวไฟนั้นขยับไปอยู่บริเวณที่ไกลจากผิวท่อพ่นเชื้อเพลิงและสามารถเรียกว่า เปลวไฟยกตัว นอกจากการที่เพิ่มความเร็วการไหลจะทำให้เกิด Liftoff แล้ว การที่มีระยะการยกตัวมากๆยังจะทำให้เกิดการเป่าดับ (Blow off) อย่างฉับพลันอีกด้วย ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่พึงประสงค์ ดังนั้นสรุปได้ว่า Liftoff และ การเป่าดับ เป็ยผลกระทบมาจาก การสูญเสียความร้อน (Heat loss) การสูญเสียอย่างรุนแรง (Radical loss) และการเจือจางที่เพิ่มขึ้นจากของไหลรอบข้าง ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วการไหล

3.8 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (Radiation Heat Transfer) [28]

การแผ่รังสีความร้อนหมายถึงการถ่ายเทความร้อนจากผิวดังกล่าวหนึ่งไปสู่อีกผิวดังกล่าวหนึ่งซึ่งมรรุณหตมีต่างกัน พลังงานของการแผ่รังสีถูกส่งถ่ายในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) หรือในรูปของโฟตอนโดยไม้อาศัยวัสดุตัวกลาง การแผ่รังสีจึงสามารถเกิดในสุญญากาศได้

พลักซ์สูงสุดของการแผ่รังสีออกจากผิวดังกล่าว คำนวณจากกฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann) ดังนี้

$$q''_{rad} = \sigma T_s^4 \quad (3.62)$$

โดยที่ T_s คืออุณหภูมิผิวแผ่รังสีในหน่วยของศาสม์บรุณ (K)

σ คือค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่าคงที่เท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

สมการ (3.62) ใช้กับกรณีที่เป็นกรแผ่รังสีในอุดมคติหรือวัตถุดำ สำหรับกรณีพื้นผิวจริง พลักซ์แผ่รังสีจะน้อยกว่าวัตถุดำ ทั้งนี้จะขึ้นกับสภาพเปล่งรังสี (Emissivity) ของพื้นผิวนั้น (ϵ) ด้วย พลักซ์รังสีบนพื้นผิวจริงคำนวณจาก

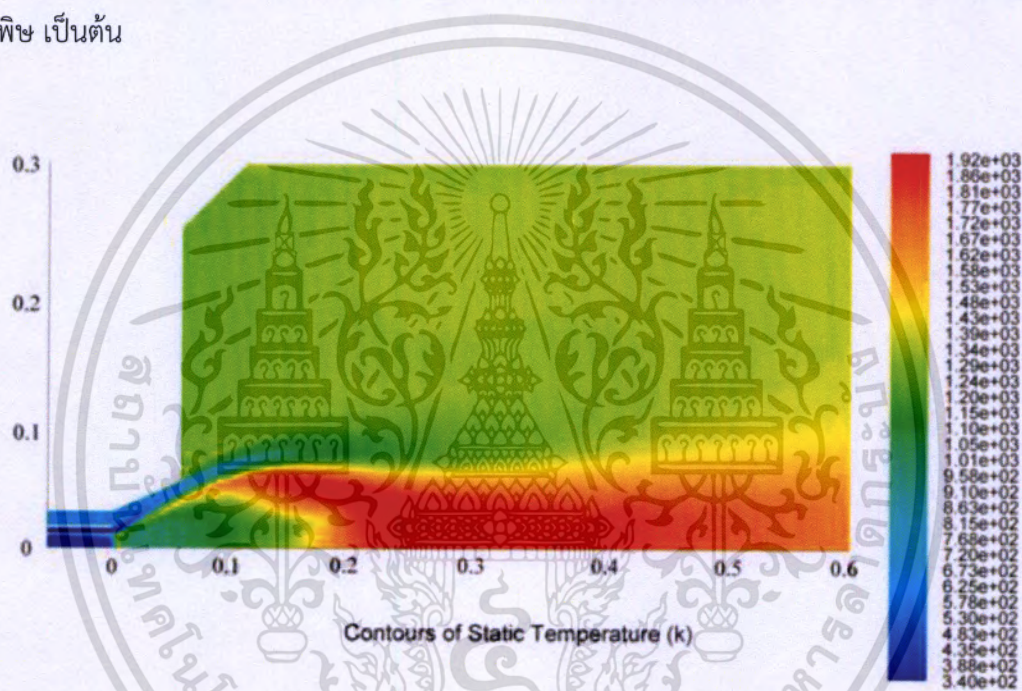
$$q''_{rad} = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (3.63)$$

พิจารณาการแผ่รังสีแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิว A อุณหภูมิ T_s มีสภาพเปล่งรังสี ϵ กับสิ่งแวดล้อมโดยรอบๆมีอุณหภูมิคงที่ T_{sur} อัตราการแผ่รังสีที่จุด A คือ

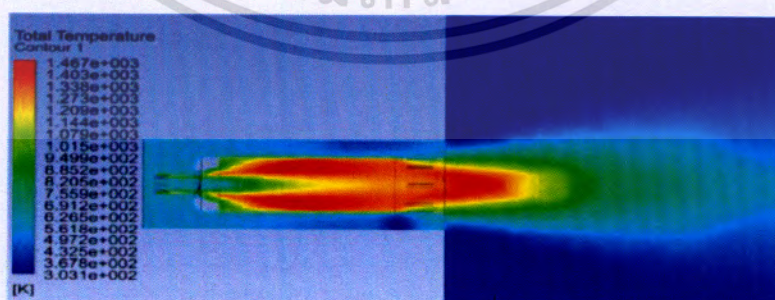
$$q''_{net} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) = \frac{\dot{Q}_{rad,net}}{A} \quad (3.64)$$

3.9 Computational fluid dynamics (CFD, [29])

CFD คือ การหาคำตอบด้วยวิธีเชิงตัวเลข ที่นำมาประยุกต์กับการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล ทั้งที่มีและไม่มีความร้อน หรือปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยการสร้างแบบจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เทคนิคนี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งและใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เช่น การผสมและการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง การไหลของสารทำงาน การกระจายตัวของมลพิษ เป็นต้น



รูปที่ 3.17 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ของโรงจักรผลิตกำลังแห่งหนึ่ง [29]



รูปที่ 3.18 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหัวเผาของโรงจักรผลิตกำลังแห่งหนึ่ง [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.1 ขั้นตอนโดยสังเขปของวิธีการคำนวณด้วยโปรแกรมทางด้าน CFD [29, 30]

ในรูปแบบที่สามารถให้ผู้ใช้งานเข้าใจได้ง่าย CFD ทุกโปรแกรมนี้จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ 1). ขั้นตอนเตรียมการก่อนการคำนวณ (Pre-processor) 2). ขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาผลเฉลย (Solver) 3). ขั้นตอนการแสดงผลการคำนวณ (Post-processor)

3.9.1.1 Pre-processor ผู้ใช้งานต้องนิยามรูปร่างและขอบเขตที่เราสนใจ หรือต้องการที่จะคำนวณ (Computational domain) ต่อมาให้ทำการสร้างกริด คือการแบ่งขอบเขตของปัญหาเป็นส่วนเล็กๆ จำนวนมากๆ นั่นเอง ต่อไปให้เลือกปรากฏการทางธรรมชาติ ทางฟิสิกส์และเคมีให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การคำนวณ ลำดับต่อไปต้องนิยามคุณสมบัติของของไหลและกำหนดขอบเขตของปัญหา

3.9.1.2 Solver เทคนิคการหาคำตอบเชิงตัวเลขมีอยู่หลายแบบด้วยกัน แต่ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแค่แบบวิธีปริมาตรจำกัดเท่านั้น เนื่องจากเป็นวิธีที่นำมาใช้กับงานวิจัยนี้

- วิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method)

วิธีปริมาตรจำกัดถูกพัฒนาแรกเริ่มจากวิธีของผลต่างสี่เหลี่ยม กล่าวคือมีการตัดพจน์อันดับสูงของอนุกรมออก ในที่นี้จะสนใจเพียงสูตรและเทคนิควิธีที่ถูกสร้างขึ้นจนเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในโปรแกรมเชิงพาณิชย์หลายตัว เช่น PHOENICS FLUENT FLOW 3D และ STAR-CD เป็นต้น ลำดับขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขของวิธีการนี้ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- การอินทิเกรตสมการควบคุมของของไหลทั้งปริมาตรควบคุมเล็กๆ ทุกปริมาตรภายใต้ขอบเขตของปัญหา
- การแปลงรูปสมการ ซึ่งประกอบไปด้วย การแทนค่าเทอมต่างๆ (การพา การแพร่ การก่อตัว หรือ การสูญเสีย) ของสมการควบคุมที่อินทิเกรตแล้วนั้น ด้วยการประมาณค่าที่อยู่ในรูปแบบที่เหมือนกับผลต่างสี่เหลี่ยม คือเป็นเทอมที่อยู่ในรูปแบบของค่าผลเฉลยที่โหนด การประมาณค่าดังกล่าวมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ทั้งนี้การแปลงรูปสมการนี้ทำให้เกิดระบบสมการพีชคณิตขึ้น
- การหาคำตอบของสมการพีชคณิตโดยวิธีการกระทำซ้ำ (Iterative Method)

ขั้นตอนแรก คือ การอินทิเกรตปริมาตรควบคุม ซึ่งเป็นการทำให้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมมีลักษณะที่พึงประสงค์ โดยขั้นตอนในการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขนี้ยังคงสะท้อนให้เห็นได้ว่า รูปแบบยังอยู่บนพื้นฐานของกฎการอนุรักษ์สสาร และพลังงาน ตามหลักทางฟิสิกส์ไว้ในแต่ละเซลล์เล็กๆที่มีขนาดปริมาตรที่แน่นอนเหล่านั้น สิ่งนี้เองที่ทำให้เกิดความชัดเจนในการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับขั้นการคำนวณเชิงตัวเลข (Algorithm) กับกฎการอนุรักษ์ปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐาน จึงทำให้ง่ายในการทำความเข้าใจ แนวคิดของวิธีปริมาตรจำกัดนี้ จึงเป็นที่นิยมที่จะนำมาใช้ในการหาผลเฉลยของปัญหาทางด้านการไหล อาจกล่าวได้ว่า กระบวนวิธีเชิงตัวเลขโดยส่วนมากที่ปรากฏในโปรแกรม

วิเคราะห์การไหลที่มีอยู่ในตลาด มักใช้วิธีปริมาตรจำกัดนี้ในการคำนวณหาผลเฉลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ที่บ่งชี้คุณสมบัติจำเพาะทางฟิสิกส์ของการไหล (Intensive property) ในกรณีทั่วไป เช่น ค่า ϕ โมเมนต์จำเพาะเชิงมวลจากความเร็วในแนวแกน x, y และ z ในระบบพิกัดฉาก หรือเอ็นทัลปีจำเพาะเชิงมวล ฯลฯ สามารถนำมาใช้อธิบายการเคลื่อนย้ายปริมาณทางฟิสิกส์ ด้วยกระบวนการต่างๆ ภายใต้กฎของการอนุรักษ์ โดยเราสามารถเขียนได้ว่า

อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณทางฟิสิกส์ที่บ่งชี้ได้ด้วยพารามิเตอร์จำเพาะเชิงมวล ϕ ภายในปริมาตรควบคุมต่อหน่วยเวลา	อัตราการเพิ่มสุทธิของปริมาณทางฟิสิกส์ นั้น ที่ข้ามขอบเขตของปริมาตรควบคุมเข้ามาในระบบได้ด้วย การพาต่อหน่วยเวลา	อัตราสุทธิของการเพิ่มขึ้นของปริมาณทางฟิสิกส์ นั้น ที่ข้ามขอบเขตของปริมาตรควบคุมเข้ามาได้ด้วย การแพร่ต่อหน่วยเวลา	อัตราการก่อกำเนิดขึ้นของปริมาณทางฟิสิกส์ นั้น ในปริมาตรควบคุม
--	---	--	---

3.9.1.3 Post-processor เป็นส่วนที่ใช้แสดงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ปัจจุบันโปรแกรมเชิงพาณิชย์ CFD ได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจากความสามารถในการทำกราฟฟิคที่ดี รวมทั้งสะดวกต่อการใช้งาน นอกจากนี้โปรแกรมยังได้สร้างเครื่องมือแสดงภาพในการมองในที่นี้ได้รวมถึง

- รูปร่างของขอบเขตของปัญหา และ แสดงกริด
- เวกเตอร์
- ภาพ Contour และเส้น
- พล็อตพื้นผิวแบบ 2D และ 3D
- เส้นการวิ่งของอนุภาค (Particle Tracking)
- จัดภาพการมองให้เหมาะสม (ในการหมุน การเคลื่อนที่ การย่อ-การขยาย เป็นต้น)

3.9.2 สมการควบคุมการไหลของแก๊ส

3.9.2.1 สมการอนุรักษ์มวล [29, 30]

การหาสมการอนุรักษ์มวล มาจากการพิจารณาถึงสมมูลมวลของชิ้นส่วนปริมาตรควบคุม คืออัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรควบคุมจะเท่ากับอัตราสุทธิของมวลที่เข้าไปในชิ้นส่วนปริมาตรควบคุมนั้น สมการอนุรักษ์มวลในกรณีของการไหลอัดตัวได้และไม่มีเทอมของการก่อกำเนิด (Source term) สามารถเขียนในรูปแบบของไดเวอร์เจนซ์ของเวกเตอร์ u ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (3.65)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.2.2 สมการนาเวียร์-สโตกส์ [31]

สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับการไหลแบบอัดตัวได้สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{i,j}}{\partial x_j} + S_{v,i} \quad (3.66)$$

โดยที่

$$\tau_{i,j} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{i,j} \quad (3.67)$$

3.9.2.3 สมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน [31]

เมื่อ ϕ คือค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติใดๆของของไหล ณ ตำแหน่งโดเมนการไหลหนึ่งๆ ซึ่งคุณสมบัติ ϕ จะเปลี่ยนไปตามเวลานั้นๆสามารถมองได้ว่าเป็นผลบวกของค่าเฉลี่ย $\bar{\phi}$ ของค่าของความแปรผันที่ขึ้นกับเวลา ϕ'

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (3.68)$$

$$\bar{\phi} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \phi dt \quad (3.69)$$

เพื่อสรุปสูตรที่จะนำไปใช้ ในกรณีที่ไม่คิดอิทธิพลของความผันแปรของความหนาแน่น แต่ของไหลเป็นชนิดที่อัดตัวได้ เราจะทำการหาค่าเฉลี่ยในลักษณะของการถ่วงน้ำหนักด้วยความหนาแน่น (Density-Weighted average หรือ Favre-average) ซึ่งรูปสมการนี้ถูกใช้กันทั่วไปในโปรแกรมสำเร็จรูปโดยที่ $\bar{\rho}$ คือความหนาแน่นเฉลี่ย

เมื่อ

$$\bar{\rho} = \frac{1}{\Delta t} \int \rho dt \quad (3.70)$$

และจาก

$$\overline{\rho \phi} = \frac{1}{\Delta t} \int \rho \phi dt \quad (3.71)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้

$$\bar{\rho}\tilde{\theta} = \overline{\rho\theta} = \frac{1}{\Delta t} \int \rho\theta dt \quad (3.72)$$

นั่นคือ

$$\tilde{\theta} = \frac{1}{\bar{\rho}\Delta t} \int \rho\theta dt \quad (3.73)$$

จะเห็นได้ว่าการหาค่าเฉลี่ยจะมีค่าความหนาแน่นเป็นตัวคูณร่วมอยู่ และผลของการอินทิเกรตถูกหารด้วยความหนาแน่นเฉลี่ยเช่นกัน ซึ่งเป็นค่า Density-Weighted average นั่นเอง จากสมการเหล่านี้เมื่อนำมารวมกับกับสมการอนุรักษ์มวลและสมการนาเวียร์-สโตกสำหรับพิกัดฉากในแกน x , y และ z จะได้สมการควบคุมสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนดังต่อไปนี้ตามลำดับ

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho}\tilde{u}) = S_M \quad (3.74)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{U})}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho}\tilde{U}\tilde{U}) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad}\tilde{U}) + \left[\frac{\partial(\overline{\rho u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial z} \right] + S_{M_x} \quad (3.75)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{V})}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho}\tilde{V}\tilde{U}) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad}\tilde{V}) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right] + S_{M_y} \quad (3.76)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{W})}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho}\tilde{W}\tilde{U}) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad}\tilde{W}) + \left[\frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w'^2})}{\partial z} \right] + S_{M_z} \quad (3.77)$$

3.9.2.4 แบบจำลอง $k - \mathcal{E}$ แบบมาตรฐาน [29, 30]

สำหรับแบบจำลอง $k - \mathcal{E}$ มาตรฐาน จะใช้สมการการถ่ายโอนต่อไปนี้สำหรับ k (Turbulent kinetic energy) และ \mathcal{E} (Turbulent dissipation)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad} k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \mathcal{E} \quad (3.78)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varepsilon U) = \text{div}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon\right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.79)$$

นั่นคือ

อัตราการผลิตพลังงานจลน์	อัตราการผลิตพลังงานจลน์	อัตราการถ่ายโอนพลังงานจลน์	อัตราการผลิตพลังงานจลน์	อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์
เปลี่ยนแปลงของ "พลังงานจลน์ปั่นป่วน" หรือ "การสลายพลังงานจลน์ปั่นป่วน"	อัตราการผลิตพลังงานจลน์	อัตราการถ่ายโอนพลังงานจลน์	อัตราการผลิตพลังงานจลน์	อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์
	ปริมาณ	เนื่องจาก การแพร่ของ "พลังงานจลน์ปั่นป่วน" หรือ "การกระจายพลังงานจลน์ปั่นป่วน"	เนื่องจาก การกำเนิดของปริมาณ	การสลายของปริมาณ
	ดังกล่าว	เนื่องจาก การพา	ดังกล่าว	ดังกล่าว

ในสมการจะมีค่าคงที่อยู่ที่ทั้งสิ้น 5 ตัว ซึ่งสามารถปรับค่าเพื่อให้ใช้ได้กับลักษณะการไหลที่หลากหลาย อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาเปรียบเทียบผลกับลักษณะการไหลลักษณะต่างๆมาอย่างกว้างขวาง ทำให้ได้ข้อสรุปของค่าที่แนะนำให้ใช้ได้ ดังนี้

$$C_{\mu} = 0.09; \quad \sigma_k = 1.00; \quad \sigma_\varepsilon = 1.30 \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92$$

3.9.2.5 การเคลื่อนย้ายของสเกลลาร์ [5]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v \tilde{\phi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u \tilde{\phi}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{eff} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z} \right) + S_{\phi} \quad (3.80)$$

$$D_{eff} = D_{\phi} + \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\phi,t}} \quad (3.81)$$

S_{ϕ} คือ Source Term ที่เกิดหรือสลายตัวเนื่องจากการทำปฏิกิริยา D_{eff} คือ Conduction Coefficient และ ϕ คือ อัตราส่วนมวล (Mass Fraction) ของปริมาณสเกลลาร์สำหรับแต่ละปัญหา

สำหรับสมการอนุรักษ์พลังงาน ϕ จากสมการ (3.11) จะเปลี่ยนเป็น H (เอนทัลปี) โดยที่ S_h คือ Source Term ปฏิกิริยาความร้อนและการถ่ายโอนความร้อน / รังสีจากอนุภาค โดยสามารถหาได้ดังนี้ในสมการนี้

$$S_h = LHV_{vol} \cdot R_v \quad (3.82)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_p คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหย และ LHV_{vol} คือ ค่า Low Heating Value ของสารระเหยในอนุภาค

3.9.2.5 สมการควบคุมที่อยู่ในรูปของพิกัดเชิงขั้ว [19]

- สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u}) = \bar{S}_m \quad (3.83)$$

- สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

ทิศทางการแนวรัศมี

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{v}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right) + \bar{S}_v + \bar{S}_{m,v} \quad (3.84)$$

เมื่อ

$$\bar{S}_v = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right) + \frac{\bar{\rho} \tilde{v}^2}{r} - 2 \mu_{eff} \frac{\tilde{v}}{r^2} \quad (3.85)$$

และ $\bar{S}_{m,v}$ คือ การถ่ายโอนโมเมนตัมที่เกิดในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็งที่ทิศทางตามแนวรัศมี

ทิศทางการแนวแกน

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{u}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right) + \bar{S}_u + \bar{S}_{m,u} \quad (3.86)$$

เมื่อ

$$\bar{S}_u = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right) \quad (3.87)$$

และ $\bar{S}_{m,u}$ คือ การถ่ายโอนโมเมนตัมที่เกิดในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็งที่ทิศทางตามแนวแกน

ทิศทางการเส้นสัมผัสกับเส้นรอบวงกลม (ตั้งฉากกับระนาบ r-z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{w}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{w}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} \right) + \bar{S}_w + \bar{S}_{m,w} \quad (3.88)$$

เมื่อ

$$\bar{S}_w = -\tilde{w} \left(\frac{\bar{\rho} \tilde{v}}{r} + \frac{\mu_{eff}}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mu_{eff}}{\partial r} \right) \quad (3.89)$$

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

- สมการความปั่นป่วน

Turbulent kinetic energy

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} k) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} k) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G_k + G_b - \bar{\rho} \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.90)$$

$$\text{ซึ่ง } G_k = \mu_{eff} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{v}}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial r} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} \right)^2 + \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\tilde{w}}{r} \right) \right]^2 \right\} \quad (3.91)$$

Dissipation rate

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \varepsilon) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) + C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (3.92)$$

เมื่อ G_k คือการกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ความเร็วเฉลี่ย G_b คือการกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว Y_M แสดงถึงการสนับสนุนของการขยายตัวที่เปลี่ยนแปลงในความปั่นป่วนอัดตัวได้ต่ออัตราการกระจายทั้งหมด และ R_ε เป็นพจน์ที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลที่มีความเครียดเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเคลื่อนย้ายของสเกลลาร์

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{\phi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{\phi}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r D_{eff} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_{eff} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z}) + \bar{S}_{\phi} \quad (3.93)$$

$$D_{eff} = D_{\phi} + \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\phi,t}} \quad (3.94)$$

\bar{S}_{ϕ} คือ Source Term ที่เกิดหรือสลายตัวเนื่องจากการทำปฏิกิริยา D_{eff} คือ Conduction Coefficient และ ϕ คือ อัตราส่วนมวล (Mass Fraction) ของปริมาณสเกลลาร์สำหรับแต่ละปัญหา

3.9.2.6 แบบจำลองการเผาไหม้ในรูปแบบของแก๊ส [31]

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหยถูกสมมติให้มีความสัมพันธ์กับอัตราการสลายตัวของกระแสน้ำมัน แบบจำลองจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจน เชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ ค่าอัตราของปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังนี้

$$R_v = ACOM \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\tilde{\phi}_{fuel}, \frac{\tilde{\phi}_{ox}}{S_r}, BCOM \frac{\tilde{\phi}_{pr}}{1+S_r} \right) \quad (3.95)$$

ซึ่ง R_v คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหย โดย ACOM และ BCOM คือค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง $\tilde{\phi}_{fuel}$ คือ สัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของสารระเหย $\tilde{\phi}_{ox}$ คือ สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน $\tilde{\phi}_{pr}$ คือ สัดส่วนโดยมวลของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ ซึ่งประกอบด้วยไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ และ S_r คือปริมาณ Stoichiometric ของสารระเหย

3.9.3 สมการในแบบจำลองอนุภาค

วิธี Lagrangian ถูกใช้ในการจำลองการไหลของอนุภาค โดยสมมติว่าอนุภาคถูกปล่อยเข้าไปมีลักษณะเป็นทรงกลมและความหนาแน่นเริ่มต้นมีค่าคงที่ การกระจายขนาดของอนุภาคถูกแบ่งเป็นช่วงๆ โดยแต่ละช่วงจะแทนด้วยขนาดเฉลี่ยของช่วงนั้นๆ อนุภาคจะถูกปล่อยในตำแหน่งที่แน่นอนที่ความเร็วและอุณหภูมิเดียวกันกับแก๊สรอบๆ การถ่ายเทมวล โมเมนตัม และพลังงาน ของอนุภาคจะมีผลกับการเคลื่อนที่ของแก๊ส และจะเกี่ยข้องกับตำแหน่งของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านคำนวณได้โดยเทคนิค Particle Source In Cell Techniques (PSICT) (Rizvi, 1985) [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.3.1 สมการอนุกรมมวล [31]

การถ่ายเทมวลจากอนุภาคสู่ก๊าซสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dm_p}{dt} = -R_m \quad (3.96)$$

สำหรับแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหิน R_m คืออัตราเชิงปริมาตรของมวลที่ออกจากอนุภาคสู่แก๊สโดยการปลดปล่อยสารระเหยหรือซาร์ในการเผาไหม้ เครื่องหมายลบหน้า R_m หมายความว่ามวลของอนุภาคลดลง

3.9.3.1.1 แบบจำลองการปล่อยสารระเหย [31]

อัตราของสารระเหยที่ปล่อยออกมาถูกอธิบายในรูปของ Arrhenius function ร่วมกับกลุ่มของตัวแปรที่ได้จากการสังเกตในการทดลอง เขียนสมการได้ดังนี้

$$R_m = \frac{dV}{dt} = K_A (V^* - V) \quad (3.97)$$

V คือปริมาณสะสมของสารระเหยที่ปล่อยออกมา V^* คือปริมาณทั้งหมดของสารระเหยภายในถ่านหิน และค่า K_A คือค่าที่แสดงในรูปของ Arrhenius ได้ดังนี้

$$K_A = k_0 \exp\left(-\frac{E_{dvol}}{R_u T}\right) \quad (3.98)$$

R_u คือ Universal gas constant, T คือค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ k_0 คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลอง และ E_{dvol} คือ activation energy

3.9.3.1.2 แบบจำลองการเผาไหม้ของซาร์ [31, 33, 34]

การจำลองสมมุติว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจะรวมตัวกับออกซิเจนอย่างสมบูรณ์ได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอัตราการเผาไหม้ของซาร์ขึ้นกับ 2 กระบวนการ คือ อัตราจลนศาสตร์ของซาร์ และอัตราการแพร่ของออกซิเจนที่พื้นผิวของอนุภาค นอกจากนี้ยังรวมไปถึงการทำปฏิกิริยาของซาร์ที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย

ปฏิกิริยาของซาร์เกิดขึ้นจากจลนศาสตร์ทางเคมี

อัตราจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาของซาร์และออกซิเจนอาจจะเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_c = K_c \left\{ (P_{O_2})_o \right\}^n \quad (3.99)$$

ซึ่ง

$$K_c = C_2 \exp \left(-\frac{E}{R_u T} \right) \quad (3.100)$$

P_{O_2} คือความดันย่อยของออกซิเจนที่ผิวของอนุภาค K_c คือสัมประสิทธิ์ของอัตราปฏิกิริยาทางเคมี กำลัง n (Field, 1967) [24], C_2 คือ Pre-Exponential Factor และ E คือ Effective Activation Energy ของปฏิกิริยาของชาร์

ปฏิกิริยาของชาร์เกิดขึ้นด้วยการแพร่ของออกซิเจน

$$R_c = K_d \left\{ (P_{O_2})_\infty - (P_{O_2})_0 \right\} \quad (3.101)$$

$$K_d = \frac{D_c M_c \phi}{\left\{ \frac{R_d}{2} \left(\frac{T_p + T_g}{2} \right) \right\}} \quad (3.102)$$

โดย

$$D_c = D_0 \left(\frac{P_0}{P} \right) \left(\frac{T_g}{T_0} \right)^{1.75} \quad (3.103)$$

และ

$$D_0 = C_1 \frac{\left[(T_p + T_\infty) / 2 \right]^{0.75}}{d_p} \quad (3.104)$$

$(P_{O_2})_\infty$ คือ ความดันย่อยของออกซิเจนของแก๊สรอบข้างที่พื้นผิวของอนุภาค M_c คือมวลของคาร์บอน ϕ คือตัวแปรของกลไกของปฏิกิริยาของชาร์กำหนดให้เท่ากับ 1.0 สำหรับการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์, R_d คือเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค T_p และ T_g คืออุณหภูมิสมบูรณ์ของอนุภาคและแก๊ส ตามลำดับ D_0 , P_0 และ T_0 คือการแพร่กระจาย ความดันและอุณหภูมิตามลำดับ T_∞ และ C_1 คืออุณหภูมิเฉลี่ยและค่าคงที่ของอัตราการแพร่กระจายตามลำดับ

Overall rate coefficient for char combustion

เมื่ออนุภาคถ่านหินมีอุณหภูมิสูงอัตราปฏิกิริยารวมเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการเกิดปฏิกิริยาของชาร์ แต่ถ้าอนุภาคอยู่ในบริเวณที่มีออกซิเจนมากและอุณหภูมิของอนุภาคต่ำ อัตราปฏิกิริยารวมจะถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมโดยอัตราทางจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Kinetic Controlled) ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราทั้งหมด K_t อาจจะเขียนได้ดังนี้

$$K_t = \frac{1}{\left\{ \left(\frac{1}{K_c} \right) + \left(\frac{1}{K_d} \right) \right\}} \quad (3.105)$$

อัตราการเผาไหม้สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (d_p) อาจจะเขียนได้ดังนี้คือ

$$\frac{\partial m}{\partial t} = K_t \pi d_p^2 P X_{O_2} \quad (3.106)$$

ซึ่ง P คือความดันของแก๊ส, X_{O_2} คือสัดส่วนโดยโมลของออกซิเจนในบริเวณแก๊สรอบข้าง

3.9.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

การสมดุลโมเมนตัมสำหรับการเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{dm_p \tilde{u}_i}{dt} = \sum \bar{F}_i \quad (3.107)$$

ในเทอมด้านขวาของสมการคือ ผลจากแรงกระทำภายนอก ในการเผาไหม้ของถ่านหินสมมุติว่าแรงที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของความดัน แรงโน้มถ่วง และผลของ Magnus มีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ (Rizvi, 1985) [32] ดังนั้นแรงจุดอาจจะเขียนได้ดังนี้ (Wallis, 1969) [35]

$$F_d = C_D \rho \frac{A_p}{2} (\tilde{U}_g - \tilde{U}_p) |\tilde{U}_g - \tilde{U}_p| \quad (3.108)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad C_D = (1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687}) \frac{\text{Re}_p}{24} \quad (3.109)$$

\tilde{U}_g คือค่าความเร็วที่เวลาเฉลี่ยของก๊าซ \tilde{U}_p คือค่าความเร็วที่เวลาเฉลี่ยของอนุภาค A_p คือพื้นที่หน้าตัดของอนุภาค ρ คือค่าความหนาแน่นของก๊าซ C_D คือสัมประสิทธิ์แรงจุด และ Re_p คือ ค่า Reynolds number ของอนุภาคกำหนดโดย

$$\text{Re}_p = \frac{\rho |\tilde{U}_g - \tilde{U}_p| d_p}{\mu} \quad (3.110)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง μ คือความหนืดของก๊าซ และ d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค สมการสำหรับสมดุลของโมเมนตัมอาจจะเขียนในรูปพิกัดทรงกระบอกได้ดังนี้

$$\text{ทิศทางการตามแนวแกน : } \frac{d\tilde{u}_p}{dt} = -\alpha (\tilde{u}_p - \tilde{u}_g) \quad (3.111)$$

$$\text{ทิศทางการตามแนวรัศมี : } \frac{d\tilde{v}_p}{dt} = -\alpha (\tilde{v}_p - \tilde{v}_g) + \frac{\tilde{w}_p^2}{r_p} \quad (3.112)$$

$$\text{ทิศทางการตามแนวเชิงมุม : } \frac{d\tilde{w}_p}{dt} = -\alpha (\tilde{w}_p - \tilde{w}_g) + \frac{\tilde{v}_p \tilde{w}_p}{r_p} \quad (3.113)$$

ซึ่ง $\alpha = \frac{18\mu C_d Re_p}{24\rho_p d_p^2}$ และ r_p คือระยะทางจากแกนสมมาตรของอนุภาค

จากที่กล่าวมาข้างต้นคือสมการสมดุลโมเมนตัมที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค สำหรับการแพร่กระจายตัวของอนุภาคที่เกิดจากความปั่นป่วนนั้นในส่วนของไหลสามารถทำนายได้โดยใช้แบบจำลองการติดตามแบบสุ่ม (Random Walk) ซึ่งแบบจำลองนี้ได้รวมผลกระทบของความผันผวนความเร็วที่ปั่นป่วนอย่างฉับพลันบนเส้นทางเดินของอนุภาค และได้ใช้หลักการเชิงสถิติในการกำหนดลักษณะของการกระจายของกลุ่มหมอกอนุภาคที่กระจายอยู่รอบๆ เส้นทางเดินเฉลี่ย ความเข้มข้นของอนุภาคภายในกลุ่มหมอกแสดงได้โดย Gaussian probability density function (PDF) รอบๆ เส้นทางเดินเฉลี่ย สำหรับแบบจำลองทางเดินของอนุภาคแบบสุ่ม จะมีเฉพาะการคำนวณการเกิดขึ้นหรือสลายตัวของความปั่นป่วนในเฟสต่อเนื่อง

การติดตามแบบสุ่ม

เมื่อการไหลเป็นแบบปั่นป่วน จะต้องทำการคำนวณเส้นทางเดินของอนุภาคโดยใช้ความเร็วของไหลเฉลี่ย \bar{u} ในสมการเส้นทางเดิน (สมการ 3.107) ซึ่งจะรวมค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของความเร็วของแก๊สที่ผันผวน (u') ไว้ด้วยเพื่อที่จะทำนายการแพร่กระจายของอนุภาคอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.114)$$

ในวิธีการติดตามแบบสุ่ม โปรแกรมได้ทำนายการแพร่กระจายของความปั่นป่วนของอนุภาคโดยการอินทิเกรตสมการเส้นทางเดินสำหรับแต่ละอนุภาค โดยใช้ความเร็วของไหลฉับพลัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\bar{u} + u'(t)$ โดยอินทิเกรตตลอดทั้งเส้นทางเดินของอนุภาค ผลกระทบแบบสุ่มของความปั่นป่วนที่มีต่อการแพร่กระจายของอนุภาคที่เกิดขึ้นก็สามารถนำมารวมไว้ใน การคำนวณได้

ช่วงเวลาของการอยู่ในกระแสหมุนวน

การทำนายการกระจายของอนุภาคจะใช้ช่วงเวลา T ซึ่งหมายถึงเวลาที่ใช้ในขณะอยู่ในความปั่นป่วนในระยะทาง ds

$$T = \int_0^\infty \frac{u'_p(t)u'_p(t+s)}{u_p'^2} ds \quad (3.115)$$

ช่วงเวลาดังกล่าวเป็นส่วนโดยตรงต่ออัตราการฟุ้งกระจายของอนุภาค เมื่อคาบเวลาที่มีค่ามาก แสดงถึงความปั่นป่วนในการไหลที่มากขึ้น ซึ่งสามารถแสดงการฟุ้งกระจายของอนุภาคได้ในพจน์ $\overline{u'_p T}$ สำหรับอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเคลื่อนที่ไปกับของไหล (ความเร็วลื่นไหลเป็นศูนย์) จะกลายเป็นเวลาลากริง (Lagrangian) ของของไหล T_L โดยช่วงเวลาตามนิยามสามารถประมาณได้ดังนี้

$$T_L = C_L \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.116)$$

ซึ่ง C_L ต้องถูกกำหนดเนื่องจากเป็นตัวแปรไม่ทราบค่าชัดเจน โดยการจับคู่กับการฟุ้งกระจายของอนุภาคขนาดเล็กที่มีปริมาณน้อย $\overline{u'_p T_L}$ กับอัตราการฟุ้งกระจายที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน v_t / σ เราจะได้

$$T_L \approx 0.15 \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.117)$$

เมื่อใช้ร่วมกับแบบจำลอง $k - \varepsilon$ และแบบจำลองที่อยู่ในกลุ่มนี้ ในขณะที่ค่า T_L หาได้จาก

$$T_L \approx 0.30 \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.118)$$

การอินทิเกรตสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค

สมการเส้นโคจรและสมการองค์ประกอบใดๆ ที่อธิบายถึงการถ่ายเทความร้อนหรือมวลไปยัง

อนุภาค คำนวณได้โดยการอินทิเกรตช่วงเวลาตลอดทั้งช่วงเวลาที่ไม่มีต่อเนื่อง ซึ่งการอินทิเกรตของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาในสมการ (3.107) จะทำให้ได้ความเร็วอนุภาคที่แต่ละจุดตลอดเส้นทางโคจร โดยเส้นทางโคจรสามารถทำนายได้โดย

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (3.119)$$

สมการ (3.107) และ (3.119) เป็นชุดของสมการอนุพันธ์ปกติ และสมการ (3.107) สามารถแทนลงในแบบฟอร์มโดยทั่วไปดังต่อไปนี้

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (u - u_p) + a \quad (3.120)$$

ซึ่งพจน์ a รวมความเร่งเนื่องมาจากแรงอื่นๆ ทั้งหมดยกเว้นแรงดูด

ในส่วนนี้ที่สามารถแก้สำหรับค่าคงที่ u , a และ τ_p โดยใช้การอินทิเกรตวิเคราะห์ สำหรับความเร็วอนุภาคที่ตำแหน่งใหม่ u_p^{n+1} จะได้

$$u_p^{n+1} = u^n + e^{-\frac{\Delta t}{\tau_p}} (u_p^n - u^n) - a\tau_p \left(e^{-\frac{\Delta t}{\tau_p}} - 1 \right) \quad (3.121)$$

ตำแหน่งใหม่ x_p^{n+1} สามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกันดังต่อไปนี้

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \Delta t \left(u^n + a\tau_p \right) + \tau_p \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_p}} \right) (u_p^n - u^n - a\tau_p) \quad (3.122)$$

ในสมการนี้ u_p^n และ u^n แสดงถึงความเร็วของอนุภาคและความเร็วของไหลที่ตำแหน่งเก่า สมการ (3.121) และ (3.122) ใช้เมื่อวิเคราะห์แบบแผนการแยกตัว ชุดของสมการ (3.107) และสมการ (3.119) สามารถแก้ได้โดยใช้วิธีการ Discretization เมื่อใช้ร่วมกับการแยกตัวของ Euler กับสมการ (3.120) จะได้

$$u_p^{n+1} = \frac{u_p^n + \Delta t \left(a + \frac{u^n}{\tau_p} \right)}{1 + \frac{\Delta t}{\tau_p}} \quad (3.123)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำวิธีมาประยุกต์กับ trapezoidal discretization กับสมการ (3.120) ตัวแปร u_p และ u_n บนด้านขวาจะเป็นค่าเฉลี่ย ขณะที่ความเร่ง a อันเนื่องมาจากแรงอื่นๆ ถูกกำหนดให้คงที่ในช่วงเวลา จะได้

$$\frac{u_p^{n+1} - u_p^n}{\Delta t} = \frac{1}{\tau_p} (u^* - u_p^*) + a^n \quad (3.124)$$

ค่าเฉลี่ย u_p^* และ u^* คำนวณจาก

$$u_p^* = \frac{1}{2} (u_p^n + u_p^{n+1}) \quad (3.125)$$

$$u^* = \frac{1}{2} (u^n + u^{n+1}) \quad (3.126)$$

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t u_p^n \cdot \nabla u^n \quad (3.127)$$

ความเร็วอนุภาคที่ตำแหน่งใหม่ $n+1$ คำนวณโดย

$$u_p^{n+1} = \frac{u_p^n \left(\left(1 - \frac{\Delta t}{2\tau_p} \right) \left(u^n + \frac{1}{2} \Delta t u_p^n \cdot \nabla u^n \right) + \Delta t a \right)}{1 + \frac{\Delta t}{2\tau_p}} \quad (3.128)$$

สำหรับ implicit และ trapezoidal scheme ตำแหน่งอนุภาคใหม่คำนวณโดย trapezoidal discretization ของสมการ (3.119) โดยตลอด จะได้

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \frac{1}{2} \Delta t (u^n + u_p^{n+1}) \quad (3.129)$$

สมการ (3.119) และ (3.120) สามารถคำนวณโดยใช้แบบแผน Runge-Kutta ซึ่งเผยแพร่โดย Cash and Karp [36] สมการอนุพันธ์สามารถพิจารณาแบบเวกเตอร์ได้ ซึ่งทางด้านซ้ายมือของอนุพันธ์ \dot{y} และทางด้านขวามือเป็นอาบิทารีฟังก์ชัน $\vec{f}(t, \vec{y})$

$$\dot{y} = \vec{f}(t, \vec{y}) \quad (3.130)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จะได้} \quad \bar{y}^{n+1} = \bar{y}^n + c_1 \bar{k}_1 + c_2 \bar{k}_2 + c_3 \bar{k}_3 + c_4 \bar{k}_4 + c_5 \bar{k}_5 + c_6 \bar{k}_6 \quad (3.131)$$

$$\text{กับ } \bar{k}_1 = \Delta t \bar{f}(t, \bar{y}^n)$$

$$\bar{k}_2 = \Delta t \bar{f}(t + a_2 \Delta t, \bar{y}^n + b_{21} \bar{k}_1)$$

$$\bar{k}_3 = \Delta t \bar{f}(t + a_3 \Delta t, \bar{y}^n + b_{31} \bar{k}_1 + b_{32} \bar{k}_2)$$

$$\bar{k}_4 = \Delta t \bar{f}(t + a_4 \Delta t, \bar{y}^n + b_{41} \bar{k}_1 + b_{42} \bar{k}_2 + b_{43} \bar{k}_3)$$

$$\bar{k}_5 = \Delta t \bar{f}(t + a_5 \Delta t, \bar{y}^n + b_{51} \bar{k}_1 + b_{52} \bar{k}_2 + b_{53} \bar{k}_3 + b_{54} \bar{k}_4)$$

$$\bar{k}_6 = \Delta t \bar{f}(t + a_6 \Delta t, \bar{y}^n + b_{61} \bar{k}_1 + b_{62} \bar{k}_2 + b_{63} \bar{k}_3 + b_{64} \bar{k}_4 + b_{65} \bar{k}_5)$$

สัมประสิทธิ์ $a_2 \dots a_6$, $b_{21} \dots b_{65}$ และ $c_1 \dots c_6$ ได้มาจาก Cash and Karp [36]

3.9.3.2 สมการอนุรักษ์พลังงาน

การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนภายในอนุภาคมาจากการการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคและความร้อนที่เกิดขึ้นหรือถูกใช้ไประหว่างการเผาไหม้ของซาร์ ความร้อนที่ปล่อยออกมาพร้อมกับการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการเผาไหม้ของซาร์และความร้อนของการระเหยในระหว่างกระบวนการปล่อยสารระเหย ในทางเทอร์โมไดนามิกส์สามารถเขียนสมการได้ดังนี้ [19]

$$\frac{d(m_p c_p T_p)}{dt} = m_p \dot{Q}_t - c_p T_p \left(-\frac{dm_p}{dt} \right) - L_v \frac{dm_p}{dt} \quad (3.132)$$

ซึ่ง

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_{convec.} + \dot{Q}_{rad.} + \dot{Q}_{comb.}$$

L_v คือ ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นแก๊สของถ่านหิน (kJ/kmol)

c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอนุภาค (kJ/kmol-K)

T_p คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ของอนุภาค (K)

สมการถ่ายเทความร้อนโดยการพา

$$\dot{Q}_{convec.} = \frac{\pi d_p^2 h_{tran} (T_g - T_p)}{m_p} \quad (3.133)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค, m_p คือมวลของอนุภาค และ h_{tran} คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนให้เท่ากับ

$$h = Nu \frac{k_g}{d_p} \quad (3.134)$$

ซึ่ง
$$Nu = 2.0 + 0.6Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (3.135)$$

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแก๊ส k_g ซึ่งแนะนำโดย Baum and Street (1971) [37] เขียนได้ดังนี้

$$k_g = 6.379 \times 10^{-5} T_g + 6.446 \times 10^{-3} \quad (3.136)$$

สมการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี
สมมุติให้การแผ่รังสีเท่ากับการดูดกลืนรังสี และอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลม สมการการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการแผ่รังสี สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{rad} = \pi \sigma \epsilon_p \frac{d_p^2}{m_p} (T_R^4 - T_p^4) \quad (3.137)$$

ซึ่ง σ คือค่าคงที่ของ Stefan-Boltzman เท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} J/m^2 s K^4$, ϵ_p คือสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของพื้นผิวอนุภาค, T_p คือ อุณหภูมิของอนุภาค และ T_R อุณหภูมิจากการแผ่รังสี

ความร้อนจากการเผาไหม้ของซาร์

H_C คือค่าความร้อนของคาร์บอนภายในซาร์ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{comb} = \frac{\eta H_C}{m_p} \left(-\frac{dm_p}{dt} \right) \quad (3.138)$$

ซึ่ง η คือ สัดส่วนของความร้อนที่ถูกดูดซึมเนื่องจากอนุภาค ซึ่งจะเห็นได้ว่าความร้อนที่อนุภาคปล่อยสู่แก๊สรอบข้างเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเคมี, Field et al., 1968 [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.3 แบบจำลอง Discrete Ordinates (DO)

แบบจำลอง DO จะคำนวณสมการถ่ายโอนรังสี (Radiative Transfer Equation หรือ RTE) ในทิศทาง \vec{s} ของสนามของสมการ ดังนั้นสมการสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') d\Omega' \quad (3.139)$$

ซึ่ง \vec{r} = เวกเตอร์ตำแหน่ง

\vec{s} = เวกเตอร์ทิศทาง

\vec{s}' = เวกเตอร์ทิศทางการกระจาย

a = สัมประสิทธิ์ดูดซับ (Gray Gas Assumption)

n = ดัชนีการสะท้อน

σ_s = สัมประสิทธิ์การกระเจิง

I = ความเข้มข้นของการแผ่รังสี ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่ง (\vec{r}) และทิศทาง (\vec{s})

T = อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนั้นๆ

Ω' = มุม Solid Angle

การเชื่อมกันระหว่างสมการพลังงานกับแบบจำลอง DO เป็นเทคนิคการหาคำตอบที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างพลังงานและความเข้มข้นการแผ่รังสีที่เซลล์ (รู้จักกันในนาม COMET) [27] จะช่วยเร่งการเข้าสู่ของ FVS (Finite Volume Scheme) ในการแผ่รังสีถ่ายเทความร้อน วิธีนี้ให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นสำหรับการคำนวณที่มีความหนาของลำแสงมากกว่า 10 โดยส่วนมากจะพบได้ในการหลอมแก้ว ซึ่งความได้เปรียบของแบบจำลองนี้จะเกิดขึ้นเมื่อการกระเจิงเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดลักษณะเช่นนี้ ส่งผลให้ความเชื่อมโยงระหว่างความเข้มข้นของรังสีในทิศทางใดๆต่อความเข้มข้นของรังสีในทิศทางอื่นมีค่าสูง โดยสมการพลังงานสำหรับวิธีคำนวณแบบขั้นต่อกันแสดงไว้ด้านล่างนี้

สมการพลังงานที่ (3.140) ได้จากการอินทิเกรตตลอดทั้งปริมาตรควบคุม i ทำให้ได้สมการพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องดังนี้

$$\sum_{j=1}^N \mu_{ij}^T T_j - \beta_i^T - \alpha_i^T \sum_{k=1}^L I_i^k \omega_k - S_i^T S_i^h \quad (3.140)$$

ซึ่ง $\alpha_i^T = k\Delta V$

$\beta_i^T = 16k\sigma T_i^{*3} \Delta V_i$

$S_i^T = 12k\sigma T_i^{*4} \Delta V_i$

k = สัมประสิทธิ์การดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta V =$ ปริมาตรควบคุม

สัมประสิทธิ์ μ_{ij}^T และพจน์แหล่งกำเนิด S_i^h เกิดจากการทำการแปลงรูป (Discretization) ของพจน์การพาและพจน์การฟุ้งกระจาย รวมถึงพจน์อื่นนอกเหนือจากการแผ่รังสี

ทำการรวมสมการแปลงรูปแล้ว (Discretized form) ของสมการ RTE (3.139) และสมการพลังงาน เข้าด้วยกัน จะทำให้ได้สมการ (3.141) ดังนี้ [39]

$$\vec{P}_i \vec{q}_i + \vec{r}_i = 0 \quad (3.141)$$

$$\vec{q}_i = \begin{bmatrix} I_i^1 \\ I_i^2 \\ \vdots \\ I_i^L \\ T_i \end{bmatrix} \quad (3.142)$$

$$\vec{P}_i = \begin{bmatrix} M_{ii}^1 + \eta_i^{11} + \gamma_i^1 \omega_1 & \eta_i^{12} + \gamma_i^1 \omega_2 & \dots & \beta_i^1 \\ \eta_i^{21} + \gamma_i^2 \omega_1 & M_{ii}^2 + \eta_i^{22} + \gamma_i^2 \omega_2 & \dots & \beta_i^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\alpha_i^T \omega_1 & -\alpha_i^T \omega_2 & \dots & M_{ii}^T \end{bmatrix} \quad (3.143)$$

$$\vec{r}_i = \begin{bmatrix} \sum_{j=1, j \neq i}^N \mu_{ij}^l I_j^l - S_i^l - S_i^B \\ \vdots \\ \sum_{j=1, j \neq i}^N \mu_{ij}^y I_j^l - S_i^T - S_i^h \end{bmatrix} \quad (3.144)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.3 สมการ Species Transport [5]

เมื่อเราเลือกสมการที่จะแก้ไขปัญหสมการอนุพันธ์ทางเคมี การคำนวณของโปรแกรมจะทำนาย mass fraction ของแต่ละสปีชีส์ ซึ่งสปีชีส์ Y_i ทั้งหมดถูกคำนวณโดยสมการของการพาและการแพร่จากสปีชีส์ i สมการอนุพันธ์นี้จะใช้ในลักษณะดังต่อไปนี้ เมื่อ Y_i คือ \emptyset จากสมการที่ (3.82)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (3.145)$$

เมื่อ R_i คืออัตราสุทธิของการผลิตโดยสปีชีส์ i ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทางเคมี และ S_i คืออัตราของการก่อตัวโดยการเพิ่มขึ้นของกระจายตัวจากแหล่งอื่นๆ สมการในรูปแบบนี้จะทำการแก้ไขปัญหาคณิตศาสตร์ของ $N-1$ เมื่อ N คือตัวเลขทั้งหมดของสถานะของไหลทางเคมี เนื่องจาก mass fraction ของสารเคมีในแต่ละชนิดต้องมีผลรวมเท่ากับ 1 โดยที่ mass fraction N_{th} ถูกกำหนดให้เท่ากับหนึ่งลบด้วยผลรวมของ $N-1$ สำหรับการหาคำตอบ เพื่อที่จะลดข้อผิดพลาดจากการคำนวณ

