

การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม  
BIOMASS BURNER DEVELOPMENT IN INDUSTRIAL BOILERS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-030-159

การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม

BIOMASS BURNER DEVELOPMENT IN INDUSTRIAL BOILERS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-030-159

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# BIOMASS BURNER DEVELOPMENT IN INDUSTRIAL BOILERS



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  
2015

KMITL-2015-EN-M-030-159

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม  
Thesis Title Biomass Burner Development in Industrial Boilers  
นักศึกษา นายชินภัทร ชูระการ  
รหัสประจำตัว 55610909  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-030-159

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	
ผศ.ดร.จินดา	เจริญพรพาณิชย์	
ศ.ดร.สำเร็จ	จักรใจ	
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมพ์สาร	
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ ห้อง HM-303

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 ขนด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม
ชื่อนักศึกษา	นายชินภัทร ชูระการ
รหัสประจำตัว	55610909
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อออกแบบ และพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง โดยนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้ที่ผ่านการจำลองเทียบเคียงกับเตาเผาเชื้อเพลิงถ่านหินผงมาประยุกต์ใช้กับการจำลองเพื่อออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ขนาด 1 MW จากการศึกษาพบว่าหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วยที่มีมุมผนังบริเวณทางออกเท่ากับ 90 องศา สามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงนำไปสู่การผลิตต้นแบบหัวเผาและระบบสนับสนุนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง สำหรับการทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิง จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงต่อความเร็วรอบใบสกรูขนถ่าย จะให้ความสัมพันธ์กันในลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยสามารถประมาณค่าอัตราการขนถ่ายของชุดสกรูขนถ่ายที่ทำการออกแบบไว้ดังนี้  $m_s = \rho_b (0.0019f + 0.0003)$  หรือ  $m_s = 0.000632\rho_b N$  ในหน่วย kg/min เมื่อทำการศึกษาเชิงทดลองถึงอิทธิพลของเงื่อนไขการดำเนินการที่มีผลต่อการทำงานของหัวเผา พบว่าขนาดของเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 mm. จะให้ลักษณะการเผาไหม้ที่มีแนวโน้มไปในทางที่ดี สังเกตเห็นเส้นทางเดินของปฏิกิริยาการเผาไหม้คาร์บอนในปริมาณน้อย โดยมุมมองศาใบปิด (swirl blades) ที่ 100 องศา จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนควงที่ดีภายในห้องเผาไหม้ช่วย ส่งผลให้หัวเผาสามารถคงความเสถียรภาพของการเผาไหม้ และทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องได้ และเมื่อทำการทดลองเพื่อหาอัตราการงานที่หัวเผา พบว่าต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย มีอัตราการงานที่มีเสถียรภาพอยู่ที่ 300 kW ถึง 500 kW ซึ่งย่านการเผาไหม้ดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารขนาดย่อมได้ โดยสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำได้สูงสุดประมาณ 0.5 ตันต่อชั่วโมงที่ความดัน 10 บาร์

Thesis Title	Biomass Burner Development in Industrial Boilers
Student	Mr. Chinnapat Turakarn
Student ID.	55610909
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jarruwat Charoensuk

### ABSTRACT

This research aims to design and develops a pulverized biomass burner. The validated model for coal combustion was applied to use for simulation of pulverized biomass fuel with pre-chamber burner, sizing 1 MW. As a result, it was found that pre-chamber burner with 90 degrees of outlet wall angle could provide stable combustion. The production of a prototype burner and supporting system for a pulverized biomass burner was then carried out. For testing the performance of the fuel feed system, it was found that the relationship between the rate of fuel transfer and the speed of screw conveyor are related in a linear form. The estimation of the transfer rate of the screw conveyor was  $m_s = \rho_b (0.0019f + 0.0003)$  or  $m_s = 0.000632\rho_b N$  in kg/min. Experimental study on the influence of operating conditions on performance of the burners was performed. It was found that the particle of the fuel that pass through a grinder screen size of 0.5 mm yielded satisfactory result as far as combustion stability was concerned. This was carried out with an angle of the swirl blades at 100 degrees, where the secondary air flow was able to induce the stream of recirculation within the pre-chamber thus enabling the combustion stability. It was found that the prototype of pulverized biomass burner with pre-chamber can be maintain stability at 300kW to 500kW. It could be applied with a small food processing industry by producing steam up to 0.5 tons per hour at 10 bar gauge approximately.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ ความกรุณา การถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์ที่ดีจาก รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. และนักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ได้ให้ คำปรึกษา คำแนะนำ คำติชมในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

การทำวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสองหน่วยงานหลักๆ หน่วยงานแรกคือ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ในโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ร่วมกับบริษัท ยู เอ เอส แมคคานิคอล คอนซัลแตนท์ จำกัด สำหรับเงินทุนในการพัฒนาหัว เผลเชื้อเพลิงชีวมวล หน่วยงานที่สองคือสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จาก แหล่งเงินทุนอุดหนุนทั่วไป ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2557 สำหรับการสร้างห้องปฏิบัติการ และชุด ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ด้วยการให้ความไว้วางใจและสนับสนุนทุนอย่างดียิ่ง ทำให้การ วิจัยครั้งนี้ประสบความสำเร็จ ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

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

ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี คุณค่าและ ประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรี รัตนตรัยอำนวยการอำนวยพรความสุขสวัสดิ์จึงมีแต่ทุกท่าน

ชินภัทร ฐระการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
3.1 สกรูขนถ่ายวัสดุ (Screw Conveyors).....	11
3.1.1 หลักการทำงาน และการใช้งาน.....	11
3.1.2 ชนิดของใบเกลียว.....	12
3.1.3 การแบ่งประเภทของวัสดุ.....	13
3.1.4 ข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดของวัสดุ.....	13
3.1.5 การคำนวณหาอัตราการขนถ่ายวัสดุ.....	14
3.2 เชื้อเพลิงแข็ง.....	21
3.2.1 ประเภท และลักษณะของเชื้อเพลิงแข็ง.....	22
3.2.2 การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็ง.....	27
3.2.3 สมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิง.....	28
3.3 การเผาไหม้ (Combustion).....	30
3.3.1 สตอยชิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion Stoichiometry).....	30
3.3.2 Enthalpy of Combustion และค่าความร้อน (Heating values).....	31
3.3.3 อุณหภูมิเปลว adiabatic (Adiabatic Flame Temperatures).....	33
3.3.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้.....	34
3.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuel Combustion).....	35
3.4.1 การทำแห้งของเชื้อเพลิงแข็ง (Drying).....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยบริษัทเอกชนในเครือ บริษัท อี.เอส.อี. จำกัด ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อVอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization).....	35
3.4.3 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Burning of Carbon).....	36
3.4.4 ลักษณะและพฤติกรรมของเศษถ่าน.....	40
3.5 การปล่อยมลพิษและการควบคุม (Pollutants Emission and Control).....	41
3.5.1 บทนำ.....	41
3.5.2 ผลกระทบของมลพิษ.....	42
3.5.3 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO <sub>x</sub> ).....	42
3.5.4 คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide).....	47
3.5.5 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO <sub>x</sub> ).....	47
3.5.6 ฝุ่นและเขม่า (Particulates and Soot).....	49
3.6 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Conduction Heat Transfer).....	50
3.6.1 การนำความร้อนผ่านผนังแผ่นระนาบ.....	51
3.6.2 การนำความร้อนในผนังราบที่เรียงซ้อนกันแบบอนุกรม.....	52
3.6.3 การนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก.....	53
3.6.4 ทรงกระบอกหลายชั้น (Multilayer Cylinders).....	54
3.6.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.....	55
3.6.6 ความหนาวิกฤติของฉนวน (Critical Radius of Insulation).....	56
บทที่ 4 การคำนวณ และการออกแบบชุดทดสอบ.....	58
4.1 สมการการเผาไหม้.....	58
4.1.1 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงแก๊ส LPG.....	59
4.1.2 สมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	59
4.2 การออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	61
4.2.1 แนวคิดในการออกแบบ.....	61
4.2.2 การคำนวณเพื่อการออกแบบ.....	63
4.2.3 การจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	64
4.2.4 การจำลองย่านการทำงานของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วยที่มีมุมผนัง บริเวณทางออก 90 องศา.....	69
4.2.5 รายละเอียดแบบสั่งผลิตสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล.....	74
4.2.6 การคำนวณความหนาของผนังห้องเผาไหม้ช่วย.....	75
4.3 การออกแบบระบบป้อนเชื้อเพลิง.....	78
4.3.1 การออกแบบถังพักเชื้อเพลิง.....	78
4.3.2 การออกแบบสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิง.....	80
4.3.3 ภาพรวมของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อVอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.4 การเลือก และติดตั้งเครื่องบดเชื้อเพลิงผง.....	84
4.4 การออกแบบห้องเผาไหม้.....	87
4.4.1 การกำหนดความยาวของห้องเผาไหม้.....	87
4.4.2 การคำนวณความหนาของผนังห้องเผาไหม้.....	88
4.4.3 รายละเอียดแบบสั่งผลิตสำหรับห้องเผาไหม้.....	89
4.5 การออกแบบระบบบำบัดไอเสีย.....	91
บทที่ 5 อุปกรณ์ เจริญไซ และวิธีการทดลอง.....	95
5.1 การขึ้นรูปชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	95
5.1.1 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber).....	95
5.1.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	97
5.1.3 ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	100
5.1.4 ระบบบำบัดไอเสีย.....	102
5.2 อุปกรณ์วัด ควบคุม และบันทึกผล.....	104
5.2.1 ระบบป้อนอากาศ.....	104
5.2.2 ระบบทางเดินแก๊ส LPG.....	105
5.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ.....	106
5.2.4 อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สไอเสีย.....	107
5.2.5 อุปกรณ์วัด และควบคุมอื่นๆ.....	108
5.2.6 ชุดทดลอง Sieve analysis.....	109
5.3 เจริญไซ และวิธีการทดลอง.....	110
5.3.1 การทดสอบสมรรถนะระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	110
5.3.2 การทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	112
บทที่ 6 ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง.....	118
6.1 ผลการทดสอบระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	118
6.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบสกรูขนถ่ายกับความถี่กระแสไฟฟ้า.....	118
6.1.2 การทดลองหาอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงชีวมวล.....	119
6.1.3 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องบด.....	122
6.2 ผลการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	125
6.2.1 อิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงต่อพฤติกรรมการเผาไหม้.....	125
6.2.2 อิทธิพลขององศาใบบิด (swirler blade) ต่อพฤติกรรมการเผาไหม้.....	127
6.2.3 พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วย.....	131
6.2.4 การศึกษาอัตราการทำงานหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย	137

