

การปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์เพื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งชนิดผง

MODIFICATION OF SYNGAS COMBUSTOR FOR PULVERIZED BIOMASS
COMBUSTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-030-067

การปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์เพื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งชนิดผง

MODIFICATION OF SYNGAS COMBUSTOR FOR PULVERIZED BIOMASS
COMBUSTION



T148659



รัชชัย จำนงค์

TAWATCHAI JUMNONG

เลขที่ 148659
ลงทะเบียน 14 เม.ย. 2560

b. 00267007
f.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-030-067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODIFICATION OF SYNGAS COMBUSTOR FOR PULVERIZED BIOMASS
COMBUSTION



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ KMITL-2017-EN-M-030-067 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017






FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์เพื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งชนิดผง
Thesis Title Modification of Syngas Combustor for Pulverized Biomass Combustion
นักศึกษา นายธวัชชัย จำนงค์
รหัสประจำตัว 55610902
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-030-067

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.พิชัย	อัษฎมงคล	
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	
ผศ.ดร.ณัฐวิภา	เจียรระโนวชิระ	
รศ.ดร.ชินรัชช์	เธียรพงษ์	
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ในวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2560 ยินช้ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์เพื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งชนิดผง
ชื่อนักศึกษา	นายรัชชัย จำนงค์
รหัสประจำตัว	55610902
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งชนิดผง โดยการใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้เป็นเครื่องมือในการช่วยประเมินความเสี่ยงเพื่อใช้เป็นข้อมูลในปรับปรุงหัวเผาขนาด 100 kW จากการศึกษาพบว่า การติดตั้งวัตถุขวางการไหล (bluff body) สามารถช่วยให้เปลวไฟมีความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงนำไปสู่การปรับปรุงหัวเผา เมื่อทำการศึกษาเชิงทดลองถึงอิทธิพลของเงื่อนไขการดำเนินการที่มีผลต่อการทำงานของหัวเผา พบว่าในสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และอากาศส่วนเกิน 30 : 70 : 50 % และ 40 : 60 : 50 % จะให้ลักษณะการเผาไหม้ที่มีแนวโน้มไปในทางที่ดี จากการสังเกตเห็นเส้นทางเดินของชาร์ปฏิกิริยาการเผาไหม้ในปริมาณน้อย โดยที่วัตถุขวางการไหลปะทะกับอนุภาคเชื้อเพลิงผง ทำให้อนุภาคเกิดฟุ้งกระจายก่อนถูกเหนี่ยวนำด้วยกระแสหมุนวนจากอากาศทุติยภูมิส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนบริเวณช่องผ่านการไหลลำดับที่สอง ทำให้หัวเผาสามารถรักษาเสถียรภาพของการเผาไหม้ และทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องได้ โดยที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 931 °C และอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 260 – 280 °C และจากผลการจำลองเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ พบว่าแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ มีลักษณะแนวโน้มของการกระจายตัวของอุณหภูมิเช่นเดียวกับผลของการทดลอง แต่ยังมีผลความผิดพลาดในแง่ที่ผลอุณหภูมิจากแบบจำลองจะสูงกว่าผลที่ได้จากการทดลองในทุกตำแหน่งการอ่านค่า ยกเว้นในตำแหน่งที่อยู่ใกล้วัตถุขวางการไหลจะได้อิทธิพลจากกระแสการไหลปั่นป่วนและโพรบวัดอุณหภูมิที่ขวางการไหลทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดการเผาไหม้ ทำให้อ่านค่าของอุณหภูมิได้สูงกว่าผลที่ได้จากแบบจำลอง ดังนั้นในอนาคตสำหรับการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์ควรคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าว เพื่อให้มีความแม่นยำในการตรวจสอบกับผลการทดลองซึ่งจะช่วยเป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Modification Of Syngas Combustor For Pulverized Biomass Combustion
Student	Mr. Tawatchai Jumnon
Student ID.	55610902
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jarruwat Charoensuk

ABSTRACT

This thesis concerns with the modification of syngas combustor for pulverized biomass combustion. Mathematical modelling was used as a risk assessment tool for syngas combustor at 100 kW. The study found that the installation of bluff body could help the flame to stabilize. This led to the improvement of syngas combustion. The study on the effect of operating conditions on performance of syngas combustor, primary air to secondary air ratio of 30:70 and 40:60 with excess air = 50% yielded satisfactory result, as far as combustion stability was concerned, yielding an averaged temperature in combustion chamber at 931 °C and the preheated secondary air temperature at 260 - 280 °C. Then, the empirical parameter were validated with simulation comparing between the standard $k-\varepsilon$ and RNG $k-\varepsilon$ turbulence model. Validation study suggested that the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model gave the same trend with experimental result. However, the error was found such that the temperature from simulation was higher than that of experimental at measurement position, except for the position near the bluff body, where the results from experiment is higher. This was due to blockage of the flow causing temporary combustion near the probe. The measurement higher temperature than those of the simulation models. So for the simulation model of syngas combustor, ones should take into account such factors for accurate validation with experiment. This will be a useful guidance for future development work of syngas combustor for pulverized biomass combustion.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ ความกรุณา การถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์ที่ดีจาก รองศาสตราจารย์ ดร.จรรูวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. และนักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ได้ให้ คำปรึกษา คำแนะนำ คำติชมในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัวทุกคนเป็นอย่างยิ่ง ที่เฝ้า เลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และให้ทุนทรัพย์ในการศึกษา รวมทั้งเป็นกำลังใจในการแก้ไขปัญหา และ อุปสรรคต่างๆเสมอมา และขอขอบคุณผู้ที่ให้การสนับสนุนทุกท่านที่มีได้เอื้อนามมา ณ ที่นี้ด้วย

ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี คุณค่าและ ประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรี รัตนตรัยอำนาจอวยพรความสุขสวัสดิ์จึงมีแต่ทุกท่าน

ธวัชชัย จำนงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	6
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
3.1 บทนำ.....	13
3.2 เชื้อเพลิง (Fuels).....	13
3.2.1 เชื้อเพลิงแข็ง.....	13
3.2.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	13
3.2.1.2 การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหิน.....	14
3.3 ทฤษฎีการเผาไหม้ (combustion theory).....	16
3.3.1 ปฏิกิริยาและกระบวนการเผาไหม้ (reaction combustion process).....	17
3.3.1.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้.....	17
3.3.2 สโตยชิโอเมตรีของการเผาไหม้ (combustion stoichiometry).....	18
3.3.3 ค่าความร้อน (calorific value).....	19
3.3.3.1 ค่าความร้อนสูง (higher heating value, HHV).....	19
3.3.3.2 ค่าความร้อนต่ำ (low heating value, LHV).....	20
3.3.4 อุณหภูมิจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	20
3.3.5 การคำนวณประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้.....	21
3.3.5.1 ประสิทธิภาพทางความร้อน (thermal efficiency).....	21
3.3.5.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (combustion efficiency).....	22
3.3.5.3 ประสิทธิภาพรวม (total efficiency).....	22
3.3.6 การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ.....	22
3.3.7 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ว่าห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ตามอาคาร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.7.1 รูปแบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง.....	23
3.4 การถ่ายเทความร้อน.....	24
3.4.1 บทนำ.....	24
3.4.2 การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน.....	24
3.4.3 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน.....	24
3.5 การปล่อยมลพิษและการควบคุม (Pollutants Emission and Control).....	25
3.5.1 บทนำ.....	25
3.5.2 ผลกระทบของมลพิษ.....	25
3.5.3 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO _x).....	26
3.5.3.1 Thermal NO _x	27
3.5.3.2 Prompt NO _x (Fenimore NO _x).....	28
3.5.3.3 Fuel NO _x	29
3.5.3.4 NO _x ที่เกิดจาก N ₂ O.....	30
3.5.4 คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide).....	30
3.5.5 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO _x).....	31
3.5.6 ฝุ่นและเขม่า (Particulates and Soot).....	32
3.6 สมการพื้นฐานของแบบจำลอง.....	33
3.6.1 แบบจำลองของก๊าซในรูปพิกัดทรงกระบอก.....	33
3.6.1.1 สมการความต่อเนื่อง.....	33
3.6.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม.....	33
3.6.2 แบบจำลอง Standard และ RNG $k-\epsilon$ Model.....	34
3.6.3 การเคลื่อนย้ายของสเกลลาร์.....	36
บทที่ 4 การคำนวณ การปรับปรุง และแบบจำลองการเผาไหม้.....	37
4.1 สมการการเผาไหม้.....	37
4.1.1 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงแก๊ส LPG.....	38
4.1.2 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล.....	38
4.1.2.1 ณ สภาพที่ได้รับ (ความชื้น 5.81 %) ที่สภาวะ stoichiometry... ..	39
4.2 การปรับปรุงหัวเผาแก๊สสังเคราะห์สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล.....	40
4.2.1 แนวคิดในการปรับปรุง และพัฒนาหัวเผาแก๊สสังเคราะห์.....	40
4.2.2 การจำลองการเผาไหม้ก่อนทำการปรับปรุงหัวเผาแก๊สสังเคราะห์.....	41
4.2.3 ผลทดลองการเผาไหม้ก่อนทำการปรับปรุงหัวเผาแก๊สสังเคราะห์.....	43
4.2.4 สรุปผลการจำลอง และทดลองการเผาไหม้ก่อนทำการปรับปรุงหัวเผาแก๊สสังเคราะห์.....	45
4.2.5 เงื่อนไขในการจำลองการเผาไหม้หลังทำการปรับปรุง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
หัวเผาก๊าซสังเคราะห์.....	47
4.2.6 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	49
4.3 ผลการจำลองการเผาไหม้.....	50
4.3.1 ผลการจำลองหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ก่อนทำการปรับปรุง.....	50
4.3.2 ผลการจำลองหัวเผาก๊าซสังเคราะห์หลังทำการปรับปรุง.....	52
4.3.2.1 อิทธิพลของวัตถุขวางการไหลจากการสร้างแบบจำลอง.....	52
4.3.2.2 อิทธิพลของผนังเตาเผาไหม้จากการสร้างแบบจำลอง.....	54
4.3.2.3 อิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$	56
บทที่ 5 อุปกรณ์ เจริญใจ และวิธีการทดลอง.....	61
5.1 อุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น.....	61
5.1.1 หัวเผาแก๊สสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นที่มีการอุ่นอากาศ.....	61
5.1.2 ระบบบัดเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	63
5.1.3 ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	65
5.1.4 ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	67
5.1.5 ระบบบำบัดไอเสีย.....	67
5.2 อุปกรณ์วัด ควบคุม และบันทึกผล.....	69
5.2.1 ระบบป้อนอากาศ.....	69
5.2.2 ระบบการทำงานของระบบแก๊ส LPG.....	70
5.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ.....	71
5.2.4 อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สไอเสีย.....	72
5.2.5 อุปกรณ์วัด และควบคุมอื่นๆ.....	73
5.2.5.1 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์.....	73
5.3 เจริญใจ และวิธีการทดลอง.....	74
5.3.1 การทดสอบสมรรถนะระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	74
5.3.1.1 การทดลองหาอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	74
5.3.2 การทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	75
5.3.2.1 วิธีการจุดระเบิด และการอุ่นหัวเผา.....	75
5.3.2.2 การศึกษาอิทธิพลของวัตถุขวางการไหล.....	76
5.3.2.3 การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้.....	77
5.3.2.4 การศึกษาย่านการทำงานของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์.....	79
บทที่ 6 ผลการทดลอง การอภิปรายผลการทดลอง.....	80
6.1 ผลการทดสอบระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	80
6.1.1 การทดลองหาอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงชีวมวล.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน 6.1.1.1 การทดสอบขนาดของเชื้อเพลิงที่ผ่านการบัดน้ำไปโดยปริยายแล้ว 81 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.1.2 การทดลองหาอัตราการการป้อนอากาศปฐมภูมิ.....	81
6.2 ผลการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	83
6.2.1 อิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงต่อพฤติกรรมการเผาไหม้	83
6.2.2 การศึกษาย่านการทำงานที่เหมาะสมของหัวเผา เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ 100 kW	83
6.2.3 การศึกษาอิทธิพลการเผาไหม้หลังทำการปรับปรุง หัวเผาก๊าซสังเคราะห์ที่ 100 kW	86
6.2.3.1 อิทธิพลของวัตถุขวางการไหลจากการทดลอง.....	86
6.2.3.2 การศึกษาย่านการทำงานหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ ที่มีการอุ่นอากาศในย่านความถี่ของพัดลมดูดไอเสีย 10 Hz.....	88
6.2.3.3 การศึกษาย่านการทำงานหัวเผาแก๊สสังเคราะห์ ที่มีการอุ่นอากาศในย่านความถี่ของพัดลมดูดไอเสีย 25 Hz.....	90
6.2.3.4 ปริมาณแก๊สไอเสีย.....	94
6.2.3.5 การตรวจสอบผลจากแบบจำลอง และผลจากการทดลอง (Validation).....	95
บทที่ 7 สรุป และข้อเสนอแนะ.....	98
7.1 บทสรุป.....	98
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	100
เอกสารอ้างอิง	101
ภาคผนวก.....	103
ภาคผนวก ก. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	104
ประวัติผู้เขียน.....	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 แสดงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงผงไม้ยางพารา.....	38
4.2 แสดงปริมาณไอเสียที่ 100 % Stoichiometry.....	39
4.3 เงื่อนไขการจำลองสำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงก่อนทำการปรับปรุง.....	43
4.4 ขนาดโดยเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงบดผ่านตะแกรง 0.5 mm.....	43
4.5 เงื่อนไขการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลก่อนทำการปรับปรุง.....	44
4.6 ขนาดโดยเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงบดผ่านตะแกรง 0.5 mm และ 1 mm.....	48
4.7 เงื่อนไขการจำลองการเผาไหม้หลังทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ขนาด 100 kW.....	48
4.8 Kinetic Parameters สำหรับแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหิน.....	48
5.1 ค่าความละเอียด และความแม่นยำของเครื่องมือวัด.....	74
5.2 เงื่อนไขการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงหลังทำการปรับปรุงหัวเผา.....	77
6.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผงบดผ่านตะแกรง ขนาด 0.5 mm และ 1 mm.....	81
6.2 แสดงสัดส่วนการปรับลดค่า Standard state enthalpy.....	96

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง	7
2.2 แสดงผลเปรียบเทียบการทดลองในเงื่อนไขต่างๆ	9
2.3 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคผ่านวัตถุขวางการไหล	10
2.4 แสดงลักษณะการปลดปล่อยสารระเหยของแบบจำลองตามแนวแกน $x = 0-120$ mm (a) conventional EDC model, (b) EDC extinction mode	10
2.5 แสดงลักษณะวัตถุขวางการไหลภายในหัวเผาเชื้อเพลิงถ่านหิน	11
2.6 แสดงด้านหน้าวัตถุขวางการไหลภายในหัวเผาเชื้อเพลิงถ่านหิน	11
2.7 แสดงผลการอนุกรมของระบบกับประสิทธิภาพการเผาไหม้	12
2.8 แสดงผลการอนุกรมของระบบกับการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	12
3.1 ชีวมวลในประเทศไทย	14
3.2 ลักษณะการไหลของก๊าซรอบ ๆ Flame stabilizer	23
3.3 ความเข้มข้นที่สมดุลของ NO_2 ที่มีส่วนประกอบของออกซิเจนในแก๊สที่แตกต่างกัน	27
3.4 ผลการคำนวณ และผลการทดลองหาค่า thermal NO และ prompt NO ของเปลวไฟ มีเทนกับอากาศในเตาเผาไหม้แบบกวน, λ หมายถึงอัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศ ทางทฤษฎี	29
3.5 การเกิด NO ตามกลไก prompt NO และการเปลี่ยนไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเป็น NO	30
4.1 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงหลังทำการปรับปรุง	37
4.2 โครงสร้างส่วนประกอบของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์	40
4.3 แสดงลักษณะโครงสร้างของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ก่อนทำการปรับปรุง	42
4.4 แสดงลักษณะภายในของหัวเผาในการสร้างแบบจำลองก่อนทำการปรับปรุง	42
4.5 แสดงลักษณะการหลุดเสียดลอดของเชื้อเพลิงชีวมวลผงบริเวณของการอนุอากาศทุติยภูมิ	44
4.6 การเลือกลักษณะของวัตถุขวางการไหลจากการเกิดกระแสการไหลหมุนวนที่ (b.r. = 0.25)	46
4.7 แสดงลักษณะโครงสร้างของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์หลังการปรับปรุง	46
4.8 แสดงลักษณะของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับสร้างแบบจำลองหลังทำการปรับปรุง	47
4.9 แสดงลักษณะของวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยสำหรับในการติดตั้งที่ (b.r. = 0.33)	47
4.10 ลักษณะของ Mesh ที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้หลังทำการปรับปรุง	49
4.11 แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ตามแนวแกน x	50
4.12 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ตามแนวแกน x	50
4.13 แสดงการเกิดจุดร้อน (hot spot) ในลักษณะการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงผง (K) (a) Non-Y Shape, (b) Y Shape	51
4.14 แสดงลักษณะของเส้นทางเดินของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผงในกรณี (a) Non-Bluff body, (b) Bluff body	53
4.15 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณี (K) (Standard $k-\epsilon$)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
(a) Non-Bluff body, (b) Bluff body.....	53
4.16 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณี (K) (Standard $k-\epsilon$)	
(a) Adiabatic wall, (b) Temperature wall.....	54
4.17 แสดงผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณี (K) (Standard $k-\epsilon$)	
(a) Adiabatic wall, (b) Temperature wall.....	55
4.18 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณี (K) (RNG $k-\epsilon$)	
(a) Adiabatic wall, (b) Temperature wall.....	55
4.19 แสดงผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณี (K) (RNG $k-\epsilon$)	
(a) Adiabatic wall, (b) Temperature wall.....	56
4.20 แสดงบริเวณการเกิดการหมุนวนของกระแสภายใน (IRZ) และภายนอก (ERZ) แกนกลางของหัวเผาแก๊สสังเคราะห์ (m/s)	
(a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$	57
4.21 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ (K)	
(a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$	58
4.22 การกระจายตัวของความเข้มข้นออกซิเจน (Mass Fraction)	
(a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$	58
4.23 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย (Mass Fraction)	
(a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$	59
4.24 แสดงการเปรียบเทียบผลจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิ (K)	
(a) Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$	60
5.1 แสดงลักษณะภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงก่อนทำการปรับปรุง.....	61
5.2 แสดงลักษณะภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงหลังทำการปรับปรุง.....	62
5.3 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีการอุ่นอากาศ (ด้านหน้า).....	63
5.4 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีการอุ่นอากาศ (ด้านหลัง).....	63
5.5 แสดงลักษณะการติดตั้งเครื่องบดเชื้อเพลิงชีวมวลก่อนทำการปรับปรุง.....	64
5.6 แสดงลักษณะการติดตั้งเครื่องบดเชื้อเพลิงชีวมวลหลังทำการปรับปรุง.....	64
5.7 แสดงชุดสกรูลำเลียงและชุดเกียร์ทดรอบ.....	65
5.8 แสดงระบบลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	65
5.9 แสดงระบบลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผง (ต่อ).....	66
5.10 แสดงอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนด้วยลมที่เลือกใช้ (ต่อ).....	66
5.11 เครื่องอัดอากาศสำหรับอุปกรณ์สร้างแรงสั่นเทือน.....	66
5.12 ลักษณะของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	67
5.13 ถังบำบัดไอเสีย (evaporative scrubber).....	68

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
5.14 ลักษณะของม่านน้ำสำหรับดักเก๊าลอย.....	68
5.15 ปอตกตะกอนหลังจากทำการปรับปรุง.....	68
5.16 แสดงอุปกรณ์ในระบบการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	69
5.17 แสดงอุปกรณ์ในระบบการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง (ต่อ).....	70
5.18 แสดงระบบการทำงานของทางเดินท่อแก๊สก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	70
5.19 แสดงแผนควบคุมระบบจ่ายแก๊ส LPG ก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	71
5.20 ตำแหน่งในการบันทึกค่าของอุณหภูมิ.....	71
5.21 thermocouple type K และหน่วยแสดงผล YOKOGAWA XL 100.....	72
5.22 เครื่องวัดแก๊สไอเสีย Testo รุ่น 350 XL.....	72
5.23 อุปกรณ์ช่วยในการวัดค่าแก๊สไอเสีย.....	73
5.24 อินเวอร์เตอร์ (inverter) ยี่ห้อ Schneider รุ่น ATV312.....	73
5.25 อินเวอร์เตอร์ (inverter) ยี่ห้อ Winner รุ่น WIN-V63.....	73
5.26 อุปกรณ์ขยายแรงดันไฟฟ้าสำหรับจุดประกายไฟ.....	76
5.27 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้หลังทำการปรับปรุง.....	78
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง (kg/min) - ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz).....	80
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลอากาศปฐมภูมิ (m ³ /s) - เปอร์เซนต์การเปิดวาล์ว (%).....	82
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลอากาศทุติยภูมิ (m ³ /s) - เปอร์เซนต์การเปิดวาล์ว (%).....	82
6.4 แสดงลักษณะเส้นทางเดินของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผงร่วมกับเปลวไฟนาร์รองแก๊ส LPG ...	84
6.5 แสดงการกระจายตัวของอนุภูมิในช่วงการทดสอบการเผาไหม้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์ ที่ย่านความถี่ของพัลสมดุดไอเสีย 10 Hz.....	85
6.6 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภูมิที่อัตราส่วนอากาศ ที่ย่านความถี่ของพัลสมดุดไอเสีย 10 Hz.....	86
6.7 แสดงพฤติกรรมการเผาไหม้บริเวณวัตถุวางการไหลรูปทรงกรวย.....	87
6.8 แสดงลักษณะการลอยตัวของเปลวไฟในช่วงที่เริ่มการปล่อยอนุภาคเชื้อเพลิงผง.....	88
6.9 แสดงลักษณะเปลวไฟภายในเตาเผาในช่วงการปล่อยเชื้อเพลิงผงและเข้าสู่สภาวะคงที่.....	88
6.10 แสดงการกระจายตัวของอนุภูมิในช่วงการทดสอบการเผาไหม้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์ ที่ย่านความถี่พัลสมดุดไอเสีย 10 Hz.....	89
6.11 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภูมิที่อัตราส่วนอากาศ ที่ย่านความถี่พัลสมดุดไอเสีย 10 Hz.....	89
6.12 แสดงการเปรียบเทียบอนุภูมิการอุ่นอากาศตามขั้นตอนดำเนินการ ที่ย่านความถี่ของพัลสมดุดไอเสีย 10 Hz ณ ตำแหน่งที่ T1.....	90
6.13 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภูมิในช่วงการทำงานของหัวเผา ที่ย่านความถี่ของพัลสมดุดไอเสีย 25 Hz.....	91
6.14 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภูมิที่อัตราส่วนอากาศ ที่ย่านความถี่ของพัลสมดุดไอเสีย 25 Hz.....	91

เอกสารนี้เป็นที่ย่านความถี่ของพัลสมดุดไอเสีย 25 Hz.....

ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
6.15 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลภูมิการอุณหภูมิอากาศตามขั้นตอนดำเนินการ ที่ย่านความถี่ของพัดลมดูดไอเสีย 25 Hz ณ ตำแหน่งที่ T1	92
6.16 แสดงลักษณะของเปลวไฟภายในหัวเผาในสภาวะคงที่ ที่ย่านความถี่ของพัดลมดูดไอเสีย 25 Hz	92
6.17 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สภาวะคงที่	93
6.18 แสดงปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หลังการเผาไหม้	95
6.19 แสดงปริมาณออกซิเจนของไนโตรเจน (NO _x) หลังการเผาไหม้	95
6.20 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้	96
6.21 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลภูมิภายในห้องเผาไหม้ ในกรณีการปรับสัดส่วนค่า Standard State enthalpy	97



รายการคำย่อและสัญลักษณ์

Roman symbols

(A/F)	อัตราส่วนมวลอากาศต่อมวลเชื้อเพลิง
$(A/F)_{stoic}$	อัตราส่วนมวลอากาศต่อมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้สมบูรณ์ตามทฤษฎี
(F/A)	อัตราส่วนมวลเชื้อเพลิงต่อมวลอากาศ
$(F/A)_{stoic}$	อัตราส่วนมวลเชื้อเพลิงต่อมวลอากาศที่เผาไหม้สมบูรณ์ตามทฤษฎี
h	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา, (kJ/kg-K)
h_D	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลแบบการพาโดยรวม, (kJ/kg-K)
h_{fg}	ค่าความร้อนแฝงในการระเหย, (kJ/kg)
i	อัตราส่วนโดยมวลของคาร์บอนต่อออกซิเจน
k	ค่าสภาพนำความร้อน (thermal conductivity) ของตัวกลาง, ($W/m \cdot K$)
k_c	ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา
M	มวลโมเลกุล
MW_{air}	น้ำหนักโมเลกุลของอากาศ
MW_{fuel}	น้ำหนักโมเลกุลของเชื้อเพลิง
m_{air}	มวลอากาศ, (kg)
m_{fuel}	มวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้, (kg)
m_{H_2O}	มวลของน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้, (kg)
GCV, HHV	ค่าความร้อนขั้นสูงของเชื้อเพลิง, (kJ/kg)
NCV, LHV	ค่าความร้อนขั้นต่ำของเชื้อเพลิง, (kJ/kg)
q_{cond}	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ หรือการนำความร้อน, (W)
q_{conv}	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือการพาความร้อน, (W)
A	พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน, (m^2)
T	อุณหภูมิ, (K)
T_{ch}	อุณหภูมิทางเข้าปล่องไฟ, (K)
T_s	อุณหภูมิของผิววัตถุ, (K)
$T_{f,\infty}$	อุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิว, (K)
T_{ad}	อุณหภูมิเปลว adiabatic, (K)
U	สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวม, ($W/m^2 \cdot K$)

Greek symbols

Φ	อัตราส่วนสมมูล
η_{th}	ประสิทธิภาพทางความร้อน
η_{total}	ประสิทธิภาพรวม
λ	อัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการเผาไหม้วัตถุดิบประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย สมมุติฐานของการศึกษา ขั้นตอนของการศึกษาจากการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองการเผาไหม้ และประโยชน์ของงานวิจัยของวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบันมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องหาพลังงานทดแทนในรูปแบบอื่นๆ พลังงานทดแทนจากเชื้อเพลิงชีวมวล (biomass) จึงเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากพลังงานชีวมวลนั้นสอดคล้องกับองค์ประกอบต่างๆ ในประเทศไทย ไม่ว่าจะเป็นทางด้านวัตถุดิบซึ่งมีชีวมวลที่ได้จากเกษตรกรรมเป็นจำนวนมาก โดยการพัฒนาพลังงาน ทดแทนจากชีวมวลจึงเป็นตัวช่วยการกระตุ้นการสร้งงานและการเพิ่มรายได้ให้กับคนในภาค เกษตรกรรม พลังงานชีวมวลจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการนำใช้แทนเชื้อเพลิงจากถ่านหิน น้ำมัน หรือก๊าซธรรมชาติ โดยการแปรรูปเชื้อเพลิงจากชีวมวลให้อยู่ในลักษณะของอนุภาค ซึ่งสามารถใช้เป็น พลังงานทดแทนที่หลายประเทศให้การยอมรับและใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งพลังงานชีวมวลนั้นได้มา จากวัตถุดิบหรือสารที่ได้จากธรรมชาติหรือสิ่งมีชีวิตโดยไม่เน้นการกลายเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล

เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากชีวมวล (biomass energy technology) เป็นเทคโนโลยีโดย การเปลี่ยนชีวมวลเป็นกระบวนการทางเคมี-ความร้อน ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ การเผาไหม้โดยตรง (direct fired) การเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงสองชนิดขึ้นไป (co-firing) การผลิต ก๊าซชีวมวล (gasification) ไพโรไลซิส (pyrolysis) และยังมีเทคโนโลยีที่อยู่ระหว่างในการทำวิจัยและ พัฒนา ได้แก่ การผลิตน้ำมันการชีวมวล (bio-oil) เป็นต้น ซึ่งจะเห็นว่าพลังงานชีวมวลเป็นพลังงานที่ ได้รับความสนใจ เนื่องจากชีวมวลเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรและกระบวนการผลิตอาหาร เช่น แกลบ ชังข้าวโพด อ้อย กะลามะพร้าว ไม้พืน เหง้ามันสำปะหลัง ชี้เลี้ยง เป็นต้น และเพราะด้วย ลักษณะเฉพาะของชีวมวลที่มีน้ำหนักเบา ความชื้นสูง ทำให้การขนส่งชีวมวลไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากชีวมวลส่วนใหญ่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อนเพื่อนำไปผลิตเป็น พลังงานไฟฟ้า ดังนั้นความชื้นภายในของชีวมวลและระยะทางการขนส่งชีวมวลจึงเป็นปัจจัยสำคัญใน การกำหนดราคาของชีวมวล ดังนั้นเทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวลเพื่อลดความชื้นและเพิ่มความ แน่นให้กับชีวมวลให้อยู่ในรูปแบบเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง (wood pellet) [1]

ในการนำเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งมาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนเพื่อนำไปใช้ใน อุตสาหกรรมหม้อไอน้ำ (boiler) จึงจำเป็นต้องหาเทคโนโลยีหรือเทคนิคมาประยุกต์ใช้ในการ ออกแบบและพัฒนาหัวเผา (burner) ให้มีความเหมาะสมกับการเผาไหม้ ซึ่งเทคโนโลยีการเผาไหม้ ระบบพัลเวอร์ไรซ์ (pulverized) เหมาะสมกับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่มีลักษณะบดเป็นผง

จากงานวิจัยในอดีตได้ทำการออกแบบหัวเผาไว้สำหรับในการเผาไหม้แก๊สซิฟิเคชัน แต่ด้วย การสร้างอุปกรณ์การทดสอบสำหรับเทคโนโลยีการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงชีวมวลมีการ ลงทุนที่สูง ทำให้ได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ให้สามารถนำมาใช้กับเชื้อเพลิงชี วมวลอัดแท่งที่บดเป็นผง และได้ทำการศึกษาเชิงทดลองถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการเผาไหม้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน การค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของหัวเผาที่กำลังการผลิตทางความร้อน 100 kW เช่น อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง อัตราการไหลของเชื้อเพลิง อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (primary air flow) อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ (secondary and tertiary air flow) เป็นต้น

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาโครงสร้างส่วนประกอบของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ และเงื่อนไขในการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงในอดีต จึงได้สร้างแบบจำลองการเผาไหม้ โดยใช้ข้อมูลในการทดลองในอดีต กำหนดเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการช่วยประเมินปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงานของหัวเผาในเบื้องต้น จากแบบการจำลอง พบว่าลักษณะของช่องการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลผงรูปทรงตัววาย (Y-shaped) ในตำแหน่งช่องทางเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหัวเผา และช่องผสมอากาศทุติยภูมิมีผลทำให้แบบจำลองไม่ลู่เข้าหาคำตอบ ในบางเงื่อนไขที่ได้ปรับสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงผง ซึ่งได้สันนิษฐานว่าสาเหตุของการไม่ลู่เข้าหาคำตอบ เนื่องจากการหลุดลื่นหลุดของเชื้อเพลิงชีวมวลผงผ่านเข้าสู่ช่องผสมอากาศทุติยภูมิ ในช่วงเริ่มต้นกำหนดการจุดของหัวเผาในแบบจำลองที่อุณหภูมิ 1000 K ทำให้บริเวณของการอุ่นอากาศมีอุณหภูมิสูง จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ในบริเวณดังกล่าว จึงได้สรุปผลการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ดังต่อไปนี้

(1) ลักษณะของช่องการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลผงรูปทรงตัววาย (Y-shaped) และตำแหน่งช่องทางเข้าที่ไม่สมมาตรของห้องเผาไหม้ มีผลต่อเส้นทางเดินของอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลผงสำหรับการสร้างแบบจำลอง

(2) ช่องผสมอากาศทุติยภูมิสำหรับการสร้างแบบจำลองมีผลต่อการลู่เข้าสู่คำตอบ

สำหรับการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ เพื่อใช้ในการตรวจสอบปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของหัวเผา ดังนั้นจึงได้ทดลองการเผาไหม้ก่อนทำการปรับปรุง เพื่อทำการตรวจสอบเงื่อนไขการทดลอง เนื่องจากอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงมีขนาดใหญ่ขึ้น หลังจากทำการปรับปรุงระบบของการบดเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 1 mm และได้ทำการทดลองการเผาไหม้ทำให้พบว่าลักษณะตำแหน่งของช่องทางอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงผงที่ไม่สมมาตร มีผลต่อการฟุ้งกระจายของอนุภาคเชื้อเพลิงผงที่มีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ และช่องผสมอากาศทุติยภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เชื้อเพลิงชีวมวลผงหลุดลื่นหลุดเข้าสู่บริเวณของการอุ่นอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการเผาไหม้ที่ไม่ลู่เข้าคำตอบ

จากการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ และผลการทดลองก่อนทำการปรับปรุง ทำให้สามารถประเมินถึงปัจจัยความเสี่ยงที่มีผลกระทบต่อการทำงานของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ และใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ดังต่อไปนี้

(1) ลักษณะตำแหน่งช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงผงที่ไม่สมมาตรของห้องเผาไหม้ มีผลต่อการฟุ้งกระจายตัวของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานว่าในกรณีที่ได้ติดตั้งวัตถุขวางการไหล (bluff body) จะช่วยให้อนุภาคของเชื้อเพลิงผงเกิดการฟุ้งกระจายที่ดีขึ้นผสมกับอากาศทุติยภูมิที่มีการอุ่นอากาศ และทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ

(2) ช่องผสมอากาศทุติยภูมิมีผลต่อการเกิดปัจจัยความเสี่ยงต่อหัวเผา ดังนั้นจึงทำการปิดช่องผสมอากาศทุติยภูมิเพื่อป้องกันไม่ให้เชื้อเพลิงหลุดลื่นเข้าไปในบริเวณของการอุ่นอากาศ

หลังจากทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ ในกรณีที่ติดตั้งวัตถุขวางการไหล และปิดช่องผสมอากาศทุติยภูมิ และทำการทดลองการเผาไหม้หลังการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ เพื่อศึกษา

อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการเผาไหม้ของหัวเผา เช่น อัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิง อัตราการไหลของเชื้อเพลิง อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ และย่านการทำงานของพัดลมดูดไอเสีย ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองการเผาไหม้หลังทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ จะนำมาใช้เป็นเงื่อนไขในการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ ในกรณีติดตั้งวัตถุขวางการไหล เพื่อใช้ในการตรวจสอบลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ และเปรียบเทียบกับผลของการจำลองการเผาไหม้ในกรณีที่ไม่ติดตั้งวัตถุขวางการไหล โดยผลที่ได้จากการทดลองและการจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ จะนำไปสู่การพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์เชื้อเพลิงชนิดผงให้สามารถใช้ในโรงงานภาคอุตสาหกรรมและในเชิงพาณิชย์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ ให้สามารถใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแห้งผงบดละเอียด และสามารถทดสอบการเผาไหม้ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้
2. เพื่อทำการศึกษาค่าตัวแปรที่มีผลต่อการเผาไหม้ของหัวเผา เช่น อัตราส่วนผสมของอากาศเชื้อเพลิง อัตราการไหลของเชื้อเพลิง อุณหภูมิอุ่นอากาศที่มีผลต่อการเผาไหม้ และลักษณะการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้และการทำงานของหัวเผา
3. สามารถสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผงเพื่อใช้ในการเป็นเครื่องมือสำหรับในการศึกษาปรากฏการณ์ภายในห้องเผาไหม้ และประเมินปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเผาไหม้
4. เพื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผง

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. ลักษณะของการจ่ายอากาศตามแนวเส้นสัมผัสซึ่งทำให้เกิดการไหลแบบหมุนควง (swirling flow) สามารถสร้างให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องเผาไหม้และช่วยส่งเสริมให้เกิดการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพ
2. อุณหภูมิการอุ่นอากาศทุติยภูมิสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหัวเผาได้
3. ตำแหน่งการจ่ายเชื้อเพลิงและอากาศปฐมภูมิที่ไม่สมมาตรมีผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง
4. การติดตั้งวัตถุขวางการไหล (bluff body) รูปพื้นผิวรูปทรงกรวยกลมจะช่วยทำให้เปลวไฟเกิดเสถียรภาพ และสามารถช่วยไม่ให้เกิดปัจจัยความเสี่ยงต่อหัวเผา

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1. ทดลองและปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงที่มีการอุ่นอากาศให้เหมาะสมกับการเผาไหม้สำหรับหัวเผาขนาด 100 kW
2. ใช้เชื้อก๊าซธรรมชาติเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ขณะเริ่มอุ่นหัวเผา และเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งชนิดผงเป็นเชื้อเพลิงหลักในการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง ในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งวัตตวงวางการไหล ก่อนทำการปรับปรุง และในกรณีที่ได้ติดตั้งวัตตวงวางการไหลหลังทำการปรับปรุง เพื่อทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลผง และการเกิดเสถียรภาพของเปลวไฟ

4. งานวิจัยนี้ได้กำหนดลักษณะรูปร่างของวัตตวงวางการไหลเป็นแบบทรงกรวย สำหรับในการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของวัตตวงวางการไหล

5. สภาวะการทำงานอย่างต่อเนื่องของหัวเผา และชุดทดสอบสามารถทำงานภายใต้้อัตราการเผาไหม้ทางความร้อนที่ 100 kW

6. สมรรถนะที่จะต้องทำการศึกษาค้นคว้า ได้แก่ อุณหภูมิการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้, การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ในกรณีไม่ได้ติดตั้งวัตตวงวางการไหล และในกรณีติดตั้งวัตตวงวางการไหล และองค์ประกอบของก๊าซไอเสีย เป็นต้น

7. อุณหภูมิสูงสุดภายในห้องเผาไหม้ต้องไม่เกิน 1200 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่ผนังของหัวเผาสามารถทนได้โดยไม่เกิดความเสียหาย

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. กำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัย

2. ศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ และการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งชนิดผง

3. ศึกษาอิทธิพลของการจ่ายอากาศปฐมภูมิ และเชื้อเพลิงชีวมวลผงรูปทรงตัววาย (Y-shaped) และตำแหน่งช่องทางเข้าของอากาศปฐมภูมิกับเชื้อเพลิงผงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้ โดยการใช้แบบจำลองการเผาไหม้เพื่อทำการตรวจสอบ และประเมินปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้

4. ศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้ หลักการทำงาน การปรับปรุงหัวเผาสำหรับการเผาไหม้แก๊สซิฟิเคชั่น ให้สามารถใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง

5. ทำการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงในกรณีที่ไม่ติดตั้งวัตตวงวางการไหล เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขการทดลองการเผาไหม้ เนื่องจากขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผงมีขนาดใหญ่ขึ้น หลังจากการพัฒนากระบวนการบดเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

6. จากสมมติฐานตำแหน่งการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงผงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ดังนั้นจึงทำการติดตั้งวัตตวงวางการไหลเพื่อทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลผงเกิดการฟุ้งกระจายตัว

7. ทำการทดลองการเผาไหม้ในกรณีที่ได้ติดตั้งวัตตวงวางการไหลตามสมมติฐาน และขอบเขตตามที่ได้กำหนดไว้

8. วิเคราะห์ผลการทดลองในกรณีติดตั้งวัตตวงวางการไหล และนำผลที่ได้จากการทดลองมาใช้เป็นเงื่อนไขในการตรวจสอบแบบจำลองการเผาไหม้ เพื่อทำการศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผง

9. สรุปผลการทดลองการเผาไหม้ และการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงหัวเผาสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งชนิดผงต่อไป

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เพื่อเป็นทางเลือกใหม่สำหรับภาคอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางเกษตร และเทคโนโลยีที่สามารถนำพลังงานจากภาคอุตสาหกรรมดังกล่าวไปใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับใช้เป็นพลังทดแทนในอนาคต
2. สามารถนำผลที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้เพื่อที่จะสามารถใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาหัวเผาที่มีการอุ่นอากาศเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งผงบดละเอียด (pulverized wood pellet)
3. เพื่อช่วยส่งเสริมอุตสาหกรรมสำหรับใช้เป็นพลังงานทางเลือกใหม่ ให้สามารถนำมาใช้ทดแทนหัวเผาเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ เพื่อช่วยลดการนำเข้าหัวเผาและอุปกรณ์การจ่ายเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

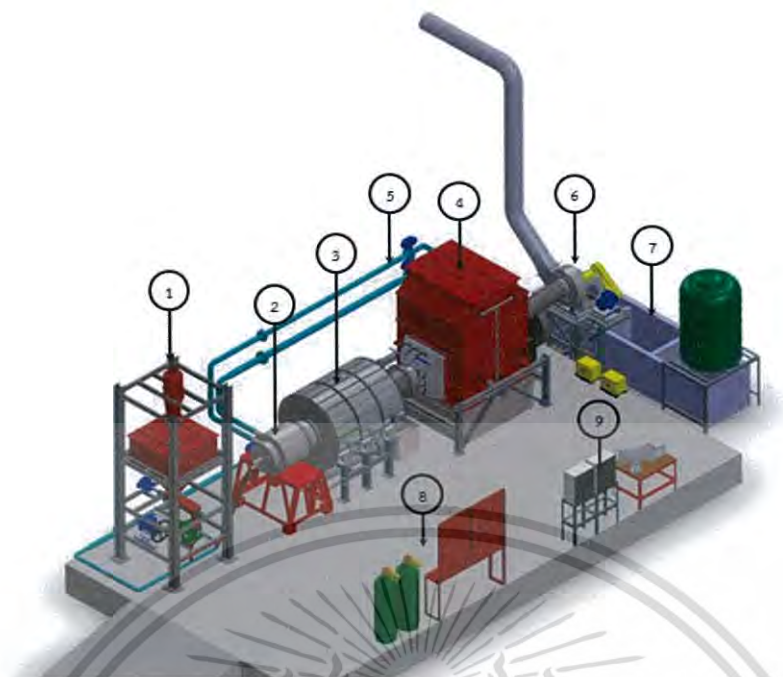
จากบทที่หนึ่งได้ทราบว่างานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นในด้านการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผา (burner) ให้มีความเหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งบดละเอียด (pulverized wood pellet) นอกจากนี้ยังมุ่งเน้นที่จะศึกษาให้ทราบถึงย่านการทำงาน และสมรรถนะของหัวเผา สำหรับการออกแบบปรับปรุงหัวเผานั้นจำเป็นต้องทำการศึกษาดังหลักการทํางานของหัวเผา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งต้องศึกษางานวิจัยที่มีผู้ทำการศึกษามาก่อน เพื่อให้ทราบถึงแนวคิด คุณสมบัติองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง และปัจจัยต่างๆที่อาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของหัวเผา นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันการละเมิดสิทธิบัตรของผู้วิจัยท่านอื่น ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันนั้นมิ้นกวิจัยทั้งในและต่างประเทศได้ศึกษาในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่คุณวิจัยกำลังศึกษามากมาย อาทิเช่น

จิตพงษ์ กนกนัยการ และคณะ [2] ได้ทำการศึกษเกี่ยวกับการพัฒนาต้นแบบเตาปฏิกรณ์แก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลสำหรับในการผลิตก๊าซสังเคราะห์ที่มีกำลังการผลิตทางความร้อน 100 kW โดยใช้โปรแกรม Ansys CFX การจำลองการเผาไหม้ช่วยในการทำการออกแบบและผลที่ได้จากการวิเคราะห์เผาไหม้มีอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงสุดอยู่ 1200 °C อุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณทางออกของชุดเผาไหม้และแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 970 °C อากาศที่ผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อนมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 150-320 °C และได้ทำการสร้างชุดทดสอบการเผาไหม้สำหรับหัวเผาแก๊สสังเคราะห์ ซึ่งงานวิจัยนี้ทำให้ทราบข้อมูลรายละเอียดของโครงสร้างชิ้นส่วนประของหัวเผาและได้นำข้อมูลมาสร้างแบบจำลองการเผาไหม้สำหรับหัวเผาแก๊สสังเคราะห์สำหรับใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุง

ปภัส ชูโชติศิริ และคณะ [3] ได้ทำการพัฒนาต้นแบบระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่กำลังการผลิตทางความร้อน 100 kW และได้ทำการทดสอบการเผาไหม้ในเงื่อนไขของสัดส่วนอากาศปฐมภูมิที่ 30% 40% และ 50% โดยมวล ทดสอบที่ 70% 60% และ 50% โดยมวล พบว่าสัดส่วนอากาศทางเข้าปฐมภูมิที่ 50% โดยมวล และทดสอบที่ 50% โดยมวลนั้นเปลวไฟเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีอุณหภูมิที่แกนกลางหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันทั้งหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล และ เกิดการเสถียรภาพของเปลวไฟภายในหัวเผาเชื้อเพลิง และสำหรับการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิของอากาศก่อนการเผาไหม้นั้นคงที่ประมาณ 195-200 °C ซึ่งข้อมูลดังที่ได้กล่าวสามารถนำไปใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้และการทดสอบการเผาไหม้หลังจากทำการปรับปรุงหัวเผาแก๊สสังเคราะห์

ชินภัทร ธุระการ [4] ได้ทำการออกแบบ และพัฒนาต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ขนาด 1 MW ซึ่งนอกเหนือจากต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงแล้วเพื่อให้งานวิจัยสามารถดำเนินการต่อได้ จึงต้องทำการออกแบบระบบสนับสนุนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ซึ่งได้แก่ระบบป้อนเชื้อเพลิง ห้องเผาไหม้ และระบบบำบัดไอเสีย เป็นต้น โดยในการออกแบบจะถูกจำกัดขอบเขตด้วยกำลังความร้อนสูงสุดของหัวเผาที่ 1 MW ซึ่งผลลัพธ์ของการออกแบบจะทำให้ได้ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงดังแสดงในรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล (1) ระบบบด และป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล, (2) หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล, (3) ห้องเผาไหม้, (4) ระบบบำบัดไอเสีย wet scrubber, (5) ระบบป้อนอากาศ, (6) พัดลมดูดอากาศ และปล่องควัน, (7) ปอดตกตะกอน และระบบหมุนเวียนน้ำ, (8) ชุดควบคุมแก๊ส LPG, (9) ระบบวัด และควบคุม [4]

ธนภัทร์ ภัคตีวรวงศ์ [5] ได้พบว่าการใช้แบบจำลองการเผาไหม้ species transport แบบจำลองการปั่นป่วน $k-\epsilon$ Standard โดยมีการเพิ่มค่าคงที่ของอัตราการแพร่ออกซิเจนภายในพื้นผิวอนุภาคคาร์ และอัตราจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของซาร์ในอัตราส่วน 2.5 เท่าของค่าเริ่มต้น และใช้แบบจำลองการติดตามแบบสุ่ม (random walk) สำหรับทำนายการกระจายตัวของอนุภาคอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน สามารถทำให้ผลการกระจายตัวของอนุภาคและการกระจายตัวของความเข้มข้นออกซิเจนมีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองอย่างน่าพอใจ เมื่อนำแบบจำลองที่ถูกปรับเทียบแล้วนี้มาใช้จำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับหัวเผาแบบ Pre-Chamber ขนาด 1 MW