\bar{J}_i คือฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์ i ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากเกรเดียนต์ของความเข้มข้นและอุณหภูมิ โดยค่าเริ่มต้นของโปรแกรมใช้การประมาณโดยเริ่มจากน้อยๆก่อนในรูปแบบของการแพร่อื่นเนื่องมาจากเกรเดียนต์ของความเข้มข้น ซึ่งสมการฟลักซ์ของการแพร่สามารถเขียนโดย

$$\bar{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (3.146)$$

เมื่อ $D_{i,m}$ คือค่าสัมประสิทธิ์เชิงมวลสำหรับสปีชีส์ i จากการผสมผสานกัน และ $D_{T,i}$ คือสัมประสิทธิ์เชิงความร้อนจากการแพร่

ในการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) จำนวนจากการแพร่เชิงมวลตั้งสมการ

$$\bar{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i}\right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (3.147)$$

เมื่อ Sc_i คือ turbulent Schmidt number ($\frac{\mu_t}{\rho D_i}$ เมื่อ μ_t คือความหนืดของการปั่นป่วน และ D_i คือการแพร่กระจายของความปั่นป่วน) ค่าเริ่มต้นสำหรับ Sc_i เท่ากับ 0.7 อันเนื่องจากการแพร่กระจายของความปั่นป่วนโดยทั่วไปจะครอบคลุมการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) และรายละเอียดของคุณสมบัติการแพร่สำหรับการไหลแบบราบเรียบในการไหลแบบปั่นป่วนโดยทั่วไปนั้นน้อยมากและสามารถละทิ้งได้

ในสมการพลังงานของ species transport สามารถอธิบายได้ว่ามันคือ องค์ประกอบของการไหลแบบผสมผสานในการแพร่ของสปีชีส์และเอนทัลปี คำนวณได้จากสมการ

$$\nabla \cdot \left[\sum_{i=1}^n h_i \bar{J}_i \right] \quad (3.148)$$

โดยทั่วไปเอนทัลปีไม่ควรที่จะตัดทิ้งในการคำนวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ในสมการ Lewis number ซึ่งใช้สำหรับการนำความร้อน

$$Le_i = \frac{k}{\rho c_p D_{i,m}} \quad (3.149)$$

3.9.4 The Generalized Finite-Rate Formulation for Reaction Modeling [5]

อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ได้จากแหล่งอื่นๆถูกคำนวณโดยสมการที่ (3.145) แต่สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนจะถูกคำนวณโดย 3 ลักษณะดังต่อไปนี้

- Laminar finite-rate model: ผลกระทบของการไหลแบบปั่นป่วนจะไม่ถูกคำนวณและอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกคำนวณโดยการเคลื่อนที่แบบจลนศาสตร์ Arrhenius
- Eddy-dissipation model: อัตราการเกิดปฏิกิริยาสมมติให้ถูกควบคุมโดยปั่นป่วน โดยที่การคำนวณแบบจลนศาสตร์เคมี Arrhenius นั้นมีความซับซ้อนมาก แบบจำลองนี้จะคำนวณในลักษณะที่ไม่ซับซ้อนแต่ได้ผลการจำลองออกมาใกล้เคียงความเป็นจริง โดยที่ใช้กลไกในการคำนวณการปลดปล่อยความร้อนเพียงหนึ่งหรือสองระดับเท่านั้น
- Eddy-dissipation-concept (EDC) model: รายละเอียดการคำนวณแบบจลนศาสตร์เคมี Arrhenius สามารถที่นำมารวมกันในการปั่นป่วน โดยที่การคำนวณแบบจลนศาสตร์เคมีถูกใช้สำหรับแบบจำลองที่มีความซับซ้อนกันอย่างมาก

โดยลักษณะทั่วไปของแบบจำลอง finite-rate เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยาของการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน รวมไปถึงการเผาไหม้แบบ premixed และ non-premixed หรือ partially-premixed flames

Eddy-dissipation model [29]

มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลากหลายที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับการเผาไหม้ของแก๊ส หนึ่งในแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับพอสมควรสำหรับการเผาไหม้สารระเหยที่ปลดปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิงแข็ง คือ แบบจำลองที่เชื่อมโยงอัตราการเกิดปฏิกิริยากับอัตราการสลายตัวของกระแส

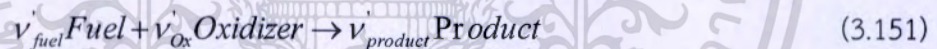
ปั่นป่วน เรียกว่า Eddy-Dissipation Model แนวคิดนี้สอดคล้องกับลักษณะการเข้าทำปฏิกิริยาของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารระเหยกับออกซิเจนในอากาศ ด้วยเหตุที่สารระเหยไม่ได้ถูกผสมกับอากาศมาก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงถูกควบคุมด้วยอัตราการผสมกันของออกซิเจน เชื้อเพลิงและก๊าซร้อน ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ โดยมีสมมติฐานเพิ่มเติมคือเชื้อเพลิงจะเผาไหม้อย่างรวดเร็วมากเมื่อเทียบกับอัตราการผสมกันด้วยความปั่นป่วน (Fast kinetic assumption)

$$R_i = v_i' MW_i A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_{Fuel}}{v_{Fuel}' MW_{Fuel}}, \frac{Y_{Ox}}{v_{Ox}' MW_{Ox}}, B \frac{Y_{Product}}{v_{product}'' MW_{product}} \right) \quad (3.150)$$

เมื่อ i คือ ดรรชนีจำแนกสปีชีส์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเผาไหม้

จากโครงสร้างของสมการจะเห็นว่าอัตราการผลิตหรือสูญหายของสปีชีส์แต่ละชนิด จะเชื่อมโยงอยู่กับอัตราการสูญสลายของกระแสนปั่นป่วน $\frac{\varepsilon}{k}$ ด้วยค่าคงที่ A แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับว่าในตำแหน่งดังกล่าวจะมีความเข้มข้นของเชื้อเพลิง สสารที่เข้าทำปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์ อยู่มากน้อยเพียงใด ซึ่งปริมาณดังกล่าวเชื่อมโยงอยู่กับอัตราส่วนเชิงมวล Y_{Fuel} , Y_{Ox} และ $Y_{Product}$ ตามลำดับ ทั้งนี้ อัตราส่วนผสมพอดี ระหว่างเชื้อเพลิง สสารที่เข้าทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ สามารถแสดงได้ด้วยสมการมวลสารสัมพันธ์ คือ

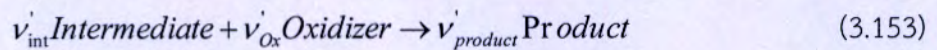
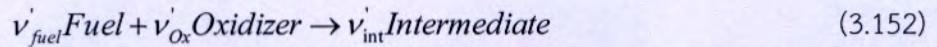


ในบริเวณที่มีอัตราส่วนผสมพอดี ค่าทั้งสามที่อยู่ในวงเล็บจะมีสัดส่วนที่เท่ากัน (หากค่าคงที่ B เท่ากับ 1) ในบริเวณที่ส่วนผสมหนา (Fuel rich) อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกควบคุมด้วยปริมาณอากาศ (ในที่นี้คือ Oxidizer) เนื่องจากเทอมที่สองจะเป็นค่าที่ต่ำสุด ในบริเวณที่ส่วนผสมบาง (Fuel lean) อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกควบคุมด้วยปริมาณเชื้อเพลิง เนื่องจากเทอมแรกจะเป็นค่าที่ต่ำสุด นอกจากนี้ อัตราการเกิดปฏิกิริยายังถูกควบคุมด้วยผลิตภัณฑ์ที่มีความร้อนจากปฏิกิริยาแฝงอยู่ ซึ่งจะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นที่อยู่ในบริเวณนั้น อิทธิพลของปริมาณผลิตภัณฑ์ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาถูกเชื่อมโยงกันด้วยค่าพารามิเตอร์ B ที่หาได้จากการปรับแต่งระหว่างการเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับผลการทดลอง

ในกรณีที่เราให้ความสนใจการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศที่มีการก่อกำเนิดของสปีชีส์ระหว่างการเกิดปฏิกิริยา (Intermediate species) ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และต่อมาจึงเกิดการเผาไหม้ของก๊าซนี้ไปสู่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งเรียกรวมกันว่า ผลิตภัณฑ์ในที่สุด สมมุติฐานที่ว่าอัตราจลนของการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงกว่าอัตราการผสมกันระหว่างสารตั้งต้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยายังสามารถใช้ได้อยู่ ดังนั้น เราจะพิจารณากระบวนการเผาไหม้ในเนื้อก๊าซเป็นสอง ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังนี้



ทั้งนี้ อัตราการผลิต และอัตราการบริโภคของสารที่เกี่ยวข้องกันในแต่ละปฏิกิริยา ก็จะสามารถเขียนได้ด้วยโครงสร้างสมการที่คล้ายกัน ดังนี้

$$R_i = v'_i MW_i A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_{Fuel}}{v'_{Fuel} MW_{Fuel}}, \frac{Y_{Ox}}{v'_{Ox} MW_{Ox}}, B \frac{Y_{int}}{v'_{int} MW_{int}} \right) \quad (3.154)$$

เมื่อ i คือตัวบ่งชี้ ว่าเป็น Fuel , Oxidizer หรือ Intermediate species

$$R_i = v'_i MW_i A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_{int}}{v'_{int} MW_{int}}, \frac{Y_{Ox}}{v'_{Ox} MW_{Ox}}, B \frac{Y_{product}}{v'_{product} MW_{product}} \right) \quad (3.155)$$

เมื่อ i คือตัวบ่งชี้ ว่าเป็น Intermediate species , Oxidizer หรือ Product

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาเพื่ออธิบายการเผาไหม้ในเนื้อก๊าซนั้นมีอยู่หลากหลาย ผู้อ่านควรพิจารณาให้รอบคอบในการเลือกใช้ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับบริบทที่ต้องการทำการการศึกษา สำหรับแบบจำลองที่คัดสรรมาอธิบายในหัวข้อนี้ อยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าเชื้อเพลิงกับอากาศไม่ได้ผสมกันมาก่อนการเผาไหม้ (Non-premixed combustion) เพราะหากนำไปใช้ในการจำลองการเผาไหม้ของปัญหาที่มีการผสมก่อนการเผาไหม้ (Premixed combustion) ก็จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้อง

บทที่ 4

อุปกรณ์ การคำนวณ และออกแบบการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ต่างๆและระบบทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองเพื่อพิสูจน์สมมุติฐาน และการคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นไป การกำหนดขอบเขต ออกแบบ การทดลอง รวมไปถึงการปรับปรุงอุปกรณ์บางอุปกรณ์ เพื่อให้ตอบสนองด้านความสะดวกและประสิทธิภาพในการทดลอง

4.1 อุปกรณ์การทดลองและรายละเอียด

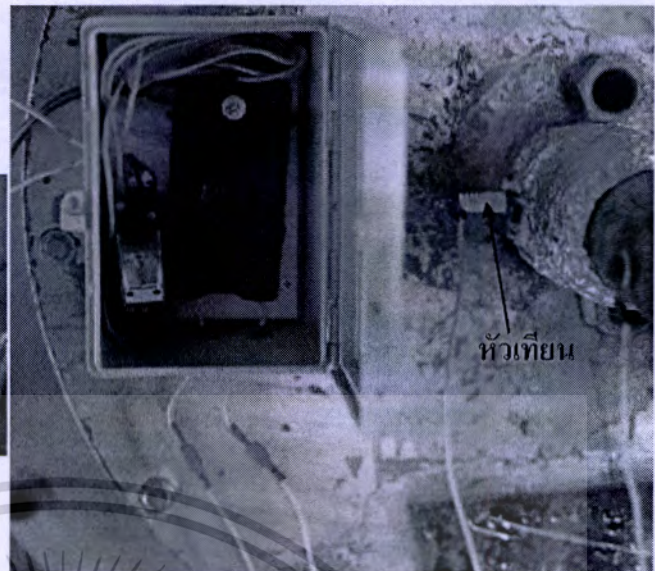
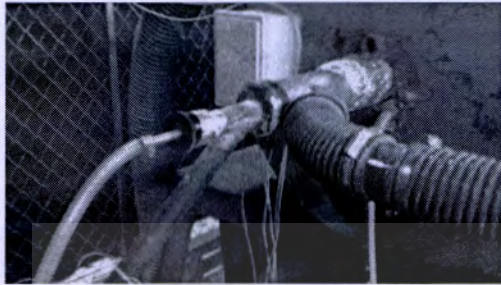
4.1.1 อุปกรณ์การทดลองเชิงโครงสร้าง



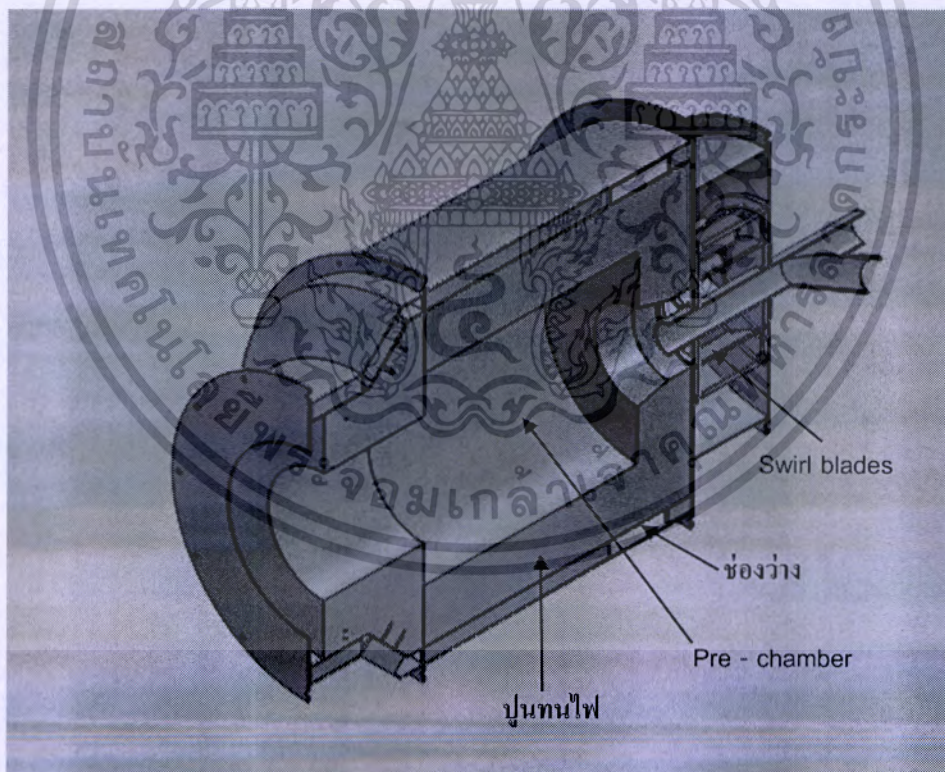
รูปที่ 4.1 รายละเอียดภายนอกและภาพถ่ายของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น

จากรูปที่ 4.1 โดยภาพรวมแล้วภายนอกหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นจะประกอบด้วย (1.) ส่วนของท่อทางเข้าของชีวมวลฝุ่น ซึ่งชีวมวลฝุ่นภายในท่อจะถูกเหนี่ยวนำให้ไหลมาโดยอากาศปฐมภูมิ (Primary air) ต่อมาคือ (2.) ส่วนนี้มีไว้สำหรับใช้ในตอนที่ผู้ทดลองทำการอุ่นระบบ ซึ่งก็คือท่อสำหรับใส่หัวแก๊ส LPG นั่นเอง โดยหัวแก๊ส LPG จะถูกเสียบเข้าไปในท่อนี้ในแนวแกนกลาง และมีการติดตั้งหัวเทียนสำหรับจุดแก๊ส LPG ให้ติดไฟก่อนทำการอุ่นระบบสังเกตได้ในรูปที่ 4.2 (3.) ท่อทางเข้าของอากาศทุติยภูมิ (Secondary air) ซึ่งจะติดต่อกับ Swirl blade chamber (4.) คือท่อที่ติดอยู่กับผิวภายนอกของหัวเผา และท่อนี้คือท่อทางเข้าของอากาศตติยภูมิ (Tertiary air)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของการติดตั้งหัวแก๊ส LPG (ซ้าย) และหัวเทียนที่ถูกติดตั้งลงไปเพื่อสำหรับใส่หัวแก๊ส LPG (ขวา)



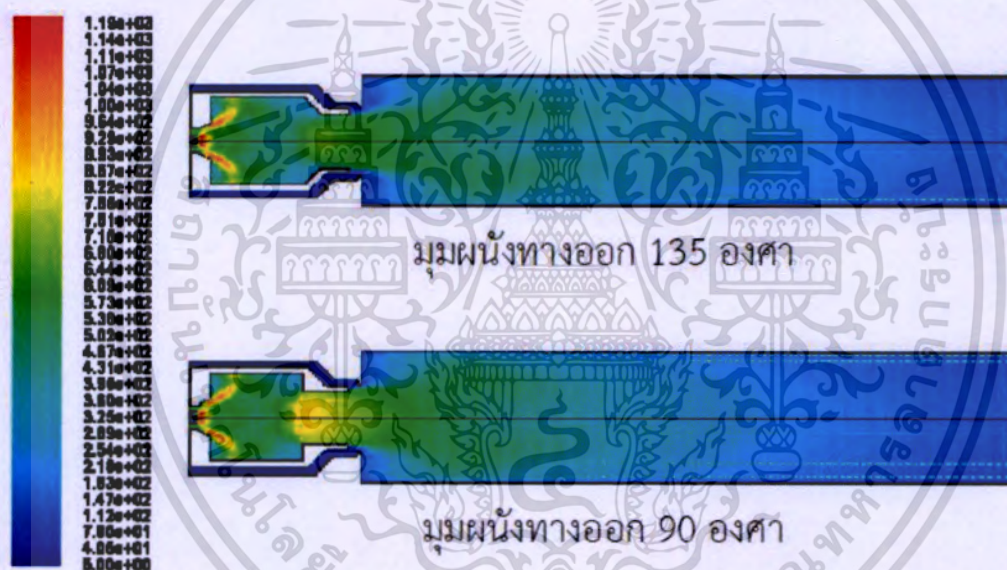
รูปที่ 4.3 แสดงรายละเอียดภายในของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 คือส่วนประกอบภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นจะประกอบไปด้วย Pre-chamber Swirl blades ปูนทนไฟ และช่องว่าง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

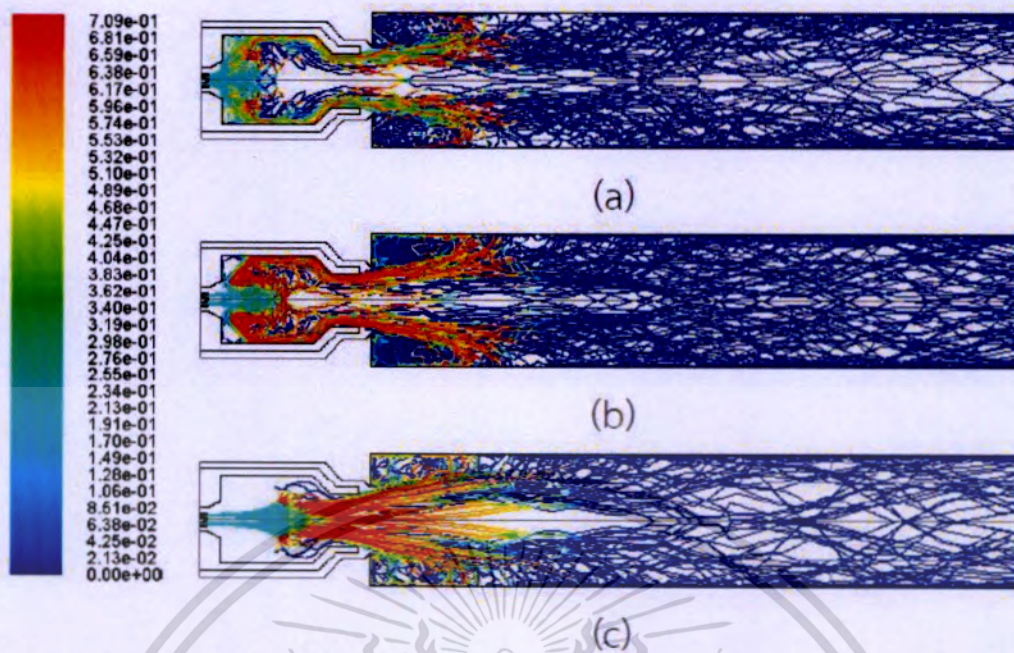
Pre-chamber

การเผาไหม้ของชีวมวลฝุ่นจะเริ่มเกิดขึ้นภายใน Pre-chamber หรือ ห้องเผาไหม้ช่วยนี้ ซึ่งประสิทธิภาพการเผาไหม้ภายใน Pre-chamber จะมีผลอย่างมากกับคุณลักษณะการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้หลัก (Furnace) หรือกับระบบการเผาไหม้รวมทั้งหมด และลักษณะของ Pre-chamber มีส่วนสำคัญมากอย่างมากกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดย นาย ชินภัทร ธุระการ [9] ได้ทำการตรวจสอบเพื่อพิสูจน์แล้วว่าที่มุมผนังทางออกเป็น 90 องศา อนุภาคคาร์จะมีความปั่นป่วนและมีเวลาที่อยู่ใน Pre-chamber เพิ่มมากขึ้น จะทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการเป่าดับ

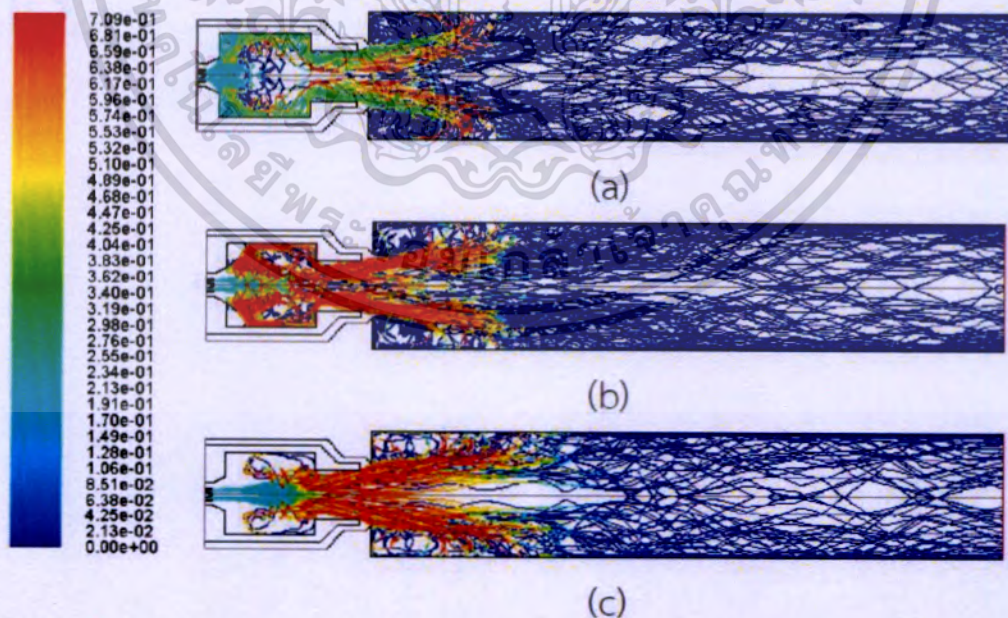


รูปที่ 4.4 แสดงความเข้มข้นของความปั่นป่วนภายใน Pre-chamber และ Furnace สำหรับมุมทางออกที่ต่างกันของ Pre-chamber [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์บอนใน Pre-chamber และ Furnace สำหรับมุมทางออกของ Pre-chamber เป็น 135 องศา โดย (a); 10-30 (b); 40-70 (c); 80-100 ไมครอน [9]



รูปที่ 4.6 แสดงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์บอนใน Pre-chamber และ Furnace สำหรับมุมทางออก

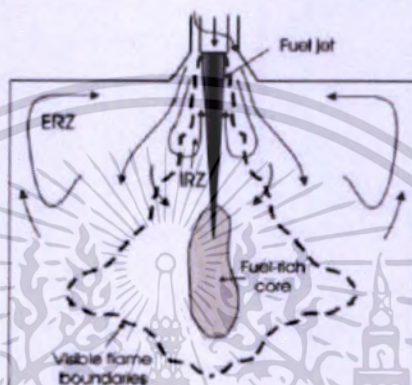
ของ Pre-chamber เป็น 90 องศา โดย (a); 10-30 (b); 40-70 (c); 80-100 ไมครอน [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

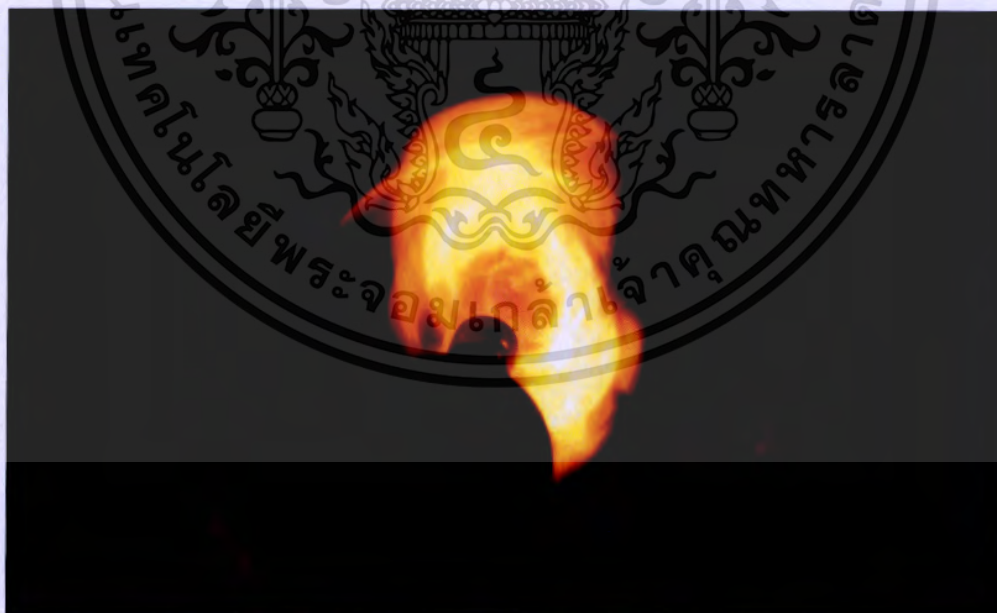
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Swirl blades

Swirl blades หรือใบพัด มีหน้าที่เหนี่ยวนำอากาศทวนที่ไหลผ่านเข้าไปใน Pre-chamber ให้เกิดการหมุนวน ผลก็คือการเกิดกระแสอากาศหมุนวนขึ้นภายใน Pre-chamber ทั้งแบบ กระแสหมุนวนภายใน (Internal recirculation zone; IRZ) และกระแสหมุนวนภายนอก (External recirculation zone; ERZ) แสดงดังรูปที่ 4.7 ปรากฏการณ์นี้จะช่วยให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศและชีวมวลฝุ่นให้ดีขึ้น ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากกับประสิทธิภาพของการเผาไหม้ของระบบ ดังนั้น มุมใบพัดจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเนื่องจากมีผลโดยตรงกับกระแสอากาศหมุนวนใน Pre-chamber

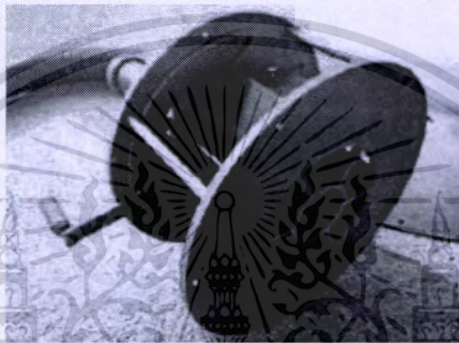
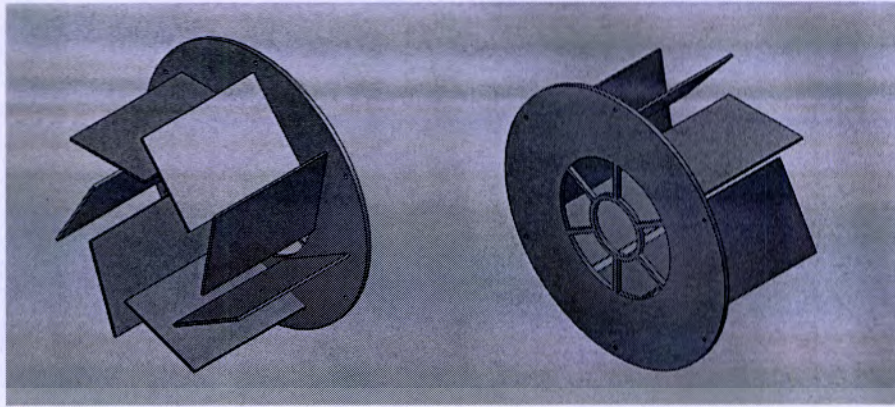


รูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบการเกิดกระแสอากาศหมุนวนภายใน Pre-chamber [40]

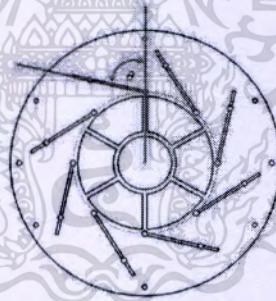


รูปที่ 4.8 แสดงรูปถ่ายจากการทดลองเพื่อยืนยันว่าเกิดกระแสอากาศหมุนวนภายใน Pre-chamber จริง

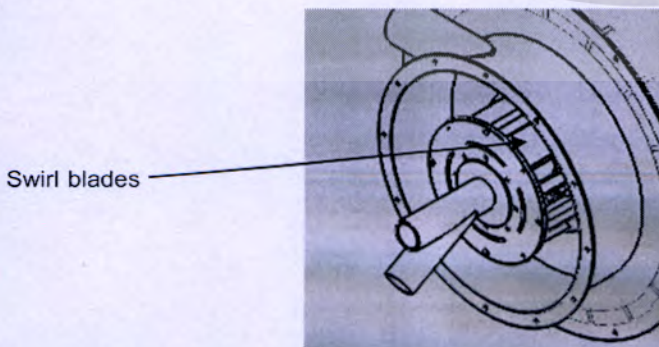
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ลักษณะและภาพถ่ายจริงของใบพัด [9]



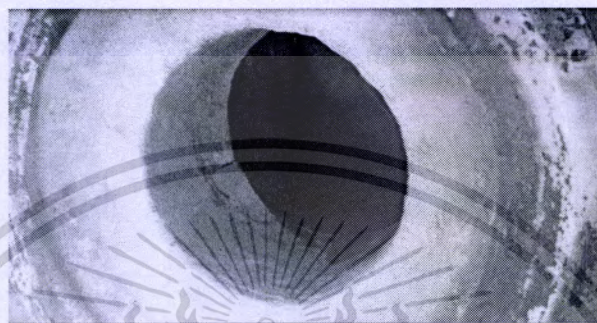
รูปที่ 4.10 การอ้างอิงมุมของใบพัด (ref)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.11 ลักษณะการติดตั้งใบพัดเข้ากับหัวเผาหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปูนทนไฟ

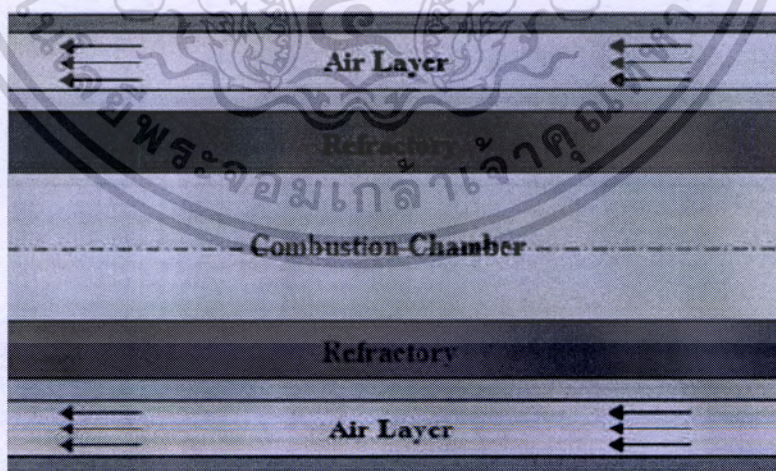
ปูนทนไฟในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นนี้มีบทบาทเป็นผนังของ Pre-chamber ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นผนังดักความร้อนไม่ให้ออกมาสู่ผิวของหัวเผา และมีประโยชน์ที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ มันจะแผ่รังสีความร้อนให้กับกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายใน Pre-chamber ซึ่งสามารถช่วยให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ



รูปที่ 4.12 ลักษณะของปูนทนไฟ ณ บริเวณผนังทางออกของ Pre-chamber

ช่องว่าง

ช่องว่าง (Layer) นี้อยู่ระหว่างปูนทนไฟกับผิวภายนอกของหัวเผานี้ ซึ่งมีไว้สำหรับให้อากาศตติยภูมิไหลผ่านและไหลเข้าไปใน Furnace ณ บริเวณ คอคอดระหว่าง Pre-chamber กับ Furnace เพื่อหล่อเย็นให้ผนังภายนอกของหัวเผาไม่ร้อนจนเกินไป



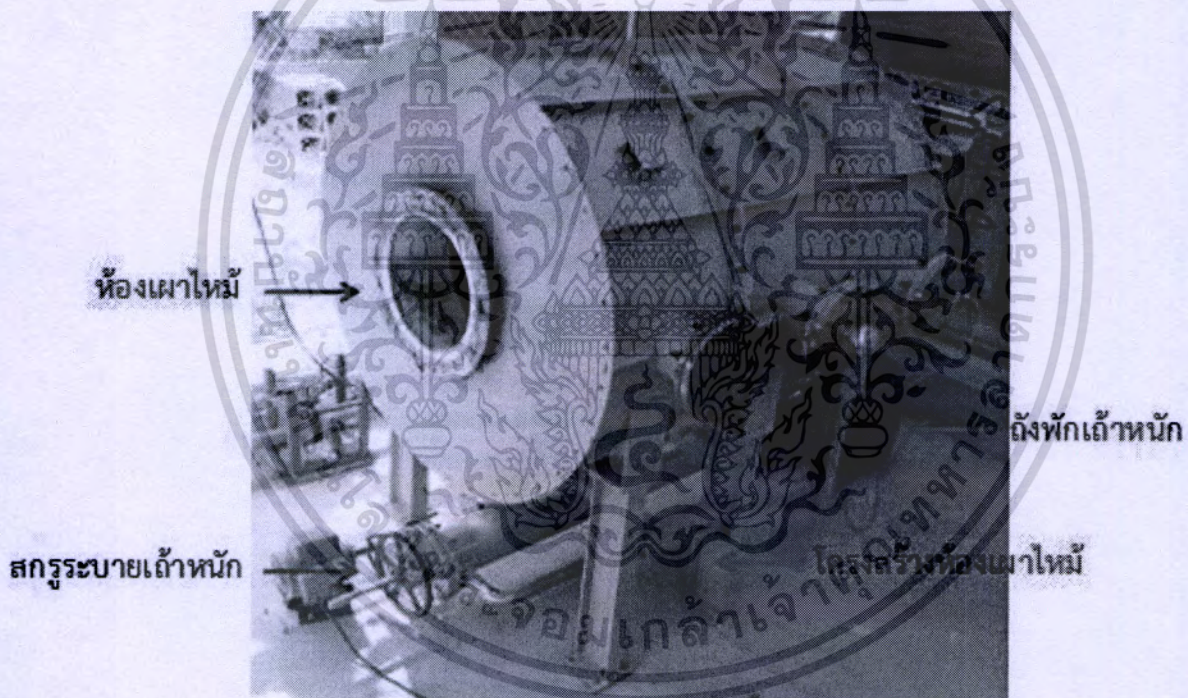
รูปที่ 4.13 ลักษณะการไหลของอากาศตติยภูมิในช่องว่างระหว่างปูนทนไฟกับผิวภายนอกของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นส่วนประกอบของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ต่อมาจะอธิบายถึงส่วนประกอบหรือย่อย ที่นำมาประกอบกับเป็นระบบผลิตความร้อนและใช้ในการทดลอง

ห้องเผาไหม้หลัก

ห้องเผาไหม้หลัก (Furnace) เป็นส่วนประกอบที่อยู่ถัดมาจากหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น ซึ่งผนังของมันจะถูกฉาบไปด้วยปูนทนไฟหนาเช่นเดียวกับผนังของ Pre-chamber ปฏิกริยาการเผาไหม้จะสิ้นสุดลงภายในห้องเผาไหม้หลักนี้ เนื่องจากในห้องเผาไหม้หลักส่วนใหญ่แล้วเป็นการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์และขนาดของรศมีที่กว้างของมัน ในห้องเผาไหม้หลักจึงมีขี้เถ้าหนัก (Bottom ash) จำนวนมาก ดังนั้นจึงมีการติดตั้งระบบขนถ่ายที่จะลำเลียงขี้เถ้าหนักออกจากห้องเผาไหม้นี้ รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.14

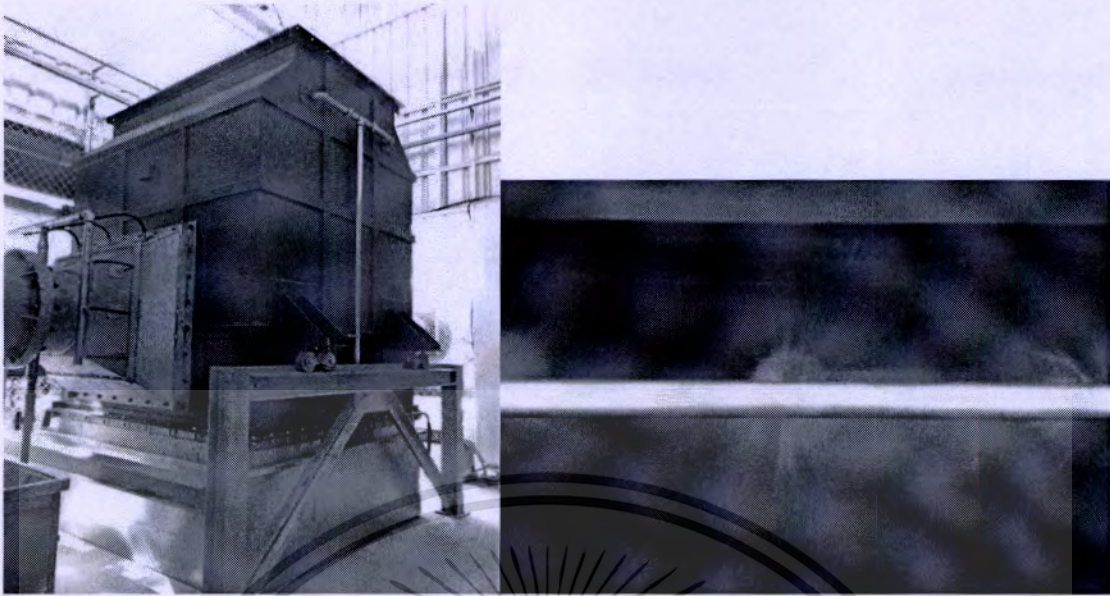


รูปที่ 4.14 ลักษณะของห้องเผาไหม้หลักและระบบลำเลียงเถ้าหนัก

ถังบำบัดไอเสีย

ถังบำบัดไอเสีย (Evaporative scrubber) ถังนี้จะติดตั้งหัวฉีดไอน้ำข้างบนเพื่อพ่นน้ำที่ถูกลำเลียงมาตามท่อโดยปั๊ม เพื่อลดอุณหภูมิของไอเสียและดักขี้เถ้าลอย (Fly ash) ไม่ให้ออกสู่บรรยากาศ

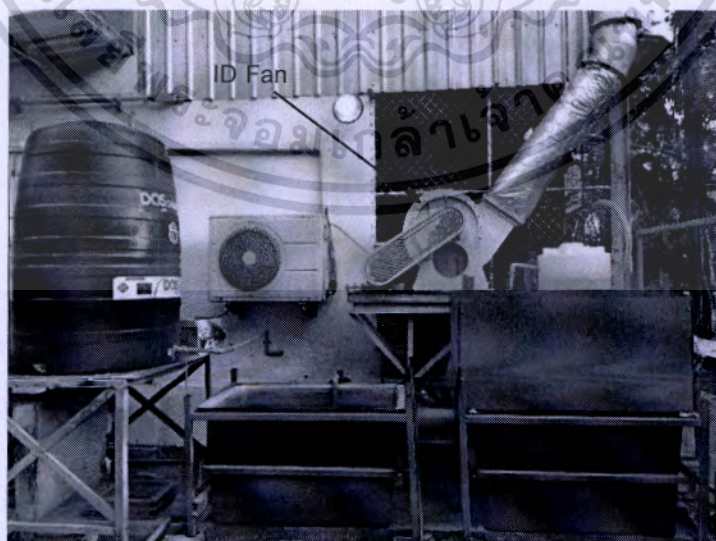
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ลักษณะของถังบำบัดไอเสีย (ซ้าย) และการทำงานของหัวฉีดน้ำสำหรับลดอุณหภูมิไอเสียและดักเก็ดลอย (ขวา)

พัดลมดูดไอเสียและบ่อดักตะกอน

พัดลมดูดไอเสีย (ID Fan) จะมีหน้าที่ดูดเอาไอเสียออกสู่บรรยากาศเพื่อให้มีการระบายไอเสียตลอดเวลาและระบบจะทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ส่วนบ่อดักตะกอนจะทำหน้าที่พักน้ำที่มาจากถังบำบัดไอเสียเพื่อให้นุภาคที่มากับน้ำเกิดการตกตะกอนและจะมีปั๊มดูดเอาน้ำใสจากการตกตะกอนนี้ นำกลับไปใช้ในถังบำบัดไอเสียอีกครั้ง (Water treatment recirculation)

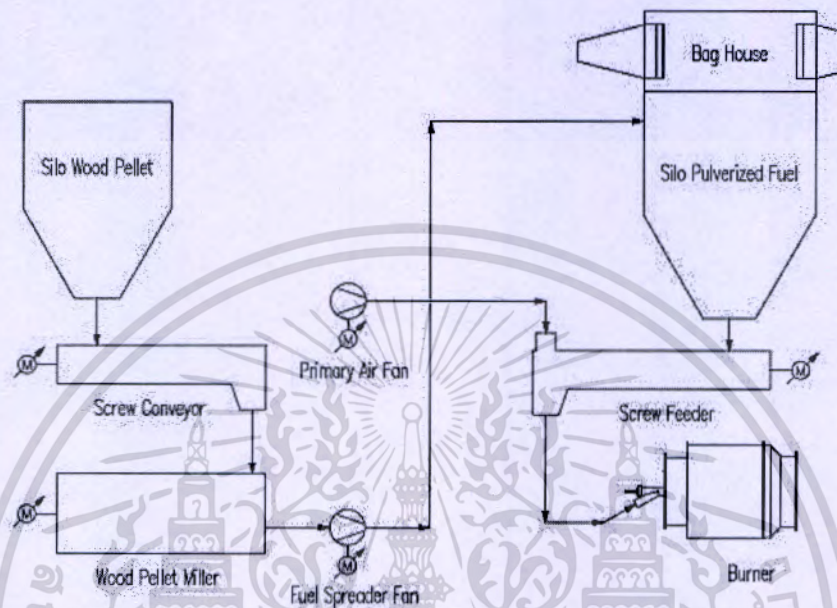


รูปที่ 4.16 ลักษณะของพัดลมดูดไอเสีย บ่อดักตะกอนที่ 1 (ถังสีน้ำเงินขวา) และบ่อดักตะกอนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน(ถังสีน้ำเงินซ้าย)เท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบลำเลียงเชื้อเพลิง

ระบบลำเลียงนี้ถูกออกแบบและจัดทำขึ้นโดยผู้วิจัยร่วม [41] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

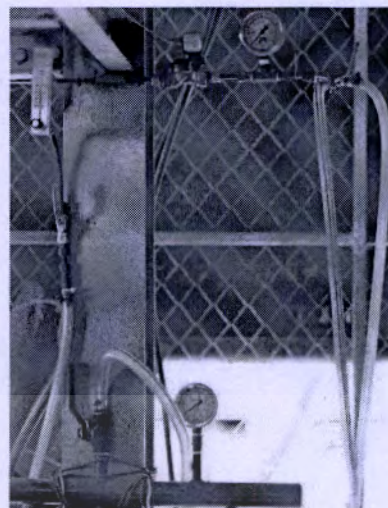
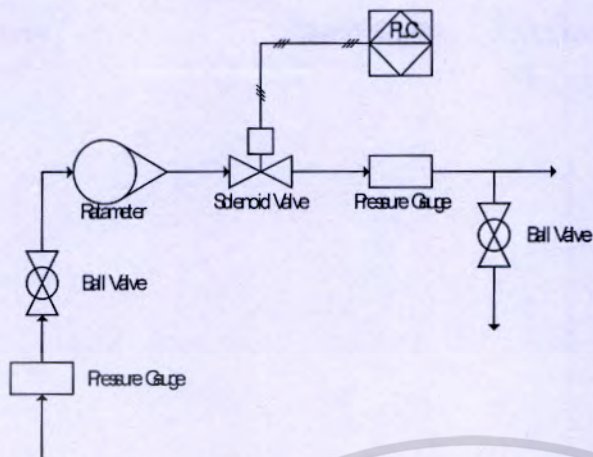


รูปที่ 4.17 รายละเอียดของระบบลำเลียงเชื้อเพลิง

พิจารณาจากรูปที่ 4.17 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (Pellets) จะถูกนำไปเทใส่ที่ Silo wood pellet และจะถูกลำเลียงโดยสกรู (Screw conveyor) ไปเข้ายังเครื่องบด (Wood pellet miller) จากนั้นจะกลายเป็นชีวมวลฝุ่นและจะถูกลำเลียงต่อไปยัง Silo Pulverized fuel โดยพัดลม (Fuel spreader fan) เพื่อกักเก็บไว้ก่อนนำไปเป็นเชื้อเพลิงให้หัวเผาชีวมวลฝุ่นนี้ เมื่อต้องการใช้ชีวมวลฝุ่นนี้ จะมีสกรูอีกชุด (Screw feeder) ลำเลียงชีวมวลฝุ่นมาบริเวณปากทางออกและจะมีพัดลมปฐมภูมิ (Primary air fan) เป่าชีวมวลตามท่อเข้าไปยัง Pre-chamber

ระบบลำเลียง LPG

ในกรณีอุณหภูมิต่ำจะมีการใช้ LPG เข้ามาช่วยอุ่น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบลำเลียงแก๊สเพื่อความสะดวกในการไหลของแก๊ส

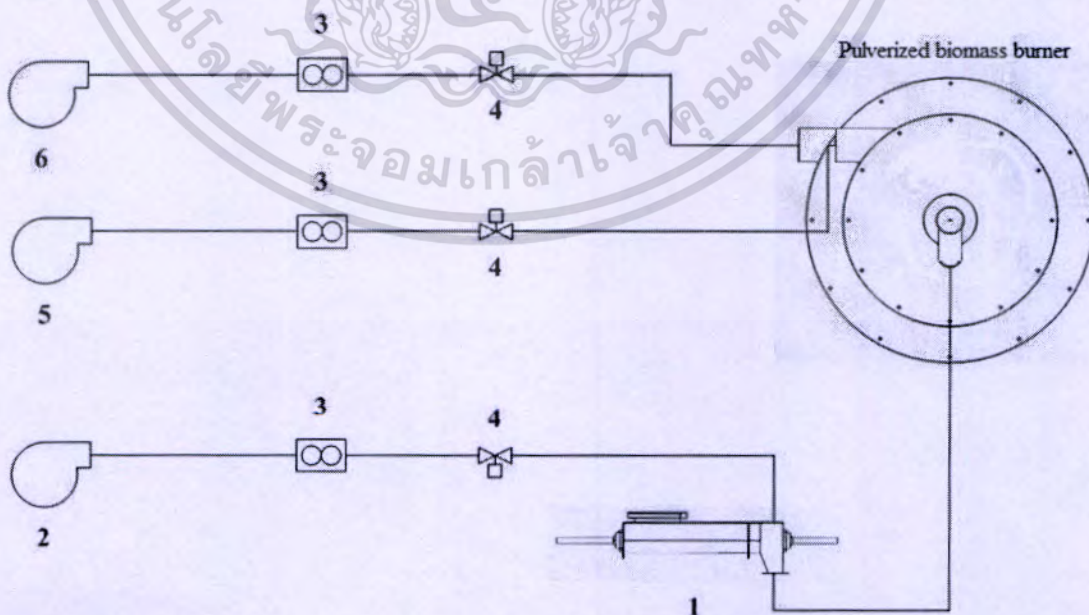


รูปที่ 4.18 แผนภาพ (ซ้าย) และภาพถ่าย (ขวา) ของระบบลำเลียง LPG

ระบบลำเลียงอากาศ

สำหรับระบบลำเลียงอากาศเข้านี้จะแบ่งเป็นสามส่วน ได้แก่ อากาศปฐมภูมิ (Primary air) ทุติยภูมิ (Secondary air) และ ตติยภูมิ (Tertiary air) โดยมีลักษณะการลำเลียงเข้าดังรูปต่อไปนี้