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุป และข้อเสนอแนะ.....	146
7.1 บทสรุป.....	146
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	149
เอกสารอ้างอิง.....	150
ภาคผนวก.....	152
ภาคผนวก ก. แบบสิ่งผลิต.....	153
ภาคผนวก ก1. แบบสิ่งผลิตของต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	154
ภาคผนวก ก2. แบบสิ่งผลิตของระบบป้องกันเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	159
ภาคผนวก ก3. แบบสิ่งผลิตของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	168
ภาคผนวก ก4. แบบสิ่งผลิตของสกรูระบายไถ่หมัก.....	173
ภาคผนวก ก5. แบบสิ่งผลิตของระบบบำบัดไอเสีย.....	176
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	185
ประวัติผู้เขียน.....	195

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อVIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แฟกเตอร์ระยะพิตซีไบสกรู.....	15
3.2 แฟกเตอร์ชนิดไบสกรู $F_f$ .....	19
3.3 ค่าประมาณของแฟกเตอร์ของวัสดุ ( $F_m$ ).....	19
3.4 แฟกเตอร์ไพบัต ( $F_p$ ).....	19
3.5 ตัวอย่างแฟกเตอร์วัสดุ ( $F_m$ ).....	20
3.6 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่างๆ.....	21
3.7 ลักษณะของถ่านหิน.....	23
3.8 ตัวอย่างเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างไม้สนกับถ่านหินบิทูมินัส.....	23
3.9 การแบ่งชนิดของถ่านหินโดยศักดิ์ของถ่านหิน (หลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า).....	23
3.10 ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของ RDF และเชื้อเพลิงต่างๆ (หลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า).....	26
3.11 จุดวาบไฟและจุดติดไฟด้วยตัวเองของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ.....	29
4.1 แสดงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวลอัดแท่งจากหญ้าเนเปียร์.....	59
4.2 แสดงปริมาณไอเสียที่ 100 % Stoichiometry.....	60
4.3 ผลการคำนวณการออกแบบหัวเผาขนาด 1 MW ภายใต้สภาวะอากาศเกิน 30%.....	64
4.4 คุณสมบัติของถ่านหิน.....	66
4.5 เงื่อนไขการจำลองสำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	66
4.6 Kinetic Parameters สำหรับแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหิน.....	66
4.7 ค่าตัวแปรควบคุมที่ใช้คำนวณหาความหนาของผนังห้องเผาไหม้ช่วย.....	77
4.8 ผลการคำนวณขนาดถังพักเชื้อเพลิง (hopper).....	80
4.9 ผลการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุ.....	82
4.10 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องบด.....	85
4.11 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องบด ยี่ห้อ BONNY.....	86
4.12 ค่าตัวแปรควบคุมที่ใช้คำนวณหาความหนาของผนังห้องเผาไหม้.....	88
4.13 แสดงการคำนวณปริมาณไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้.....	94
5.1 ค่าความละเอียด และความแม่นยำของเครื่องมือวัด.....	109
5.2 เงื่อนไขในการทดลอง (ตัวแปรควบคุม) เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิง.....	114
5.3 เงื่อนไขการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	115
6.1 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาแฟกเตอร์ความเต็มรวงของสกรูขนถ่าย.....	121
6.2 เปรียบเทียบกำลังการผลิตจริงกับข้อมูลจากผู้ผลิต.....	123
6.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่ผ่านการบด.....	124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตี VIII ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	4
2.1	6
2.2	7
2.3	7
2.4	8
2.5	9
2.6	9
2.7	10
3.1	11
3.2	12
3.3	12
3.4	12
3.5	13
3.6	14
3.7	15
3.8	16
3.9	16
3.10	17
3.11	17
3.12	19
3.13	24
3.14	31
3.15	32
3.16	34
3.17	35
3.18	37
3.19	38
3.20	38
3.21	41