Lingling Zhao, Qiangtai Zhou และ Changsui Zhao (2008) [6] ได้ศึกษาการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของลักษณะของเปลวไฟสำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผงที่มีค่าสารระเหยต่ำและคาร์บอนคงที่สูง โดยใช้แบบจำลอง Random Walk สำหรับทำนายเส้นทางเดินของอนุภาค และ $k-\epsilon$ Renormalization Group (RNG) สำหรับทำนายกระแสการไหลที่ได้รับอิทธิพลมาจากความปั่นป่วน ซึ่งเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินนี้ได้มีการออกแบบหัวเผาให้เป็นลักษณะรูปทรงกลีบกุหลาบเพื่อให้เกิดการหมุนวนภายในห้องเผาไหม้ โดยที่ลักษณะของหัวเผานี้สามารถทำให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศส่วนที่หนึ่งและเชื้อเพลิงผงภายในส่วนที่มีการหมุนวนของกระแสการไหล จึงทำให้อนุภาคถ่านหินถูกเหนี่ยวนำมาในช่วงที่มีการหมุนวนของกระแสการไหลและผสมกันอย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุที่ทำให้ลักษณะเปลวไฟมีความเสถียรภาพ โดยผลจากการจำลองนี้ได้ถูกนำไปเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งผลการจำลองนั้นมีผลที่คล้ายคลึงกับผลการทดลอง

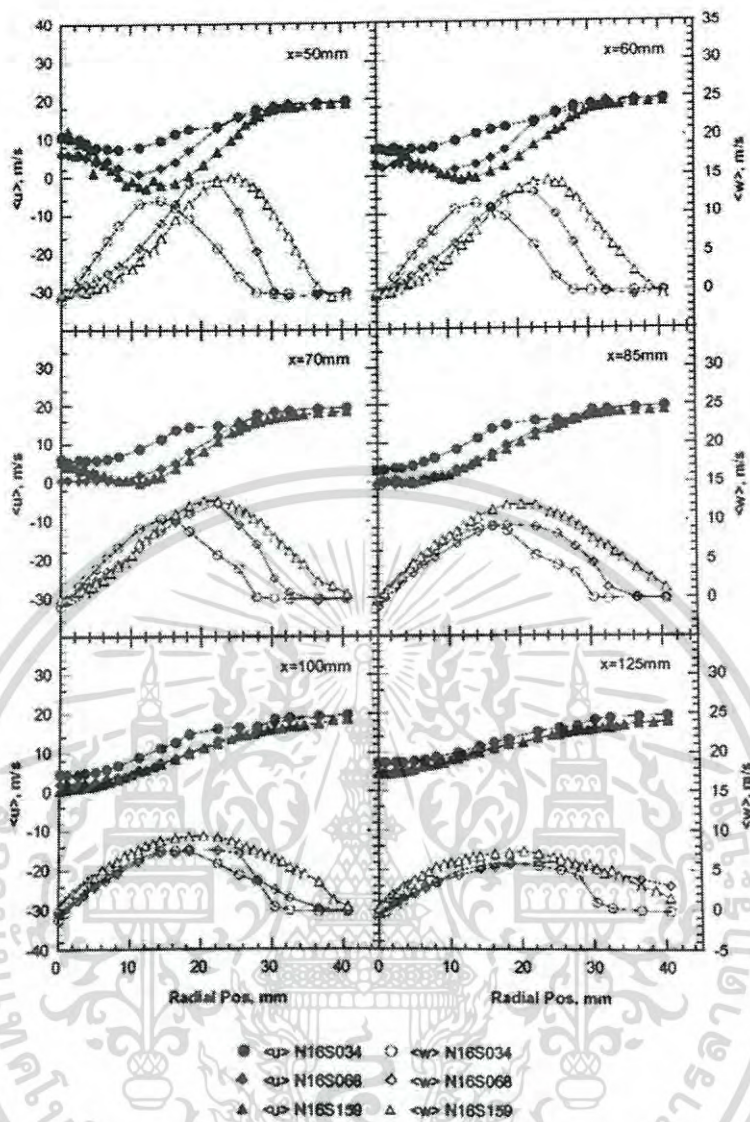
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ashwani K. Gupta (2000) [7] ได้ทำการศึกษาลักษณะทางความร้อนของเปลวไฟโพรเพนและอากาศที่อุณหภูมิสูงในการเผาไหม้ ลักษณะเปลวไฟถูกนำเสนอโดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซหลายชนิด ซึ่งมีห้องเผาไหม้ที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษ สร้างขึ้นโดย Nippon Furnace Kogyo จากประเทศญี่ปุ่น ได้ถูกนำมาใช้เพื่ออุ่นอากาศในการเผาไหม้ให้สูงขึ้น ระบบการกักเก็บความร้อนที่ติดตั้งในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดตรงฝั่ง สามารถทำให้อุ่นอากาศร้อนได้ถึง $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเตาเผากับอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้อาจอยู่ที่ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือน้อยกว่า ความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศเผาไหม้มีความแตกต่างกันตั้งแต่ 21% โดยปริมาตร (อากาศปกติ) ถึง 2% ลักษณะของเปลวไฟจึงมีความแตกต่างกันมากกับอุณหภูมิการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงจะมีเสถียรภาพมากขึ้นและเป็นเนื้อเดียวกัน (ทั้งแบบชั่วคราวและแบบไม่เชิงพื้นที่) เมื่อเทียบกับการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ เปลวไฟที่มีเสถียรภาพได้รับในอัตราส่วนที่ต่ำ ซึ่งจะไม่สามารถใช้ได้กับอุณหภูมิอากาศปกติ คุณสมบัติเปลวไฟโดยทั่วไปแสดงให้เห็นว่าสีของเปลวไฟเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงินและสีเขียว ในช่วงเงื่อนไขที่ตรวจสอบในการใช้โพรเพนเป็นเชื้อเพลิง ในบางกรณีเปลวไฟเป็นสีผสมสังเกตได้จากภายใต้เงื่อนไขบางประการเปลวไฟที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันน้อยลงหรือไม่มีสีของเชื้อเพลิงได้ถูกสังเกตสำหรับเชื้อเพลิงบางชนิด ซึ่งเชื้อเพลิงที่ได้ทำการศึกษาได้แก่ LPG, โพรเพน, มีเทน และก๊าซความร้อนต่ำเชื้อเพลิงบางชนิดให้เปลวไฟเป็นสีม่วงภายใต้สภาวะการทำงานที่คล้ายคลึงกัน ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะการแผ่รังสีของเปลวไฟ การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของ OH, CH และ C_2 และปริมาณการปล่อยมลพิษ NO_x ต่ำพร้อมกับปริมาณ CO และ HC ที่ไม่สำคัญที่ได้รับจากการเผาไหม้ด้วยอุณหภูมิสูง ซึ่งผลการทดลองได้รับการตรวจสอบด้วยการจำลองเชิงตัวเลข โดยผลที่ได้การคำนวณมีคุณลักษณะคล้ายกับเปลวไฟที่ได้จากการทดลอง

พฤติกรรมด้านความร้อนและทางเคมีของเปลวไฟที่การเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเชื้อเพลิง อุณหภูมิการอุ่นอากาศ และความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศ เปลวไฟที่เกิดจากอากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความร้อนสูงกว่าเปลวไฟที่เกิดจากอากาศปกติ ดังนั้นเทคโนโลยีการเผาไหม้ด้วยอากาศที่อุณหภูมิสูงช่วยประหยัดพลังงานได้มาก (ประมาณ 60%) การลดขนาดของอุปกรณ์ (ประมาณ 30%) และการลดมลพิษ (ประมาณ 25%) [7] การประหยัดพลังงานจะช่วยลด CO_2 และก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ สู่สิ่งแวดล้อม

Al-Abdeli, Yasir M และ Assaad R. Masri (2003) [8] ได้ศึกษาปรากฏการณ์การไหลหมุนวนของอากาศบริเวณรอบ ๆ Bluff body ที่มีการปล่อยอากาศเป็นลักษณะเจ็ทตรงบริเวณศูนย์กลางมุ่งเน้นไปที่การดูช่วงของเลขการไหลหมุนวน (swirl) และ Stream wise Annular velocity ซึ่งจะมีความสำคัญต่อลักษณะการไหลภายในห้องเผาไหม้ โดยได้ทำการควบคุมในส่วนของความเร็วและทำการตรวจสอบการไหลในโซนที่มีการไหลการไหลหมุนวนในช่วงด้านบนของห้องเผาไหม้ที่บริเวณทางออกของหัวเผา จากการทดลองพบว่ากระแสการไหลบริเวณที่อยู่ใกล้กับ Bluff body จะมีลักษณะของกระแสการไหลตามแนวแกนที่รุนแรงมากขึ้น และจากการทดลองในเงื่อนไข N16S159 โดยความเร็วในแนวแกนเท่ากับ 16.3 (m/s) ความเร็วในแนวสัมผัส 25.6 (m/s) และ Swirl number เท่ากับ 1.59 (มีค่าสูงสุดในเงื่อนไขทั้งหมด) แสดงให้เห็นถึงการหมุนวนย้อนกลับที่มีเสถียรภาพมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไข N16S168, N16S154 และ N16S000 ดังแสดงในรูปที่ 2.2

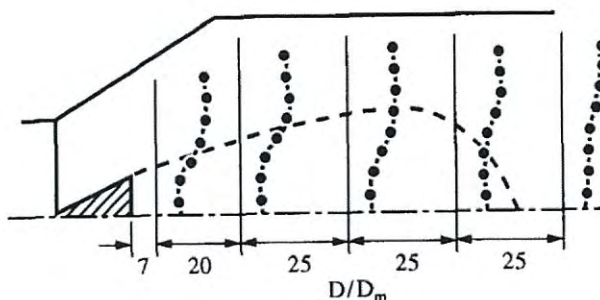
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงผลเปรียบเทียบการทดลองในเงื่อนไขต่างๆ [8]

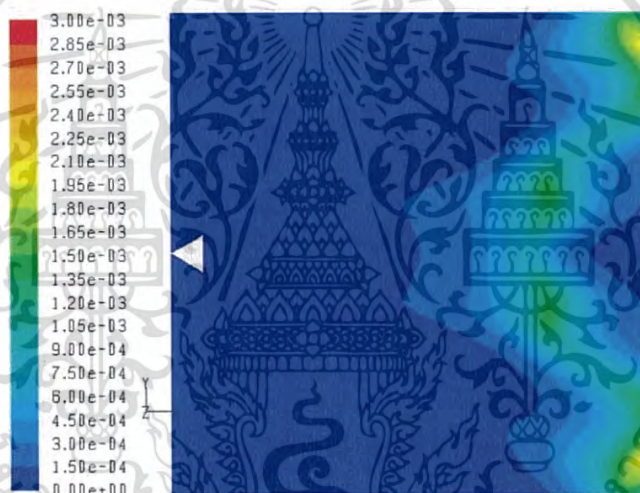
Minghou Xu et al. (1995) [9] ได้ศึกษาขนาดของอนุภาค ส่วนประกอบผันผวนของค่าความเร็ว และความปั่นป่วนของการไหลในบริเวณทางออกของวัตถุขวางการไหลรูปทรงสามเหลี่ยม (Bluff body) โดยใช้วิธี 3D PDA (three-dimensional laser particle dynamics anemometry) จากรูปที่ 2.5 พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคถ่านหินขนาดเล็กจะถูกเหนี่ยวนำด้วยกระแสการไหลหมุนวนให้รวมตัวกันอยู่บริเวณเส้นทางเดินภายในของวัตถุขวางการไหลเป็นเวลานาน และความดันต่ำในแกนกลางของกระแสการไหลหมุนวนจะดูดซับก๊าซไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงในขณะที่อยู่ในกระบวนการเผาไหม้ เงื่อนไขเหล่านี้จึงทำให้อนุภาคถ่านหินขนาดเล็กถูกเผาไหม้ออกทันที และอุณหภูมิบริเวณกระแสการไหลหมุนวนสูงถึง 1000°C ที่บริเวณขอบเขตของกระแสการไหลหมุนวนอนุภาคขนาดใหญ่จะถูกนำกลับมาเนื่องจากแรงเฉื่อยของอนุภาค ในบริเวณขอบเขตของกระแสการไหลหมุนวนไปยังผนังเตาเผา การกระจายตัวของขนาดอนุภาคถูกทำให้มีวเรียบและมีขนาดเล็ก จากสิ่งทำให้คิดว่ากระแสการไหลผ่านวัตถุขวางการไหลทำให้อนุภาคถ่านหินขนาดใหญ่ถูกเหวี่ยงไปยังผนังซึ่งทำให้ยากที่จะเผาไหม้ และทำให้เกิดการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

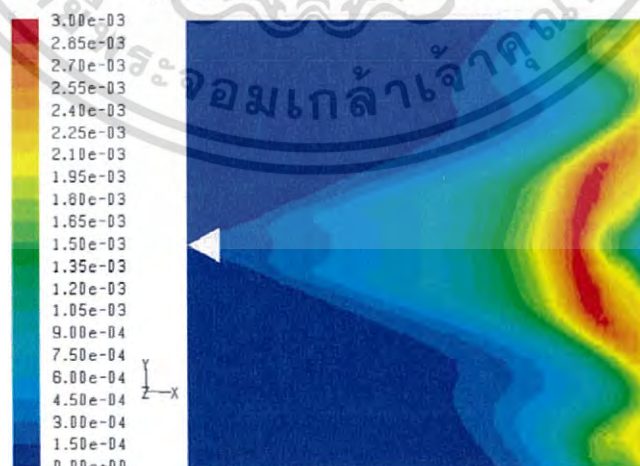


รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคผ่านวัดอุทวขวางการไหล [9]

Bing Liu et al. (2016) [10] ได้พัฒนาแบบจำลองการติดไฟของหัวเผาเชื้อเพลิงถ่านหินฝุ่น โดยใช้แบบจำลอง EDC (eddy dissipation concept) extinction model ดังแสดงในรูปที่ 2.6 พบว่าสารระเหยจะเริ่มถูกปลดปล่อยตั้งแต่บริเวณเส้นทางเดินหลังวัดอุทวขวางการไหลรูปทรงสามเหลี่ยม ในการคาดการณ์ระยะการติดของเปลวไฟมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง



(a) conventional EDC model



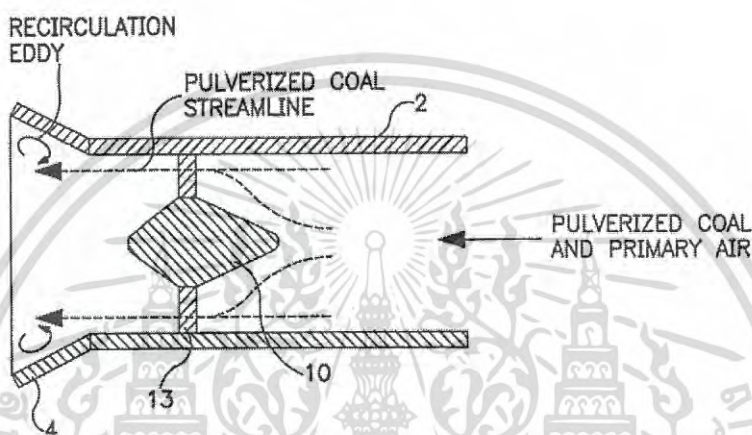
(b) EDC extinction model

รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการปลดปล่อยสารระเหยของแบบจำลองตามแนวแกน $x = 0-120$ mm

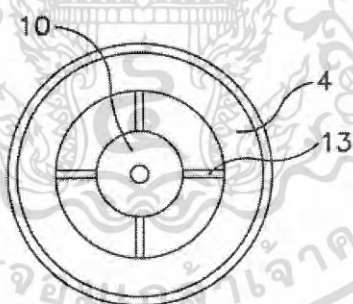
(a) conventional EDC model, (b) EDC extinction model [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Okamoto et al. (2000) [11] ได้ทำการเผยแพร่ข้อมูลเทคโนโลยีเกี่ยวกับลักษณะการติดตั้ง วัตถุขวางการไหลภายในหัวเผาในรูปทรงต่างๆ เช่น รูปร่างของวัตถุขวางการไหลที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นและ ลดลงตามทิศทางการไหล (10) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8 เชื้อเพลิงถ่านหินผงจะถูกรวบรวมบน พื้นผิวเส้นรอบวงด้านในของท่อเชื้อเพลิงถ่านหินผง โดยการชนโดยตรงกับการไหลของเชื้อเพลิงถ่านหินผง หรือเส้นโค้งกระแสการไหลของเชื้อเพลิงถ่านหินผง ดังนั้นส่วนผสมที่มีความเข้มข้นสูงของ เชื้อเพลิงถ่านหินผงจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวด้านในของเส้นรอบวงของท่อเชื้อเพลิงถ่านหินผงจึงช่วยลด อัตราส่วนอากาศบนพื้นผิวด้านในของแผ่นรักษาเปลวไฟ (4) และเพื่อรักษาเสถียรภาพของการเผาไหม้โดยไม่คำนึงถึงภาวะการเผาไหม้ รวมถึงยังเป็นการลดการเกิด NO_x



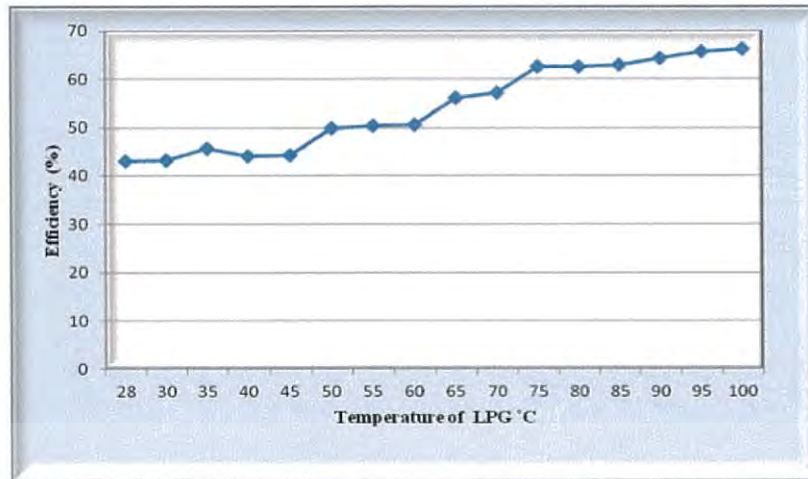
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะวัตถุขวางการไหลภายในหัวเผาเชื้อเพลิงถ่านหิน [11]



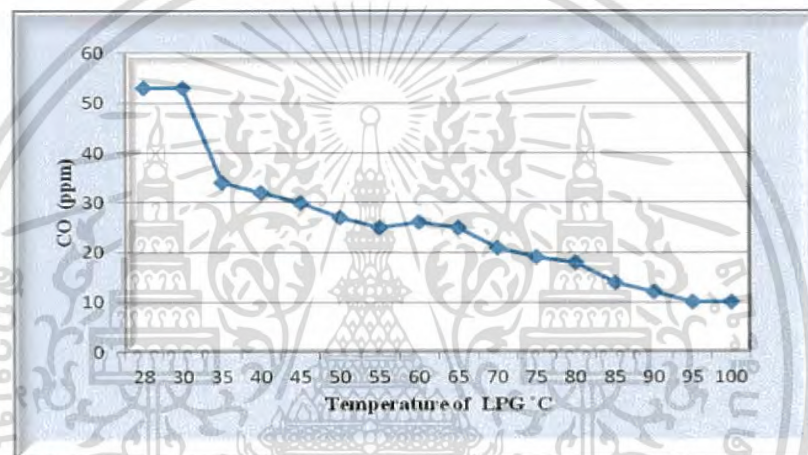
รูปที่ 2.6 แสดงด้านหน้าวัตถุขวางการไหลภายในหัวเผาเชื้อเพลิงถ่านหิน [11]

Lies Aisyah, Dimitri Rulianto และ Cahyo S Wibowo (2015) [12] ได้ศึกษาลักษณะของ ระบบอุ่นเชื้อเพลิงก่อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของแก๊ส LPG ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ขนาดเล็ก ผลการทดลองเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของแก๊ส LPG เริ่มต้นจาก 28 °C เป็น 50 °C จากเพิ่ม ประสิทธิภาพของหัวเผาได้ถึง 6.75% และการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง 49.06% นอกจากนี้ หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 100 °C จะทำให้ประสิทธิภาพของเตาเผาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและปริมาณ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงผลการอุ่นอุณหภูมิของระบบกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ [12]



รูปที่ 2.8 แสดงผลการอุ่นอุณหภูมิของระบบกับการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [12]

สำหรับในงานวิจัยนี้มีแนวคิดในการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง โดยการติดตั้งวัตถุขวางการไหล (Bluff body) และปิดช่องผสมอากาศทุติยภูมิ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้หลังจากปรับปรุงโดยการติดตั้งวัตถุขวางการไหล เนื่องจากงานวิจัยที่ได้ศึกษาพบว่าการติดตั้งวัตถุขวางการไหลทำให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงเกิดการกระจายตัว และถูกกระแสการไหลหมุนวนเหนี่ยวนำรวมตัวอยู่ภายในบริเวณเส้นทางเดินเป็นเวลานาน ส่งผลให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ และเทคนิคการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงจะมีลักษณะของเปลวไฟที่มีเสถียรภาพมากกว่าการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งยังส่งผลต่อการลดปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนทำให้ประสิทธิภาพของเตาเผาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงอย่างมาก ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ ขั้นตอนการทดสอบการเผาไหม้ ผลการทดสอบและสรุปผลการทดสอบการเผาไหม้ได้กล่าวในบทถัดไป

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมี ที่ซึ่งวัตถุที่เผาไหม้ได้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจน พร้อมกับปลดปล่อยความร้อนออกมา ในขณะที่เดียวกันก็จะแปรสภาพไปเป็นสารประกอบออกไซด์หรือผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ ได้แก่คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงไปโดยเปล่าประโยชน์และก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศดังนั้น การทราบหลักการของกระบวนการเผาไหม้และวิธีการควบคุมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ จึงมีความสำคัญยิ่งต่อการอนุรักษ์พลังงานและรักษาสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ การทราบสาเหตุของการสูญเสียความร้อนในรูปแบบต่างของระบบและอุปกรณ์ความร้อน พร้อมทั้งแนวทางในการป้องกัน จะช่วยทำให้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานความร้อนของระบบโดยรวมให้สูงขึ้นได้อีกด้วย

3.2 เชื้อเพลิง (Fuels) [13,14]

เชื้อเพลิง หมายถึง สารที่สามารถเผาไหม้ได้โดยง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศหรือออกซิเจนและความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้นั้นสามารถนำมาใช้งานในเชิงเศรษฐกิจ ดังนั้น การนำสิ่งใดสิ่งหนึ่งมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้น จำเป็นต้องสามารถผลิตได้ในจำนวนมาก สามารถจัดหาได้สะดวก เก็บรักษาขนส่ง และใช้งานได้ง่าย นอกจากนี้สารที่ได้จากการเผาไหม้ (เช่น ไอเสีย ขี้เถ้า เป็นต้น) ต้องไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ทางอากาศ ทางน้ำ ฯลฯ

เชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้ตามสภาพทางกายภาพ เป็นเชื้อเพลิงก๊าซ เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง (ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเชื้อเพลิงแข็งเป็นเชื้อเพลิงหลักในการทำวิจัย)

3.2.1 เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งหมายถึงเชื้อเพลิงที่ใช้งานในสภาพที่เป็นของแข็ง เชื้อเพลิงแข็งหลักๆ ได้แก่เชื้อเพลิงธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ ไม้ ฯลฯ และเชื้อเพลิงที่ได้จากการนำเชื้อเพลิงมาเผาถ่าน (carbonization) เช่น ถ่านโค้ก (coke) ถ่านเซมิโค้ก (semi-coke) ถ่านลิกไนต์โค้ก (lignite coke) ถ่านไม้ เป็นต้น ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเชื้อเพลิงแข็งประเภทเชื้อเพลิงชีวมวล (biomass)

3.2.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวล [13]

ชีวมวลหมายถึงสิ่งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต หรือสารอินทรีย์ที่สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่าง ๆ เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตร อาทิพืชผลทางการเกษตร เศษวัสดุที่เหลือทิ้งทางการเกษตร เป็นต้น โดยเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$) และลิกนิน ($C_{40}H_{44}O_6$) จากแหล่งข้อมูลทางการเกษตรของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรในปีเพาะปลูก พ.ศ. 2549-2550 พบว่าชีวมวลที่นำมาใช้ประโยชน์ในประเทศไทย สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ (1) ชีวมวลจากภาคการเกษตร (2) ชีวมวลจากภาคอุตสาหกรรมป่าไม้ (3) ชีวมวลจากชุมชน ในที่นี้จะกล่าวถึงชีวมวลจากภาคการเกษตรเท่านั้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ชีวมวลจากภาคการเกษตร สามารถจำแนกออกเป็น วัสดุทิ้งจากภาคการเกษตรและชีวมวลจากพืชพลังงาน



กากใยปาล์ม



ไม้พืน



ซังข้าวโพด



เหม้ามันสำปะหลัง



กะลามะพร้าว



แกลบ

รูปที่ 3.1 ชีวมวลในประเทศไทย [13]

(1.1.) ชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรและกระบวนการผลิตอาหาร สำหรับประเทศไทยพืชเกษตรที่มีความสำคัญมาก ประกอบด้วย ข้าว ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง ปาล์ม น้ำมัน เพราะเป็นพืชที่มีการเพาะปลูกมาก และสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกหรือแปรรูปมาแปลงสภาพเป็นพลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้าได้ โดยพืชแต่ละประเภทมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นชีวมวล

(1.2.) ชีวมวลจากพืชพลังงาน ประเทศไทยได้มีการศึกษาและทดลองปลูกพืชที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นพลังงานได้ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 จำพวกหลักคือ พืชประเภทโตเร็ว เช่น ต้นกระถินยักษ์ และ พืชที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานได้ เช่น ต้นสบู่ดำ ต้นปาล์ม น้ำมัน อ้อย และมันสำปะหลัง เป็นต้น

3.2.1.2 การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหิน [14]

การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหินถูกนำมาปรับใช้เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล ที่นิยมใช้มีอยู่ 2 แบบคือ การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก

การวิเคราะห์โดยประมาณจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของถ่านหินเมื่อถูกให้ความร้อน ผลการทำกรวิเคราะห์โดยประมาณยังมีประโยชน์ในการเลือกถ่านหินที่จะนำไปเผาไหม้ มาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ANSI/ASTM D 3172 ผลจากการวิเคราะห์ประกอบด้วย

1. การวิเคราะห์โดยประมาณ

1.1 ความชื้นแฝง (Inherent Moisture) หมายถึง ค่าความชื้นภายในที่อยู่ในรูเล็กๆ (micro pores) ภายในโครงสร้างของถ่านหินและไม่ใช้ความชื้นอิสระ ค่านี้ไม่รวมกับความชื้นที่เกิดจากการระเหยของสารพวกสสารธาตุ (mineral matter) และความชื้นที่เกิดจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เช่าได้เห็นว่าเว็บไซต์ของเอ็กสาร์ท
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลายตัว (decomposition moisture) ค่านี้ถูกเก็บแบบจำลองแห้งแรเป็นสัดส่วนต่อน้ำหนักถ่านหินแห้ง

1.2 เถ้า (Ash) หมายถึง สิ่งที่เหลือจากการเผาไหม้ (non-combustion residue) เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 815 °C เป็นเวลา 90 นาที เถ้านี้ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสสาร (mineral) และ อินทรีย์วัตถุ (organic matter) ค่าเถ้าบันทึกเข้าสู่แบบจำลองแห้งแรแบบ air-dry มีหน่วยเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักถ่านหินแห้ง

1.3 สารระเหย (Volatile Matter) หมายถึง สารที่มาจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ร่วมกับ สสารธาตุที่สามารถสลายตัวได้เมื่อถูกความร้อน เช่น CO₂ มาจากสารประกอบคาร์บอเนต (carbonate) เป็นต้น ค่าสารระเหยเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักถ่านหินที่สูญเสียไปหลังจากหักค่าความชื้นของถ่านหินออกไปแล้ว เมื่ออบถ่านหินที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 7 นาที

1.4 ปริมาณคาร์บอนในถ่านหิน (Fixed Carbon) เป็นสารประกอบของคาร์บอน (carbonaceous residue) ที่ไม่รวมเถ้าหลังจากที่สารระเหยถูกไล่ออกไปแล้ว ค่าปริมาณคาร์บอนเป็นค่าที่วัดปริมาณสารที่สามารถเผาไหม้ได้ (solid combustible material)

2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ เป็นการวิเคราะห์อย่างละเอียดซึ่งจะให้ผลเปอร์เซ็นต์มวลขององค์ประกอบทางเคมีประกอบทางเคมีอยู่ในถ่าน ซึ่งประกอบไปด้วย คาร์บอน, ไฮโดรเจน, ไนโตรเจน, ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะนำไปใช้ในการดุลสมการการเผาไหม้ เพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้และน้ำหนักของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ป้อนอากาศ รวมไปถึงใช้ในการคำนวณความสูญเสียความร้อนอีกด้วย มาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ANSI/ASTM D 3176 ผลการวิเคราะห์จะประกอบด้วย

2.1 คาร์บอน ปริมาณคาร์บอนจะประกอบด้วยคาร์บอนที่มีอยู่ในคาร์บอนคงที่และในสารวาปไฟ เมื่อถ่านหินถูกเผาไหม้แล้วผลลัพธ์ที่ออกมาคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนจะปรากฏอยู่ 2 รูปแบบคือ

1. สารประกอบอินทรีย์ (organic compound) ได้แก่ สารประกอบอะโรมาติก (aromatic) และ สารประกอบอะลิฟาติก (aliphatic) และสารประกอบคาร์บอเนตของธาตุต่าง ๆ

2. สารประกอบอนินทรีย์ คาร์บอเนต (inorganic carbonate) ได้แก่ แคลไซต์ (calcite) และ ซิเดอไรต์ (siderite)

2.2 ไฮโดรเจน เกิดจากองค์ประกอบอินทรีย์สารและความชื้นในถ่านหิน สำหรับการวิเคราะห์ไฮโดรเจนทำได้โดยการเผาถ่านหินให้ไฮโดรเจนถูกเปลี่ยนเป็นน้ำภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกดูดซับด้วยสารที่เหมาะสมแล้วนำมาคำนวณหาปริมาณไฮโดรเจนโดยการชั่งน้ำหนักของตัวดูดซับนั้น ๆ ในทางทฤษฎีน้ำที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้จะมีมวลเป็น 9 เท่าของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง สำหรับคาร์บอนและไฮโดรเจนจะใช้เป็นตัวแปรในการแยกประเภทของถ่านหินใช้ในการคำนวณหาความร้อนและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ซัลเฟอร์ ในถ่านหินเกิดได้จากทั้งอินทรีย์สาร และ อนินทรีย์สารซึ่งอยู่ในรูปไพไรต์ (pyrite) มาร์คาไซต์ (marcasite) และ ซัลเฟต (sulphate) โดยทั่วไปซัลเฟอร์จะแบ่งเป็น 3 แบบคือ ไพไรต์ ซัลเฟอร์(pyritic sulphur), ซัลเฟตซัลเฟอร์ (sulphate sulphur) และ อินทรีย์ซัลเฟอร์ (organic sulphur) ซึ่งไพไรต์ซัลเฟอร์ (FeS_2, FeS) และ ซัลเฟตซัลเฟอร์ นี้เราสามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้ เมื่อนำค่าที่ได้ไปลบออกจากค่าซัลเฟอร์รวม เราจะได้ปริมาณอินทรีย์ซัลเฟอร์ในการวิเคราะห์ซัลเฟอร์แยกออกได้เป็นการวิเคราะห์ปริมาณและการวิเคราะห์รูปแบบการรวมตัว

2.4 ไนโตรเจน เป็นธาตุตัวเดียวที่เกิดในถ่านหินในลักษณะที่เป็นอินทรีย์ สารประกอบของไนโตรเจนจะเสถียรในลักษณะเป็น เฮเทอโรไซคลิก (heterocyclic) และ สารประกอบไซคลิกที่ไม่ซับซ้อน (complex non-cyclic compound) ส่วนมากไนโตรเจนจะเกิดจากซากพืช ซากสัตว์ และโปรตีนของสัตว์ส่วนสารอนินทรีย์ไนโตรเจน (inorganic nitrogen) จะเป็นส่วนประกอบส่วนหนึ่งของหินแอมล

2.5 ออกซิเจน เกิดจากสารประกอบอินทรีย์, สารประกอบอนินทรีย์, ความชื้น และ สสารธาตุ เช่น ดินเหนียว, สารประกอบคาร์บอเนต และซัลเฟอร์ ในสารประกอบอินทรีย์ออกซิเจนจะรวมอยู่ในรูป ซิลิเกต (silicates), คาร์บอเนต (carbonates), ออกไซด์ (oxides), สารประกอบซัลเฟต (sulphate compound) และจากน้ำ สำหรับซิลิเกตจะอยู่ในรูปอะลูมิเนียมซิลิเกต (aluminum silicates) ซึ่งพบในหินดินดานที่ปะปนอยู่ในถ่านหิน ส่วนคาร์บอเนตส่วนมากจะเป็นพวกแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, CaCO_3) และ เหล็กคาร์บอเนต (iron carbonate, Fe_2CO_3) สำหรับออกไซด์จะรวมถึงออกไซด์ของเหล็กและออกไซด์ของซัลเฟอร์โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แคลเซียมซัลเฟต (calcium sulphate, CaSO_4) และ เหล็กซัลเฟต (iron sulphate, Fe_2SO_4)

3.3 ทฤษฎีการเผาไหม้ (combustion theory) [15,16,17,18]

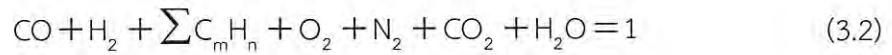
ในการคำนวณการเผาไหม้จะคำนวณปริมาณต่าง ๆ ต่อปริมาณเชื้อเพลิงหนึ่งหน่วย อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปสำหรับเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว จะใช้มวล 1 kg (เขียนตามความนิยมว่า kg_f) และสำหรับเชื้อเพลิงก๊าซจะใช้ 1 m^3_N (เขียนตามความนิยมว่า m^3_{N-f}) เป็นปริมาณหนึ่งหน่วย หน่วย m^3_N หมายถึงปริมาตรที่สภาวะมาตรฐาน (ความดัน 0.1013 MPa (1 บรรยากาศ), อุณหภูมิ 0°C (273.15 K) เมื่อแสดงปริมาณอากาศหรือปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงต่าง ๆ ด้วยหน่วยนี้แล้ว จะสามารถกำหนดปริมาณสัมบูรณ์ของก๊าซเหล่านั้นได้ จึงมีความสะดวกในการใช้งาน

ในกรณีของเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว จะแสดงสัดส่วนโดยมวล (kg/kg_f) ของคาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน ความชื้น และขี้เถ้าในเชื้อเพลิงด้วย C, H, S, O, N, w, a ตามลำดับ

$$C + H + S + O + N + w + a = 1 \quad (3.1)$$

ในกรณีของเชื้อเพลิงก๊าซ จะแสดงสัดส่วนโดยปริมาตร ($\text{m}^3_N / \text{m}^3_{N-f}$) ของ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ฯลฯ ซึ่งเป็นองค์ประกอบด้วย $\text{CO}, \text{H}_2, \text{C}_m\text{H}_n, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สมการที่แสดงความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างก่อนและหลังปฏิกิริยาเผาไหม้ เรียกว่า สมการปฏิกิริยาเผาไหม้ ตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจนและออกซิเจนเผาไหม้เกิดไอน้ำ สามารถแสดงได้ดังนี้



ปฏิกิริยาในห้องเผาไหม้ H_2 และ O_2 จะไม่เปลี่ยนเป็น H_2O ทั้งหมดทันที แต่จะต้องผ่านปฏิกิริยาพื้นฐานจำนวนมากทำให้เกิด H_2O ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง และในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาที่ H_2O สลายตัวย้อนกลับกลายเป็น H_2 กับ O_2 อีกด้วย ดังนั้น H_2 , O_2 และ H_2O จะยังคงอยู่ด้วยสัดส่วนค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในขณะนั้น (สภาวะสมดุลเคมี) อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแล้วสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ต่อสารตั้งต้นจะมีค่าสูงมาก หากอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ไม่ได้มีอุณหภูมิสูงมากแล้ว จะพิจารณาว่าสารตั้งต้นเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ทั้งหมดก็ได้

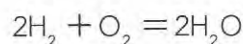
3.3.1 ปฏิกิริยาและกระบวนการเผาไหม้ (reaction combustion process) [15]

3.3.1.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้มีลักษณะเด่นคือ เป็นปฏิกิริยาอุณหภูมิสูงและความเร็วสูงที่ประกอบด้วยอะตอมและอนุภาคมูลอิสระ รวมทั้งคุณสมบัติของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิมากกับอิทธิพลทางกลศาสตร์ของก๊าซ กล่าวคือ ปฏิกิริยาการเผาไหม้ทั่วไปหากไม่สนใจกระบวนการระหว่างทางแล้ว ผลลัพธ์สุดท้ายแล้วจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนในสถานะก๊าซ ไม่ว่าจะเชื้อเพลิงจะเป็นของแข็งหรือของเหลว เมื่อเริ่มการเผาไหม้จะเกิดการกลายเป็นไอก่อน หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยาคายความร้อนในสถานะก๊าซระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงกับสารออกซิเดชัน

เชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็นก๊าซ ของเหลว หรือของแข็ง จะประกอบด้วยอะตอมของ C, H, O ฯลฯ ที่ทำพันธะกันในรูปแบบต่าง ๆ อะตอมเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับออกซิเจนก่อให้เกิดแสงและความร้อน จากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน สุดท้ายแล้วเชื้อเพลิงจะกลายเป็น CO_2 , H_2O ทั้งนี้แล้ววัตถุประสงค์ของอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความร้อน ก็คือ การใช้ความร้อนที่เกิดขึ้นให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่จะทำได้

ปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ได้สัดส่วนตามทฤษฎีมีดังต่อไปนี้



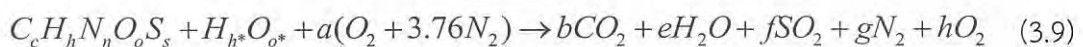
อย่างไรก็ตาม ด้านซ้ายของสมการนี้จะแสดงเพียงสภาวะก่อนทำปฏิกิริยา และด้านขวาก็แสดงเพียงสภาวะหลังทำปฏิกิริยาเท่านั้น ไม่ได้แสดงให้เห็นกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างทางแต่อย่างใด ในทางปฏิบัติเนื่องจากเปลวไฟจะมีอุณหภูมิสูง ดังนั้น H_2O จึงแยกตัวออก (dissociation) ทำให้เกิดสารประกอบมีทั้ง H_2 , O_2 , OH , H , O อยู่ด้วย ซึ่งเมื่อหลุดพ้นเปลวไฟออกมาปฏิกิริยาหลักทั้งหมดจะสิ้นสุดลง และได้สมดุลทางเคมีตามสมการ อย่างไรก็ตาม ก่อนจะถึงจุดนั้น ปฏิกิริยาจะดำเนินไปโดยผ่านกระบวนการพื้นฐานจำนวนมาก เช่น



ทั้งนี้ M หมายถึงโมเลกุลใด ๆ ซึ่งมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกับชนิดสารเคมี (chemical species) ระหว่างการทำปฏิกิริยาเท่านั้น แต่ตัวมันเองจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ปฏิกิริยา (3.4)-(3.8) เรียกว่า ปฏิกิริยาเบื้องต้น (elementary reaction) ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้ไม่เพียงดำเนินไปในทิศทางตามลูกศร (ปฏิกิริยาไปข้างหน้า) เท่านั้น แต่ยังดำเนินการไปในทิศทางย้อนกลับด้วย (ปฏิกิริยาย้อนกลับ) และในก๊าซการเผาไหม้จะมีสารตัวกลาง (intermediate) จากปฏิกิริยารวมอยู่ด้วยปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การแยกตัวออก หรือ การแยกตัวออกด้วยความร้อน (thermal dissociation) และเมื่อความเข้มข้นของชนิดสารเคมีอยู่ในสถานะที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเรียกว่า ได้ สมดุลเคมี ปรากฏการณ์การสลายตัวจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 2000 K อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้ปฏิกิริยาปลดปล่อยความร้อนจากการเผาไหม้และทำให้อุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ลดต่ำลง

3.3.2 สตอยชิโอเมตรีของการเผาไหม้ (combustion stoichiometry) [4,16]

การเผาไหม้ที่ stoichiometry เป็นการคำนวณปริมาณออกซิไดเซอร์ที่พอดีในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นถ้าปริมาณออกซิไดเซอร์มากกว่าที่สภาวะ stoichiometry นั้นหมายถึงการเผาไหม้นั้นมีส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงแบบบาง (fuel lean) ในทางกลับกัน เมื่อมีปริมาณออกซิไดเซอร์น้อยกว่าที่สภาวะ stoichiometry หมายถึงมีส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงแบบหนา (fuel rich) การหาความสัมพันธ์แบบ stoichiometry ทำได้โดยการเขียนสมการเผาไหม้จะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ได้ดังนี้



ในเทอมของ H_h^*O_o^* เกิดจากความชื้นของเชื้อเพลิง

$$\text{เมื่อ} \quad a = \frac{2b + e + 2f - o - o^*}{2} \quad (3.10)$$

สัดส่วนของปริมาณออกซิเจนในอากาศซึ่งมักนิยมพิจารณาให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เป็นอากาศแห้งประกอบไปด้วยออกซิเจน 21% โดยปริมาตร และไนโตรเจน 79% โดยปริมาตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือแต่ละโมลของออกซิเจนมีในโตรเจน 3.76 โมล ซึ่งการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ตามทฤษฎีหรือตาม stoichiometry สามารถหาได้จาก

$$(A/F)_{\text{stoic}} = \left(\frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}} \right) = \frac{4.76a}{1} \frac{MW_{\text{air}}}{MW_{\text{fuel}}} \quad (3.11)$$

เมื่อ MW_{air} และ MW_{fuel} เป็นน้ำหนักโมเลกุลของอากาศ และเชื้อเพลิงตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีปริมาณอื่นๆที่เกี่ยวข้องดังนี้

อัตราส่วนสมมูล (equivalent ratio, Φ) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกว่าส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นแบบ Stoichiometry หนา หรือ บาง ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\Phi = \frac{(A/F)_{\text{stoic}}}{(A/F)} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{\text{stoic}}} \quad (3.12)$$

จากนิยามจะเห็นได้ว่า สำหรับส่วนผสมหนา (fuel rich) จะมีค่า $\Phi > 1$ ส่วนผสมบาง (fuel lean) จะมี $\Phi < 1$ และสำหรับ stoichiometry จะมี $\Phi = 1$ ซึ่งอัตราส่วนสมมูลนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่มีประโยชน์มากในการบ่งบอกสมรรถนะของพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ % stoichiometry air คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้คิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศตามทฤษฎี ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนสมมูลดังนี้

$$\% \text{stoichiometry air} = \frac{100\%}{\Phi} \quad (3.13)$$

และเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (% excess air) คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินกี่เปอร์เซ็นต์โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100

$$\% \text{excess air} = \frac{(1-\Phi)}{\Phi} \cdot 100\% \quad (3.14)$$

3.3.3 ค่าความร้อน (calorific value) [16]

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

หมายถึงความร้อนที่ถูกปลดปล่อยจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยมวล ที่รวมค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ การเผาไหม้กำหนดให้เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิ 25°C ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้สารผลิตภัณฑ์ที่เย็นตัวลงมา 25°C และน้ำในสารผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะของเหลว ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวลปกติจะอยู่ประมาณ 18-22 MJ/Kg สามารถคำนวณหาค่าความร้อนสูงจากหลักอ้างอิงแห้ง (dry basis) โดยใช้สูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$GCV = 0.3491 \cdot X_C + 1.1783 \cdot X_H + 0.1005 \cdot X_S - 0.0151 \cdot X_N - 0.1034 \cdot X_O - 0.0211 \cdot X_{ash} \quad (3.15)$$

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

3.3.3.2 ค่าความร้อนต่ำ (low heating value, LHV) หรือ net calorific value (NCV)

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

$$NCV = GCV \left(1 - \frac{w}{100}\right) - 2.444 \cdot \frac{w}{100} - 2.444 \cdot \frac{h}{100} \cdot 8.936 \left(1 - \frac{w}{100}\right) \quad (3.16)$$

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

ในทางปฏิบัติจะนำค่าความร้อนต่ำไปคำนวณ เนื่องจากไม่สามารถนำความร้อนแฝงของการกลายเป็นไจากค่าความร้อนสูงมาใช้คำนวณในทางปฏิบัติได้

3.3.4 อุณหภูมิจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล [16]

อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลคำนวณได้จากสมดุลพลังงานและสมดุลเคมี จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ พลังงานที่เชื้อเพลิงคายออกมาจากปฏิกิริยาจะให้ความร้อนแก่สารผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะแก๊ส (flue gas) สมดุลพลังงานของการเผาไหม้เขียนได้ดังนี้

พลังงานในเชื้อเพลิง + พลังงานจากการอุ่น = พลังงานในสารผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะแก๊ส + พลังงานที่สูญเสีย

พลังงานในเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้ในสมการ 3.16 สำหรับในการคำนวณพลังงานจากการอุ่น (preheat energy) และพลังงานในแก๊สเสีย สามารถใช้คุณสมบัติของแก๊สจากการเผาไหม้มาใช้ในการตั้งสมการต่อไปนี้

$$h_i(T) = T \left(a_1 + \frac{a_2}{2} \cdot T + \frac{a_3}{3} \cdot T^2 + \frac{a_4}{4} \cdot T^3 + \frac{a_5}{5} \cdot T^4 + \frac{a_6}{6} \right) \frac{R_u}{M_i} \quad (3.17)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิของแก๊สเสีย โดยสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก [13] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$NCV \cdot \dot{m}_F + [h_F(T_F) - h_F(T_{Amb})]\dot{m}_F + [h_{Air}(T_{Air}) - h_{Air}(T_{Amb})]\dot{m}_{Air} = [h_{FG}(T_{FG}) - h_{FG}(T_{Amb})]\dot{m}_{FG} + \sum_i Q_i + \sum_j \bar{E}_j \cdot \dot{m}_F \quad (3.18)$$