1. Screw feeder
2. Primary air fan
3. Flow meter
4. Control valve
5. Secondary air fan
6. Tertiary air fan

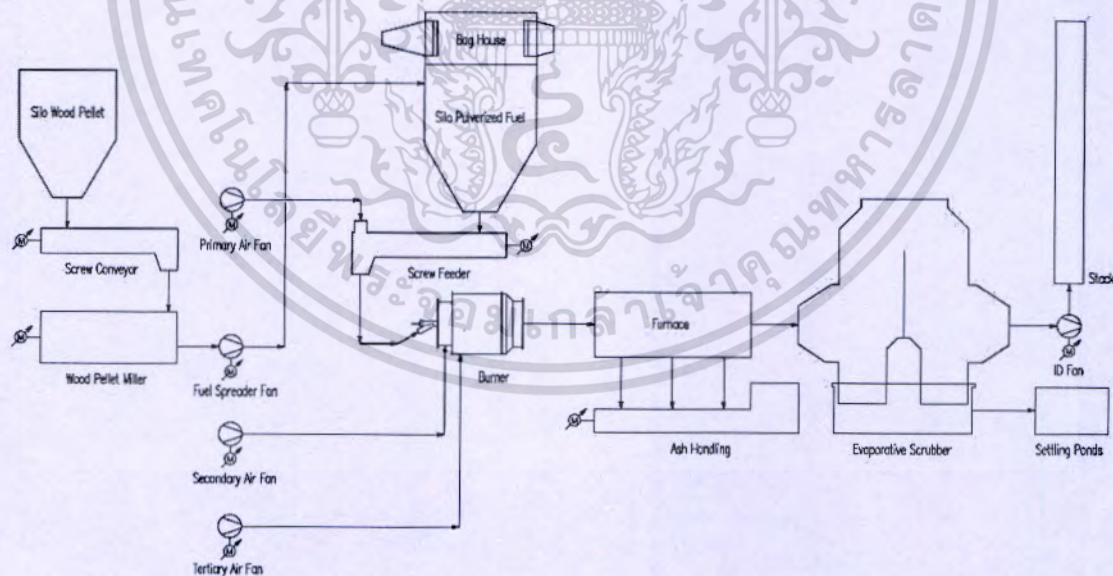


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 4.19 ลักษณะการป้อนอากาศเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น ระเบียบองค์การการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 สรุปหน้าที่การทำงานหลักๆของอากาศแต่ละส่วน

ส่วนของอากาศ	การทำงานและหน้าที่	พื้นที่หน้าตัดของแผ่น Orifice/ขนาดท่อ	สมการหาอัตราการไหล
Primary	เหนี่ยวนำเชื้อเพลิงฝุ่นเข้าไปในห้องเผาไหม้	0.0021 m ² / 3 in	$\dot{m} = 0.022879\sqrt{\Delta P}$
Secondary	ไหลผ่านแผ่นปิด ทำให้เกิดกระแสอากาศหมุนวนภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งช่วยเพิ่มการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ	0.003685 m ² / 4 in	$\dot{m} = 0.039694\sqrt{\Delta P}$
Tertiary	หล่อเย็นผนังของหัวเผา มีผลในแง่ความทนทาน และความปลอดภัย	0.0021 m ² / 3 in	$\dot{m} = 0.022879\sqrt{\Delta P}$

เมื่อนำอุปกรณ์และระบบย่อยๆมารวมกันก็จะได้ระบบผลิตความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่ใช้ในการทดลองดังรูปด้านล่าง



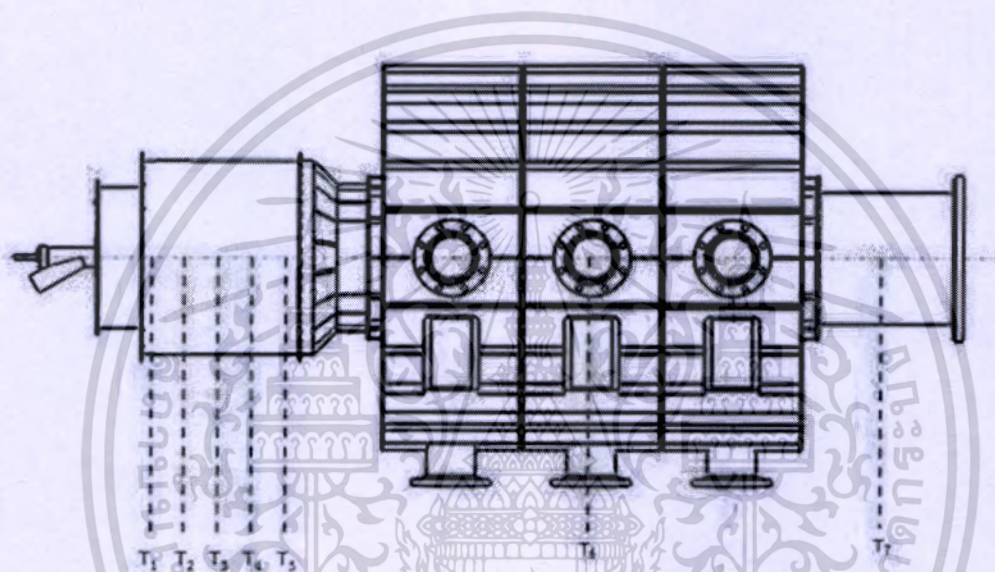
รูปที่ 4.20 แผนภาพรวมของระบบผลิตความร้อนจากชีวมวลฝุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 อุปกรณ์การทดลองเชิงการวัดและการควบคุม

การวัดอุณหภูมิ

อุณหภูมิจะถูกวัดด้วย Thermocouples type k และแสดงผลด้วย Data logger รุ่น GL820 [42] ทั้งหมด 7 จุดด้วยกัน โดยแบ่งเป็นใน Pre-chamber 5 จุด ใน Furnace 1 จุด และในท่อทางออกอีก 1 จุด สังเกตได้ว่าใน Pre-chamber มีการวัดที่ค่อนข้างจะละเอียด ทั้งนี้เพราะว่าการเผาไหม้ใน Pre-chamber มีบทบาทที่สำคัญกับประสิทธิภาพของระบบมาก จึงต้องวัดอุณหภูมิอย่างละเอียด แสดงดังแผนภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของระบบด้านล่าง



รูปที่ 4.21 แผนภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของระบบ



รูปที่ 4.22 Thermocouples type k (ซ้าย) และ Data logger รุ่น GL820 (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดองค์ประกอบของแก๊สจากการเผาไหม้ (Flue gas)

สำหรับจุดที่ใช้วัดองค์ประกอบของ Flue gas คือ จุดเดียวกับจุดวัดอุณหภูมิจุดที่ 7 โดยจะทำการวัดองค์ประกอบของ Flue gas เพื่อนำมาวิเคราะห์สมรรถนะของการเผาไหม้ ได้แก่ ออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และออกไซด์ของไนโตรเจน เนื่องจากบริเวณจุดวัดอุณหภูมิจุดที่ 7 มีอุณหภูมิประมาณ 500 – 1000 °C เพื่อเป็นการถนอมหัวโพรบจึงต้องมีอุปกรณ์สำหรับหล่อเย็น Flue gas ก่อนการวัด สำหรับเครื่องมือที่ใช้วัดองค์ประกอบของ Flue gas คือ Testo รุ่น 350XL [43] แสดงดังรูปที่ 4.23 เช่นเดียวกับอุปกรณ์สำหรับหล่อเย็น Flue gas



รูปที่ 4.23 Testo 350XL gas analyzer (ซ้าย) และ อุปกรณ์สำหรับหล่อเย็น Flue gas (ขวา)

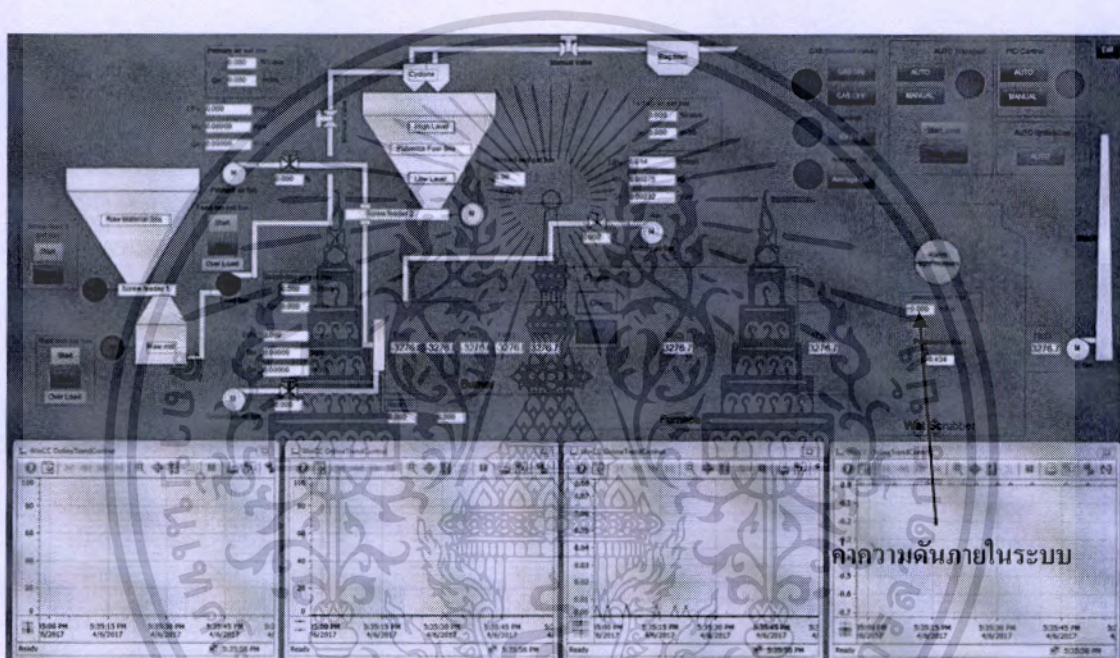
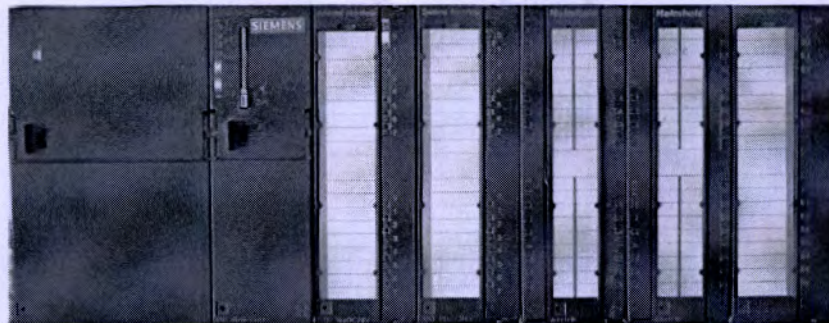
การวัดและควบคุมอัตราการป้อนอากาศและความดันภายในระบบ

อุปกรณ์วัดความดันมีหน้าที่วัดค่าความดันที่เกิดขึ้นภายในระบบ โดยในการทดลองจะต้องรักษาความดันของระบบให้มีค่าติดลบเพื่อความปลอดภัยในการทดลอง ซึ่งเครื่องมือวัดที่นำมาใช้ในการทดลองนี้คือ Differential pressure transmitter ยี่ห้อ KIMO รุ่น CR110-PN [44] ซึ่งถูกติดตั้งและเขียนโปรแกรมการแสดงผลด้วยจอคอมพิวเตอร์จากการเชื่อมต่อกับ PLC (Siemens Simatic s7-300) โดย นาย นันทพล จงจัน [45]



รูปที่ 4.24 ลักษณะการติดตั้ง Differential pressure transmitter สำหรับวัดความดันภายในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 PLC ยี่ห้อ Siemens รุ่น Simatic s7-300 (บน) และ การแสดงผลค่าความดันภายในระบบ ในจอคอมพิวเตอร์ (ล่าง)

สำหรับอากาศที่ถูกป้อนให้หัวเผาชีวมวลผุนี้ อัตราการไหลของอากาศทั้งสามส่วนถูกวัดโดยการวัดความดันตกคร่อมแผ่น Orifice จาก Differential pressure transmitter ยี่ห้อ KIMO รุ่น CP110-PN [44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



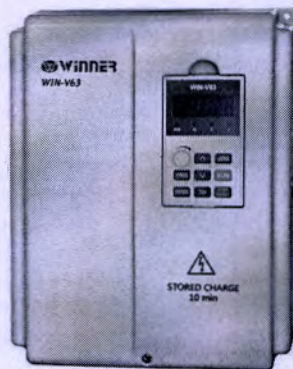
รูปที่ 4.26 ลักษณะการติดตั้งแผ่น Orifice และ Differential pressure transmitter สำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศทั้งสามส่วน

จากความดันตกคร่อมที่ได้จาก Differential pressure transmitter ก็สามารถแปลงเป็นอัตราการไหลโดยสมการภายในตารางที่ 4.1 เมื่อได้อัตราการไหลที่ป้อนให้หัวเผาทั้งสามส่วนแล้ว ก็มีการส่งสัญญาณย้อนกลับจากการวัด (Feedback signal) ไปยังระบบควบคุมและแสดงผล เพื่อที่จะควบคุมค่าอัตราการไหลโดยส่งสัญญาณไปที่ชุดควบคุมวาล์วเพื่อควบคุมวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly valves) ด้วยการอ้างอิงจากค่าที่ตั้งไว้ (Set point) ซึ่งกระบวนการควบคุมการไหลของอากาศทั้งหมดที่กล่าวมานี้ถูกติดตั้งและเขียนโปรแกรมโดยผู้วิจัยร่วมคือนาย นันทพล คงจัน [45] ส่วนของการควบคุม ID Fan นั้นจะใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยตรง ซึ่งไม่มีการส่งสัญญาณจากคอมพิวเตอร์ไปควบคุม



รูปที่ 4.26 ลักษณะของการติดตั้งวาล์วปีกผีเสื้อและชุดควบคุม

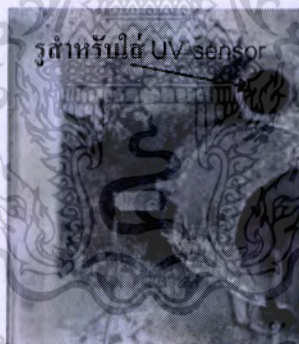
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Winner รุ่น WIN-V63 [46] สำหรับควบคุมความเร็วของ ID Fan

4.1.3 การเก็บภาพถ่ายและวิดีโอในการทดลอง

การเก็บภาพถ่ายนั้นจะถูกถ่ายบริเวณรูที่ใช้ในการติดตั้ง UV sensor ดังรูปที่ 4.28 เพื่อวัดลักษณะการติดดับของเปลวไฟ โดยเวลาที่มีการถ่ายภาพหรือวิดีโอจะถอด UV sensor ออกเพื่อให้เห็นถึงลักษณะของเปลวไฟภายใน Pre-chamber



รูปที่ 4.28 ลักษณะรูที่มีไว้ใส่ UV sensor ที่อยู่บริเวณด้านหลังหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นนี้

4.2 การคำนวณและออกแบบการทดลอง

ก่อนทำการทดลองเราได้ซื้อเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมา ซึ่งทำมาจากไม้ยางพารามีลักษณะดังรูปที่ 4.29 และนำมาบดให้เป็นฝุ่น ต่อไปก็นำส่งไปวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุที่ Thailand Institute of Scientific and Technology Research (TISTR) [47] ประกอบกับการทดลองของ นาย พิระพัฒน์ เทพลี [41] ที่ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้กับความถี่ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ควบคุมสกรูสำหรับป้อนเชื้อเพลิงฝุ่นให้หัวเผา (รูปที่ 4.30) เพื่อที่จะนำมาเข้าสู่กระบวนการคำนวณหาสภาวะต่างๆในการทดลอง

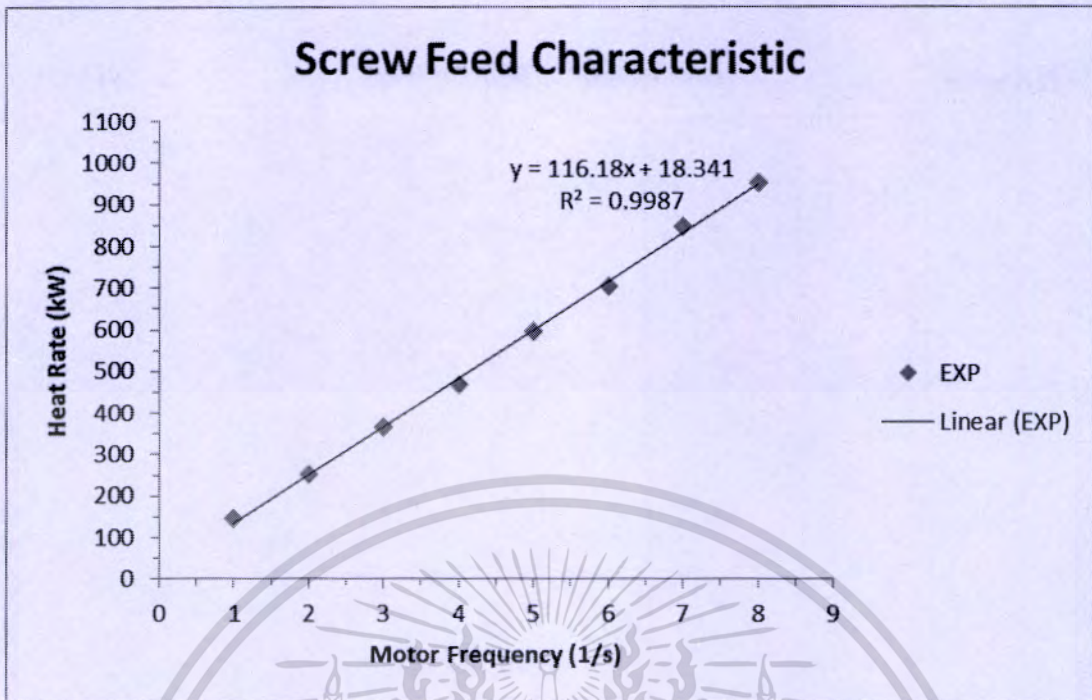


รูปที่ 4.29 รูปถ่ายของเชื้อเพลิงชีวมวลไม้ยางพาราอัดเม็ดก่อนทำการบด

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบธาตุของชีวมวลไม้ยางพาราฝุ่นวิเคราะห์โดย TISTR

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, %	45.45	48.22
ไนโตรเจน, %	0.45	0.48
ออกซิเจน, %	45.54	42.86
ซัลเฟอร์, %	0.00	0.00
ค่าความร้อนสูง, กิโลแคลอรี/กก.	4180	4440
ค่าความร้อนต่ำ, กิโลแคลอรี/กก.	3860	4100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้กับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ควบคุมสกรูสำหรับป้อนเชื้อเพลิงฝุ่นให้หัวเผา [41]

จากข้อมูลที่มีอยู่และสมการเคมีสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในสภาวะ Stoichiometric หรือ Lean เราสามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังต่อไปนี้



ต่อมาทำการหาค่าตัวแปร c, h, n, o, s, h^*, o^* และ a ค่าองค์ประกอบของธาตุและความชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ และดุลสมการหาค่า b, e, f และ g แล้วก็หาปริมาณอากาศและอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่สภาวะ Stoichiometric จากสมการที่ 4.2 [19] ได้ดังต่อไปนี้ (แสดงในตารางที่ 4.3)

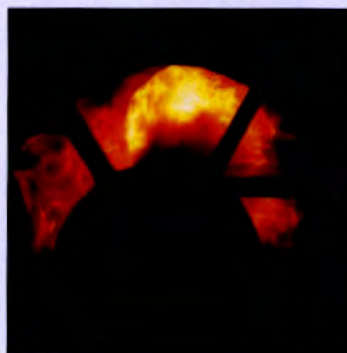
$$kg \text{ air@stoi} = a[2MW_{\text{oxygen}} + (2 \times 3.76 MW_{\text{nitrogen}})] \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลจากการหาค่าตัวแปร สมดุลสมการการเผาไหม้ และสมการที่ 4.2

ตัวแปร	ค่าจากการคำนวณ
c	0.03784
h	0.05660
n	0.00032
o	0.02523
s	0.00000
h*	0.00645
o*	0.03227
a	0.03938
b	0.03784
e	0.03153
f	0.00000
g	0.14825
kg air at stoichiometric (1/kg fuel)	5.40679
Air/Fuel ratio at stoichiometric	5.40679/1

จากนั้นทำการกำหนด Excess air โดยทำการศึกษาลำดับอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ นายชินภัทร ธุระการ [9] ซึ่งเขาได้ใช้เชื้อเพลิงชนิดเดียวกันกับเรา และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ความชื้น และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่เขาใช้นั้นมีผลออกมาใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ของเราอีกด้วย เนื่องจากเชื้อเพลิงที่นำมาใช้นั้นมาจากแหล่งเดียวกัน คือ ไม้ยางพาราที่เหลือจากโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์แห่งหนึ่ง ซึ่งในกระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์นี้ทางผู้ผลิตจะมีกระบวนการควบคุมความชื้นอยู่แล้ว เขาพบว่าที่ Excess air = 15 % โดยมีอัตราส่วนอากาศสามส่วนคือ Primary Secondary และ Tertiary เป็น 10 ต่อ 65 ต่อ 25 % ความร้อน 300 kW และ มุมไบบิตเท่ากับ 100 การเผาไหม้สามารถดำเนินไปได้โดยไม่เกิดการเป่าดับ แสดงดังรูปที่ 4.31 ดังนั้นงานวิจัยนี้จะกำหนด Excess air = 15 % ความร้อน 300 kW และมุมไบบิตเท่ากับ 100 เช่นเดียวกัน เพื่อทำการเปรียบเทียบผลความแตกต่างที่เกิดขึ้นกรณีอัตราส่วนอากาศสามส่วนแตกต่างกัน จากนั้นก็คำนวณหาสภาวะอากาศในสภาวะการเผาไหม้จริงได้ผลตามตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายเปลวไฟภายใน Pre-chamber จากการทดลองของ นาย ชินภัทร ชูระการ (Excess air = 15 %, 10 ต่อ 65 ต่อ 25 % ของอัตราส่วนอากาศ, ความร้อน 300 kW และ 100 องศาเซลเซียส) [9]

ตารางที่ 4.4 ผลการหาสถานะอากาศในสภาวะการเผาไหม้จริง

Excess air	15 %
A/F ratio ที่สภาวะจริง	6.2178/1
Equivalent ratio	0.8695

และทำการรวมรวบข้อมูลจากตารางที่ 4.2 4.3 4.4 และรูปที่ 4.3 เพื่อหาสถานะในการทดลองได้ตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

(1.) ค่าความร้อนต่ำ, kJ/kg	จากตาราง 4.2	16161
(2.) ความร้อนที่ต้องการ, kW	กำหนดเอง	300
(3.) ความถี่ไฟฟ้า (มอเตอร์สกรูเชื้อเพลิงคู่), Hz	จากสมการในรูปที่ 4.3	2.45
(4.) อัตราการป้อนเชื้อเพลิง, kg/s	(1.) / (2.)	0.0187
(5.) อัตราการป้อนอากาศรวม, kg/s	(4.) x (A/F ratio ที่สภาวะจริง)	0.1165
(6.) อัตราการป้อนอากาศรวม, m ³ /s	(5.) / ความหนาแน่นอากาศ	0.0984

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าค่าอัตราการป้อนอากาศนั้นเป็นอัตราของอากาศทั้งหมดที่ต้องป้อนให้กับการเผาไหม้ภายในระบบ แต่ระบบของเรานั้นออกแบบมาให้มีการป้อนอากาศสามส่วนด้วยกัน ซึ่งมีความสำคัญแตกต่างกันออกไป ดังนั้นเราจึงกำหนดให้อัตราการป้อนอากาศรวมเป็น 100 % และทำการแบ่ง 100 % นี้เป็นสามส่วนตามการทดลองของ นาย ชินภัทร ชูระการ ซึ่งได้กล่าวไว้ในข้างต้นแล้ว คือ 10 ต่อ 65 ต่อ 25 % ของอากาศ Primary, Secondary และ Tertiary ตามลำดับ แต่ว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบลำเลียงเชื้อเพลิงฝุ่นที่ใช้ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่โดย นาย พิระพัฒน์ เทพลิบ [41] และจากการทดลองของเขาพบว่าที่ Excess air = 15 % และ 300 kW ถ้าอากาศ Primary ต่ำกว่า 15 % การลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นนี้จะเกิดการติดขัด โดยมีเชื้อเพลิงฝุ่นนี้ไปต้นในท่อลำเลียงไม่สามารถดำเนินการระบบต่อไปได้ ดังนั้นเราจึงกำหนดอัตราส่วนของอากาศใหม่เพื่อให้ทำการทดลองได้ คือ 15 ต่อ 65 ต่อ 20 % และใช้เป็นกรณีอ้างอิง (Reference case) ในการเปรียบเทียบเมื่ออัตราส่วนนี้เปลี่ยนไป มากไปกว่านั้นการทำการเปรียบเทียบต้องใช้ค่าที่เป็นตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless) เราจึงใช้ค่าอัตราส่วนเชิงมวล (Mass ratio) เป็นหลักในการเปรียบเทียบ ซึ่ง Mass ratio สามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Mass ratio} = \frac{\dot{m}_{\text{primary}}}{\dot{m}_{\text{secondary}}} \quad (4.3)$$

เมื่อ \dot{m}_{primary} คืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ Primary และ $\dot{m}_{\text{secondary}}$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ Secondary และตอนนี้จากที่เราได้ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพร้อมกับพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นในการทำการทดลองครบแล้ว เราจึงทำการกำหนดกรณีและเงื่อนไขต่างๆ (Case) ที่ต้องการศึกษาทดลองแล้วสรุปไว้เป็นในตารางที่ 4.6 ด้านล่างนี้ ซึ่ง Case P1 และ Case P2 คือการเพิ่มขึ้นของอากาศ Primary โดยอากาศ Secondary คงที่ และ Case S1 Case S2 และ Case S3 คือการเพิ่มขึ้นของอากาศ Secondary โดยอากาศ Primary คงที่

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาทดลอง

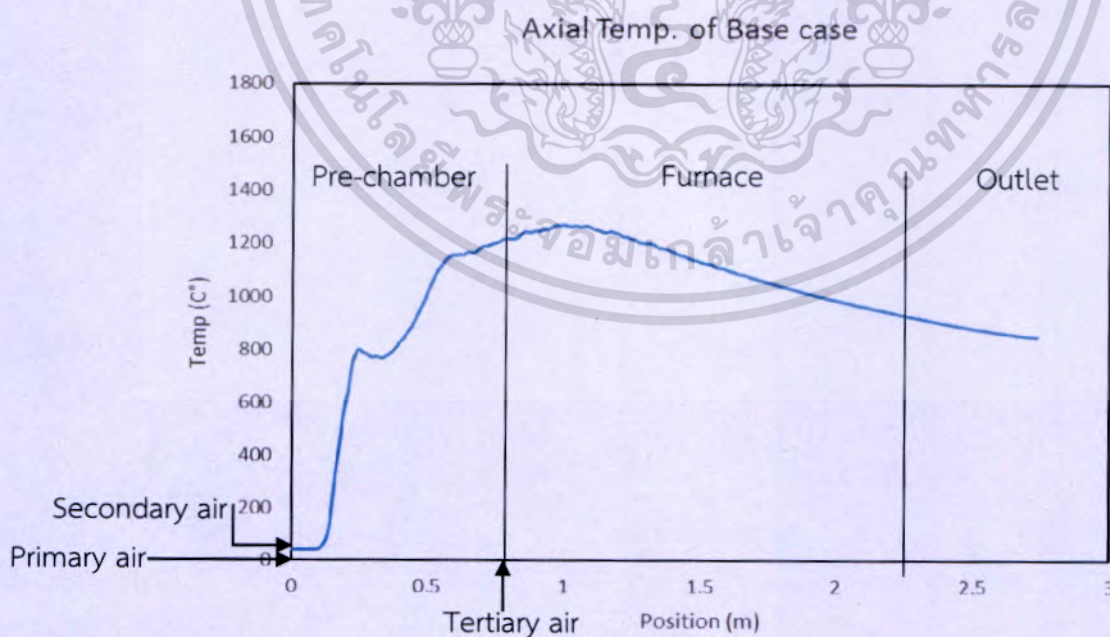
Case	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)				Ratio (%)	Mass ratio
	Primary	Secondary	Tertiary	รวม		
Ref.	0.0175	0.0757	0.0233	0.1165	15/65/20	0.2307
P1	0.0233	0.0757	0.0175	0.1165	20/65/15	0.3076
P2	0.0291	0.0757	0.0116	0.1165	25/65/10	0.3846
S1	0.0175	0.0816	0.0175	0.1165	15/70/15	0.2142
S2	0.0175	0.0874	0.0116	0.1165	15/75/10	0.2000
S3	0.0175	0.0932	0.0058	0.1165	15/80/5	0.1875
Excess air = 15 % อัตราการป้อนเชิงมวลของชีวมวลฝุ่น = 0.0187 kg/s (300 kW) มุมองศาไบบิต = 100°						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราสรุปเงื่อนไขต่างๆในการทดลองแล้ว ก่อนทำการทดลองเราจึงทำการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เนื่องจากการทำเช่นนี้จะช่วยลดค่าใช้จ่ายและช่วยให้เห็นอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นก่อนการทดลอง เช่น การเกิดจุดร้อน (Hotspot) เป็นต้น จากการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Ref. case ได้ผลการจำลองดังต่อไปนี้

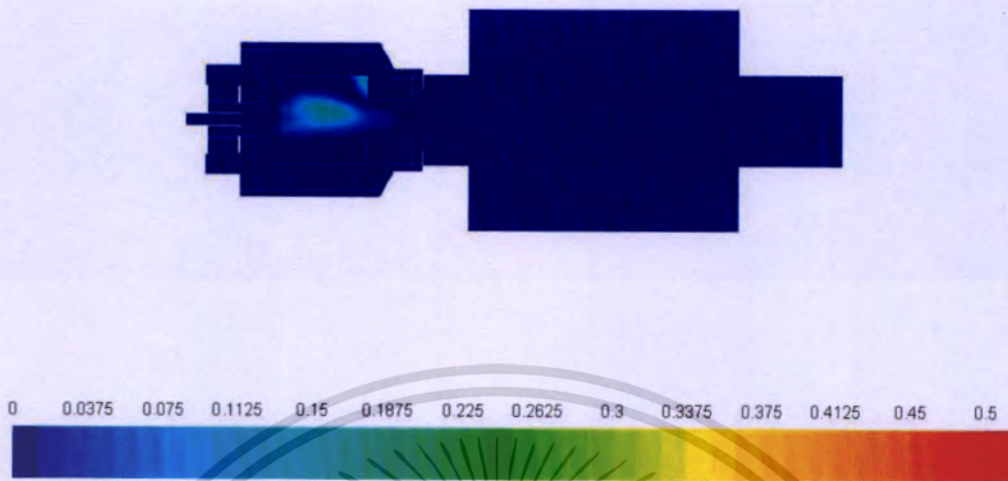


รูปที่ 4.32 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของการกระจายตัวของอุณหภูมิ $^{\circ}\text{C}$ (Ref. case)

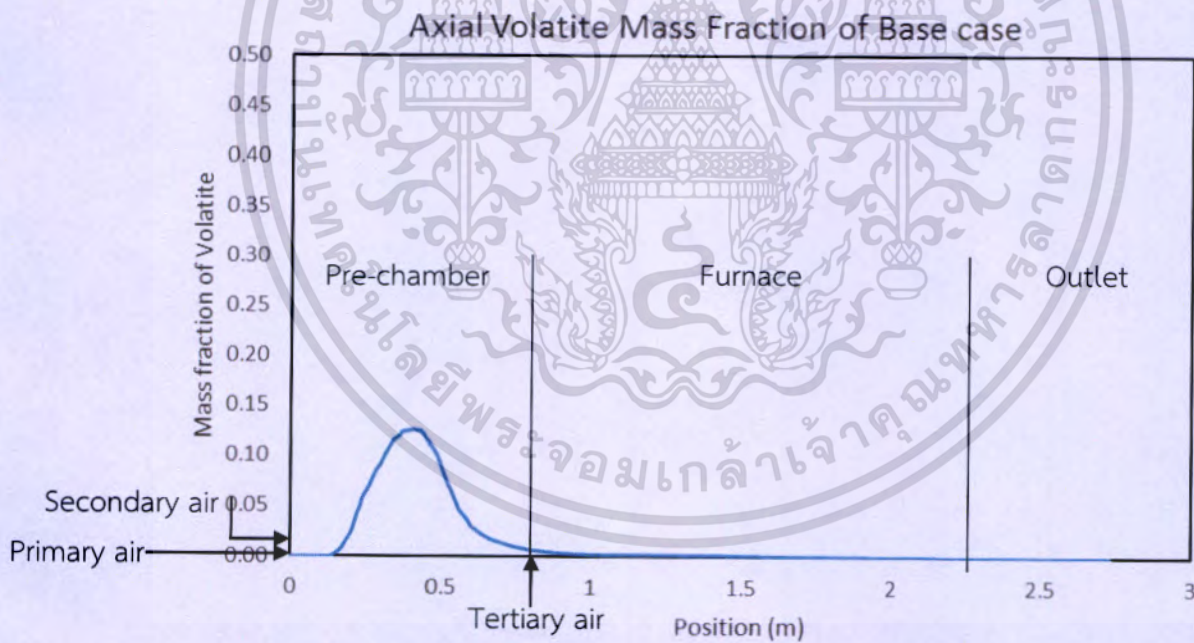


รูปที่ 4.33 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิตามแนวแกน $^{\circ}\text{C}$ (Ref. case)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



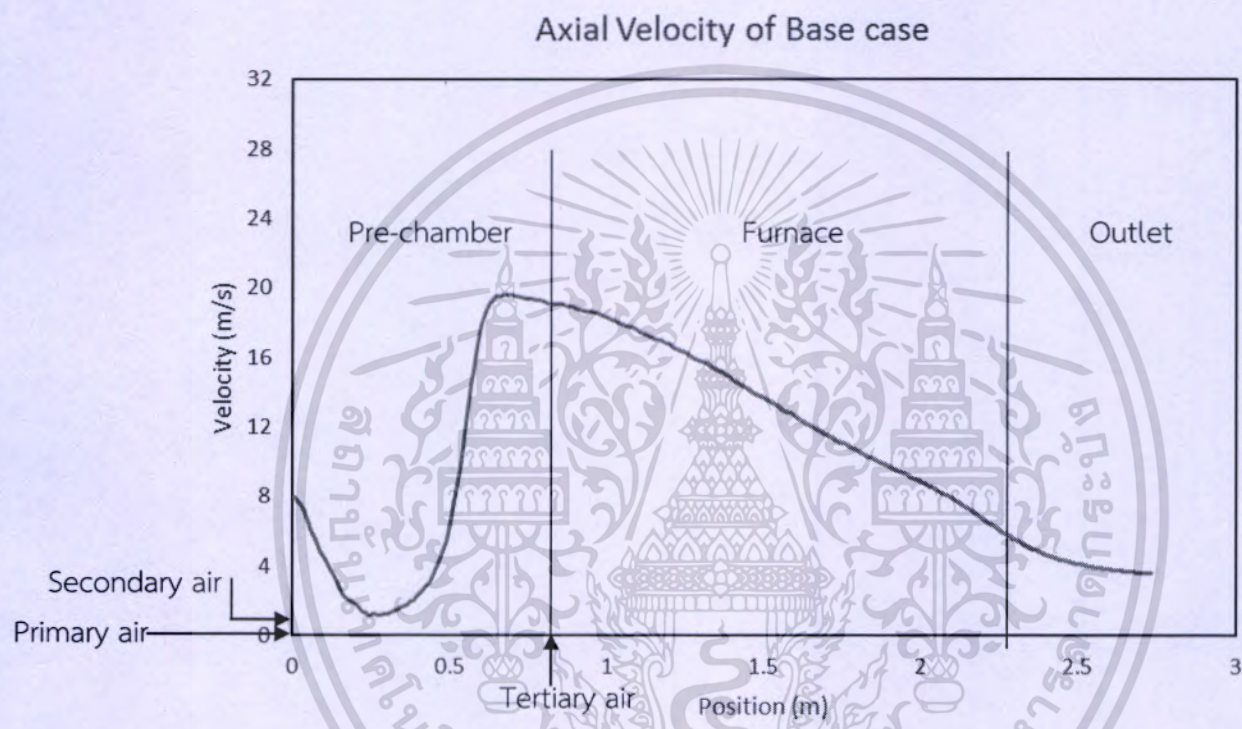
รูปที่ 4.34 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของการกระจายตัวสัดส่วนเชิงมวลของสารระเหย (Mass fraction of volatile; Ref. case)



รูปที่ 4.35 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของสัดส่วนเชิงมวลของสารระเหยตามแนวแกน (Axial mass fraction of volatile; Ref. case)

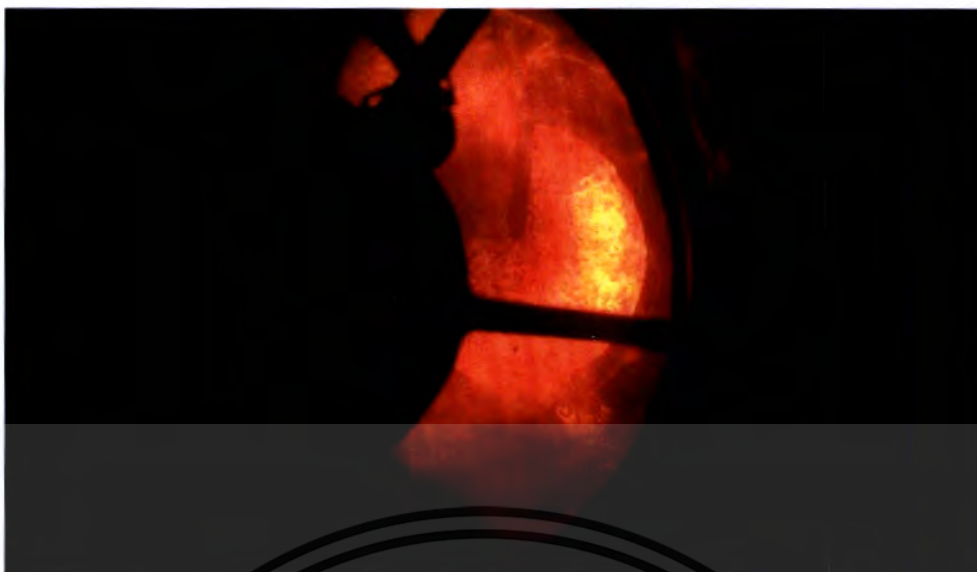
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Ref. case (mass ratio = 0.2307) ในรูปที่ 4.32 – 4.35 จะเห็นว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นภายในระบบ โดยการปลดปล่อยสารระเหยนั้นมีการปลดปล่อยออกมาตั้งแต่อยู่ใน Pre-chamber และเผาไหม้หมดไปอย่างรวดเร็วที่บริเวณคอคอดหรือรอยต่อระหว่าง Pre-chamber กับ Furnace มากไปกว่านั้นบริเวณคอคอดนี้ยังมีอุณหภูมิสูงอีกด้วย ทั้งนี้เพราะว่าบริเวณคอคอดนี้มีความเร็วอากาศค่อนข้างสูงเกิดความปั่นป่วนอย่างรุนแรง (สังเกตได้รูปที่ 4.36) ทำให้การคลุกเคล้ากันระหว่างอากาศกับสารระเหยและอนุภาคคาร์บอนมีมากจึงทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงนั่นเอง

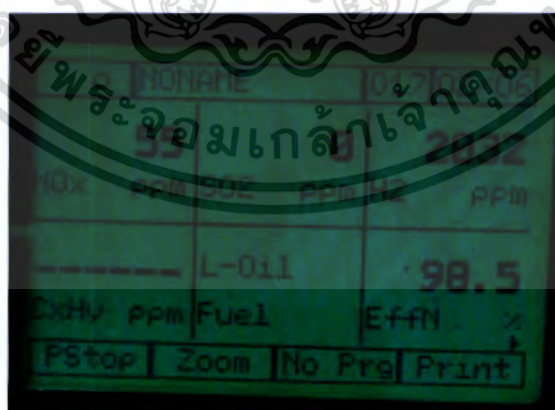


รูปที่ 4.36 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของความเร็วตามแนวแกน m/s (Ref. case)

เมื่อทำการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Ref. case เสร็จแล้ว เราจึงทำการทดลองของ Ref. case แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกัน (Validation) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการจำลอง (Simulation model) และผลการทดลองที่ Mass ratio = 0.2307 แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายเปลวไฟภายใน Pre-chamber (Ref. case)



รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายผลจากการวัดองค์ประกอบของ Flue gas (Ref. case)

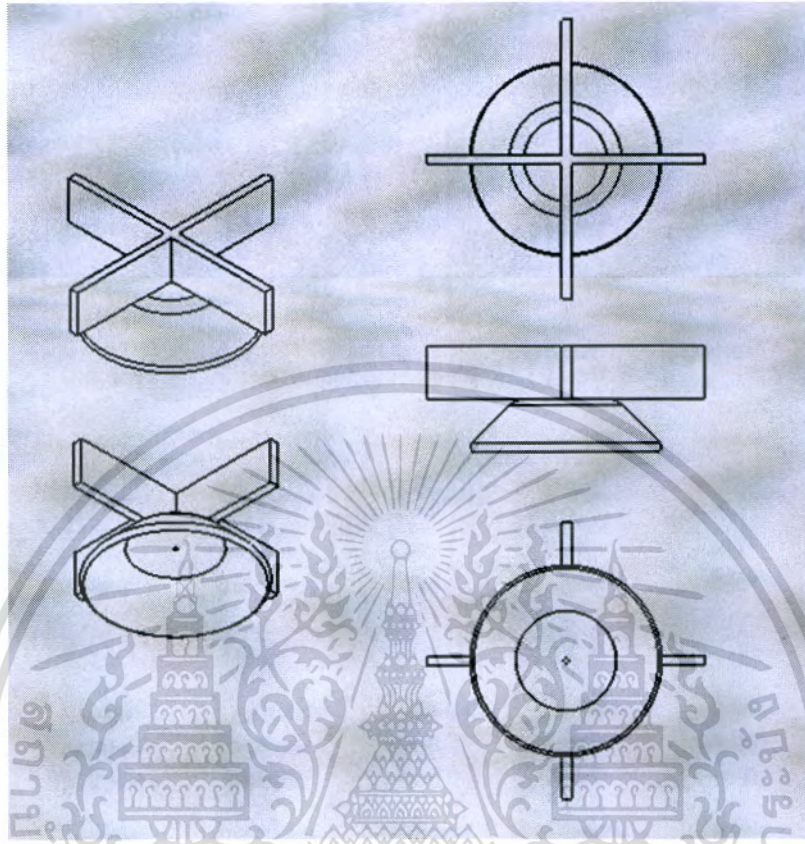
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่าเมื่อเราทำการอุ่นระบบให้ได้สภาวะที่ต้องการแล้ว เมื่อเราทำการปิดแก๊ส LPG การเผาไหม้ค่อยข้างแย่มากและเวลาผ่านไปไม่นานการเผาไหม้ก็ไม่สามารถดำเนินต่อไปได้โดยเปลวไฟในระบบนั้นดับลง เราจึงหยุดการทดลองไว้เท่านั้น แต่ระหว่างที่เปลวไฟยังติดอยู่เมื่อดับแก๊ส LPG เราได้ทำการถ่ายภาพเปลวไฟภายใน Pre-chamber และวัดองค์ประกอบของแก๊สภายใน Flue gas จากการเผาไหม้มาได้ จากรูปที่ 4.37 จะเห็นว่าอนุภาคที่พ่นออกจากท่อลำเลียงมีโมเมนต์ค้อยข้างสูง ทำให้อนุภาคบางส่วนวิ่งทะลุผ่าน Pre-chamber โดยไม่เกิดการเผาไหม้ ซึ่งทำให้เวลาการอยู่ในห้องเผาไหม้ของอนุภาค (Residence time) น้อยมาก ประกอบกับอนุภาคส่วนใหญ่วิ่งเป็นลำตรงทำให้อุณหภูมิของผนังของ Pre-chamber มีอุณหภูมิไม่สูงพอ (จากการวัดประมาณ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) ทำให้ผนังของ Pre-chamber ซึ่งเป็นปูนทนไฟมีการแผ่รังสีความร้อนให้กับอนุภาคน้อย จึงทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ไม่ดีและสิ้นสุดลงในที่สุด สอดคล้องกับผลการวัดองค์ประกอบของแก๊สใน Flue gas จะเห็นว่าค่าออกซิเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สูงมากเกินค่ามาตรฐานอุตสาหกรรมบ่งบอกได้ชัดเจนว่าการบริโภคออกซิเจนค่อนข้างต่ำและการเผาไหม้ในระบบมีแนวโน้มแย่มาก ผลการทดลองที่ออกมาชี้ชัดแย้งกับผลการจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้ทำไว้ก่อนหน้านี้ สำหรับสาเหตุที่มันขัดแย้งกัน อาจเป็นเพราะว่าในรูปแบบการจำลองได้มีการกำหนดค่าการแผ่รังสีความร้อนให้ปูนทนไฟที่เป็นผนังของ Pre-chamber อย่างชัดเจน จึงมีการแผ่รังสีความร้อนจากปูนทนไฟนี้สู้อนุภาคที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ในระบบได้ แต่สำหรับการทดลองมันไม่สามารถกำหนดขึ้นเองได้ซึ่งมันจะเกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ แต่มันก็ไปขัดแย้งกับการทดลองของ นาย ชินภัทร ธุระการ ที่เขาสามารถทดลองที่เงื่อนไขที่ใกล้เคียงนี้ได้ ความขัดแย้งที่เกิดขึ้นนี้มาจากความแตกต่างของอัตราส่วนของอากาศทั้งสามส่วนที่เราได้ทำการเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมกับระบบลำเลียงที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ และอีกสาเหตุก็คือ ชีวมวลฝุ่นที่ นาย ชินภัทร ธุระการ ได้ใช้ในการทดลองมาจากเครื่องบดที่ใช้ในระบบลำเลียงเก่า ซึ่งการทดลองนี้ได้ใช้ชุดลำเลียงและเครื่องบดตัวใหม่ ซึ่งจะทำให้ขนาดของชีวมวลฝุ่นแตกต่างกัน

ดังนั้นเพื่อที่จะให้ทำการดำเนินการระบบได้เราจึงได้ปรับปรุงท่อพ่นเชื้อเพลิงฝุ่นเข้าไปใน Pre-chamber โดยการติดตั้ง Bluff body เพื่อที่จะลดโมเมนต์ของอากาศและเชื้อเพลิงฝุ่นก่อนเข้า Pre-chamber และมันยังจะช่วยให้อนุภาคเกิดการบานกระจายออกไปกระทบกับผนังของ Pre-chamber และเผาไหม้บริเวณนั้นทำให้อุณหภูมิผนังมีค่าสูง ทำให้ผนังปูนนี้มีการแผ่รังสีความร้อนมาที่อนุภาคมากขึ้นและทำให้กระบวนการเผาไหม้เกิดได้เร็วขึ้นด้วย จึงสามารถทำให้การเผาไหม้ในระบบดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง จากสมมุติฐานนี้ถูกพิสูจน์ในการทำงานวิจัยของ นาย พงษ์พันธ์ แก่นพรม [48] ซึ่งเขาได้ศึกษาอิทธิพลที่เกิดขึ้นจากการติดตั้ง Bluff body เพื่อขวางการไหลที่ปลายท่อพ่นเชื้อเพลิงฝุ่นเข้าไปใน Pre-chamber โดย Bluff body นี้มีลักษณะคล้ายๆกับจาน มีมุมบาน 45 องศา ถูกติดตั้งไปกับท่อโดยการเชื่อมผ่านฐานรูปตัวเอ็ก เพื่อให้มั่นใจว่าเมื่อมีเชื้อเพลิงฝุ่นและลมมากระทบจะไม่เกิดการเสียหาย แตก หรือหลุดออกของ Bluff body ขณะที่ดำเนินการทดลอง ซึ่งอาจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดความเสียหายที่คลาดไม่ถึงได้ ลักษณะของ Bluff body และลักษณะการติดตั้งกับท่อแสดงดังรูปที่ 4.39 - 4.41 ตามลำดับ



รูปที่ 4.39 ลักษณะรูปทรงของ Bluff body ก่อนที่จะถูกติดตั้ง ซึ่งจะถูกเชื่อมติดกับฐานตัวเอ็ก



รูปที่ 4.40 ลักษณะของท่อพ่นเชื้อเพลิงก่อนติดตั้ง Bluff body เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งนั้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยู่ใช้เห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 ลักษณะการติดตั้ง Bluff body ลงไปที่ท่อพ่นเชื้อเพลิงฝุ่น (บน)

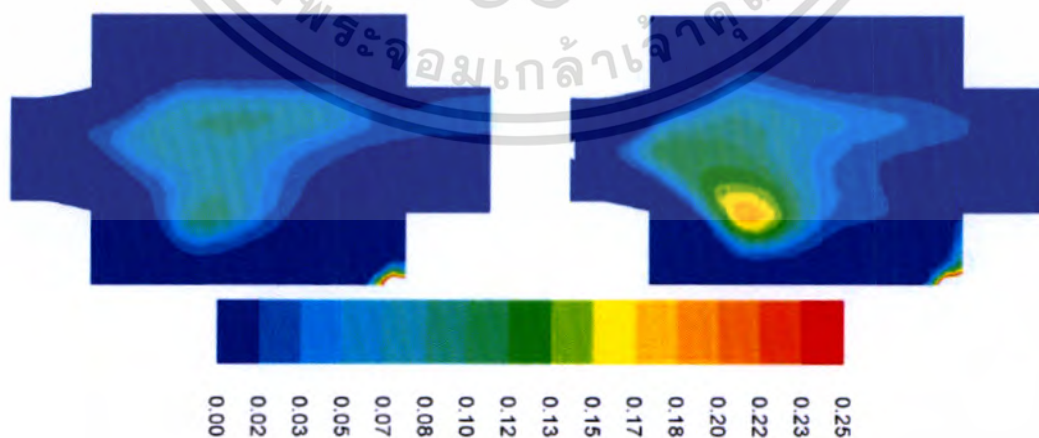
และภาพถ่ายจากของจริง (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาของ นาย พงชนันท์ แก่นพรม [48] ที่ได้ศึกษาอิทธิพลจากการติดตั้ง Bluff body ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของการเผาไหม้ของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นนี้ มากไปกว่านั้นเขาได้ทำการศึกษา ในเงื่อนไขที่ตรงกับ Ref. case (Excess air = 15 %, 300 kW และมุมไบบิตเท่ากับ 100°) อีกด้วย โดยเขาได้ทำการจำลองเชิงตัวเลขโดยที่ผนังของ Pre-chamber นั้นเป็นแบบอะเดียบาติก (Adiabatic) ผลการจำลองของเขาพบว่า จากรูปที่ 4.42 เป็นการเปรียบเทียบเส้นทางเดินอนุภาค ขนาดใหญ่ที่สุดของกรณีพื้นฐานกับกรณีใส่ Bluff body มันบ่งบอกได้ว่าอนุภาคเกิดการบานกระจาย ไปกระทบกับผนังปูนมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิของผนังปูนมีสูงกว่ากรณีพื้นฐาน อนุภาคในกรณีใส่ Bluff body จึงได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีของผนังมากกว่า เป็นสาเหตุให้การเผาไหม้ของกรณีใส่ Bluff body เกิดขึ้นได้เร็วกว่าและมีเสถียรภาพมากกว่า สังเกตได้จากการเปรียบเทียบกระจายตัวของ การปลดปล่อยสารระเหยภายใน Pre-chamber การบริโภคออกซิเจนที่เยอะกว่าในกรณีใส่ Bluff body และการกระจายตัวอุณหภูมิในรูปที่ 4.43 4.44 และ 4.45 ตามลำดับ