3.22	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23 ผลการคำนวณ และผลการทดลองหาค่า thermal NO และ prompt NO ของเปลวไฟ มีเทนกับอากาศในเตาเผาไหม้แบบกวน, $\lambda$ หมายถึงอัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศทางทฤษฎี.....	45
3.24 การเกิด NO ที่ขับเคลื่อนด้วยกลไกของ Zeldovich.....	46
3.25 การนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติพิภัก $x$ .....	50
3.26 การเปรียบเทียบการนำความร้อนกับวงจรไฟฟ้า.....	51
3.27 แสดงการนำความร้อนแบบมิติเดียวที่ไหลผ่านผนังหลายชั้น.....	52
3.28 การนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก.....	53
3.29 การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านทรงกระบอกกลวงหลายชั้น.....	54
3.30 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังระบบ.....	55
3.31 ความหนาวิกฤตของฉนวนบุท่อ.....	56
3.32 อัตราการพาความร้อนจากฉนวนสู่บรรยากาศ.....	57
4.1 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	58
4.2 ตัวอย่างหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย.....	62
4.3 ขั้นตอนในการคำนวณเพื่อออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล.....	63
4.4 ลักษณะของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (unit in mm.).....	65
4.5 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	67
4.6 การวิเคราะห์จำนวนกริดที่เหมาะสม โดยพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคตามแนว Axial ของเตาเผา.....	67
4.7 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคชาร์ระหว่างการเผาไหม้ (มุมผนัง $135^\circ$ ).....	68
4.8 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคชาร์ระหว่างการเผาไหม้ (มุมผนัง $90^\circ$ ).....	68
4.9 การเปรียบเทียบถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นของความปั่นป่วน.....	69
4.10 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนิวตามแนวแกนของเตาเผา.....	69
4.11 ลักษณะการกระจายตัวของความเข้มข้นของออกซิเจนตามแนวแกนของเตาเผา.....	70
4.12 ลักษณะการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหยตามแนวแกนของเตาเผา.....	70
4.13 การกระจายตัวของอนุภาคนิว.....	71
4.14 การกระจายตัวของความเข้มข้นออกซิเจน (Mass Fraction).....	71
4.15 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย (Mass Fraction).....	72
4.16 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของชาร์ (Particle Char Fraction).....	72
4.17 แสดงภาพตัดของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber).....	74
4.18 ส่วนประกอบของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย.....	74
4.19 ลักษณะขอบเขตของผนังห้องเผาไหม้ช่วย.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อXอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 การคำนวณหาความหนาผนังปูนของห้องเผาไหม้ช่วย.....	76
4.21 ผลการคำนวณหาความหนาผนังปูนทนไฟของห้องเผาไหม้ช่วย.....	77
4.22 มุมก่องของวัสดุ.....	79
4.23 ลักษณะของถังพักเชื้อเพลิง (hopper).....	79
4.24 ขนาดของถังพักเชื้อเพลิง (hopper).....	80
4.25 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุ.....	81
4.26 ภาพตัด และทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงผ่านสกรูขนถ่าย.....	83
4.27 ลักษณะของสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงที่ทำการออกแบบ.....	83
4.28 การประกอบถังพักเชื้อเพลิงกับชุดสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิง.....	84
4.29 แสดงตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องบด และชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องบด.....	85
4.30 แสดงเครื่องบด ยี่ห้อ BONNY รุ่น YPT-302 (F/S) .....	86