โดยที่
$$h_{Air} = X_{N_2} h_{N_2} + X_{O_2} h_{O_2} \quad (3.19)$$

$$h_{FG} = X_{CO_2} h_{CO_2} + X_{H_2O} h_{H_2O} + X_{SO_2} h_{SO_2} + X_{N_2} h_{N_2} + X_{O_2} h_{O_2} \quad (3.20)$$

เมื่อพิจารณาที่สภาวะไม่มีการสูญเสียความร้อน และไม่มีการอุ่นเชื้อเพลิงหรืออากาศ สมการสมดุลพลังงานจะเขียนใหม่ได้เป็น

$$NCV \cdot \dot{m}_F = [h_{FG}(T_{FG}) - h_{FG}(T_{Amb})]\dot{m}_{FG} \quad (3.21)$$

3.3.5 การคำนวณประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ [16]

3.3.5.1 ประสิทธิภาพทางความร้อน (thermal efficiency)

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

$$Q_{Ch} = [h_{FG}(T_{Ch}) - h_{FG}(T_{Amb})]\dot{m}_{FG} \quad (3.22)$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{Ch} + \sum_i Q_i}{NCV \cdot \dot{m}_F + [h_F(T_F) - h_F(T_{Amb})]\dot{m}_F + [h_{Air}(T_{Air}) - h_{Air}(T_{Amb})]\dot{m}_{Air}} \quad (3.23)$$

ในกรณีที่ไม่มี การอุ่นเชื้อเพลิงหรืออากาศ และสมมติว่ามีความร้อนสูญเสียที่ปล่องไฟเท่านั้น ประสิทธิภาพทางความร้อนคำนวณได้จากสูตร

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{Ch}}{NCV \cdot \dot{m}_F} \quad (3.24)$$

3.3.5.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (combustion efficiency)

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยปกติการเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์ร้อยเปอร์เซ็นต์ เพราะจะมีองค์ประกอบที่เผาไหม้ไม่หมด ดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้จะพิจารณาความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงบางส่วนที่ไม่ถูกเผาไหม้ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\eta_{comb} = 1 - \frac{\sum_j \bar{E}_j \cdot \dot{m}_F}{NCV \cdot \dot{m}_F} = 1 - \frac{\sum_j \bar{E}_j}{NCV} \quad (3.25)$$

3.3.5.3 ประสิทธิภาพรวม (total efficiency)

ประสิทธิภาพรวมจะพิจารณาทั้งความร้อนที่สูญเสียที่ปล่องไฟ ความร้อนที่สูญเสียจากการถ่ายเทเนื่องจากการพา การนำ และการแผ่รังสีความร้อน และความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงบางส่วนไม่ถูกเผาไหม้ ประสิทธิภาพรวมสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\eta_{tot} = 1 - \frac{Q_{Ch} + \sum_i Q_i + \sum_j \bar{E}_j \cdot \dot{m}_F}{NCV \cdot \dot{m}_F + [h_F(T_F) - h_F(T_{Amb})] \dot{m}_F + [h_{Air}(T_{Air}) - h_{Air}(T_{Amb})] \dot{m}_{Air}} \quad (3.26)$$

สำหรับในกรณีไม่มีการอุ่นอากาศและเชื้อเพลิง

$$\eta_{tot} = 1 - \frac{Q_{Ch} + \sum_i Q_i + \sum_j \bar{E}_j \cdot \dot{m}_F}{NCV \cdot \dot{m}_F} \quad (3.27)$$

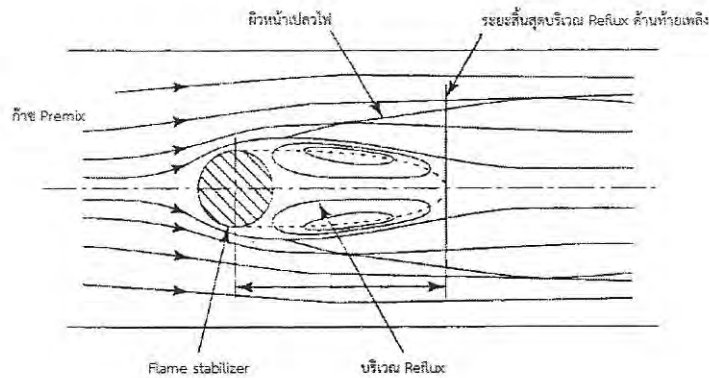
3.3.6 การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ [15]

หมายถึงการทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพในกระแสก๊าซผสม ความเร็วสูง หรือการทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพที่ปลายเพลิงของหัวเผา ซึ่งอยู่ในกระแสอากาศปฐมภูมิ วิธีการรักษาเสถียรภาพทำได้โดยใช้ (1) Flame stabilizer (2) Swirler (3) Countercurrent jet เป็นต้น ไม่ว่าจะวิธีใดก็ตาม จะทำงานด้วยการสร้างบริเวณที่มีการไหลย้อนกลับ (reflux) หรือบริเวณที่เกิดกระแสความเร็วต่ำขึ้น แล้วทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพในบริเวณนั้น

Flame stabilizer หมายถึงวัตถุตั้งขวาง (bluff body) ที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก จานกลม ทรงกลม พื้นผิวรูปตัววีหรือพื้นผิวรูปกรวยกลม ฯลฯ ซึ่งจะกักก๊าซเผาไหม้แล้วมีอุณหภูมิสูงไว้ในบริเวณที่มีการไหลย้อนกลับ ปิดล้อมบริเวณที่เกิดขึ้นที่ทางผ่านของตัวมัน แล้วใช้ก๊าซนี้เป็นเชื้อในการจุดไฟให้กระแสก๊าซผสม ความเร็วสูงลักษณะการไหลของก๊าซรอบ ๆ Flame stabilizer แสดงไว้ในรูปที่ 3.6

Swirler เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้กระแสเกิดการตีเกลียว ทำให้เกิด Reflux ขึ้นด้วยความดันลบที่บริเวณศูนย์กลาง เพื่อให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ ความแตกต่างจาก Flame stabilizer คือวิธีทำให้เกิด Reflux เท่านั้นส่วนหลักการทำงานเหมือนกันทุกประการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ลักษณะการไหลของก๊าซรอบ ๆ
Flame stabilizer

(เปลวไฟโพรง-อากาศ อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ) [15]

Countercurrent jet จะเป็นวิธีพ่น (Jet) ส่วนกับกระแสสม่ำเสมอ แล้วทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ ณ บริเวณกระแสความเร็วต่ำใกล้ๆ กับจุดหยุดนิ่ง มีทั้งวิธีพ่นเชื้อเพลิงส่วนกระแสอากาศ และวิธีพ่นของอากาศหรือก๊าซเผาไหม้ อุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิสูงส่วนกับกระแสก๊าซผสม

นอกจากนี้ ยังมีวิธีคว้านปากหัวพ่นเชื้อเพลิง ให้กว้างขึ้นเป็นขั้นบันได หรือวิธีบากร่องบนผนัง ฯลฯ วิธีการเหล่านี้ก็สามารถพิจารณาได้ว่าเป็น Flame stabilizer ประเภทหนึ่ง

3.3.7 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง [15]

3.3.7.1 รูปแบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง

(1) การเผาไหม้จากการระเหย (evaporating combustion) เป็นปรากฏการณ์ที่เชื้อเพลิงแข็งที่มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำจะหลอมเหลวก่อนเผาไหม้ แล้วระเหยในทำนองเดียวกับเชื้อเพลิงเหลว หลังจากนั้นจึงเผาไหม้ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่อุณหภูมิระเหยมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิสลายตัวด้วยความร้อน

(2) การเผาไหม้จากการสลายตัว (decomposing combustion) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่อุณหภูมิสลายตัวด้วยความร้อนมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิระเหย โดยเมื่อได้รับความร้อน เชื้อเพลิงจะสลายตัวด้วยความร้อน และเมื่อสารระเหยถูกปลดปล่อยออกจากพื้นผิวจะเกิดการเผาไหม้

(3) การเผาไหม้ที่พื้นผิว (surface combustion) เป็นปรากฏการณ์ที่พบได้ในถ่านไม้หรือถ่านโค้กซึ่งแทบไม่มีสารระเหย และพบได้ใน Fixed carbon หลังจากการเผาไหม้จากการสลายตัว โดยออกซิเจนหรือก๊าซที่มีคุณสมบัติออกซิเดชัน (เช่น CO_2) จะแพร่เข้าไปในช่องว่างบนพื้นผิวหรือภายในของแข็งแล้วเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้

(4) การเผาไหม้จากการระอุ (smoldering) สำหรับสสารที่มีอุณหภูมิสลายตัวด้วยความร้อนต่ำ เช่น กระดาษ หลังจากเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน หากสารระเหยไม่ถูกจุดไฟ บางครั้งจะเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวซึ่งทำให้เกิดควันขึ้นเป็นจำนวนมากเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การระอุ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปฏิกิริยาที่พื้นผิวมีการดำเนินไปอย่างต่อเนื่องภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิติดไฟของสารระเหย ถ้าบังคับควันให้ติดไฟ หรือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่าจุดติดไฟของควันแล้ว การเผาไหม้จะเปลี่ยนรูปแบบเป็นการเผาไหม้ที่เกิดเปลวไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การถ่ายเทความร้อน [17]

3.4.1 บทนำ

สำหรับการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อนนั้น สามารถแยกพิจารณาตามกลไกการถ่ายเทความร้อนในแบบต่างๆ ได้อย่างชัดเจนเป็น 3 แบบคือ การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี ในความจริงการกระจายของอุณหภูมิในตัวกลางจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนทั้งสามรูปแบบตามที่ได้กล่าวมา แต่เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์จึงแยกพิจารณาเป็นแบบใดแบบหนึ่งได้ โดยรายละเอียดสามารถศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและหนังสือเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน สำหรับในหัวข้อนี้ขออธิบายโดยสังเขปต่อไป

3.4.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน

การนำความร้อนหมายถึงการส่งถ่ายพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลาง อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยส่งถ่ายความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งสู่อีกโมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่อง อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนคำนวณจากกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's law) ซึ่งการนำความร้อนในทิศทาง x ภายใต้สภาวะคงตัว (steady state) ซึ่งมีรูปแบบสมการเป็น

$$q_{cond,x} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.28)$$

เมื่อ $q_{cond,x}$ คืออัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ หรือการนำความร้อน (W) k คือค่าสภาพนำความร้อน (thermal conductivity) ของตัวกลาง ($W/m \cdot K$) A คือพื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (m^2) T คือ อุณหภูมิ (K) และ x คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน

3.4.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน

เมื่อของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อน ระหว่างของไหลกับวัตถุ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือ การพาความร้อน กระบวนการพาความร้อนดังกล่าวนี้เป็นประภฏการณ์พื้นฐาน แต่กลไกของการถ่ายเทความร้อนนั้นซับซ้อนมากสมการหลักๆ ที่สามารถใช้ในการคำนวณหาอัตราการพาความร้อนจาก ส่วนย่อยๆ ของระบบ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของระบบที่ให้ความร้อนและช่วยระบายความร้อน การถ่ายเท ความร้อนโดยการพาหรือการพาความร้อนนี้แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การพาความร้อนแบบอิสระ (free convection) และการพาความร้อนแบบบังคับ (force convection) แรงที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนไหวของการพาความร้อนแบบอิสระนั้นเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในก้อนของไหลที่เนื่องมาจากการที่ของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน จนทำให้เกิดการลอยตัวขึ้น สำหรับในการถ่ายเทความร้อนด้วยพาความร้อนไม่ว่าแบบไหนก็ตามต่างก็มีสมการสำหรับหาอัตราการพาความร้อนที่อยู่ในรูปของ กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ซึ่งมีรูปแบบสมการเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_{conv} = \bar{h}_c A (T_s - T_{f,\infty}) \quad (3.29)$$

เมื่อ q_{conv} คืออัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือการพาความร้อน (W) \bar{h}_c คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (average convective heat) ของตัวกลาง ($W/m^2 \cdot K$) A คือพื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (m^2) T_s คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ (K) และ $T_{f,\infty}$ คือ อุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิว (K)

3.5 การปล่อยมลพิษและการควบคุม (Pollutants Emission and Control) [18]

3.5.1 บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าสารมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน เป็นสาเหตุหลักของการทำลายสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ยิ่งปริมาณการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นเท่าไร ก็จะทำให้ทำลายมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นการเปลี่ยนรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนโดยการเผาไหม้เพื่อการดำรงอยู่ของมนุษย์จะไม่มี ความหมายเลยถ้ามนุษย์ไม่ตระหนักถึงผลกระทบจากมลพิษที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

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

3.5.2 ผลกระทบของมลพิษ [18]

ตัวอย่างผลกระทบที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เช่น

3.5.2.1 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางลบของสภาพแวดล้อมทางอากาศ การเพิ่มขึ้นของปัญหาหมอกควัน บดบังปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ส่องมายังพื้นดิน ทศวรรษภัยลดลง 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 วัสดุต่างๆทำให้เสื่อมสภาพ และอาจสีกร่อนได้ ดูไม่สวยงาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)

ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนนั้น ได้รับการพิจารณาว่าเป็นสาเหตุของการเกิดหมอกทางโฟโตเคมี หรือแก๊สโอโซนในระดับต่ำ (ground level ozone) ซึ่งเกิดจาก NO_x และ HC ที่มาจากไอเสียของรถยนต์เป็นส่วนใหญ่ มาทำปฏิกิริยากันในวันที่มีแสงแดดจ้า จนเกิดเป็นโอโซน O₃ ซึ่งมีก่อดตัวในบริเวณที่มีอากาศนิ่งเหนือเมืองใหญ่ๆที่มีการจราจรหนาแน่น โดยหมอกทางโฟโตเคมีจะทำให้มีปัญหาเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ และไปลดหน้าที่ของเม็ดเลือดแดงในการนำออกซิเจนไปเลี้ยงสมอง เป็นต้น

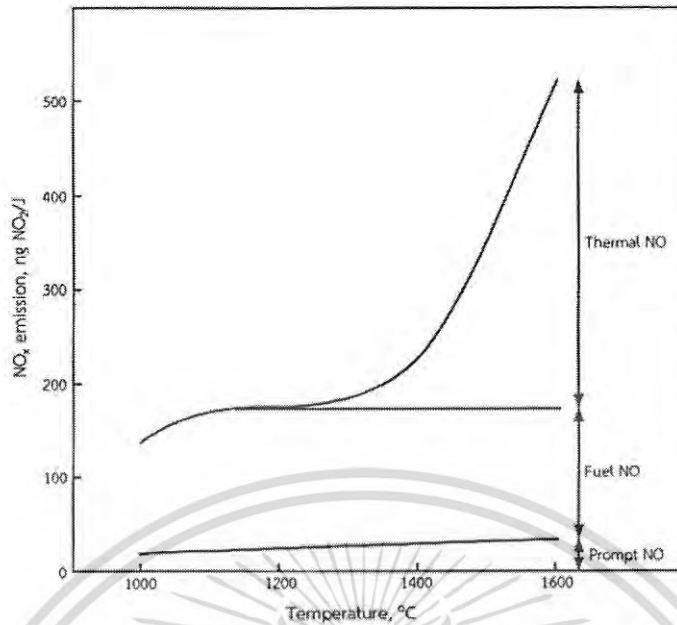
NO_x นอกจากจะเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโอโซนในระดับต่ำที่เป็นพิษแล้ว ยังเป็นตัวทำลายโอโซนที่เป็นประโยชน์ซึ่งอยู่ในระดับชั้นบรรยากาศ Stratosphere ของโลกอีกด้วย ดังสมการ



สังเกตเห็นได้ว่า NO เพียงโมเลกุลเดียวมีผลต่อการทำลาย O₃ อย่างต่อเนื่องโดยปฏิกิริยารีดอกซ์ เพราะ NO₂ ที่เกิดจากสมการ 3.30 จะถูกรีดิวซ์มาเป็น NO ตามสมการ 3.31 เพื่อย้อนกลับไปทำลาย O₃ ให้เป็น O₂ ต่อไปตามสมการ 3.30 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

จากรูปที่ 3.3 แสดงค่าประมาณของการเกิด thermal NO_x, prompt NO_x และ fuel NO_x ที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ถ่านหินซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ จะพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1300 °C กลไกการเกิด thermal NO_x จะน้อยมากเมื่อเทียบกับอีกสองชนิด ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น thermal NO_x ก็จะเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากกลไกการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนทั้งสามชนิดมีจลน์เคมีที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีอัตราการเกิดที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะได้แยกพิจารณาการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนทั้งสามชนิดดังกล่าว



รูปที่ 3.3 ความเข้มข้นที่สมดุลของ NO_2 ที่มีส่วนประกอบของออกซิเจนในแก๊สที่แตกต่างกัน [18]

3.5.3.1 Thermal NO_x

Thermal NO_x หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Zeldovich NO_x มีสมการ

พื้นฐานดังนี้



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

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

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

สาเหตุที่ได้ชื่อว่า thermal NO_x เพราะว่า NO ที่เกิดจากสมการที่ 3.32 นั้นต้องใช้พลังงานกระตุ้นที่สูงมากเมื่อเทียบกับสมการที่ 3.31 ทั้งนี้เพราะต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของ N_2 ซึ่งเป็นแบบไตรพันธะ (triple bond) ขณะเดียวกันสมการที่ 3.32 จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้ต่อเมื่ออุณหภูมิสูงเท่านั้น ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นตัวควบคุมการเกิด NO ตามสมการที่ 3.32 ผ่านค่าคงตัวของอัตราการเกิดปฏิกิริยา k_1 ซึ่งแปรผกผันกับ $1/T$ ในการทำนายปริมาณการเกิด NO_x ในปฏิกิริยาการเผาไหม้ ไม่ควรใช้วิธีการทำสมดุลเคมีเหมือนการหาปริมาณ H_2O หรือ CO_2 เพราะจะเกิดความผิดพลาดอย่างมาก เนื่องจากสมดุลเคมีจะเกิดขึ้นได้นั้นต้องใช้เวลาที่ค่อนข้างนาน และนานกว่าเวลาที่อยู่ในเปลวไฟอุณหภูมิสูงเสียอีก จากสมการเคมีกลไกของ Zeldovich สามารถหาอัตราการเกิด NO_x ได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] \quad (3.35)$$

เนื่องจากว่าอัตราการเกิดอะตอมของไนโตรเจนขณะเกิดปฏิกิริยา ในสภาวะเสถียรคือ

$$\frac{d[N]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] \approx 0 \quad (3.36)$$

ดังนั้นได้อัตราการเกิด NO คือ

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[O][N_2] \quad (3.37)$$

จะเห็นได้ว่าการที่จะลดปริมาณ thermal NO_x ได้นั้นมีเพียงสองวิธีคือ ลด $[N_2]$ และ $[O]$ หรือลด k_1 ซึ่งมีความหมายคือต้องลดอุณหภูมิในการเผาไหม้นั่นเอง

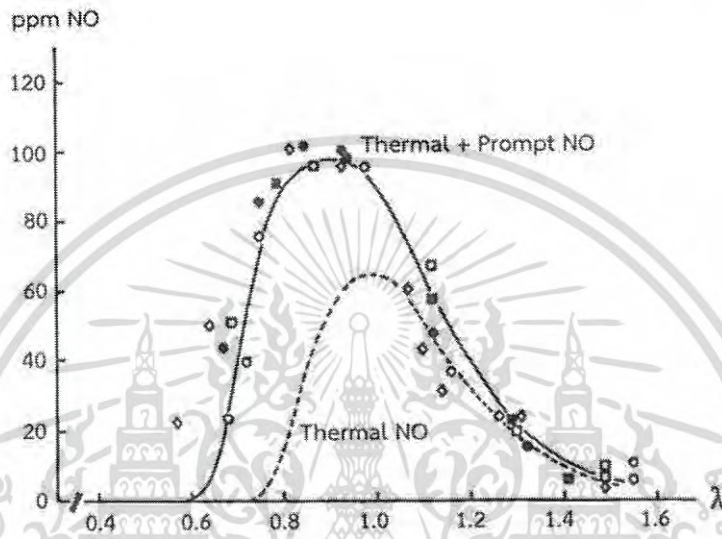
3.5.3.2 Prompt NO_x (Fenimore NO_x)

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



prompt NO_x มักเกิดในสภาวะการเผาไหม้แบบผสมก่อนเท่านั้น ทั้งนี้เพราะอนุมูลอิสระ CH จะเกิดจากอะซีทิลีน (C_2H_2) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารที่เกิดก่อนหน้า ดังนั้น prompt NO_x จะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า thermal NO_x เพราะปฏิกิริยาต้องใช้พลังงานกระตุ้นที่น้อยกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำประมาณ 1000 K เท่านั้น รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณ และผลการทดลองหาค่า thermal NO_x และ prompt NO_x ของเปลวไฟมีเทนกับอากาศในเตาเผาแบบกวน (well-stirred reactor) ผลการคำนวณกระทำในสองลักษณะคือ คำนวณโดยกลไกทางความร้อน (Zeldovich mechanism) อย่างเดียว และคำนวณโดยกลไกผสมระหว่าง Zeldovich + Fenimore จะเห็นได้ว่าส่วนต่างระหว่าง thermal-prompt NO_x กับ thermal NO_x ก็คือ prompt NO_x นั้นเอง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองนี้



รูปที่ 3.4 ผลการคำนวณ และผลการทดลองหาค่า thermal NO และ prompt NO ของเปลวไฟมีเทนกับอากาศในเตาเผาไหม้แบบกวน λ หมายถึงอัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศทางทฤษฎี [18]

3.5.3.3 Fuel NO_x [18]

สำหรับเชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบได้แก่ เชื้อเพลิงชีวมวล และ ถ่านหิน 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 ดังนั้นสัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่หลุดออกมาจากเปลวไฟกลายเป็น NO นั้นจะเป็นอิสระต่ออัตราส่วนระหว่าง NO/O_2 ในเปลวไฟ นั่นคือหากรักษาให้สัดส่วนของออกซิเจนในแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงในเปลวไฟให้ต่ำไว้ ก็จะทำให้ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเปลี่ยนไปเป็น NO น้อยลงตามไปด้วย

สัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนเป็น NO_x ในแก๊สไอเสียนั้น ประมาณได้ว่ามีสัดส่วนประมาณร้อยละ 20 ถึง 50 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะของเตาเผา และอาจขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของไนโตรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงอีกด้วย จะเห็นได้ว่าแม้จะทำการวิเคราะห์และศึกษากลไกการเกิด NO แต่แต่ละประเภทแยกออกจากกัน แต่ทั้ง thermal NO_x , prompt NO_x และ Fuel NO_x ต่างก็เกิดขึ้นพร้อมๆ กันและมีกลไกการเกิดร่วมกัน



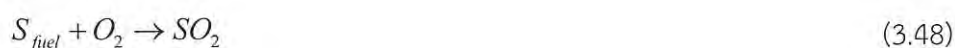
สาเหตุที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้เกิด CO คือการมีเวลาสั้นเกินไปในโซนการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากต้องระบายไอเสียออกทันที อุณหภูมิ และความดันเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ดังนั้น CO จะอยู่ในสภาวะสมดุลบางส่วนมากกว่าที่จะอยู่ในสภาวะสมดุลอย่างสมบูรณ์ ทำให้การเปลี่ยนแปลงจาก CO เป็น CO₂ เกิดขึ้นไม่เต็มที่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



ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์สามารถควบคุมได้จากอัตราส่วนผสม หรือปริมาณออกซิเจนในปฏิกิริยาการเผาไหม้ แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์เป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และเป็นพิษต่อร่างกายอย่างมาก เมื่อร่างกายได้รับแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์จะทำให้ร่างกาย สมอง และกล้ามเนื้อได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ ปฏิกิริยาการตอบสนองของร่างกายจะช้าลง และขาดการตัดสินใจที่ดี เมื่อได้รับแก๊สชนิดนี้เข้าไปในปริมาณมากๆ สามารถทำให้เสียชีวิตได้

3.5.5 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x)

เป็นที่ทราบกันว่าออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) นอกจากจะมีผลต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังสามารถทำลายอุปกรณ์การเผาไหม้ และอุปกรณ์อื่นๆ ให้ผู้กร่อนเสียหายได้ 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 ในขณะที่ถ่านหินเกือบทุกชนิดอาจมีอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 0.5 ถึง ร้อยละ 3 ในขณะที่น้ำมันโดยทั่วไปจะมีซัลเฟอร์มากกว่าไม้แต่จะน้อยกว่าที่มีในถ่านหิน ถ้าทำการเผาไหม้ ไม้ ซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในไม้เกือบทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ดังสมการต่อไปนี้



ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วกลายเป็นกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดฝนกรด

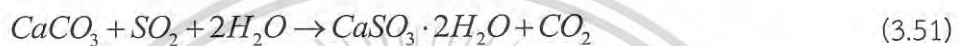


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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 จะถูกกำจัดดังสมการต่อไปนี้

กรณีใช้โคลนเหลวของหินปูน (aqueous slurry of limestone)



กรณีใช้โคลนเหลวของหินขาว (aqueous slurry of lime)



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

3.5.6 ฝุ่นและเขม่า (Particulates and Soot)

ฝุ่นและเขม่าสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในเปลวไฟชนิดแพร่ และในเปลวไฟชนิดผสมก่อน ฝุ่นเกิดจากสารอินทรีย์ที่ปนอยู่ในเชื้อเพลิง เช่น ในรูปของสารละลายในเชื้อเพลิงเหลว หรือในรูปของเถ้าในเชื้อเพลิงแข็ง สารอินทรีย์จะถูกเผาไหม้แล้วกลายเป็นฝุ่นออกมาพร้อมกับแก๊สไอเสีย ฝุ่นบางชนิดมีขนาดใหญ่ และน้ำหนักมากจึงแยกตัวออกจากแก๊สไอเสียได้ง่าย เช่น เถ้าก้นเตา (bottom ash) ของระบบการเผาไหม้ถ่านหินบดละเอียด เป็นต้น ฝุ่นบางชนิด เช่น ที่มีขนาดเล็กกว่า $10 \mu m$ จะลอยปนอยู่ในแก๊สไอเสียอย่างถาวรเรียกว่าเถ้าลอย (fly ash) จึงต้องใช้วิธีการพิเศษเพื่อแยกออก เช่น ถุงกรอง (bag filter), เครื่องแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) และไซโคลน เป็นต้น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2. การเติบโตของผิวรอบนอก (surface growth) จะเกิดการขยายใหญ่ขึ้นด้วยการเกาะตัวของสารชั้นกลางต่างๆบนผิว ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นอะเซทิลีน (C_2H_2) ที่มีมากถึง 85% ของมวลรวม

3. การเกาะรวมตัวกัน (coagulation) อนุภาคเขม่าแต่ละก้อน เคลื่อนที่ชนกัน และเกาะรวมกันเป็นกลุ่ม เกิดเป็นอนุภาคจุลสารรูปร่างลักษณะคล้ายห่วงโซ่

4. การออกซิไดซ์เขม่า (soot oxidation) ภายหลังจากที่เขม่าเกิดขึ้นแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งมักเกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของ reaction zone ที่อยู่ตรงปลายของเปลวไฟ (flame tip) เขม่าจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นกระแสผ่านเข้าไปในบริเวณการเผาไหม้ที่ปลายของเปลวไฟนั้น ถ้าเขม่าถูกเผาไหม้จนหมดจะเรียกเปลวไฟนั้นว่าเปลวไฟไร้เขม่า ในขณะที่ถ้าเขม่าเผาไหม้ไม่หมดจะเกิดเปลวไฟมีเขม่า

3.6 สมการพื้นฐานของแบบจำลอง [5,20]

สำหรับในหัวข้อนี้จะอธิบายโดยสังเขปเกี่ยวกับสมการพื้นฐานของแบบจำลองเชิงตัวเลขของสมการทางคณิตศาสตร์ในพิกัดทรงกระบอกที่ใช้สำหรับการจำลองการเผาไหม้ โดยรายละเอียดที่เกี่ยวข้องสามารถศึกษาได้เพิ่มเติมในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตและหนังสือเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [3] โดยสมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

3.6.1 แบบจำลองของก๊าซในรูปพิกัดทรงกระบอก [5]

สมการที่ใช้ในการอธิบายการไหลของก๊าซสามารถเขียนในรูปพิกัดทรงกระบอกโดยพิจารณาห้องปฏิกิริยาเป็นแบบสมมาตรได้ตามสมการข้างล่างนี้

3.6.1.1 สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \bar{u}) = \bar{S}_m \quad (3.53)$$

\bar{S}_m คือ Source term ที่เกิดขึ้นโดยแสดงถึงการถ่ายเทจากอนุภาคสู่อากาศ

3.6.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมถูกอธิบายในลักษณะของพิกัดทรงกระบอก 3 มิติ

ดังนี้

ทิศทางตามแนวรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{v}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right) + \bar{S}_v + \bar{S}_{m,v} \quad (3.54)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad \bar{S}_v = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right) + \frac{\bar{\rho} \tilde{w}^2}{r} - 2 \mu_{eff} \frac{\tilde{v}}{r^2} \quad (3.55)$$

$\bar{S}_{m,v}$ คือ การถ่ายโอนโมเมนตัมที่เกิดในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็งทิศทางตามแนวรัศมี
ทิศทางตามแนวแกน

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{u} \tilde{u}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right) + \bar{S}_u + \bar{S}_{m,u} \quad (3.56)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad \bar{S}_u = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right) \quad (3.57)$$

$\bar{S}_{m,u}$ คือ การถ่ายโอนโมเมนตัมที่เกิดในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็งทิศทางตามแนวแกน
ทิศทางตามเส้นสัมผัสกับเส้นรอบวงกลม (ตั้งฉากกับระนาบ $r-z$)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{w}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{w}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} \right) + \bar{S}_w + \bar{S}_{m,w} \quad (3.58)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad \bar{S}_w = -\tilde{w} \left(\frac{\bar{\rho} \tilde{v}}{r} + \frac{\mu_{eff}}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mu_{eff}}{\partial r} \right) \quad (3.59)$$

$\bar{S}_{m,w}$ คือ การถ่ายโอนโมเมนตัมที่เกิดขึ้นในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็งในทิศทางสัมผัสกับ
เส้นรอบวงกลม

3.6.2 แบบจำลอง Standard และ RNG $k-\varepsilon$ Model [20]

พลังงานจลนศาสตร์ของความปั่นป่วนและอัตราการสลายตัวถูกแสดงไว้ในสมการ
ดังนี้ พิจารณาห้องปฏิบัติการเป็นแบบสมมาตรได้ตามสมการข้างล่างนี้
สำหรับสมการในแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ Model

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2 \mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (3.60)$$

และ

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2 \mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ

อัตราการเปลี่ยนแปลงของ "พลังงานจลน์ปั่นป่วน" หรือ "การสลายพลังงานจลน์ปั่นป่วน"	+	อัตราการถ่ายโอนของปริมาณดังกล่าวเนื่องจาก การพา	=	อัตราการถ่ายโอนเนื่องจากการแพร่ของ "พลังงานจลน์ปั่นป่วน" หรือ "การกระจายพลังงานจลน์ปั่นป่วน"	+	อัตราการก่อกำเนิดของปริมาณดังกล่าว	-	อัตราการสูญเสียของปริมาณดังกล่าว
--	---	---	---	--	---	------------------------------------	---	----------------------------------

ในสมการจะมีค่าคงที่อยู่ที่ทั้งสิ้น 5 ตัว ซึ่งสามารถปรับค่าเพื่อให้ใช้ได้กับลักษณะการไหลที่หลากหลาย อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาเปรียบเทียบผลกับลักษณะการไหลลักษณะต่างๆ อย่างเป็นกว้างขวาง ทำให้ได้ข้อสรุปของค่าที่แนะนำให้ใช้ได้ ดังนี้

$$C_{\mu} = 0.09; \quad \sigma_k = 1.00; \quad \sigma_{\varepsilon} = 1.30 \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad (3.62)$$

สำหรับสมการในแบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ Model

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\alpha_k \mu_{eff} \text{grad } k \right] + \tau_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (3.63)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\alpha_{\varepsilon} \mu_{eff} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \rho \varepsilon \quad (3.64)$$

เมื่อ

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} = 2\mu_t E_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

ที่ซึ่ง

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t; \quad \mu_t = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}$$

และ

$$C_{\mu} = 0.0845 \quad \alpha_k = \alpha_{\varepsilon} = 1.39 \quad C_{1\varepsilon} = 1.42 \quad C_{2\varepsilon} = 1.68 \quad (3.65)$$

โดยที่

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}; \quad \eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}; \quad \eta_0 = 4.377$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีเฉพาะค่า β เท่านั้นที่สามารถปรับแต่งได้ โดยค่าที่ให้ไว้นี้เป็นค่าที่ปรับแต่งสำหรับการไหลใกล้เคียง ส่วนค่าคงที่อื่นๆ นั้นได้ถูกคำนวณขึ้น อันเป็นผลมาจากกระบวนการของการจัดกลุ่มใหม่ (re-normalization group, RNG) ของเทอมต่างๆ ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมจาก Versteeg, H. K., and Malalasekera, W. [20]

3.6.3 การเคลื่อนย้ายของสเกลลาร์

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{\phi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{\phi}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{eff} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z} \right) + \bar{S}_{\phi} \quad (3.66)$$

$$D_{eff} = D_{\phi} + \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\phi,t}} \quad (3.67)$$

S_{ϕ} คือ Source Term ที่เกิดหรือสลายตัวเนื่องจากการทำปฏิกิริยา D_{eff} คือ Conduction Coefficient และ ϕ คือ อัตราส่วนมวล (Mass Fraction) ของปริมาณสเกลลาร์สำหรับแต่ละปัญหา สำหรับสมการอนุรักษ์พลังงาน ϕ จากสมการ (3.15) จะเปลี่ยนเป็น H (เอนทัลปี) โดยที่ S_h คือ Source Term ปฏิกิริยาความร้อนและการถ่ายโอนความร้อน / รังสีจากอนุภาค โดยสามารถหาได้ดังในสมการนี้

$$S_h = LHV_{vol} \cdot R_v \quad (3.68)$$

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

บทที่ 4

การคำนวณ การปรับปรุงหัวเผา และแบบจำลองการเผาไหม้

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงรายละเอียดการคำนวณในเบื้องต้นโดยอ้างอิงทฤษฎีการเผาไหม้ นอกเหนือจากหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นหัวข้อหลักของงานวิจัยแล้ว ทางทีมงานผู้วิจัยจะต้องทำการปรับปรุงระบบคเชื้อเพลิง ระบบการป้อนเชื้อเพลิง และระบบบำบัดไอเสีย สำหรับการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งรูปแบบของชุดทดสอบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.1



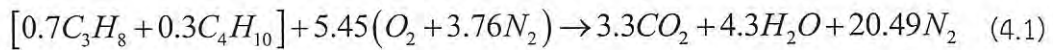
รูปที่ 4.1 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล (1) ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลแห้ง, (2) เครื่องบด, (3) ไซโลสำหรับเชื้อเพลิงผง, (4) สกรูป้อนเชื้อเพลิงผง, (5) หัวเผา, (6) ห้องเผาไหม้, (7) ระบบบำบัดไอเสีย, (8) พัดลมดูดอากาศ, (9) ปล่องควัน, (10) บ่อดักตะกอน และระบบหมุนเวียนน้ำ, (11) ระบบป้อนอากาศ

4.1 สมการการเผาไหม้

สำหรับในการออกแบบและการปรับปรุงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้นั้น ทางผู้วิจัยจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่จะนำมาใช้ในการเผาไหม้ เพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์สมการการเผาไหม้ และให้ได้มาซึ่งอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง สำหรับงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยในการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ [3] ให้สามารถใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลแบบมีการอุ่นอากาศ (air-preheat) ในช่วงขั้นตอนเริ่มต้นการจุดเตานั้นจะต้องใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงในการอุ่นห้องเผาไหม้และอุ่นอากาศทุติยภูมิ จนอุณหภูมิของห้องเผาไหม้สูงกว่าอุณหภูมิจุดติดไฟของเชื้อเพลิงชีวมวล และทำการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ต่อไป ดังนั้นเชื้อเพลิงที่จะถูกนำมาใช้ในการทดสอบในช่วงการอุ่นของหัวเผา คือ แก๊ส LPG และเชื้อเพลิงชีวมวลในการทดสอบการเผาไหม้ ซึ่งสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดเป็นดังนี้

4.1.1 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงแก๊ส LPG

แก๊ส LPG มีส่วนประกอบหลักคือ โพรเพน (C_3H_8) ประมาณ 70% และมีบิวเทน (C_4H_{10}) ประมาณ 30% โดยปริมาตร ซึ่งสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ได้เป็น



จากสมการทางเคมีจะได้ว่า

$$\text{ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้เท่ากับ } (0.70 \times 44) + (0.30 \times 58) = 48.20 \text{ kg}$$

$$\text{ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เท่ากับ } 5.45 \times [32 + (3.76 \times 28)] = 748.18 \text{ kg}$$

ดังนั้น

$$\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F)} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right) = \frac{748.18}{48.20} = 15.52 \frac{kg_{air}}{kg_{fuel}} \quad (4.2)$$

4.1.2 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง

เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบหัวเผาคือ เชื้อเพลิงผงไม้ยางพารา (para wood) ซึ่งตารางที่ 4.1 แสดงถึงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงผงไม้ยางพารา ซึ่งกรณีศึกษานี้จะทำการวิเคราะห์การเผาไหม้ที่สภาวะ stoichiometry โดยการวิเคราะห์สมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะคิดที่สภาพที่ได้รับ ดังนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงผงไม้ยางพารา

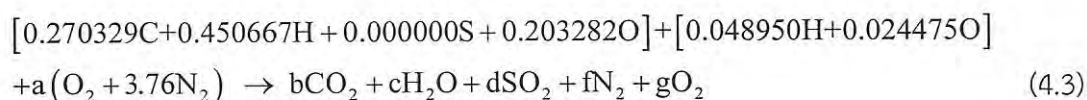
คุณสมบัติ	สภาพที่ได้รับ	หลักอ้างอิงแห่ง
การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis)		
ความชื้น,%	5.81	-
สารระเหย,%	76.68	81.41
ถ่านคงตัว,%	15.23	16.16
เถ้า,%	2.28	2.43
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)		
ไฮโดรเจน,%	6.31	6.01
คาร์บอน,%	45.42	48.22
ไนโตรเจน,%	0.45	0.48
ออกซิเจน,%	45.54	42.86
ซัลเฟอร์,%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

ที่มา : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

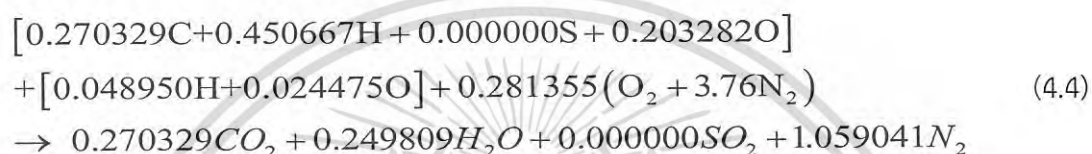
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.1 ณ สภาพที่ได้รับ (ความชื้น 5.81 %) ที่สภาวะ stoichiometry

เมื่อวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพที่ได้รับตามที่แสดงไว้ดังตารางที่ 4.1 จะสามารถเขียนสมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง ได้ดังนี้



ทำการสมดุลสมการจะได้สมการการเผาไหม้ที่สภาวะ stoichiometry ดังนี้



จากการวิเคราะห์สมการการเผาไหม้จะทำให้ได้อัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิง (AF ratio) ที่สภาวะ Stoichiometry ประมาณ $5.094 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ ซึ่งตัวเลขนี้จะนำไปสู่การคำนวณเพื่อปริมาณเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ของหัวเผาต่อไป

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณไอเสียที่ 100 % Stoichiometry

สารประกอบ	สัดส่วนโดยโมล	สัดส่วนโดยมวล
CO ₂	0.171	0.258
H ₂ O	0.158	0.098
SO ₂	-	-
N ₂	0.671	0.644
O ₂	-	-

ผลรวมของเลขดุลหน้าสารประกอบ 1.309

มวลโมเลกุลของไอเสีย = $29.16 \text{ kg}_{\text{ไอเสีย}}/\text{kmol}_{\text{ไอเสีย}}$

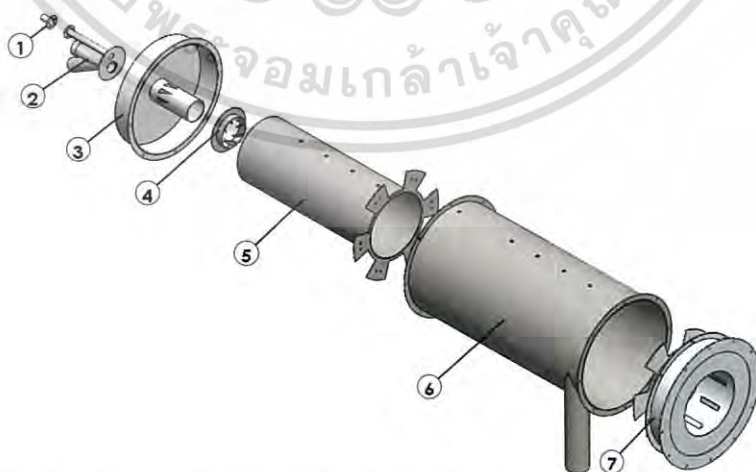
4.2 การปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง

4.2.1 แนวคิดในการปรับปรุง และพัฒนาหัวเผาก๊าซสังเคราะห์

ก่อนทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ให้สามารถนำมาใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงนั้น ได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ที่ผ่านมาในอดีต เช่น ที่มาเกี่ยวกับแนวคิดในการออกแบบหัวเผาสำหรับการเผาไหม้ก๊าซสังเคราะห์โดย จิตพงษ์ กนกนัยการ และคณะ [2] สำหรับในส่วนหนึ่งของโครงสร้างส่วนประกอบของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ที่ได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงโดย ปภัส ชูโชติศิริ และคณะ [3] ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่ใช้ในการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง ลักษณะการทำงานของหัวเผาและงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดขอบเขตสำหรับการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้น

สำหรับการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงนั้น เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบสมมติฐานเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงานของหัวเผา เช่น ลักษณะของการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงรูปทรงตัววาย (Y-shaped) ตำแหน่งการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้ ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง และช่องผสมอากาศทุติยภูมิ โดยใช้เงื่อนไขในการทดลองของ ปภัส ชูโชติศิริ และคณะ [3] เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการกำหนดค่าในแบบจำลองการเผาไหม้ ในย่านการทำงานทางความร้อนเท่ากับ 100 kW

จากการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ในเบื้องต้น ทำให้พบปัจจัยที่มีผลต่อการลุ่เข้าหาคำตอบของแบบจำลองการเผาไหม้ เช่น ลักษณะของการจ่ายอากาศและเชื้อเพลิงผงรูปทรงตัววาย (Y-shaped) มีส่วนทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของอนุภาคเชื้อเพลิงก่อนถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในตำแหน่งที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้ ตำแหน่งการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้ มีผลต่อการหลุดเล็ดลอดของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผงผ่านเข้าช่องผสมอากาศทุติยภูมิ และการเกิดจุดร้อนบริเวณผนังของห้องเผาไหม้ และเมื่อทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ จึงได้ทำการทดลองการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลผงก่อนทำการปรับปรุง



รูปที่ 4.2 โครงสร้างส่วนประกอบของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ (1) UV Sensor supporter, (2) Feeder pipe, (3) Front cover, (4) Swirl plate (5) Reactor, (6) Middle cover, (7) End cover

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การจำลองการเผาไหม้ก่อนทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์

สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง โดยในส่วนของขนาดและส่วนประกอบต่างๆ ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ได้ทำการออกแบบและผลิตชิ้นงานขึ้น เพื่อใช้สำหรับในการเผาไหม้แก๊สซีพีเออร์ [2] ซึ่งในปัจจุบันได้ทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง และได้ทำการทดลองการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง [3] ซึ่งลักษณะโครงสร้างส่วนประกอบภายในของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ก่อนทำการปรับปรุง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 สำหรับในส่วนของการรายละเอียดที่เกี่ยวกับขั้นตอนการดำเนินและเงื่อนไขในการทดลองการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากงานวิจัยของ [3]

ในการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงควบคู่กับการทดลองการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ก่อนทำการปรับปรุง เพื่อทำการตรวจสอบปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ของหัวเผา และศึกษาดูปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ โดยที่ขนาดของชิ้นส่วนประกอบต่างๆ ของหัวเผาได้ทำการศึกษาจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [2] สำหรับในส่วนของการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง เพื่อง่ายต่อการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้นั้น จึงได้ตัดส่วนประกอบที่เกี่ยวกับลักษณะของช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงรูปทรงตัววาย (Y-Shaped) ออก เนื่องจากไม่น่าจะส่งผลต่อการลู่เข้าหาคำตอบของแบบจำลองการเผาไหม้ ในตำแหน่งที่ไม่สมมาตรตามแนวแกน x ของห้องเผาไหม้ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นลักษณะที่ใช้สำหรับในการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงก่อนทำการปรับปรุง และเงื่อนไขในการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงก่อนทำการปรับปรุงได้ใช้ข้อมูลจากการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงในงานวิจัย [3] ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4

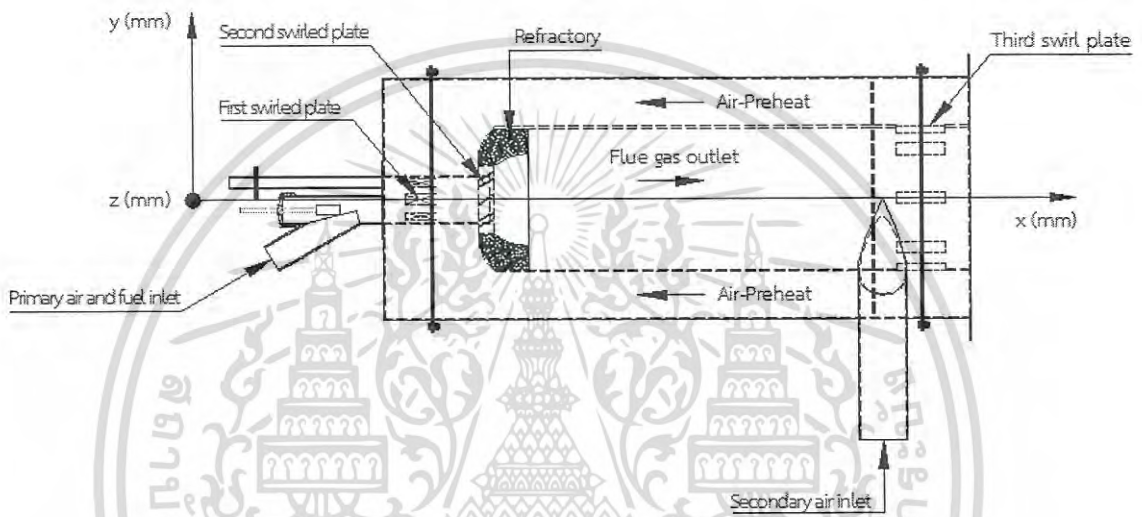
สำหรับผลของการจำลองการเผาไหม้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์ก่อนทำการปรับปรุงนั้น เป็นเพียงการตรวจสอบและประเมินปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ พบว่าตำแหน่งช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้ มีผลต่อเส้นทางของอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลผง และการจ่ายตัวของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้ ทำให้เกิดจุดร้อนบริเวณผนังของห้องเผาไหม้ และช่องผสมอากาศทุติยภูมิอันดับที่หนึ่ง (first swirled plate) มีผลต่อการลู่เข้าสู่คำตอบของแบบจำลองการเผาไหม้ จึงได้ตั้งข้อสันนิษฐานว่าในช่วงที่เริ่มต้นการปล่อยอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลผงและการกำหนดจุดเริ่มติดไฟในตำแหน่งที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้ เมื่ออนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลผงจะเคลื่อนที่ด้วยกระแสอากาศปฐมภูมิเข้าผสมกับอากาศทุติยภูมิแล้วเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ มีอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลผงบางส่วนที่มีขนาดใหญ่เกิดการหลุดลอดผ่านช่องผสมอากาศทุติยภูมิลำดับที่หนึ่งเข้าไปในบริเวณของการอุ่นอากาศจึงทำให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิที่สูง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ขึ้น จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้แบบจำลองไม่ลู่เข้าหาคำตอบ

ในการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ก่อนทำการปรับปรุง เพื่อใช้ในการตรวจสอบและประเมินปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ จึงทำให้สามารถประเมินปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้และการทดลองเผาไหม้ของหัวเผา

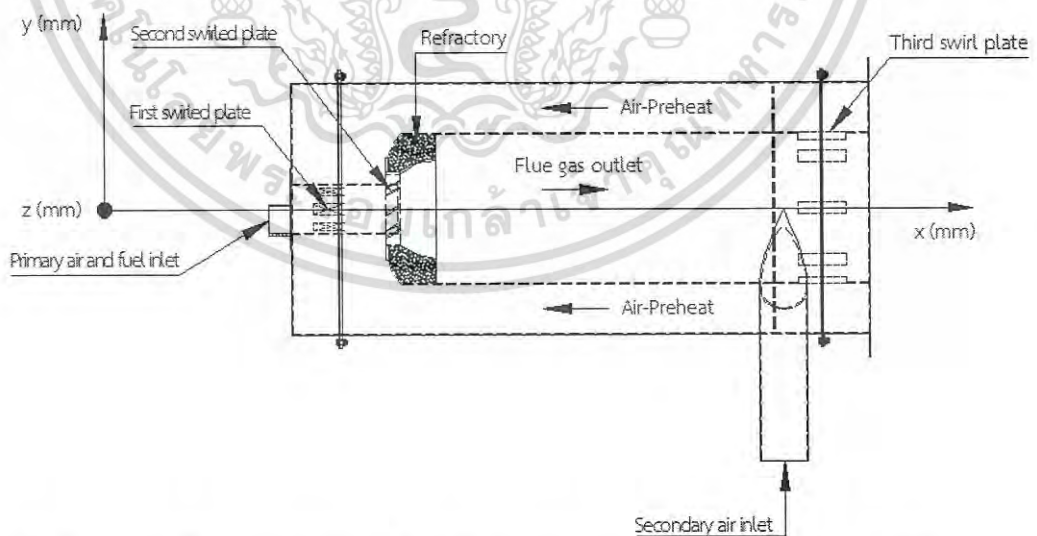
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเพื่อตรวจสอบผลจากการประเมินในการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ของหัวเผา ก๊าซสังเคราะห์ จึงต้องทำการทดลองการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ก่อนทำการปรับปรุง เพื่อทำการตรวจสอบเงื่อนไขในการทดลอง เนื่องจากในปัจจุบันได้ทำการปรับปรุงระบบการบดเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงให้เพียงพอต่อความต้องการสำหรับการใช้ในการเผาไหม้ โดยที่ระบบการบดเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจะถูกบดผ่านตะแกรงขนาด 5 mm และ 1 mm ทำให้ขนาดของอนุภาคของเชื้อเพลิงผงมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นกว่าที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้ ทำให้มีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งขนาดของอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลผงจะเป็นตัวแปรสำคัญในการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะโครงสร้างของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ก่อนทำการปรับปรุง



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะภายในของหัวเผาในการสร้างแบบจำลองก่อนทำการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขการจำลองสำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงก่อนทำการปรับปรุง [3]

Primary pipe:	Air flow rate (m ³ /s)	1.34 × 10 ⁻²
	Swirl number	-
	อุณหภูมิ (K)	313
	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/s)	5.715 × 10 ⁻³
Secondary pipe:	Air flow rate (m ³ /s)	3.13 × 10 ⁻²
	Swirl number	-
	อุณหภูมิ (K)	313
Pressure outlet:	Pressure (Pa)	-1500
	Gravity (m/s)	-9.81
	อุณหภูมิผนังเตา (K)	1000
อากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (%)		30

ตารางที่ 4.4 ขนาดโดยเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงขนาดผ่านตะแกรง 0.5 mm [4]

Particle Size Distribution (μm)	(% โดยน้ำหนัก)
500	2.6
362.5	16.8
240	25.5
165	12.6
112.5	18.1
37.5	24.4

4.2.3 การทดลองการเผาไหม้ก่อนทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์

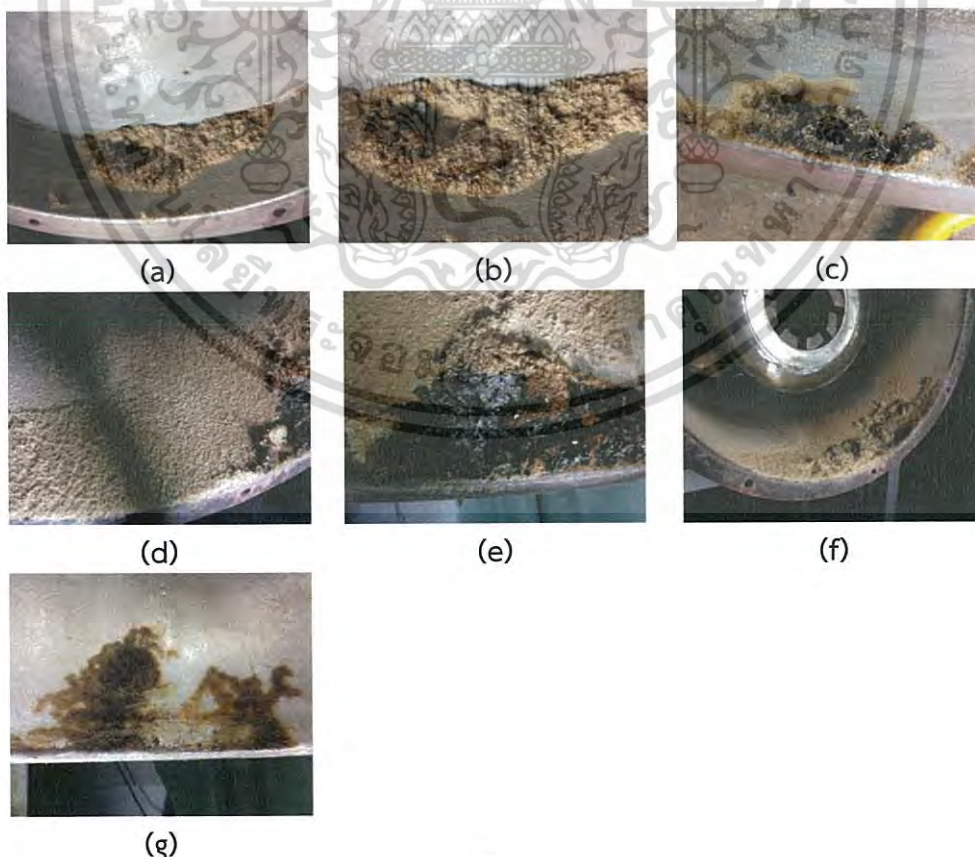
ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงการทดลองการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผงก่อนทำการปรับปรุงนั้น เพื่อต้องการตรวจสอบปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ของหัวเผาที่ได้จากการประเมินเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ โดยขั้นตอนการดำเนินงานและเงื่อนไขในการทดลองสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากงานวิจัยในอดีต [3] ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ในการทดลองการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง ซึ่งในปัจจุบันได้ทำการปรับปรุงระบบการบดเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด โดยเครื่องบดได้ใช้ตะแกรงขนาด 0.5 mm และ 1 mm ในการบดเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดร่วมกัน ซึ่งทำให้สัดส่วนโดยเฉลี่ยของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผงนั้นค่อนข้างมีขนาดที่หยาบ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และเมื่อนำเชื้อเพลิงชีวมวลผงมาทำการทดลองการเผาไหม้ พบว่าขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีขนาดหยาบส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์, สัดส่วนของอากาศปฐมภูมิที่ใช้ในการลำเลียงเชื้อเพลิงผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในตำแหน่งการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้ ส่งผลต่อการฟุ้งกระจายของกลุ่มอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผงและเข้าผสมกับอากาศทุติยภูมิที่ได้รับการอุ่นอากาศจากผนังของห้องเผาไหม้, และการหลุดเล็ดลอดของเชื้อเพลิงชีวมวลผงผ่านเข้าช่องผสมอากาศทุติยภูมิลำดับที่หนึ่ง สำหรับในงานวิจัยนี้ตำแหน่งของช่องผสมอากาศทุติยภูมิ เรียกว่า

First swirled plate ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งเมื่อมีอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่หลุดเล็ดลอดผ่านเข้าสู่ภายในบริเวณของการอุ่นอากาศทุติยภูมิ เกิดการกองของเชื้อเพลิงชีวมวลผง และมีเชื้อเพลิงชีวมวลผงบางส่วนเกิดการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (a) – (g) ในช่วงที่เริ่มการเปลี่ยนเงื่อนไขของสัดส่วนอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ พบปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การไหลย้อนกลับของเปลวไฟ (fire back) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างหัวเผากับเตาเผาไหม้ ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เป็นปัจจัยสำคัญ สำหรับการทดลองการเผาไหม้ให้มีความปลอดภัย

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลก่อนทำการปรับปรุง [3]

ตัวแปรควบคุม	100 kW		
Biomass Fuel, kg/s (Hz)	0.0063 (0.7)		
Excess air, (%)	30		
Operate ID Fan(Hz)	10		
Primary Air, kg/s (% ratio)	0.0151 (30)	0.0202 (40)	0.0252 (50)
Secondary Air, kg/s (% ratio)	0.0353 (70)	0.0302 (60)	0.0252 (50)



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการหลุดเล็ดลอดของเชื้อเพลิงชีวมวลผงบริเวณของการอุ่นอากาศทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นประโยชน์ในการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการทดลองเผาไหม้หลังทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ โดยการเพิ่มเงื่อนไขงานการทำงานของพัดลมดูดไอเสียที่ 25 Hz เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น และงานการทำงานของพัดลมดูดไอเสียที่เหมาะสมกับการทดลองการเผาไหม้

4.2.4 สรุปผลการจำลอง และทดลองการเผาไหม้ก่อนทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์

จากปัจจัยต่างๆ ที่พบจากการสร้างแบบจำลองและทดลองการเผาไหม้ก่อนทำการปรับปรุง พบว่าการที่มีเชื้อเพลิงชีวมวลผงหลุดเล็ดลอดผ่านเข้าสู่ช่องผสมอากาศหุติยภูมิ ทำให้เกิดเป็นปัจจัยความเสี่ยงที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ขึ้นภายในบริเวณการอุ่นอากาศหุติยภูมิของหัวเผา และตำแหน่งการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงผงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้มีผลต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผง เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดบดผ่านตะแกรง 0.5 mm และ 1 mm ทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลผงมีขนาดที่หยาบขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงได้กำหนดขอบเขตของเงื่อนไขในการทดลอง และสมมุติฐานในการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผงดังต่อไปนี้

(1) ทำการปิดช่องผสมของการอุ่นอากาศหุติยภูมิเพื่อไม่ให้อากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลผงหลุดเล็ดลอดเข้าไปในบริเวณการอุ่นอากาศหุติยภูมิภายในหัวเผาก๊าซสังเคราะห์

(2) สำหรับในตำแหน่งของการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้ จากงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวกับการวัดอุทกวิทยาการไหลจะช่วยให้อนุภาคของเชื้อเพลิงเกิดการกระจายตัว และสร้างกระแสการไหลหมุนวนทำให้เปลวไฟเกิดเสถียรภาพ แต่สิ่งที่มีผลต่อการไหลหมุนวนภายในเส้นทางเดินของวัตถุขวางไหลขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของวัตถุขวางการไหล ตามหนังสือ Combustion Aerodynamics ของ J.M. Beer [21] ได้กล่าวไว้ว่า อัตราส่วนขวางกั้น (blockage ratios) ที่เท่ากัน (b.r. = 0.25) ลักษณะของวัตถุขวางไหลรูปร่างแบบจานเกิดกระแสการไหลหมุนวนที่กว้างและยาวกว่า รูปร่างกรวย 45° และรูปร่างกระบอก ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และวัตถุขวางการไหลรูปร่างแบบจานจะสร้างการไหลย้อนกลับ (reverse flow) สูงสุดส่งผลกระทบต่อการนำแก๊สร้อนมาผสมคลุกเคล้ากับส่วนผสมใหม่

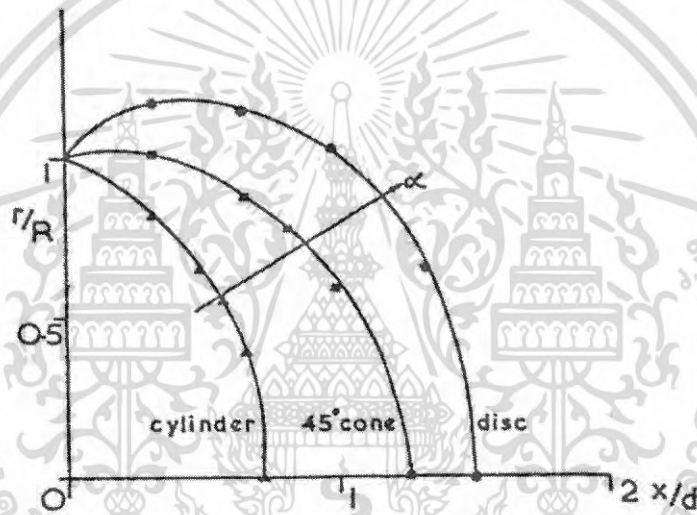
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกพิจารณาเพียงลักษณะของรูปร่างในการติดตั้งวัตถุขวางการไหล สำหรับในการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจากได้ตั้งข้อสันนิษฐานว่าลักษณะของวัตถุขวางการไหลรูปร่างแบบจานกับรูปร่างกระบอก ในลักษณะตำแหน่งของช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้ น่าจะขวางกั้นเส้นทางเดินของอนุภาคเชื้อเพลิงผง เมื่ออนุภาคของเชื้อเพลิงเข้าปะทะกับวัตถุขวางการไหล โดยที่วัตถุขวางการไหลทำมุม 180° สำหรับรูปร่างแบบจาน, 0° สำหรับรูปร่างกระบอก และ α° สำหรับรูปร่างกรวย ซึ่งอัตราส่วนขวางกั้น มุม และลักษณะของวัตถุขวางการไหลรูปร่างอื่นๆ นั้นยังไม่ได้นำมาใช้ในการพิจารณาในงานวิจัยนี้ แต่ในอนาคตอาจทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยดังกล่าว สำหรับในการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ จากบทความของ Okamoto et al [11] ได้กล่าวถึงลักษณะรูปแบบของวัตถุขวางการไหลรูปร่างกรวยที่ทำการติดตั้งอยู่ภายในของหัวเผาเพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพของการเผาไหม้

(3) สำหรับในเงื่อนไขในการทดลองเพื่อป้องกันความเสียหายของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ และลดอุณหภูมิของการอุ่นอากาศหุติยภูมิ โดยได้เพิ่มปริมาณสัดส่วนของอากาศส่วนเกินที่ใช้เป็น 50% ในการทดลองการเผาไหม้หลังจากทำการปรับปรุง และใช้เป็นเงื่อนไขสำหรับสัดส่วนของอากาศ

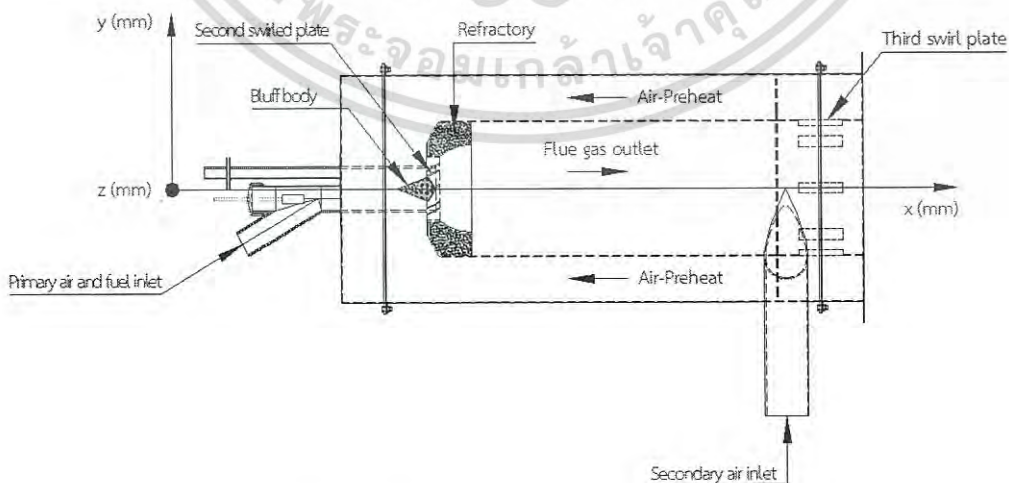
เอกสารปฐมภูมิ อากาศหุติยภูมิและตติยภูมิในการจำลองการเผาไหม้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) สำหรับในการทดลองได้เพิ่มเงื่อนไขสำหรับย่านการทำงานของพัดดูดไอเสียที่ 25 Hz ดังแสดงในตารางที่ 5.2 เพื่อป้องกันการเกิดปรากฏการณ์เปลวไฟไหลย้อน

(5) สำหรับในการปรับปรุงแบบจำลองการเผาไหม้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลผงหลังทำการปรับปรุง ลักษณะของช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลผงให้เป็นแบบรูปทรงตัววายตามลักษณะของชิ้นงานที่ได้ทำการผลิตขึ้น ปิดช่องผสมอากาศทุติยภูมิและติดตั้งวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยที่ขนาดและมุมของวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยที่นำมาใช้ในการศึกษากรณีที่ติดตั้งวัตถุขวางการไหลมีค่าของ อัตราส่วนขวางกันเท่ากับ ($b.r. = 0.33$) ซึ่งได้กำหนดเป็นลักษณะเริ่มต้นสำหรับในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้หลังจากทำการปรับปรุง และเปรียบเทียบกับผลการทดลองการเผาไหม้ที่ย่านการทำงานทางความร้อนขนาด 100 kW โดยผลที่ได้จากการปรับปรุงแบบจำลองการเผาไหม้จะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

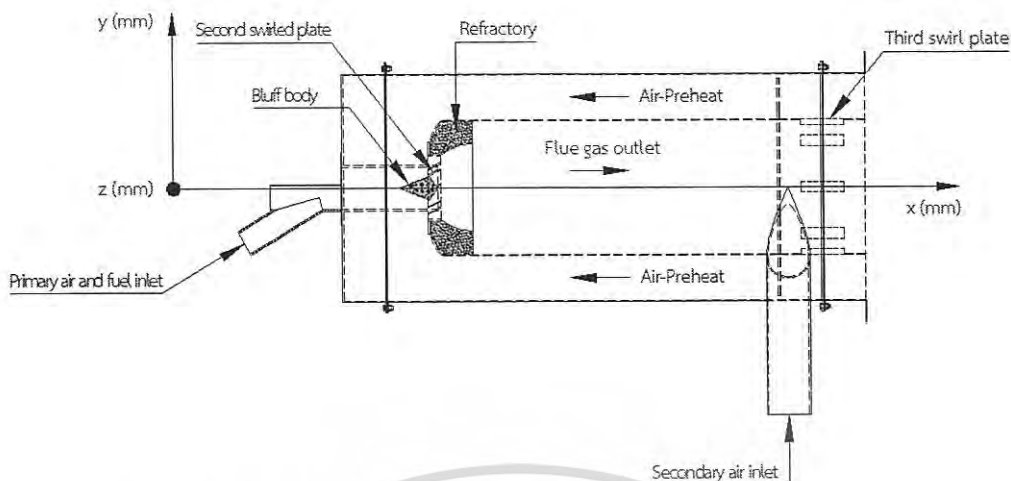


รูปที่ 4.6 การเลือกลักษณะของวัตถุขวางการไหล จากการเกิดกระแสการไหลหมุนวนที่ ($b.r. = 0.25$)

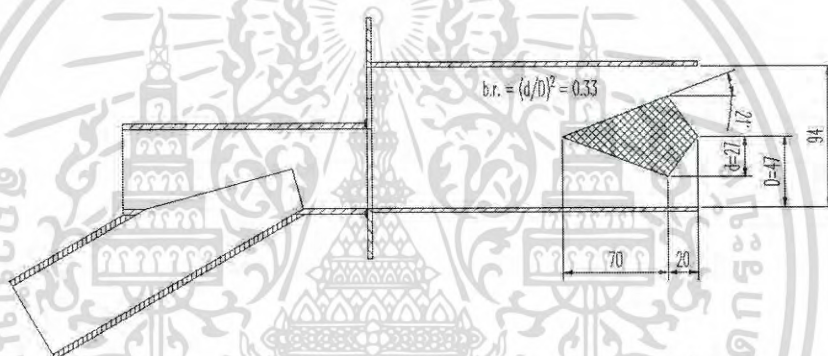


รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะโครงสร้างของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์หลังการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับสร้างแบบจำลองหลังทำการปรับปรุง



รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของวัตถุวางกรวยไหลรูปทรงกรวยสำหรับการติดตั้งที่ (b.r. = 0.33)

4.2.5 เงื่อนไขในการจำลองการเผาไหม้หลังทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์

สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่ถูกนำมาใช้ในการจำลองการเผาไหม้ คือเชื้อเพลิงชีวมวลผงจากไม้ยางพารา คุณสมบัติของไม้ยางพาราแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์เชื้อเพลิงโดย Thailand Institute of Scientific and Technological Research สำหรับการกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลองการเผาไหม้ ได้แก่ การไหลกำหนดให้เป็นแบบสมมาตรรอบแนวแกน 3 มิติ (3D axis symmetric) ที่สภาวะคงตัว (steady state) แบบจำลองการเผาไหม้ Species Transport, แบบจำลองการปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และแบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ โดยมีการเพิ่มค่าคงที่ของอัตราการแพร่ออกซิเจนภายในพื้นผิวอนุภาคคาร์ (C_1) และอัตราจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของคาร์ (C_2) เพิ่มขึ้น 2.5 เท่าจากค่าเริ่มต้น [3] และใช้แบบจำลองการติดตามแบบสุ่ม (random walk model) ในขณะที่ขนาดของอนุภาค (particle size distribution) เป็นขนาดโดยเฉลี่ยที่ได้ทำการทดสอบจากทีมงานผู้วิจัยร่วม สิริธิดา สุขทั่ว ดังแสดงในตารางที่ 4.6 [22] และ Kinetic Parameters ได้ถูกกำหนดให้ใช้ลักษณะเดียวกับกรณีเชื้อเพลิงถ่านหินที่ได้ทำการวิจัยก่อนหน้านี้ ตามตารางที่ 4.8 [5] ตามลำดับ โดยเงื่อนไขการจำลองหัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผงถูกสรุปไว้ในตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลอง Numerical scheme แบบต้นทางการไหลอันดับที่หนึ่ง (First order upwind scheme) สำหรับในการทำหายของการลู่เข้าหาคำตอบในขั้นแรกและปรับใช้เป็นแบบต้นทางการไหลอันดับที่สอง (second order upwind scheme) สำหรับในการลู่เข้าหาคำตอบสุดท้าย เนื่องจากแบบจำลองการเผาไหม้ร่วมกับบนพื้นฐานของ RANS หรือ (Reynold Averaged Navier Stokes) นั้นมีปัญหาเรื่องการลู่เข้าหาคำตอบ ซึ่งคุณสมบัติสำหรับตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ใน ANSYS Tutorial: Coal combustion with eddy break up (EBU) model [23] และในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์การลู่เข้าหาคำตอบทุกสมการจะต้องมีส่วนเหลือ (Residual) เท่ากับหรือน้อยกว่า 1×10^{-4}

ตารางที่ 4.6 ขนาดโดยเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงบดผ่านตะแกรง 0.5 mm และ 1 mm [22]

Particle Size Distribution (μm)	(% โดยน้ำหนัก)
500	35.8
390	9.4
327.5	9.8
240	18.4
165	9.4
112.5	8.1
37.5	9.2

ตารางที่ 4.7 เงื่อนไขการจำลองการเผาไหม้หลังทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซหลังเครื่องขนาด 100 kW

Primary pipe:	Air flow rate (m^3/s)	1.47×10^{-2}
	Swirl number	-
	อุณหภูมิ (K)	313
	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/s)	5.715×10^{-3}
Secondary pipe:	Air flow rate (m^3/s)	3.44×10^{-2}
	Swirl number	-
	อุณหภูมิ (K)	313
Pressure outlet:	Pressure (Pa)	-1500
	Gravity (m/s)	-9.81
	อุณหภูมิ (K)	1000
อากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (%)		50

ตารางที่ 4.8 Kinetic Parameters สำหรับแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหิน [5]

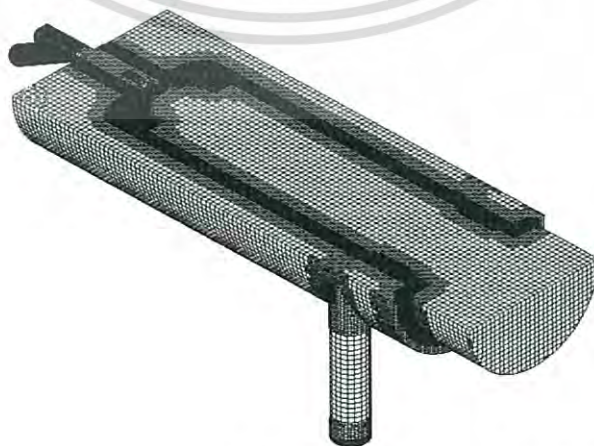
Kinetic parameters:	
Devolatilization, E_{dvol} (J/kg-mol)	7.40×10^7
Pre-Exponential Factor	3.82×10^5
Char reaction, E (J/kg-mol)	7.90×10^7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 แบบการจำลองเชิงคณิตศาสตร์

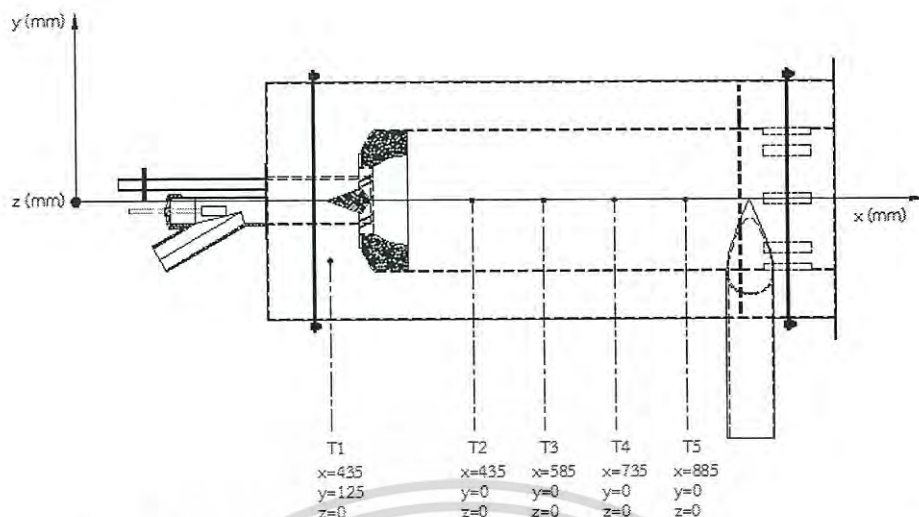
สำหรับกระบวนการของการสร้าง Mesh มีความสำคัญต่อการคำนวณของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งมีผลต่อความถูกต้องและระยะเวลาของการคำนวณ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการตรวจสอบจำนวน mesh ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการจำลอง โดยใช้โปรแกรม Ansys Meshing เลือกรูปแบบการสร้าง mesh แบบ cut-cell mesh ซึ่งมีความรวดเร็วในการสร้างและลักษณะของ mesh ส่วนใหญ่เป็นแบบ hexahedral ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยทางผู้วิจัยได้เลือกการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ที่จะทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ในครั้งที่สองมาใช้เป็นแบบจำลองในการพิจารณาความเหมาะสมของ mesh ซึ่งลักษณะของ mesh ที่ใช้ในแบบจำลองจะประกอบด้วย mesh ที่สำคัญถึงสองส่วน คือ mesh ในส่วนของไหลและของแข็งซึ่งจะถ่ายเทความร้อนรวมกัน (conjugate heat transfer) กล่าวคือจะมีการนำความร้อนผ่านของแข็งควบคู่ไปด้วยการถ่ายเทความร้อนในของไหล โดยใช้แบบจำลองการเผาไหม้ Species Transport และใช้แบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$

สำหรับเบื้องต้นนั้นได้ทำการตรวจสอบอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ตามแนวแกน x โดย mesh ที่ใช้ในการตรวจสอบมีจำนวนประมาณ 1,649,250 elements, 1,854,780 elements และ 2,571,230 elements สำหรับตำแหน่งในการตรวจสอบอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ตามแนวแกน x ดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยจากการพิสูจน์เบื้องต้นพบว่าจำนวนของ mesh ทั้งสามในตำแหน่งที่เริ่มต้น (0.435 mm) และในตำแหน่งสุดท้าย (0.885 mm) มีค่าอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มการกระจายของอุณหภูมิไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อทำการพิจารณาในตำแหน่งที่ (0.585 mm) และ (0.735 mm) จำนวน mesh ขนาด 1,854,780 elements และ 2,571,230 elements มีค่าของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งจำนวนขนาดของ mesh ที่ใช้ในการจำลองมีจำนวนขนาดของ mesh ที่สูงเนื่องจากแบบจำลองนี้ได้ประกอบด้วย mesh ทั้งของไหลและของแข็งในการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ mesh ที่มีความละเอียด 2,571,230 ในการจำลองการเผาไหม้ เนื่องจากหากปรับจำนวนของ mesh เพิ่มขึ้นจะต้องใช้ระยะเวลาในการคำนวณและทรัพยากรทางด้านคอมพิวเตอร์ไม่เอื้ออำนวยต่อการวิเคราะห์ผลการจำลองการเผาไหม้ และหลังจากการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ในครั้งที่สองทางผู้วิจัยจากนำผลที่ได้จากการทดลองการเผาไหม้มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองการเผาไหม้เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์เชื้อเพลิงผงที่มีการอุ่นอากาศ

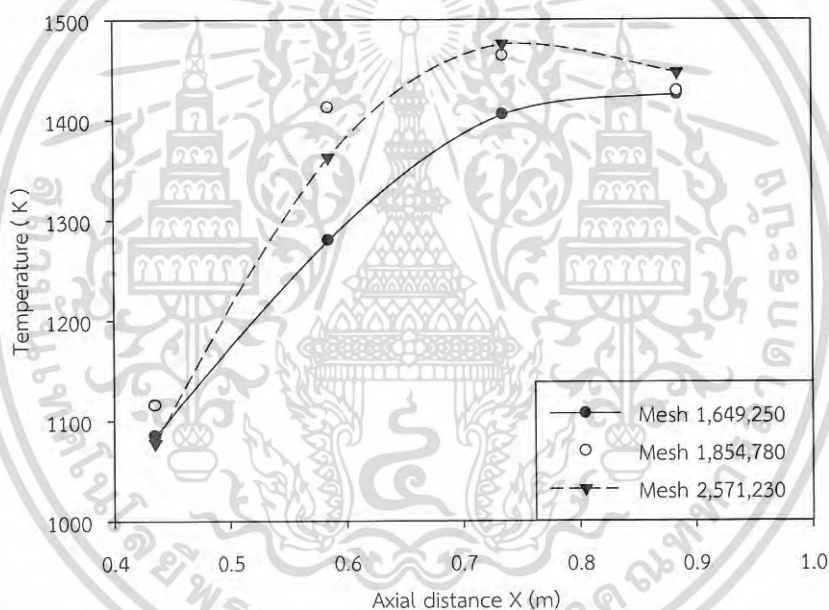


รูปที่ 4.10 ลักษณะของ Mesh ที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้หลังทำการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นาเบเซประเษชนดานการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ตามแนวแกน x



รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ตามแนวแกน x

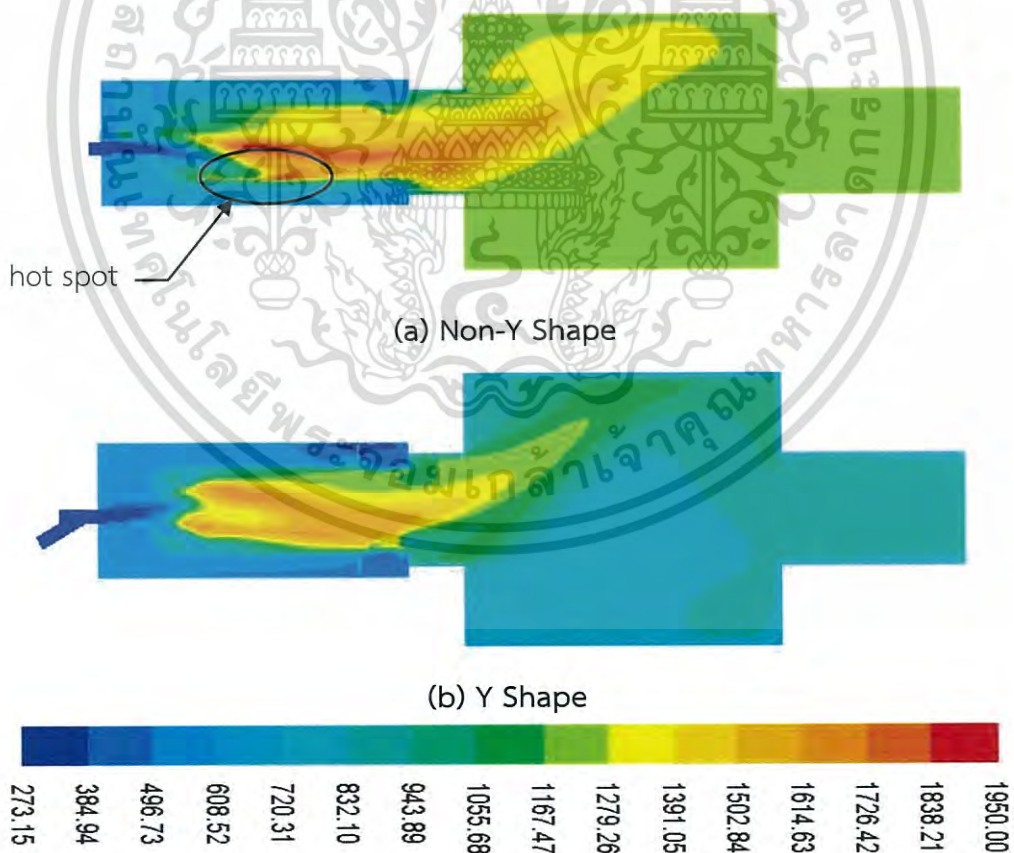
4.3 ผลการจำลองการเผาไหม้

4.3.1 ผลการจำลองหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ก่อนทำการปรับปรุง

สำหรับในจำลองการเผาไหม้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับเชื้อเพลิงเชื่อมวลผง ในขั้นแรกได้ใช้แบบจำลองการเผาไหม้ Species Transport และแบบจำลองการปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ เนื่องจากไม่สามารถใช้แบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ สำหรับในการวิเคราะห์ในกรณีที่ได้ตัดช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิกับเชื้อเพลิงผงรูปทรงตัววายออก (Non-Y Shaped) โดยมีตำแหน่งทางเข้าของอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้ เมื่อปล่อยอนุภาคของเชื้อเพลิงผงตามลักษณะโครงสร้างของแบบจำลองก่อนทำการปรับปรุง พบว่าในกรณีของแบบจำลองที่ได้ตัดช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิรูปทรงตัววายออกทำให้บริเวณจุดที่เริ่มติดไฟ (ignition) มีความเร็วเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สูงโดยได้เหนี่ยวนำเปลวไฟ เข้าสู่ห้องเผาไหม้และเมื่อความเร็วในห้องเผาไหม้ลดลงทำให้บริเวณผนังกลางห้องเผาไหม้เกิดจุดร้อน (hot spot) ดังที่แสดงในรูปที่ 4.13 (a) และอาจทำให้เปลวไฟหลุดออกจากห้องเผาไหม้ทำให้เกิดปรากฏการเป่าดับได้ ดังนั้นจากการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ในกรณีดังกล่าวซึ่งมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้และทำให้ผลจากแบบจำลองเกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ ทำให้ต้องทำการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ในกรณีสำหรับช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงผงให้มีลักษณะเป็นแบบรูปทรงตัววาย (Y Shape) ตรงตามชิ้นงานจริงที่ได้ทำการสร้างขึ้นสำหรับการทดสอบการเผาไหม้

หลังจากแก้ไขแบบจำลองการเผาไหม้ ในส่วนของช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงผง พบว่าลักษณะของช่องทางเข้ารูปทรงตัววายมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ และการเกิดจุดร้อนบริเวณผนังกลางห้องเผาไหม้ของหัวเผาอย่างชัดเจน และยังส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (b) แต่ในทั้งสองกรณีสำหรับการสร้างแบบจำลองยังแสดงถึงปรากฏการณ์ของเปลวไฟที่เกิดการลอยขึ้นเนื่องแรงลอยตัว ซึ่งเป็นผลมาจากโน้มถ่วงของโลก เนื่องจากอุณหภูมิที่ผนังของเตาเผาไหม้หลักต่ำกว่าอุณหภูมิของเปลวไฟทำให้อากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะไหลเข้าไปแทนที่อุณหภูมิของเปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูงกว่าหลังจากปฏิกิริยาการเผาไหม้สิ้นสุดลงที่บริเวณทางออกของหัวเผากับเตาเผาไหม้หลัก



รูปที่ 4.13 แสดงการเกิดจุดร้อน (hot spot) ในลักษณะการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงผง (K)
(a) Non-Y Shape, (b) Y Shape

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสร้างแบบจำลองในส่วนของช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิรูปทรงตัววายมีผลต่อปรากฏการณ์ของเปลวไฟที่เกิดขึ้นและความเสี่ยงที่จะเกิดจุดร้อนภายในห้องเผาไหม้ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ โดยได้ทำการติดตั้งวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย เพื่อทำการศึกษาลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นและปัจจัยความเสี่ยงที่จากเกิดขึ้น เนื่องจากมีสมมุติฐานว่าวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยจะช่วยให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ และจะช่วยไม่ให้เกิดจุดร้อนภายในห้องเผาไหม้

สำหรับปัจจัยความเสี่ยงอีกหนึ่งปัจจัยที่เกิดขึ้นจากผลการทดสอบการเผาไหม้ในอดีตพบว่าช่องผสมอากาศทุติยภูมิมีเชื้อเพลิงบางส่วนหลุดเล็ดลอดเข้าไปในบริเวณการอุ่นอากาศและเกิดการกองของเชื้อเพลิงผิงขึ้นภายในหัวเผาดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5 มาก่อนหน้านี้ จากแบบจำลองการเผาไหม้พบว่าเส้นทางเดินของอนุภาคของเชื้อเพลิงผิงไม่เกิดการไหลย้อนเข้าไปในช่องผสมอากาศทุติยภูมิ ซึ่งขัดแย้งกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงภายในห้องเผาไหม้ เนื่องจากการสร้างแบบจำลองสำหรับลักษณะของช่องผสมอากาศทุติยภูมิมีความซับซ้อน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงทำแก้ไขสาเหตุของการเกิดปัจจัยความเสี่ยงดังที่ได้กล่าวมา โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ที่ได้ปิดช่องผสมอากาศทุติยภูมิ ช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิรูปทรงตัววาย และการติดตั้งวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยดังรูปที่ 4.7

4.3.2 ผลการจำลองหัวเผาก๊าซสังเคราะห์หลังทำการปรับปรุง

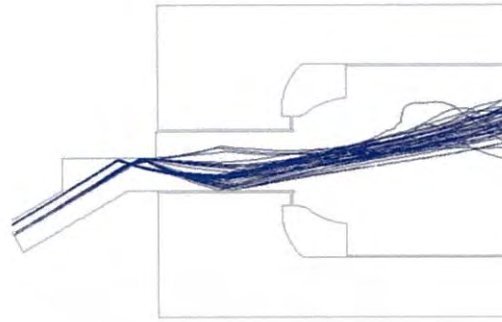
จากข้อมูลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ก่อนทำการปรับปรุง ทำให้ได้พบปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการปรับปรุงการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ตามที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่แล้ว โดยได้ใช้แบบจำลองการเผาไหม้ Species Transport ร่วมกับแบบจำลองการปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของเวกเตอร์ความเร็วของก๊าซ การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมัน การกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหย และการกระจายตัวของความเข้มข้นของออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้หลังจากทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ตามลำดับ

4.3.2.1 อิทธิพลของวัตถุขวางการไหลจากการสร้างแบบจำลอง

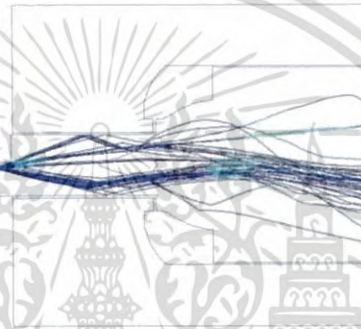
ในกรณีนี้ได้ทำศึกษาอิทธิพลของการติดตั้งวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย โดยกำหนดให้อนุภาคน้ำมันของเตาเผาไหม้เป็นอะเดียแบติกในการพิจารณา จากผลการจำลองการเผาไหม้ เมื่อพิจารณาเส้นทางเดินของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผิงที่ขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 500 ไมครอน ดังตารางที่ 4.6 ซึ่งเป็นขนาดที่ค่อนข้างหยาบที่สุดที่ได้ทำการศึกษา สำหรับในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งวัตถุขวางไหลพบว่าเส้นทางเดินของอนุภาคเชื้อเพลิงผิงมีลักษณะจับตัวเป็นกลุ่มก้อนก่อนเคลื่อนตัวเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และเมื่อสังเกตในกรณีที่ติดตั้งวัตถุขวางไหลรูปทรงกรวย พบว่าเมื่ออนุภาคของเชื้อเพลิงผิงปะทะกับวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยอนุภาคของเชื้อเพลิงผิงบางส่วนจะถูกเหวี่ยงออกโดยรอบเข้าผสมกับอากาศทุติยภูมิ โดยที่อนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลผิงเริ่มปลดปล่อยสารระเหยอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (a) และ (b)

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันภายในห้องเผาไหม้ พบว่าในกรณีที่ติดตั้งวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย ลักษณะฐานของเปลวไฟจะเกิดเป็นวงกว้างมากกว่าในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งวัตถุขวางการไหล เนื่องจากเมื่ออากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลผิงไหลเข้าปะทะวัตถุขวางไหลทางด้านหน้าทำให้เกิดความดันสูง และด้านหลังมีความดันที่ต่ำกว่า ทำให้เกิดกระแสการไหล

หมุนวนของแก๊สที่มีอุณหภูมิเข้าผสมกับเชื้อเพลิงใหม่จนเกิดการลุกติดไฟขึ้น ซึ่งส่งผลต่อความยาวและเสถียรภาพของเปลวไฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (a) และ (b)



(a) Non-Bluff body



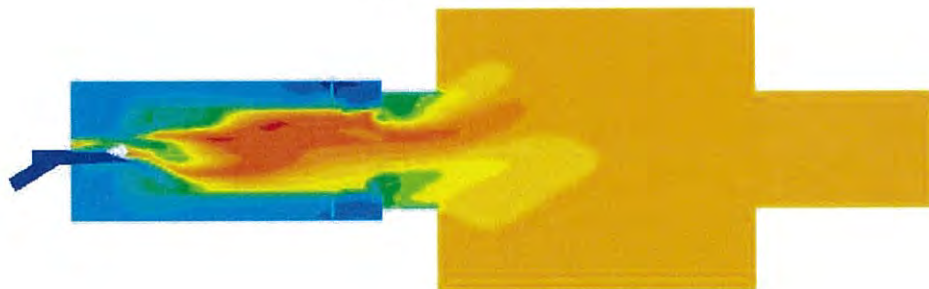
(b) Bluff body

รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะของเส้นทางการเดินของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผงในกรณี

(a) Non-Bluff body, (b) Bluff body



(a) Non-Bluff body



(b) Bluff body

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.15 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณี (K) (Standard $k-\epsilon$)

(a) Non-Bluff body, (b) Bluff body

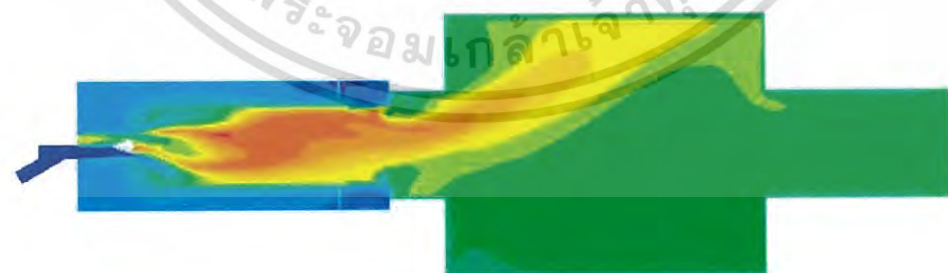
4.3.2.2 อิทธิพลของผนังเตาเผาใหม่จากการสร้างแบบจำลอง

ในกรณีนี้ได้ทำศึกษาอิทธิพลการกำหนดสมมติฐานของอุณหภูมิผนังเตาเผาใหม่แบบอะเดียแบติก และการกำหนดอุณหภูมิผนังเตาเผาใหม่ที่วัดได้จากการทดลองประมาณ 1000 K โดยใช้แบบจำลองการเผาไหม้ Species Transport แบบจำลองการปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ ในการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น