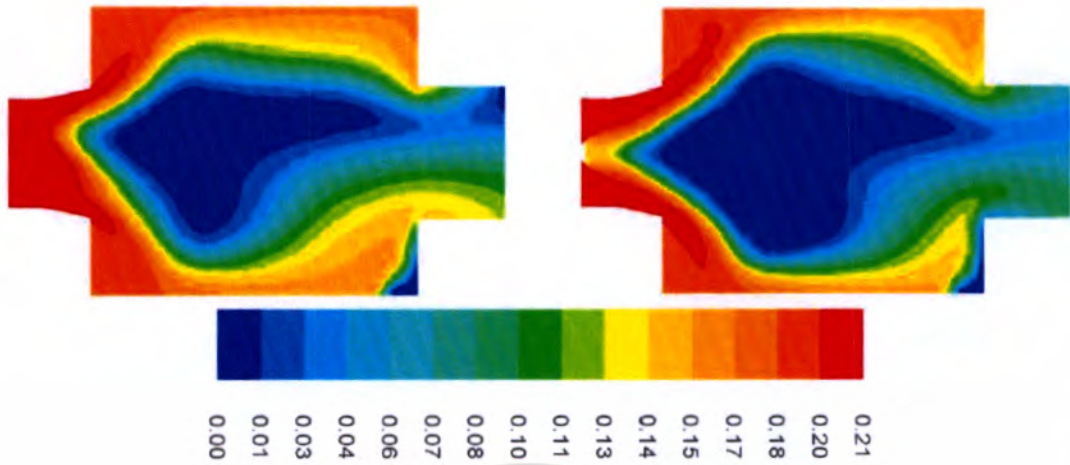
รูปที่ 4.42 ลักษณะของเส้นทางเดินอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุดของกรณีพื้นฐาน (ซ้าย) และกรณีใส่ Bluff body (ขวา) [48]



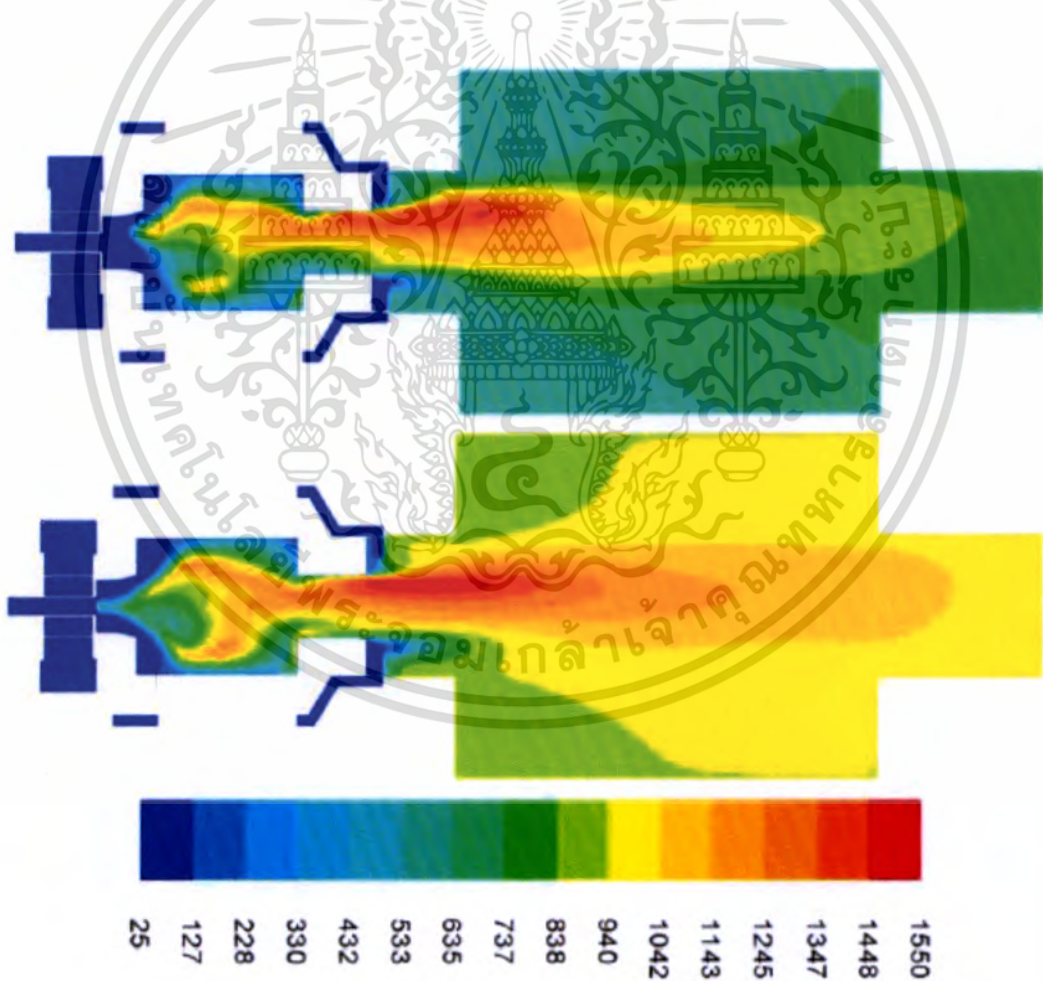
รูปที่ 4.43 การกระจายตัวการปลดปล่อยสารระเหยของกรณีพื้นฐาน (ซ้าย)

และกรณีใส่ Bluff body (ขวา) [48]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 การกระจายตัวสัดส่วนโดยโมลออกซิเจนของกรณีพื้นฐาน (ซ้าย)
และกรณีใส่ Bluff body (ขวา) [48]



รูปที่ 4.45 การกระจายตัวอุณหภูมิ C° ของกรณีพื้นฐาน (บน)
และกรณีใส่ Bluff body (ล่าง) [48]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ นาย พงชนันท์ แก่นพรม สามารถที่จะตอบสมมุติฐานในข้างต้นได้ว่าการติดตั้ง Bluff body ที่ปลายท่อพ่นเชื้อเพลิงฝุ่นนั้นสามารถทำให้สมรรถนะการเผาไหม้ดีขึ้นจริง มีเสถียรภาพโดยเปลวไฟไม่ดับ ทำให้ดำเนินการระบบหรือดำเนินการต่อ การต่อได้อย่างต่อเนื่อง เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะศึกษาผลกระทบของการบ่อนอากาศที่มีผลต่อการเผาไหม้ของหัวเผาชีวมวลฝุ่นโดยที่มีการติดตั้ง Bluff body ด้วยในทุกเงื่อนไขในตารางที่ 4.6 ดังนั้นเงื่อนไขในตารางที่ 4.6 จะเพิ่มเงื่อนไขที่มีการติดตั้ง Bluff body ขึ้นมาด้วย และสรุปให้เห็นใน ตารางที่ 4.7 โดยเราทำการเปลี่ยน Ref. case ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีอัตราส่วนอากาศ 15 ต่อ 65 ต่อ 20 % และไม่มีการติดตั้ง Bluff body เป็น Base case ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีอัตราส่วนอากาศ 15 ต่อ 65 ต่อ 20 % และมีการติดตั้ง Bluff body ด้วย

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาทดลอง (ติดตั้ง Bluff body)

Case	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)				Ratio (%)	Mass ratio
	Primary	Secondary	Tertiary	รวม		
Base	0.0175	0.0757	0.0233	0.1165	15/65/20	0.2307
P1	0.0233	0.0757	0.0175	0.1165	20/65/15	0.3076
P2	0.0291	0.0757	0.0116	0.1165	25/65/10	0.3846
S1	0.0175	0.0816	0.0175	0.1165	15/70/15	0.2142
S2	0.0175	0.0874	0.0116	0.1165	15/75/10	0.2000
S3	0.0175	0.0932	0.0058	0.1165	15/80/5	0.1875
Excess air = 15 % อัตราการป้อนเชิงมวลของชีวมวลฝุ่น = 0.0187 kg/s (300 kW) มุมองศาไบบิด = 100° ติดตั้ง Bluff body						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การจำลองเชิงคณิตศาสตร์ และผลการจำลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาและเงื่อนไขการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ก่อนที่จะทำการทดลองจริง ซึ่งจะทำให้เราคาดการณ์ถึงปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง สำคัญไปกว่านั้นคือสามารถประเมินความปลอดภัยได้ก่อนทำการทดลอง รวมไปถึงการอภิปรายผลการจำลองก่อนที่จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อตรวจสอบ (Validation) รูปแบบการจำลองที่มีความเชื่อถือได้มากน้อยเพียงใด อีกประการหนึ่งก็คือถ้าผลการจำลองนี้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองจริง จะทำให้เราสามารถอภิปรายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้จากผลที่ไม่สามารถวัดได้ในการทดลองจากการจำลองนี้

5.1 รูปแบบของการจำลอง

สำหรับรูปแบบการจำลองเชิงคณิตศาสตร์นี้สร้างขึ้นโดยแบ่งเป็น 2 โดเมน ได้แก่ โดเมนของของไหล (Fluid domain) และ โดเมนผนังปูน (Cement domain) รายละเอียดแสดงในรูปที่ 5.1 สำหรับสาเหตุที่ต้องมีโดเมนของผนังปูนก็คือ จะทำให้ประเมินผลของการถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้ภายใน Pre-chamber ได้ว่าจะทำให้เกิดความเสียหายเชิงความร้อน (Thermal damage) กับหัวเผาชีวมวลฝุ่นนี้แค่ไหน มากไปกว่านั้นจะทำให้รูปแบบการจำลองใกล้เคียงกับสถานะจริงมากขึ้นด้วย



รูปที่ 5.1 ลักษณะของรูปแบบของการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ประกอบด้วย โดเมนของไหล (ไม่แรงเงา)

และโดเมนผนังปูน (แรงเงาสีเขียว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 Mesh independent

สำหรับการสร้าง Mesh เนื่องจากรูปทรงหัวเผาชีวมวลฝุ่นนี้ค่อนข้างที่จะซับซ้อน เราจึงทำการสร้าง Mesh แบบ Polyhedra และสร้างขึ้น 2 แบบ Mesh คือ แบบหยาบ (Coarse) และแบบละเอียด (Fine) และนำผลจากการจำลองของ 2 แบบ Mesh ที่ต่างกันนี้มาเปรียบเทียบ เพื่อหาจำนวน Mesh ที่เหมาะสมกับการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งเงื่อนไขที่เลือกมาเพื่อทำ Mesh independent นี้ก็คือ Base case ในกรณีที่ไม่มีกรณีติดตั้ง Bluff body มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

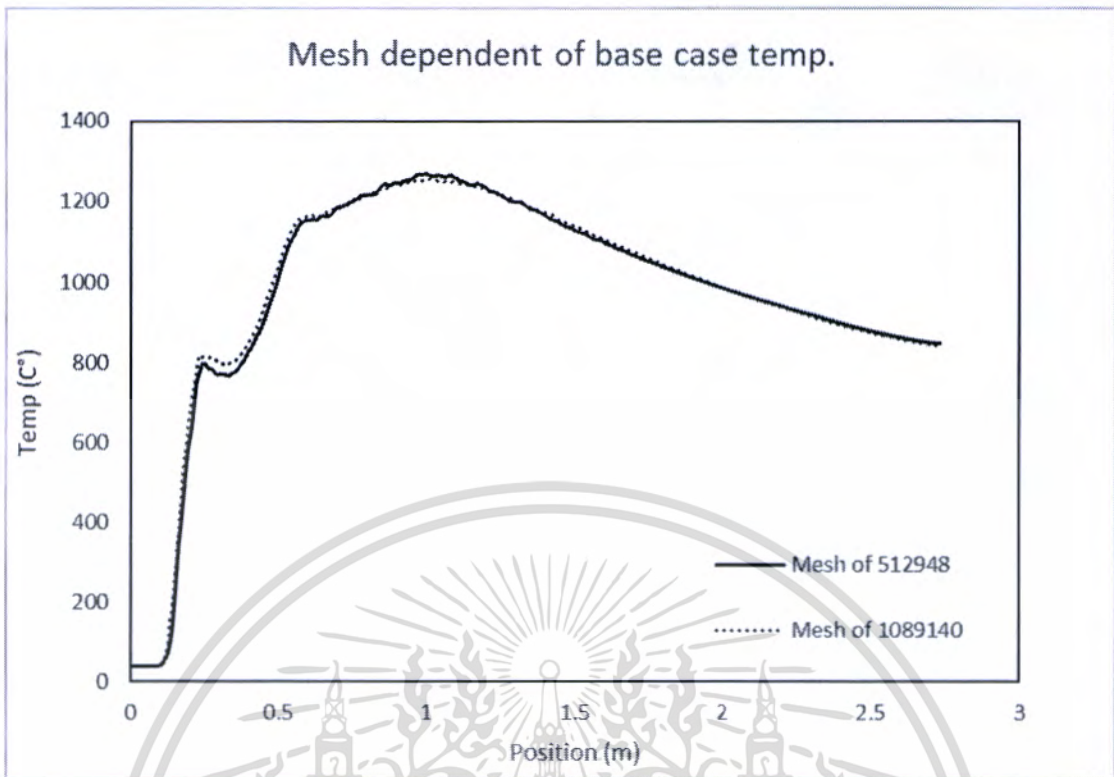
ตารางที่ 5.1 รูปแบบ Mesh สำหรับการทำ Mesh independent

Mesh	Number
Coarse	512984
Fine	1089140

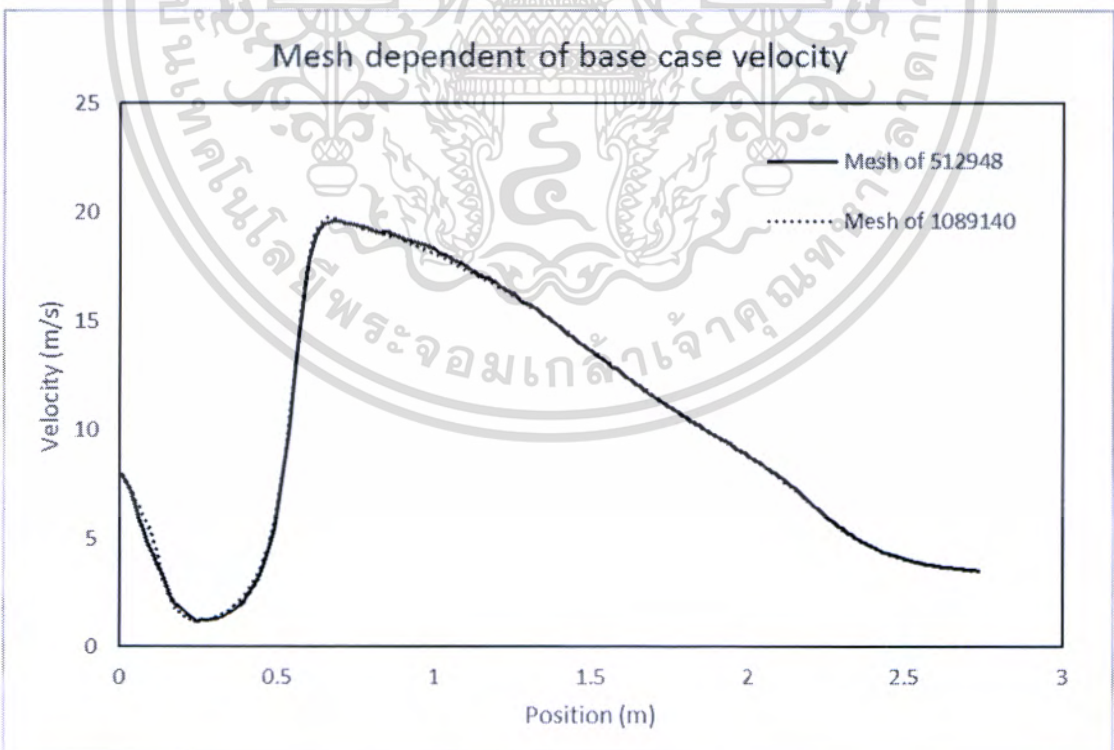


รูปที่ 5.2 ลักษณะของ Coarse mesh (บน) และ Fine mesh (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 กราฟการเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่าง Coarse mesh กับ Fine mesh



รูปที่ 5.4 กราฟการเปรียบเทียบความเร็วตามแนวแกนระหว่าง Coarse mesh กับ Fine mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทำ Mesh independent ในรูปที่ 5.2 และ 5.3 Coarse mesh และ Fine mesh ให้ผลการจำลองใกล้เคียงกันมาก บ่งบอกว่าถ้า Mesh มีจำนวนมากกว่า 512948 เซล คำตอบของการจำลองจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากนี้ ดังนั้นเราจึงทำการเลือกใช้ Mesh ที่มีจำนวน 512948 เซล ในการจำลองเชิงตัวเลขครั้งนี้ เนื่องจากสามารถประหยัดเวลาไปได้มากในการเข้าสู่คำตอบ และมันยังสามารถให้คำตอบได้แม่นยำไม่ต่างจาก Mesh ที่มีจำนวนมาก

5.3 การกำหนดเงื่อนไขการจำลองเชิงคณิตศาสตร์

เนื่องจากชีวมวลฝุ่นเป็นเชื้อเพลิงแข็งแบบจำลองการเผาไหม้นั้นจึงคล้ายคลึงกับแบบจำลองการเผาไหม้ของถ่านหิน นาย ธนภัทร์ ภักดีวรวงษ์ [5] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงฝุ่น โดยได้นำแบบจำลองการเผาไหม้ของถ่านหินฝุ่นมาประยุกต์ใช้กับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น และแบบจำลองการเผาไหม้ของถ่านหินฝุ่นสามารถใช้จำลองการเผาไหม้ของชีวมวลได้ฝุ่น โดยทำการเปลี่ยนพารามิเตอร์และคุณสมบัติต่างๆเป็นของเชื้อเพลิงชีวมวล เขาพบว่าแบบจำลองการเผาไหม้ชนิด Species Transport ให้ผลการทำนายที่แม่นยำกว่าแบบจำลองการเผาไหม้ Mixture Fraction สามารถใช้แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$ Standard เพื่อให้ได้คำตอบที่แม่นยำได้ การเพิ่ม Char Reaction (C_1 และ C_2) เป็น 2.5 เท่าของค่าเริ่มต้นผลของการจำลองนี้ให้ค่าของความเข้มข้นออกซิเจนใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้น และแบบจำลอง Random Walk มีแนวโน้มให้ผลลัพธ์สอดคล้องตามหลักกายภาพสำหรับการทำนายเส้นทางเดินอนุภาค ดังนั้นเราจึงใช้แบบจำลองการเผาไหม้ Species Transport แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$ Standard เพิ่มค่า C_1 และ C_2 เป็น 2.5 เท่า ใช้แบบจำลอง Random Walk และทั้งหมดเป็นการจำลองแบบสามมิติ (3D) ใน Steady state โดยโปรแกรม ANSYS FLUENT เวอร์ชัน 12.0

5.3.1 การกระจายตัวของขนาดเชื้อเพลิง (Particle size distribution)

ชีวมวลที่เป็นแท่งจะถูกบดผ่านตะแกรง 2 เส้นผ่านศูนย์กลางรู คือ 1.0 mm และ 0.5 mm ซึ่งเป็นงานวิจัยของ นาย พีระพัฒน์ เทพลิบ [41] และผลการ Sieve analysis แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 Particle size distribution

ขนาด (ไมโครเมตร)	% (โดยน้ำหนัก)
37.50	9.20
112.5	8.10
165.0	9.40
240.0	18.4
327.5	9.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 Particle size distribution (ต่อ)

ขนาด (ไมโครเมตร)	% (โดยน้ำหนัก)
390.0	9.40
712.5	35.8

5.3.2 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) และ Kinetic parameters สำหรับการเผาไหม้

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และ Kinetic parameters ได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.3 ด้านล่าง

ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองเชิงคณิตศาสตร์

Parameters	Value
<u>Primary air inlet</u>	
Mass flow rate (kg/s)	ตารางที่ 4.6
Fuel flow (kg/s)	0.0187
Temperature (°C)	40.000
Hydraulic diameter (m)	0.0525
O ₂ Species mass fractions	0.2315
<u>Secondary air inlet</u>	
Mass flow rate (kg/s)	ตารางที่ 4.6
Temperature (°C)	40.000
Hydraulic diameter (m)	0.0830
O ₂ Species mass fractions	0.2315
<u>Tertiary air inlet</u>	
Mass flow rate (kg/s)	ตารางที่ 4.6
Temperature (°C)	40.000
Hydraulic diameter (m)	0.0830
O ₂ Species mass fractions	0.2315
<u>Outlet</u>	
Pressure (Pa)	-1500.0
Back flow temperature (°C)	900.00
Back flow hydraulic diameter (m)	0.4100
O ₂ Species mass fractions	0.2315

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (ต่อ)

Parameters	Value
<u>Furnace wall</u>	
Temperature (°C)	900.00
Internal emissivity (ปูนทนไฟ)	0.7500
<u>Kinetic parameters</u>	
Devolatilization, E_A (J/kg-mol)	6.80×10^7
Pre-Exponential Factor of Devolatilization	382000
Kinetics-Limited Rate, E_A (J/kg-mol)	7.90×10^7
Kinetics-Limited Rate Constant (C_1)	1.25×10^{-11}
Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor (C_2)	0.0050

5.4 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์และการอภิปราย

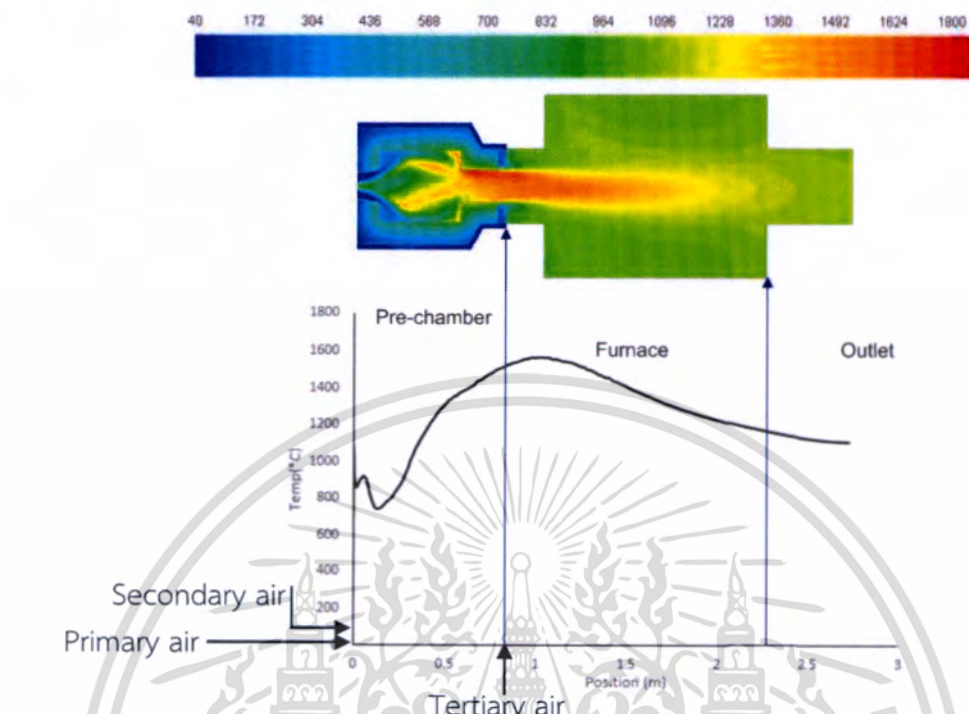
ในการอภิปรายผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ จะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็น Base case โดยส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ใช้เปรียบเทียบกับทุกๆ Case ต่อไปคือส่วนของ Case P1 และ Case P2 ส่วนนี้จะเป็นส่วนที่มีการเพิ่มอากาศ Primary อากาศ Secondary คองที และลดอากาศ Tertiary เหมือนกัน สุดท้าย คือกรณี อากาศ Primary คองที เพิ่มอากาศ Secondary และลดอากาศ Tertiary กำหนดเป็น Case S1 Case S2 และ Case S3

5.4.1 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Base Case

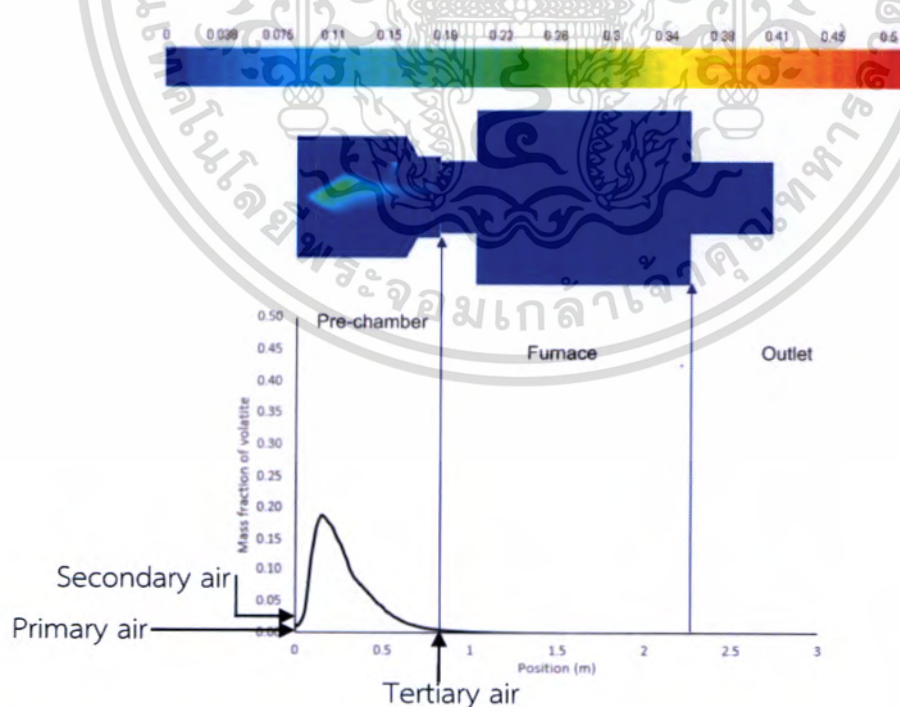
ผลการจำลองของ Base case จะถูกใช้เป็นตัวเปรียบเทียบสำหรับทุกๆ Case จากการกระจายตัวของอุณหภูมิและอุณหภูมิตามแนวแกนในรูปที่ 5.5 พบว่าการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเป็นที่น่าพอใจ โดยเชื้อเพลิงจะเริ่มติดไฟตั้งแต่ Bluff body สังเกตจากการที่มีการปลดปล่อยสารระเหย การบริโภคออกซิเจน และการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นบริเวณนี้ในรูปที่ 5.6 5.7 และ 5.8 ทั้งนี้เนื่องจากกระแสลมย้อนกลับที่มีความเร็วค่อนข้างมากบริเวณ Bluff body ทำให้เกิดความปั่นป่วนและการคลุกเคล้ากันที่ตระหว่างอากาศกับชีวมวลฝุ่น ทำให้เราเห็นอุณหภูมิบริเวณนี้สูงกว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้ง Bluff body และอุณหภูมิตามแนวแกนจะต่ำลงในช่วงตำแหน่ง 0.09 – 0.20 m เนื่องจากบริเวณนี้เกิด IRZ ขึ้น ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วการไหลและความปั่นป่วนของแก๊สค่อนข้างที่จะน้อย ต่อมาจะเผาไหม้อย่างรุนแรงที่คอคอดเพราะบริเวณนี้จะเกิดปรากฏการณ์ที่คล้ายๆกับทางออกของหัวฉีด (Nozzle) กล่าวคือมีการไหลมาบรรจบกันของแก๊สร้อน ซึ่งมีความเร็วและความปั่นป่วนสูงมาก ดังรูปที่ 5.9 5.10 และ 5.11 การเผาไหม้ก็ยังดำเนินต่อไปภายใน Furnace และสิ้นสุดลงอย่างช้าๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยยังคงมีอนุภาคคาร์บอนขนาด 165.0- 712.5 ไมโครเมตรเหลืออยู่แสดงในรูปที่ 5.12 ทำให้
อุณหภูมิบริเวณทางออกของ Furnace มีค่าสูง และเปลวไฟค่อนข้างยาว



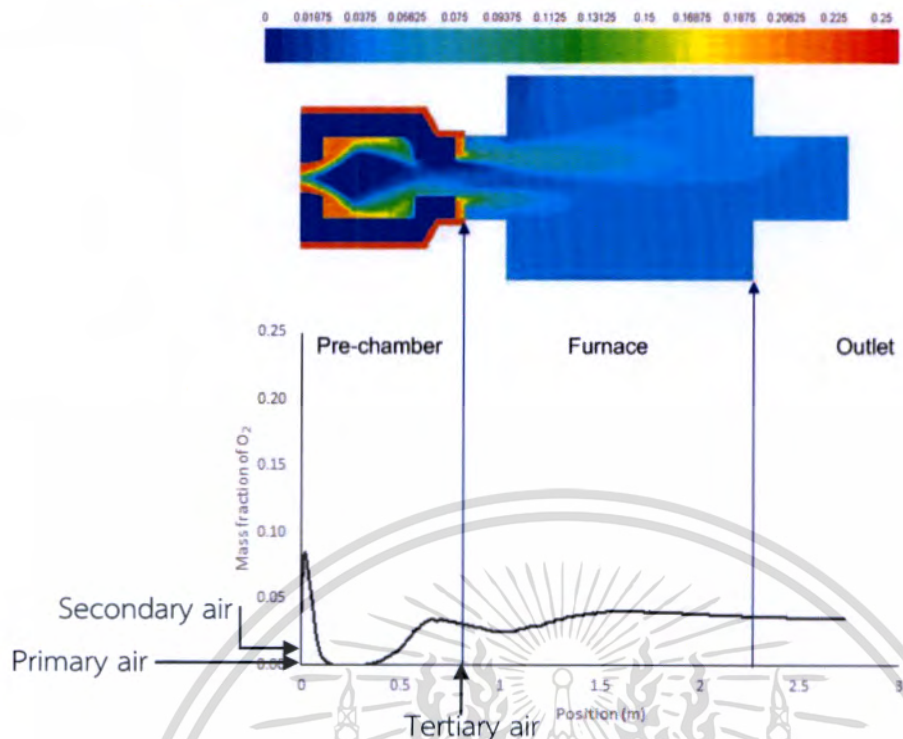
รูปที่ 5.5 กราฟอุณหภูมิตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวอุณหภูมิของ Base case



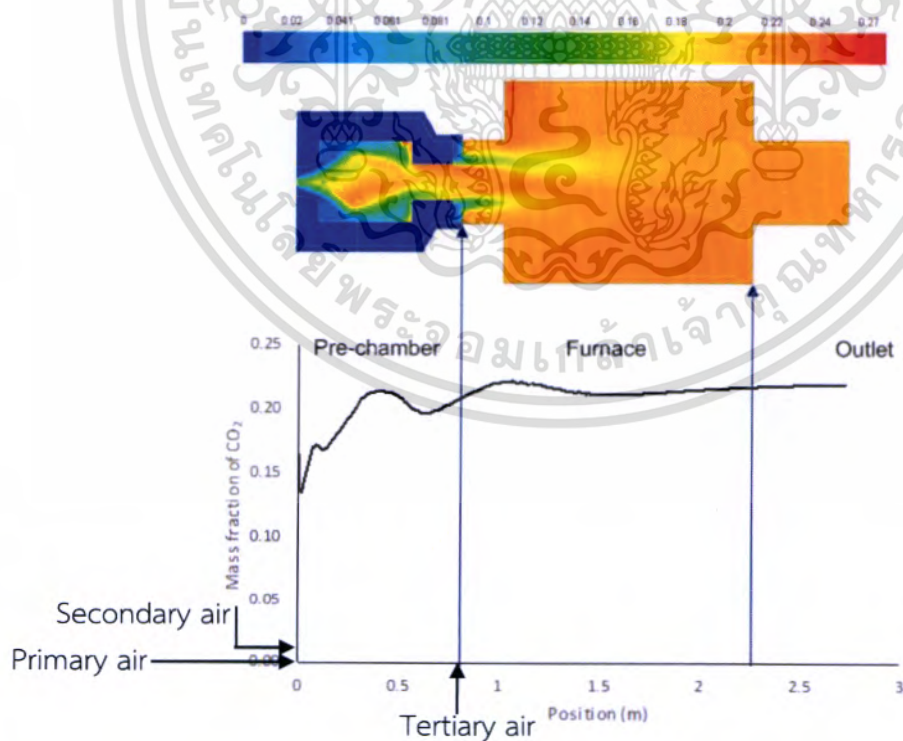
รูปที่ 5.6 กราฟสัดส่วนเชิงมวลของสารระเหยตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วนเชิงมวล

สารระเหยของ Base case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



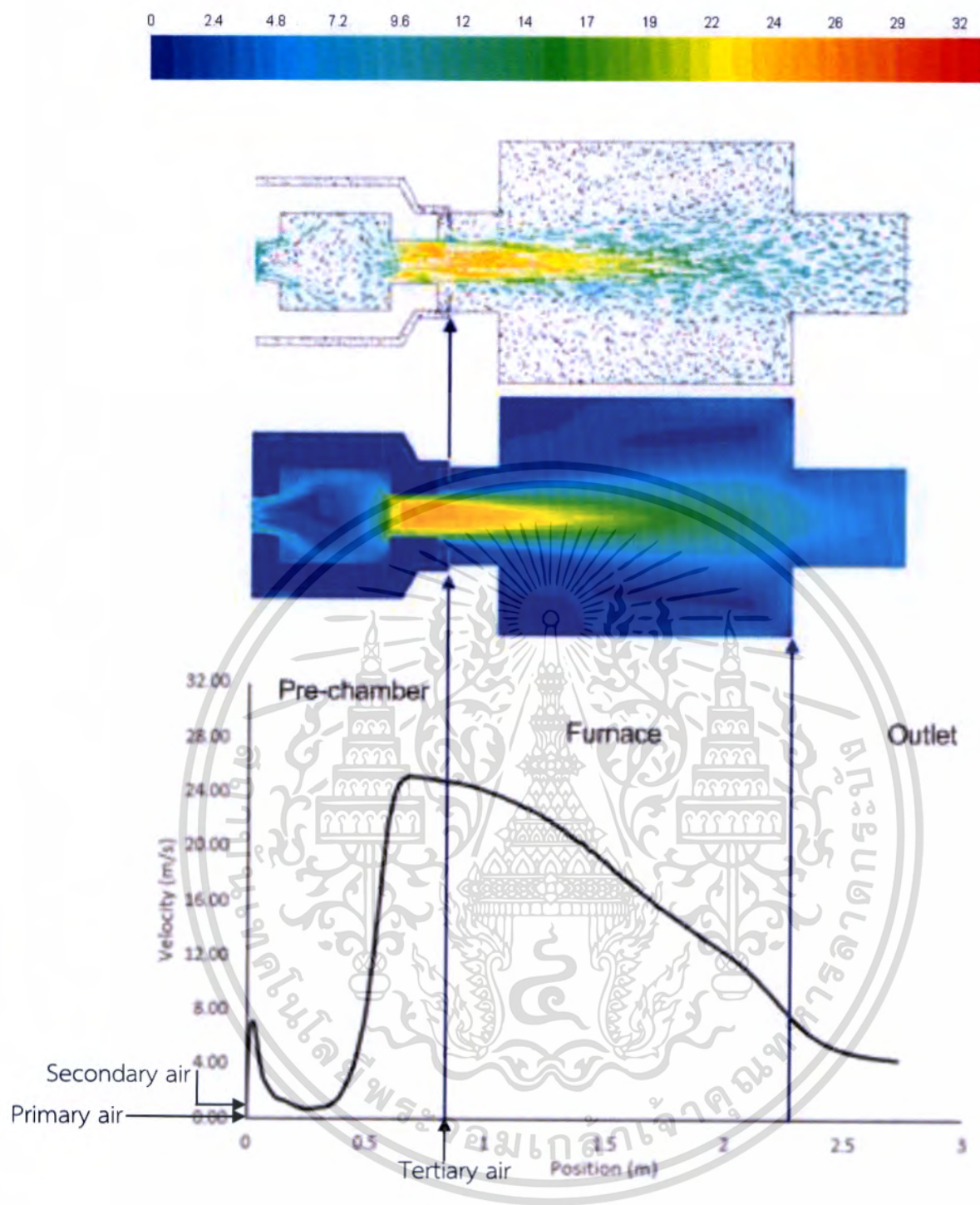
รูปที่ 5.7 กราฟสัดส่วนเชิงมวลของออกซิเจนตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วนเชิงมวลออกซิเจนของ Base case



รูปที่ 5.8 กราฟสัดส่วนเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วน

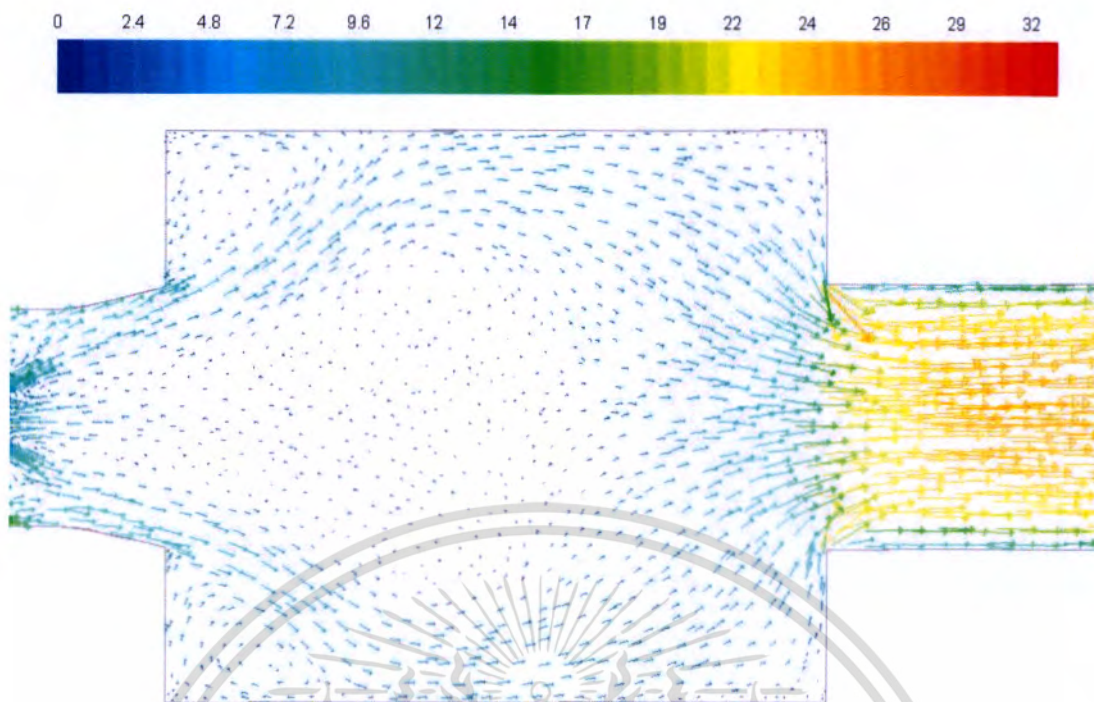
เชิงมวลคาร์บอนไดออกไซด์ของ Base case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

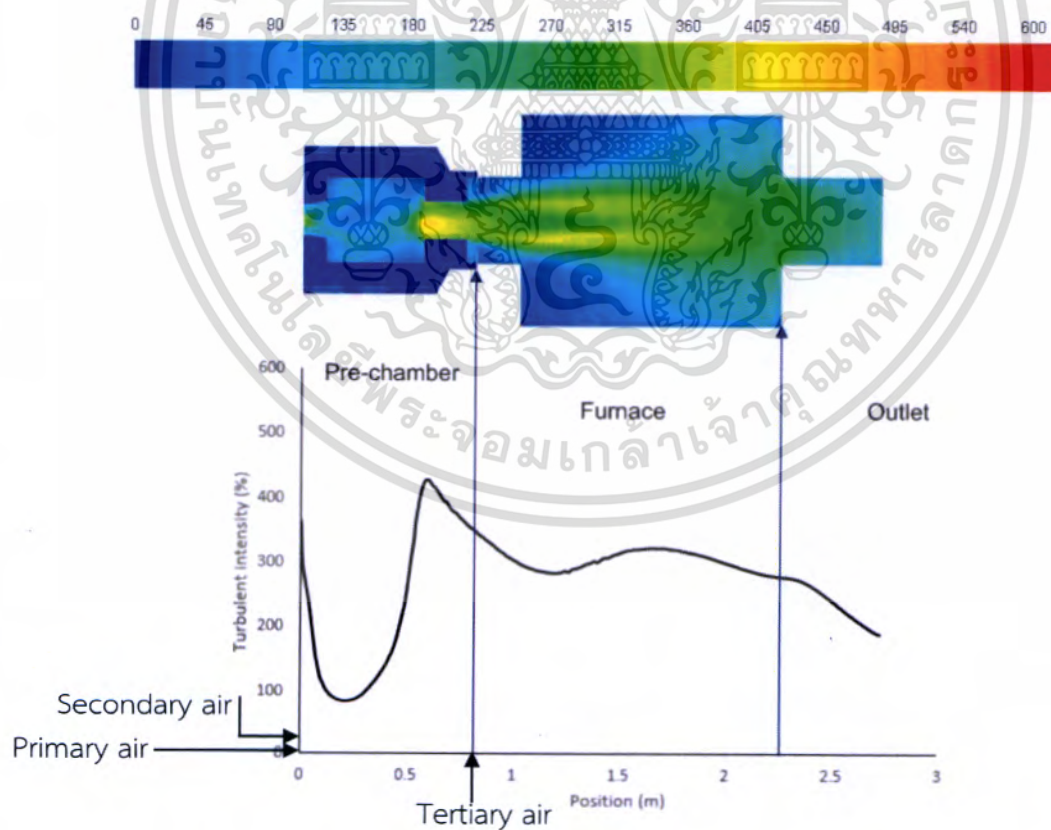


รูปที่ 5.9 กราฟความเร็วแก๊สตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวความเร็วและเวกเตอร์แก๊ส (m/s) ของ Base case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



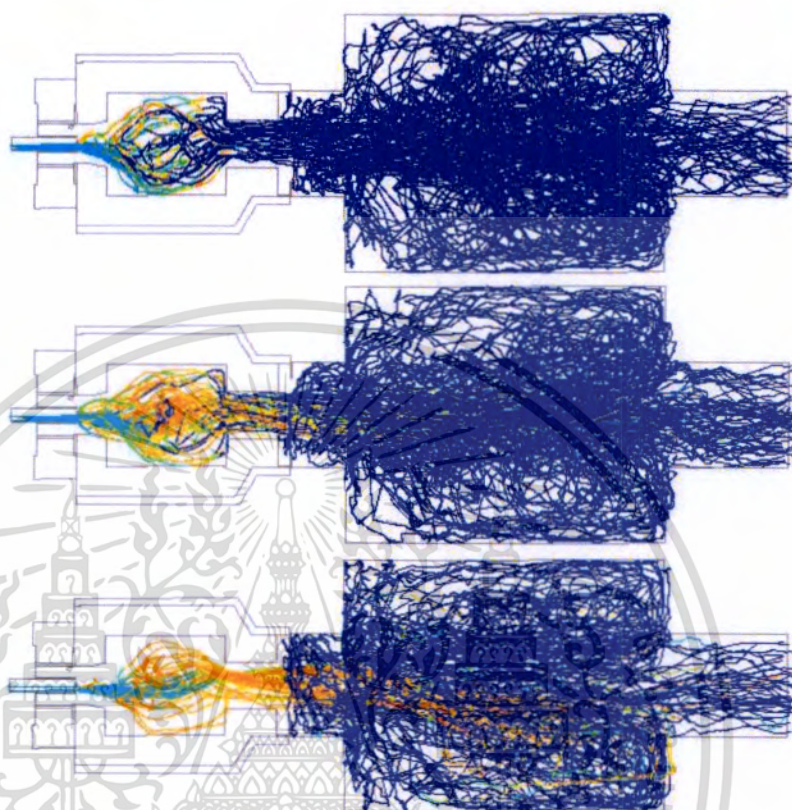
รูปที่ 5.10 การกระจายเวกเตอร์แก๊ส (m/s) ภายใน Pre-chamber ของ Base case



รูปที่ 5.11 กราฟความเข้มความปั่นป่วนตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวความเข้มความปั่นป่วน

ของ Base case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



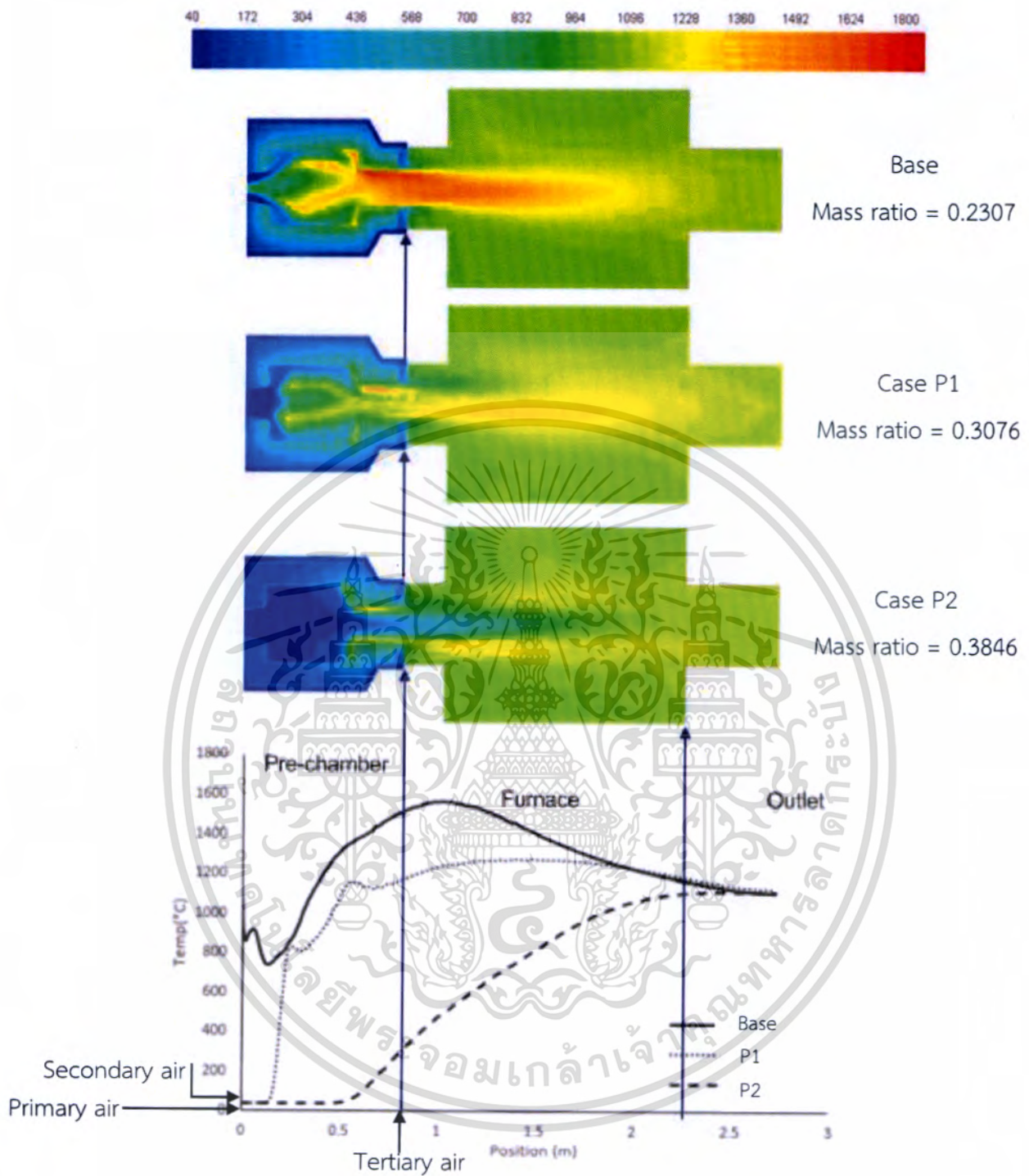
รูปที่ 5.12 เส้นทางเดินในรูปแบบสัดส่วนเชิงมวลอนุภาคซาร์ของ Base case (ขนาด 37.5-112.5 (บน), 165.0-327.5(กลาง), 390.0-712.5 (ล่าง) ไมโครเมตร)

5.4.2 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Case P1 และ Case P2

การจำลองของ Case P1 และ Case P2 คือการกำหนดให้อากาศ Secondary คงที่ ซึ่งคือกำหนดให้การหมุนควงของอากาศ (Swirl air) คงที่นั่นเอง และเพิ่มอากาศ Primary ซึ่งก็คืออากาศที่ช่วยพ่นชีวมวลฝุ่นเข้าไปใน Pre-chamber และลดอากาศในส่วนที่ช่วยหล่อเย็นผิวของหัวเผาเลยคืออากาศ Tertiary การทำเช่นนี้จากรูปที่ 5.13 ที่ mass ratio เป็น 0.3076 พบว่าอุณหภูมิตามแนวแกนใน Pre-chamber และ Furnace ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่อุณหภูมิกลับเพิ่มขึ้นในช่วงตำแหน่งเป็น 2 m ขึ้นไปนั่นคือบริเวณ Outlet และในการกระจายตัวของอุณหภูมิก็บ่งบอกได้ว่ามันทำให้การเผาไหม้ไม่ได้เริ่มเกิดขึ้นบริเวณ Bluff body แต่จะมาเริ่มปลดปล่อยสารระเหยและเผาไหม้ที่ตำแหน่งประมาณ 0.2 m เนื่องจากอุณหภูมิที่บริเวณตำแหน่งนี้มีอัตราการเพิ่มขึ้นสูงมาก ซึ่งสอดคล้องกับการบริโภคออกซิเจนและการเกิดขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปที่ 5.14 5.15 และ 5.16 ตามลำดับ เมื่อมาพิจารณารูปที่ 5.17 5.18 และ 5.19 บ่งบอกว่า IRZ ที่ตื้นนั้นสามารถทำให้อุณหภูมิเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตไหนาเปเซประเษณดานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