4.31 แสดงลักษณะภายในเครื่องบด ยี่ห้อ BONNY รุ่น YPT-302 (F/S).....	86
4.32 ระยะเวลาสิ้นสุดปฏิกิริยาการเผาไหม้.....	87
4.33 ลักษณะขอบเขตของผนังห้องเผาไหม้.....	88
4.34 ผลการคำนวณหาความหนาผนังปูนทนไฟของห้องเผาไหม้.....	89
4.35 ลักษณะของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	89
4.36 ภาพตัดแสดงลักษณะภายในของเปลือกห้องเผาไหม้.....	90
4.37 ส่วนประกอบของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	90
4.38 ลักษณะระบบบำบัดไอเสีย.....	91
4.39 ทิศทางการไหลของแก๊สร้อนภายในห้องบำบัดไอเสีย.....	91
4.40 ลักษณะการจัดวางตำแหน่งของระบบบำบัดไอเสีย.....	92
4.41 ขั้นตอนในการคำนวณหาปริมาตรของแก๊สไอเสีย.....	93
5.1 แสดงชิ้นส่วนหลักของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย.....	95
5.2 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (ด้านหน้า) .....	96
5.3 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (ด้านหลัง) .....	96
5.4 แผนภาพองค์ประกอบย่อยของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	97
5.5 ลักษณะถังพักเชื้อเพลิงชีวมวลผง (hopper) และสกรูลำเลียงที่ติดตั้งเข้ากับโครงสร้าง....	97
5.6 ระบบลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	98
5.7 แสดงอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนด้วยลมที่เลือกใช้.....	98
5.8 เครื่องอัดอากาศสำหรับอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน.....	99
5.9 โบลเวอร์ และวาล์วปรับอัตราการไหลอากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air).....	99
5.10 อุปกรณ์สำหรับลำเลียงเชื้อเพลิง และอากาศเข้าสู่หัวเผา.....	100
5.11 เครื่องบดเชื้อเพลิงที่ถูกติดตั้งกับระบบป้อนเชื้อเพลิง.....	100
5.12 ลักษณะของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อXไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 โครงสร้างห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	101
5.14 สกรูระบายไถ่หนัก และถังพักไถ่หนัก.....	101
5.15 มอเตอร์สกรูระบายไถ่หนัก.....	102
5.16 ถังบำบัดไอเสีย (evaporative scrubber) .....	102
5.17 ลักษณะของมาน้ำสำหรับดักไถ่ลอย.....	103
5.18 ปอดตกตะกอน และพัดลมดูดไอเสีย.....	103
5.19 ระบบป้อนอากาศสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	103
5.20 วาล์วปีกผีเสื้อ (butterfly valve) หลังการติดตั้ง.....	104
5.21 ลักษณะการติดตั้ง Orifice plate และ Pressure Transmitter.....	104
5.22 แผนภาพการทำงานของทางเดินท่อแก๊สก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	105
5.23 แผงควบคุมแก๊ส LPG ก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	105
5.24 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิ.....	106
5.25 thermocouple type K และหน่วยแสดงผล YOKOGAWA XL 100.....	106
5.26 เครื่องวัดแก๊สไอเสีย Testo รุ่น 350 XL.....	107
5.27 อุปกรณ์ช่วยในการวัดค่าแก๊สไอเสีย.....	107
5.28 อินเวอร์เตอร์ (inverter) ยี่ห้อ Schneider รุ่น ATV312.....	108
5.29 อินเวอร์เตอร์ (inverter) ยี่ห้อ Winner รุ่น WIN-V63.....	108
5.30 เครื่องวัดความเร็วรอบ (tachometer) ยี่ห้อ Digicon รุ่น DT-245P.....	108
5.31 ชุดทดสอบ sieve analysis.....	109
5.32 อุปกรณ์ขยายแรงดันไฟฟ้าสำหรับจุดประกายไฟ.....	113
5.33 ลักษณะการอ้างอิงมุมของใบพัด.....	115
5.34 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย.....	116
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของสกรูขนถ่าย(RPM)-ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz)	118
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง (kg/min)-ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz)	119