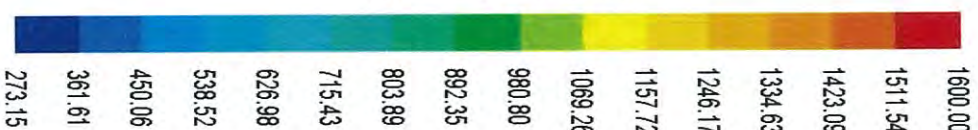
จากผลการจำลองการเผาไหม้ เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ในกรณีอุณหภูมิผนังเตาเผาใหม่เป็นแบบอะเดียแบติก และในกรณีที่อุณหภูมิผนังเตาเผาใหม่จากการทดลอง พบว่าในทั้งสองกรณีให้ผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่เคียงกัน แต่สำหรับในกรณีที่ผนังเตาเผาจากการทดลองนั้น ส่งผลต่อความยาวของเปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในเตาเผา และยังเกิดการลอยตัวของเปลวไฟอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากอุณหภูมิของเปลวไฟสูงกว่าอุณหภูมิของผนังเตาเผา ดังแสดงในรูปที่ 4.16 – 4.19



(a) Adiabatic wall

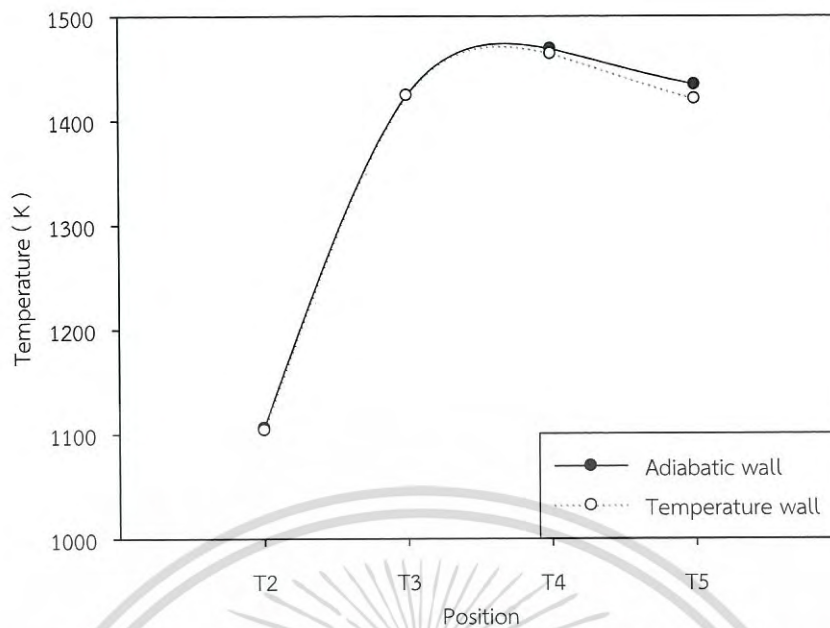


(b) Temperature wall

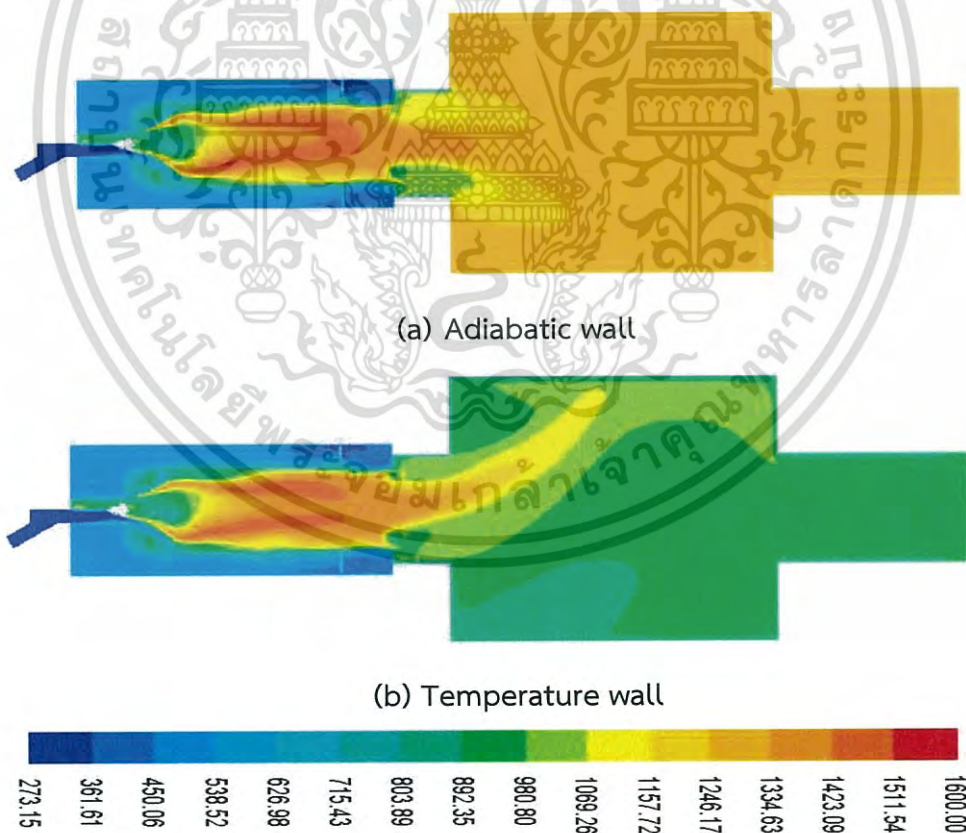
รูปที่ 4.16 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณี (K) (Standard $k-\epsilon$)

(a) Adiabatic wall, (b) Temperature wall

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

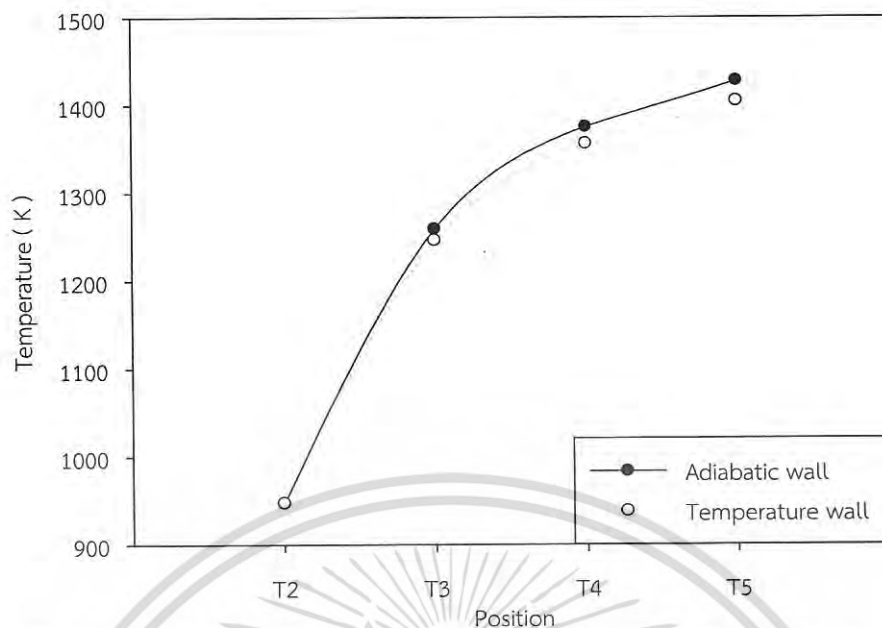


รูปที่ 4.17 แสดงผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณี (K) (Standard $k-\epsilon$)
(a) Adiabatic wall, (b) Temperature wall



รูปที่ 4.18 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณี (K) (RNG $k-\epsilon$)
(a) Adiabatic wall, (b) Temperature wall

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณี (K) (RNG $k-\epsilon$)
(a) Adiabatic wall, (b) Temperature wall

4.3.2.3 อิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$

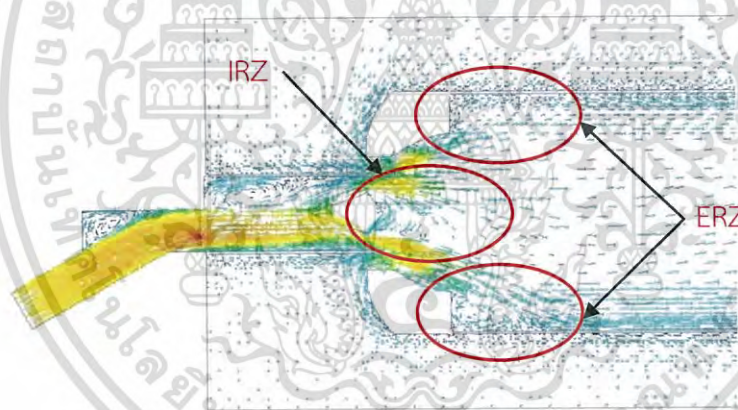
จากผลการจำลองในหัวข้อ 4.3.2.2 เกี่ยวกับอิทธิพลของผนังเตาเผา เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงได้เลือกใช้อุณหภูมิของผนังเตาเผาจากการทดลองเป็นเงื่อนไขในการศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วน

พบว่าแบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ ทำให้เกิดการหมุนวนของกระแสภายในแกนกลางของหัวเผา (Internal Recirculation Zone, IRZ) บริเวณด้านหลังของวัตถุขวางไหลรูปทรงกรวยได้อย่างชัดเจน ซึ่งได้รับอิทธิพลจากอากาศป้อนภูมิหลังจากกระแสการไหลผ่านวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยและยังได้อิทธิพลจากอากาศทุติยภูมิหลังจากกระแสการไหลผ่านใบพัดลำดับที่สอง ทำให้เกิดการหมุนวนของกระแสนอกแกนกลางของหัวเผา (External Recirculation Zone, ERZ) สำหรับในแบบจำลองการปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ นั้นเกิดการหมุนวนของกระแสภายในแกนกลางของหัวเผาที่ต่ำมากหรืออาจจะไม่เกิดการหมุนวนของกระแสภายในแกนกลางของหัวเผา ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (a) และ (b) ทำให้มีผลต่อการเกิดของฐานเปลวไฟด้านหลังวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย ซึ่งจะพบว่าแบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ จะเกิดฐานของการเกิดเปลวไฟที่กว้างกว่าแบบจำลองการปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ ทำให้มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและความยาวของเปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 (a) และ (b) และเมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นของออกซิเจนและความเข้มข้นของการปลดปล่อยสารระเหย พบว่าแบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ ที่เกิดการหมุนวนของกระแสภายในแกนกลางของหัวเผาที่บ้านกว่าแบบจำลองการปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ ส่งผลต่อระยะเวลาในการปลดปล่อยสารระเหยและการบริโภคของออกซิเจนสำหรับในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 – 4.23 (a) และ (b) เป็นสาเหตุที่ทำให้การเกิดอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟสำหรับแบบจำลองการปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ มีลักษณะของเปลวไฟที่ยาวกว่าแบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ โดยทั้งสองแบบจำลองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

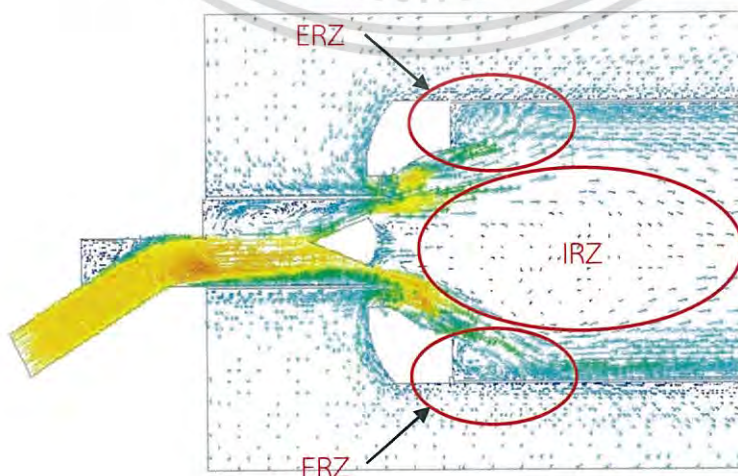
การปั่นป่วนมีความเข้มข้นของการปลดปล่อยสารระเหยเริ่มต้นและหมดลงภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งถือว่าพฤติกรรมเผาไหม้ทั้งสองแบบจำลองการปั่นป่วนเป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

จากผลการจำลองการเผาไหม้โดยใช้แบบจำลองการปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และแบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ พบว่าแบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ จะมีการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่สูงกว่าแบบจำลองการปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ ในทุกตำแหน่งที่จะทำการวัดผล แต่แบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ มีผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิในตำแหน่งที่ 0.735 – 0.885 m บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (a) และ (b) และในทำนองเดียวกันนั้นผลที่ได้จากการจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองหลังจากทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์หลังทำการปรับปรุงซึ่งจะได้กล่าวในบทถัดไป

สำหรับงานวิจัยของ พงศธร ปู่ยา [23] พบว่าแบบจำลองการปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ มีพจน์ที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลที่มีความเครียดเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน และสามารถคำนวณให้เห็นถึงกระแสการไหลที่มีความปั่นป่วนได้อย่างละเอียดกว่าแบบจำลองการปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ จึงทำให้เห็นลักษณะการไหลหมุนวนของกระแสการไหลได้อย่างชัดเจนและปัจจัยเกี่ยวกับมุมของไบบิตที่มีผลกระทบทำให้เกิดลักษณะกระแสหมุนวนภายใน (IRZ) และกระแสหมุนวนภายนอก (ERZ)

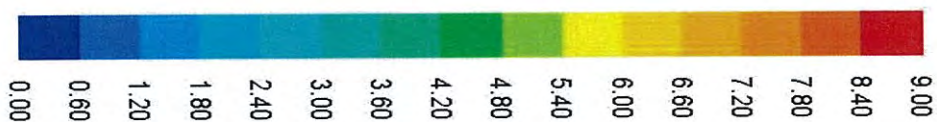


(a) Standard $k-\epsilon$



(b) RNG $k-\epsilon$ अनुवादให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

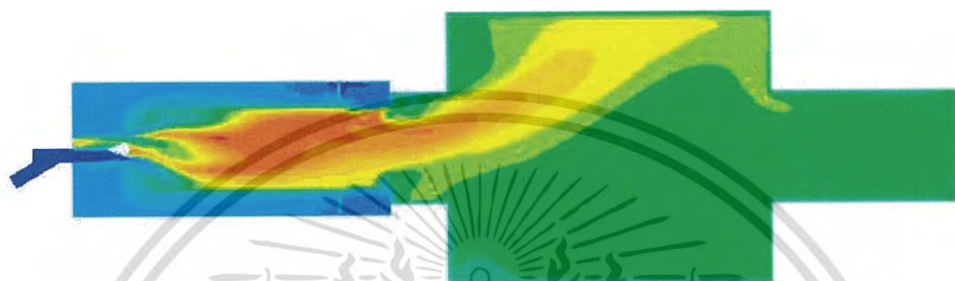
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ (b) RNG $k-\epsilon$ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงบริเวณการเกิดการหมุนวนของกระแสภายใน (IRZ) และภายนอก (ERZ)

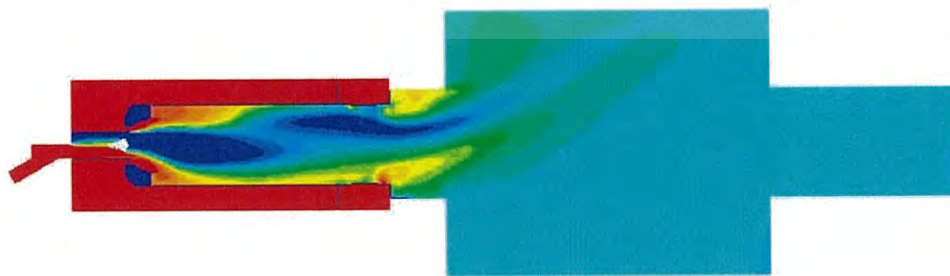
แกนกลางของหัวเผาแก๊สสังเคราะห์ (m/s)

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

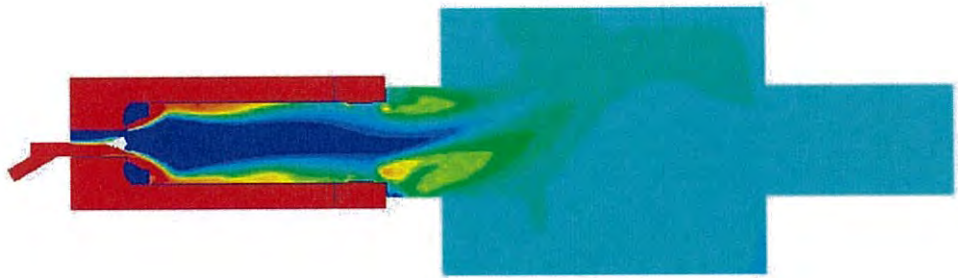


รูปที่ 4.21 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ (K)

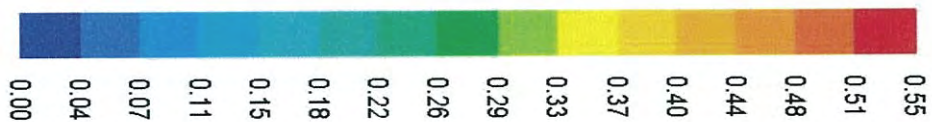
(a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) RNG $k-\varepsilon$ 

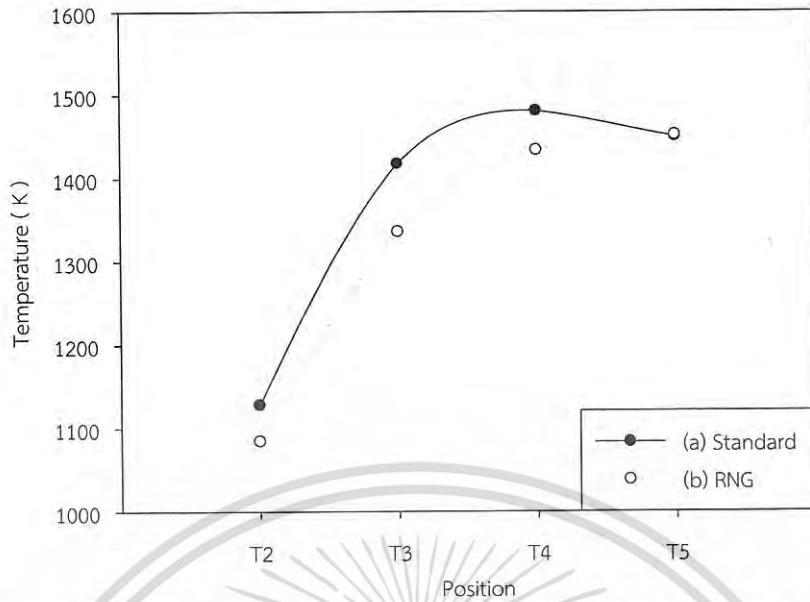
รูปที่ 4.22 การกระจายตัวของความเข้มข้นออกซิเจน (Mass Fraction)

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

รูปที่ 4.23 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย (Mass Fraction)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบผลจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิ (K)
(a) Standard $k-\varepsilon$, (b) RNG $k-\varepsilon$

จากผลที่ได้จากการจำลองการเผาไหม้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นสำหรับในงานวิทยานิพนธ์นี้ ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ทำนายของปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้น ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อแบบจำลองคือ ลักษณะทางเข้าของอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลรูปทรงตัววาย (Y-Shaped) ช่องผสมอากาศทุติยภูมิโดยที่ปัจจัยเหล่านี้ ทำให้เห็นถึงแนวโน้มของการเกิดปัจจัยความเสี่ยงภายในห้องเผาไหม้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์ เช่น ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผง การเกิดจุดร้อน และการหลุดเล็ดของเชื้อเพลิงผ่านช่องผสมอากาศทุติยภูมิเข้าสู่บริเวณที่มีการอุ่นอากาศร้อน จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงได้ทำการปรับปรุงแบบจำลองการเผาไหม้โดยได้ติดตั้งวัตถุขวางการไหล และปิดช่องผสมอากาศทุติยภูมิเพื่อการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น โดยผลการจำลองได้อภิปรายมาก่อนหน้านี้ และทำการทดสอบการเผาไหม้หลังจากทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ ซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป

บทที่ 5

อุปกรณ์ เื่อนไข และวิธีการทดลอง

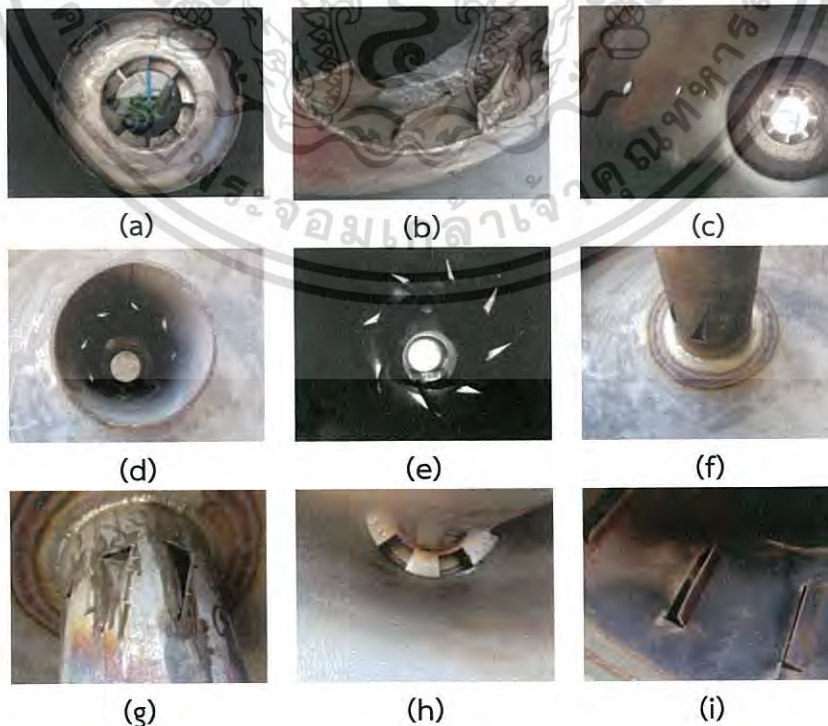
สำหรับบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับอุปกรณ์สำหรับชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง จากที่ได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาในบทก่อนหน้านี้นอกจากนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวกับชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงก่อน เครื่องมือที่ใช้ในการบันทึกข้อมูล และเครื่องมือวัดต่างๆ รวมทั้งวิธีการทดลองเพื่อทำการทดสอบหาสมรรถนะของหัวเผือก๊าซสังเคราะห์ สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งชนิดผง

5.1 อุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งชนิดผง

หลังจากที่ได้มีการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาที่มีการอุ่นอากาศในอดีต เพื่อให้หัวเผาสามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงชีวมวลผง ทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการเผาไหม้ก่อนทำการปรับปรุงอีกครั้ง เพื่อทำการเก็บข้อมูล สำหรับการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากแบบจำลองการเผาไหม้ก่อนที่จะทำการปรับปรุงหัวเผือก๊าซสังเคราะห์ โดยการติดตั้งวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย และปิดช่องผสมอากาศทุติยภูมิ ซึ่งได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ สำหรับอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงนั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ตัวอย่างเช่น หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง ระบบบดเชื้อเพลิง ระบบป้อนเชื้อเพลิงผง ระบบบำบัด เป็นต้น

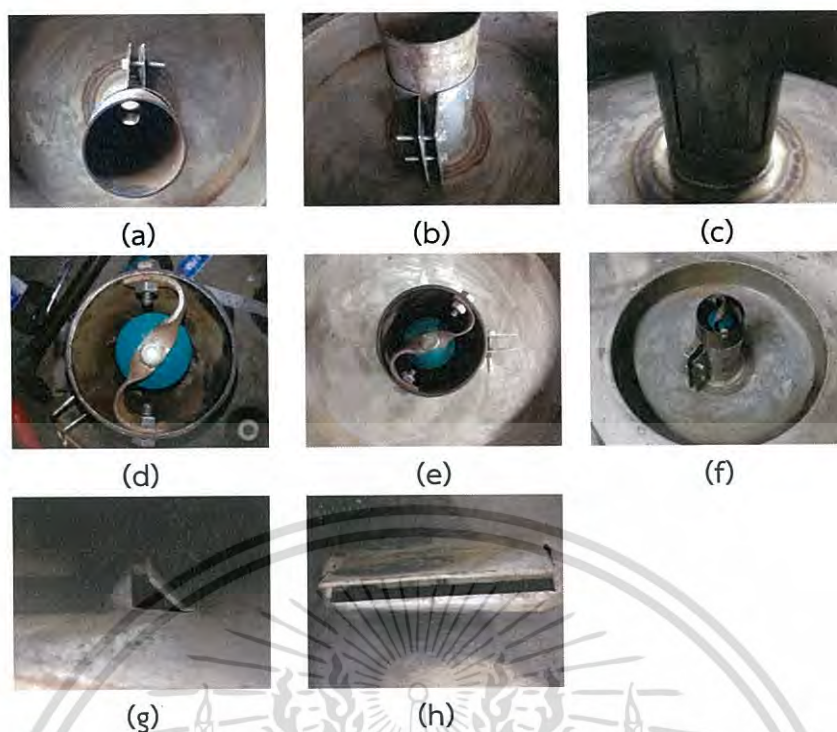
5.1.1 หัวเผือก๊าซสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นที่มีการอุ่นอากาศ

โครงสร้างของหัวเผือก๊าซสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลผงแบบที่มีการอุ่นอากาศได้ถูกออกแบบให้ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักๆ 7 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงก่อนทำการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยผู้จัดทำเนื้อหาได้ขอสงวนสิทธิ์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงหลังทำการปรับปรุง

รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่มีการอุ่นอากาศก่อนทำการปรับปรุง ซึ่งได้อธิบายพอสังเขปดังต่อไปนี้ (a) – (b) แสดงลักษณะของ swirl plate สำหรับอากาศทุติยภูมิ (c) แสดงตำแหน่งจุดการวัดอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ (d) – (f) แสดงลักษณะของช่องผสมอากาศทุติยภูมิ (h) แสดงลักษณะของ swirl plate สำหรับในการแบ่งอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ และ (i) แสดงลักษณะของช่องการไหลอากาศตติยภูมิ และรูปที่ 5.2 แสดงลักษณะภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงแบบที่มีการอุ่นอากาศหลังทำการปรับปรุง ซึ่งได้อธิบายลักษณะในการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ได้พอสังเขปดังต่อไปนี้ (a) – (c) แสดงลักษณะของการปิดช่องผสมอากาศทุติยภูมิ (d) – (f) แสดงลักษณะการติดตั้งวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย (g) – (h) แสดงลักษณะของช่องการไหลตติยภูมิ ซึ่งได้ปรับช่องการไหลสำหรับอากาศตติยภูมิให้แคบลง ซึ่งสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับขั้นตอนการประกอบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงก่อนทำการปรับปรุงได้จากงานวิจัยของ [2] และเมื่อทำการประกอบชิ้นส่วนต่างๆของหัวเผาเข้าด้วยกันซึ่งจะได้หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงแบบที่มีการอุ่นอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีการอุ่นอากาศ (ด้านหน้า)



รูปที่ 5.4 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีการอุ่นอากาศ (ด้านหลัง)

5.1.2 ระบบบดเชื้อเพลิงชีวมวลผง

สำหรับชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ระบบบดเชื้อเพลิงถือเป็นระบบหนึ่งที่มีความจำเป็นอย่างมาก โดยทางทีมวิจัยร่วม พิรพัฒน์ เทพลิบ [24] ได้ทำการปรับปรุงระบบบดเชื้อเพลิงให้สามารถบดเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้อย่างต่อเนื่องตามปริมาณความต้องการของการใช้เชื้อเพลิง เนื่องจากระบบเครื่องบดเดิมมีปัญหาเกี่ยวกับการบดที่ไม่ต่อเนื่องและเกิดปัญหาการอุดตันของเชื้อเพลิงชีวมวลผงทำให้เครื่องบดต้องหยุดการทำงาน ดังนั้นจึงได้ทำการติดตั้งระบบเครื่องบดใหม่เพื่อไม่ทำให้เกิดปัญหาดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยลักษณะของระบบบดเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดก่อนและหลังที่ทำการปรับปรุงดังแสดงในรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แสดงลักษณะการติดตั้งเครื่องบดเชื้อเพลิงชีวมวลก่อนทำการปรับปรุง [4]



รูปที่ 5.6 แสดงลักษณะการติดตั้งเครื่องบดเชื้อเพลิงชีวมวลหลังทำการปรับปรุง [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง

สำหรับระบบป้อนเชื้อเพลิงผงถือเป็นระบบอีกระบบหนึ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งได้ทำการออกแบบเพิ่มเติมโดยทีมงานนักวิจัยที่เกี่ยวข้อง [24] เพื่อใช้สำหรับในการพักเชื้อเพลิงผงและลำเลียงเชื้อเพลิงผง โดยได้ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงผงให้อยู่ในระดับที่พร้อมใช้งานและชุดสกรูลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผงซึ่งจะควบคุมอัตราการขนถ่ายด้วยความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายและชุดเกียร์ทดรอบแสดงดังรูปที่ 5.7 โดยที่ทางออกของชุดสกรูลำเลียงถูกออกแบบให้ใช้งานร่วมกับระบบการขนถ่ายด้วยลม ซึ่งประกอบด้วยโบลเวอร์และวาล์วปรับอัตราการไหลอยู่ในส่วนของการป้อนอากาศปฐมภูมิร่วมกับการลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ตามย่านการทำงานของหัวเผา ก๊าซสังเคราะห์ โดยถังพักเชื้อเพลิงมีขนาดความจุ 0.5 m³ สามารถสำรองเชื้อเพลิงชีวมวลผงสำหรับใช้ในการทดสอบการเผาไหม้ที่กำลังการผลิตความร้อน 100 kW ดังแสดงในรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 นอกจากนี้บริเวณด้านข้างผนังถังพักเชื้อเพลิงผงได้ถูกติดตั้งอุปกรณ์สั่นสะเทือนซึ่งใช้ลมในการเคาะ โดยใช้ลมจากเครื่องอัดอากาศที่ความดัน 4 bar_g เพื่อให้เชื้อเพลิงผงภายในถังพักไหลได้อย่างต่อเนื่องไม่เกิดการติดค้างของเชื้อเพลิงชีวมวลผงภายในถังพักดังแสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.7 แสดงชุดสกรูลำเลียงและชุดเกียร์ทดรอบ



รูปที่ 5.8 แสดงระบบลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 แสดงระบบลำเลียงเชื้อเพลิงซีมวลผง (ต่อ)



รูปที่ 5.10 แสดงอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนด้วยลมที่เลือกใช้ (ต่อ)

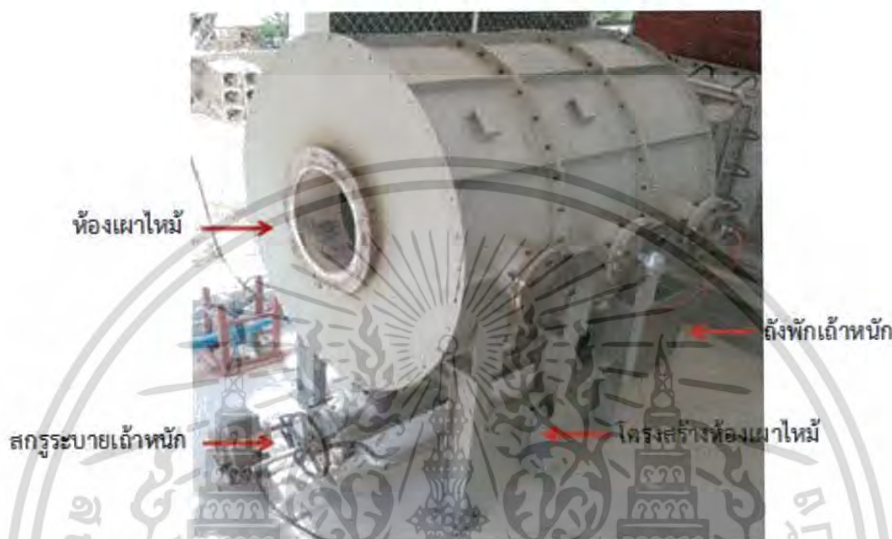


รูปที่ 5.11 เครื่องอัดอากาศสำหรับอุปกรณ์สร้างแรงสั่นเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

สำหรับห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ของชุดทดสอบการเผาไหม้ ซึ่งห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลนั้นจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ 4 ส่วนได้แก่ ห้องเผาไหม้ โครงสร้างห้องเผาไหม้ ถังพักไถ่หนัก และชุดสกรูระบายไถ่หนัก ดังแสดงในรูปที่ 5.12 สำหรับในรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบ และการผลิตสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากวิทยานิพนธ์ของ ชินภัทร ฐรการ [4]



รูปที่ 5.12 ลักษณะของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

5.1.5 ระบบบำบัดไอเสีย

สำหรับระบบบำบัดไอเสียเดิมได้ถูกออกแบบให้เป็นระบบลดอุณหภูมิไอเสีย (evaporative cooling) และระบบกำจัดฝุ่นแบบเปียก (wet scrubber) เข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งรายละเอียดในการออกแบบ และสิ่งผลิตสามารถศึกษาเพิ่มเติมจากวิทยานิพนธ์ของ ชินภัทร ฐรการ [4] โดยระบบบำบัดไอเสียได้ทำการติดตั้งหัวฉีดน้ำ ระบบหมุนเวียนน้ำ รวมไปถึงการติดตั้งพัดลมดูดแก๊สไอเสีย และปล่องไอเสีย เป็นต้น โดยที่ในปัจจุบันได้ทำการปรับปรุงบ่อตกตะกอนใหม่ ซึ่งลักษณะของระบบบำบัดไอเสีย ดังแสดงในรูปที่ 5.13 - 5.15



รูปที่ 5.13 ถังบำบัดไอเสีย (evaporative scrubber)



รูปที่ 5.14 ลักษณะของม่านน้ำสำหรับดักแก๊สลอย



(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเชิงนโยบายการศึกษาค้นคว้า โดยผู้ผู้ที่ได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

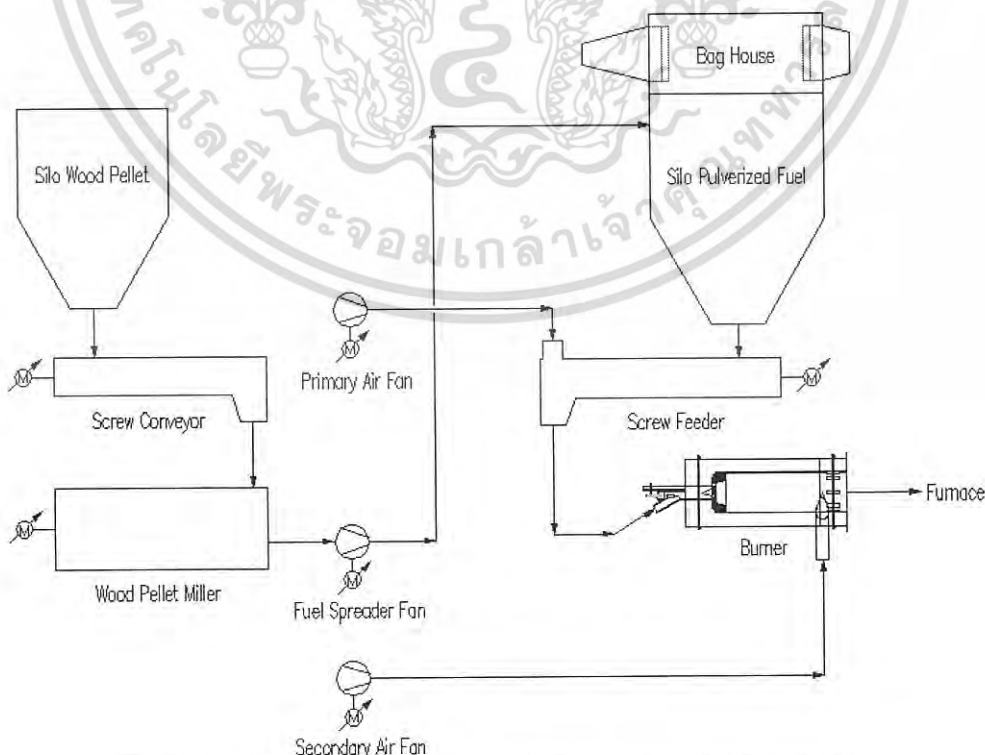
5.2 อุปกรณ์วัด ควบคุม และบันทึกผล

5.2.1 ระบบป้อนอากาศ

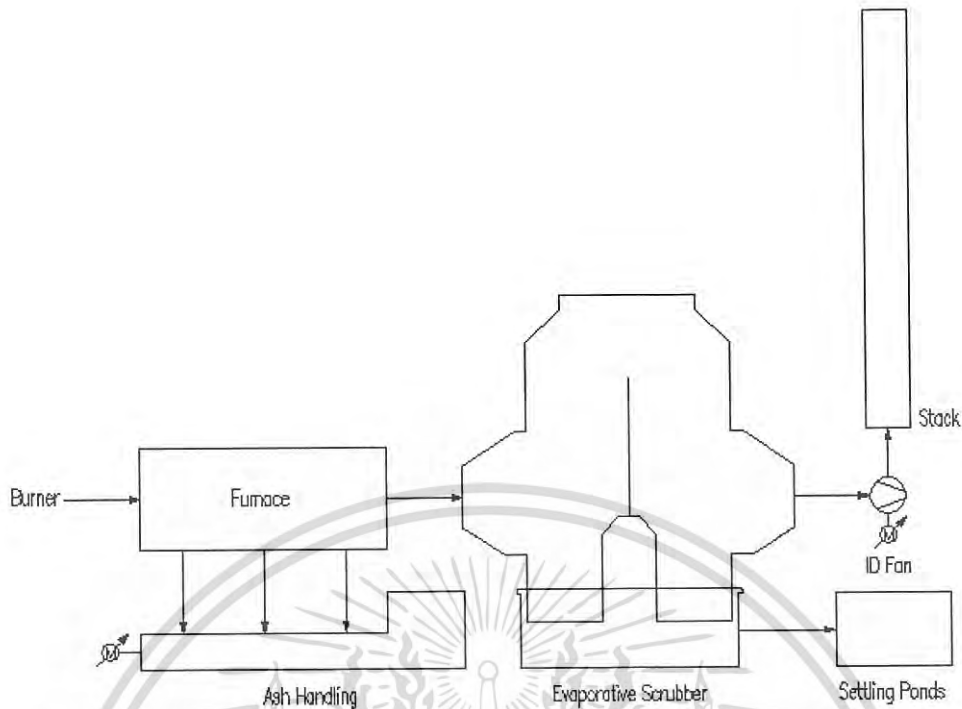
ระบบป้อนอากาศสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงถูกออกแบบให้อากาศแบ่งออกเป็นสองส่วนตามหน้าที่ของการทำงาน ได้แก่

1. อากาศปฐมภูมิ (primary air) ใช้สำหรับในการจุดหัวเผาพร้อมกับแก๊ส LPG ในช่วงที่อุ่นหัวเผา และถูกออกแบบให้เป็นอากาศที่นำเชื้อเพลิงชีวมวลผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้
2. อากาศทุติยภูมิ (secondary air) เป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งได้ออกแบบให้อากาศไหลเข้าตามแนวเส้นสัมผัสของหัวเผามีลักษณะทิศทางการไหลสวนทางกับไอเสีย ซึ่งอากาศในส่วนนี้จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นก่อนไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในลักษณะที่มีการหมุนควงและผสมกับอากาศปฐมภูมิที่ทำหน้าที่ลำเลียงเชื้อเพลิงผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้
3. อากาศตติยภูมิ (tertiary air) เป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้อีกส่วนหนึ่งซึ่งถูกแบ่งออกมาจากอากาศทุติยภูมิ ก่อนที่อากาศทุติยภูมิจะถูกอุ่นให้ร้อน โดยที่อากาศตติยภูมิ ถูกป้อนเข้าสู่ปากทางออกของห้องเผาไหม้ชั้นใน เพื่อเติมอากาศให้แก่การเผาไหม้ที่ต่อเนื่องมาจากส่วนต้นของห้องเผาไหม้ และยังทำหน้าที่หล่อเย็นให้กับทางออกของหัวเผาอีกด้วย

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.16 และ รูปที่ 5.17 แสดงเกี่ยวกับอุปกรณ์ในระบบการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง ซึ่งประกอบด้วย ระบบบดเชื้อเพลิงเม็ด ระบบป้อนเชื้อเพลิงผง ระบบการป้อนอากาศ ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงผง ระบบลำเลียงซีเมนต์ ระบบบำบัด และระบบป้อนตะกอน ดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้



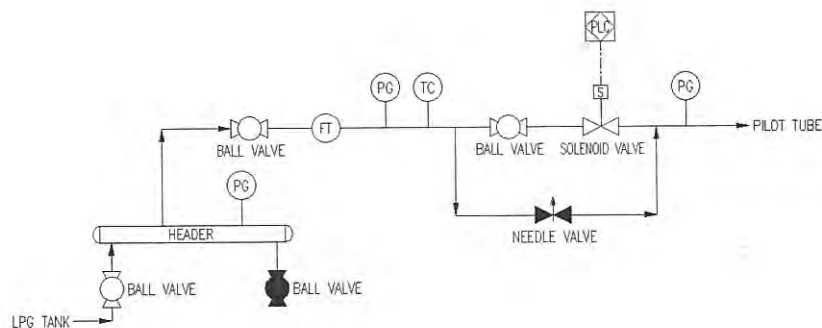
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานในระบบงานเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
รูปที่ 5.16 แสดงอุปกรณ์ในระบบการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



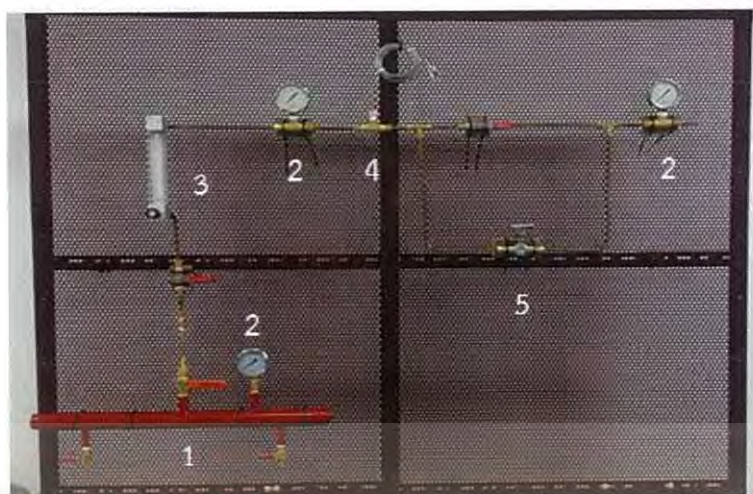
รูปที่ 5.17 แสดงอุปกรณ์ในระบบการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง (ต่อ)

5.2.2 ระบบการทำงานของระบบแก๊ส LPG

การควบคุมการทำงานของระบบการจ่ายแก๊ส LPG จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมการจุดของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงในช่วงที่เริ่มการอุ่นหัวเผา เมื่อพิจารณารูปที่ 5.18 และ รูปที่ 5.19 แก๊สจะถูกจ่ายผ่านจากตัว Header โดยมี Ball valve เป็นตัวควบคุมการเปิด-ปิดแก๊สให้ผ่านไปยัง Flow meter เพื่อควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส และวัดแรงดันโดย Pressure gauge ก่อนเข้าอุปกรณ์ Temperature sensor จากนั้นจะไหลเข้าหัวเผาโดยใช้ท่อทางเดินแก๊ส 2 ทาง คือ ทางหลักจะใช้ Solenoid valve ซึ่งจะใช้ไฟฟ้าในการสั่งการเปิดปิดวาล์ว และทางแยกได้ใช้ Needle valve ในการเปิด-ปิดแก๊สให้สามารถควบคุมได้ด้วยมือ สำหรับข้อดีของการควบคุมระบบแก๊ส 2 ทาง คือ เพื่อสะดวกในการซ่อมบำรุง เช่น หาก Solenoid valve มีปัญหาไม่ว่าจะเนื่องจากไฟฟ้าดับ หรือตัว Solenoid valve เกิดการชำรุดขึ้นก็ยังสามารถใช้ Needle valve ในการทำงานต่อไปได้ และก่อนเข้าหัวเผาได้ติดตั้ง Pressure gauge เพื่อวัดแรงดันก่อนเข้าหัวเผาอีกครั้งเพื่อดูได้ว่าความดันของแก๊สก่อนที่จะเข้าหัวเผาเป็นไปตามเงื่อนไขของการทดลอง



รูปที่ 5.18 แสดงระบบการทำงานของทางเดินท่อแก๊สก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง การดำเนินการนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ทางไปก่อนเริ่มการทำงานเพื่อตรวจสอบแก๊สก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง ไม่สามารถแก้ไขใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



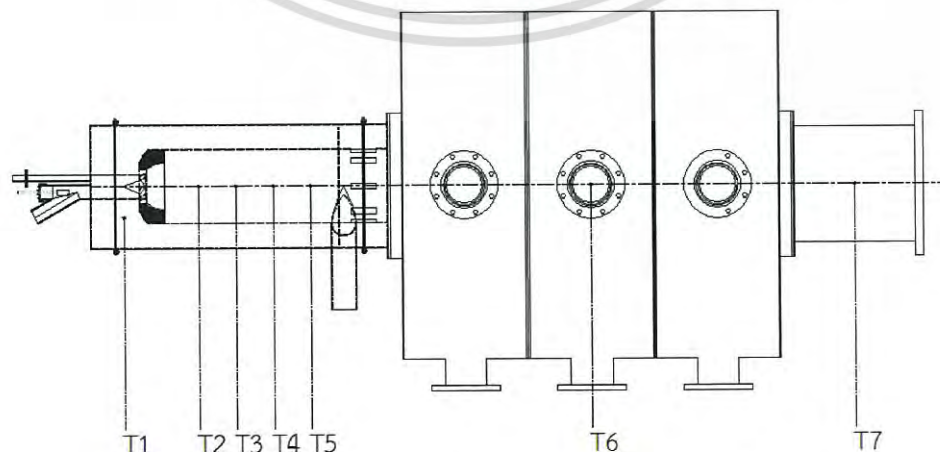
รูปที่ 5.19 แสดงแผงควบคุมระบบจ่ายแก๊ส LPG ก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมแก๊ส LPG.