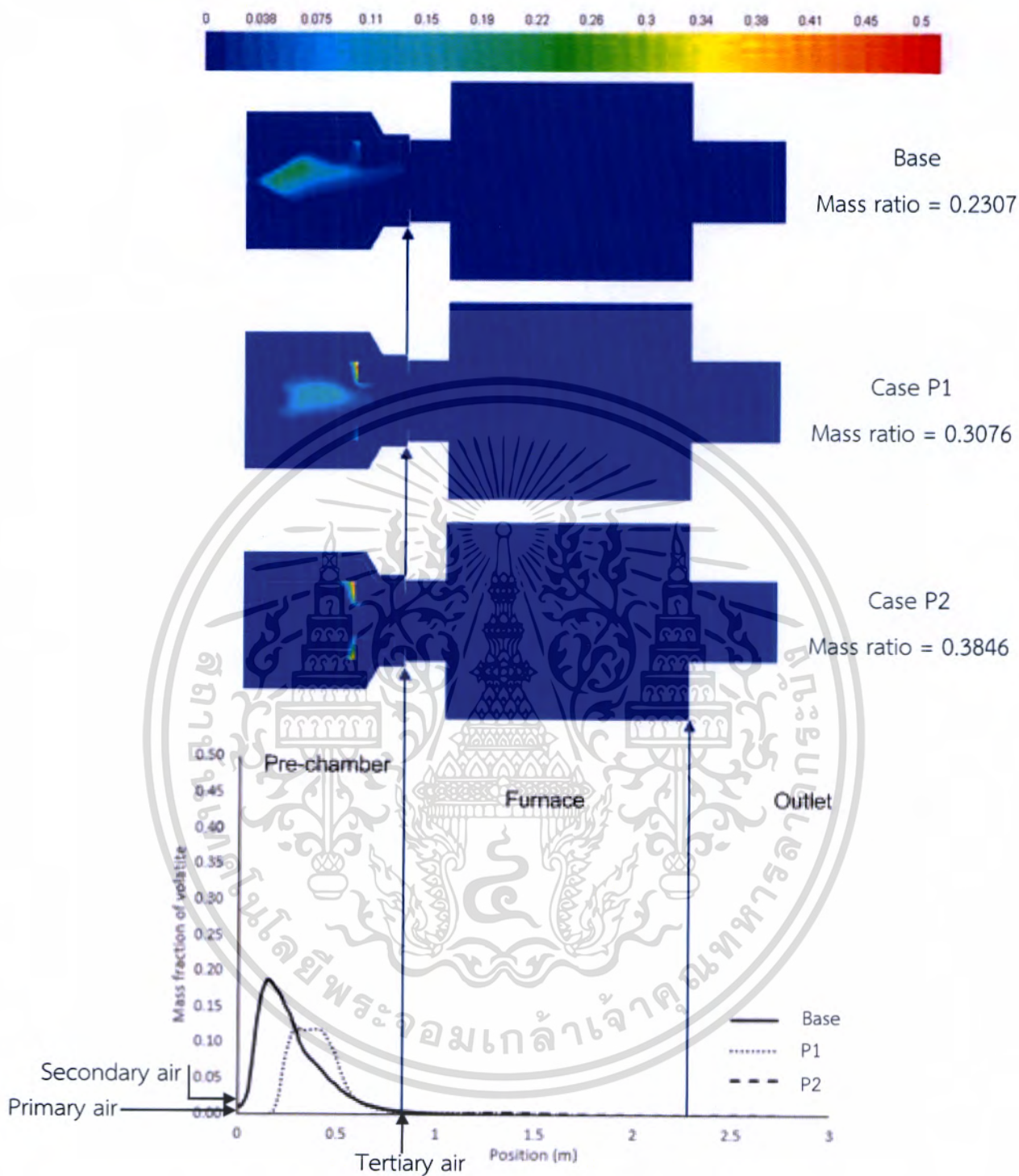
ความเร็วตามแนวแกนของแก๊สมีค่าน้อยใน Pre-chamber และมีค่ามากที่บริเวณคอคอด เนื่องจากว่า IRZ นี้จะทำหน้าคล้ายๆกับ Bluff body เบี่ยงทิศทางการไหลให้แก๊สไหลไปบริเวณใกล้ผนังทำให้พื้นที่การไหลแคบลงความเร็วที่คอคอดจึงเพิ่มขึ้น แต่ความเร็วตามแนวแกนภายใน Pre-chamber จะลดลง เมื่อโมเมนต์ของอากาศ Primary เพิ่มขึ้นดัง Case P1 มันจึงมีความสามารถที่จะเอาชนะกระแสย้อนการไหลกลับใน IRZ ได้ ทำให้ความเป็น IRZ ลดลง ความเร็วในของแก๊สใน Pre-chamber จึงมากขึ้น แต่ที่บริเวณคอคอดนั้นจะลดลงตาม ส่งผลให้ความปั่นป่วนน้อยลงด้วยดังรูปที่ 5.20 จึงทำให้การคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงน้อย อุณหภูมิบริเวณ Pre-chamber และ Furnace ต่ำลง และทำให้มีอนุภาคคาร์บอนเหลือมากกว่า สังเกตได้ในรูปที่ 5.21 ดังนั้นอุณหภูมิในบริเวณ Outlet จะสูงขึ้นและมีเปลวไฟที่ยาว เมื่อมีการเพิ่ม mass ratio ขึ้นไปอีกเป็น 0.3846 ใน Case P2 จะเห็นว่า IRZ ถูกทำลายไปอย่างเห็นได้ชัดด้วยโมเมนต์ที่มากของอากาศ Primary ดังรูปที่ 5.19 (ล่าง) ทำให้ความเร็วการไหลของแก๊สมีค่าสูงใน Pre-chamber แต่ในบริเวณคอคอดนั้นมีค่าน้อยลงจนใกล้เคียงกับความเร็วของอากาศ Primary ที่พุ่งออกมาจากท่อ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ Residence time ของเชื้อเพลิงมีค่าน้อยเพราะว่าเชื้อเพลิงจะถูกเหนี่ยวนำออกจาก Pre-chamber อย่างรวดเร็วโดยเกิดการเผาไหม้และมีการปลดปล่อยสารระเหยออกน้อยมาก แสดงได้ด้วยการกระจายตัวของอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยมวลของสารระเหยดังรูปที่ 5.13 และ 5.14 ตามลำดับ ทำให้ปริมาณออกซิเจนใน Pre-chamber มีปริมาณเยอะแต่เมื่อเข้าไปใน Furnace แล้วจะมีอากาศ Tertiary มาผสมจึงทำให้เกิดการเผาไหม้มากขึ้น ปริมาณออกซิเจนจึงลดลงและเกิดการคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ว่าเนื่องจาก IRZ ถูกทำลายไปทำให้กระแสอากาศหมุนควงมีน้อยมาก เชื้อเพลิงกับแก๊สที่ออกมา Pre-chamber จึงพุ่งมาเป็นลำตรงตามแนวแกนด้วยความเร็วจากการจำลองประมาณ 13 m/s โดยไม่มีการหมุนควงคลุกเคล้ากันที่ตีพ้อและมีความเข้มความปั่นป่วนในแนวแกนน้อย ดังรูปที่ 5.20 (ล่าง) บริเวณนี้จึงเข้าใกล้ปรากฏการณ์เป่าดับ (Blow off effect) แต่ดูจากการกระจายตัวของอุณหภูมิแล้วอุณหภูมิจะสูงในแนวรัศมีที่ห่างจากแนวแกนออกไป เนื่องจากว่าบริเวณนี้เกิดการเผาไหม้ด้วยความปั่นป่วนที่เกิดจากผนังทางออกของ Furnace และทำอุณหภูมิที่ Outlet มีค่าสูงขึ้นจนเข้าใกล้กับ Base case และ Case P1 ด้วยการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอน แต่ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมดทำให้อนุภาคคาร์บอนของ Case P2 หลงเหลือและหลุดออกไปจาก Furnace มากที่สุดดังตารางที่ 5.4 โดยเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่สุดสังเกตได้ในรูปที่ 5.21 เป็นที่น่าสนใจอีกอย่างในกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณผนังทางออก Pre-chamber ของ Base case Case P1 และ Case P2 จะมี Hotspots เกิดขึ้น เป็นเพราะว่ามีอนุภาคเชื้อเพลิงวิ่งไปชนผนังนี้จำนวนมาก จึงมีการปลดปล่อยสารระเหยและเผาไหม้เกิดขึ้นบริเวณนี้ ซึ่งจะมีผลต่อความปลอดภัยในการใช้งานจริง และความทนทานของหัวเผาชีวมวลฝุ่นนี้จึงเป็นอีกปัจจัยที่เราได้นำเข้ามาพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



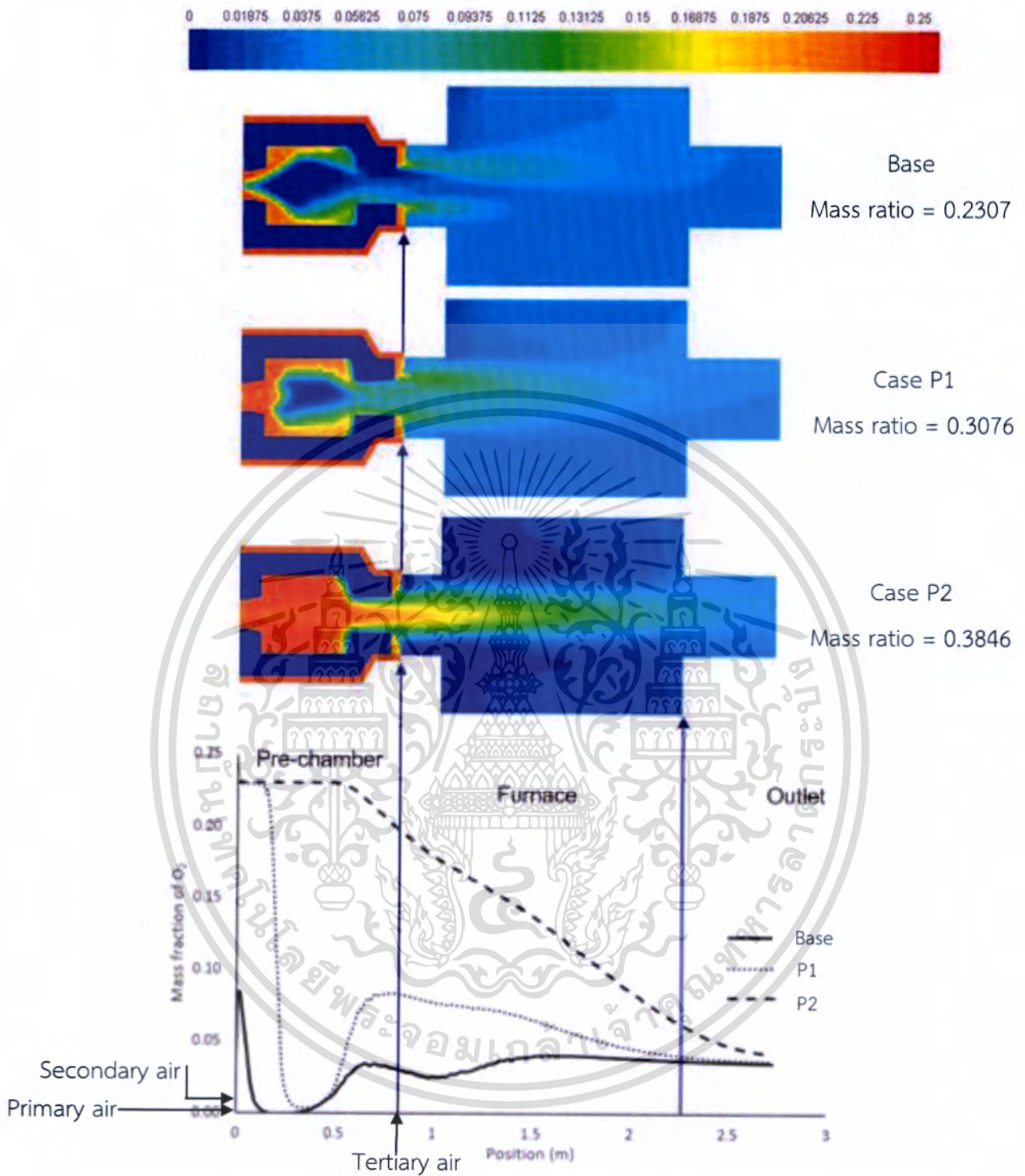
รูปที่ 5.13 กราฟอุณหภูมิตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวอุณหภูมิของ Base case, Case P1 และ Case P2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



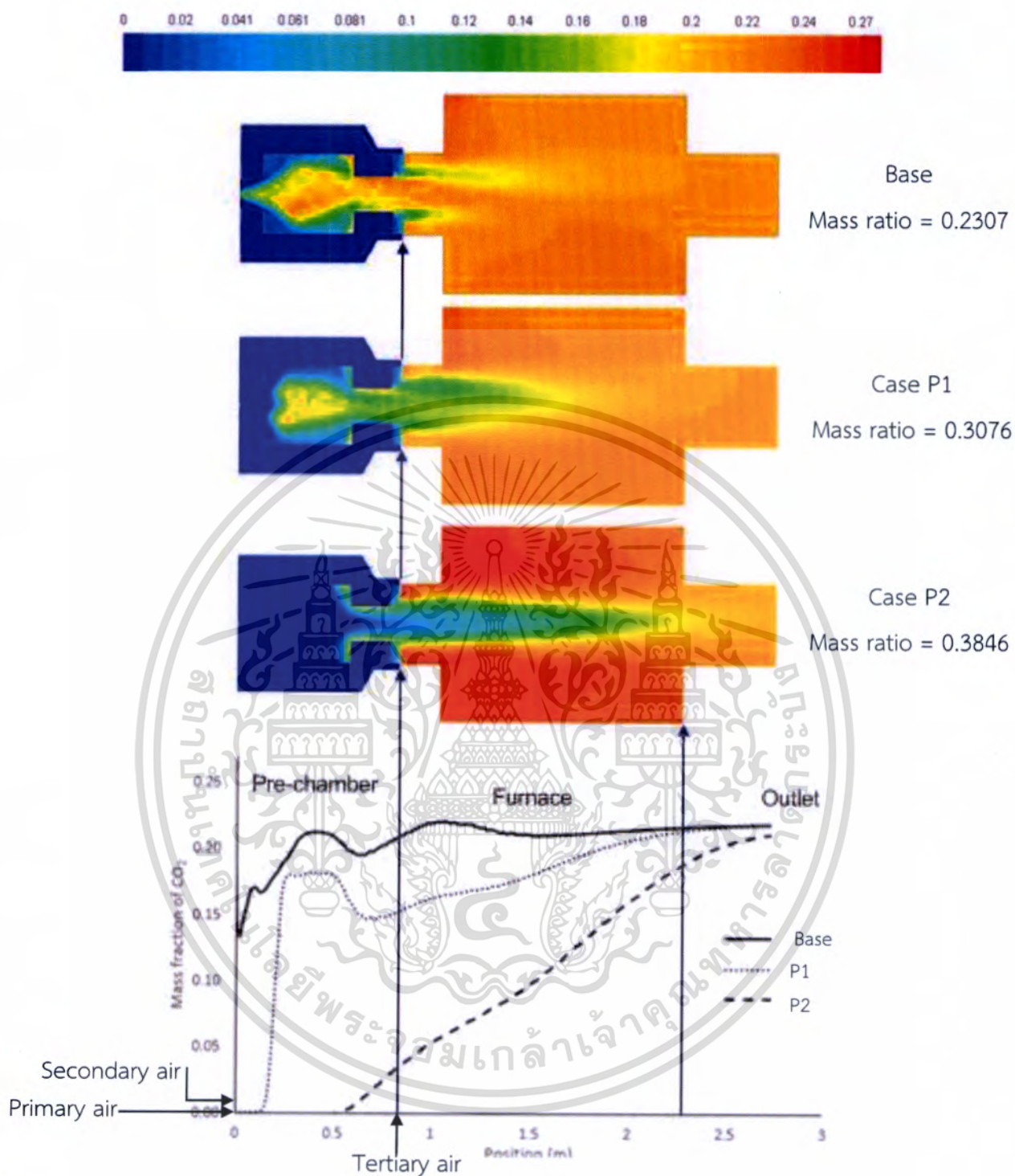
รูปที่ 5.14 กราฟสัดส่วนโดยมวลสารระเหยตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วนโดยมวลสารระเหยของ Base case, Case P1 และ Case P2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



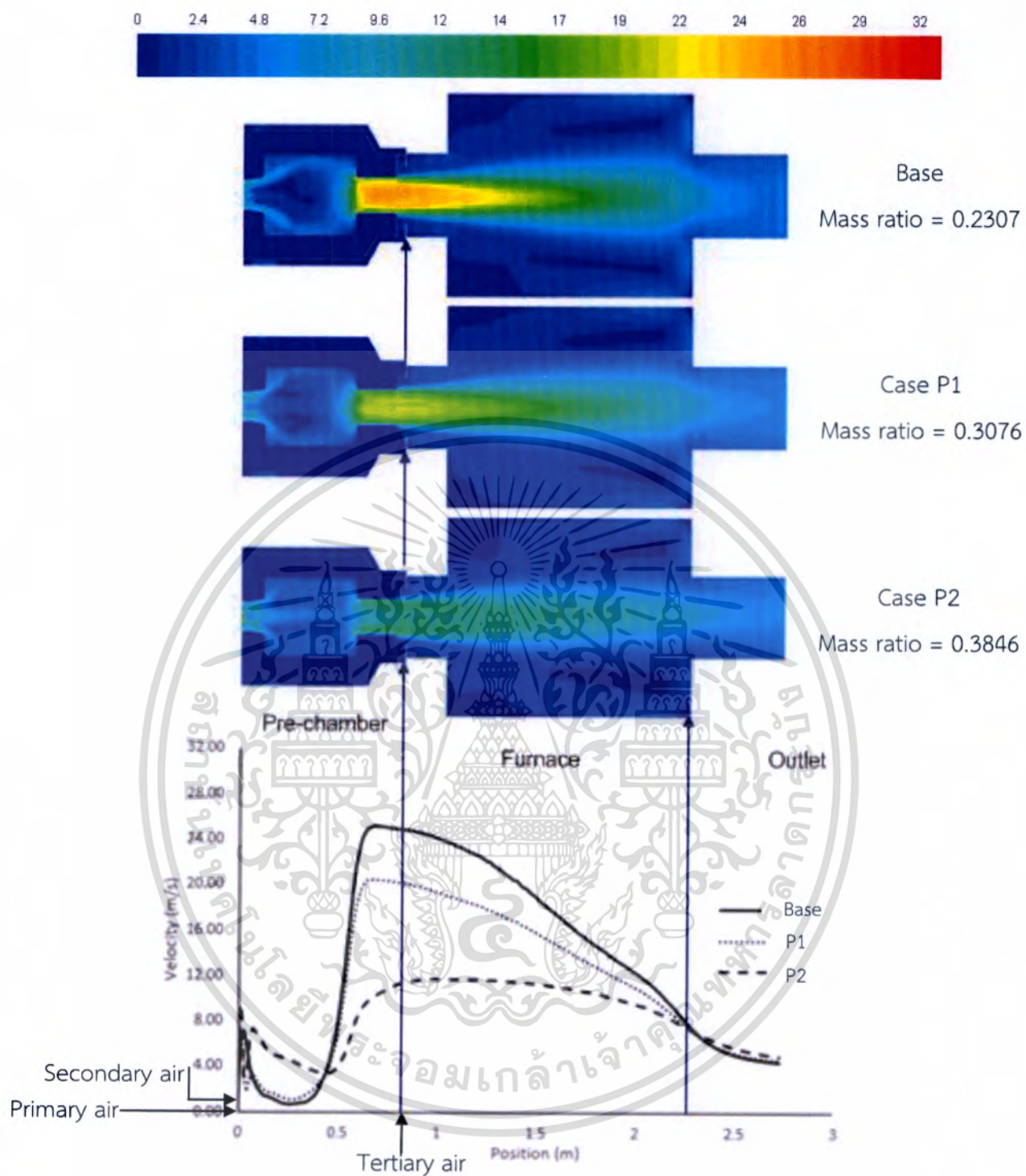
รูปที่ 5.15 กราฟสัดส่วนโดยมวลออกซิเจนตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วนโดยมวลออกซิเจนของ Base case, Case P1 และ Case P2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



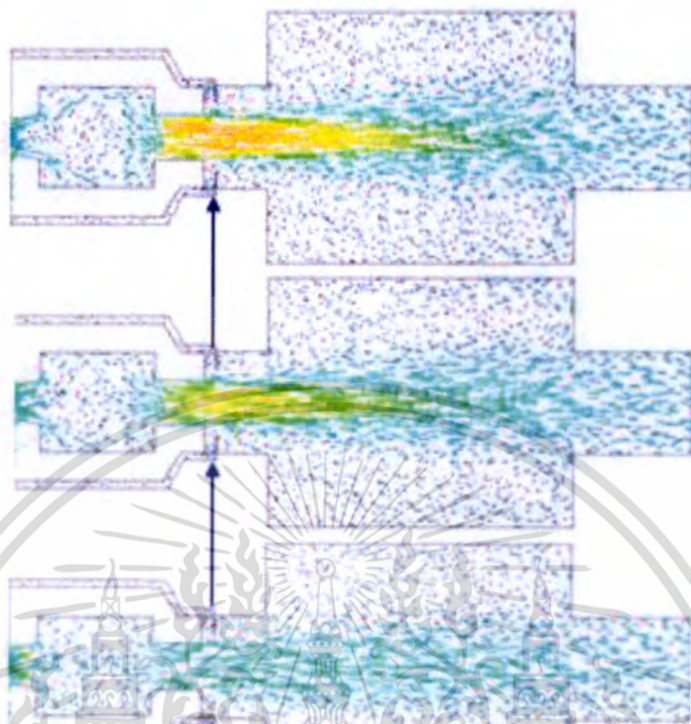
รูปที่ 5.16 กราฟสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วน
โดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ของ Base case, Case P1 และ Case P2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 กราฟความเร็วแก๊สตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวความเร็วแก๊สของ Base case, Case P1 และ Case P2

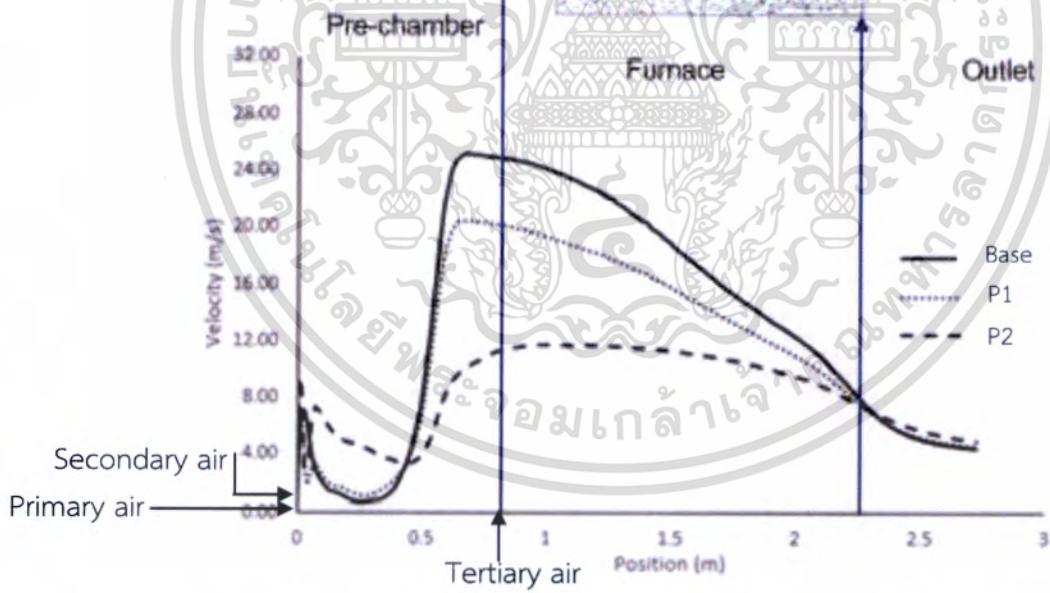
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Base
Mass ratio = 0.2307

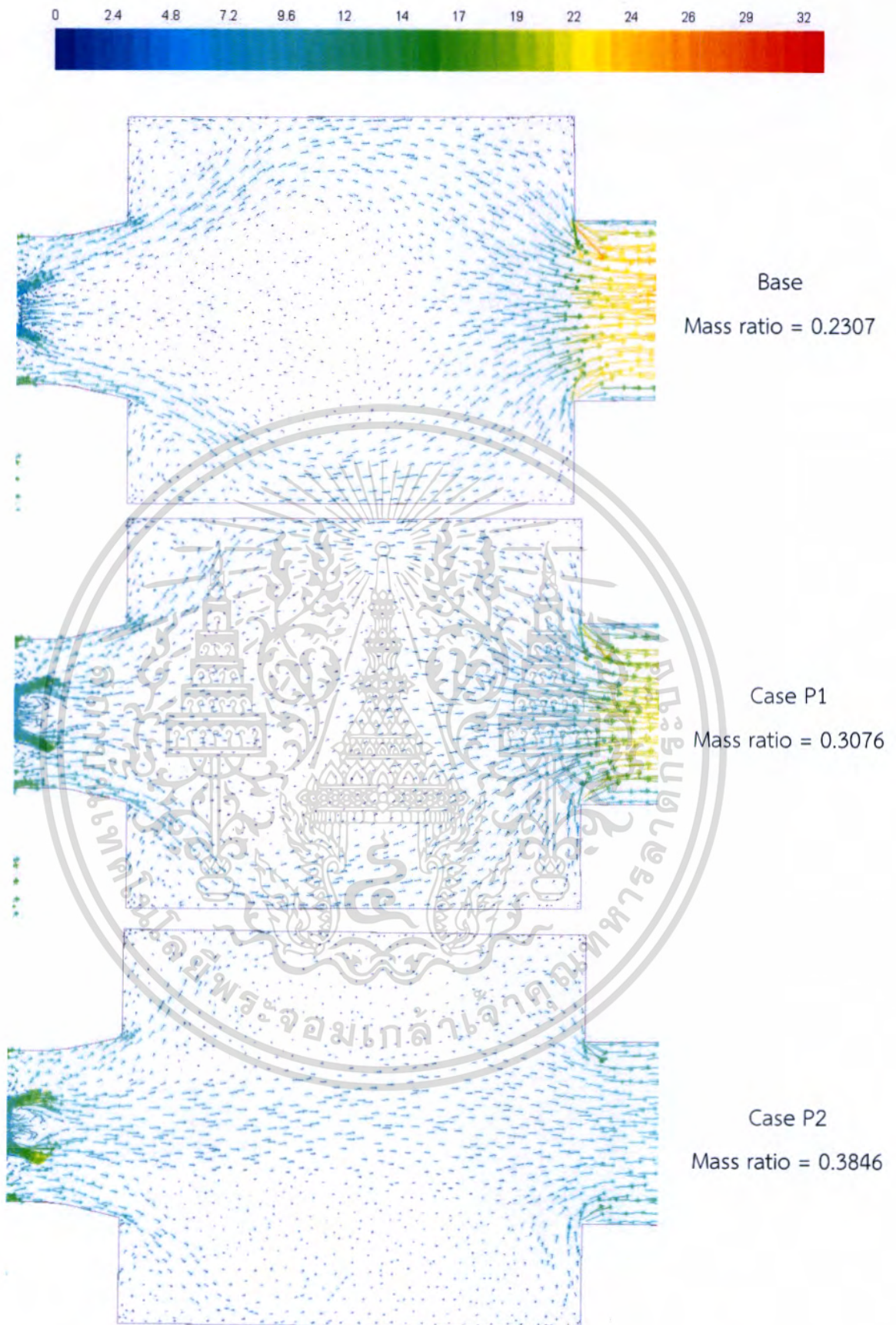
Case P1
Mass ratio = 0.3076

Case P2
Mass ratio = 0.3846



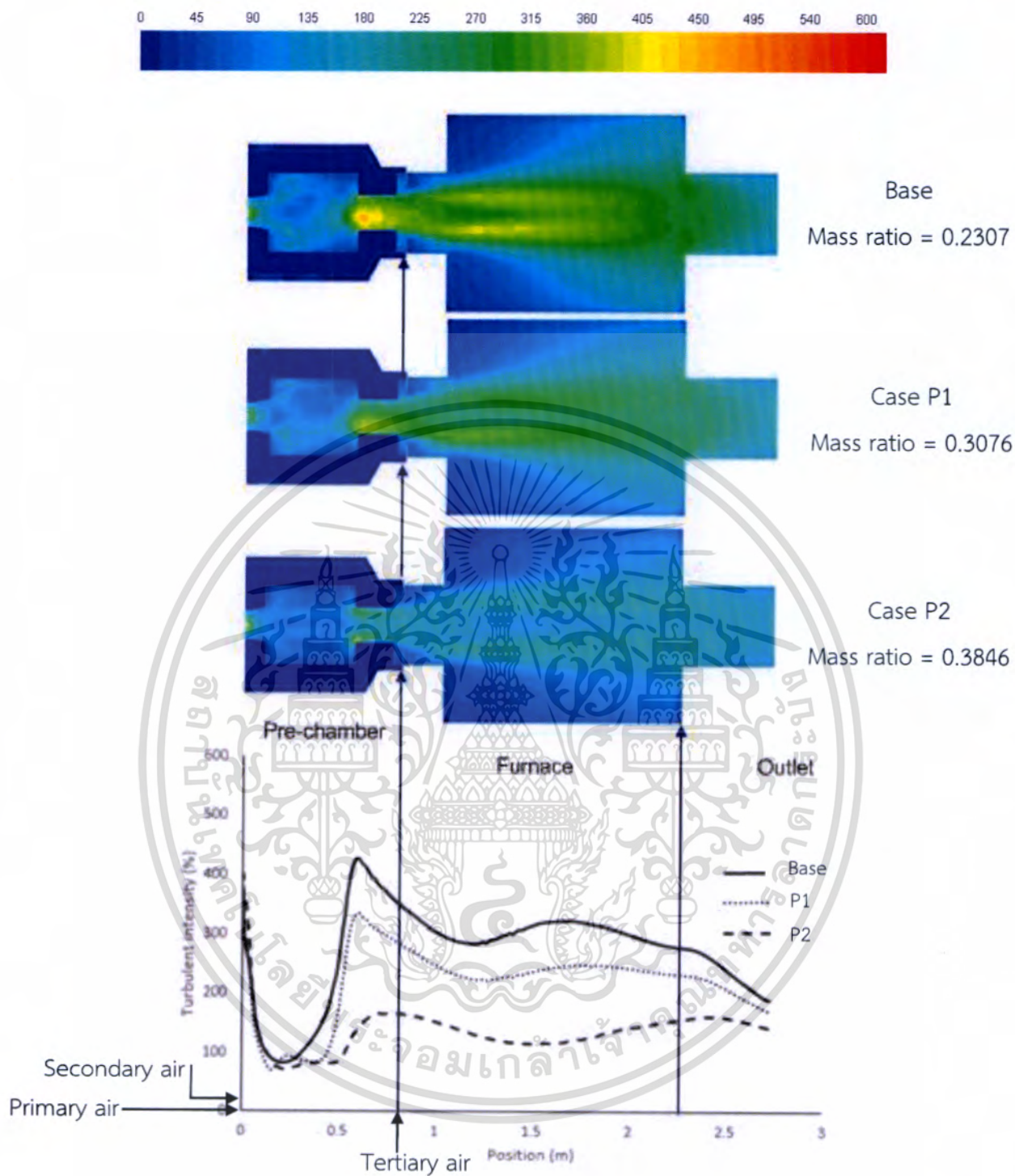
รูปที่ 5.18 กราฟความเร็วแก๊สตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวทิศทางความเร็วแก๊สของ Base case, Case P1 และ Case P2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



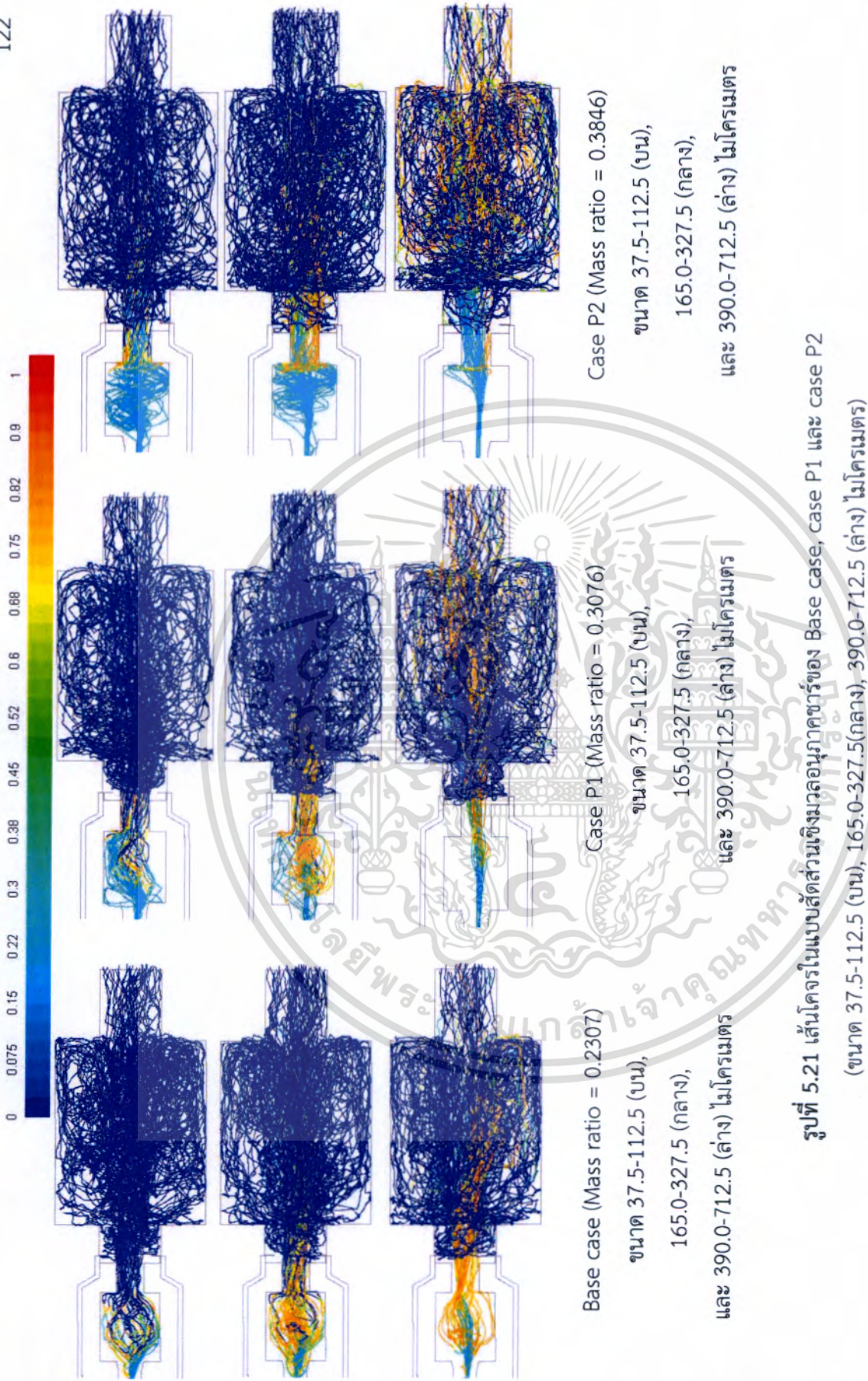
รูปที่ 5.19 การกระจายตัวทิศทางความเร็วแก๊สของ Base case (บน), Case P1 (กลาง) และ Case P2 (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 กราฟความเข้มความปั่นป่วนตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวความเข้มความปั่นป่วนของ Base case, Case P1 และ Case P2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



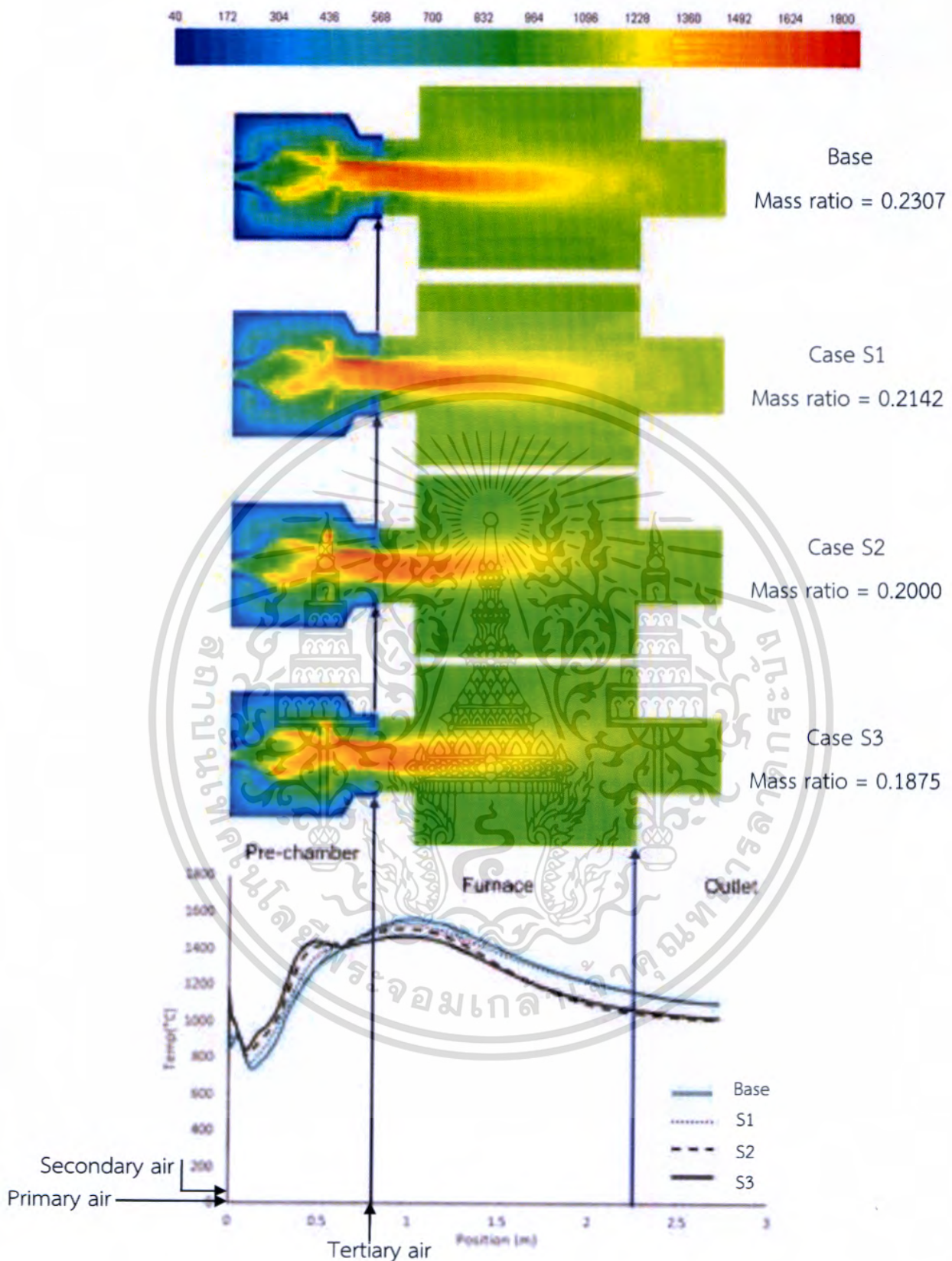
รูปที่ 5.21 เส้นโคจรในแบบตัดส่วนเชิงมุมอนุภาคของ Base case, case P1 และ case P2 (ขนาด 37.5-112.5 (บน), 165.0-327.5(กลาง), 390.0-712.5 (ล่าง) ไมโครเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 ผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Case S1 Case S2 และ Case S3

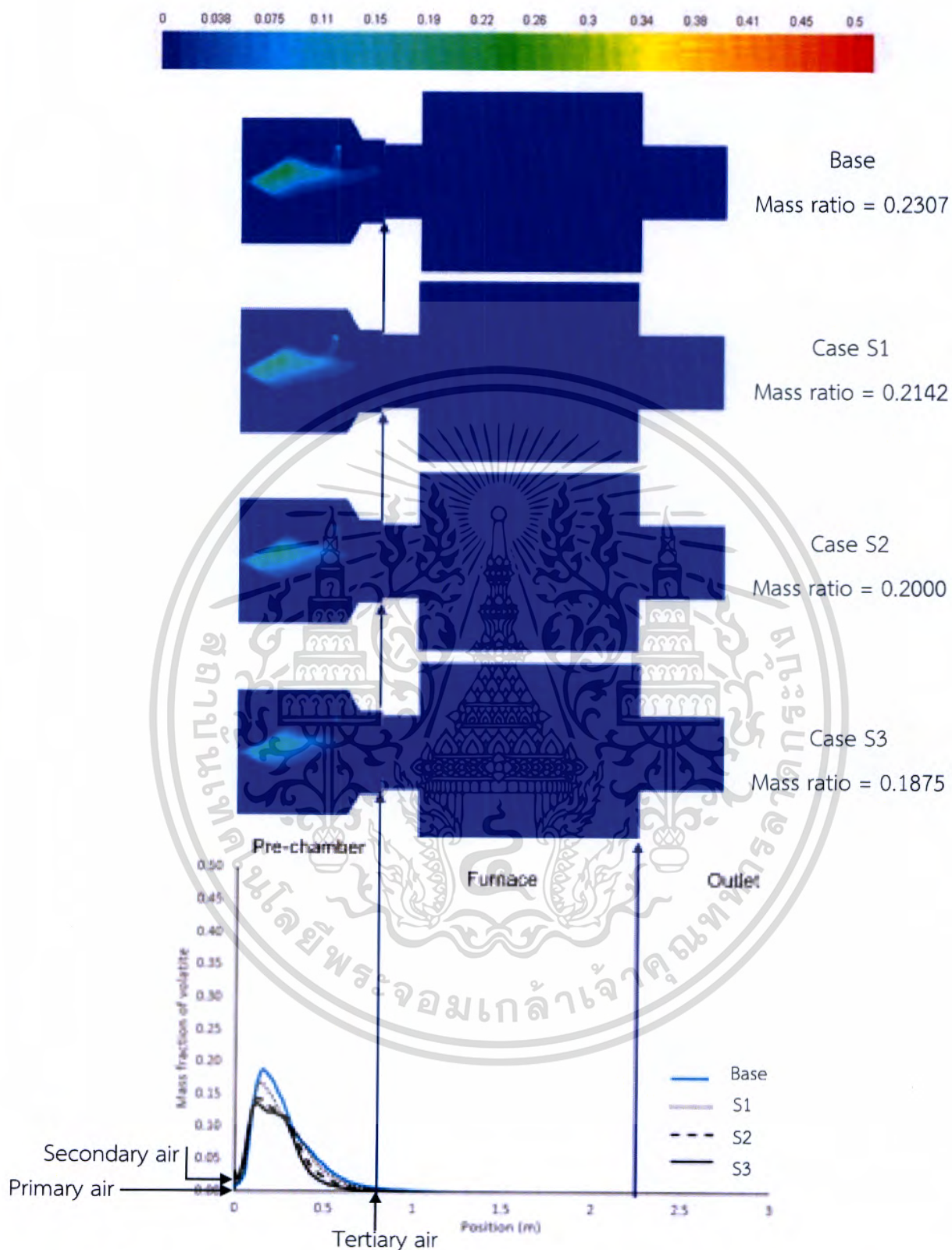
จากผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Base case, Case P1 และ Case P2 เราพบว่า การเพิ่มขึ้นของ Mass ratio ทำให้การเผาไหม้ออกไปสู่ทางที่แย่ง โดยมีอุณหภูมิตามแนวแกนต่ำลง และมีอนุภาคคาร์บอนเหลือมากขึ้น ดังนั้นเราจึงกำหนดอัตราการไหลของอากาศ Primary ให้คงที่ โดยกำหนดให้น้อยที่สุดเท่าที่ระบบรับได้คือ 15 % และมาศึกษาอิทธิพลของอากาศ Secondary โดยมีสมมติฐานว่า “เมื่ออัตราการไหลของอากาศ Secondary เพิ่มขึ้นจะทำให้มีการหมุนควงภายใน Pre-chamber และ Furnace มากขึ้นตาม เกิดการคลุกเคล้าที่ดีขึ้นระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น” ในรูปที่ 5.22 จากการจำลองเมื่อ Mass ratio น้อยลงจาก 0.2307 เป็น 0.2142 พบว่าการเผาไหม้มีเสถียรภาพที่ดีกว่าโดยอุณหภูมิใน Pre-chamber จะเพิ่มขึ้นมาเฉลี่ยแล้วประมาณ 4.12 % ส่วนใน Furnace และ Outlet จะลดลง 0.77 และ 0.06 % ตามลำดับ เพราะทำให้เกิดการเผาไหม้มากขึ้นใน Pre-chamber และทำให้อนุภาคคาร์บอนบริเวณ Furnace และ Outlet น้อยลงแสดงดังตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.30 ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 5.26 5.27 และ 5.28 ซึ่งเกิดจากโมเมนตัมของอากาศ Secondary เพิ่มขึ้น จึงทำให้แก๊สที่อยู่ภายใน Pre-chamber เกิดการหมุนควงและกระแสไหลย้อนกลับ รวมทั้งความเร็วที่บริเวณผนังของ Pre-chamber และบริเวณคอคอด ไปจนถึงความเข้มของความปั่นป่วน (รูปที่ 5.29) มากขึ้นตาม ดังนั้นเชื้อเพลิงจะมี Residence time ภายใน Pre-chamber ที่มากพอที่จะทำให้การคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศมีมากกว่า Base case และการทำให้แห้ง (Drying) การปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization) และการเผาไหม้ของคาร์บอน (Char oxidation) จะเกิดขึ้นเร็วกว่า จึงสามารถตอบสมมติฐานได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศ Secondary เพิ่มขึ้นโดยอากาศ Primary คงที่ การเผาไหม้นั้นจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นจริง ซึ่งสอดคล้องกับกราฟแสดงค่าตามแนวแกนและการกระจายตัวของ อัตราส่วนโดยมวลของสารระเหย ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 5.23 5.24 และ 5.25 ตามลำดับ ดังนั้นเราจึงทำการลด Mass ratio ลงอีกเป็น 0.2000 และ 0.1875 ซึ่งอยู่ใน Case S2 และ Case S3 ตามลำดับ พบว่าการเผาไหม้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็นไปดังสมมติฐานด้วยเหตุผลเดียวกันกับที่ได้อธิบายไว้ด้านบน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Case S3 โดยอุณหภูมิตามแนวแกนเฉลี่ยใน Pre-chamber มีค่าสูงที่สุดเนื่องจากความปั่นป่วนใน Pre-chamber มีค่าสูงที่สุดมาจากที่เราเพิ่มโมเมนตัมเชิงมุมของอากาศ Secondary ซึ่งอุณหภูมิตามแนวแกนเฉลี่ยใน Pre-chamber เพิ่มขึ้นมาจาก Base case ประมาณ 15.12 % และที่ Outlet จะมีค่าใกล้เคียงกับ Case S2 อย่างมากคือประมาณ 1040 °C ซึ่งลดลงจาก Base case 8.05 % เนื่องจาก Case S2 และ Case S3 จะมี Aerodynamic ที่คล้ายคลึงกัน โดยมีความปั่นป่วนสูงมากและมีอากาศ Tertiary ค่อนข้างน้อยทำให้ได้รับผลกระทบจากแรงลอยตัว (Buoyancy force) ทำให้เปลวไฟลอยและมีการสลับ [10] เหมือนกัน แต่การสลับไม่มีความรุนแรงและอยู่ในช่วงที่รับได้ มากไปกว่านั้นยังมี % Burn out ของคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดค่อนข้างใกล้เคียงกันด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



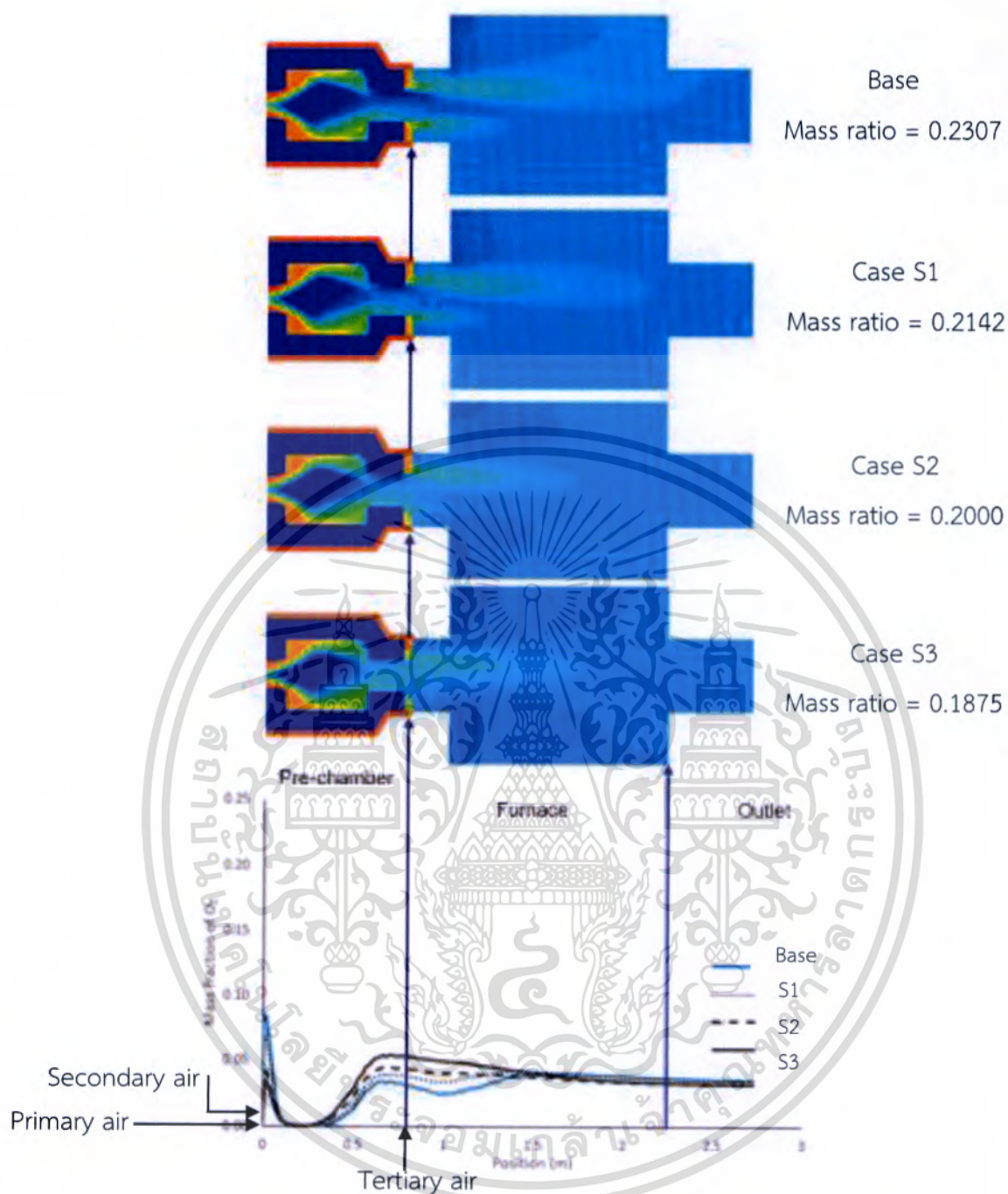
รูปที่ 5.22 กราฟอุณหภูมิตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวอุณหภูมิของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