6.3 เปรียบเทียบอัตราการขนถ่ายจากการทดลอง กับอัตราการขนถ่ายตามทฤษฎี (k=0.3)....	121
6.4 การเปรียบเทียบอัตราการผลิตของเครื่องบดต่อขนาดรูของตะแกรงเครื่องบด.....	122
6.5 ลักษณะเชื้อเพลิงชีวมวล.....	123
6.6 เปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีขนาดของอนุภาคต่างกัน.....	126
6.7 พฤติกรรมของการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ที่องศาของใบพัดต่างกัน.....	128
6.8 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย (Mass Fraction) ภายใน pre-chamber.....	129
6.9 เวกเตอร์ความเร็วของแก๊สภายในหัวเผา pre-chamber.....	130
6.10 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิ.....	131
6.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยตามระยะแนวแกน.....	133
6.12 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยตามระยะแนวรัศมี.....	136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อXIIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.13 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน.....	137
6.14 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน (ภายในหัวเผา) .....	138
6.15 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน (ภายในห้องเผาไหม้) .....	138
6.16 แสดงเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (O <sub>2</sub> ) หลังการเผาไหม้.....	139
6.17 แสดงปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หลังการเผาไหม้.....	140
6.18 แสดงปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO <sub>x</sub> ) หลังการเผาไหม้.....	141
6.19 ทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์ระหว่างการเผาไหม้.....	142
6.20 เปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่ไม่ได้รับการเผาไหม้โดยแยกตามขนาดอนุภาค.....	143
7.1 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	146
ก1.1 ส่วนประกอบของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	155
ก1.2 รายละเอียดของชิ้นส่วนหัวเผาหมายเลข 1 burner nozzle jacket.....	155
ก1.3 รายละเอียดของชิ้นส่วนหัวเผาหมายเลข 2 refractory nozzle sheet.....	156
ก1.4 รายละเอียดของชิ้นส่วนหัวเผาหมายเลข 3 burner main jacket.....	156
ก1.5 รายละเอียดของชิ้นส่วนหัวเผาหมายเลข 4 main refractory sheet.....	157
ก1.6 รายละเอียดของชิ้นส่วนหัวเผาหมายเลข 5 swirl box.....	157
ก1.7 รายละเอียดของชิ้นส่วนหัวเผาหมายเลข 6 swirl unit.....	158
ก1.8 รายละเอียดของชิ้นส่วนหัวเผาหมายเลข 7 end plate และหมายเลข 8 fuel tube.....	158
ก2.1 ส่วนประกอบหลักของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	160
ก2.2 ชิ้นส่วนหมายเลข 1 (ไซโคลน) ของระบบป้อนเชื้อเพลิง.....	160
ก2.3 รายละเอียดของหน้าแปลน และช่องทางออกอากาศของไซโคลน.....	161
ก2.4 รายละเอียดการเชื่อม และองค์ประกอบส่วนบนของไซโคลน.....	161
ก2.5 รายละเอียดส่วนบน และช่องทางเข้าอากาศของไซโคลน.....	162
ก2.6 รายละเอียดส่วนล่าง (กรวย) ของไซโคลน.....	162
ก2.7 ชิ้นส่วนหมายเลข 2 (ไซโลเก็บเชื้อเพลิง) ของระบบป้อนเชื้อเพลิง.....	163
ก2.8 รายละเอียดฝาปิดด้านบนของไซโลเก็บเชื้อเพลิง.....	163
ก2.9 รายละเอียดการเชื่อม และขนาดของไซโลเก็บเชื้อเพลิง.....	164
ก2.10 รายละเอียดหน้าแปลนของไซโลเก็บเชื้อเพลิง.....	164
ก2.11 ชิ้นส่วนหมายเลข 3 (สกรู) ของระบบป้อนเชื้อเพลิง.....	165
ก2.12 รายละเอียดช่องทางเข้าของเชื้อเพลิง และแผ่นปิดรางสกรูลำเลียง.....	165
ก2.13 รายละเอียดแผ่นปิดหัว-ท้ายของรางสกรูลำเลียง.....	166
ก2.14 รายละเอียดของรางสกรูลำเลียง.....	166
ก2.15 รายละเอียดช่องทางออกเชื้อเพลิงของสกรูลำเลียง.....	167
ก2.16 รายละเอียดของเพลลา และใบสกรูลำเลียง.....	167
ก3.1 ส่วนประกอบหลักของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	169