1. Header สามารถรับแรงดันได้สูงสุด 10 bars
2. Pressure gauge ยี่ห้อ Nuovafima 2.5 ช่วงการทำงาน 0-4 bars
3. Rota meter ยี่ห้อ Nitto รุ่น K200 Model 2013 ช่วงการทำงาน 1-10 L/min
4. Temperature sensor type K
5. Needle valve รุ่น SINV3-F-4N-SS

5.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

ในการบันทึกค่าอุณหภูมิจะเก็บบันทึกทั้งหมด 8 ตำแหน่งตามระยะแนวแกนของชุดทดสอบการเผาไหม้ดังแสดงในรูปที่ 5.20 โดยแบ่งเป็นที่บริเวณภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงจำนวน 4 ตำแหน่ง บริเวณตำแหน่งอุณหภูมิอุ่นอากาศ บริเวณกลางเตาห้องเผาไหม้หลัก บริเวณก่อนเข้าระบบบำบัดไอเสีย และบริเวณหลังจากระบบบำบัดอย่างละ 1 ตำแหน่ง ซึ่งในการตรวจวัดทำโดยใช้ thermocouple type K เชื่อมต่อกับหน่วยแสดงผล YOKOGAWA รุ่น XL100 ดังแสดงในรูปที่ 5.21 โดยได้เก็บบันทึกผลการทดลองเมื่อการเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงที่



รูปที่ 5.20 ตำแหน่งในการบันทึกค่าของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ผู้จัดทำเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 thermocouple type K และหน่วยแสดงผล YOKOGAWA XL 100

5.2.4 อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สไอเสีย

ตำแหน่งที่จะทำการตรวจวัดแก๊สไอเสีย คือบริเวณก่อนเข้าระบบบำบัดแก๊สไอเสีย ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งวัดอุณหภูมิ T7 ดังแสดงในรูปที่ 5.20 โดยจะทำการตรวจวัด และบันทึกผลเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนหลังการเผาไหม้ ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ และสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดได้แก่เครื่องวัดแก๊ส Testo รุ่น 350 XL ดังแสดงในรูปที่ 5.22 แต่เนื่องด้วยตำแหน่งที่ทำการวัดแก๊สไอเสียในตำแหน่งดังกล่าวมีอุณหภูมิของแก๊สไอเสียประมาณ (300-600 °C) จึงต้องทำการดูดแก๊สไอเสียออกมาวัดภายนอกเพื่อป้องกันอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สสัมผัสเปลวไฟ ดังนั้นจึงได้เพิ่มอุปกรณ์ช่วยในการวัดค่า ได้แก่ หลอดพักและลดอุณหภูมิแก๊สไอเสีย และปั๊มลมสำหรับช่วยสร้างสุญญากาศในการดูดแก๊สไอเสียเข้าหลอดพักไอเสีย ดังแสดงในรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.22 เครื่องวัดแก๊สไอเสีย Testo รุ่น 350 XL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 5.23 อุปกรณ์ช่วยในการวัดค่าแก๊สไอเสีย (a) หลอดฟักและลดอุณหภูมิไอเสีย และ (b) ปัมลม

5.2.5 อุปกรณ์วัด และควบคุมอื่นๆ

5.2.5.1 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

สำหรับชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงนั้น ระบบที่มีความจำเป็นต้องทำการควบคุมความเร็วรอบจะประกอบไปด้วยสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิง และพัดลมดูดแก๊สไอเสีย ซึ่งทั้งสองระบบจะถูกควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ที่แสดงดังรูปที่ 5.24 และ 5.25 ตามลำดับ



รูปที่ 5.24 อินเวอร์เตอร์ (inverter) ยี่ห้อ Schneider รุ่น ATV312



รูปที่ 5.25 อินเวอร์เตอร์ (inverter) ยี่ห้อ Winner รุ่น WIN-V63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับย่านการทำงาน (ranges) ค่าความแม่นยำ (accuracy) และค่าความละเอียด (resolution) ของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองสามารถตรวจสอบได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าความละเอียด และความแม่นยำของเครื่องมือวัด [4]

รายการ	ย่านการทำงาน (Ranges)	ค่าความแม่นยำ (Accuracy)	ค่าความละเอียด (Resolution)
Pressure gauge ยี่ห้อ Nuova fima	0-4 bar	± 1.6 %	0.1 bar
Rota meter ยี่ห้อ Nitto รุ่น K200	0-10 l/min	± 5.0 %	0.2 l/min
Data logger YOKOGAWA รุ่น XL100 + thermocouple type K	-	± 1 °C	0.1 °C
Difference pressure transmitter ยี่ห้อ KIMO รุ่น CP 112	0-10 mbar	± 1.5 %	0.01 mbar
Difference pressure transmitter ยี่ห้อ KIMO รุ่น CP 115	0-2000 mbar	± 1.5 %	1 mbar
Gas analyzer Testo 350 XL	O ₂ ; 0-25 Vol.%	± 0.8 %	0.1 Vol.%
	CO ; 0-10000 ppm	± 5.0 %	1 ppm
	NO ; 0-3000 ppm	± 5.0 %	1 ppm
Inverter ยี่ห้อ Schneider รุ่น ATV312	0-50 Hz.	± 0.2 %	0.1 Hz.
Inverter ยี่ห้อ Winner รุ่น WIN-V63	0-50 Hz.	± 5.0 %	0.01 Hz.

5.3 เงื่อนไข และวิธีการทดลอง

สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงเงื่อนไข และขั้นตอนในการทดสอบสมรรถนะของชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเน้นในส่วนการทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง และหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดที่มีการอุ่นอากาศเป็นหลัก และในส่วนของรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับระบบอื่นๆ ของชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้ที่เกี่ยวข้องสามารถศึกษาจากวิทยานิพนธ์ของ ชินภัทร ฐกรการ [4]

5.3.1 การทดสอบสมรรถนะระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง

ระบบการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงเป็นระบบที่มีความสำคัญต่อชุดทดสอบการเผาไหม้เป็นอย่างมาก เนื่องจากระบบการป้อนเชื้อเพลิงผง เป็นระบบที่ส่งผลต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของหัวเผาโดยตรง ดังนั้นระบบป้อนเชื้อเพลิงผงที่ดีต้องสามารถถ่ายเทเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงได้ตามย่านการทำงานของหัวเผา สำหรับในการทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงนั้นจะเริ่มต้นตั้งแต่การหาความสัมพันธ์ระหว่างการปรับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้ามอเตอร์ และอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงผง เป็นต้น

5.3.1.1 การทดลองหาอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงชีวมวลผง

สำหรับในส่วนการคำนวณอัตราการขนถ่ายตามทฤษฎี จะพบว่ามีส่วนตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่ออัตราการขนถ่าย คือความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (ρ_b) และแฟกเตอร์ความเต็มรวงของเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งในวิชาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุ (k) นั้นคือถึงแม้ว่าจะใช้ระบบสกรูขนถ่ายชุดเดียวกัน แต่เมื่อทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงอัตรากรขนถ่ายก็จะเปลี่ยนไป ดังนั้นหัวข้อนี้จึงเป็นการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตรากรขนถ่าย (kg/s) กับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz) ของเชื้อเพลิงชีวมวลผงหลังทำการปรับปรุงระบบบดเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ใช้สำหรับในการเผาไหม้ที่ 100 kW

เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : ชนิดของเชื้อเพลิง และความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz)

ตัวแปรตาม : น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ถูกป้อนสู่ภาชนะบรรจุ (kg)

ตัวแปรควบคุม : เวลาในการขนถ่ายเชื้อเพลิงที่ 1 นาที

วิธีการทดลอง

1. บรรจุเชื้อเพลิงลงในถังพักเชื้อเพลิง (hopper)
2. ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรูซึ่งการทดลองจะเริ่มต้นที่ 0.5 Hz
3. นำภาชนะที่ผ่านการชั่งน้ำหนักเริ่มต้น มารองรับเชื้อเพลิงบริเวณทางออกของรางสกรู
4. เปิด switch มอเตอร์ของสกรูขนถ่าย และอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เชื้อเพลิงถูกถ่ายออกสู่ภาชนะรองรับที่เตรียมไว้ โดยจับเวลา 1 นาที แล้วปิดการจ่ายกระแสที่อินเวอร์เตอร์
5. นำเชื้อเพลิงที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และบันทึกค่าลงในตารางบันทึกผลการทดลอง
6. ทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-5 โดยปรับเพิ่มความถี่ของกระแสไฟฟ้าขึ้นทีละ 0.1 Hz ถึง 1 Hz
7. เมื่อทำการทดลองครบแล้ว ให้ทำความสะอาดสกรูขนถ่าย แล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-6

5.3.2 การทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

สำหรับในการทดสอบการเผาไหม้เพื่อหาสมรรถนะ และย่านการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดที่มีการอุ่นอากาศ (air-preheat) ที่ได้ทำพัฒนามาในอดีตก่อนทำการปรับปรุงและหลังทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น สำหรับในการทดสอบการเผาไหม้ต้องจัดทำเป็นลำดับขั้นตอน ได้แก่ การทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ได้ทำการเพิ่มเติมจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ การทดสอบขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงผงที่มีผลต่อการเผาไหม้ และการทดสอบอิทธิพลของติดตั้งวัตถุขวางการไหลเป็นต้น เพื่อนำผลสรุปจากการทดลองนั้นๆ ไปใช้เป็นตัวแปรควบคุมของการทดลองในขั้นตอนถัดไป ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ถูกนำมาใช้ในการทดสอบคือเชื้อเพลิงผงจากขี้เลื่อยไม่ยางพารา

5.3.2.1 วิธีการจุดระเบิด และการอุ่นหัวเผา

ก่อนที่จะทำการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง จะต้องทำการอุ่นหัวเผาและห้องเผาไหม้ เพื่อให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้นจนกระทั่งเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ป้อนเข้าสู่หัวเผาสามารถเกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเองได้ สำหรับการจุดและการอุ่นหัวเผาในเบื้องต้นจะใช้เชื้อเพลิงแก๊ส LPG ซึ่งการทดสอบปริมาณ LPG ที่เหมาะสมกับการอุ่นหัวเผาสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [2] โดยการอุ่นเตามีลำดับขั้นตอนดังนี้

การจุดหัวเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 1. เปิดตัวลวอากาศส่วนที่หนึ่งที 30% อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 0.0151 kg/s ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เปิดวาล์วอากาศส่วนที่สองที่ 33.5% อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 0.0313 kg/s
3. เปิดวาล์วแก๊ส ปรับค่าอัตราการไหลแก๊สโดยใช้ needle valve ที่ติดตั้งอยู่บนแผงควบคุมแก๊ส LPG ดังแสดงในรูปที่ 5.19 โดยปรับอัตราการไหลที่ 3 L/min
4. ทำการเปิดอุปกรณ์ขยายแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้เกิดประกายไฟบริเวณเคี้ยวจุด



รูปที่ 5.26 อุปกรณ์ขยายแรงดันไฟฟ้าสำหรับจุดประกายไฟ

การอุ่นหัวเผา

1. หลังจากการจุดหัวเผาที่อัตราการไหล LPG เป็น 3 L/min อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (30%) และทุติยภูมิ (70%) ใช้เวลาในการอุ่นหัวเผา 15 นาที บันทึกค่าอุณหภูมิทุก 5 นาที จากนั้นทำการป้อนเชื้อเพลิงผงบวมกับเชื้อเพลิง LPG ใช้เวลาในการอุ่นหัวเผาอีก 10 นาที บันทึกค่าอุณหภูมิทุก 5 นาที หลังจากนั้นหยุดการจ่ายแก๊ส LPG

5.3.2.2 การศึกษาอิทธิพลของวัตถุขวางการไหล

สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบสมรรถนะของการติดตั้งวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย โดยจะทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ที่มีการอุ่นอากาศทั้งกรณีไม่ติดตั้งวัตถุขวางการไหล และกรณีที่ติดตั้งวัตถุขวางการไหลตามลำดับ โดยจะทำการทดสอบการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 100 kW เงื่อนไขการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.2

เงื่อนไขการทดลอง

- ตัวแปรต้น : วัตถุขวางการไหลรูปแบบทรงกรวย
- ตัวแปรตาม : ลักษณะของเปลวไฟ และพฤติกรรมการเผาไหม้ภายในหัวเผา (วิเคราะห์จากอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้)
- ตัวแปรควบคุม : อัตราการป้อนอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 5.2
อัตราการป้อนเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่ 100 kW
ชีวมวลจากซีลี้อย่างพาราที่บดผ่านรูตะแกรงขนาด 0.5 และ 1 mm
ดังแสดงในตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงหลังทำการปรับปรุงหัวเผา

ตัวแปรควบคุม	100 kW			
Biomass Fuel, kg/s (Hz)	0.0063 (0.7)			
Excess air, (%)	30	50		
Operate ID Fan(Hz)	10	10	25	
Primary Air, kg/s (% ratio)	0.0151 (30)	0.0174 (30)	0.0233 (40)	0.0291 (50)
Secondary Air, kg/s (% ratio)	0.0353 (70)	0.0407 (70)	0.0349 (60)	0.0291 (50)

วิธีการทดลอง

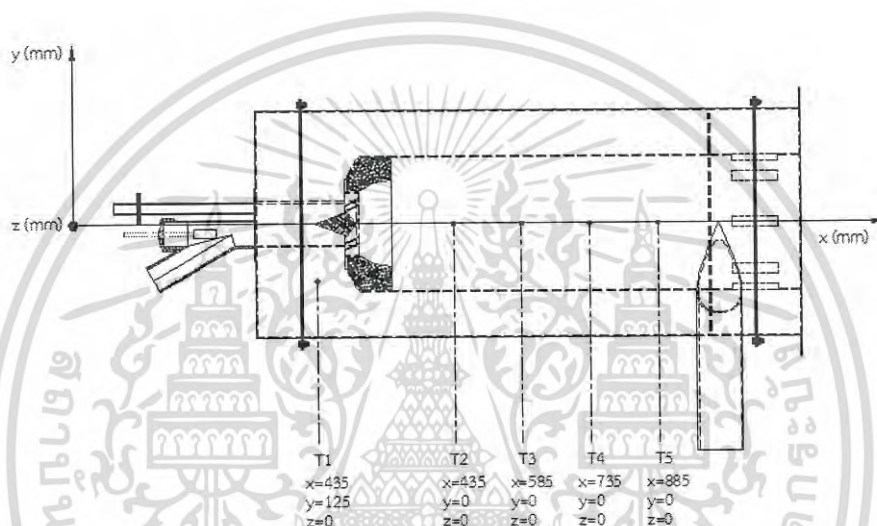
1. บดเชื้อเพลิงชีวมวลผงลงในถังพักเชื้อเพลิง (hopper)
2. ติดตั้งวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย
3. ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าสำหรับที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรูขนถ่ายตามเงื่อนไขของการทดลอง
4. เปิด switch พัดลมอากาศส่วนที่หนึ่งและอากาศส่วนที่สอง และปรับวาล์วตามเงื่อนไขของการทดลอง
5. ทำการจุดไฟด้วยอุปกรณ์ขยายแรงดันไฟฟ้า และอุ่นหัวเผาด้วยแก๊ส LPG
6. เปิด switch มอเตอร์ของสกรูขนถ่าย และอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เชื้อเพลิงผงถูกลำเลียงจากถังพักเชื้อเพลิง และลมจากพัดลมส่วนที่หนึ่งจะเป็นตัวส่งเชื้อเพลิงผงเข้าสู่หัวเผา
7. เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถเผาไหม้ด้วยตัวเองได้อย่างต่อเนื่อง ให้ทำการปิดแก๊ส LPG เมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้คงที่ ให้ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ และบันทึกภาพลักษณะของเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้ที่มีการอุ่นอากาศ
8. ทำการบันทึกค่าโอเสี่ย
9. ทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-8 โดยเปลี่ยนอัตราการจ่ายอากาศส่วนที่หนึ่งและอัตราการจ่ายอากาศส่วนที่สองตามเงื่อนไขการทดลอง

5.3.2.3 การศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้

การทดลองนี้จะเป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่มีการอุ่นอากาศ ด้วยการบันทึกค่าของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จำนวน 4 ตำแหน่ง และอุณหภูมิของการอุ่นอากาศ 1 ตำแหน่ง ประกอบกับการบันทึกภาพลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 5.27 โดยจะทำการทดสอบการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 100 kW เงื่อนไขการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.2

เงื่อนไขการทดลอง

- ตัวแปรต้น : สัดส่วนของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 5.2
 อากาศส่วนเกินที่ 30 และ 50 % ดังแสดงในตารางที่ 5.2
- ตัวแปรตาม : การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผา (°C)
 อุณหภูมิของการอุ่นอากาศ
 ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้
- ตัวแปรควบคุม : อัตราการป้อนเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่ 100 kW
 ชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่บดผ่านรูดะแกรงขนาด 0.5 และ 1 mm
 วัตถุวางการไหลรูปทรงกรวย



รูปที่ 5.27 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้หลังทำการปรับปรุง

วิธีการทดลอง

1. ทำการบดเชื้อเพลิงชีวมวลเม็ดและลำเลียงเชื้อเพลิงผงโดยใช้ระบบการขนส่งด้วยลมสำหรับนำไปจัดเก็บไว้ในถังพักเชื้อเพลิงชีวมวลผง (hopper)
2. ปรับวาล์วแรงดันที่แผงควบคุมแก๊ส LPG สำหรับปรับอัตราการไหลของแก๊ส LPG
3. ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรูขนถ่ายตามเงื่อนไขการทดลอง
4. เปิด switch พัดลมอากาศส่วนที่หนึ่งและพัดลมอากาศส่วนที่สอง และปรับวาล์วตามเงื่อนไขของการทดลอง
5. ทำการจุดไฟด้วยอุปกรณ์ขยายแรงดันไฟฟ้า และอุ่นหัวเผาด้วยแก๊ส LPG
6. เปิด switch มอเตอร์ของสกรูขนถ่าย และอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เชื้อเพลิงผงถูกลำเลียงจากถังพักเชื้อเพลิง และลมจากพัดลมสำหรับอากาศในส่วนที่หนึ่งจะเป็นตัวส่งเชื้อเพลิงผงเข้าสู่หัวเผา
7. เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถเผาไหม้ได้ด้วยตัวเองอย่างต่อเนื่อง ให้ทำการปิดแก๊ส LPG เมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้คงที่ ให้ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ และบันทึกภาพลักษณะของเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้ที่มีการอุ่นอากาศ
8. ทำการบันทึกค่าไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-8 โดยเปลี่ยนอัตราการจ่ายอากาศในส่วนที่หนึ่งและอัตราการจ่ายอากาศในส่วนที่สองตามเงื่อนไขการทดลอง

5.3.2.4 การศึกษาย่านการทำงานของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์

ในการศึกษาเพื่อหา ย่านการทำงานของหัวเผา ก๊าซสังเคราะห์สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล แข็งชนิดผง จะถูกจำกัดการทดสอบด้วยปัจจัยในหลายๆ ด้าน เช่น ขนาดของโบลเวอร์ (blower) และขีดความสามารถของหัวเผา ก๊าซสังเคราะห์ที่ทำการทดสอบ เป็นต้น ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วง 100 kW เท่านั้น โดยในกรณีที่ไม่ติดตั้งวัตถุขวางการไหล และในการกรณีติดตั้งวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย โดยใช้เงื่อนไขการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.2

เงื่อนไขการทดลอง

- ตัวแปรต้น : อัตราการป้อนอากาศ และเชื้อเพลิงชีวมวลผงดังแสดงในตารางที่ 5.2
 ตัวแปรตาม : การกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน ($^{\circ}\text{C}$)
 ตัวแปรควบคุม : ชีวมวลจากซีลี้อยู่ในรูปผงที่บดผ่านรูตะแกรงขนาด 0.5 และ 1 mm. วัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยและการปิดช่องผสมอากาศทุติยภูมิ สัดส่วนของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 อากาศส่วนเกินที่ 30 และ 50 % ดังแสดงในตารางที่ 5.2

สำหรับวิธีการทดลองนั้นจะดำเนินการเหมือนในหัวข้อที่ผ่านมา แต่จะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ของหัวเผาทั้งหมด 4 ตำแหน่ง อุณหภูมิการอุ่นอากาศ อุณหภูมิแกนกลางของห้องเผาไหม้หลัก และอุณหภูมิก่อนเข้าระบบบำบัดอย่างละ 1 ตำแหน่ง สำหรับตำแหน่งในการบันทึกอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 5.20

บทที่ 6

ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง

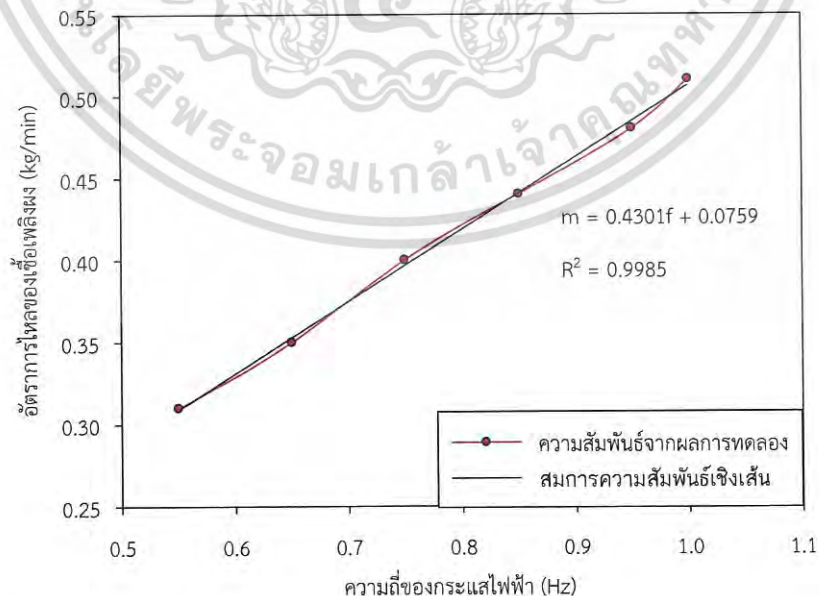
จากบทที่ผ่านมาได้ทราบถึงกระบวนการในการพัฒนาและปรับปรุงชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง รวมไปถึงวิธีการทดสอบการทำงานของชุดทดสอบ และเงื่อนไขการทดสอบการเผาไหม้ของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงเป็นที่เรียบร้อยแล้ว สำหรับในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลอง และการอภิปรายผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจะนำไปสู่ข้อสรุปทางด้านสมรรถนะการเผาไหม้ และย่านการทำงานของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผงต่อไป

6.1 ผลการทดสอบระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง

ระบบป้อนการเชื้อเพลิงชีวมวลผงเป็นระบบหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อชุดทดสอบการเผาไหม้เป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นระบบที่ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของหัวเผา หากเชื้อเพลิงถูกลำเลียงเข้าสู่หัวเผา ในลักษณะที่ไม่สามารถลำเลียงเชื้อเพลิงผงได้อย่างต่อเนื่องจะส่งผลให้การเผาไหม้ของหัวเผาทำให้ไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง อันเนื่องจากการอุดตันของเชื้อเพลิง ความดันหรือพฤติกรรมกรเผาไหม้ภายในหัวเผาที่เปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ซึ่งอาจจะนำไปสู่ปรากฏการณ์เป่าดับได้ หรือเกิดการกองของเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ ดังนั้นระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ดีต้องสามารถลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงร่วมกับอากาศป้อนได้อย่างรวดเร็ว

6.1.1 การทดลองหาอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงชีวมวล

สำหรับในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงผง (kg/min) ต่อความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz) ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง (kg/min) - ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง (kg/min) ต่อความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz) ของเชื้อเพลิงผง คือเชื้อเพลิงอัดเม็ดบดละเอียด ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับในการทดลองและได้แสดงถึงความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นเชิงเส้นระหว่างตัวแปรทั้งสองได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$m = 0.4301f + 0.0759 \text{ (kg/min)} \quad (6.1)$$

โดยที่ m คือ อัตราการขนถ่ายของเชื้อเพลิงผงบดละเอียด

f คือ ความถี่ของกระแสไฟฟ้า

6.1.1.1 การทดสอบขนาดของเชื้อเพลิงที่ผ่านการบด

จากการนำตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่บดผ่านตะแกรงที่มีขนาดรู 0.5 mm และ 1.0 mm โดยที่เครื่องบดได้ใช้ขนาดของรูตะแกรงทั้งสองขนาดรวมกันในการบด ซึ่งเชื้อเพลิงที่ผ่านตะแกรงนั้นจะต้องมีขนาดเล็กกว่า 0.5 mm และ 1.0 mm เมื่อนำไปทดสอบหาขนาดของเชื้อเพลิงที่แท้จริงผ่านวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (sieve analysis) โดยผู้วิจัยร่วม สิริธิดา สุขทั่ว [22] ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 6.1 พบว่าอนุภาคเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.425-1.0 mm คิดเป็น 35.8 % รองลงมาคือขนาด 0.180-0.299 mm คิดเป็น 18.4 % ในขณะที่ขนาดของอนุภาคอื่นมีสัดส่วนโดยเฉลี่ย 9.2 % แสดงว่าเชื้อเพลิงที่ได้จากการบดของขนาดรูตะแกรง 0.5 mm และ 1.0 mm ร่วมกันมีสัดส่วนของขนาดอนุภาคของเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบการเผาไหม้ เนื่องจากขนาดของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ต้องใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่นานขึ้น ซึ่งค่าสัดส่วนของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงที่ได้มานั้นจะถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงต่อไป

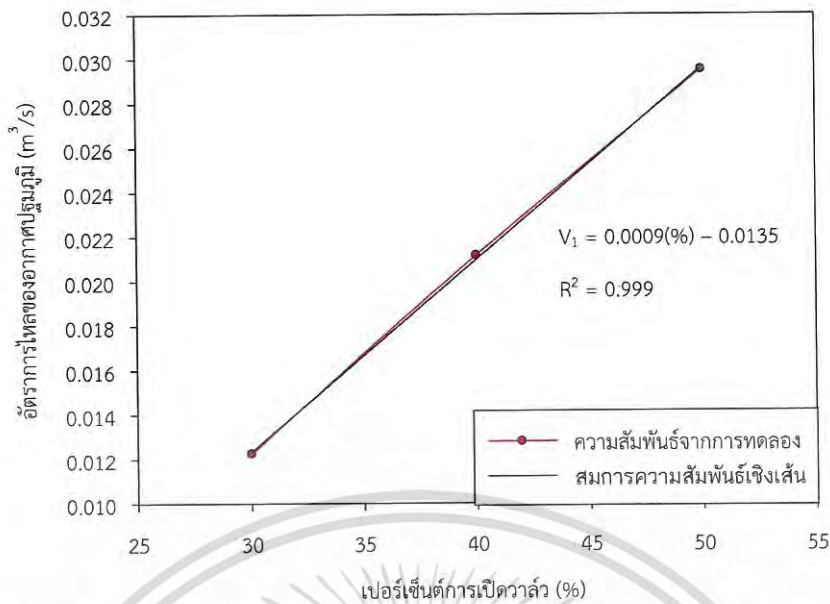
ตารางที่ 6.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผงบดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 mm และ 1 mm [22]

ขนาดอนุภาคเชื้อเพลิง	% by mass
425- 1000 μm	35.8
355 - 424 μm	9.4
300 - 354 μm	9.8
180 - 299 μm	18.4
150 - 179 μm	9.4
75 - 149 μm	8.1
0 - 74 μm	9.2

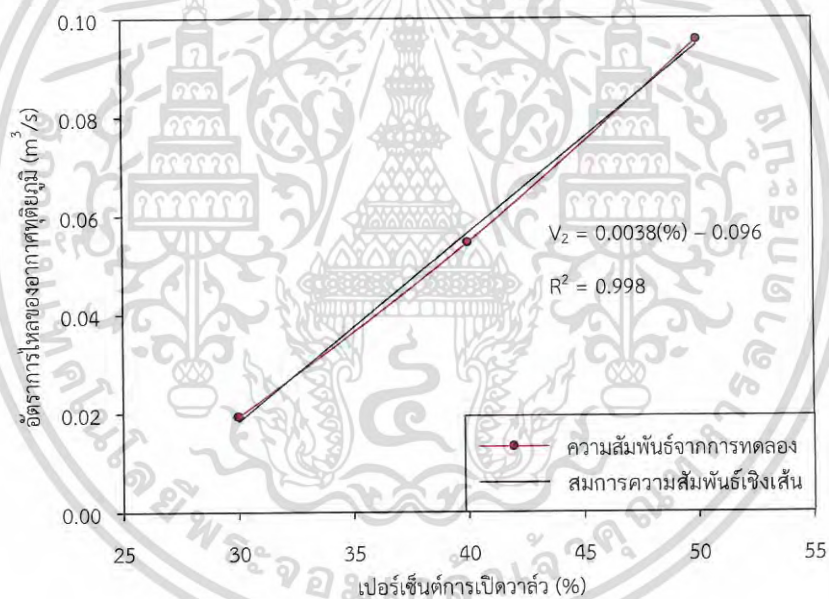
6.1.2 การทดลองหาอัตราการการป้อนอากาศปฐมภูมิ

สำหรับในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการการป้อนอากาศปฐมภูมิ (m^3/s) ต่อเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์ว (%) โดยผู้วิจัยร่วม นันทพล จันคง [26] ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 6.2 และ 6.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (m³/s) - เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์ว (%)



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (m³/s) - เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์ว (%)

จากรูปที่ 6.2 และรูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิกับอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ (m³/s) ต่อเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์ว (%) ซึ่งอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิจะเป็นอากาศหลักที่ใช้ในการเผาไหม้ สำหรับในกรณีใช้เชื้อเพลิง LPG รวมทั้งในกรณีใช้เชื้อเพลิงชีวมวล และยังใช้ในการลำเลียงเชื้อเพลิงผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้อีกด้วย สำหรับอากาศทุติยภูมิถูกออกแบบให้มีการแบ่งอากาศภายในหัวเผาออกเป็นสองส่วนคือ อากาศทุติยภูมิในส่วนที่จะได้รับการเพิ่มอุณหภูมิจากห้องเผาไหม้ในสัดส่วน 33 % ของอากาศทุติยภูมิ และอากาศทุติยภูมิในส่วนที่เหลือถูกออกแบบให้เป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ซ้ำในสัดส่วน 67 % ของอากาศทุติยภูมิ ในส่วนนี้เรียกว่า อากาศตติยภูมิ สำหรับในการทดลองสามารถควบคุมได้เพียงอัตราการไหลของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทุติยภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ได้เท่านั้น จากสมการ 6.2 และ 6.3 แสดงถึงความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นเชิงเส้นระหว่างตัวแปรทั้งสองสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_1 = 0.0009(\%) - 0.0135 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (6.2)$$

$$V_2 = 0.0038(\%) - 0.096 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (6.3)$$

โดยที่ V_1, V_2 คือ อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ % คือ เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์ว

6.2 ผลการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

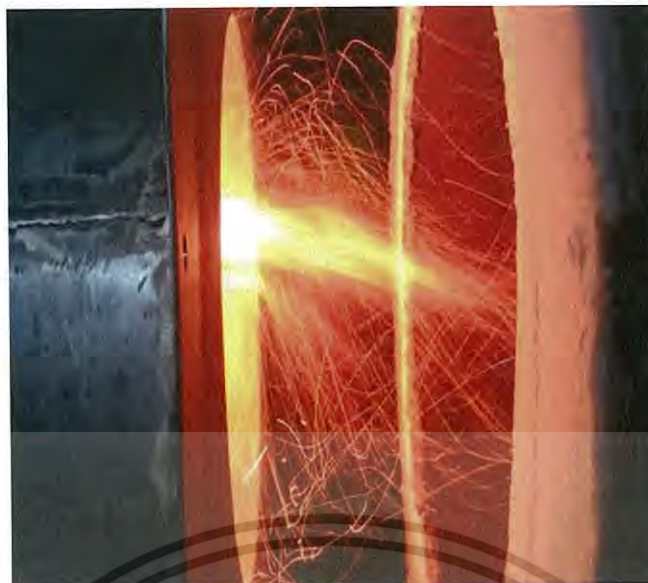
ในการทดสอบการเผาไหม้เพื่อหาสมรรถนะ และการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดแบบที่มีการอุ่นอากาศในย่านการทำงาน 100 kW ที่ได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาให้สามารถใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลได้ ต้องทำการทดสอบเป็นลำดับขั้น ได้แก่การทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิง และการทดสอบอิทธิพลของการติดตั้งวัตถุวางการไหลรูปทรงกรวย เป็นต้น เพื่อนำผลสรุปการทดลองนั้นๆ ไปใช้เป็นตัวแปรควบคุมของการทดลองในขั้นถัดไป

6.2.1 อิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงต่อพฤติกรรมการเผาไหม้

จากการทดลองเมื่อปล่อยอนุภาคเชื้อเพลิงเข้าปะทะกับเปลวไฟนาร์รองของแก๊ส LPG อนุภาคเชื้อเพลิงผงจะเข้าสู่กระบวนการทำแห้ง (drying) อุณหภูมิของอนุภาคสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำ จนอนุภาคเกิดการระเหย จากนั้นอุณหภูมิจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่กระบวนการปลดปล่อยสารระเหย (devolatilization) กระบวนการเผาไหม้สารระเหย และการเผาไหม้ถ่านชาร์ (char combustion) ตามลำดับ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดกระบวนการ (resident time) เหล่านี้ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วของแก๊สร้อนที่พัดพาอนุภาค ความเร็วของอากาศทุติยภูมิที่นำอากาศร้อนเข้ามาช่วยเผาไหม้ และขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผง เป็นต้น เมื่อพิจารณาลักษณะเปลวไฟบริเวณช่องทางออกของหัวเผาดังแสดงในรูปที่ 6.4 พบว่าลักษณะของเปลวไฟที่เกิดจากอนุภาคเชื้อเพลิงผงจะมีลักษณะที่เป็นเส้นทางเดินของปฏิกิริยาการเผาไหม้อนุภาคชาร์อย่างเห็นได้ชัดเจน นั้นแสดงว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาภายในห้องเผาไหม้สั้นกว่าระยะเวลาที่ขนาดของอนุภาคชาร์ต้องการใช้ในการเผาไหม้ และมีลักษณะเส้นทางเดินของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้เกิดการหมุนวนของอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้จะเป็นเพียงปฏิกิริยาการทำแห้ง และปฏิกิริยาการปลดปล่อยสารระเหย ในส่วนของปฏิกิริยาการเผาไหม้ถ่านชาร์จะหลุดมาเกิดที่บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ ซึ่งพฤติกรรมนี้อาจจะส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

6.2.2 การศึกษาย่านการทำงานที่เหมาะสมของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ 100 kW [2]

ในหัวนี้จะกล่าวถึงที่มาสำหรับเงื่อนไขในการทดสอบการเผาไหม้ เพื่อทำการตรวจสอบหา ย่านการทำงานที่เหมาะสม ก่อนทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ โดยได้ใช้ข้อมูลจากการทดสอบหา ย่านการทำงานของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ในงานวิจัยของ ปภัศ ชูโชติสิริ และคณะ [2] สำหรับในสัดส่วนของปริมาณอากาศปฐมภูมิ 30% อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 70% ที่อากาศส่วนเกิน 30% มีเอกสารอุณหภูมิของเปลวไฟสูงสุด หรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 แสดงลักษณะเส้นทางเดินของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผงร่วมกับเปลวไฟนํารองแก๊ส LPG

สำหรับในสัดส่วนของปริมาณอากาศปฐมภูมิ 40% อากาศหตุยภูมิและตติยภูมิ 60% ที่อากาศส่วนเกิน 0% มีอุณหภูมิของเปลวไฟสูงสุด สำหรับในสัดส่วนของปริมาณอากาศปฐมภูมิ 50% อากาศหตุยภูมิและตติยภูมิ 50% ที่อากาศส่วนเกิน 10% มีอุณหภูมิของเปลวไฟสูงสุด และสำหรับในสัดส่วนของปริมาณอากาศปฐมภูมิ 60% อากาศหตุยภูมิและตติยภูมิ 40% ที่อากาศส่วนเกิน 10% มีอุณหภูมิของเปลวไฟสูงสุด โดยสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้ในงานวิจัยของ ปภัส ชูโชติสิริ และคณะ [3] จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบย่านของสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ อากาศหตุยภูมิและตติยภูมิ อากาศส่วนเกิน เพื่อนํามากำหนดเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น ในการสร้างแบบจำลองและการทดสอบการเผาไหม้หลังจากทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์

จากการทดสอบการเผาไหม้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์ เมื่อทำจุดหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ด้วยเชื้อเพลิงแก๊ส LPG สำหรับในช่วงของการอุ่นห้องเผาไหม้ มีการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกันประมาณ 170°C ในตำแหน่งการวัดของอุณหภูมิที่ (T2 – T5) สำหรับในช่วงการป้อนเชื้อเพลิงผงร่วมกับเชื้อเพลิง LPG อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยที่ตำแหน่งบริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ (T5) จะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ และเมื่อหยุดการป้อนเชื้อเพลิงแก๊ส LPG การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ตลอดแนวแกนห้องเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 6.5 หลังจากอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงที่ จึงได้ปรับเงื่อนไขสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ อากาศหตุยภูมิและตติยภูมิ พบว่าเมื่อปรับสัดส่วนอากาศปฐมภูมิเพิ่มขึ้น และปรับลดสัดส่วนอากาศหตุยภูมิและตติยภูมิ การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จะสูงขึ้นทุกตำแหน่งของการวัด และอุณหภูมิของการอุ่นอากาศจะมีค่าของอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยมีลักษณะแนวโน้มการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ไปในทิศทางเดียวกัน ในแต่ละสัดส่วนของการปรับอากาศปฐมภูมิ อากาศหตุยภูมิและตติยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 6.6

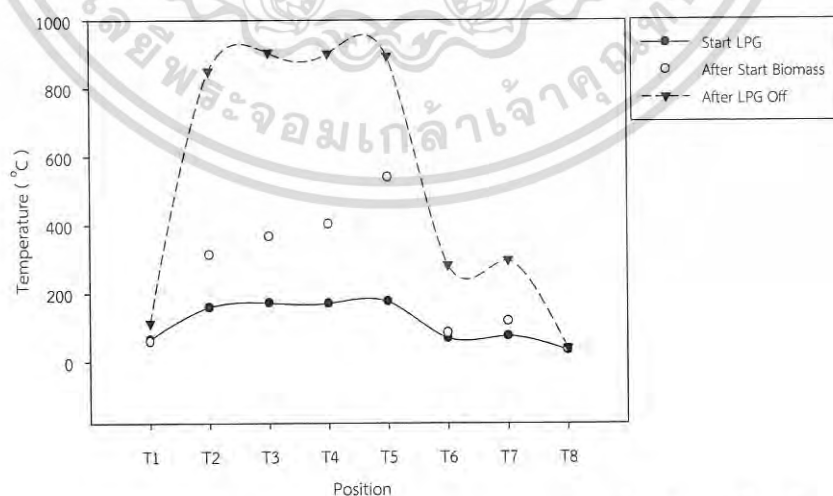
จากการทดสอบการเผาไหม้พบปัญหาเกี่ยวกับระบบการป้อนเชื้อเพลิงผงเกิดขัดข้อง จากการอุดตันเชื้อเพลิงผงภายในท่อลำเลียงขึ้น และเมื่อทำการแก้ไขระบบลำเลียงเชื้อเพลิงจึงเริ่มขั้นตอนการทดสอบขึ้น พบว่าเมื่อทดสอบในเงื่อนไขปรับอากาศปฐมภูมิ 50% อากาศหตุยภูมิและตติยภูมิ 50% อากาศส่วนเกิน 10% อุณหภูมิของการอุ่นอากาศของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์มีอุณหภูมิสูงถึง 350°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอุณหภูมิของการอุ่นอากาศมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น ดังนั้นจึงได้หยุดการทดสอบการเผาไหม้ที่เงื่อนไข สัดส่วนปริมาณอากาศปฐมภูมิ 50% อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 50% เพื่อความปลอดภัยในการทำงานของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ จากการตรวจสอบสาเหตุที่ทำให้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์มีอุณหภูมิอุ่น อากาศก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิที่สูง อาจเกิดจากในช่วงที่ระบบลำเลียง มีการขัดข้อง ทำให้มีการกองของเชื้อเพลิงผงภายในห้องเผาไหม้ และการหลุดเล็ดลอดของเชื้อเพลิงผงเข้าไปภายในบริเวณ ของการอุ่นอากาศซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องมาก่อนหน้านี้ในหัวข้อ 4.2.2 การจำลองการ เผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

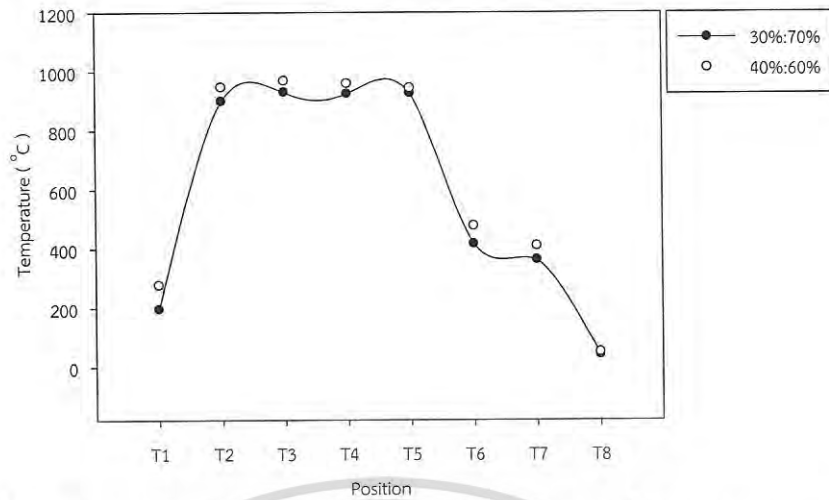
เพื่อแก้ปัญหาข้างต้น จึงต้องทำการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขดำเนินการ จากการทดลองเพิ่ม อากาศปฐมภูมิที่ 50% และ 60% พบว่าความเร็วในการขนถ่ายเชื้อเพลิงผงจะเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลต่อ ระยะเวลาในการเผาไหม้ และสัดส่วนของอากาศส่วนที่เหลือที่ป้อนเข้าสู่หัวเผา อนึ่ง โครงสร้างภายใน หัวเผาจะแบ่งอากาศที่เหลือเพื่อป้อนเข้าสู่หัวเผานี้ ออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกอากาศจะถูกแบ่งมา ไหลสวนทางกับไอเสียเพื่อถูกอุ่นให้ร้อนขึ้นก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ซึ่งถูกเรียกว่าอากาศทุติยภูมิ ส่วนที่ สองอากาศจะถูกแบ่งเพื่อเป็นอากาศตติยภูมิสำหรับการใช้ในการเผาไหม้ซ้ำ

เมื่อพิจารณาสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิที่ถูกอุ่นให้ร้อนมีปริมาณของอากาศทุติยภูมิลดลง เมื่อเพิ่มอากาศปฐมภูมิ ซึ่งอาจมีปริมาณอากาศทุติยภูมิไม่เพียงพอในการแลกเปลี่ยนความร้อนจาก ห้องเผาไหม้ ทำให้อุณหภูมิของการอุ่นอากาศสูงขึ้น ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้เลือกย่านการทำงานของหัว เผาก๊าซสังเคราะห์สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ขนาด 100 kW ที่สัดส่วนของปริมาณอากาศปฐมภูมิ 30% อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 70% อากาศส่วนเกิน 30% สำหรับในช่วงที่อุ่นหัวเผา และที่อากาศ ส่วนเกิน 50% เป็นเงื่อนไขในการทดสอบการเผาไหม้เพื่อหาสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติย ภูมิและตติยภูมิที่เหมาะสมกับการเผาไหม้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์ของเชื้อเพลิงชีวมวลผง และเป็น เงื่อนไขในการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้และเปรียบเทียบกับผลการทดลองการเผาไหม้ ใน การศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ตามเงื่อนไขการทดลองในตารางที่ 5.2 หลังจาก ทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์



รูปที่ 6.5 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในการทดสอบการเผาไหม้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์ ที่ย่านความถี่ของพัลลมดุดไอเสีย 10 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่อัตราส่วนอากาศที่ย่านความถี่ของพัลส์มดุดไอเสีย 10 Hz

6.2.3 การศึกษาอิทธิพลการเผาไหม้หลังทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ที่ 100 kW

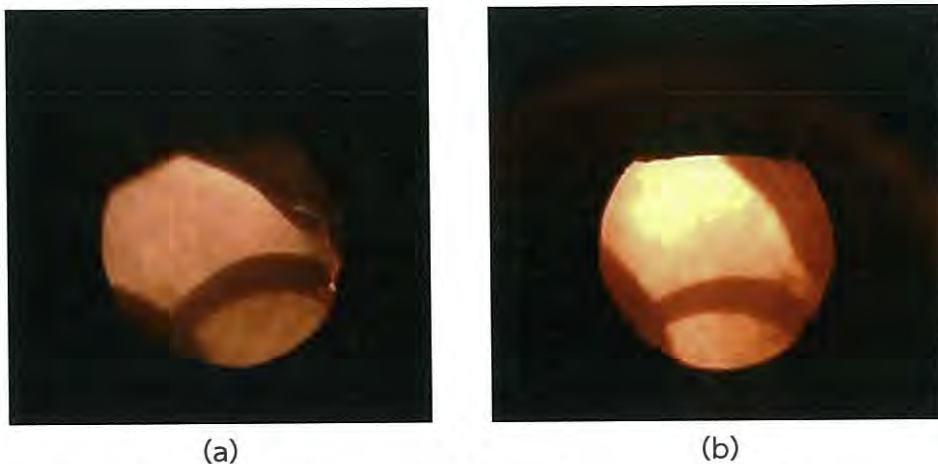
สำหรับในหัวนี้จะเป็นการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง หลังจากทำการปรับปรุงหัวเผาแก๊สสังเคราะห์ตามที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ที่กำลังความร้อน 100 kW โดยการบันทึกค่าของอุณหภูมิจะทำการบันทึกการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งหมด 8 ตำแหน่ง โดยให้ความสนใจในตำแหน่ง (T1 – T5) ดังแสดงในรูปที่ 5.27

6.2.3.1 อิทธิพลของวัตถุขวางการไหลจากการทดลอง

ในหัวข้อนี้เป็นผลการทดสอบการเผาไหม้หลังจากได้ทำการติดตั้งวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยและปิดช่องผสมอากาศทุติยภูมิ โดยได้ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในสัดส่วนอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ อากาศส่วนเกิน และย่านความถี่ของพัลส์มดุดไอเสีย ตามเงื่อนไขในตารางที่ 5.2