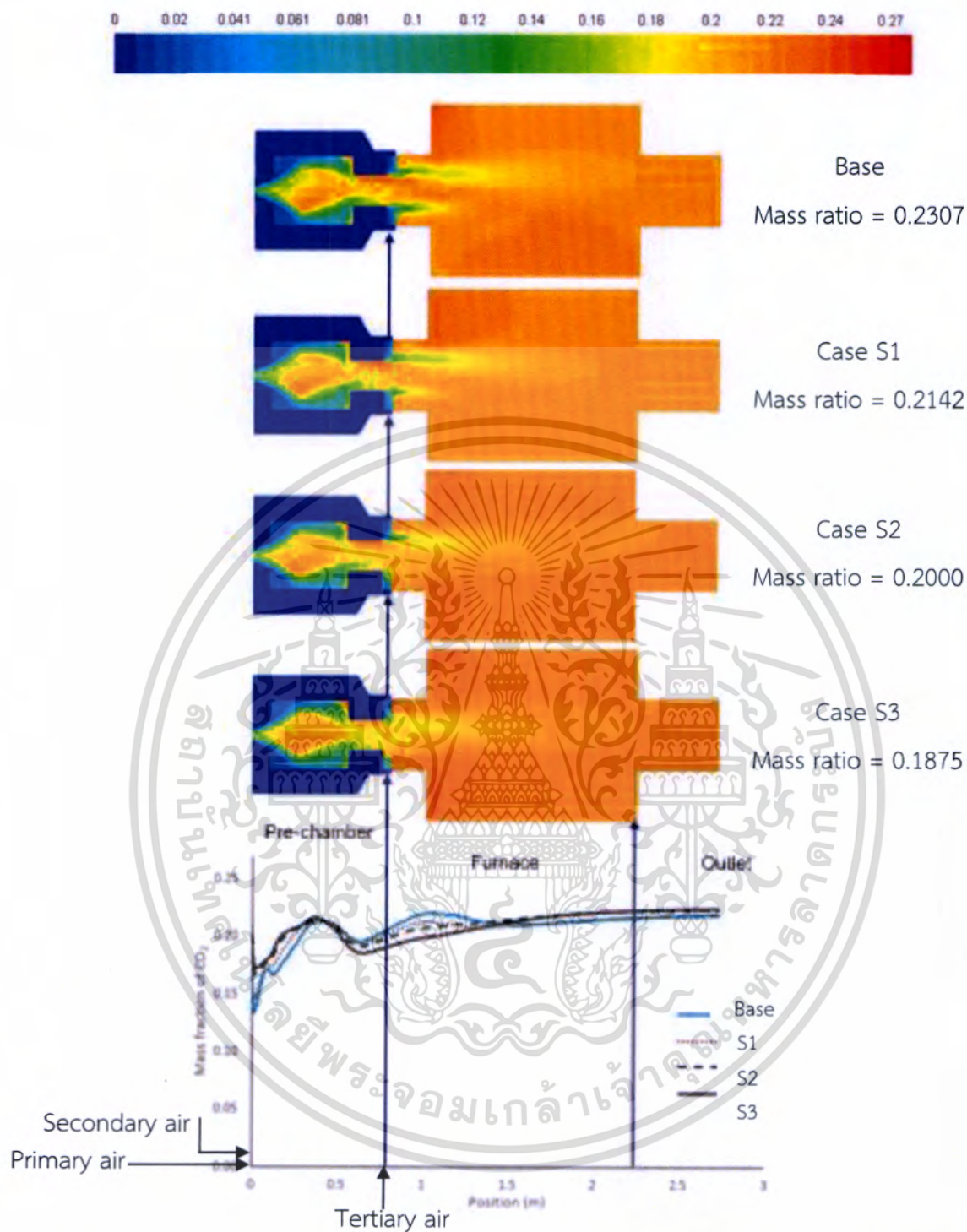
รูปที่ 5.23 กราฟสัดส่วนโดยมวลสารระเหยตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วนโดยมวลสารระเหยของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



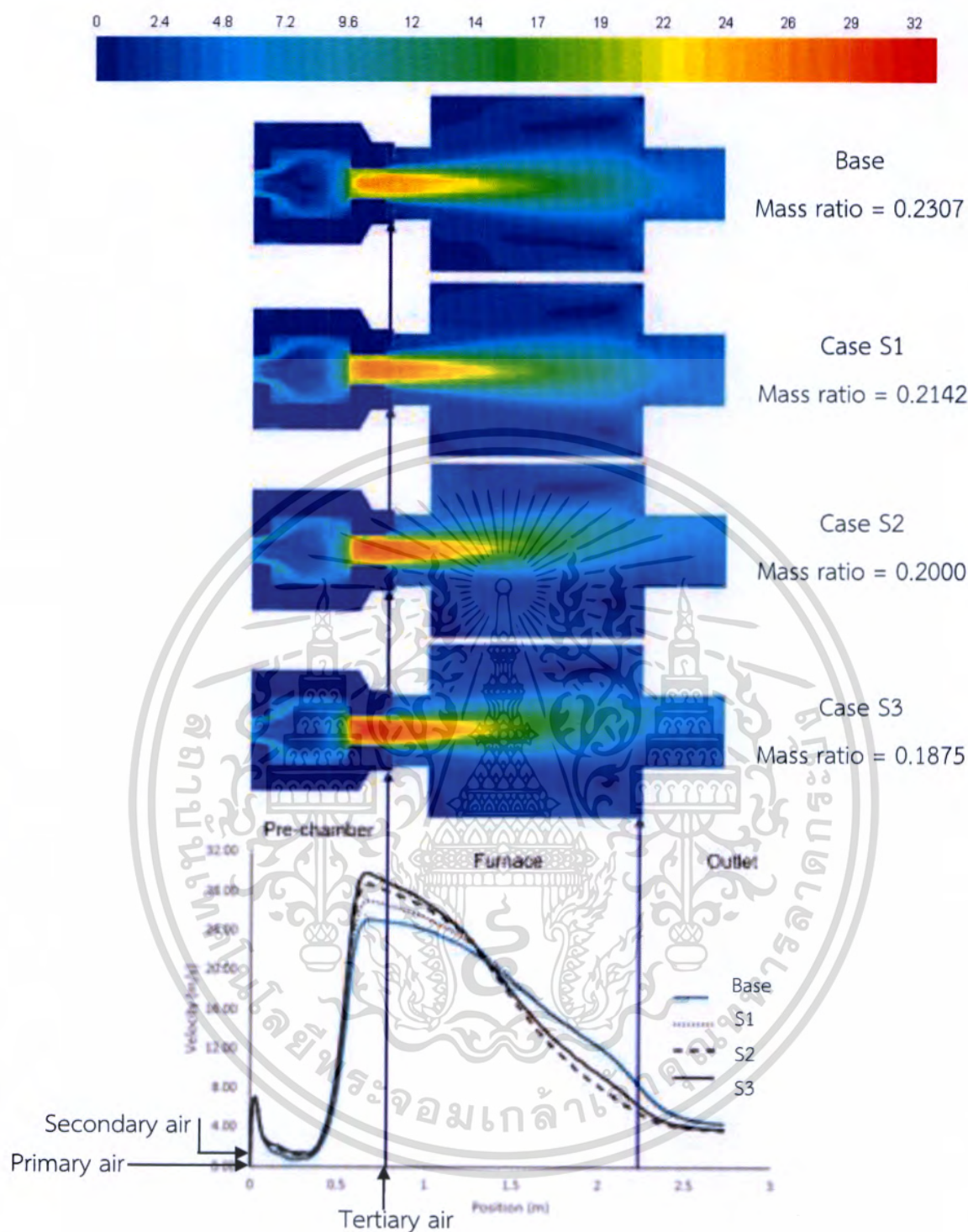
รูปที่ 5.24 กราฟสัดส่วนโดยมวลออกซิเจนตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วนโดยมวลออกซิเจนของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



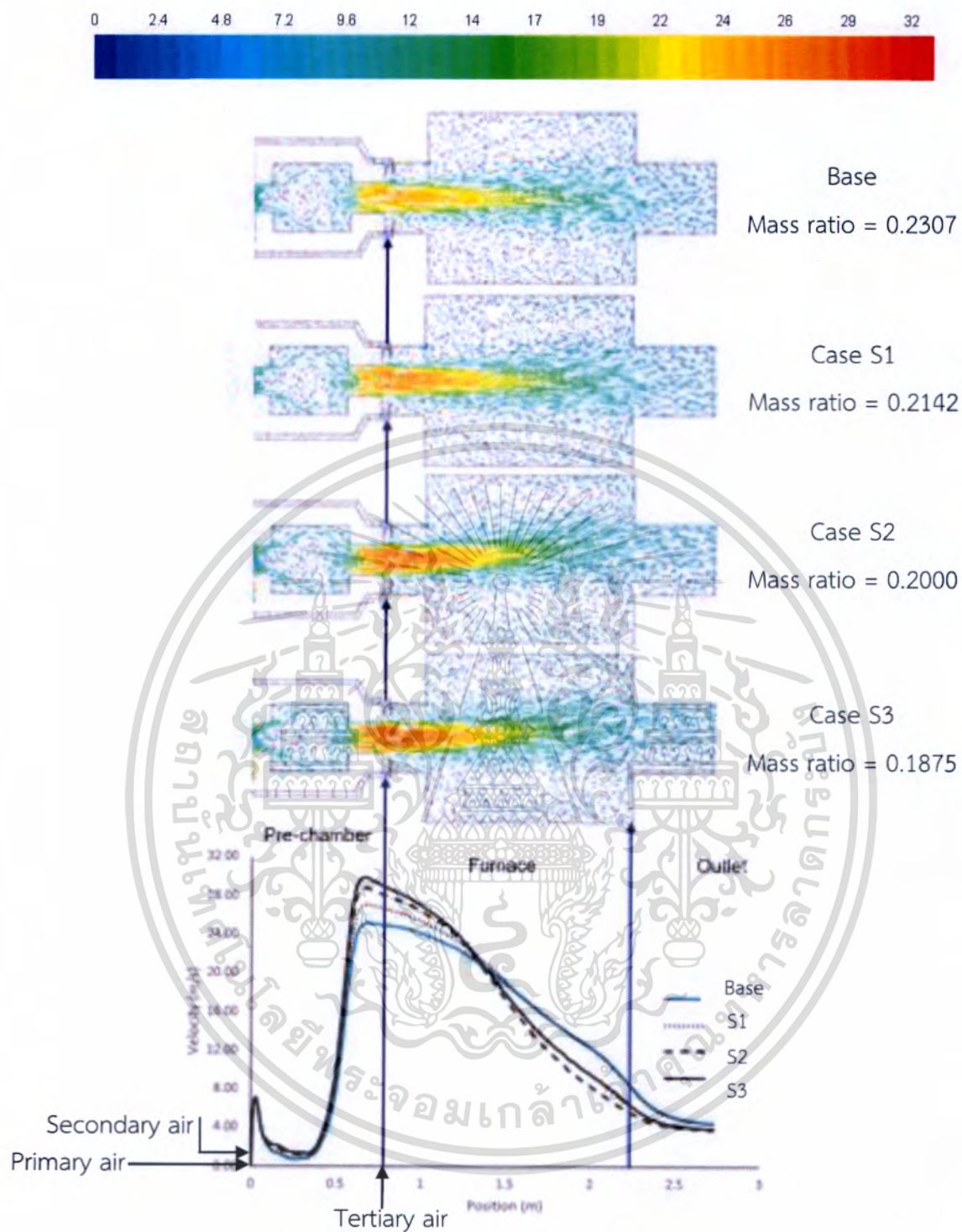
รูปที่ 5.25 กราฟสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวสัดส่วน โดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



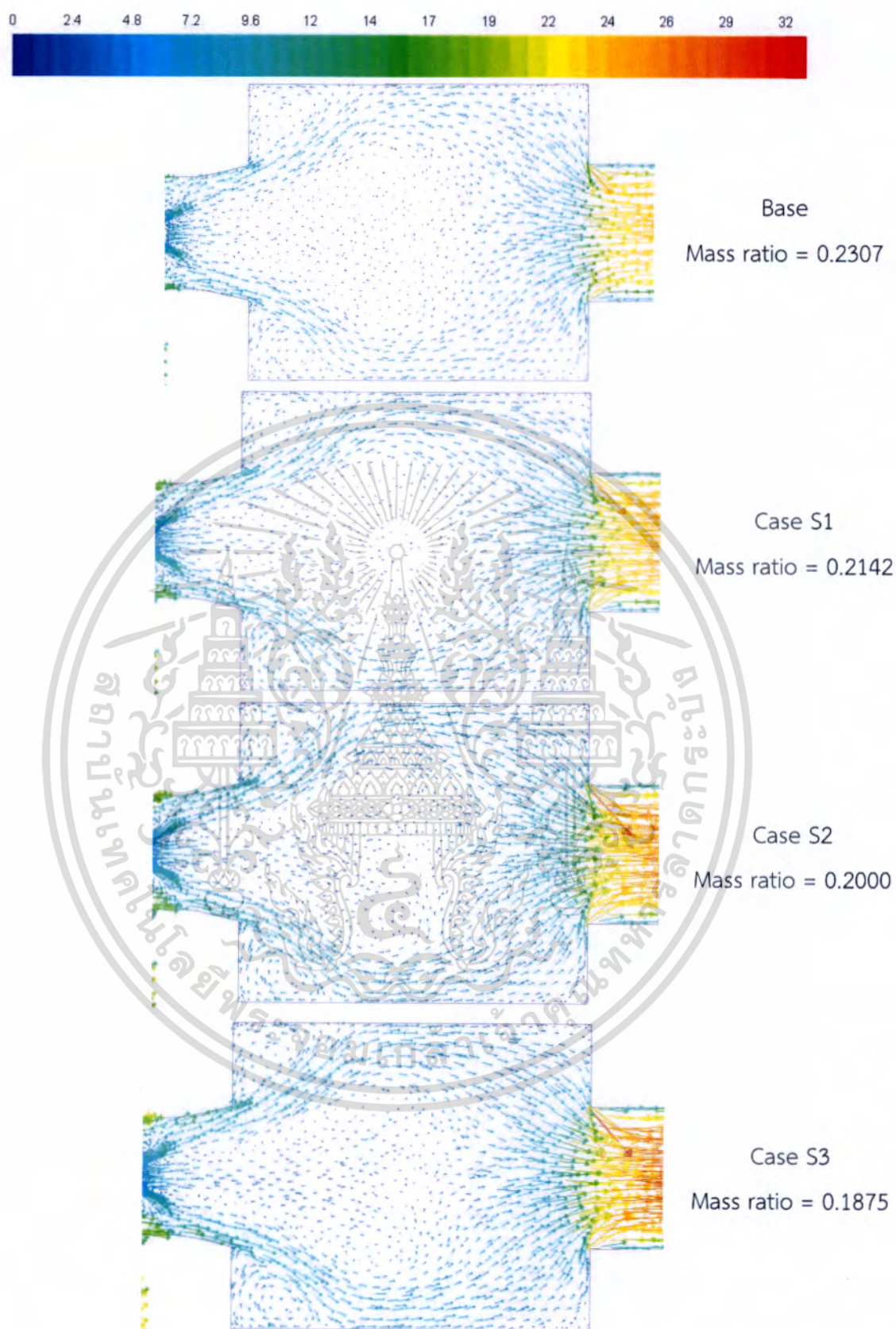
รูปที่ 5.26 กราฟความเร็วแก๊สตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวความเร็วแก๊สของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



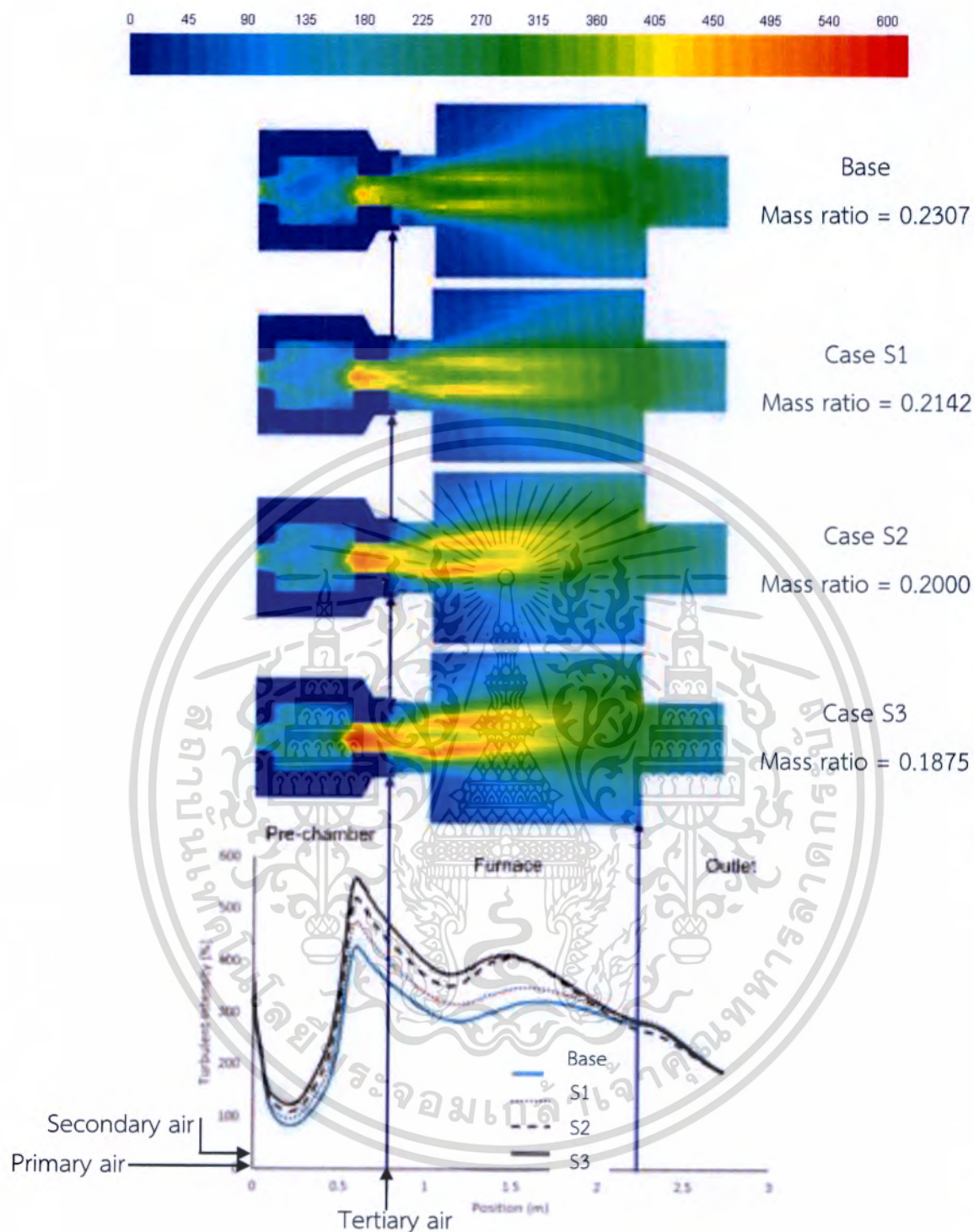
รูปที่ 5.27 กราฟความเร็วแก๊สตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวทิศทางความเร็วแก๊สของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



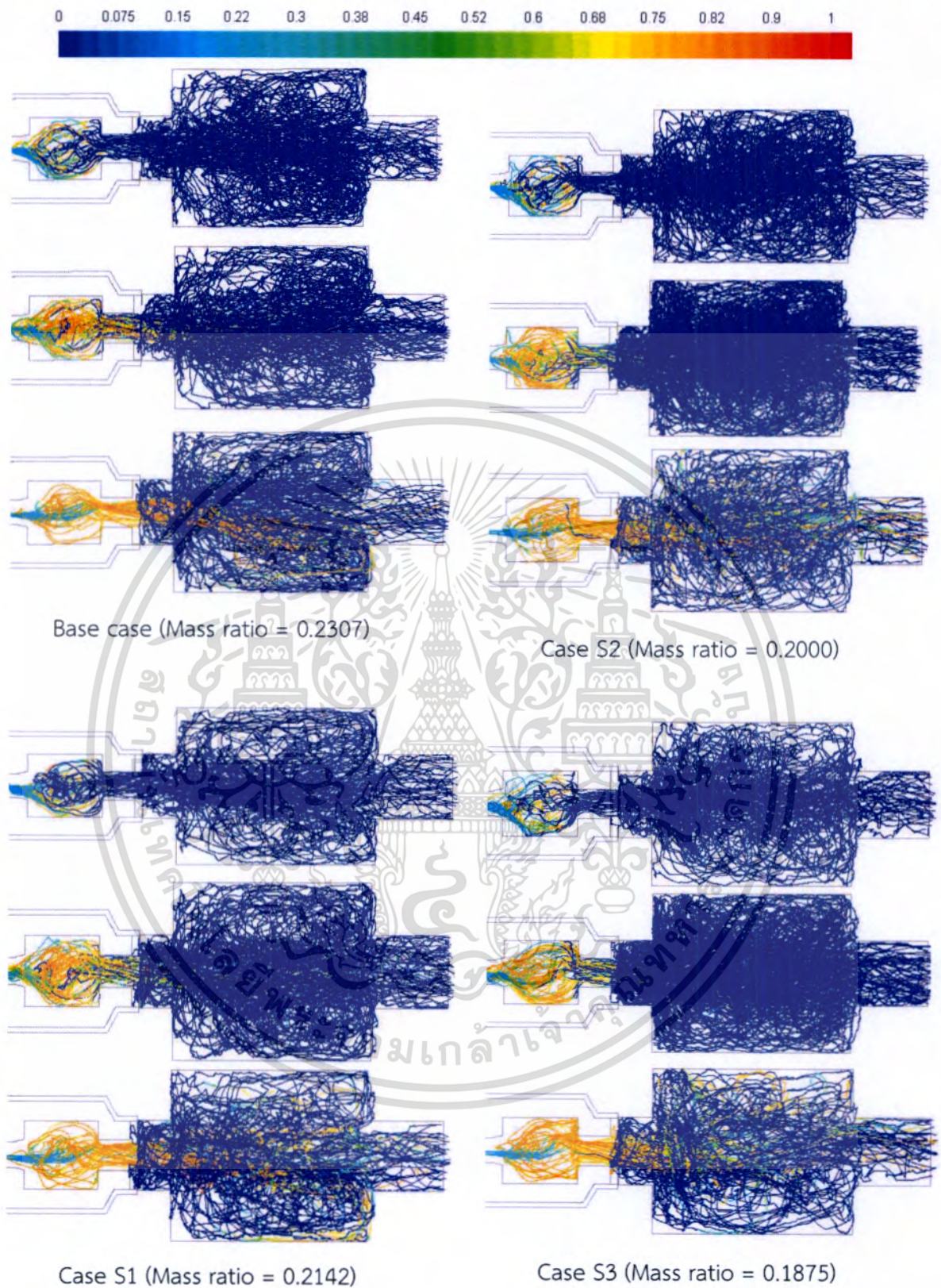
รูปที่ 5.28 การกระจายตัวทิศทางความเร็วแก๊สของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.29 กราฟความเข้มความปั่นป่วนตามแนวแกนเทียบกับการกระจายตัวความเข้มความปั่นป่วนของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

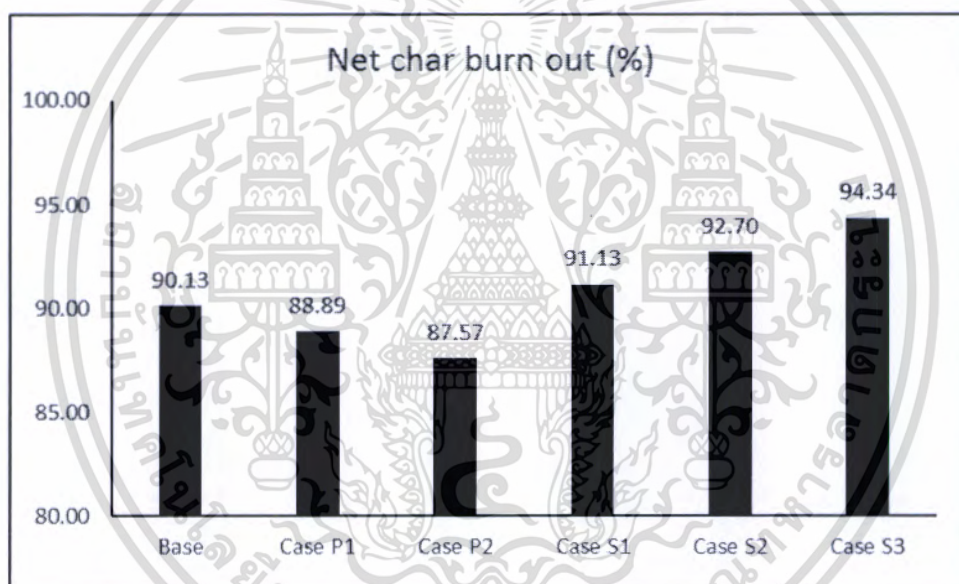


รูปที่ 5.30 เส้นโคจรในแบบสัดส่วนเชิงมวลอนุภาคคาร์ของ Base case, Case S1, Case S2 และ Case S3 (ขนาด 37.5-112.5 (บน), 165.0-327.5(กลาง), 390.0-712.5 (ล่าง) ไมโครเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 % การ Burn out ของอนุภาคคาร์

Case	% Burn out ของอนุภาค ขนาดใหญ่ที่สุด (712.5 μm)	% Burn out สุทธิ
Base	73.13	90.13
P1	69.22	88.89
P2	66.21	87.57
S1	75.79	91.13
S2	80.19	92.70
S3	84.83	94.34



รูปที่ 5.31 กราฟเปรียบเทียบการ Burn out ของอนุภาคคาร์ระหว่าง Base case และ Case P1 ถึง Case S3 ตามลำดับ

5.4.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้จากผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์

จากการจำลองสามารถหาประสิทธิภาพของการเผาไหม้ (Combustion efficiency) ได้ เพื่อดูว่าแต่ละ Case จะมีความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้แบบไหนและ Case ไหนจะมีสมรรถนะการเผาไหม้ดีที่สุด จากการคิดหาการสูญเสียปริมาณความร้อนไปกับอนุภาคคาร์ที่เผาไหม้ไม่หมดเพียงอย่างเดียวด้วยการ เทียบกับปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง ดังสมการในตารางที่ 5.5 และประสิทธิภาพของการเผาไหม้ของแต่ละ Case ได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.5 เช่นกัน ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ของแต่ละ Case จากการจำลองเชิงคณิตศาสตร์

Case	$Combustion\ Efficiency\ (\eta_{comb}) = 100 - \frac{flue\ heat\ losses}{fuel\ heating\ value} \times 100$
Base	97.44
P1	97.24
P2	96.78
S1	97.76
S2	98.02
S3	98.46

จากการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ทำให้สรุปได้คร่าวๆก่อนการทดลองจริงว่าเมื่อเราให้อัตราการไหลของอากาศ Primary คงที่ที่ 15 % และเพิ่มอากาศ Secondary โดยลด Tertiary ลงและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้โดยการลดลงของอนุภาคคาร์ที่เผาไหม้ไม่หมด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทาง Aerodynamic ภายในระบบรายละเอียดดังอธิบายไว้ในผลการจำลอง ดังนั้นเราจึงทำการทดลองและนำมาเปรียบเทียบผล (Validation) เพื่อที่จะยืนยันได้ว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นและเห็นในผลการจำลองนั้นเกิดขึ้นในสถานการณ์จริง ซึ่งผลการทดลองถูกอภิปรายในบทต่อไป

บทที่ 6

ผลการทดลอง และการอภิปรายผล

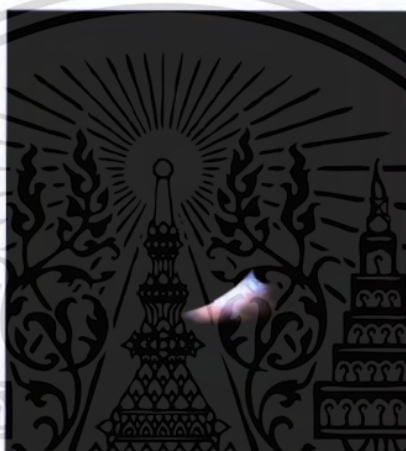
ในบทนี้จะพูดถึงการทำการทดลองเป็นลำดับขั้นตอน ผลการทดลองที่วัดได้คืออุณหภูมิตามแนวแกน และองค์ประกอบของไอเสีย ร่วมกับผลการตรวจสอบแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์โดยเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับการจำลอง รวมไปถึงการวิเคราะห์หา Mass ratio ที่เหมาะสมที่ทำให้การเผาไหม้ในระบบนี้มีเสถียรภาพและสมบูรณ์ที่สุด

6.1 การอุ่นระบบหรือการ Start up ระบบ

เริ่มแรกเราจะใช้ LPG อย่างเดียวก่อน โดยมีอัตราการไหลประมาณ 4 L/min และใช้ LPG เพียงอย่างเดียวในการอุ่นระบบนี้จนอุณหภูมิใน Pre-chamber เริ่มคงที่ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 นาที ต่อมาจะสั่งเปิดพัดลม Primary และเริ่มป้อนชีวมวลผงโดยเริ่มที่ป้อนที่ 100 kW และเปิดพัดลม Secondary และ Tertiary ตามลำดับ ต่อมาเมื่ออุณหภูมิเริ่มคงที่เราก็จะเพิ่มปริมาณชีวมวลผงเป็น 150 kW, 200 kW, 250 kW และ 300 kW ซึ่งก็ถึงกำลังความร้อนที่ต้องการแล้ว ต่อมารองระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ จึงทำการดับแก๊ส LPG แล้วค่อยๆเลื่อนท่อหัวเผา LPG ออกจากท่ออากาศ Primary ปล่องจากระบบปรับตัวเข้าสู่สมดุลอีกครั้ง จึงเริ่มทำการปรับระบบเข้าสู่สภาวะที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขการทดลอง และวัดค่าที่ต้องการ สำหรับการอุ่นระบบเราได้เลือกอัตราส่วนอากาศใน Case P1 มาเป็นเงื่อนไขแรก เนื่องจากที่ Base case มีเปอร์เซ็นต์ของอากาศ Primary น้อยที่สุด ซึ่งมีโอกาสที่ท่อจะเกิดการอุดตันของเชื้อเพลิง ซึ่งประเด็นค้นพบนี้ มาจากผลการทดลองของผู้วิจัยร่วมที่เคยกล่าวไว้ในบทที่ 4 [41] จากเหตุผลดังกล่าว การอุ่นระบบนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงด้วย นอกจากนี้ ภายในท่ออากาศ Primary ที่ทางเข้า Pre-chamber (ซึ่งมีอากาศ Primary ผสมกับชีวมวลฝุ่นไหลผ่านเข้าไปใน Pre-chamber) ยังไม่มีการเลื่อนออกของท่อหัว LPG ขณะอุ่นโดยใช้ LPG ช่วย ทำให้ท่อนี้ขวางการไหลของอากาศ Primary เราจึงกำหนด Case P1 และ Case P2 ให้มีอัตราการไหลของอากาศ Primary สูง ก็คือ 20 % และ 25 % ตามลำดับ แต่จากการผลจำลองแล้ว Case P1 ให้ผลที่ดีกว่าในแง่ของการเผาไหม้ ดังนั้น เพื่อให้มั่นใจว่าจะไม่มีการอุดตันของเชื้อเพลิงและมีการเผาไหม้ที่ดีพอโดยไม่เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ในปริมาณที่มากขณะทำการอุ่นระบบ เราจึงเลือกใช้ Case P1 ในการอุ่นระบบ ซึ่งพารามิเตอร์ควบคุมต่างๆที่มาจากการคำนวณสรุปไว้ในตาราง 6.1 รูปถ่ายภายใน Pre-chamber ในสภาวะที่เดินเครื่องด้วย LPG เพียงอย่างเดียว ที่ 100, 150, 200, 250 และ 300 kW แสดงในรูปที่ 6.1 ถึง 6.7 ตามลำดับ หากแต่ภาพถ่ายที่สภาวะ 300 kW เมื่อปิด LPG และเลื่อนท่อหัว LPG ออก คือ Case P1 นั่นเอง ซึ่งจะแสดงให้เห็นในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ควบคุมสำหรับการอุ่นระบบ

ความร้อน (kW)	อัตราการป้อนชีว มวลฝุ่น (kg/s)	อัตราการป้อน (m ³ /s)		
		อากาศ Primary	อากาศ Secondary	อากาศ Tertiary
100	0.00652	0.00685	0.02227	0.00514
150	0.00940	0.00987	0.03209	0.00740
200	0.01242	0.01304	0.04240	0.00978
250	0.01551	0.01629	0.05295	0.01221
300	0.01874	0.01969	0.06399	0.01476

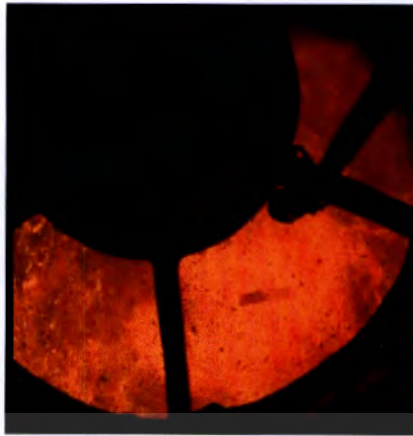


รูปที่ 6.1 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ขณะอุ่นระบบโดยใช้ LPG เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 6.2 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ขณะอุ่นระบบที่ 100 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ขณะอุณหภูมิ 150 kW

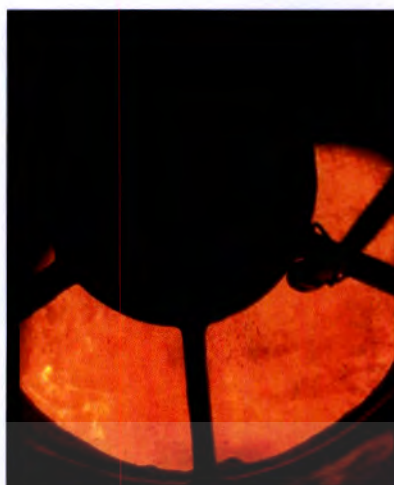


รูปที่ 6.4 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ขณะอุณหภูมิ 200 kW



รูปที่ 6.5 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ขณะอุณหภูมิ 250 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ขณะอุ่นระบบที่ 300 kW (ยังไม่ปิด LPG)



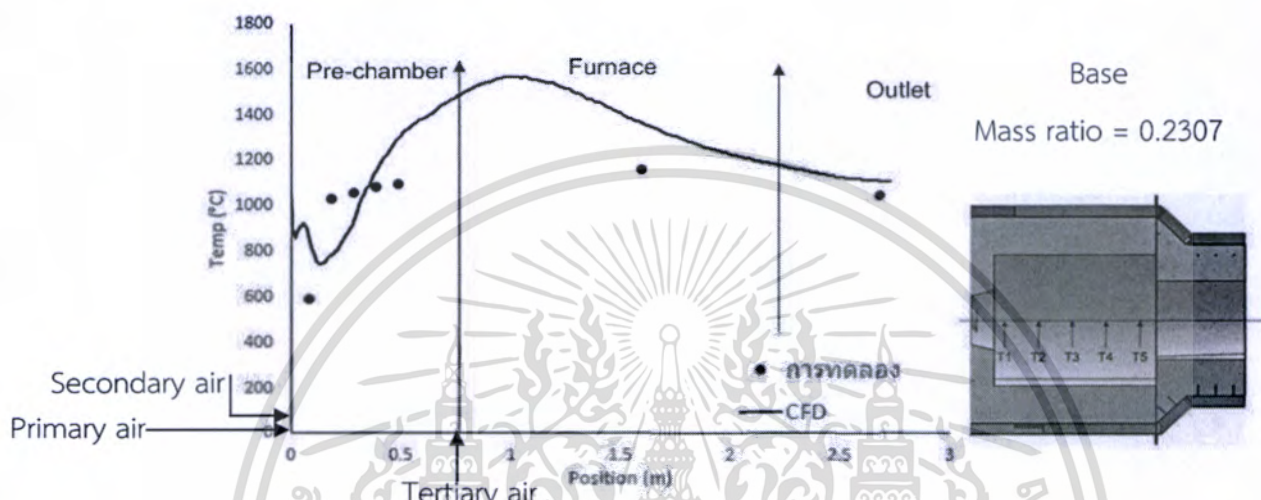
รูปที่ 6.7 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ขณะอุ่นระบบที่ 300 kW (ปิด LPG แต่ยังไม่เลื่อนท่อของ Pilot LPG burner ออก)

6.2 การตรวจสอบรูปแบบการจำลองเชิงคณิตศาสตร์

6.2.1 การตรวจสอบรูปแบบของ Base case

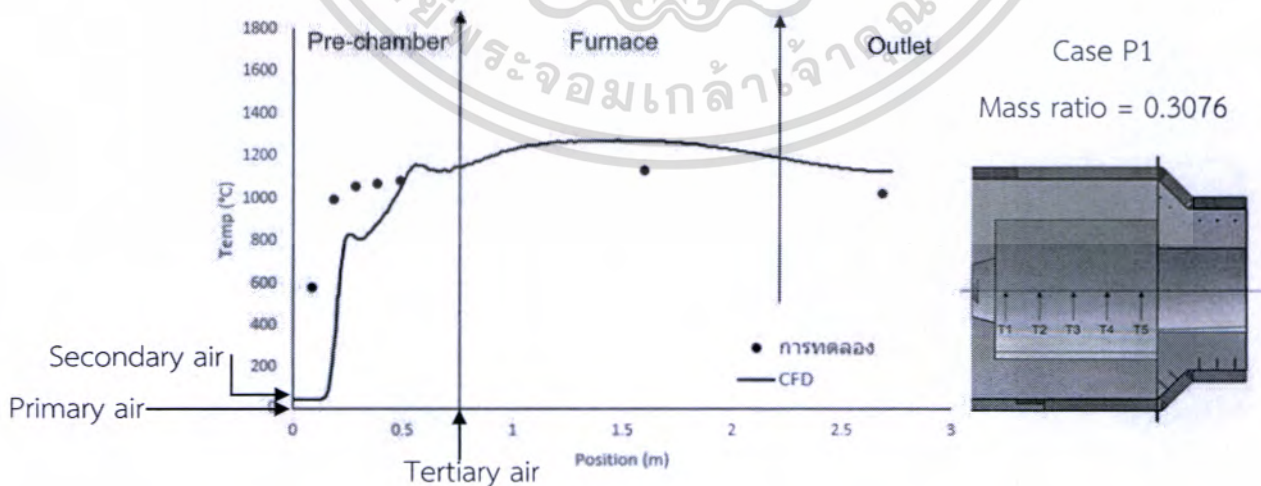
อุณหภูมิตามแนวแกนถูกใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ แสดงในรูปที่ 6.8 ผลของการเปรียบเทียบพบว่าอุณหภูมิมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันโดยที่ตำแหน่งการวัด T_2 และ T_3 ภายใน Pre-chamber อุณหภูมิของการทดลองจะสูงกว่า บ่งบอกได้ว่าการหมุนควงของอากาศ และ IRZ ภายใน Pre-chamber เกิดขึ้นค่อนข้างมากกว่าการทดลองจริง จึงทำให้เปลวไฟภายใน Pre-chamber นั้นวิ่งข้ามตำแหน่ง T_2 และ T_3 และค่อยกลับมาบรรจบกันที่บริเวณ T_4 ประกอบกับพารามิเตอร์ Default ในรูปแบบการเผาไหม้ของสารระเหยและอนุภาคคาร์บอนให้ผลการเผาไหม้ค่อนข้างสูงภายใน Pre-chamber ซึ่งยังไม่มีการศึกษาค่า Default ที่ใช้ในการจำลองนี้ก่อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในการจำลองนี้ได้ใช้ตามแบบจำลองของถ่านหินตามที่มีผู้วิจัยได้สรุปมาแล้ว ว่าสามารถให้ความแม่นยำได้ในระดับที่ดีพอ นอกจากนี้อุณหภูมิของการทดลองจะต่ำกว่าของการจำลองทุกจุด (นอกจาก T_2 และ T_3) อาจเป็นเพราะว่าในการทดลองระบบมีรอยรั่วที่บริเวณคอคอด ทำให้ในระบบมีปริมาณ Excess air เกินกว่า 15 % ซึ่งบ่งบอกได้จากปริมาณออกซิเจนที่วัดได้ใน Flue gas มีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี



รูปที่ 6.8 การเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Base case

6.2.2 การตรวจสอบรูปแบบของ Case P1

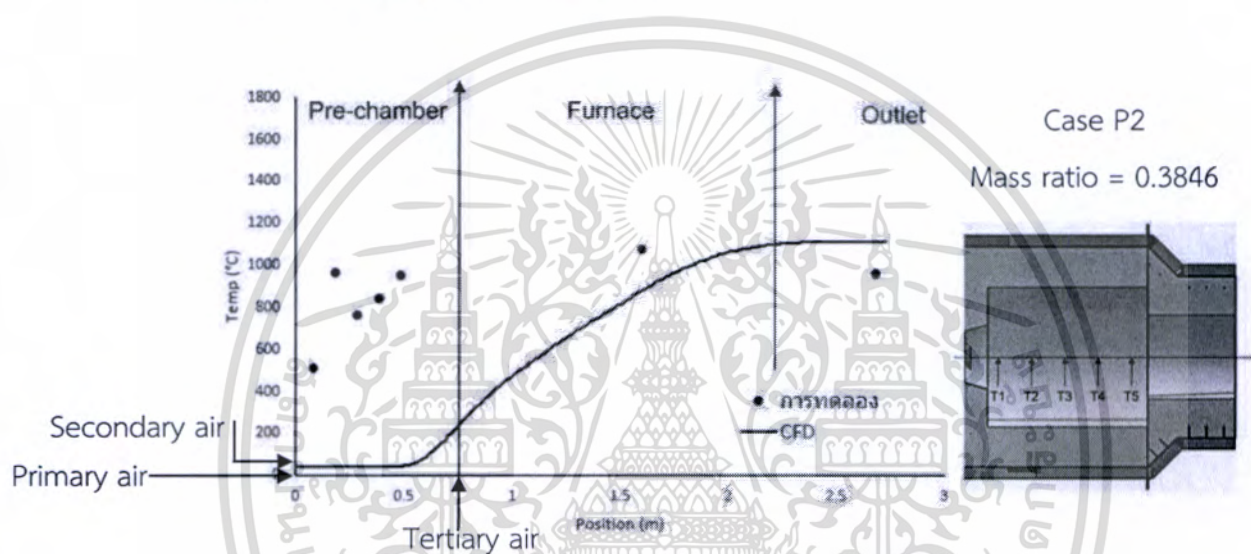


รูปที่ 6.9 การเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Case P1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.9 การทดลองนั้นมีแนวโน้มไปแนวทางเดียวกันก็คืออุณหภูมิตามแนวจะลดลงเมื่อ Mass ratio เพิ่มขึ้น และพบว่าอุณหภูมิใน Pre-chamber ของการจำลองต่ำกว่าการทดลองทุกจุด และสูงกว่าการทดลองใน Furnace และ Outlet บ่งบอกได้ว่าในแง่ของการจำลองนั้นผลกระทบจากการสูญเสียการหมุนควงของอากาศใน Pre-chamber มีผลอย่างน้อยสำคัญต่อการผสมคลุกเคล้ากันระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง แต่ในการทดลองจะไม่ค่อยมีผลภายใน Pre-chamber มากนัก แต่กลับมีผลใน Furnace มากกว่า สังเกตได้ในรูปที่ 6.18 ถึง 6.20

6.2.3 การตรวจสอบรูปแบบของ Case P2

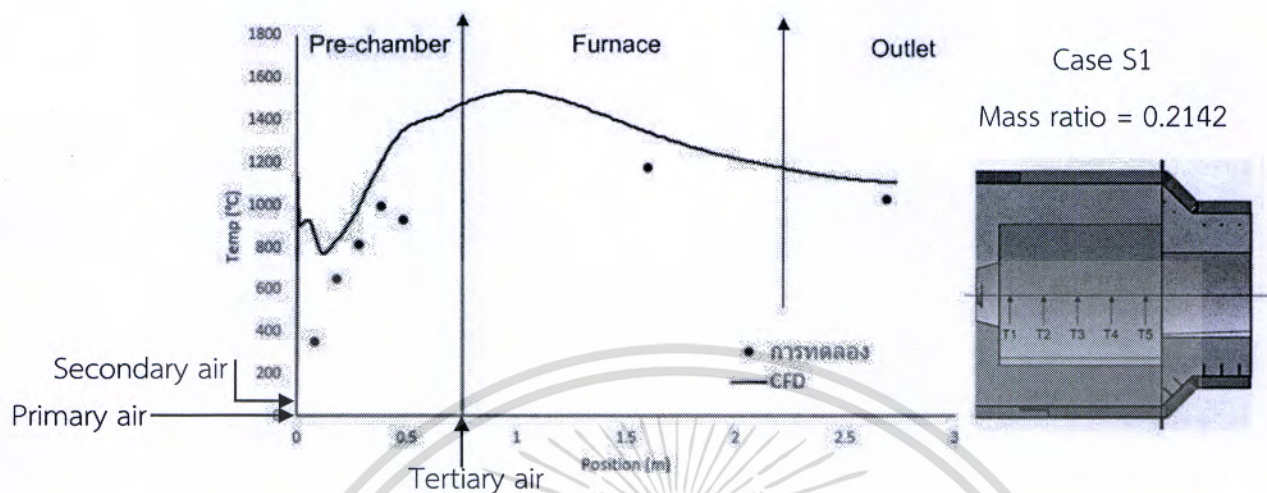


รูปที่ 6.10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Case P2

จากรูปที่ 6.10 พบว่าผลการจำลองกับผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทางที่ไม่พึงประสงค์เช่นเดียวกัน แต่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ ในการจำลองนั้นไม่มีการเผาไหม้เกิดขึ้นใน Pre-chamber แต่ในการทดลองมีอุณหภูมิสูงที่เกิดจากการเผาไหม้อย่างเห็นได้ชัด โดยเป็นที่น่าสังเกตว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T₃ และ T₄ มีค่าต่ำลง ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเมื่อมีการติดตั้ง Thermocouple เข้าไปใน Pre-chamber เพื่อวัดอุณหภูมิ จึงทำให้ก้านของ Thermocouple ที่ตำแหน่ง T₁ และ T₂ ไปขวางการไหลและทำหน้าที่เป็น Bluff body จึงกลายเป็นส่วนที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้ขึ้นมาด้วยเปลวไฟที่มีลักษณะบานออกข้ามตำแหน่ง T₃ และ T₄ อุณหภูมิสองตำแหน่งนี้จึงมีค่าต่ำ และสามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้โดยไม่เกิดการเป่าดับ ซึ่งข้อสันนิษฐานนี้ยังคงไม่มีหลักฐานยืนยันที่ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.4 การตรวจสอบรูปแบบของ Case S1



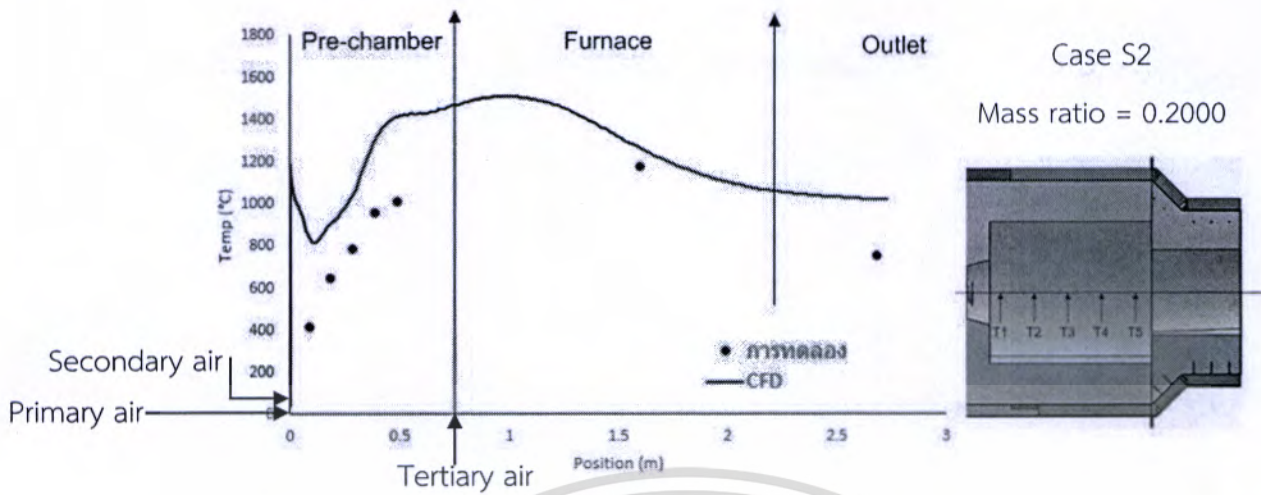
รูปที่ 6.11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Case S1