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัด XIII ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก3.2 รายละเอียดชิ้นส่วนหมายเลข 1 และ 3 ของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	169
ก3.3 รายละเอียดหน้าแปลนของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	170
ก3.4 รายละเอียดเปลือก (body) ของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	170
ก3.5 รายละเอียดจุดยึดของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	171
ก3.6 รายละเอียดรูระบายไถ่้าหนักของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	171
ก3.7 รายละเอียดชิ้นส่วนหมายเลข 2 ของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	172
ก3.8 รายละเอียดเปลือกของชิ้นส่วนหมายเลข 2 ของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	172
ก4.1 ส่วนประกอบหลักของสกรูระบายไถ่้าหนัก.....	174
ก4.2 รายละเอียดช่องทางเข้าของไถ่้าหนัก และรางของสกรูระบายไถ่้า.....	174
ก4.3 รายละเอียดขนาดเพลา และใบของสกรูระบายไถ่้า.....	175
ก4.4 รายละเอียดถังพักน้ำสำหรับหล่อเย็นใบสกรู.....	175
ก5.1 ส่วนประกอบหลักของระบบลดอุณหภูมิ และบำบัดไอเสีย.....	177
ก5.2 รายละเอียดฝาปิดด้านบนของห้องบำบัดไอเสีย.....	177
ก5.3 รายละเอียดรูเจาะ และเหล็กเสริมความแข็งแรงของฝาปิดห้องบำบัดไอเสีย.....	178
ก5.4 รายละเอียดการเชื่อม และขนาดห้องบำบัดไอเสีย.....	178
ก5.5 รายละเอียดหน้าแปลนของห้องบำบัดไอเสีย.....	179
ก5.6 รายละเอียดจุดยึดโครงสร้างของห้องบำบัดไอเสีย.....	179
ก5.7 รายละเอียดแผ่นด้านข้างของห้องบำบัดไอเสีย.....	180
ก5.8 รายละเอียดแผ่นด้านหน้าของห้องบำบัดไอเสีย.....	180
ก5.9 รายละเอียดการเชื่อม และขนาดช่องทางเข้าของแก๊สร้อนของห้องบำบัดไอเสีย.....	181
ก5.10 รายละเอียดหน้าแปลนช่องทางเข้าแก๊สร้อนของห้องบำบัดไอเสีย.....	181
ก5.11 รายละเอียดการเชื่อม และขนาดช่องทางออกของแก๊สไอเสีย.....	182
ก5.12 รายละเอียดหน้าแปลนช่องทางออกแก๊สไอเสีย.....	182
ก5.13 ลักษณะช่องระบายน้ำทิ้งของระบบบำบัดไอเสีย.....	183
ก5.14 รายละเอียดขนาด และหน้าแปลนของช่องระบายน้ำทิ้ง.....	183
ก5.15 รายละเอียดของแผ่นแบ่งช่องการไหลภายในห้องบำบัดไอเสีย.....	184
ก5.16 ขนาดของแผ่นแบ่งช่องการไหลภายในห้องบำบัดไอเสีย.....	184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตี XIV ึ่งอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# รายการคำย่อและสัญลักษณ์