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในช่วงต้นเมื่อเชื้อเพลิงผงเคลื่อนที่ตามช่องทางเข้ารูปรองตัวววยเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในตำแหน่งที่ไม่สมมาตร เมื่อเชื้อเพลิงผงปะทะกับวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยเพื่อทำให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงผงเกิดฟุ้งกระจายก่อนเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (reacting zone) เมื่อเชื้อเพลิงผงจะเริ่มกระบวนการทำแห้ง (drying) และกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยตามลำดับ เมื่อพิจารณารูปที่ 6.7 (a) จะสังเกตเห็นเชื้อเพลิงผงฟุ้งกระจายซึ่งบริเวณนี้จะเป็นบริเวณการเกิดกระบวนการทำแห้งเนื่องจากอิทธิพลของการอุ่นอากาศรวมกับการแผ่รังสีความร้อนจากห้องเผาไหม้ และการปลดปล่อยสารระเหย ดังปรากฏเป็นกลุ่มหมอกสีเทา คือกลุ่มของไอน้ำและสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิงนั่นเอง หลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของสารระเหย ดังรูป 6.7 (b) ซึ่งสังเกตได้จากกลุ่มหมอกสีเทาเริ่มจางลงและเปลวไฟเริ่มสว่างขึ้น ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการเผาไหม้ในรูปที่ 4.15 (a) และ (b) และเนื่องจากขีดจำกัดทางลักษณะของโครงสร้างของหัวเผาแก๊สสังเคราะห์ ทำให้สามารถสังเกตได้เพียงจุดเริ่มต้นทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผง และบริเวณทางออกของหัวเผาจะสังเกตเห็นกระบวนการเผาไหม้ของถ่านชาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 แสดงพฤติกรรมของการเผาไหม้บริเวณวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย

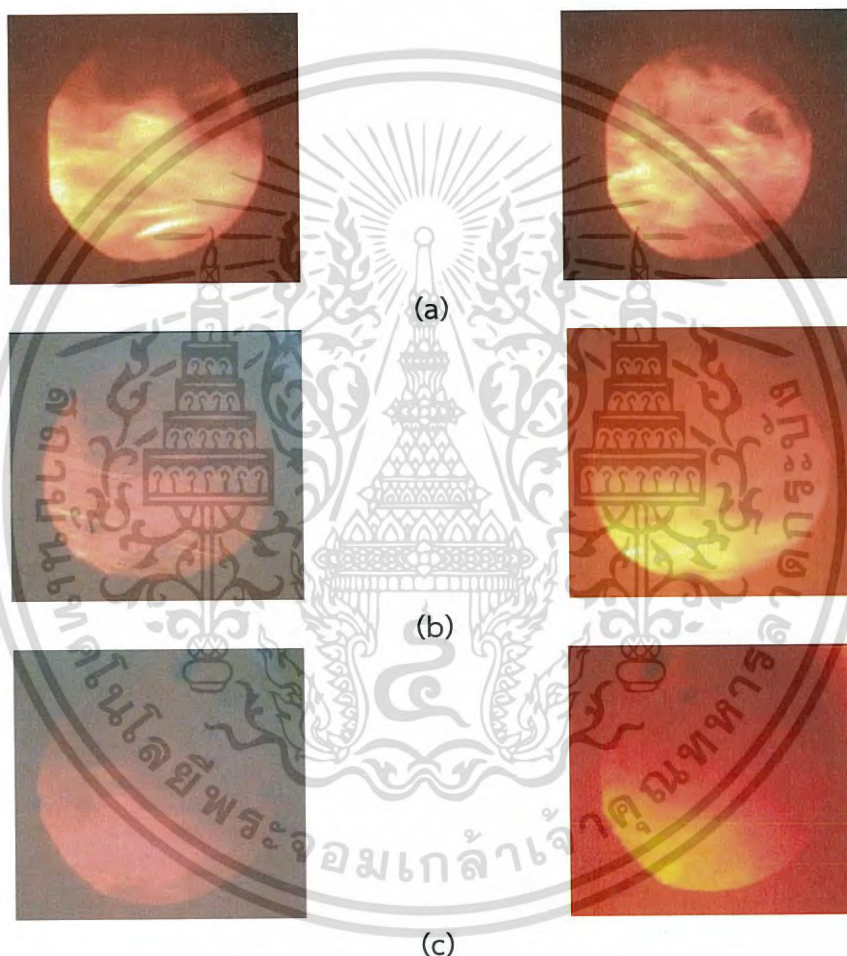
หลังจากอนุภาคของเชื้อเพลิงได้ปลดปล่อยสารระเหยจนหมด ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเผาไหม้คาร์ คือ อัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่พื้นผิวของอนุภาคและอุณหภูมิของอนุภาค ซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตามเงื่อนไขของการเกิดปฏิกิริยาที่ยังคงอยู่ [4]

เมื่อพิจารณาในช่วงที่เริ่มการปล่อยอนุภาคของเชื้อเพลิง พบว่าลักษณะของเปลวไฟที่เกิดจากอนุภาคเชื้อเพลิง และเส้นทางการเดินสะเก็ดไฟที่บ่งชี้ลักษณะของการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์ อย่างเห็นได้ชัดเจนนั่น แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาภายในห้องเผาไหม้สั้นเกินไป และยังพบปรากฏการณ์การลอยตัวของเปลวไฟเกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์ หลังจากอนุภาคของเชื้อเพลิงได้ปลดปล่อยสารระเหยจนหมดสิ้นลงภายในห้องเผาไหม้ อนุภาคของคาร์ที่เหลือเกิดกระบวนการเผาไหม้ขึ้น จากการแพร่ของออกซิเจนภายในเตาเผาเข้าสู่พื้นผิวของอนุภาคของถ่านคาร์ที่มีอุณหภูมิที่สูงทำให้เปลวไฟเกิดการลอยตัวขึ้น ดังรูปที่ 6.8 เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิของผนังเตาเผาไหม้ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิของเปลวไฟ ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองการเผาไหม้ในรูปที่ 4.13 (a) และ (b) ในเงื่อนไขการของอากาศปฐมภูมิ 30% อากาศหตุติภูมิและตติภูมิ 70% และอากาศส่วนเกิน 50% ทั้งนี้เป็นผลมาจากอิทธิพลของแรงลอยตัว (Buoyancy force)

เมื่ออุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้มีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 950 °C พบว่าลักษณะของเปลวไฟที่เกิดจากอนุภาคการเผาไหม้ของคาร์หมดไป ดังรูปที่ 6.9 (a) ซึ่งสังเกตจากเส้นทางการเดินของสะเก็ดไฟที่บ่งชี้กระบวนการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์ลดน้อยลง นั่นคือ การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้อย่างต่อเนื่องจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) ในสัดส่วนอากาศปฐมภูมิ 30% อากาศหตุติภูมิและตติภูมิ 70% และอากาศส่วนเกิน 50% และจากรูปที่ 6.9 (b) – (c) เมื่อปรับสัดส่วนอากาศปฐมภูมิ 40%, 50% อากาศหตุติภูมิและตติภูมิ 60%, 50% และอากาศส่วนเกิน 50% สังเกตเห็นลักษณะของเปลวไฟที่เกิดจากอนุภาคของเส้นทางการเดินของสะเก็ดไฟบ่งชี้ถึงการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์ และภายในเตาเผาายังสังเกตเห็นการเกิดของกลุ่มหมอกจากกระจกมองไฟเกิดจากปฏิกิริยาการทำแห้งและการปลดปล่อยสารระเหย ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นในช่วงที่เริ่มปรับเงื่อนไขสำหรับสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ อากาศหตุติภูมิ และตติภูมิ ซึ่งเมื่อปล่อยให้ระบบดำเนินการสู่สภาวะคงที่ลักษณะของความเข้มของเปลวไฟจะชัดเจนขึ้น และในการสังเกตการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิง โดยดูจากเส้นทางการเดินสะเก็ดไฟ ไม่สามารถบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์ ว่าหมดลงหรือไม่ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาก่อนหน้านี้ทำให้กระจกมองไฟเกิดเป็นฝ้าขึ้น



รูปที่ 6.8 แสดงลักษณะการลอยตัวของเปลวไฟในช่วงที่เริ่มการปล่อยอนุภาคเชื้อเพลิงผง



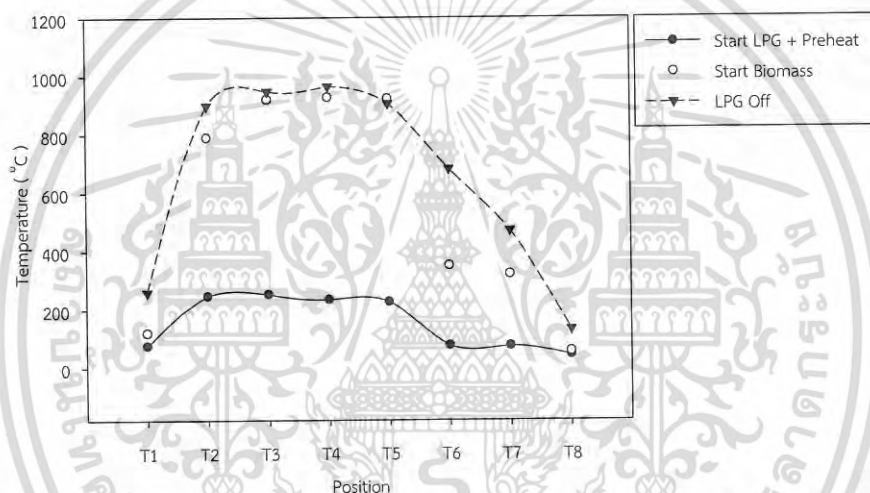
รูปที่ 6.9 แสดงลักษณะเปลวไฟภายในเตาเผาในช่วงการปล่อยเชื้อเพลิงผงและเข้าสู่สภาวะคงที่
(a) 30%:70%, (b) 40%:60%, (c) 50%:50%

6.2.3.2 การศึกษายานการทำงานหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ที่มีการอุ่นอากาศในย่านความถี่ของพัลสมดุดไอเสีย 10 Hz

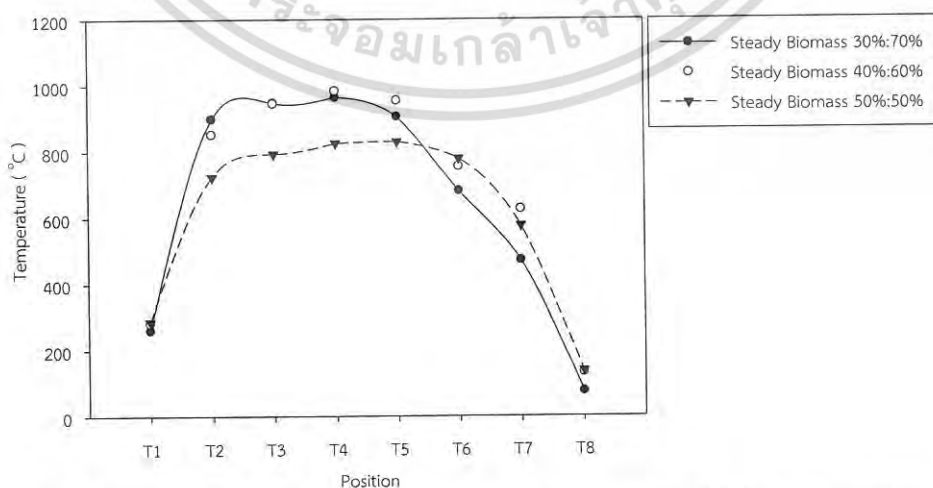
จากการศึกษายานการทำงานของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ หลังจากทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ สำหรับการติดตั้งวัตถุวางการไหลรูปทรงกรวย จากรูปที่ 6.10 หลังจากปล่อยอนุภาคของเชื้อเพลิงผงรวมร่วมกับเชื้อเพลิง LPG อุณหภูมิภายในห้องเผาใหม่จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิที่ (T3 – T5) มีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน แต่ในตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(T2) ที่อยู่ใกล้วัตถุวางการไหลมีผลของอุณหภูมิต่ำกว่าในตำแหน่งที่ (T3 – T5) หลังจากหยุดจ่ายเชื้อเพลิง LPG อุณหภูมิในตำแหน่งที่ (T2 – T5) มีแนวโน้มของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันก่อนเข้าสู่ระบบสภาวะคงที่

รูปที่ 6.11 แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ อากาศส่วนเกิน 50% พบว่าในสัดส่วนของการจ่ายอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 70% และ 60% จะมีผลการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สูงกว่าที่สัดส่วนของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 50% เนื่องจากความรุนแรงของกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้น โดยที่ในสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 70% ได้นำผลของอุณหภูมิกายในห้องเผาไหม้เปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองการเผาไหม้ในหัวข้อที่ (6.2.3.5) สำหรับอุณหภูมิของการอุ่นอากาศพบว่าเมื่อลดสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิลง อุณหภูมิการอุ่นอากาศจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งมีค่าอุณหภูมิของการอุ่นอากาศประมาณ 280 – 285 °C ดังแสดงในรูปที่ 6.12



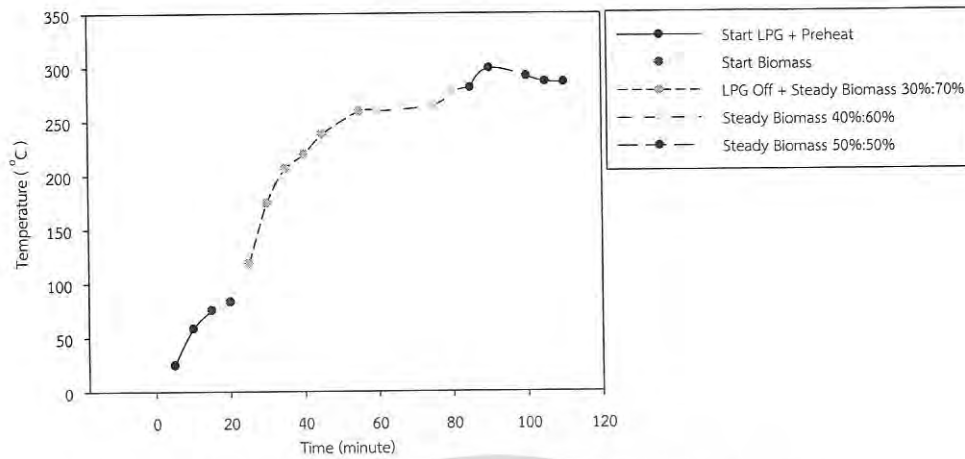
รูปที่ 6.10 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในช่วงการทดสอบการเผาไหม้หัวเผาก๊าซสังเคราะห์ ที่ย่านความถี่พัดลมดูดไอเสีย 10 Hz



รูปที่ 6.11 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่อัตราส่วนอากาศ

ที่ย่านความถี่พัดลมดูดไอเสีย 10 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิอุ่นอากาศตามขั้นตอนดำเนินการ ที่ย่านความถี่พัลสมดูลไอเสีย 10 Hz ณ ตำแหน่งที่ T1

6.2.3.3 การศึกษาย่านการทำงานหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ที่มีการอุ่นอากาศในย่านความถี่ของพัลสมดูลไอเสีย 25 Hz

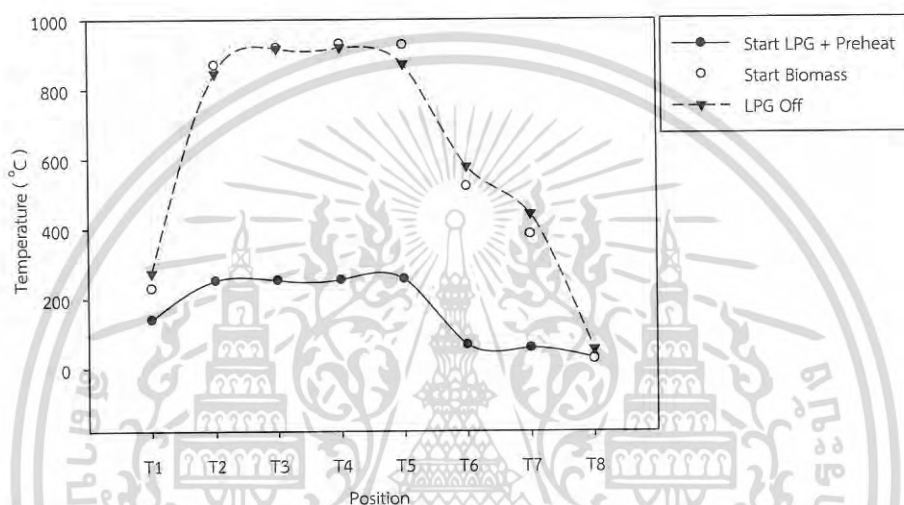
จากศึกษาอิทธิพลของย่านความถี่ของพัลสมดูลไอเสียที่ 25 Hz เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมเกี่ยวกับการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ อุณหภูมิของการอุ่นอากาศ สัดส่วนอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้น เพื่อประเมิณย่านการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีการอุ่นอากาศที่ 100 kW โดยนำผลการทดลองในย่านความถี่การทำงานของพัลสมดูลไอเสียที่ 25 Hz เปรียบเทียบกับผลการทดลองการเผาไหม้ในย่านความถี่การทำงานของพัลสมดูลไอเสียที่ 10 Hz

จากรูปที่ 6.13 – 6.14 เป็นช่วงขั้นตอนดำเนินการทดลองหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ จะมีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิเช่นเดียวกันในย่านการทำงานพัลสมดูลไอเสียที่ 10 Hz เมื่อหยุดการปล่อยเชื้อเพลิง LPG และปล่อยให้เชื้อเพลิงแข็งเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่าในสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ 30%, 40% (ซึ่งสัมพันธ์กับที่อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 70%, 60% ตามลำดับ) ภายใต้อากาศส่วนเกิน 50 % มีการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามในสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ 50 % อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 50 % ที่อากาศส่วนเกิน 50 % พบว่าอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเจนเนื่องจากสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิที่ลดลง ทำให้เกิดกระแสการหมุนวนต่ำลง อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้โดยเฉลี่ยประมาณ 760 °C

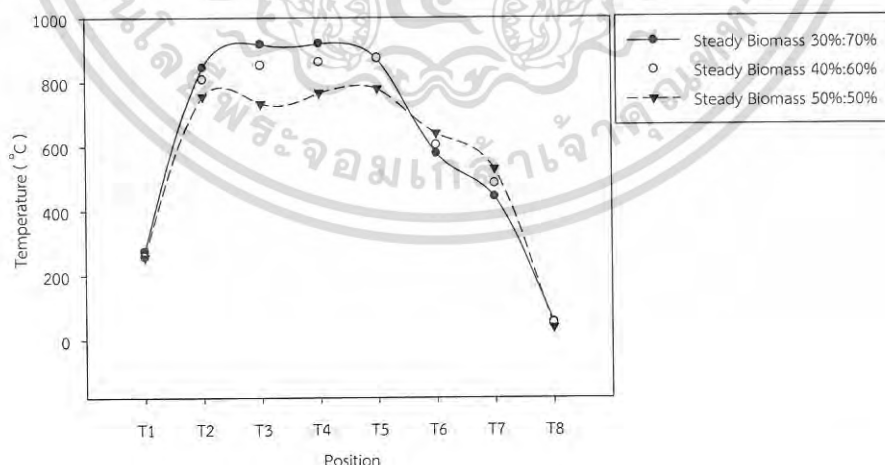
จากรูปที่ 6.15 จะแสดงถึงอุณหภูมิการอุ่นอากาศตลอดการทำงานของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ที่มีการอุ่นอากาศจนกระทั่งเป็นไปตามเงื่อนไขในการทดลอง และเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งอย่างต่อเนื่องจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่าเมื่ออุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ลดลงอุณหภูมิการอุ่นอากาศก็ลดลงตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิการอุ่นอากาศเฉลี่ยประมาณ 230 - 255 °C ในการทำงานด้วยย่านความถี่ของพัลสมดูลไอเสียที่ 25 Hz

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ในย่านความถี่ของพัลสมดูลไอเสียที่ 25 Hz จะสังเกตเห็นว่าลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิลำดับกับในย่านความถี่ของพัลสมดูลไอเสียที่ 10 Hz จากรูปที่ 6.16 (a) พบว่าในย่านความถี่ของพัลสมดูลไอเสียที่ 25 Hz ที่สัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ

30% อากาศหุติยภูมิและตติยภูมิ 70% ที่อากาศส่วนเกิน 50% ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ของซาร์หมดไป สังเกตจากการเผาไหม้อนุภาคซาร์ โดยดูจากเส้นทางเดินของสะเก็ดไฟ และจากรูปที่ 6.16 (b) – (c) สำหรับในสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ 40%, 50% (ซึ่งสัมพันธ์กับอากาศหุติยภูมิและอากาศตติยภูมิ 60%, 50% ตามลำดับ) ภายใต้อากาศส่วนเกิน 50% เมื่อพิจารณาเส้นทางเดินของสะเก็ดไฟที่เกิดจากอนุภาคของเชื้อเพลิง บ่งชี้ถึงระยะเวลาในการเผาไหม้ที่ไม่เพียงพอ ในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของอนุภาคซาร์ เนื่องจากย่านความถี่ของพัลสมดูลไอเสียที่รุนแรงเกินไป สังเกตได้จากลักษณะของเปลวไฟถูกดึงลงสู่ด้านล่างของเตาเผาไหม้ เนื่องจากน้ำหนักของอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดและยังมีมวลมาก

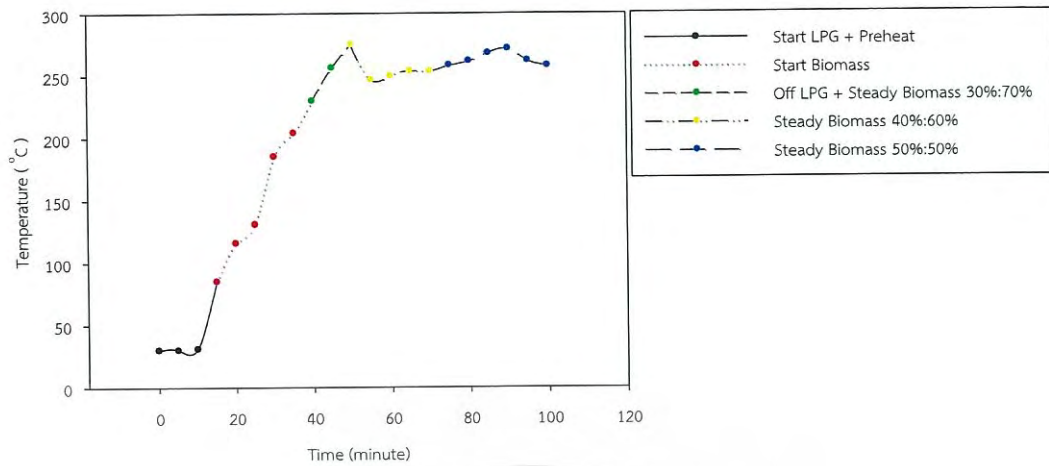


รูปที่ 6.13 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิในช่วงการทำงานของหัวเผาที่ย่านความถี่พัลสมดูลไอเสีย 25 Hz

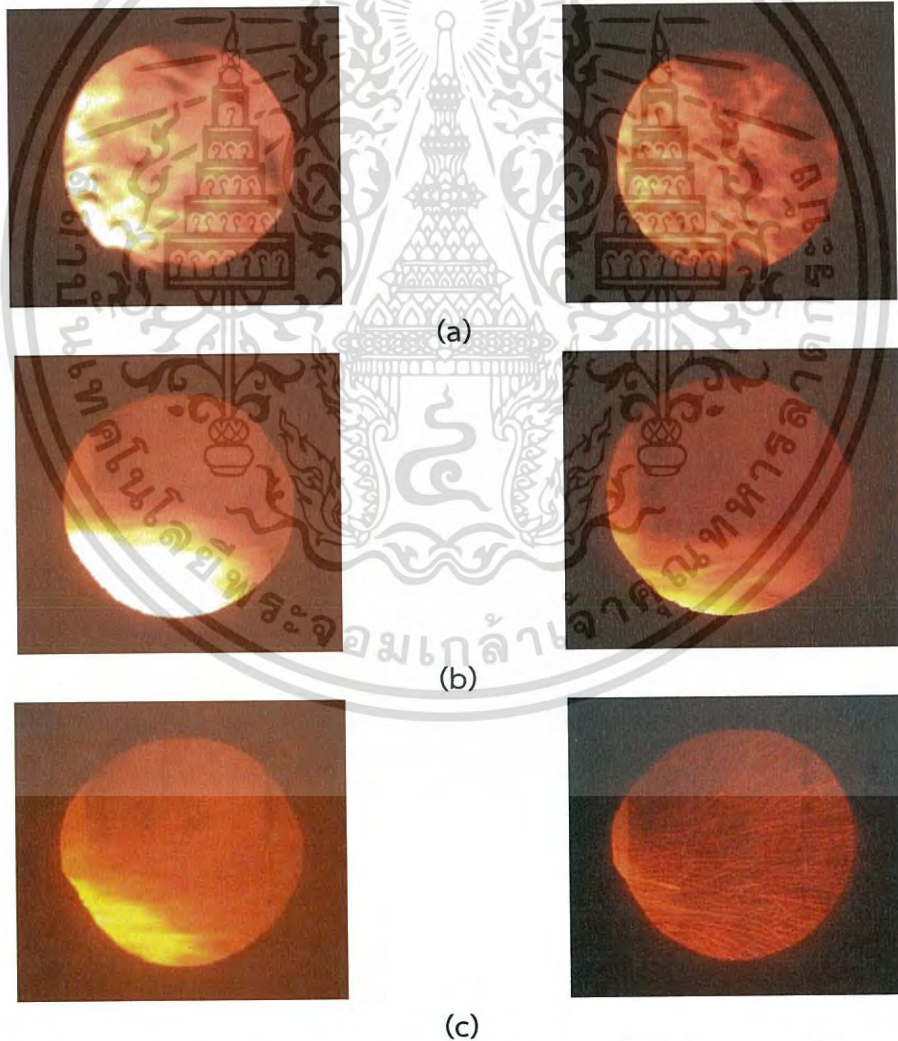


รูปที่ 6.14 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่อัตราส่วนอากาศที่ย่านความถี่พัลสมดูลไอเสีย 25 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

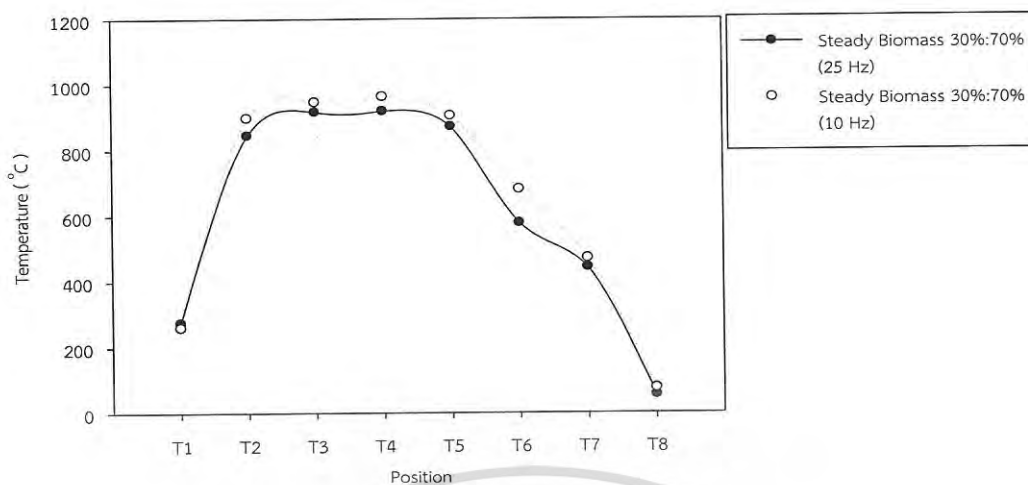


รูปที่ 6.15 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิการอุ่นอากาศตามขั้นตอนดำเนินการ ที่ย่านความถี่พัลสมดูลไอเสีย 25 Hz ณ ตำแหน่งที่ T1

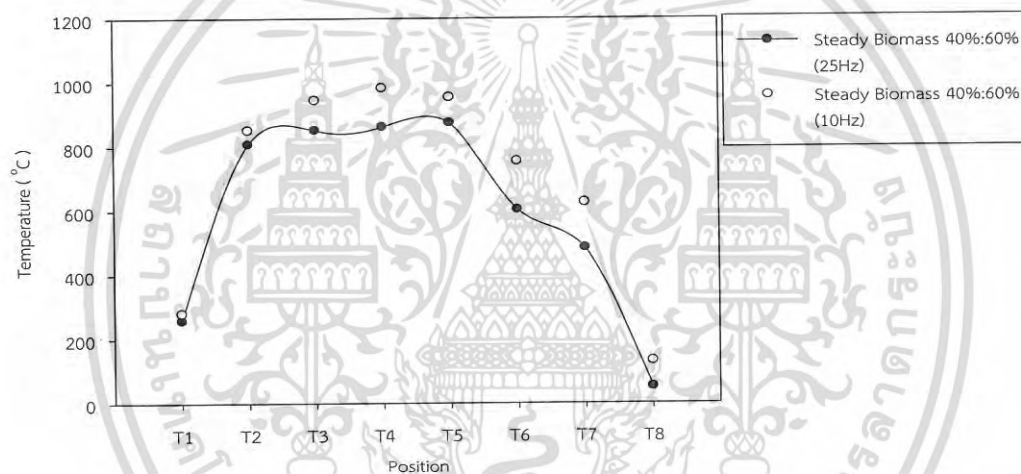


รูปที่ 6.16 แสดงลักษณะของเปลวไฟภายในเตาเผาในสภาวะคงที่ ที่ย่านความถี่พัลสมดูลไอเสีย 25 Hz

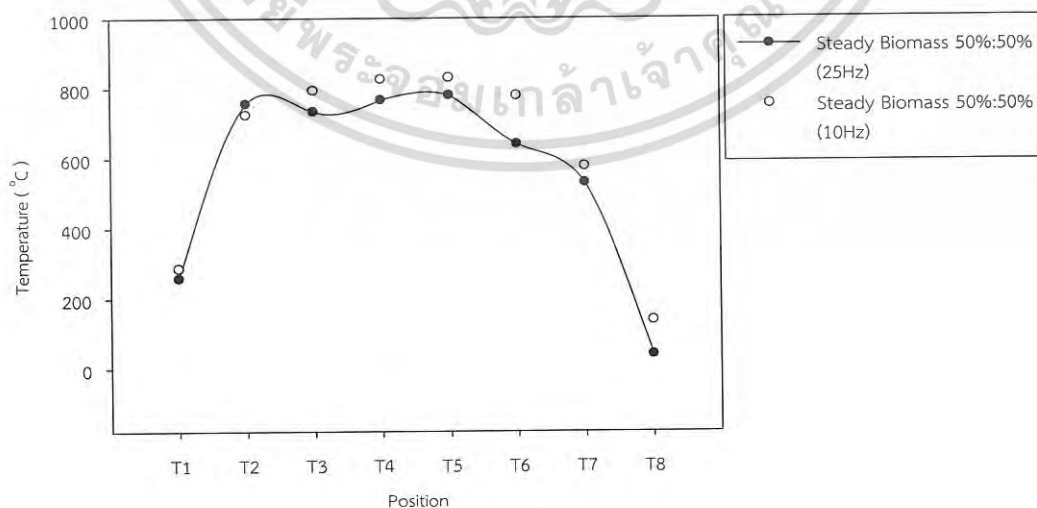
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 6.17 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สภาวะคงที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ (a) 30% : 70%, (b) 40% : 60%, (c) 50% : 50% นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

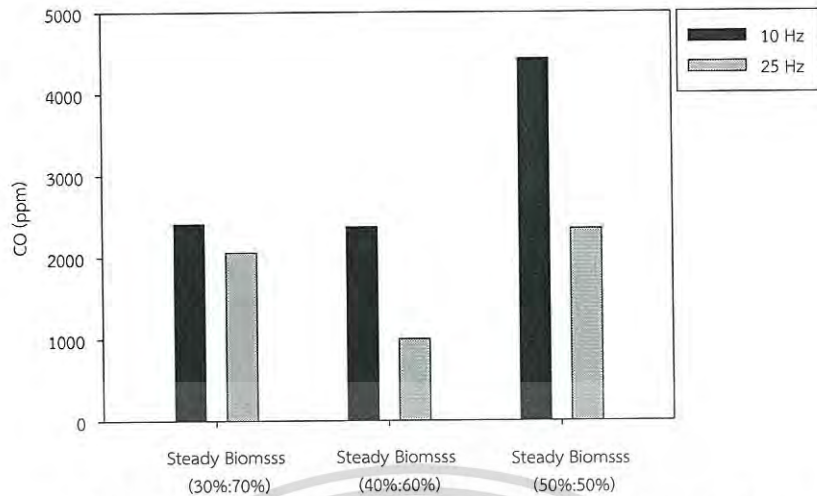
จากรูปที่ 6.17 (a) – (c) พบว่าในย่านความถี่ของพัลลคมดุดไอเสียที่ 10 Hz จะมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงกว่าในย่านความถี่ของพัลลคมดุดไอเสียที่ 25 Hz ในทุกเงื่อนไขการทดลอง และเมื่อสังเกตในการเลือกความถี่ของพัลลคมดุดไอเสียมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอนอย่างเห็นได้ชัดเจน ในเงื่อนไขการทดลองอากาศปฐมภูมิ 40%, 50% อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 60%, 50% อากาศส่วนเกิน 50% ดังรูปที่ 6.9 และ 6.16 สำหรับในการสรุปงานการทำงานของหัวเผือก๊าซสังเคราะห์จะต้องพิจารณาพฤติกรรมของการเผาไหม้ขีดจำกัดของอุปกรณ์ ความปลอดภัยในการทำงานของหัวเผาและผู้ทดสอบและอื่นๆ ซึ่งจะได้กล่าวในบทถัดไป

6.2.3.4 ปริมาณแก๊สไอเสีย

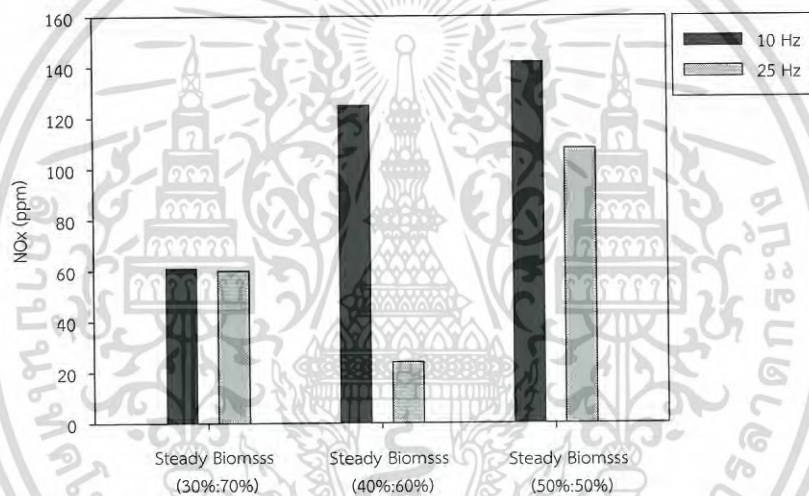
ไอเสียถือเป็นตัวแปรหนึ่งที่สามารถบ่งชี้ถึงสมรรถนะของชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้ได้ หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ดีต้องสามารถเหนี่ยวนำให้อากาศ และเชื้อเพลิงเกิดการผสมผสานจนเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และปลดปล่อยแก๊สพิษ (CO NO_x และ HC) ในปริมาณต่ำ

แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้อาจจะมีสาเหตุมาจากหลายด้าน เช่น สภาพการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป ปริมาณอากาศส่วนเกินน้อยเกินไป ระยะเวลาในการเผาไหม้ไม่เพียงพอ และการผสมคลุกเคล้ากันไม่ดีพอ เป็นต้น แต่จากที่ได้กล่าวไปในข้างต้นสำหรับการทดสอบการเผาไหม้นี้ อัตราส่วนของอากาศส่วนเกินที่เหลือไปกับไอเสียในปริมาณที่ค่อนข้างสูง จึงทำให้ตัดข้อสันนิษฐานในสองประการแรกออกไปได้ ดังนั้นประเด็นที่ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จึงเกิดจากการผสมคลุกเคล้าที่ไม่ดีพอระหว่างอากาศ และระยะเวลาในการเผาไหม้ของอนุภาค เมื่อพิจารณารูปที่ 6.18 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หลังการเผาไหม้ พบว่าปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดค่าได้จากไอเสียในสภาวะคงที่ ในสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 30%:70%, 40%:60% และ 50%:50% อากาศส่วนเกิน 50% ในย่านความถี่ของพัลลคมดุดไอเสีย 10 Hz และ 25 Hz มีค่าปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงเกินค่ากำหนดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม บ่งชี้ว่าสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิและตติยภูมียังไม่เหมาะสม ระยะเวลาในการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงไม่เพียงพอ สังเกตได้จากการเผาไหม้ อนุภาคเชื้อเพลิงเส้นทางเดินของสะเก็ดไฟที่เกิดขึ้นในเงื่อนไขของการทดลองที่กำหนด

เมื่อพิจารณาปริมาณออกซิเจนของไนโตรเจน (NO_x) ที่ปนอยู่ในแก๊สไอเสีย ดังรูปที่ 6.19 ในการวัดค่าปริมาณออกซิเจนของไนโตรเจนที่ปนอยู่ในแก๊สไอเสียได้น้อยมาก เนื่องจากหัวเผือก๊าซสังเคราะห์ที่มีการอุ่นอากาศเป็นเทคนิคที่ช่วยลดการเกิด NO_x โดยอากาศที่ใช้เผาไหม้ถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิสูง ซึ่งช่วยลดความเข้มข้นของออกซิเจนทำให้อุณหภูมิของเปลวไฟลดลง และเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน (N) ที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับถ่านหิน บวกกับชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ ส่งผลให้การเผาไหม้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ เมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้ต่ำกว่า 1500 K กลไกในการเกิด thermal NO_x จะไม่ใช่ปัจจัยหลักของปริมาณมลพิษที่วัดได้ ดังนั้นจึงอาจจะสรุปได้ว่าออกซิเจนของไนโตรเจน (NO_x) ที่วัดค่าได้นั้นเกิดจาก Fuel NO_x [4]



รูปที่ 6.18 แสดงปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หลังการเผาไหม้



รูปที่ 6.19 แสดงปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) หลังการเผาไหม้

6.2.3.5 การตรวจสอบผลจากแบบจำลอง และผลจากการทดลอง (Validation)

ในหัวข้อนี้เป็นผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ หลังจากทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ และผลจากการทดสอบการเผาไหม้ โดยเงื่อนไขที่จะนำมาใช้เป็นกรณีศึกษาคือ ในกรณีที่ใช้สัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ 30% อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 70% และอากาศส่วนเกิน 50% ที่กำลังการผลิตทางความร้อน 100 kW ซึ่งรายละเอียดของโครงสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ และหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ สำหรับในหัวข้อนี้จะให้ความสนใจในส่วนของ ตำแหน่งการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ในตำแหน่งที่ (T2 – T5)

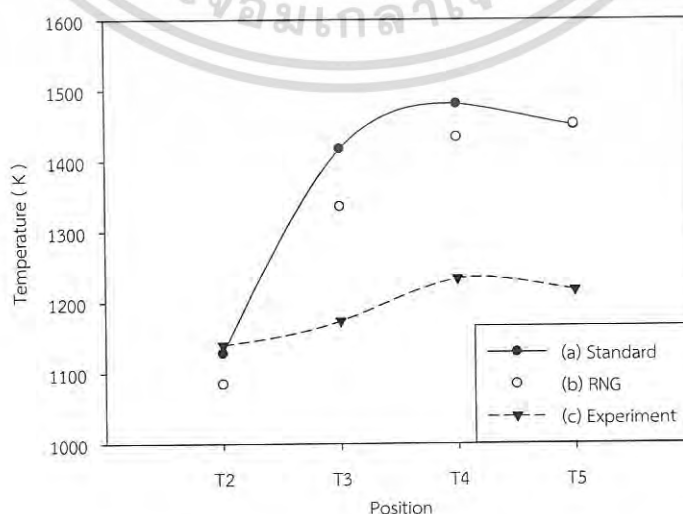
จากรูปที่ 6.20 จากผลการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง พบว่าแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ ให้ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ในตำแหน่งที่ (T3 – T5) มีลักษณะ แนวโน้มของอุณหภูมิเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการทดลอง แต่ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิใน ตำแหน่งดังกล่าวนี้สูงกว่าผลจากการทดลองอยู่มาก และสำหรับในตำแหน่งที่ (T2) ให้ผลของ อุณหภูมิต่ำกว่าการทดลอง ดังนั้นทางผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานว่าในการใช้แบบจำลองการเผาไหม้ใน เอกสารโปรแกรม ANSYS โดยพื้นฐานค่าคงที่จะคำนวณมาจากถ่านหิน ซึ่งคุณสมบัติทางความร้อนของถ่านหิน ไม่วากกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หินจะสูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวล และในงานวิทยานิพนธ์จะพิจารณาตัวแปรที่น่าจะมีผลต่ออุณหภูมิ คือ ตัวแปรที่เรียกว่า State enthalpy หรือเรียกค่าความร้อนการก่อตัวเพื่อทำการศึกษาระยะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้น โดยได้ทำการปรับลดค่าดังกล่าว จากค่า Standard state enthalpy ที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม ดังแสดงในตารางที่ 6.2

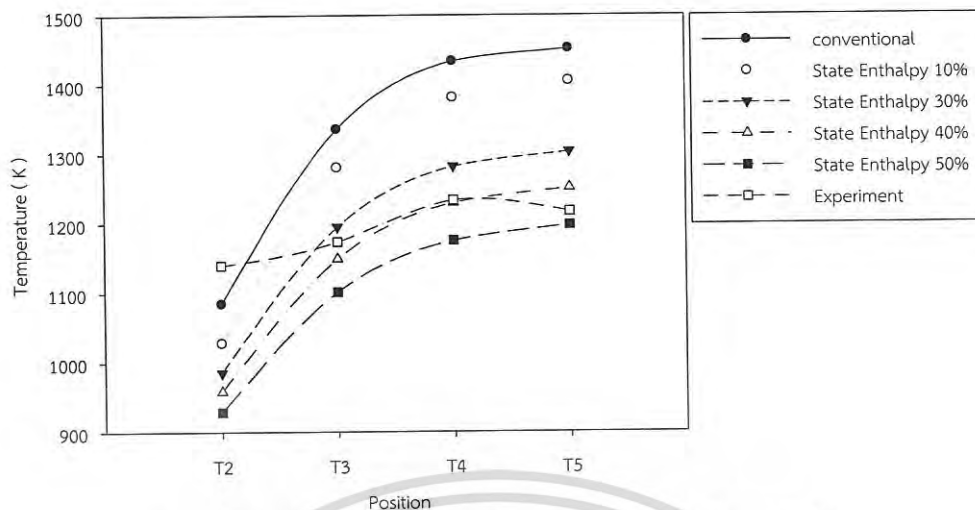
ตาราง 6.2 แสดงสัดส่วนการปรับลดค่า Standard state enthalpy

สัดส่วนการปรับลดค่า Standard state enthalpy (%)	Standard state enthalpy (j/kgmol)
Standard	-2.79898×10^8
10	-3.07888×10^8
30	-3.63867×10^8
40	-3.91857×10^8
50	-4.19847×10^8

จากรูปที่ 6.21 พบว่าหลังจากปรับลดค่าของ Standard state enthalpy ลงทำให้ค่าของการกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งค่า Standard state enthalpy ที่สัดส่วนการปรับลดที่ 40% ให้ค่าของการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองในตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ (T4) สำหรับในตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ (T2) มีค่าของอุณหภูมิที่ต่างกันมาก ซึ่งจากการสันนิษฐาน มีความเป็นไปได้ว่า อุปกรณ์การวัดอุณหภูมิที่ไปวางการไหลของอนุภาคเชื้อเพลิงผงทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดการเผาไหม้รอบ ๆ แกนของอุปกรณ์เครื่องมือวัดทำให้ผลการวัดในตำแหน่งดังกล่าวมีค่าสูง และในตำแหน่งการวัด (T5) เกิดจากความผิดพลาดของแบบจำลองการเผาไหม้บริเวณช่องทางเข้าอากาศศตติยภูมิ เนื่องจากช่องทางเข้าบริเวณดังกล่าวได้ถูกปรับช่องทางเข้าให้แคบลง สำหรับให้อากาศศตติยภูมิที่จะไหลผ่านให้มีสัดส่วนที่ลดน้อยลง เพื่อที่จะทำให้สัดส่วนของอากาศศตติยภูมิมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการอันการไหลของอากาศซึ่งทำให้บริเวณดังกล่าวมีการถ่ายเทความร้อนทำให้อุณหภูมิในบริเวณดังกล่าวลดต่ำลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 6.20 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.21 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้
ในการปรับสัดส่วนค่า Standard State enthalpy

จากผลที่ได้จากการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง และการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การสร้างแบบจำลอง เพื่อนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการพัฒนาปรับปรุงหัวเผาแก๊สสังเคราะห์ที่มีการอุ่นอากาศ ในการทำนายปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ และทำให้สามารถนำผลที่ได้มากำหนดเป็นเงื่อนไขเริ่มในการทดลอง หรือในการตรวจสอบปัจจัยต่างๆ ที่ให้ ความสนใจ สำหรับผลที่ได้จากการทดสอบการเผาไหม้ และการสร้างแบบจำลองจะนำไปสรุปในบทถัดไป

สรุป และข้อเสนอแนะ

7.1 บทสรุป

จากการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ที่มีการอุ่นอากาศ กำลังการผลิตทางความร้อน 100 kW โดยการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการทำนายปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผง ซึ่งได้นำข้อมูลจากการศึกษาการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ในอดีตนำมาใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ เพื่อทำการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ และปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเสียงหรือเกิดความเสียหายต่อชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ เมื่อทราบสาเหตุการเกิดปัจจัยความเสี่ยงต่อโครงสร้างของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ จึงนำผลที่ได้มาทำการปรับปรุงหัวเผา และเงื่อนไขในการทดสอบหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ที่มีการอุ่นอากาศ

ในการจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ที่มีการอุ่นอากาศ ในลักษณะของการตัดรายละเอียดช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงผงรูปทรงตัววาย (Non-Y shaped) เมื่อจ่ายอากาศปฐมภูมิ และเชื้อเพลิงผงเคลื่อนตัวเข้าสู่ห้องเผาไหม้ตามแนวแกน ในตำแหน่งที่ช่องทางเข้าไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้ พบว่าด้วยลักษณะของช่องทางเข้าดังกล่าว ทำให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงผงบางส่วนเริ่มติดไฟหลุดเคลื่อนผ่านเข้าช่องผสมอากาศทุติยภูมิในบริเวณของการอุ่นอากาศ ส่งผลให้บริเวณของการอุ่นอากาศมีอุณหภูมิที่สูง ทำให้แบบจำลองไม่สามารถเข้าสู่หาคำตอบ สำหรับในเงื่อนไขสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ 30% อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 70% อากาศส่วนเกิน 30% ซึ่งการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงผงไม่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบริเวณช่องผสมการอุ่นอากาศ

จากผลการจำลองการเผาไหม้ เพื่อประเมินอิทธิพลของลักษณะของช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงผงรูปทรงตัววาย Non-Y shaped และ Y shaped ทำให้ทราบว่าช่องทางเข้ารูปทรงตัววายมีผลต่อเส้นทางเดินของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้ และส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดปัจจัยความเสี่ยง คือ การเกิดจุดร้อน (hot spot) ภายในผนังห้องเผาไหม้ชั้นใน