จากผลการจำลองของ Case S1 พบว่าเมื่อ Mass ratio ที่ปรับเปลี่ยนจาก Base case มีค่าน้อยลงเข้าสู่ Case S1 การเผาไหม้มีแนวโน้มไปในทางที่ดีกว่า Base case และผลการทดลองที่ออกมาเป็นที่น่าพอใจ ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไปในทางเดียวกันกับผลการจำลอง ซึ่งอุณหภูมิของผลการจำลองจะมีอุณหภูมิสูงกว่าผลการทดลองทุกตำแหน่งตรงข้ามกับ Base case, Case P1 และ Case P2 ซึ่งจะมากกว่าที่บริเวณ Furnace และ Outlet เท่านั้น เนื่องจาก ในการจำลองนั้น อิทธิพลจากการหมุนควงของอากาศใน Pre-chamber มีผลต่ออุณหภูมิใน Pre-chamber อย่างมีนัยสำคัญมากกว่าที่วัดได้จากการทดลอง ทำให้เกิด IRZ ค่อนข้างที่จะใหญ่กว่าความเป็นจริง แต่ในความเป็นจริงบริเวณที่เกิด IRZ จะมีก้านของ Thermocouple 5 ตัว ไปขวางการไหลย้อนกลับทำให้การหมุนควงใน Pre-chamber น้อยลง ประสิทธิภาพของ IRZ จึงลดลง รวมทั้งการจำลองยังมีการสูญเสียความร้อนจากระบบและสิ่งแวดล้อมน้อยมาก เพราะโดเมนการไหลในห้องเผาไหม้ช่วยในการจำลอง มีเงื่อนไขขอบเขตที่เป็นอะเดียแบติก และรูปแบบพารามิเตอร์ Default ในอัลกอริทึมของ Kinetics rates ที่คล้ายกับถ่านหิน ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์การวัด รวมไปถึงการทำการทดลองของผู้ที่ทำการทดลอง

6.2.5 การตรวจสอบรูปแบบของ Case S2

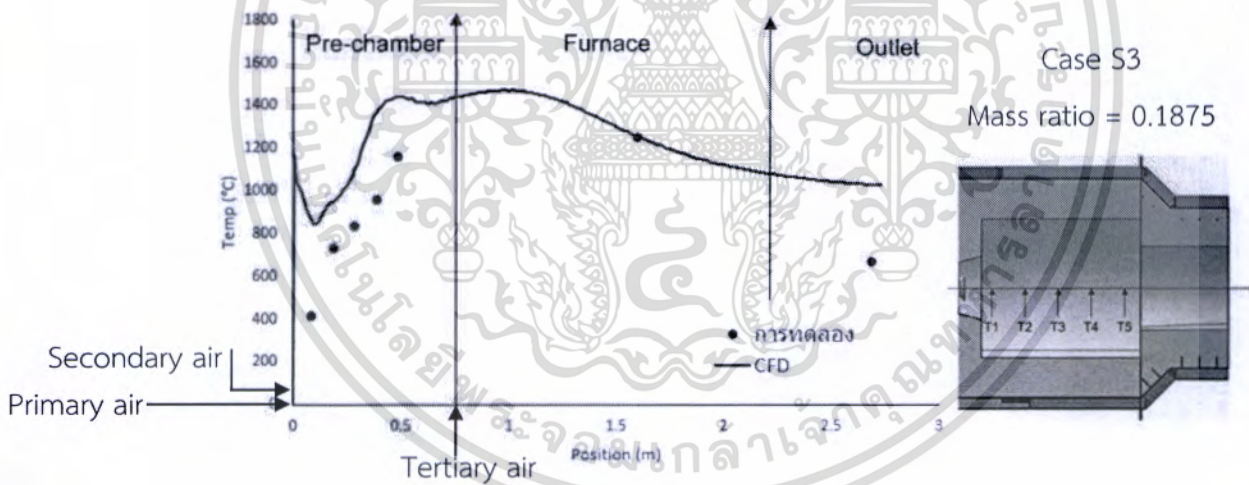
ผลของการตรวจสอบ Case S2 ในรูปที่ 6.12 คล้ายกับ Case S1 ซึ่งมาจากการเปลี่ยนแปลงของ Aerodynamic ภายในระบบที่เหมือนกัน ดังนั้นเหตุผลของความแตกต่างระหว่างผลการจำลองกับการทดลองจึงมาจากเหตุผลเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 การเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Case S2

6.2.6 การตรวจสอบรูปแบบของ Case S3



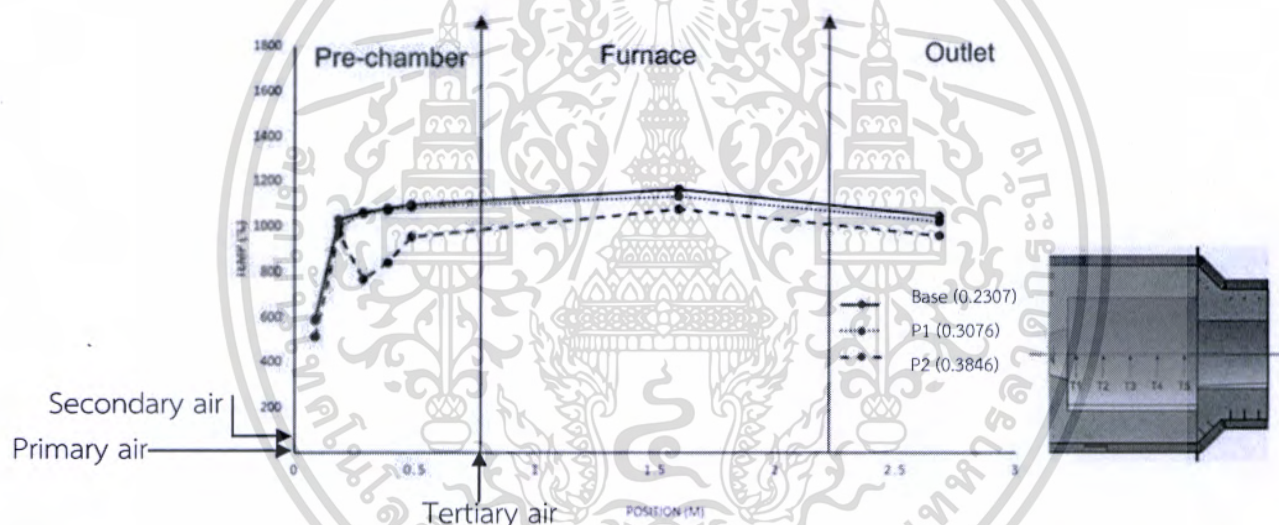
รูปที่ 6.13 การเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวแกนระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Case S3

ผลของการตรวจสอบของ Case S3 ในรูปที่ 6.13 คล้ายกับ Case S1 และ Case S2 แต่บริเวณ Furnace นั้นอุณหภูมิของการจำลองกับการทดลองใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากว่าที่ Mass ratio เป็น 0.1875 มีความเร็วที่บริเวณคอคอดหรือบริเวณรอยต่อระหว่าง Pre-chamber กับ Furnace สูงมาก ทำให้บริเวณนี้เกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงและอุณหภูมิสูงมาก ดังนั้นกระบวนการเผาไหม้ก็จะจบลงอย่างรวดเร็วจึงทำให้อุณหภูมิใน Furnace ลดลงมามีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการตรวจสอบทุก Case สามารถสรุปผลได้ว่า การจำลองเชิงคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือระดับหนึ่ง โดยให้ผลออกมาเป็นแนวโน้มไปในทางเดียวกันในระดับที่น่าพอใจ และสามารถใช้ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการจำลองมาช่วยวิเคราะห์กับการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงได้ ความแตกต่างที่เกิดขึ้น มาจากอิทธิพลของอากาศหมุนวนภายใน Pre-chamber ที่มีความคลาดเคลื่อนและค่อนข้างมีนัยสำคัญ ซึ่งมาจากการกำหนดโดเมนการไหลให้มีความง่ายในการจำลอง โดยโดเมนของการทดลองจริงมีการติดตั้ง Thermocouple เข้าไปภายใน Pre-chamber ถึง 5 ตัว รวมไปถึงความเป็นอะเดียบาติกของรูปแบบการจำลองเป็นเหตุผลที่ทำให้ Aerodynamic และการสูญเสียเชิงความร้อนแตกต่างกันและเกิดความผิดพลาดขึ้น แต่อยู่ในช่วงที่เราสามารถวิเคราะห์และเชื่อถือได้

6.3 ผลการทดลองของ Case P1 และ Case P2 เทียบกับ Base case



รูปที่ 6.14 อุณหภูมิตามแนวแกนจากการทดลองของ Case P1 และ Case P2 เทียบกับ Base case

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิตามแนวแกนจากการเผาไหม้ค่อนข้างที่จะคงที่ตั้งแต่ตำแหน่ง T_2 ถึง T_7 เนื่องจากโมเมนต์ของอากาศ Secondary ยังไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการหมุนวนและความแข็งแรงของ IRZ มากนักจึงทำให้ความเร็วตามแนวแกนค่อนข้างคงที่ แต่ตำแหน่ง T_1 นั้นอุณหภูมิต่ำกว่าตำแหน่งอื่นเพราะอยู่ใกล้กับ Bluff body โดย Bluff body จะขวางเปลวไฟไว้ไม่ให้มาสัมผัสหัววัด เมื่อ Mass ratio เพิ่มขึ้นเป็น 0.30769 อากาศ Primary ก็จะมีโมเมนต์มากขึ้นทำให้ Residence time ของเชื้อเพลิงใน Pre-chamber น้อยลง จึงไม่ทำให้การเผาไหม้ออกมาดีขึ้น มากไปกว่านั้น เกิดการสูญเสียความร้อนโดยการพาความร้อนที่มีมากขึ้นจากอากาศ Primary ที่เพิ่มขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นทำให้อุณหภูมิตามแนวแกนทุกตำแหน่งการวัดลดลงทั้งหมด แต่อุณหภูมิตามแนวแกนก็ยังอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันตลอดที่ตำแหน่ง T_2 ถึง T_7 โดยที่ยังไม่เกิดการเป่าดับ เมื่อ Mass ratio เพิ่มขึ้นไปอีกเป็น 0.38461 พบว่าการเผาไหม้ใน Pre-chamber กลับด้อยลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเปรียบเทียบได้ โดยจะเห็นผงเชื้อเพลิงจำนวนมากใน Pre-chamber และที่พุ่งเป็นลำตรงออกจาก Pre-chamber ไปจากรูปถ่าย ในรูปที่ 6.15 ถึง 6.17 เมื่อพิจารณาประกอบกับอุณหภูมิตามแนวแกนแล้ว ที่ T_3 และ T_4 อุณหภูมิจะต่ำ เนื่องจากโมเมนต์ที่มากขึ้นของ Case P2 ทำให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพในการเผาไหม้จนจะเกิดการเป่าดับที่ T_3 แต่จากสมมุติฐานก็คือ Thermocouple ที่ตำแหน่ง T_3 กลับกลายเป็น Bluff body ทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอีกครั้งบริเวณนี้จึงทำให้อุณหภูมิ T_4 T_5 ถึง T_7 สูงขึ้นมา แต่ภาพรวมการเผาไหม้ของ Case นี้ก็ค่อนข้างไม่เป็นที่น่าพอใจ และมีอุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับ Base case โดยกระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นช้ากว่า และมีการสูญเสียความร้อนจากการพามากกว่า



รูปที่ 6.15 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ของ Base case



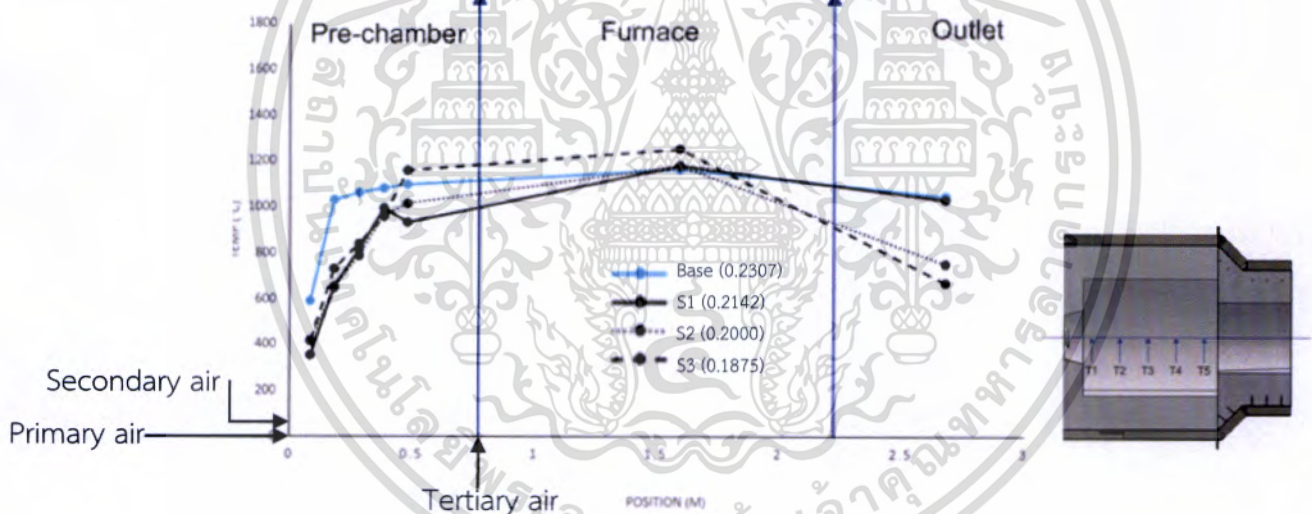
รูปที่ 6.16 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ของ Case P1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ของ Case P2

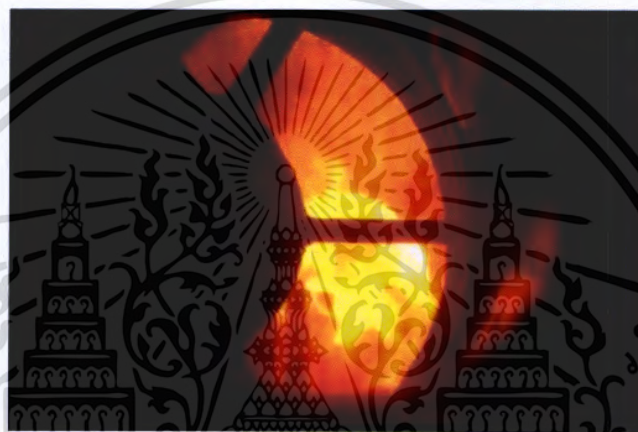
6.4 ผลการทดลองของ Case S1 Case S2 และ Case S3 เทียบกับ Base case



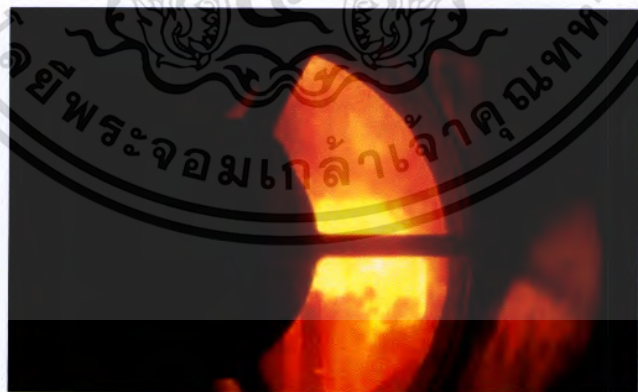
รูปที่ 6.18 อุณหภูมิตามแนวแกนจากการทดลองของ Case S1 Case S2 และ Case S3 เทียบกับ Base case

จากการทดลองของ Mass ratio เป็น Case S1 Case S2 และ Case S3 ในการจำลองจะเห็นว่าอุณหภูมิภายใน Pre-chamber จะสูงกว่า Base case และอุณหภูมิใน Furnace จะต่ำกว่า Base case แต่ในการทดลองจริงกับให้ผลตรงกันข้ามกัน บ่งบอกได้ว่าการทดลองจะเกิดการสูญเสียความร้อนจากการพาเมื่ออากาศ Secondary มากขึ้นทำให้อุณหภูมิใน Pre-chamber ต่ำลง การเผาไหม้จึงเกิดขึ้นไม่มากใน Pre-chamber จึงมองเห็นลำเชื้อเพลิงที่ยังไม่ถูกเผาในรูปที่ 6.19 ถึง 6.21 แต่ผลกระทบจากอากาศหมุนควงจะมีอิทธิพลมากในคอคอดและ Furnace สังเกตได้ว่า บริเวณเอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงวนวสาหรับการเขงานเพื่อกการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติเนาไปไซ่ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้อุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นจนมากกว่า Base case เมื่อ Mass ratio ลดลงกระทั่งเข้าสู่ Case S3 ถึงแม้จะเผาไหม้ใน Pre-chamber จะด้อยกว่ากรณี Base case แต่ความปั่นป่วนจากการหมุนควงที่คอคอดและ Furnace จะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ดี ที่ T_5 และส่งผลต่อเนื่องถึง T_6 ภายใน Furnace โดยที่ใน Pre-chamber จะไม่ค่อยแตกต่างกันกับ Case S1 และ Case S2 และเมื่อเกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงที่ Furnace แล้วจึงทำให้การเผาไหม้ของชาร์บริเวณ Outlet มีน้อย เป็นเหตุผลที่ทำให้เมื่อ Mass ratio น้อยๆ การเผาไหม้สมบูรณ์กว่า Mass ratio มากๆ และจะจบลงภายใน Furnace อุณหภูมิที่ Outlet จึงต่ำลง ทำให้ปริมาณ CO ที่ได้มีปริมาณต่ำลงและประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น ซึ่งจะแสดงให้เห็นในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 6.19 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ของ Case S1



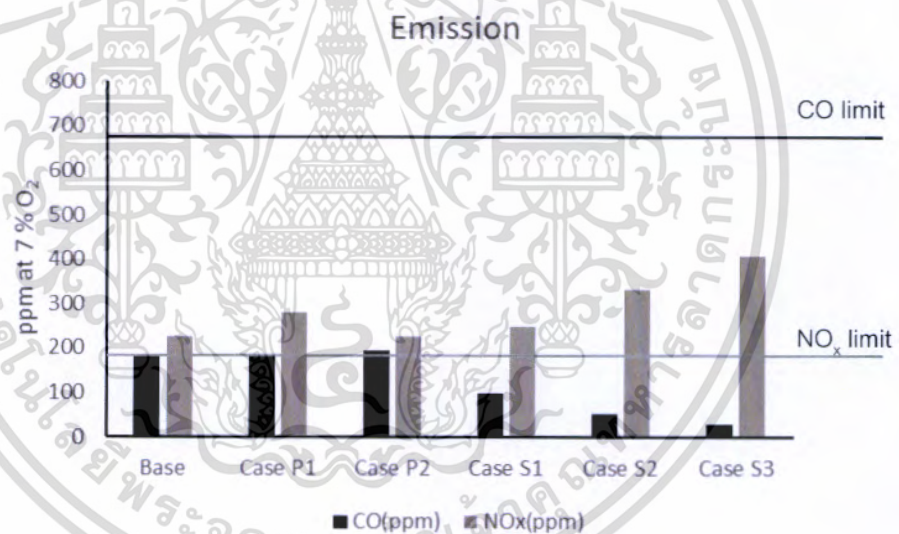
รูปที่ 6.20 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ของ Case S2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.21 ภาพถ่ายภายใน Pre-chamber ของ Case S3

6.5 ผลการวัดองค์ประกอบของ Flue gas



รูปที่ 6.22 ผลการวัดองค์ประกอบของ Flue gas

จากรูปที่ 6.22 เป็นการนำผลการวัดไอเสียที่ออกซิเจน 7 % มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานอุตสาหกรรมจากกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม [49] โดยจะเห็นว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นไม่มี Case ไหนที่เกินมาตรฐานเลย แต่ออกไซด์ของไนโตรเจนนั้นเกินค่ามาตรฐานทุก Case โดยจะมีค่ามากที่สุดที่ Case S3 เนื่องจากว่ามีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ที่สุดและอุณหภูมิสูงมากจึงเกิดออกไซด์ไนโตรเจนจาก Thermal NO_x รองลงมาคือ Case P1 ซึ่งการเผาไหม้นั้นไม่ได้มีอุณหภูมิสูงมากนัก แต่ออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดขึ้นนี้เกิดจาก Fuel NO_x เนื่องจากว่าในชีวมวลนั้นมีปริมาณเอ็กสาร์เป็นเอ็กสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่มีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ กล่าวคือ ใน Case S3 จะมีค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำมากที่สุด ตามมาด้วย Case S2 และ Case S1 แต่สำหรับ Base case, Case P1 และ Case P2 แล้วปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีมากกว่าและมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของ Mass ratio ให้มากกว่า 0.23076 (Base case) ไม่สามารถทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น โดยมีการสูญเสียความร้อนด้วยการพาค่อนข้างมาก ความปั่นป่วนเกิดขึ้นน้อยด้วยโมเมนต์ที่พุ่งตรงตามแนวแกนของอากาศ Primary ทำให้การผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงน้อยลง อุณหภูมิตามแนวแกนลดลงตลอดแนวแกน การเผาไหม้มีแนวโน้มที่จะเกิดการเป่าดับ แต่การลด Mass ratio เป็น 0.18570 นั้นสามารถเพิ่มความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ได้และมีสมรรถนะการเผาไหม้ที่ดีที่สุดในทุก Case โดยมีการสูญเสียความร้อนด้วยการพาเช่นกัน ทำให้อุณหภูมิใน Pre-chamber ลดลงต่ำกว่า Base case แต่โมเมนต์เชิงมุมที่มากขึ้นของอากาศ Secondary ทำให้เกิดความปั่นป่วนสูงในบริเวณคอคอดและ Furnace เชื้อเพลิงกับอากาศถูกผสมกันดีในบริเวณนี้ทำให้อุณหภูมิใน Furnace สูงขึ้นประมาณ 8 % และมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เหลือจากการเผาไหม้ลดลง 85 % แต่ทว่าการที่จะเลือกใช้ Case นี้ในการดำเนินการ (Operating condition) จะมีปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนหลงเหลือเกินค่ามาตรฐานไปมาก มากไปกว่านั้นอาจจะมีผลกับความทนทานของหัวเผาชีวมวลผุ่นนี้ เนื่องจาก Case นี้มีอัตราการไหลของอากาศ Tertiary น้อยมาก ซึ่งจะทำให้ผนังหัวเผานี้มีอุณหภูมิสูงมากและอาจเกิดความเสียหายได้ เพราะฉะนั้น Case ที่ควรใช้ในการดำเนินการระบบนี้ที่สุดโดยพิจารณาที่การ Burn out เยอะๆ คือ Mass ratio เป็น 0.20000 (Case S2) ซึ่งมีสมรรถนะการเผาไหม้ดีรองลงมาจาก Case S3 โดยมีอุณหภูมิใน Furnace สูงขึ้นประมาณ 1.6 % และมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เหลือจากการเผาไหม้ลดลง 72 % เทียบกับ Base case แต่ว่า Case นี้ ยังมีข้อจำกัดที่ออกไซด์ของไนโตรเจนค่อนข้างสูงอยู่ แต่ถ้าเราพิจารณาถึงประเด็นของปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน และการ Burn out ที่ดี จะได้ Case สำหรับการดำเนินการเป็น Case S1 แม้ว่า การ Burn out จะไม่ดีเท่า Case S2 และ Case S3 แต่สมรรถนะการเผาไหม้ก็ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ดีอยู่ โดยปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เหลือจากการเผาไหม้ลดลง 47 % เทียบกับ Base case และถึงแม้จะไม่ลดลงมากเท่า Case S2 และ Case S3 แต่ก็ยังเป็นค่าไม่เกินมาตรฐาน อีกทั้งยังมีออกไซด์ของไนโตรเจนน้อยกว่า Case S2 และ Case S3

6.6 ประสิทธิภาพการเผาไหม้จากผลการทดลอง

จากผลการจำลองเชิงคณิตศาสตร์เราสามารถหาประสิทธิภาพได้มาค่าหนึ่ง ซึ่งหามาจากเปอร์เซ็นต์ที่หลงเหลือของอนุภาคคาร์เพียงอย่างเดียว แต่เมื่อทำการทดลองแล้วเราจึงได้มีการประเมินประสิทธิภาพการเผาไหม้ใหม่อีกครั้ง (ภาคผนวก ก.) โดยข้อมูลที่มีเพิ่มขึ้นจากการทดลอง คือ ค่าจริงของคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ ตามลำดับ ทำให้เราสามารถประเมินประสิทธิภาพได้ค่อนข้างสูงมากและมีค่าเกินความเป็นจริงอยู่ดี เนื่องจากเราไม่ทราบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงปริมาณคาร์บอนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ในถ้ำ ซึ่งเป็นข้อจำกัดข้อหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเราจึงประยุกต์ใช้ข้อมูลที่มีอยู่ทั้งหมด ทั้งจากการจำลองเชิงคณิตศาสตร์และการทดลองเพื่อมาประเมินประสิทธิภาพของ Base case, Case P1, Case P2, Case S1, Case S2 และ Case S3 ได้ 97.31, 97.12, 96.65, 97.69, 97.98 และ 98.44 % ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุป และข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

การศึกษาศมรรถนะของการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 300 kW ปริมาณอากาศส่วนเกิน 15 % และมีการติดตั้ง Bluff body ด้วยผลของการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เทียบเคียงกับผลการทดลอง จากการเปลี่ยนแปลงของ Mass ratio ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นกับอัตราการไหลของอากาศทั้งสามส่วนที่ป้อนให้หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นคือ อากาศ Primary, Secondary และ Tertiary โดยแบ่งออกเป็น 5 Case ได้แก่ Base case, Case P1, Case P2, Case S1, Case S2 และ Case S3 และมี Mass ratio เป็น 0.23076, 0.30769, 0.38461, 0.21428, 0.20000 และ 0.18750 ตามลำดับ ผลของการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

7.1.1 ที่ Mass ratio เท่ากับ 0.23076 สามารถให้เสถียรภาพการเผาไหม้ได้โดยไม่เกิดการเป่าดับ ขณะที่ดำเนินการระบบที่ 300 kW ซึ่งพบว่าปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ภายใน Flue gas เป็น 237 ppm เป็นค่าที่น่าพอใจโดยไม่เกินมาตรฐานอุตสาหกรรม แต่ในการอุ่นระบบจะมีการดำเนินการต่ำกว่า 300 kW เงื่อนไขในการป้อนอากาศนี้ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ เนื่องจาก Base case มีโมเมนต์ของอากาศในส่วนที่ใช้ในการลำเลียงเชื้อเพลิง (Primary) ต่ำไม่สามารถให้ความเสถียรภาพในการลำเลียงเชื้อเพลิงได้โดยจะมีการอุดตันของเชื้อเพลิงที่ท่อลำเลียง แต่เงื่อนไขที่สามารถจะดำเนินการในสภาวะที่ต่ำกว่า 300 kW กรณีอุ่นระบบ คือที่ Mass ratio เป็น 0.30769 (Case P1) ซึ่งจะทำให้ปัญหาดังกล่าวหมดไปจากโมเมนต์ของอากาศ Primary เพิ่มขึ้นที่ไม่มากเกินไป โดยยังคงรักษา IRZ ภายใน Pre-chamber กับกระแสหมุนควงบริเวณคอคอดและภายใน Furnace ไว้ได้ ส่งผลให้การเผาไหม้ยังเกิดอย่างมีเสถียรภาพโดยไม่เกิดการเป่าดับ

7.1.2 ที่ 300 kW เมื่อ Mass ratio เพิ่มขึ้นมากกว่า Base case เป็น 0.30769 (Case P1) ทำให้มีการสูญเสียความร้อนด้วยการพามากขึ้นประกอบด้วยกระแสหมุนควงของอากาศภายใน Pre-chamber ลดลง อนุภาคของเชื้อเพลิงเลยมี Residence time น้อยลง ส่งผลให้การความเข้มข้นของสารระเหยที่ปล่อยออกมาอยู่ประมาณที่ตำแหน่ง 0.4 m ทำให้สมรรถนะการเผาไหม้ลดน้อยลงโดยอุณหภูมิตามแนวแกนลดลงทุกตำแหน่ง และมีอนุภาคคาร์บอนหลงเหลือจากการเผาไหม้เพิ่มขึ้นโดยมีเปอร์เซ็นต์การเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอนลดลงเหลือ 88.89 % ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ค่อนข้างที่จะใกล้เคียงกับ Base case เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ Mass ratio ไปอีกจนเป็น 0.38461 ภายใน Pre-chamber มีการสูญเสียความร้อนด้วยการพาเยอะมาก และ IRZ ถูกทำลายไปจากโมเมนต์ของอากาศ Primary ที่สามารถจะเอาชนะโมเมนต์ของกระแสอากาศย้อนกลับใน IRZ ได้ ทำให้ในผลการจำลองไม่มีการการเผาไหม้เกิดขึ้นใน Pre-chamber โดยอนุภาคจะวิ่งออกมาจาก Pre-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

chamber อย่างรวดเร็วโดยไม่มีการปลดปล่อยสารระเหย แต่ในการทดลองมีการการเผาไหม้เกิดขึ้นใน Pre-chamber โดยสมมุติฐานว่าอาจเป็นเพราะ Thermocouple ที่ถูกติดตั้งเพื่อวัดกลายเป็น Bluff body ช่วยทำให้มีการเผาไหม้เกิดขึ้น และอุณหภูมิตามแนวแกนจะลดลงทุกตำแหน่งต่ำกว่า Base case และ Case P1 มีการเผาไหม้อุณหภูมิคาร์สุทธิ 87.57 % ซึ่งน้อยกว่า Case P1 และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ไม่เปลี่ยนแปลงไปจาก Base case ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของ Mass ratio เป็น 0.30769 และ 0.38461 นั้นไม่สามารถทำให้เพิ่มสมรรถนะของการเผาไหม้ได้แต่กลับเป็นทำให้สมรรถนะการเผาไหม้ลดลงด้วย

7.1.3 ที่ 300 kW เมื่อ Mass ratio ลดลงจาก Base case อุณหภูมิใน Pre-chamber จะต่ำลงเพราะว่าเกิดมีอากาศเข้าไปใน Pre-chamber มากขึ้น แต่เงื่อนไขสามารถเพิ่มสมรรถนะการเผาไหม้ได้ดีจากการที่มีกระแสอากาศหมุนควงและการผสมกันของอากาศกับเชื้อเพลิงภายในระบบมากขึ้นมีผลทำให้เกิดการเผาไหม้จะรุนแรงบริเวณคอคอดและ Furnace ทำให้การเผาไหม้จับลงภายใน Furnace อุณหภูมิบริเวณดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น และมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และอนุภาคคาร์ที่หลงเหลืออยู่น้อยมาก ดังนั้นเมื่อมีการป้อนอากาศ Primary คงที่ที่ 15 % และเพิ่มอากาศ Secondary โดยการลดอากาศ Tertiary ลง จน Mass ratio เป็น 0.18750 จะทำให้สมรรถนะของการเผาไหม้เพิ่มขึ้นโดยที่อุณหภูมิแนวแกนสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณ 8 % มีอนุภาคคาร์สุทธิหลงเหลือ 5.66 % และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจาก Base case 85 % เป็น 28.49 ppm แต่มีปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนค่อนข้างสูงจากที่มีอุณหภูมิจากการเผาไหม้เกิน 1200 °C จึงเกิด Thermal NO_x และการที่เงื่อนไขนี้มีอัตราการไหลของอากาศ Tertiary น้อยมาก ซึ่งเป็นอากาศที่ทำหน้าที่หล่อเย็นผิวของหัวเผาไม่ให้อุณหภูมิร้อนเกินไป เงื่อนไขนี้จึงกลายเป็นเงื่อนไขที่มีผลในแง่ของมลพิษที่เป็นออกไซด์ของไนโตรเจนสูง ความทนทาน อายุการใช้งานของหัวเผา และความปลอดภัยของผู้ที่อยู่บริเวณรอบๆ เพราะฉะนั้นการเลือกเงื่อนไขมาดำเนินการจึงมีความเสี่ยงสูง เราจึงเลือกเงื่อนไขที่ตรงลงมาคือ Case S2 ที่ Mass ratio เท่ากับ 0.20000 ซึ่งอุณหภูมิแนวแกนสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณ 1.6 % มีอนุภาคคาร์สุทธิหลงเหลือ 7.30 % และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจาก Base case 72 % เป็น 51 ppm ซึ่งไม่เกินมาตรฐานอุตสาหกรรม แต่ปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่ยังมีค่าสูงเกินมาตรฐานอุตสาหกรรม ดังนั้นเงื่อนไขจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในกรณีที่พิจารณาว่าการ Burn out มากๆ แต่ถ้าเราพิจารณาถึงอีกเงื่อนไขที่มีการ Burn out รองลงมาอีก คือ Case S1 ซึ่งมีปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่น้อยกว่า Case S2 และ Case S3 และแม้ว่าจะมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จะมากกว่าและมีการ Burn out น้อยกว่า Case S2 และ Case S3 แต่ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ยังอยู่ในช่วงต่ำกว่ามาตรฐานอุตสาหกรรม โดยลดลง 47 % เทียบกับ Base case ดังนั้นอัตราส่วน Case S1 สามารถแก้ปัญหากรณีที่มีออกไซด์ของไนโตรเจนสูงๆได้ โดยสามารถลดลงมาได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามแต่ก็ยังคงมีค่าเกินมาตรฐานอยู่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาระบบบำบัดไอเสียในอนาคต จากการประเมินประสิทธิภาพการเผาไหม้ พบว่ามีข้อจำกัดในการเก็บตัวอย่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า การประเมินประสิทธิภาพนี้จึงประยุกต์มาจากการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ร่วมกับปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้จากการทดลองจริง ซึ่งจากการคำนวณพบว่า CaseS1 CaseS2 และ CaseS3 มีประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ที่ 97.69, 97.98 และ 98.44 % ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า Base case ทั้งหมด

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำวิจัยครั้งนี้ก็พบว่า มีข้อจำกัดบางอย่างที่เป็นอุปสรรคในการวิจัย และการให้ข้อเสนอแนะนี้ เพื่อเป็นประโยชน์ในการที่จะมีการปรับปรุงระบบการเผาไหม้ให้ดียิ่งขึ้นในอนาคตต่อไป

7.2.1 ควรมีการปรับปรุงระบบการวัดอุณหภูมิใหม่ แทนที่การเสียบ Thermocouple เข้าไปในห้องเผาไหม้ เพื่อไม่เป็นการไปรบกวนกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้

7.2.2 ควรมีการปรับปรุงระบบของการลำเลียงเชื้อเพลิงและอากาศ Primary ให้สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้มากกว่านี้ เพื่อที่จะเพิ่มกำลังความร้อนในการเผาไหม้ให้มากขึ้นกว่าเดิม

7.2.3 ระหว่างการทดลองควรมีระบบในการช่วยเก็บแก๊สที่เหลือจากการเผาไหม้ เพื่อที่จะส่งไปวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุ เพื่อที่จะหาค่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้จากการทดลองจริงได้

7.2.4 ควรมีการเพิ่มระยะการปรับมุมของใบพัดให้มากกว่า 100 องศา เพื่อที่จะศึกษาได้ว่าถ้ามีการเพิ่มขึ้นของกระแสหมุนวนไปอีกแล้วจะสามารถเพิ่มสมรรถนะของการเผาไหม้ได้มากกว่านี้หรือไม่

7.2.5 เนื่องจากการเผาไหม้ให้อุณหภูมิออกมาสูงมากและจากการศึกษาพบว่าปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนมีค่าเกินมาตรฐาน จึงควรที่จะพัฒนาระบบกำจัดไอเสียขึ้นมาเพื่อทำห้องค์ประกอบต่างๆในไอเสียมีค่าอยู่ในค่าควบคุมจากมาตรฐานอุตสาหกรรม

เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร.อำพล อาภาชานกร ดร.นิมิต นิพัทธ์ธรรมกุล และนายเฉลิมพงษ์ กล้าขยัน โครงการนำร่องเพื่อผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลในระดับชุมชน พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน) และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน 2555
- [2]] Jianping J., Zhengqi L., Qunyi Z., Zhichao C. and Feng R. "Influence of primary air ratio on flow and combustion characteristics and NOx emissions of a new swirl coal", *Energy* 36, 2010, pp. 1206-1213.
- [3] Sharfi and Boroomand M. "An investigation of thermo-compressor design by analysis and experiment: Part1. Validation of the numerical method", *Energy* 69, 2013, pp. 217-227.
- [4] Dong-Fang Z., Feng-Guo L., Xue-Yi Y., Rui Z., Bin-Long Z. and Gui-Long H. "Optimization of a premixed cylindrical burner for low pollutant emission", *Energy Conversion and Management* 99, 2015, pp. 151-160.
- [5] ธนภัทร์ ภักดีวรวงศ์. "การจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [6] Shan Xue et al. "Experimental investigation on NOx emission and carbon burnout from a radially biased pulverized coal whirl burner." *Fuel Processing Technology* 90. 2009. pp. 1142-1147.
- [7] จิตติพัทธ์ ลิ้มกุล. "การประยุกต์หลักการอากาศไหลหมุนควงในเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล." วิศวกรรมลาดกระบัง. ปีที่ 28 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2554.
- [8] Norbert Modlinski." Computational modeling of a utility boiler tangentially-fired furnace retrofitted with swirl burners." *Fuel Processing Technology* 91. 2010. pp. 1601-1608.
- [9] Chinnapat Turakarn. "Biomass burner development in industrial boilers", Thesis of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2015.
- [10] Narasad Phikun-ngoen et al. "Effect of Primary to Secondary Air Ratio on Combustion Performance for Pulverized Biomass Burner in Industrial Boiler" The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering. 13-16 December 2016. p. 47.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Li Zhengqi et al. "Effect of primary air flow types on particle distributions in the near swirl burner region." *Fuel* **81**. 2002. pp. 829-835.
- [12] Jianping Jing et al. "Influence of different outer secondary air vane angles on flow and combustion characteristics and NOx emissions of a new swirl coal burner." *Energy fuel* **24**. 2010. pp. 346-354.
- [13] Subo Fan et al. "Influence of outer secondary-air vane angle on combustion characteristics and NOx emissions of a down-fired pulverized-coal 300 MWe utility boiler" *Fuel* **89**. 2010. pp. 1525-1533.
- [14] Jianping Jing et al. "Influence of the mass flow rate of secondary air on the gas/particle flow characteristics in the near-burner region of a double swirl flow burner." *Chemical Engineering Science* **66**. 2011. pp. 2864-2871.
- [15] Yasir M. et al. "Recirculation and flow field regimes of unconfined non-reacting swirling flows." *Experimental Thermal and Fluid Science* **27**. 2003. pp. 655-665.
- [16] R. P. van der Lans. et al. "Residence time distributions in a cold, confined swirl flow Implications for chemical engineering combustion modelling." *Chemical Engineering Science* **66**. 1997. pp. 2743-2756.
- [17] R K. CHENG. "Velocity and Scalar Characteristics of Premixed Turbulent Flames Stabilized by Weak Swirl." *Combustion and flame* **101**. 1995. pp. 1-14.
- [18] Ying Huang. "Effect of swirl on combustion dynamics in a lean-premixed swirl-stabilized combustor." *Combustion Institute* **30**. 2005. pp. 1775-1782.
- [19] Stephen R. Turns. *An Introduction to Combustion Concept and Applications*. third edition. Singapore. Mc Graw Hill. 2012.
- [20] สำเร็จ จักรใจ. การเผาไหม้ (Combustion). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.
- [21] สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน. 2555. ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ความร้อน). [online]. Available : <http://www2.dede.go.th/>.
- [22] สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2555. พลังงานชีวมวล. [online]. Available : <http://www2.dede.go.th/>
- [23] นคร ทิพย์วงศ์. *พื้นฐานวิศวกรรมกรรมการเผาไหม้*.
- [24] สมรัฐ เกิดสุวรรณ. *การเผาไหม้และการควบคุมมลพิษ*. ปทุมธานี. สกายบุ๊กส์. 2549.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] Sjaak van Loo. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. London. Earthscan. 2008.
- [26] *Division of Safety and Fire Engineering*. School of engineering. CUSAT.
- [27] Kenneth K. Kuo. *Fundamentals of Turbulent and Multiphase Combustion*. Canada. John Wiley and Sons Inc. 2012.
- [28] **มนตรี พิพิธภุณเกษตร**. การถ่ายเทความร้อน ฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์. กรุงเทพมหานคร : วิทยพัฒน์. 2548.
- [29] **จารุวัตร เจริญสุข**. เอกสารประกอบการสอนวิชา Computational Fluid Dynamics. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพมหานคร.
- [30] H K Versteeg and W Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Second edition. England. Pearson Education Limited. 2007.
- [31] J. Charoensuk. "The Application of Mathematical Model for Scaling Pulverized coal combustors." Ph.D Thesis, University of London. 1996.
- [32] Rizvi S.M.A. "Prediction of Flow, Combustion and Heat Transfer in Pulverized Coal Flames." Ph.D. Thesis of University of London and the Dipoma of Membership of the Imperial College. 1985.
- [33] M A. Field. "Rate of Combustion of Size-Graded Fractions of Char from a Low Rank Coal between 1200 K-2000 K". *Combustion and Flame* 13, 1969. pp. 237-252.
- [34] M.M. Baum and P. J. Street. Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles. *Combust. Sci. Tech.* 3(5), 1971. pp. 231-243.
- [35] Wallis G.B. *One – Dimensional Two – Phase Flow*. New York : McGraw-Hill. 1969.
- [36] J. R. Cash and A. H. Karp. "A variable order Runge-Kutta method for initial value problems with rapidly varying right-hand sides." *ACM Transactions on Mathematical Software* 16. 1990. pp. 201-222.
- [37] Baum M.M. and Street P.J. "Predicting the Combustion Behaviour of Coal Particles." *Combustion Science and Technology* 3. 1971. p. 231.
- [38] Field M.A., Gill D.W., Morgan B.B. and Hawksley P.G.W. *Combustion of Pulverized Coal*. BCURA, Leatherhead, Surrey, England. Publisher : Cheney & Sons Ltd., Banbury, England .1967.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [39] S.R. Mathur and J. Y. Murthy. "Coupled ordinates method for multigrid acceleration of radiation calculations". *J. of Thermophysics and Heat Transfer* 13(4) 1999. pp. 467-473.
- [40] J.Ballester et al. "Comparative study of semi-industrial-scale flames of pulverized coals and biomass.", *Combustion and Flame* 141. 2005. pp. 204-215..
- [41] พีระพัฒน์ เทพลีป "การพัฒนาระบบควบคุมการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงขนาด 1 MW." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560.
- [42] GL820 midi logger. Data sheet [online]. Available: https://www.dataq.com/resources/pdfs/datasheets/gl820_ds.pdf.
- [43] Testo 350XL. Data sheet [online]. Available: <http://www.wisenvironmental.co.uk/docs/Testo%20350XL%20Data%20Sheet.pdf>.
- [44] KIMO CP110-PN. Data sheet download [online]. Available: http://www.kimo.fr/produits/1296/cp_110.html?lang=en.
- [45] นันทพล จันคง "การพัฒนาระบบควบคุมสัญญาณการเผาไหม้สำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560.
- [46] Winner win-v63. Data sheet [online]. Available: <http://www.fctcl.com/Upload/%E4%BA%A7%E5%93%81%E4%B8%AD%E5%BF%83/FrequencyInverter/WINV63seriesvectorcontrolinverter-16412370855.pdf>
- [47] Thailand Institute of Scientific and Technology Research (2015). Characteristics of rubber wood pellet report 2015.
- [48] พงศนันท์ แก่นพรม "อิทธิพลของแผ่นบีดและแผ่นขวางกั้นช่องการไหลต่อสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560.
- [49] ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม 2549. กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม. [online]. Available: http://www.mnre.go.th/more_news.php?offset=20&cid=110.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

การหาประสิทธิภาพการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง นอกเหนือจากการตรวจวัดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ปนมากับไอเสียแล้ว ยังต้องทำการตรวจวัดปริมาณชาร์ที่ปนมากับเถ้า (Char un-burnt) เพื่อคำนวณถึงปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ไม่ได้รับการเผาไหม้ แต่เนื่องจากหัวเผาที่ใช้ในการทดลอง เป็นขนาดที่สามารถนำไปใช้ในหม้อน้ำอุตสาหกรรม ดังนั้นในการทดสอบการเผาไหม้ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จึงไม่สามารถที่จะหยุดการทดสอบเพื่อทำการเก็บตัวอย่างของเถ้าได้ เนื่องจากในการทดสอบแต่ละครั้งต้องใช้ระยะเวลาที่ค่อนข้างนานกว่าที่การเผาไหม้จะเข้าสู่สภาวะคงตัว รวมไปถึงชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการทดลองไม่มีระบบสำหรับการเก็บตัวอย่างเถ้าในลักษณะแห้ง

ดังนั้นในการประเมินประสิทธิภาพการเผาไหม้จึงต้องประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงบดมาเป็นเครื่องมือในการประเมิน เมื่อพิจารณาผลการจำลองของเปอร์เซ็นต์ Char unburnt ดังตารางต่อไปนี้

% Char unburnt at 300 kW and 15 % excess air							
Particle		Cases					
Injection	D (micron)	Base	1	2	3	4	5
6	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	112.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	165.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	240.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	327.50	0.33	0.00	0.39	0.21	0.40	0.54
1	390.00	2.35	1.00	2.94	1.46	2.63	2.01
0	712.50	26.87	30.78	33.79	24.21	19.81	15.17
Total		29.55	31.78	37.12	25.88	22.84	17.72

การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_{comb}) จะทำการพิจารณาค่าความร้อนที่สูญเสียไปกับอนุภาคเชื้อเพลิงที่ไม่ได้รับการเผาไหม้ (flue heat losses) รวมกับค่าความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO heat losses) ต่อค่ากำลังความร้อนของเชื้อเพลิงที่ป้อนให้กับหัวเผา (fuel heating value) ซึ่งในตัวอย่างนี้จะยกตัวอย่างแค่หนึ่งเงื่อนไขคือ Base case สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

Flow rate	LHV _{fuel}	Carbon	LHV _{co}
kg/s	kJ/kg	kg _{carbon} /kg _{fuel}	kJ/kg _{co}
0.018563	16161	0.4542	10106

ตารางแสดงปริมาณขององค์ประกอบของ Flue gas จากการวัดในการทดลอง

Gas	By volume	MW	By Vol x MW	By mass
CO ₂	0.103301	44	4.545276	0.151849
CO	0.000185	28	0.005181	0.000173
O ₂	0.070000	32	2.240000	0.074834
N ₂	0.826513	28	23.14270	0.773143
		Total	29.93282	1

จาก

$$\eta_{comb} = \left(100 - \frac{flue\ heat\ losses + CO\ heat\ losses}{fuel\ heating\ value} \right) \times 100$$

เชื้อเพลิงจะมีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ 15.23 % นั่นคือจะมีอัตราการก่อกำเนิดคาร์บอนเท่ากับ 0.0028272 kg/s ดังนั้น Base case จะมีปริมาณคาร์บอนที่ไม่ได้รับการเผาไหม้เหลืออยู่เท่ากับ 29.55 % คือ 0.0008354 kg/s และจาก $H_{burnout}$ ของอนุภาคคาร์บอนสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลเท่ากับ 9200 kJ/kg เพราะฉะนั้นจาก $flue\ heat\ losses = \dot{m}_{unburn} \times H_{burnout}$ จะได้ Flue heat losses เท่ากับ 7.69 kW และจากความสัมพันธ์ด้านล่าง

$CO\ heat\ losses =$ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง \times ปริมาณ CO ในการเผาไหม้ fuel 1kg \times LHV_{co}

เมื่อ ปริมาณ CO ในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง 1 kg = ปริมาณแก๊สไอเสียแห้งในเชื้อเพลิง 1 kg \times สัดส่วนเชิงมวลของ CO ใน Flue gas

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ ปริมาณแก๊สไอเสียแห้งในเชื้อเพลิง 1 kg = คาร์บอนใน CO₂ และ CO ต่อ 1 kg
ของ Flue gas / ปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิง 1 kg

จากความสัมพันธ์ทั้งหมดสามารถหาพารามิเตอร์ที่นำไปสู่ค่า CO heat losses และสรุปดังตาราง
ต่อไปนี้

คาร์บอนใน CO ₂ และ CO	ปริมาณแก๊สไอเสียแห้ง	ปริมาณ CO ในการเผาไหม้
kg _{carbon} /kg _{flue gas}	kg _{dry flue gas} /kg _{fuel}	kg _{co} /kg _{fuel}
0.041487	10.94784	0.001895

ดังนั้น CO heat losses = 0.355522 kW ในเงื่อนไขที่ Fuel heating เป็น 300 kW นำไปสู่
ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 97.31 %



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คำขอใบรับรอง เลขที่ 144/58

ที่ ผทท.หน. 452-05/58

รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์

ให้แก่

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การทดสอบ / วิเคราะห์ เรือเพลิงเครื่องยนต์อากาศยาน

วิธีทดสอบ / วิเคราะห์ ASTM D 7582, D 5373, D 4239 and D 5865

ภาวะการทดสอบ / วิเคราะห์: อุณหภูมิ - °C ความชื้นสัมพัทธ์ - %

ผลการทดสอบ / วิเคราะห์

คุณสมบัติ	สภาพอ้างอิง	สภาพน้ำหนักแห้ง
ความชื้น, %	5.81	
สารระเหย, %	76.68	81.41
อิมัลชัน, %	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, %	48.54	42.86
ซีลีเนียม, %	0.00	0.00
ค่าความร้อนสูง, กิโลแคลอรี/กก.	4,180	4,400
ค่าความร้อนต่ำ, กิโลแคลอรี/กก.	3,960	4,100

ผู้ทดสอบ / วิเคราะห์

- 1.
2. ทินส์ พงษ์จตุร.