อีกหนึ่งปัจจัยเสี่ยงที่แสดงให้เห็นจากแบบจำลองและยืนยันจากการทดสอบการเผาไหม้ คือ ลักษณะการไหลในช่องทางเดินอากาศทุติยภูมิ เนื่องจากเชื้อเพลิงผงจะหลุดเคลื่อนเข้าไปในบริเวณของการอุ่นอากาศ ซึ่งปัจจัยความเสี่ยงดังกล่าวตรวจสอบพบในกระบวนการการสร้างแบบจำลองและการทดสอบการเผาไหม้ซ้ำก่อนทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ในครั้งที่สอง จากผลการจำลองการเผาไหม้ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่เกิดจุดร้อน เนื่องจากตำแหน่งทางเข้าอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้ ด้วยการติดตั้งวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย และปิดช่องผสมอากาศทุติยภูมิเพื่อป้องกันการหลุดเคลื่อนของเชื้อเพลิงผงเข้าสู่บริเวณของการอุ่นอากาศและเกิดการเผาไหม้ขึ้นโดยทำการปิดช่องผสมอากาศทุติยภูมิ

การทดสอบการเผาไหม้เบื้องต้น แบ่งออกสามกรณีศึกษาและข้อสรุปของแต่ละกรณี ได้แก่

1. การทดสอบการเผาไหม้เบื้องต้น โดยอ้างอิงเงื่อนไขดำเนินการจากงานวิจัยในอดีต เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขของการทำงานของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ และปัจจัยความเสี่ยงที่เกิดขึ้น เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ในเงื่อนไขการทดสอบการเผาไหม้ ที่อากาศปฐมภูมิ 40% อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 60% อากาศส่วนเกิน 30% พบว่าอากาศในช่องการไหลทุติยภูมิมีอุณหภูมิที่สูงประมาณ 350 °C หลังจากทำการตรวจสอบภายในห้องเผาไหม้ สาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักศึกษาไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการอุ่นอากาศมีอุณหภูมิที่สูง เกิดจากการกองของเชื้อเพลิงผงภายในห้องเผาไหม้ ในขณะดำเนินการทดสอบระบบลำเลียงของเชื้อเพลิงผงเกิดความขัดข้อง จึงได้ทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์โดยการติดตั้งวัตถุขวางการไหล การปิดช่องผสมอากาศทุติยภูมิ และเพิ่มสัดส่วนของอากาศส่วนเกิน 50% ในเงื่อนไขดำเนินการทดสอบหลังจากทำการปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์

2. การทดสอบการเผาไหม้เมื่อติดตั้งวัตถุขวางการไหล และปิดช่องผสมอากาศทุติยภูมิ ในเงื่อนไขดำเนินการทดสอบการเผาไหม้ที่ความถี่ของพัลลมดุดไอเสียที่ 10 Hz ในสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ 30% อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 70% อากาศส่วนเกิน 50% พบว่ามีการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้โดยเฉลี่ยประมาณ 950 °C อุณหภูมิการอุ่นอากาศโดยเฉลี่ยประมาณ 260 °C มีลักษณะการเกิดของเปลวไฟที่มีเสถียรภาพ สังเกตจากเส้นทางเดินของสะเก็ดไฟที่บ่งชี้กระบวนการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอนน้อยลง สำหรับในสัดส่วนอากาศปฐมภูมิ 40%, 50% ที่อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 60%, 50% ตามลำดับ อากาศส่วนเกิน 50% เมื่อปรับสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิลดลง การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ลดต่ำลง และไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟได้ สังเกตจากเส้นทางเดินของสะเก็ดไฟที่บ่งชี้กระบวนการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอนยังไม่หมดลงภายในห้องเผาไหม้ จึงถูกแรงดูดจากพัลลมดุดไอเสียดึงอนุภาคที่เผาไหม้ไม่หมด และมีมวลมากพอที่จะเอาชนะแรงลอยตัว ตกลงสู่ด้านล่างของเตาเผา จึงสังเกตเห็นเปลวไฟลงสู่ด้านล่างของเตาเผา

3. การทดสอบการเผาไหม้เมื่อติดตั้งวัตถุขวางการไหล และปิดช่องอากาศทุติยภูมิ ในเงื่อนไขดำเนินการทดสอบการเผาไหม้ที่ความถี่ของพัลลมดุดไอเสียที่ 25 Hz ในสัดส่วนอากาศปฐมภูมิ 30% อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 70% อากาศส่วนเกิน 50% มีการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้โดยเฉลี่ยประมาณ 890 °C อุณหภูมิการอุ่นอากาศโดยเฉลี่ยประมาณ 275 °C มีลักษณะการเกิดของเปลวไฟที่มีเสถียรภาพ สังเกตจากเส้นทางเดินของสะเก็ดไฟที่บ่งชี้กระบวนการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอนน้อยลง และไม่ถูกแรงดูดจากพัลลมดุดไอเสียดึงอนุภาคที่เผาไหม้ไม่หมด ตกลงสู่ด้านล่างของเตาเผา สำหรับในสัดส่วนอากาศปฐมภูมิ 40%, 50% อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 60%, 50% ตามลำดับ อากาศส่วนเกิน 50% เมื่อปรับสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิลดลง การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ลดต่ำลง และไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟได้ เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์การเผาไหม้เช่นเดียวกับในกรณีที่ 2 ในสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ 40%, 50% ที่อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 60%, 50% ตามลำดับ อากาศส่วนเกิน 50%

มลพิษไอเสียถือเป็นตัวแปรหนึ่งที่สามารถบ่งชี้ถึงสมรรถนะของชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้ได้ หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ดีต้องสามารถเหนี่ยวนำให้อากาศ และเชื้อเพลิงเกิดการผสมผสานจนเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และปลดปล่อยแก๊สพิษในปริมาณต่ำ เมื่อพิจารณาแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้จะพบว่าสัดส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดค่าได้จากไอเสียที่ 100 kW ในย่านความถี่พัลลมดุดไอเสีย 10 Hz ที่สัดส่วนอากาศปฐมภูมิ 30%, 40%, 50% อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ 70%, 60%, 50% อากาศส่วนเกิน 50% ค่าเท่ากับ 2409 ppm 2371 ppm และ 4431 ppm ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณสูงเนื่องจากการผสมคลุกเคล้าที่ไม่ดีพอระหว่างอากาศ ขนาดของอนุภาคของเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ และระยะเวลาในการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอนที่สั้น จึงทำให้วัดค่าของคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณที่สูง แต่เมื่อพิจารณาปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) พบว่าปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่ปนอยู่ในแก๊สไอเสียมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานอุตสาหกรรม (ไม่เกิน 200 ppm) เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน (N) ที่ค่อนข้างน้อย บวกกับการเผาไหม้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางธุรกิจ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ต่ำกว่า 1500 K กลไกในการเกิด thermal NO_x จึงไม่ใช่องค์ประกอบหลักของปริมาณมลพิษที่ตรวจวัดได้นี้ ดังนั้นจึงอาจจะสรุปไปว่าออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่วัดค่าได้นั้นมาจาก Fuel NO_x และหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ที่มีการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้ ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนลดลงมีผลต่อการปลดปล่อย NO_x อย่างมีนัยสำคัญ

การตรวจสอบผลจากแบบจำลองและผลการทดสอบ พบว่าในงานวิทยานิพนธ์นี้ค่าความร้อนก่อตัว (enthalpy of formation) สำหรับในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยเมื่อปรับค่าความร้อนก่อตัวลดลงจากค่า Default ของโปรแกรม พบว่าเมื่อปรับค่าความร้อนก่อตัวลดลง 40 % ของค่า standard ส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลของทดสอบการเผาไหม้ในตำแหน่งที่ (T3 – T5) และในตำแหน่งการวัดที่ (T2) โดยผลที่ได้จากการทดลองมีค่าของอุณหภูมิสูงกว่าผลที่ได้จากแบบจำลองการเผาไหม้ โดยได้ตั้งข้อสันนิษฐานว่าสาเหตุที่ทำให้ในตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ (T2) จากการทดลองมีอุณหภูมิที่สูง เนื่องจากโพรบอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ ขวางเส้นทางเดินการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอนทำให้เกิดการเผาไหม้บริเวณรอบแกนโพรบอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ ซึ่งทำให้ในตำแหน่ง (T2) มีอุณหภูมิการวัดที่สูง และทำให้ทราบถึงอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้คือ ในตำแหน่งของการติดตั้งโพรบการวัดอุณหภูมิที่เปรียบเสมือนกับวัตถุขวางการไหลซึ่งมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้

จากการสร้างแบบจำลองและการทดลองทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ ซึ่งส่งผลต่อปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นของแต่ละเงื่อนไขที่ได้ทำการศึกษา โดยจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ต่อไป

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้จะทำการกล่าวถึงข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีการอุ่นอากาศ สำหรับในงานวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับในการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง ต่อไปในอนาคต หรือเพื่อนำข้อมูลการวิจัยไปต่อยอด และใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผ่าสำหรับการใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยมีรายละเอียดดังนี้

7.2.1 ควรมีการออกแบบและแก้ไขตำแหน่งช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงผงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้

7.2.2 ควรมีการปรับปรุงในส่วนของการแบ่งสำหรับอากาศทุติยภูมิและอากาศตติยภูมิให้สามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศได้เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน

7.2.3 ควรทำการศึกษาขนาดและรูปทรงของวัตถุขวางการไหล สำหรับในการกระแสรไหลหมุนวนเพื่อช่วยให้เกิดเสถียรภาพของเปลวไฟ

7.2.4 ควรทำการศึกษาสัดส่วนของอากาศทั้งสามส่วน ที่มีความเหมาะสมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่กำลังความร้อนต่างๆ รวมไปถึงศึกษาถึงอากาศส่วนเกินที่มีความเหมาะสมกับหัวเผาและการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

7.2.5 ควรทำการศึกษาถึงศักยภาพด้านการแผ่รังสี การนำและการพาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุง และพัฒนาหัวเผ่าให้มีศักยภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของแก๊สร้อน และมวลอนุภาคเชื้อเพลิง ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มสมรรถนะ และประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหัวเผา

7.2.6 ทำการศึกษาเพื่อหาขีดจำกัดทางความร้อนของหัวเผาก๊าซสังเคราะห์ที่มีการอุ่นอากาศการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] The Japan Institute of Energy. 2008. คู่มือสารชีวมวลเอเชีย แนวทางสำหรับการผลิตและการใช้สารชีวมวล. [online]. Available <http://www.jie.or.jp/biomass/>
- [2] จิตพงษ์ กนกนัยการ และปรินทร์ แจ็งไธสง. การพัฒนาต้นแบบเตาปฏิกรณ์ก๊าซสังเคราะห์จากชีวมวล. ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [3] ปภัส ชูโชติศิริ, ฝไทรซ์ สีดา, และสมิทธิ์ เกษตรภิบาล การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงระดับอุตสาหกรรมที่มีการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้. ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [4] ชินภัทร ชูระการ “การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558
- [5] ธนภัทร ภักดีวรวงศ์. “การจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [6] Lingling Zhao, Qiangtai Zhou and Changsui Zhao “Flame characteristics in a novel petal swirl burner.” *Combustion and Flame* 155 (2008) 277–288
- [7] Ashwani K. Gupta “Flame characteristics and challenges with high temperature air combustion.” *Proceedings of the International Joint Power Generation Conference.* (2000) 23–26
- [8] Al-Abdeli, Yasir M and Assaad R. Masri “Recirculation and flowfield regimes of unconfined non-reacting swirling flows.” *Experimental Thermal and Fluid Science* 27 (2003) 655–665
- [9] Minghou Xu et al. “Investigation of particle dynamics and pulverized coal combustion in a cavity bluff-body burner.” *Fuel* 74. 1995. pp. 1913-1917.
- [10] Bing Liu et al. “Improvement of ignition prediction for turbulent pulverized coal combustion with EDC extinction model.” *Fuel* 181. 2016. pp. 1265-1272
- [11] Okamoto et al. “Pulverized fuel rich/lean separator for pulverized fuel burner” Patent number 6,053,118. Apr. 25, 2000.
- [12] Lies Aisyah et al. “Analysis of the effect of preheating system to improve efficiency in LPG-fuelled small industrial burner” *Energy Procedia* 65 (2015) 180–185
- [13] สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2555. พลังงานชีวมวล. [online]. Available : <http://www2.dede.go.th/>
- [14] การวิเคราะห์คุณภาพถ่าน. [online]. Available : <http://maemohmine.egat.co.th/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน. 2555. ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ความร้อน). [online]. Available : <http://www2.dede.go.th/>.
- [16] Sjaak van Loo. The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. London. Earthscan. 2008.
- [17] พงษ์เจต พรหมวงศ์ การถ่ายเทความร้อน.
- [18] นคร ทิพย์วงศ์. พื้นฐานวิศวกรรมการเผาไหม้.
- [19] สมรัฐ เกิดสุวรรณ. การเผาไหม้และการควบคุมมลพิษ. ปทุมธานี. สกายบุ๊กส์. 2549.
- [20] H K Versteeg and W Malalasekera. An introduction to computational fluid dynamics, The finite volume method. second edition. Pearson Education. 2007.
- [21] J.M. Beer, N.A. Chigier. Combustion aerodynamics. Fuel and energy science series, University of Sheffield. Applied science. 1972.
- [22] สิริธิดา สุขทั่ว. “การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลและเส้นทางเดินของอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลในเครื่องขัดแยกอนุภาคอนุภาคแบบไซโคลน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 25XX. อยู่ในขั้นตอนการร่างวิทยานิพนธ์
- [23] ANSYS Tutorial: Coal combustion with eddy break up (EBU) model
- [24] พงศธร ปู่ยา. “การจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [25] พีรพัฒน์ เทพลิบ. “การพัฒนาระบบควบคุมการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงขนาด 1 MW.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 25XX. อยู่ในขั้นตอนการร่างวิทยานิพนธ์.
- [26] นันทพล จันคง. “การพัฒนาระบบควบคุมและตรวจจับสัญญาณการเผาไหม้สำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 25XX. อยู่ในขั้นตอนการร่างวิทยานิพนธ์.



ภาคผนวก

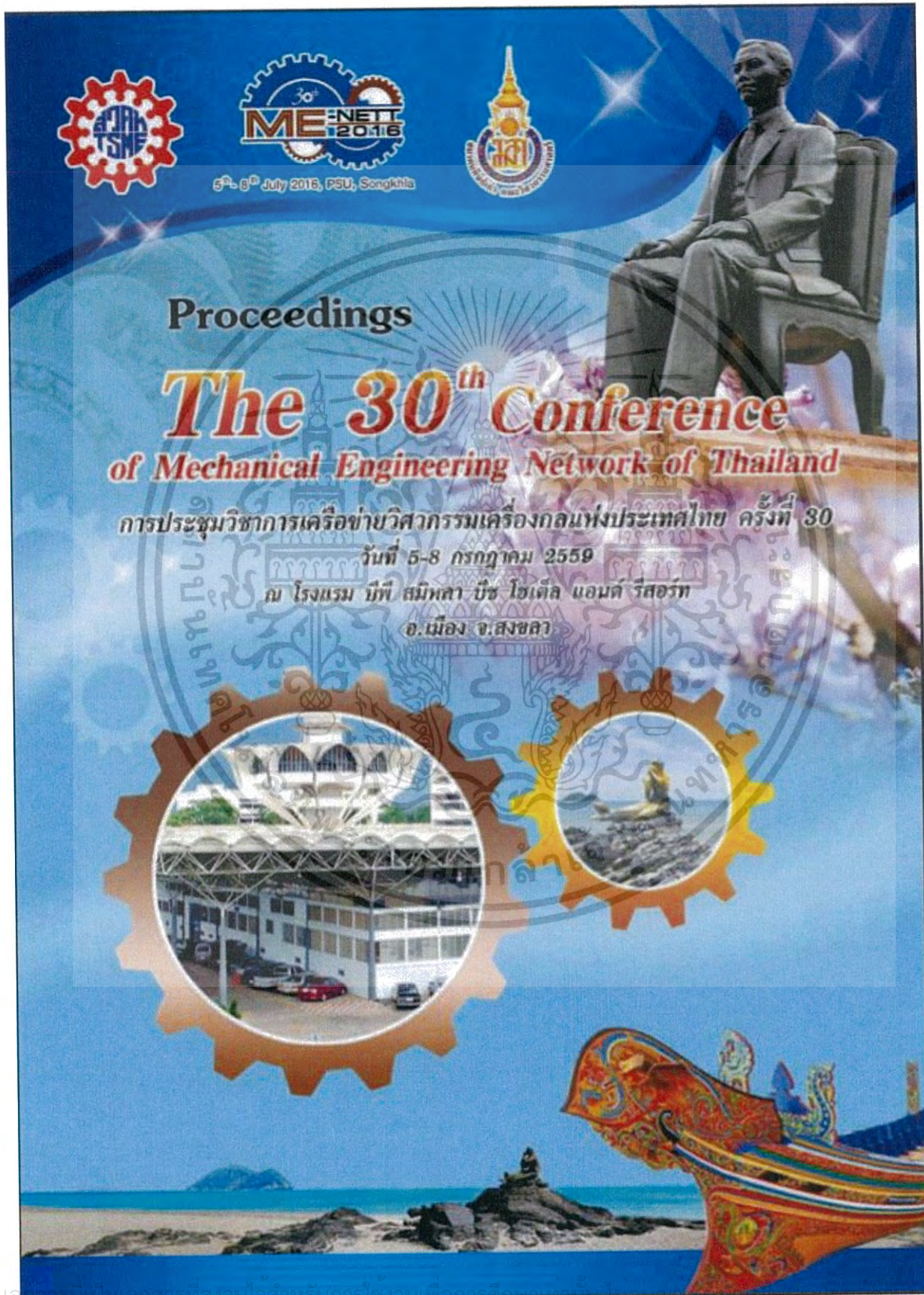
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของหน่วยงานที่ออกกรีกษาหากมีผู้อื่นไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีกริคำ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST0024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา

การประเมินความเสี่ยงของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงแบบอุ่นอากาศ
โดยการใช้แบบจำลองการเผาไหม้
Risk assessment of Biomass Pulverized Burner with Air Preheat
Using Simulation Combustion Model

วิจัยชัย จันงค์, และ จารุวัตร เจริญสุข*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
*ติดต่อ: E-mail : kcjaruw@kmitl.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ : 023 264 197, เบอร์โทรสาร : 023 264 198

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการประเมินความเสี่ยงในระหว่างการดำเนินการทดลองในขั้นต้นพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีการอุ่นอากาศทุติยภูมิ โดยการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเผาไหม้ ภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่มีกำลังการผลิตขนาด 100 kW ปริมาณอากาศปฐมภูมิ 40 % ทุติยภูมิและตติยภูมิ 60 % และปริมาณอากาศส่วนเกิน 10 % ซึ่งเป็นปริมาณสัดส่วนของอากาศที่เหมาะสมในการเผาไหม้โดยที่ให้มีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้ 899 °C และมีอุณหภูมิอุ่นอากาศทุติยภูมิที่ 192 °C จากผลของแบบจำลองการเผาไหม้โดยใช้โปรแกรม ANSYS และใช้เทคนิคการ Coupled Wall ระหว่างผนังภายในห้องเผาไหม้ด้านแก๊สไอเสียกับผนังภายนอกห้องเผาไหม้ด้านอากาศทุติยภูมิ พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 1177 °C และอุณหภูมิอุ่นอากาศทุติยภูมิ 350 °C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ได้จากผลการทดลองถึง 31% และ 80% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์นี้ทำให้ได้พบปัญหาเกี่ยวกับลักษณะของหัวเผา ที่มีช่องการจ่ายอากาศที่ไม่สมมาตร ทำให้เกิดจุดร้อนขึ้นในบริเวณผนังอุ่นอากาศ และการเปิดของช่องผสมระหว่างอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิที่ทำให้มีเชื้อเพลิงเล็ดลอดเข้าไปในห้องอุ่นอากาศ ในอนาคตจะได้ทำการพัฒนาหัวเผาโดยการปรับปรุงลักษณะการจ่ายส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศปฐมภูมิ เพื่อหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์ดังกล่าวต่อไป

คำหลัก: การเผาไหม้; การจำลอง; เชื้อเพลิงชีวมวล

Abstract

This research aims to making risk assessment during development of biomass burner with preheated secondary air under related experimental condition at 100kW power, primary air to secondary and tertiary air ratio = 40:60 with excess air 10%. Experimental result suggested the averaged combustion chamber at 899 °C and the preheated secondary air temperature at 192 °C. However, the simulation on ANSYS with Coupled wall method indicated that an averaged temperature in combustion chamber at 1177 °C and 346 °C of secondary air. These seem to be higher than workshop experimentation for 31% and 80%, respectively. From this study, some issues were discovered such as; leakage of fuel into the secondary air preheating chamber and non-uniform distribution of fuel stream which resulted in hot spot at the combustion liner. More developments will be adopted in future validation work and will be reported in the future.

Keywords: Combustion, Simulation modelling, Biomass

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST0024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2569 จังหวัดสงขลา



1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันความต้องการในใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น จึงจำต้องหาพลังงานทดแทนในรูปแบบอื่นๆ พลังงานทดแทนจากชีวมวล (Biomass) จึงเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจ ซึ่งชีวมวลนั้นได้มาพืชและสัตว์หรือองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตหรือสารอินทรีย์ต่างๆรวมทั้งวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรเช่น แกลบ ไม้สับ ชังข้าวโพด คากโยปาล์ม เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น โดยเชื้อเพลิงชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาแปรรูปให้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง (Wood Pellets) ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลมีข้อดีคือการก่อให้เกิดแก๊สพิษ เช่น SO_2 และ NO_x ในปริมาณที่น้อย

สำหรับในการศึกษาในอดีตของ จิตพงษ์ กนกนัยการ และคณะ [1] ได้ทำการออกแบบจัดสร้างต้นแบบเตาปฏิกรณ์และหัวเผา (Burner) ก๊าซสังเคราะห์จากชีวมวลโดยมีกำลังการผลิตขนาด 100 kW ซึ่งในปัจจุบันได้ทำการพัฒนาปรับปรุงต้นแบบหัวเผาสำหรับก๊าซสังเคราะห์เพื่อนำมาใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยที่มีกำลังการผลิต 100 kW โดย ปภัศ ซูโชติศิริ และคณะ [2]

งานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีกำลังการผลิต 100 kW ของ ปภัศ ซูโชติศิริ และคณะ [2] เพื่อนำมาเป็นเงื่อนไขในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 3 มิติ (3D-Axisymmetric) โดยกำหนดให้มีตำแหน่งการจ่ายอากาศปฐุมุมและเชื้อเพลิงชีวมวลที่ไม่สมมาตรกับทางเข้าห้องเผาไหม้ ตำแหน่งการจ่ายอากาศปฐุมุมตามแนวเส้นสัมผัสผิวห้องเผาไหม้โดยมีลักษณะการไหลของอากาศปฐุมุมแบบการไหลสวนทาง (Counter Flow) กับแก๊สไอเสียภายในห้องเผาไหม้ เมื่ออากาศปฐุมุมได้รับความร้อนจากผนังห้องเผาไหม้ทำให้อากาศปฐุมุมมีอุณหภูมิสูงขึ้นไหลผ่านแผ่นสร้างการไหลหมุนวนลำดับหนึ่ง (First Swirled Plate) ตรงช่องทางเข้าอากาศปฐุมุมสำหรับช่วย Pre-mixed ร่วมกับอากาศปฐุมุมและเชื้อเพลิง และยังมีอากาศปฐุมุมส่วนหนึ่งไหลผ่านแผ่นสร้างการไหลหมุนวนลำดับสอง (Second Swirled Plate) บริเวณทางเข้าห้องเผาไหม้

โดยทางผู้วิจัยคาดว่าแผ่นสร้างการไหลหมุนวนลำดับหนึ่งบริเวณช่องทางเข้าของอากาศปฐุมุมและ

ตำแหน่งของการจ่ายอากาศปฐุมุมและเชื้อเพลิงที่ไม่สมมาตร น่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อหัวเผา จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้เพื่อทำการวิเคราะห์ถึงปัจจัยดังกล่าวว่าจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล โดยอาศัยผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองเป็นข้อมูลในการพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาต่อไป

2. ลักษณะของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

จากรูปที่ 1 แสดงถึงลักษณะของหัวเผาสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดกำลังการผลิตที่ 100 kW โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในห้องเผาไหม้เท่ากับ 0.3 เมตร, ขนาดความยาวหัวเผาเท่ากับ 1.2 เมตร, มีลักษณะตำแหน่งการจ่ายของอากาศปฐุมุมและเชื้อเพลิงชีวมวลที่ไม่สมมาตร และในส่วนของอากาศปฐุมุมมีลักษณะการจ่ายตามแนวเส้นสัมผัสผิวของห้องเผาไหม้ โดยบริเวณทางเข้าห้องเผาไหม้ ออกแบบเป็นวัสดุทนไฟ ในขณะที่เตาเผาไหม้หลักถูกออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.0 เมตร และขนาดความยาวเท่ากับ 1.5 เมตร

2.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการเผาไหม้ชีวมวล

กำหนดการไหลให้เป็นแบบสมมาตรโดยใช้พิกัดทรงกระบอก r, θ, z เป็นพิกัดอ้างอิงตามแนวแกน 3 มิติ โดยเป็นการไหลแบบสภาวะคงตัว (Steady State) เลือกใช้รูปแบบการจำลองการเผาไหม้แบบ Discrete Phase Model และรูปแบบการไหลปั่นป่วนเลือกใช้สมการ $k-\epsilon$ Standard

สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการศึกษาคือเชื้อเพลิงจากไม้ยางพารา ซึ่งสมบัติและองค์ประกอบได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 7582, D 5373, D 4239, และ D 5863 ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยเป้าหมายวัตถุประสงค์ของการจำลองในขั้นต้น คือการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้เพื่อทำการวิเคราะห์โดยทำการเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง โดยที่หัวเผายังจะต้องสามารถเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่องที่ กำลังการผลิต 100 kW, ทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับตำแหน่งของการจ่ายอากาศปฐุมุมและเชื้อเพลิงในกรณีที่ย่อยอากาศปฐุมุมที่ไม่สมมาตรและในกรณีที่เหมาะสมกับห้องเผาไหม้เพื่อดูแนวโน้มของผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยตารางที่ 4 แสดงถึงเงื่อนไขเกี่ยวกับตัวแปรที่ใช้ในการเผาไหม้ที่ กำลังการผลิต 100 kW

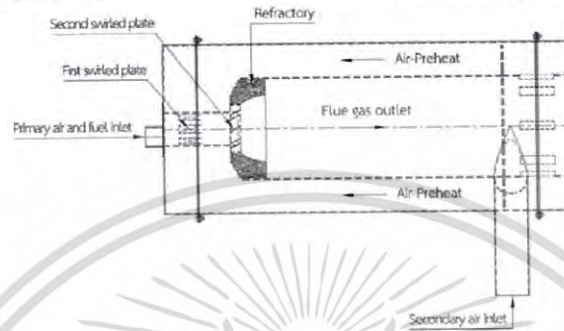
CST0024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



2.2 ลักษณะของเมฆในการจำลอง

สำหรับเมฆที่ใช้ในแบบจำลองจะประกอบด้วย



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของหัวเผา

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงฝงไม้ยางพารา
(Thailand Institute of Scientific and Technological Research)

การวิเคราะห์โดยประมาณ	(% โดยน้ำหนัก)
สารระเหย	76.68
คาร์บอนคงตัว	15.23
ความชื้น	5.81
ซีเถ้า	2.28
การวิเคราะห์โดยละเอียด	(% โดยน้ำหนัก)
คาร์บอน	45.42
ไฮโดรเจน	6.31
ไนโตรเจน	0.45
ออกซิเจน	45.54
ซัลเฟอร์	0.00
ปริมาณความร้อน (MJ/kg)	17.5

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการจำลองสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝง

Primary Air: Air flow Rate (kg/s)	1.54×10^{-2}
อุณหภูมิ (K)	313
อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/s)	5.715×10^{-3}
Secondary Air: Air flow Rate (kg/s)	2.31×10^{-2}
อุณหภูมิ (K)	473.15
อากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (%)	10
ความดันบรรยากาศ (Pa)	101325
ความดันทางออก (Pa)	-1500
อุณหภูมิ (K)	1200
ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	-9.81

(m/s)

เมฆในส่วนของแข็งและของไหลโดยใช้รูปทรงหลายด้าน (Polyhedra) ซึ่งเป็นบริเวณที่ให้ความสนใจ สำหรับพฤติกรรมของการไหลและการถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังห้องเผาไหม้กับอากาศทุติยภูมิ ซึ่งในการสร้างแบบจำลองที่มีความละเอียดและจำนวนของเมฆที่มาก ทำให้มีผลต่อระยะเวลาในการวิเคราะห์และการตรวจสอบเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง ดังนั้นจึงเลือกใช้จำนวนเมฆที่ 1,035,649 อิลลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่งของการจ่ายอากาศและเชื้อเพลิง, อุณหภูมิของการอุ่นอากาศและสำหรับในกรณี First Swirled Plate และในกรณี Non First Swirled Plate โดยตำแหน่งของ First Swirled Plate ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยทำการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้, การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนรัศมีตามแนวแกน Z ของห้องเผาไหม้ และอุณหภูมิของการอุ่นอากาศกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีระยะตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิแสดงดังในรูปที่

3

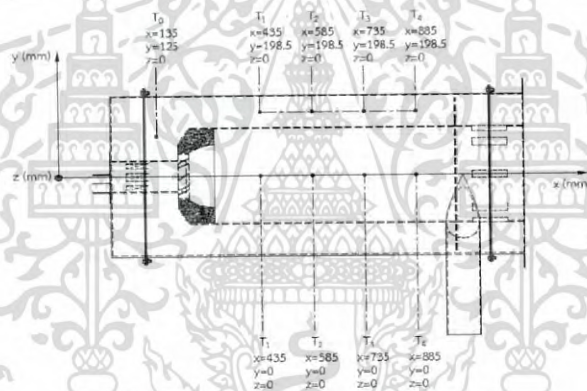
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST0024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2569 จังหวัดสงขลา



รูปที่ 2 แสดงเมชที่ใช้ในแบบจำลอง



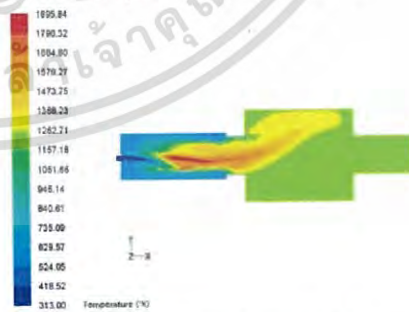
รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิ

ภายในห้องเผาไหม้พบว่าในตำแหน่งที่ระยะ 0.885 m บริเวณผนังการอุ่นอากาศเกิดจุดร้อนที่สูงกว่าในระยะ

3. ผลการจำลองการเผาไหม้

3.1 การจำลองการเผาไหม้ในกรณี First Swirled Plate

จากการจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาซีวมวล ผงแบบมีการอุ่นอากาศ ในกรณี First Swirled Plate พบว่าการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้โดยที่มีตำแหน่งการจ่ายอากาศและเชื้อเพลิงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 954 °C, อุณหภูมิของการอุ่นอากาศหตุยภูมิอยู่ที่ 350 °C และผลจากการแบบจำลองพบว่าบริเวณใกล้ผนังของการอุ่นอากาศภายในห้องเผาไหม้เกิดจุดร้อน (Hot Spots) ดังแสดงในรูปที่ 4 และเมื่อพิจารณาตำแหน่งการกระจายตัวของอุณหภูมิจากบริเวณกึ่งกลางภายในห้องเผาไหม้ไปตามแนวแกนรัศมีตามในแนวแกน Z ของผนังการอุ่นอากาศ



รูปที่ 4 แสดงการกระจายอุณหภูมิในกรณี First Swirled Plate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

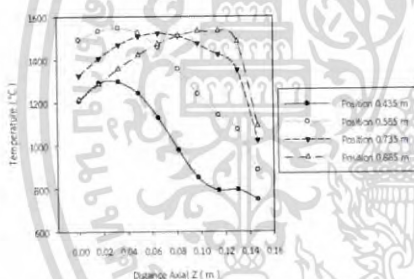
CST0024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3C
5-8 กรกฎาคม 2569 จังหวัดสงขลา



ตำแหน่งอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 และเป็นตำแหน่งที่เกิดจุดร้อนสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ที่ 1090 °C และในกรณีนี้ลักษณะของเปลวไฟบริเวณทางออกของห้องเผาไหม้เกิดการลอยตัวขึ้นก่อนไหลเข้าสู่เตาหลัก เนื่องจากเกิดการสูญเสียเสถียรภาพจนอาจทำให้เปลวไฟดับได้

จากผลที่ได้จากการจำลองการเผาไหม้ในกรณีดังกล่าวทำให้ทางผู้วิจัยมาพิจารณาเกี่ยวกับแผนผังการไหลหมุนวนลำดับหนึ่งกับอัตราส่วนของปริมาณการอุ่นอากาศที่ไหลผ่านแผ่นสร้างหมุนวนลำดับหนึ่งและแผ่นสร้างหมุนวนลำดับสองเท่ากับ 30% ของการจ่ายอากาศหตุยภูมิสำหรับใช้ในการอุ่นอากาศ ซึ่งมีผลต่อความเร็วของอากาศเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นสร้างการไหลหมุนวนลำดับหนึ่งและลำดับสอง เนื่องจากปริมาณของอากาศหตุยภูมิจะไหลผ่านแผ่นสร้างการไหลหมุนวนลำดับหนึ่งและลำดับสองซึ่งไม่สามารถควบคุมอัตราส่วน



รูปที่ 5 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีในแนวแกน Z ในกรณี First Swirled Plate

ของปริมาณการอุ่นอากาศได้ ทำให้ความเร็วของการอุ่นอากาศหตุยภูมิบริเวณช่องทางเข้าแผ่นสร้างการไหลหมุนวนลำดับสองไม่สามารถทำให้เกิดกระแสการไหลแบบหมุนวนที่รุนแรงเพียงพอเพื่อช่วยในการรักษาเสถียรภาพเปลวไฟ

3.2 การจำลองการเผาไหม้ในกรณี Non First Swirled Plate

สำหรับในกรณี Non First Swirled Plate เป็นการจำลองเพื่อทำการเพิ่มปริมาณอัตราส่วนของการอุ่นอากาศ ที่มีตำแหน่งการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงที่ไม่สมมาตร โดยมีอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เฉลี่ยอยู่ที่ 1177 °C อุณหภูมิของการอุ่นอากาศหตุยภูมิอยู่ที่ 350 °C ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยที่ลักษณะของเปลวไฟไม่มีความเสถียรภาพไม่เกิดการลอยตัวของเปลวไฟ, มี

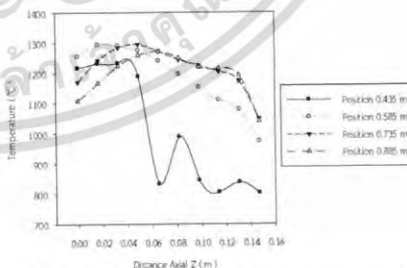
การกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอภายในเตาเผาหลัก เมื่อพิจารณาตำแหน่งการกระจายตัวของอุณหภูมิจากบริเวณกึ่งกลางภายในห้องเผาไหม้ไปตามแนวแกนรัศมีตามในแนวแกน Z พบว่าบริเวณใกล้ผนังภายในห้องเผาไหม้ ที่ตำแหน่งระยะ 0.735 m และ 0.885 m บริเวณผนังของการอุ่นอากาศเกิดจุดร้อน 966 °C ดังแสดงในรูปที่ 7

3.3 การจำลองการเผาไหม้ในกรณีที่มีการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงที่สมมาตร

จากผลที่ได้จากการจำลองการเผาไหม้ในตำแหน่งที่มีการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงที่ไม่สมมาตรในกรณี First Swirled Plate และในกรณี Non First Swirl Plate พบว่าลักษณะการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงที่ไม่สมมาตรมีอิทธิตต่อการเผาไหม้ทำให้เกิดจุดร้อนบริเวณผิวผนังการอุ่นอากาศซึ่งอาจทำให้ผิวผนังของห้องเผาไหม้มีความเสี่ยงที่จะได้รับความ



รูปที่ 6 แสดงการกระจายอุณหภูมิในกรณี Non First Swirled Plate



รูปที่ 7 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีในแนวแกน Z ในกรณี Non First Swirled Plate

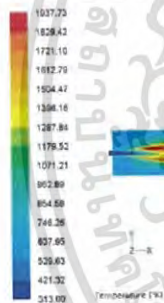
เสียหายจากเปลวไฟ ดังนั้นทางผู้วิจัยซึ่งได้ทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการสร้างแบบจำลองโดยใช้ตำแหน่งการจ่าย

CST0024

การประชุมวิชาการเครื่องจักรวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา

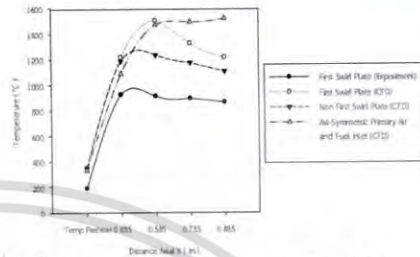


อากาศและเชื้อเพลิงที่สมมาตรและเนื่องจากผลที่ได้จากการจำลองในกรณีนี้ Non First Swirled Plate มีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่สม่ำเสมอจึงนำมาใช้เป็นเงื่อนไขในการจำลองการเผาไหม้เพื่อทำการพิจารณาอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิง พบว่าอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เฉลี่ยอยู่ที่ 1120 °C อุณหภูมิของการอุ่นอากาศทุติยภูมิอยู่ที่ 334 °C ดังแสดงในรูปที่ 8 และจากผลการจำลองพบว่าในตำแหน่งของการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงมีลักษณะของการเกิดของเปลวไฟที่สมมาตรและบริเวณที่เกิดจุดร้อนอยู่ห่างจากผนังอุ่นอากาศมากกว่าในตำแหน่งที่มีการจ่ายอากาศที่ไม่สมมาตร ผลจากการทดลอง พบว่าที่ตำแหน่งของการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงที่ไม่สมมาตรมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 899 °C, มีอุณหภูมิการอุ่นอากาศอยู่ที่ 192 °C เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลองการเผาไหม้มาทำ

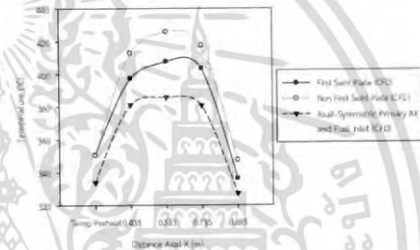


รูปที่ 8 แสดงการกระจายอุณหภูมิ Axial-Symmetric ในกรณี Non First Swirled Plate

การเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าผลจากการจำลองการเผาไหม้อุณหภูมิของการอุ่นอากาศในกรณี First Swirl Plate และ Non First Swirl Plate และในกรณีการจ่ายอากาศและเชื้อเพลิงที่สมมาตรมีอุณหภูมิการอุ่นอากาศที่ใกล้เคียงกันอุณหภูมิโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 345 °C ในส่วนของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ผลที่ได้จากการจำลองจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าผลที่ได้จากการทดลองและเมื่อนำผลที่ได้จากการจำลองในกรณี First Swirled Plate และ Non First Swirled Plate อุณหภูมิของการอุ่นอากาศทุติยภูมิเมื่อไหลสวนทางกับแก๊สไอเสียจะเพิ่มขึ้นจนถึงตำแหน่งช่วงกึ่งกลางของห้องเผาไหม้อุณหภูมิอุ่นอากาศจะลดลงก่อนเข้าห้องเผาไหม้ประมาณ 350 °C ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้



รูปที่ 10 แสดงอุณหภูมิการอุ่นอากาศ

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการจำลองการเผาไหม้ที่กำลังการผลิต 100 kW สำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบมีการอุ่นอากาศทุติยภูมิผสมก่อนการเผาไหม้ พบว่ามีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเผาไหม้เช่น ตำแหน่งการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้, ปริมาณอัตราส่วนของการอุ่นอากาศทุติยภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้, และ First Swirled Plate ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อเสถียรภาพของหัวเผาชีวมวลแบบที่มีการอุ่นอากาศ ซึ่งจากการจำลองการเผาไหม้เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าในตำแหน่งของการป้อนอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้ในกรณี First Swirled Plate เมื่อจ่ายอากาศปฐมภูมิและอุณหภูมิของเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ปรากฏว่ามีอุณหภูมิของเชื้อเพลิงบางส่วนหลุดเล็ดลอดผ่านเข้าไปในช่อง First Swirled Plate ทำให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงบางส่วนที่หลุดเล็ดลอดเข้าไปเกิดการเผาไหม้ภายในโซนของการอุ่นอากาศ ซึ่งอาจทำให้หัวเผาได้รับความเสียหายจากการเผาไหม้บริเวณโซนของการอุ่นอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST0024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



ดังนั้นจึงได้ทำการจำลองการเผาไหม้ในกรณี Non First Swirled Plate เพื่อทำการแก้ไขปัญหาที่อนุภาคของเชื้อเพลิงหลุดเล็ดลอดผ่านช่อง First Swirled Plate จากผลการจำลองพบว่าลักษณะของเปลวไฟในกรณี Non First Swirled Plate ไม่เกิดการลอยตัวของเปลวไฟบริเวณทางออกห้องเผาไหม้และเมื่อทำการพิจารณาตำแหน่งการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงชีวมวลที่ไม่สมมาตรทั้งในกรณี First Swirled Plate และในกรณี Non First Swirled Plate พบว่าเกิดจุดร้อนอุณหภูมิสูงบริเวณผนังห้องเผาไหม้ เนื่องจากตำแหน่งการจ่ายอากาศและเชื้อเพลิงที่ไม่สมมาตรทำให้เส้นทางเดินของความเร็วการจ่ายอากาศลดต่ำลงบริเวณผนังของห้องเผาไหม้ด้วยค่าแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งใช้เป็นเงื่อนไขในการจำลอง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวอาจทำให้ผนังของห้องเผาไหม้มีความเสี่ยงที่จะได้รับความเสียหายจากการเกิดจุดร้อนได้

จากปัจจัยดังกล่าวจึงได้ทำการปรับปรุงแบบจำลองให้มีตำแหน่งการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงที่สมมาตร ในกรณี Non First Swirled Plate พบว่าลักษณะของการเกิดฐานเปลวไฟที่สมมาตรและไม่เกิดจุดร้อนอุณหภูมิสูงบริเวณผนังห้องเผาไหม้และทำให้อุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางภายในห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันตลอดห้องเผาไหม้และ เมื่อทำการตรวจสอบผลจากการจำลองของอุณหภูมิการอุ่นอากาศทุติยภูมิก่อนการเผาไหม้ สำหรับในทั้งสามกรณีมีค่าของอุณหภูมิการอุ่นอากาศที่ใกล้เคียงกันประมาณ 350 °C

จากผลที่ได้จากการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแบบมีการอุ่นอากาศทำให้ทางผู้วิจัยได้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความเสี่ยงของหัวเผา เช่น ตำแหน่งของการจ่ายอากาศปฐมภูมิและเชื้อเพลิงที่ไม่สมมาตรกับห้องเผาไหม้มีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดจุดร้อนอุณหภูมิสูงบริเวณผนังของห้องเผาไหม้, แผ่นสร้างการไหลหมุนวนลำดับหนึ่งมีความเสี่ยงที่ให้อนุภาคของเชื้อเพลิงจะหลุดเล็ดลอดเข้าไปในโซนของการอุ่นอากาศและอาจทำให้เกิดการเผาไหม้ในบริเวณโซนของการอุ่นอากาศ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองจะนำไปเปรียบเทียบและประเมินกับผลที่ได้จากการทดลองจริงเพื่อที่จะได้นำไปพัฒนาและปรับปรุงในส่วนที่จะทำให้เกิดความเสี่ยงสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบมีการอุ่นอากาศเช่น ตำแหน่งของการป้อนอากาศปฐมภูมิและอนุภาคของเชื้อเพลิงในตำแหน่งที่สมมาตรกับห้อง

เผาไหม้, แผ่นการสร้างการไหลหมุนวนลำดับหนึ่ง โดยจะทำการทดลองเพื่อตรวจสอบว่ามีการเล็ดลอดของเชื้อเพลิงเข้าไปในโซนการอุ่นอากาศหรือไม่ และทางผู้วิจัยคิดว่าอัตราของการจ่ายอากาศทุติยภูมิน่าจะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการเผาไหม้ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมปริมาณอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิสำหรับที่ใช้ในการอุ่นอากาศได้ ซึ่งจะต้องทำการวิจัยพัฒนาและปรับปรุงหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลลงไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จัดทำโดยห้องปฏิบัติการวิจัยการเผาไหม้ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] จิตพงษ์ กนกนัยการ และ ประมินทร์ แจ้งโธสง (2554). "การพัฒนาต้นแบบปฏิกรณ์ก๊าซสังเคราะห์จากชีวมวล" ปริญญาบัณฑิตวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] ปภัส ฐุโชติศิริ, มโหรีช สิตา และ สมบัติ เกษตรภิบาล (2557). "การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงระดับอุตสาหกรรมที่มีการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้" ปริญญาบัณฑิตวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] ชินภัทร ฐระการ, ธนภัทร์ ภักดีวงค์ และ จารุวัตร เจริญสุข (2557). การศึกษายานการทางานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีมุมผนังทางออก 90 องศา, *การประชุมสัมมนาเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น*
- [4] Y.S. Shen, B.Y. Guo, A.B. Yu, P. Zulli. (2009). A Three-Dimensional Numerical Study of The Combustion of Coal Blends in Blast Furnace, *Fuel 88*, pp. 255-263.
- [5] J.Charoensuk, (1996). *The Application of Mathematical Model for Scaling Pulverized coal combustors*, Ph.D Thesis, University of London

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST0024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



[6] อพอล อาภาธนากร นิมิต นิต์ธรรมกุล และเฉลิม พงษ์ กล้าขยัน (2555). *โครงการนำร่องเพื่อผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลในระดับชุมชน, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักงานวิศวกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน) และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน*



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายธีรชัย จำนงค์
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 23 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2528
 ที่อยู่ 141/1 หมู่ 4 ตำบลตากแดด อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร 86000
 ประวัติการศึกษา 2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ประวัติการทำงาน พ.ศ. 2553-ปัจจุบัน ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกล ประจำแผนก Engineering
 บริษัท บางกอกอินดัสเทรียล บอยเลอร์ จำกัด
 368 หมู่ 6 ถนนสุขุมวิท ตำบลสำโรงเหนือ อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัด
 สมุทรปราการ 10270



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้