ผู้รับรอง

(ดร.อเนก พงษ์ธรรม)
ผู้อำนวยการฝ่ายเทคนิค

ผู้ตรวจสอบ

(ดร.บริพัตร ชินทรวงศ์ไพศาล)

ผู้อำนวยการ ฝ่ายเทคโนโลยีพลังงาน

วันที่ 21 พฤษภาคม 2558

ผลการทดสอบวิเคราะห์นี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้นำมาทดสอบ / วิเคราะห์เท่านั้น
ทีมงานผลการทดสอบ / วิเคราะห์ ไม่สามารถรับผิดชอบต่อผลเป็นภาระผูกพันอื่นใดจาก วร.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

เพื่อกำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๕๕ แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. ๒๕๓๕ แก้ไขโดยมาตรา ๑๐๕ แห่งพระราชกฤษฎีกาแก้ไขบทบัญญัติให้สอดคล้องกับการโอนอำนาจหน้าที่ของส่วนราชการ ให้เป็นไปตามพระราชบัญญัติปรับปรุงกระทรวง ทบวง กรม พ.ศ. ๒๕๔๕ พ.ศ. ๒๕๔๕ อันเป็นพระราชบัญญัติที่มีบทบัญญัติบางประการเกี่ยวกับการจำกัดสิทธิและเสรีภาพของบุคคล ซึ่งมาตรา ๒๕ ประกอบกับมาตรา ๓๕ มาตรา ๔๘ มาตรา ๕๐ และมาตรา ๕๑ ของรัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทยบัญญัติให้กระทำได้ โดยอาศัยอำนาจตามบทบัญญัติแห่งกฎหมาย รัฐมนตรีว่าการกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมโดยคำแนะนำของคณะกรรมการควบคุมมลพิษ และโดยความเห็นชอบของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติจึงออกประกาศไว้ ดังต่อไปนี้

ข้อ ๑ ในประกาศนี้

“โรงงานอุตสาหกรรม” หมายความว่า โรงงานจำพวกที่ ๒ และโรงงานจำพวกที่ ๓ ตามกฎหมายว่าด้วยโรงงาน

“การประกอบกิจการโรงงาน” หมายความว่า การทำ ผลิต ประกอบ บรรจุ ซ่อม ซ่อมบำรุง ทดสอบ ปรับปรุง แปรสภาพ ล้างล้าง เก็บรักษา หรือทำอะไรสิ่งใด ๆ ตามลักษณะกิจการของโรงงาน แต่ไม่รวมถึง การทดลองเดินเครื่องจักร

“กระบวนการผลิต” หมายความว่า การประกอบกิจการโรงงานอย่างใดอย่างหนึ่งที่มีการปล่อยทิ้งอากาศเสียออกสู่บรรยากาศ

“กระบวนการผลิตที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง” หมายความว่า การประกอบกิจการโรงงานในขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งที่มีกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง หรือการสันดาป และมีการปล่อยทิ้งอากาศเสียออกสู่บรรยากาศ

“เชื้อเพลิงชีวมวล” หมายความว่า เชื้อเพลิงที่ได้มาจากอินทรีย์สารหรือสิ่งมีชีวิต รวมทั้งผลผลิตจากการเกษตร การปศุสัตว์ และการทำป่าไม้ เช่น ไม้พิน เศษไม้ แกลบ ฟาง ชานอ้อย ต้นอ้อย ใบอ้อย ใยปาล์ม กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม กะลามะพร้าว โยมะพร้าว เศษพืช มูลสัตว์ ก๊าซชีวภาพ กากตะกอน หรือของเสียจากโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เป็นต้น

หน้า ๑๐
เล่ม ๑๒๓ ตอนที่ ๕๐ ง ราชกิจจานุเบกษา ๑๘ พฤษภาคม ๒๕๕๕

ข้อ ๒ อากาศเสียแต่ละชนิดที่ปล่อยทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต้องมีค่าไม่เกินกว่ามาตรฐาน
ควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ ดังต่อไปนี้

ชนิดของอากาศเสีย	แหล่งที่มาของอากาศเสีย	ค่าปริมาณของอากาศเสียที่ปล่อยทิ้งเวลา	
		ปริมาณการปล่อยทิ้งโดย การเผาไหม้เชื้อเพลิง	ปริมาณการปล่อยทิ้ง จากการไหลซึมของเหลว
๑. ฝุ่นละออง (Total Suspended Particulate) (นับรวมทั้งอนุภาคที่จับตัว)	๑.๑ หม้อไอน้ำ หรือแหล่งกำเนิด ความร้อนที่ใช้อย่างอื่น ดังนี้ (๑) น้ำมันเตา (๒) ถ่านหิน (๓) ขี้เถ้า (๔) เชื้อเพลิงเหลว ๑.๒ การหล่อ หลอมโลหะ รีดดัด และตีเหล็ก อลูมิเนียม ๑.๓ ปริมาณการปล่อย	- - - - ไม่เกิน ๓๐๐	ไม่เกิน ๒๕๐ ไม่เกิน ๓๒๐ ไม่เกิน ๓๒๐ ไม่เกิน ๓๒๐ ไม่เกิน ๒๕๐
๒. คาร์บอนไดออกไซด์ (Sulfur dioxide) (ส่วนในล้านส่วน)	๒.๑ หม้อไอน้ำ หรือแหล่งกำเนิด ความร้อนที่ใช้อย่างอื่น ดังนี้ (๑) น้ำมันเตา (๒) ถ่านหิน (๓) ขี้เถ้า (๔) เชื้อเพลิงเหลว ๒.๒ ปริมาณการปล่อย	- - - - ไม่เกิน ๕๐๐	ไม่เกิน ๕๕๐ ไม่เกิน ๗๐๐ ไม่เกิน ๖๐ ไม่เกิน ๖๐
๓. คาร์บอนไดออกไซด์ของไนโตรเจนซึ่ง คำนวณในรูปของไนโตรเจน ไดออกไซด์ (Oxides of nitrogen as Nitrogen dioxide) (ส่วนในล้านส่วน)	หม้อไอน้ำ หรือแหล่งกำเนิดความร้อน ที่ใช้อย่างอื่น ดังนี้ (๑) น้ำมันเตา (๒) ถ่านหิน (๓) ขี้เถ้า (๔) เชื้อเพลิงเหลว	- - - -	ไม่เกิน ๒๐๐ ไม่เกิน ๕๐๐ ไม่เกิน ๒๐๐ ไม่เกิน ๒๐๐
๔. คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) (ส่วนในล้านส่วน)	ปริมาณการปล่อย	ไม่เกิน ๗๕๐	ไม่เกิน ๖๕๐

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า ๑๑

เล่ม ๑๒๓ ตอนที่ ๕๐ ง ราชกิจจานุเบกษา ๑๘ พฤษภาคม ๒๕๕๕

ชนิดของเวลาเลข	แหล่งที่มาของเวลาเลข	จำปริมาณของเวลาเลขที่ปล่อยทิ้งเวลา	
		ปริมาณการปลดปล่อยที่มี การเผาไหม้หรือหลอม	ปริมาณการปลดปล่อย การเผาไหม้หรือหลอม
๕. ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) (ส่วนในล้านส่วน)	ปริมาณการปลดปล่อย	ไม่เกิน ๑๐๐	ไม่เกิน ๕๐
๖. ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (Hydrogen Chloride) (มีคลอรีนที่ออกซิไดซ์แล้ว)	ปริมาณการปลดปล่อย	ไม่เกิน ๒๐๐	ไม่เกิน ๑๐๐
๗. กรดกำมะถัน (Sulfuric acid) (ส่วนในล้านส่วน)	ปริมาณการปลดปล่อย	ไม่เกิน ๒๕	-
๘. ไนโตรเจน (Nitrogen) (ส่วนในล้านส่วน)	ปริมาณการปลดปล่อย	ไม่เกิน ๒๐๐	-
๙. คาร์บอน (Carbon) (ส่วนในล้านส่วน)	ปริมาณการปลดปล่อย	ไม่เกิน ๕	-
๑๐. ฟอสฟอรัส (Arsimony) (มีคลอรีนที่ออกซิไดซ์แล้ว)	ปริมาณการปลดปล่อย	ไม่เกิน ๒๐	ไม่เกิน ๑๖
๑๑. อาร์เซนิก (Arsenic) (มีคลอรีนที่ออกซิไดซ์แล้ว)	ปริมาณการปลดปล่อย	ไม่เกิน ๒๐	ไม่เกิน ๑๖
๑๒. ทองแดง (Copper) (มีคลอรีนที่ออกซิไดซ์แล้ว)	ปริมาณการปลดปล่อย	ไม่เกิน ๓๐	ไม่เกิน ๒๕
๑๓. ตะกั่ว (Lead) (มีคลอรีนที่ออกซิไดซ์แล้ว)	ปริมาณการปลดปล่อย	ไม่เกิน ๓๐	ไม่เกิน ๒๕
๑๔. คลอรีน (Chlorine) (มีคลอรีนที่ออกซิไดซ์แล้ว)	ปริมาณการปลดปล่อย	ไม่เกิน ๓๐	ไม่เกิน ๒๕
๑๕. ปรอท (Mercury) (มีคลอรีนที่ออกซิไดซ์แล้ว)	ปริมาณการปลดปล่อย	ไม่เกิน ๓	ไม่เกิน ๒.๕

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อ ๓ การรายงานผลการตรวจวัดอากาศเสีย ให้รายงานผล ดังต่อไปนี้

(๑) กระบวนการผลิตที่ไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง ให้คำนวณผลที่ความดัน ๑ บรรยากาศ หรือที่ ๗๖๐ มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ ๒๕ องศาเซลเซียส ที่สภาวะแห้ง (Dry Basis) โดยมีปริมาตรอากาศเสียที่ออกซิเจน (%O₂) ๗ สภาวะจริงในขณะที่ตรวจวัด

(๒) กระบวนการผลิตที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง ให้คำนวณผลที่ความดัน ๑ บรรยากาศ หรือที่ ๗๖๐ มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ ๒๕ องศาเซลเซียส ที่สภาวะแห้ง (Dry Basis) โดยมีปริมาตรอากาศเสียที่ออกซิเจน (%O₂) ร้อยละ ๗

ข้อ ๔ การตรวจวัดอากาศเสียแต่ละชนิดตามข้อ ๒ ให้ใช้วิธี ดังต่อไปนี้

(๑) การตรวจวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง ให้ใช้วิธี Determination of Particulate Matter Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency) กำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

(๒) การตรวจวัดค่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ให้ใช้วิธี Determination of Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources หรือวิธี Determination of Sulfuric Acid and Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกาคำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

(๓) การตรวจวัดค่าก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ให้ใช้วิธี Determination of Nitrogen Oxide Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกาคำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

(๔) การตรวจวัดค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ให้ใช้วิธี Determination of Carbon Monoxide Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกาคำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

(๕) การตรวจวัดค่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ให้ใช้วิธี Determination of Hydrogen Sulfide, Carbonyl Sulfide and Carbon Disulfide Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกาคำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

(๖) การตรวจวัดค่าก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ให้ใช้วิธี Determination of Hydrogen Halide and Halogen Emissions from Stationary Sources: Non-Isokinetic หรือวิธี Determination of Hydrogen Halide and Halogen Emissions from Stationary Sources: Isokinetic ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกากำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

(๗) การตรวจวัดค่ากรดกำมะถัน ให้ใช้วิธี Determination of Sulfuric Acid and Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกากำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

(๘) การตรวจวัดค่าไซลีน ให้ใช้วิธี Measurement of Gaseous Organic Compound Emissions by Gas Chromatography ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกากำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

(๙) การตรวจวัดค่าคาร์บอน ให้ใช้วิธี Measurement of Gaseous Organic Compound Emissions by Gas Chromatography ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกากำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

(๑๐) การตรวจวัดค่าพลวง ให้ใช้วิธี Determination of Metals Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกากำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

(๑๑) การตรวจวัดค่าสารหนู ให้ใช้วิธี Determination of Metals Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกากำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

(๑๒) การตรวจวัดค่าทองแดง ให้ใช้วิธี Determination of Metals Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกากำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

(๑๓) การตรวจวัดค่าตะกั่ว ให้ใช้วิธี Determination of Metals Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกากำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล่ม ๑๒๓ ตอนที่ ๕๐ ง หน้า ๑๔
 ราชกิจจานุเบกษา ๑๘ พฤษภาคม ๒๕๔๕

(๑๔) การตรวจวัดค่าคลอรีน ให้ใช้วิธี Determination of Hydrogen Halide and Halogen Emissions from Stationary Sources Non-Isokinetic หรือวิธี Determination of Hydrogen Halide and Halogen Emissions from Stationary Sources Isokinetic ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกากำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

(๑๕) การตรวจวัดค่าสารปรอท ให้ใช้วิธี Determination of Metal Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา กำหนดไว้ หรือวิธีอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นชอบโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

ข้อ ๕ ประกาศนี้ไม่ใช้บังคับกับแหล่งกำเนิดมลพิษที่ไม่มีกำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสีย ตามกฎหมายว่าด้วยส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติไว้เป็นกรณีเฉพาะแล้ว

ข้อ ๖ ประกาศนี้ให้ใช้บังคับตั้งแต่วันถัดจากวันประกาศในราชกิจจานุเบกษาเป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ ๕ เมษายน พ.ศ. ๒๕๔๕

องยุทธ ตริยะไพรัช

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Mechanical Engineering
Innovation for Green Society



INSTITUTION OF
MECHANICAL
ENGINEERS

The 7th TSME-International Conference on Mechanical Engineering
13-16 December 2016
Duangtawan Hotel, Chiang Mai, Thailand

Hosted by CHULA ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Effect of Primary to Secondary Air Ratio on Combustion Performance for Pulverized Biomass Burner in Industrial Boiler

Narasad Phikum-ngoen¹, Jarruwat Charoensuk^{1*}, Monton Jhaikuson¹, Niwat Suksam¹, and Nuthvipa Jayranaiwachira¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

* Corresponding Author: Tel.: +66 2 3298350; fax: +66 3298352; E-mail address: kjaruw@kmitl.ac.th (J.Charoensuk)

Abstract

This research aims to investigate the factor of primary to secondary air ratio that influences the temperature in pre-chamber of 1 MW pulverized biomass burner. The air system in pulverized biomass burner is separated into three parts: primary, secondary and tertiary air. The experiment was performed as base case at the primary to secondary air ratio of 0.1538 and used for validation of the simulation. On simulation, swirl blades angle were fixed at 100 degrees, while the primary and secondary air flow rate were adjusted leading to the mass ratio variation. The comparison on each case was made on axial temperature. Among five cases of mass ratio (0.0714, 0.0769, 0.1250, 0.1333 and 0.1429), it was shown that the case for operation was found at the mass ratio of 0.1333. At this ratio, the maximum temperature and position were 1505.47 °C and 1.138 m, respectively, while the base case was 1415.05 °C and 1.404 m.

Keywords: Biomass Burner; Simulation; Primary Air; Secondary Air.

1. Introduction

In recent years, alternative energy has gained attention around the world because the energy demand is very high. The search for new alternative energy and using it with highest efficiency have received increasing attention. One of the interesting alternative energy resources is biomass. If utilized effectively, it will emit low pollution. Moreover, the main ingredients are bio organic substances including waste agriculture such as husk, sawdust and bagasse, etc.

Most combustion researches are based on empirical approach. It requires a huge experiment number, lot of cost, time and numerous resources compared with the numerical simulation for its low cost and high flexibility on application. The computational fluid dynamics (CFD) approach was used in this research to visualize the detailed of temperature distribution and flow field. Sharif and Bercoand [1] validated the difference between the numerical and experimental data. The validation study showed that the maximum difference of the numerical and experimental results was up to 11%. Dong-Fang Zhao et al [2] optimized the geometrical parameters of the nozzle outlet to ejector inlet and nozzle outlet diameter of a premixed cylindrical burner for low pollutant emission by using CFD model. The result showed that the maximum discrepancy between the numerical and experimental results was about 3.1% at $\alpha=1.6$. They explained that the reason for the discrepancies may originate from the assumption model, error from instruments system, experimental environment, approximate algorithm and operators, respectively. Thanaphat Phakdeeworrawong [3] used

the numerical model for coal combustion for simulation of pulverized biomass burner. He found the highly dispersed particle trajectories in a pre-chamber formed at 90 degrees of outlet wall angle. This could provide stable combustion without blow-off effect. Chinnapat Tursakorn [4] studied the combustion characteristic of a pulverized biomass burner on a difference swirl blades angle. The results showed that at 100 degrees of swirl blades angle, the secondary air flow was able to induce recirculation within the pre-chamber, thus enabling the combustion stability. The pulverized biomass burner with pre-chamber can be operated at 300 kW to 500 kW which could be used for industrial applications.

The air flow rate has great influence on the temperature distribution, stability of flame and exhaust gas concentration formed by combustion process. Jianping Jing et al. [5] studied the influence of various primary air ratios with CFR swirl coal burner. He found that by decreasing the primary air ratio, the gas temperature, temperature gradient and carbon monoxide concentration in the nozzle region had increased, while nitrogen oxides decreased. Later, Jianping Jing et al. [6] studied the influence of various mass flow rates (MFR) of secondary air on gas/particle flow characteristics of a CFR burner and found that at the MFR of 0.259 kg/s, large recirculation zone would occur. This resulted in stable combustion and also inhibited NOx formation.

In our pulverized biomass burner system, the unsuitability of the primary to secondary air ratio had caused a long flame and provided high temperature at wet scrubber, which is a dangerous case. The study of air ratio is necessary. It has the advantages not only for



AEC097

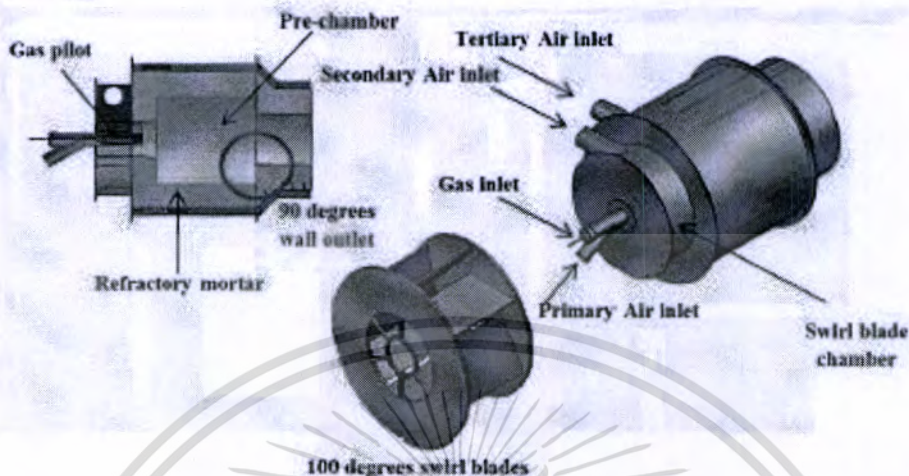


Fig. 1 Description of the pulverized biomass burner

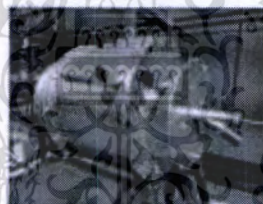
safety of system but also the relevant person during operation.

In the present work, the investigation on the effect of primary to secondary air ratio will be presented aiming to reduce the length of flame and increase the temperature in the pre-chamber with 500 kW of pulverized biomass burner. Our approach is based on CFD prior to conducting experimental investigation in order to save time and resource.

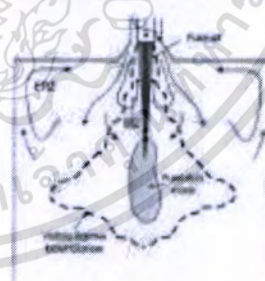
2. Description of the pulverized biomass burner and system

Fig. 1 shows the pulverized biomass burner. It consists of the pre-chamber, refractory mortar, 100 degree swirl blades, gas inlet, gas pilot, biomass fuel-primary air mixture inlet, secondary air inlet and tertiary air inlet. The pre-chamber, starting from the gas pilot, is all covered by refractory mortar. The outer edge of refractory mortar has a tertiary air flow layer introduced for trapping heat of the flame. The refractory mortar is connected with 90-degree reduction component [3]. During operation, the pulverized biomass is transported by screw feeder and entrained by primary air through primary air inlet into a pre-chamber. At the same time, the secondary air from secondary air fan pass through 100 degree swirl blades in swirl blade chamber, this swirl blade produces swirling air into the pre-chamber and generate recirculation within the pre-chamber. While burning, the tertiary air flowing through layer between refractory mortar and metal wall outside burner, passes through a tertiary port, creating cooling effect around the outer skin of the burner for safety of a person nearby. The pulverized biomass burner is designed at 1 MW. The recirculation in a pre-chamber has an

important role on realizing combustion performance. There are two zones of recirculation in the chamber: i) internal recirculation zone (IRZ) and, ii) external recirculation zone (ERZ) see Fig. 2b



(a) Photograph of pulverized biomass burner



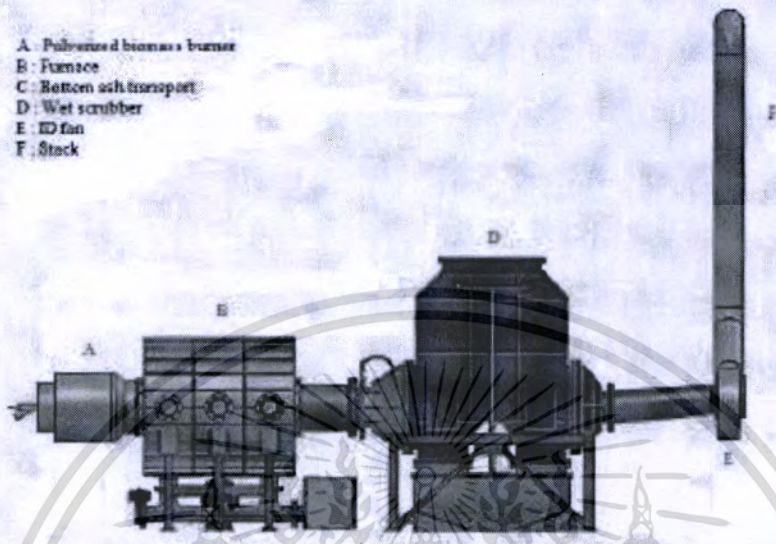
(b) Recirculation air in pre-chamber [7]

Fig. 2 The photograph of pulverized biomass burner and recirculation air in pre-chamber

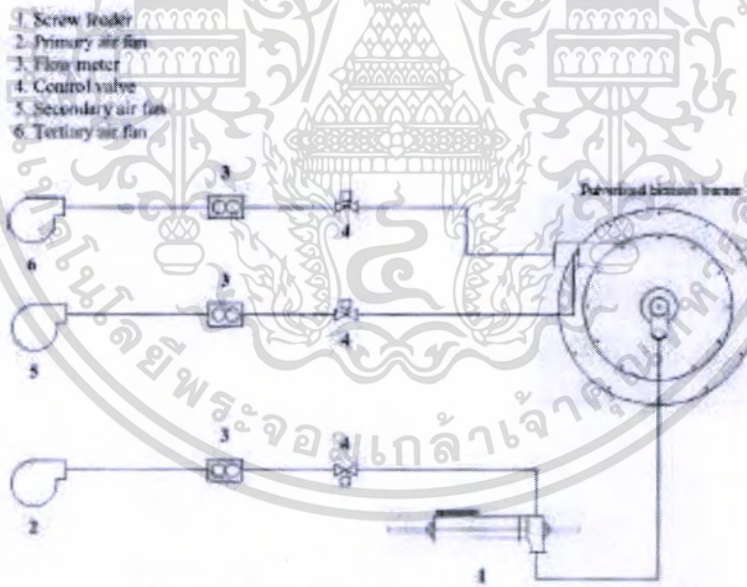
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



AEC097



(a) Schematic diagram of experimental plant system



(b) Schematic diagram pulverized biomass burner of air system

Fig. 3 Schematic diagram of experimental plant and air system of pulverized biomass burner

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AEC097

For the gas pilot burner, it is intended for use to start the operation and warm up the system. The air system in pulverized biomass burner is separated into three parts: primary, secondary and tertiary air, as given in Fig.3b. The air flow of each part is driven by primary, secondary and tertiary air fan, respectively. The pulverized biomass is entrained by primary air flow at screw feeder outlet. Three proportional valves are controlled by ZXQ2004C positioner electric actuator [8] to adjust the air flow rates of the system. There are three orifice flow meters which have ISO 5167 connection with three kimo CP110 differential pressure transmitters with measuring range of ± 100 Pa to ± 2000 mbar [9] to measure the three flow rates of air inlet. Fig.3a shows a schematic diagram of the experimental plant. While combustion take place in a pre-chamber and furnace, locating under furnace is a bottom ash transport system. It has been installed to drain the bottom ash for continued operation of system. The ID fan plays an important role in drafting exhaust gas and fly ash from combustion process through a wet scrubber for cooling the exhaust gas and trap the fly ash by water spray inside the wet scrubber before passing through to the stack.

3. CFD model and boundary condition

This simulation work is based on 3D model. It takes long time to reach convergence. Therefore, the assumptions are made before calculation, the problem is assumed to be at steady state.

3.1 Gas phase modeling [10]

The gas phase flow is described by set the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations to steady state, closed by the $k-\epsilon$ Standard turbulence model. The governing equations can be written as:

$$\nabla \cdot (\rho U \phi) - T_{eff} \nabla \phi = S_\phi \quad (1)$$

Where U is mean velocity, ρ is density, S_ϕ is source term. The governing equations solved for gas phase include various parameters which summarized in Table 1.

3.2 Particle phase modeling [11]

The Lagrangian method was adopted for the particulate phase suspending in the flow. The interaction between particulate and gaseous phases are related through the transfers of mass, momentum and energy. The source terms can be calculated by using Particle Source in Cell Techniques [12] shown in Fig.4



Fig. 4 Trajectory of particle for Lagrangian's Method

Table. 1 Variables ϕ , T_{eff} and S_ϕ in governing equation for gas phase

	ϕ	T_{eff}	S_ϕ
Continuity	1	0	Total mass transfer rate from particle phase
Momentum	u, v	$\mu + \mu_p$	Drag forces of particle
Energy	H	$\lambda + \frac{\mu_p}{\sigma_T}$	Reaction heats and convection/radiation heat transfers from particle phase
Species mass fraction	Y_i	$T + \frac{\mu_p}{\sigma_{T_i}}$	Chemical reaction rate involving species component i
Turbulent kinetic energy	k	$\mu + \frac{\mu_p}{\sigma_k}$	$P_k - \epsilon_k$
Turbulent dissipation rate	ϵ	$\mu + \frac{\mu_p}{\sigma_\epsilon}$	$C_1 \frac{\epsilon}{k} P - C_2 \rho \frac{\epsilon^3}{k}$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}, P_k = (\mu + \mu_p) \nabla U \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T)$$

$$C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$$

3.3 CFD model

The CFD solved by software ANSYS FLUENT 12.0 and used the species transport, $k-\epsilon$ Standard turbulence model by increasing 2.5 times the default parameter of the oxygen diffusion surface rate of char particle (C_1) and kinetic reaction rate of char particle (C_2) and used the random walk model for turbulent effect on particle trajectories. The kinetic parameters are shown in Table 2.

Table. 2 Kinetic parameters for biomass combustion

Kinetic parameters:	
Devolatilization, E (J/kg-mol)	7.40×10^7
Pre-Exponential Factor	3.82×10^5
Char reaction, E (J/kg-mol)	7.00×10^7

The wood pellet made from rubber tree was used in this work. The ultimate analysis has been characterized by Thailand Institute of Scientific and Technology Research (TISTR) [13] as given in Table 3. The comparison on primary to secondary air ratio case was made with respect to axial temperature distribution. This ratio is calculated by Eq. (2) and known that mass ratio. The various air boundary conditions are simulated in order to compare for different operation cases shown in Table 4.



AEC097

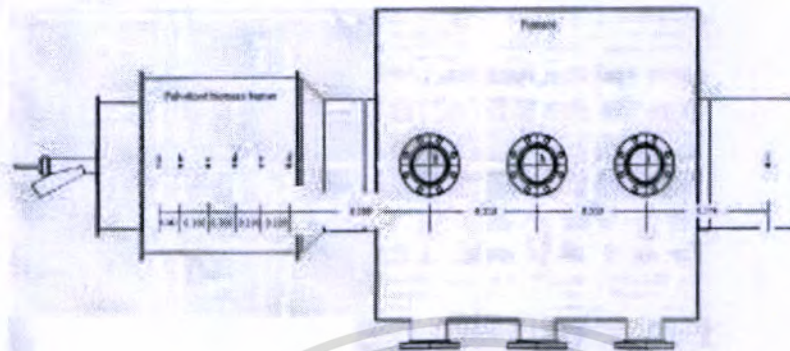


Fig. 5 The position description of pores for insertion thermocouples

Table 3 Characteristics of rubber wood pellet [13]

Proximate analysis	(% mass)
Volatile	76.68
Fixed carbon	15.23
Moisture	5.81
Ultimate analysis	(% mass)
Carbon	45.42
Hydrogen	5.31
Nitrogen	0.45
Sulphur	0.00
Oxygen	45.54
GCV (MJ/kg)	17.50

$$\text{Mass ratio} = \frac{\dot{m}_{\text{primary}}}{\dot{m}_{\text{secondary}}} \quad (2)$$

Where \dot{m}_{primary} is the mass flow rate of primary air (kg/s) and $\dot{m}_{\text{secondary}}$ is the mass flow rate of secondary air (kg/s).

4. Results and discussions

In the experimental set up, the pulverized biomass burner and furnace were installed with thermocouples along axial distance for measurement of temperature. As mentioned above, special attention was made on temperature in a pre-chamber. Therefore 5 locations of temperature are monitored in a pre-chamber. The

position description and point detail of monitoring locations are shown in Fig. 5 and Table 5, respectively.

Table 4 Air boundary conditions for simulation

Case	Air mass flow rate						Mass ratio
	Primary		Secondary		Tertiary		
	kg/s	%	kg/s	%	kg/s	%	
Base	0.0223	10	0.1440	65	0.0577	25	0.1528
1	0.0111	5	0.1560	70	0.0577	25	0.0714
2	0.0111	5	0.1440	65	0.0668	30	0.0769
3	0.0223	10	0.1783	80	0.0284	10	0.1258
4	0.0223	10	0.1671	75	0.0234	10	0.1333
5	0.0223	10	0.1360	70	0.0446	20	0.1429
Total air mass flow rate			Fuel mass flow rate				
0.2239 kg/s			0.0317 kg/s				

Table 5 Point details of pores in Fig. 5

Position	Description
a	Outlet of biomass fuel-primary air mixture pipe
b	Pre-chamber 1
c	Pre-chamber 2
d	Pre-chamber 3
e	Pre-chamber 4
f	Pre-chamber 5
g	Furnace 1
h	Furnace 2
i	Furnace 3
j	Flue gas

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



AEC097

4.1 Validation for combustion simulation results

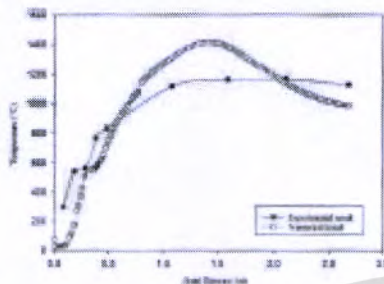


Fig. 6 Comparisons between combustion simulation results of base case temperature and experimental data

The experiment was performed as base case at the mass ratio of 0.1538 and used for validation. Fig.6 shows the simulation results of the base case temperature as compared with the experimental data. The maximum difference between simulation results and experimental results is about 19.33% at axial distance =1.594 m. the difference is observable in the pre-chamber and in the furnace. Similar to the study found in existing literature [2] the reason of the difference between the simulation and experimental results may originate from the assumptions of models being used, simplifications of the problem, error from instruments system, experimental environment, approximate algorithm and operators, respectively.

4.2 Simulation results of base case along the axial symmetry cross-section



Fig. 7 Base case temperature distributions along the axial symmetry cross-section

Fig.7 shows the temperature distributions along the axial symmetry cross-section. It depicts the flame length of base case. It is noticeable that temperature at furnace outlet zone is high because the turbulence and residence time of fuel in pre-chamber is too low and pulverized biomass fell out abruptly from mixing during combustion process. This can be observed in Fig.8

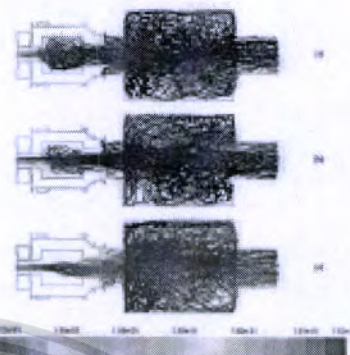


Fig. 8 Mass fraction of char particle trajectory (base case); (a) 37.50-112.5, (b) 165.0-240.0, (c) 362.5-500.0 μm

Fig.8 shows the mass fraction of char particle along with its trajectory for the base case. It consists of three diameter ranges i.e.; 37.50-112.5, 165.0-240.0, and 362.5-500.0 μm. Most of char particles are found well-dispersed in the pre-chamber, especially for the diameter range below 112.5 μm which is also found in ERZ. This is because small char particle has low momentum than large char particle. The momentum of large char particle can overcome the momentum of air recirculation in the pre-chamber and start to dispersed further away from the burner exit plane. This is not so when considering the momentum of small char particle. From the issue aforementioned, the decrease in temperature at furnace outlet and the decrease in flame length are achieved by increasing the turbulence in pre-chamber, especially for the cases with char residence time being longer than the base case. This can be described by case 1 through to case 5 in the next topics.

4.3 Simulation results of case 1 and case 2 along the axial symmetry cross-section

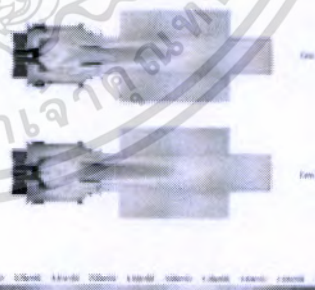


Fig. 9 Temperature distributions of case 1 and case 2 along the axial symmetry cross-section

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AEC097

Fig. 9 shows the temperature distributions of case 1 and case 2 along the axial symmetry cross-section, where the mass ratio is 0.0714 and 0.0769, respectively. The effect of mass ratio among case 1 and case 2 are small because the difference in mass flow ratio is around 5 %, referring to the numerator in Eq. (2). When decreasing the mass ratio further, it is noticeable that the process could continue to achieve stable combustion but there are hotspots at outlet wall of the burner.

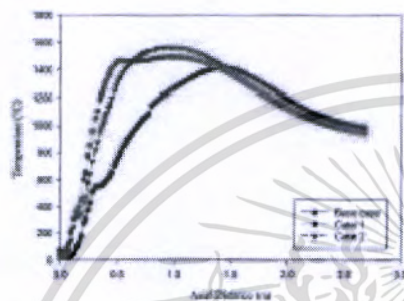


Fig. 10 Axial temperature of base case, case 1 and case 2

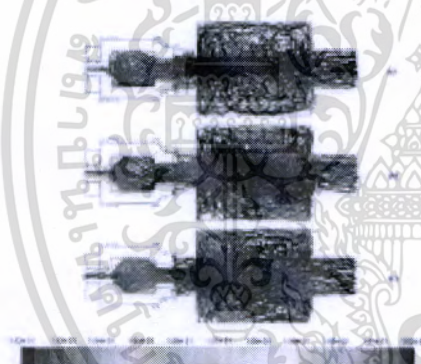


Fig. 11 Mass fraction of char particle trajectory (case 1): (a) 37.50-112.5, (b) 165.0-240.0, (c) 362.5-500.0 μm

Fig. 10 depicts the variation of the axial temperature with the decrease in mass ratio. The axial temperature of case 1 and case 2 are very similar. In both cases, dispersion of char particle significantly increases with decreasing in mass ratio because the momentum of all particle size decrease (observation in Fig.11 – 12). This results in an increase in temperature of a pre-chamber. High temperature is observed at the throat between pre-chamber and the main furnace. This hotspot shall be avoided in real situation in order to prevent thermal damage of the system.

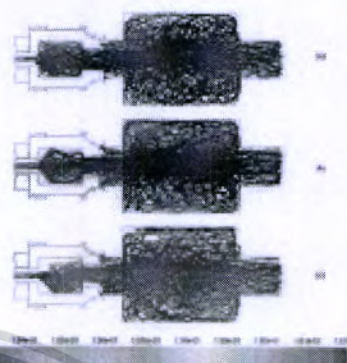


Fig. 12 Mass fraction of char particle trajectory (case 2): (a) 37.50-112.5, (b) 165.0-240.0, (c) 362.5-500.0 μm

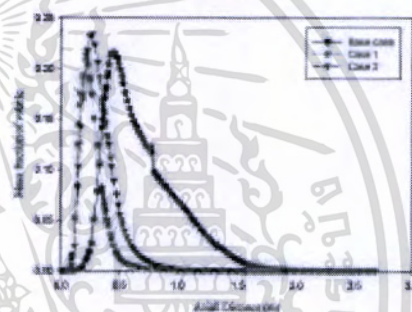


Fig. 13 Axial mass fraction of volatile of base case, case 1 and case 2

Fig. 13 shows the mass fraction of volatile along axial distance, which consistent with axial temperature and mass fraction of char particle. For base case, there is a relatively low concentration in a pre-chamber, therefore an intense volatile burn out take place outside the pre-chamber next to the tertiary air inlet. For case 1 and case 2, however, Peak value of volatile concentration is well within the pre-chamber region and sharply decrease by an intense combustion taking place at the throat of the pre-chamber. Case 1 is performed by increasing the secondary air mass flow rate, which can induce the internal recirculation well within the pre-chamber, while case 2 has a slightly difference in mass ratio compared to case 1. It creates slight delay in volatile falling pattern as a result of delayed volatile combustion along axial distance as compared to case 1.

4.4 Simulation results of case 3, case 4 and case 5 along the axial symmetry cross-section

Fig. 14 shows the temperature distributions of case 3 case 4 and case 5 along the axial symmetry cross-section, with the mass ratio of 0.1250, 0.1333

AEC097

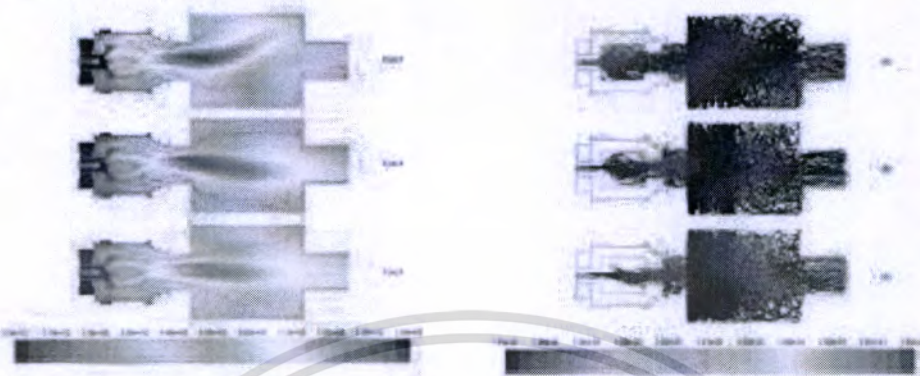


Fig. 14 Temperature distributions of case 3, case 4 and case 5 along the axial symmetry cross-section

Fig. 17 Mass fraction of char particle trajectory (case 4): (a) 37.50-112.5, (b) 165.0-240.0, (c) 362.5-500.0 μm

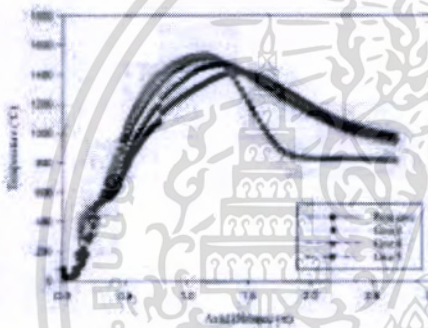


Fig. 15 Axial temperature of case 3, case 4 and case 5



Fig. 18 Mass fraction of char particle trajectory (case 5): (a) 37.50-112.5, (b) 165.0-240.0, (c) 362.5-500.0 μm

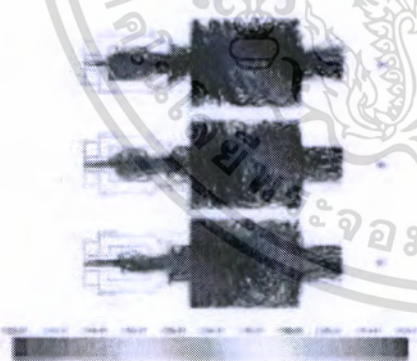


Fig. 16 Mass fraction of char particle trajectory (case 3): (a) 37.50-112.5, (b) 165.0-240.0, (c) 362.5-500.0 μm

and 0.1429, respectively. The increment of secondary air mass flow rate (by 5%) has caused slightly decreased in the mass ratio. This is because the mass flow rate of secondary air is the denominator, see Eq. (2). At the mass ratio of 0.1429, it is noticeable that it stable could be achieved but when the mass ratio is 0.1333 the flame begin to flick and severely flick when the mass ratio is 0.1250. This suggest that tertiary air has a strong influence on the flame shape in the furnace. The effect of buoyancy force for case 3 is most severe while in case 4 is lower and become insignificant in case 5.

Fig. 15 shows the axial temperature of the base case compared with case 3, case 4 and case 5. The result indicates that there are some differences among them. In case 3, at a distance about 1.4 m from the

AEC097

primary exit port, the temperature is highest. This is due to effect of large reverse flow and high turbulence in the pre-chamber created by angular momentum of the secondary air. Severe flick in flame shape is evidenced by relatively higher axial temperature compared with cases 4 and 5.

As far as burnout of char particle is concerned, the amount of left-over mass fraction of char for all cases are presented in Figs 16, 17 and 18. Although the particle trajectories are quite different, it was found that the effect of secondary to tertiary air ratio on degree of char burner out is not significant.

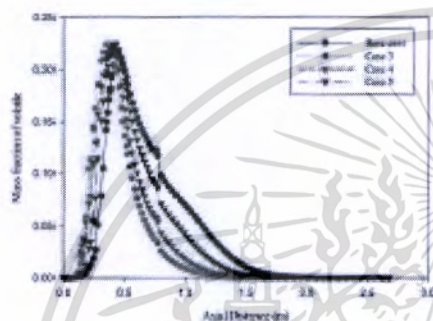


Fig. 19 Axial mass fraction of volatile of base case, case 3, case 4 and case 5

Fig.19 indicated clearly that devolatilization of case 3, 4 and 5 occur earlier than the base case. This corresponds to the amount of secondary air which directly relate to an angular momentum in the pre-chamber. Due to highest reverse flow in pre-chamber, the combustion volatile of case 3 can be completed before other case. This is consistent with those described earlier that this case has the highest axial temperature at axial distance at about 1.4 m.

It should be noted that the more turbulence taking place in pre-chamber, the earlier devolatilization occur. It creates high temperature in a pre-chamber and reduces the length of flame in operation. From the simulation results, it was shown that the case for highest temperature in pre-chamber was found at the mass ratio of 0.1250 but this mass ratio could not provide desirable flame shape due to influence of buoyancy force. Therefore, the mass ratio of 0.1333 was considered for operation case as there is a little flick of flame which is acceptable, while reduction of flame length could be achieved. Moreover, it satisfy safety requirement as hotspot at the connecting rod can be avoided although the temperature in a pre-chamber was higher than the base case and case 5. Therefore, this case has enough features to be appointed as operation case for our 1 MW pulverized biomass burner.

5. Conclusions

Simulation study is carried out to investigate temperature distribution, the trajectory of char particle and devolatilization on five cases of different mass ratios among primary secondary and tertiary air at 500 kW firing rate. Comparison is carried out with the base case in terms of the stability of flame, safety, and flame length. The following conclusions are made:

- (1) Chaotic movements of char particles and reverse flow in a pre-chamber are closely related to devolatilization rate.
- (2) The primary air mass flow rate has a great influence on aerodynamics in the combustion chamber. At low primary air corresponding to the primary/secondary mass ratio of 0.0714 and 0.0769, the condition could provide increased temperature in a pre-chamber, but the flame is large and create hotspot on surface of the refractory, bringing about safety issue in furnace operation.
- (3) At relatively higher primary air flow rate together with the primary/secondary mass ratio of 0.1250 the burner provides increased temperature in a pre-chamber than other cases. It gives high char particle turbulence because of a large swirl effect of secondary mass flow rate, causing severely flick of the flame shape. The peak temperature is maximum among other cases.
- (4) By keeping the primary air as the base case while keeping the primary/secondary mass ratio of 0.1333, desirable operating condition was achieved, as it could provide increased temperature in a pre-chamber without severe flicking of the flame shape and the axial distance of maximum temperature would shift to 1.138 m. The maximum temperature was 1505.47 °C, while the base case was at 1.404 m and 1415.05 °C, respectively.

6. Acknowledgement

The authors would like to thank center for data storage technology, KMITL, for providing the computing resources and access of software used in this research work.

7. References

- [1] Sharifi and Boroomand M. An investigation of thermo-compressor design by analysis and experiment: Part I. Validation of the numerical method, *Energy Conversion and Management*, vol.69, January 2013, pp. 217-227.
- [2] Dong-Fang Z., Feng-Guo L., Xue-Yi Y., Rui Z., Bin-Long Z. and Gui-Long H. Optimization of a premixed cylindrical burner for low pollutant emission, *Energy Conversion and Management*, vol.99, April 2015, pp. 151-160.
- [3] Thanaphat Phakdeeworrawong. Mathematical simulation for pulverized fuel combustion, Thesis of



AEC097

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2013.

[4] Chinnapat Turakarn. Biomass burner development in industrial boilers, Thesis of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2015.

[5] Jianping J., Zhengqi L., Qunyi Z., Zhichao C. and Feng R. Influence of primary air ratio on flow and combustion characteristics and NOx emissions of a new swirl coal, *Energy*, vol.36, December 2010, pp. 1206-1213.

[6] Jianping J., Zhengqi L., Lin Wang, Lizhe C. and Guohua Y. Influence of secondary air mass flow rates on gas/particle flow characteristics near the swirl burner region, *Energy*, vol.36, March 2011, pp. 3599-3605.

[7] J.Ballester, J.Barroso, L.M. Carocodo and R. Ichaso. Comparative study of semi-industrial-scale flames of pulverized coals and biomass, *Combustion and Flame*, vol.141, February 2005, pp. 204-215.

[8] JP Communications Inc., USA., URL: <http://www.manufacturer.com/xxq2004c-electric-valve-positioner-servo-controller-actuator-products-p6983265>

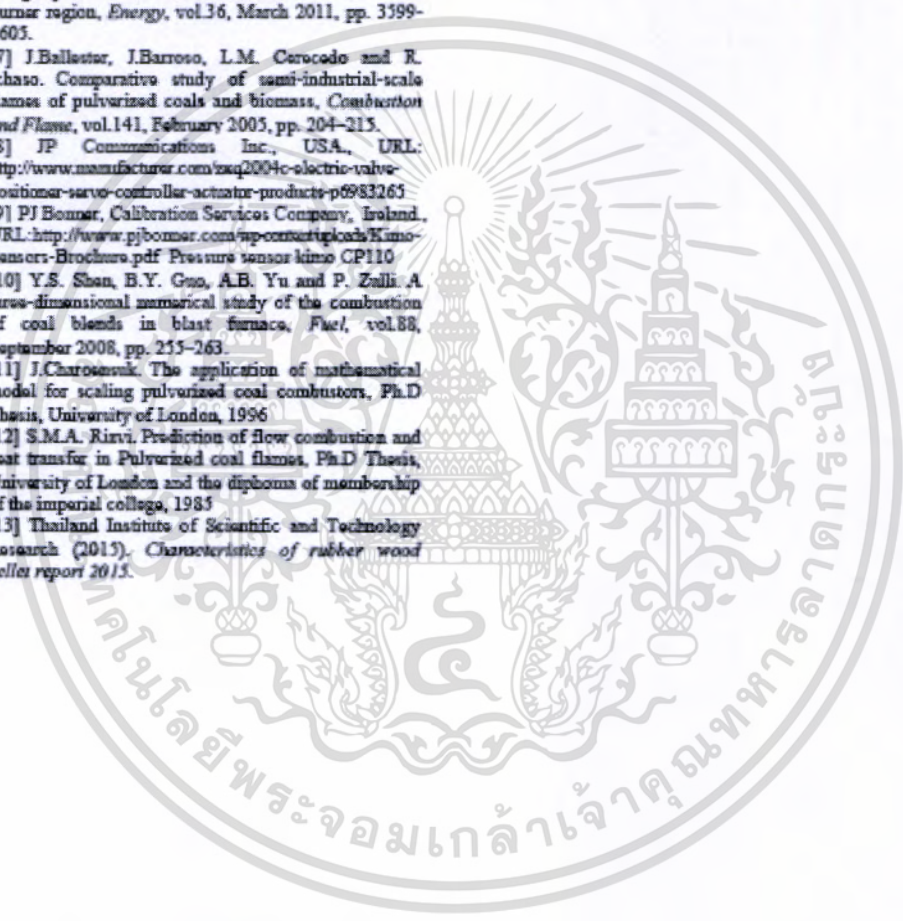
[9] PJ Bonner, Calibration Services Company, Ireland., URL: <http://www.pjbonner.com/wp-content/uploads/Kimo-Sensors-Brochure.pdf> Pressure sensor kimo CP110

[10] Y.S. Shan, B.Y. Gao, A.B. Yu and P. Zalli. A three-dimensional numerical study of the combustion of coal blends in blast furnace, *Fuel*, vol.88, September 2008, pp. 255-263.

[11] J.Charosavuk. The application of mathematical model for scaling pulverized coal combustors, Ph.D Thesis, University of London, 1996

[12] S.M.A. Rizvi. Prediction of flow combustion and heat transfer in Pulverized coal flames, Ph.D Thesis, University of London and the diploma of membership of the imperial college, 1985

[13] Thailand Institute of Scientific and Technology Research (2015). *Characteristics of rubber wood pellet report 2015*.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายนรเศรษฐ์ พิกุลเงิน
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 16 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดพิจิตร
ที่อยู่	59 หมู่ 8 ตำบลโพธิ์ชัย อำเภอลำดวน จังหวัดมหาสารคาม 44120
ประวัติการศึกษา	2557 วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2557-2558 ตำแหน่ง Boardman ประจำแผนก Power plant บริษัท TPIPL จำกัด มหาชน อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้