## Roman symbols

$A$	พื้นที่หน้าตัดของใบสกรูขนถ่ายวัสดุ, ( $m^2$ )
$A_p$	พื้นที่ผิวภายนอกของอนุภาค, ( $m^2$ )
$A_s$	พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน, ( $m^2$ )
$C_1$	ค่าคงที่ของอัตราการแพร่ออกซิเจนภายในพื้นผิวอนุภาคซาร์
$C_2$	อัตราจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของซาร์
$CF_1$	แฟกเตอร์ระยะพิตซีใบสกรู
$CF_2$	แฟกเตอร์ชนิดของใบสกรู
$CF_3$	แฟกเตอร์จำนวนใบพัด
$D$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรู, ( $m$ )
$d$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา, ( $m$ )
$F_f$	แฟกเตอร์ใบสกรู
$F_m$	แฟกเตอร์วัสดุ
$F_o$	แฟกเตอร์กำลังขับ
$F_p$	แฟกเตอร์ใบพัด
$f$	ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์, ( $Hz$ )
$g$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, ( $m/s^2$ )
$H$	ระยะทางตามแนวตั้ง, ( $m$ )
$H_{burnout}$	ค่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ซาร์, ( $MJ/kg$ )
$h$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา, ( $kJ/kg \cdot K$ )
$h_c$	ค่าความร้อนของการเผาไหม้, ( $kJ/kg$ )
$h_D$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลแบบการพาโดยรวม, ( $kJ/kg \cdot K$ )
$h_{fg}$	ค่าความร้อนแฝงในการระเหย, ( $kJ/kg$ )
$i$	อัตราส่วนโดยมวลของคาร์บอนต่อออกซิเจน
$k$	แฟกเตอร์ความเต็มร้าง
$k$	ค่าสภาพนำความร้อน (thermal conductivity) ของตัวกลาง, ( $W/m \cdot K$ )
$k_c$	ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา
$L$	ความยาวสกรูขนถ่ายวัสดุ, ( $m$ )
$M$	มวลโมเลกุล
$MW_{air}$	น้ำหนักโมเลกุลของอากาศ
$MW_{fuel}$	น้ำหนักโมเลกุลของเชื้อเพลิง
$m_a$	มวลของเศษเถ้า, ( $kg$ )
$m_c$	มวลของถ่านซาร์, ( $kg$ )
$m_{fuel}$	มวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้, ( $kg$ )
$m_{H_2O}$	มวลของน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้, ( $kg$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$m_p$	มวลของอนุภาคเชื้อเพลิง, ( $kg$ )
$m_s$	อัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงมวล, ( $kg / s$ )
$m_v$	มวลของสารระเหย, ( $kg$ )
$N$	ความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายวัสดุ, ( $RPM$ )
$P$	กำลังขั้วรวม, ( $W$ )
$P_f$	คือกำลังขับสำหรับเอาชนะความเสียดทาน, ( $W$ )
$P_m$	กำลังขับที่ใช้ขนถ่ายวัสดุ, ( $W$ )
$P_v$	กำลังขับสำหรับยกวัสดุขึ้นตามแนวตั้ง, ( $W$ )
$p$	ระยะพิทช์สกรู, ( $m$ )
$\dot{Q}_{cond,x}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ หรือการนำความร้อน, ( $W$ )
$q''_{cond,x}$	ลัทธิความร้อน, ( $W / m^2$ )
$R_{cond}$	ความต้านทานต่อการนำความร้อน, ( $K / W$ )
$R_{conv}$	ค่าความต้านทานความร้อนของการพาความร้อน, ( $K / W$ )
$R_{cyl}$	ความต้านทานการนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก, ( $K / W$ )
$R_{total}$	ผลรวมของค่าความต้านทานทางความร้อน, ( $K / W$ )
$r_1$	รัศมีภายใน, ( $m$ )
$r_2$	รัศมีภายนอก, ( $m$ )
$Sh$	เลขเซอร์วูด
$T$	อุณหภูมิ, ( $K$ )
$T_1$	อุณหภูมิของผิวผนังชั้นแรก, ( $K$ )
$T_2$	อุณหภูมิผิวด้านนอกของฉนวนที่หุ้มท่อที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ, ( $K$ )
$T_{ad}$	อุณหภูมิเปลว adiabatic, ( $K$ )
$T_{n+1}$	อุณหภูมิของผิวผนังชั้นที่ n, ( $K$ )
$U$	สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวม, ( $W / m^2 \cdot K$ )
$V$	อัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงปริมาตร, ( $m^3 / s$ )
$v$	ความเร็วเฉลี่ยในการขนถ่ายวัสดุ, ( $m / s$ )
$x$	ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน, ( $m$ )

### Greek symbols

$\Phi$	อัตราส่วนสมมูล
$\rho_b$	ความหนาแน่นของวัสดุ, ( $kg / m^3$ )
$\eta$	ประสิทธิภาพการส่งกำลังขับ
$\eta_{comb}$	ประสิทธิภาพการเผาไหม้
$\eta_{heat}$	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน
$\lambda$	อัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตี XVI ไปถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าความต้องการทางด้านการใช้พลังงานของประเทศมีแนวโน้มสูงขึ้นตามพัฒนาการของประเทศ ซึ่งพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้จะเป็นพลังงานจากแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ ถ่านหิน ปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานเหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ประกอบกับการเกิดวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และความตระหนักในสถานะโลกร้อน ทำให้ทั้งภาครัฐ และเอกชนเกิดความตื่นตัวในการพยายามมองหาแหล่งพลังงานใหม่ๆ มาใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิล เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานคลื่นมหาสมุทร เป็นต้น แต่พลังงานในรูปแบบดังกล่าวจะต้องนำมาผ่านกระบวนการผลิตที่ค่อนข้างยุ่งยาก ต้องใช้เครื่องมือที่ทันสมัย จึงทำให้ยากที่จะนำพลังงานเหล่านี้มาใช้เนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างสูง

จากการที่สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรมได้มีการประชุมหารือร่วมกับกระทรวงพลังงาน และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ในเรื่องแนวทางการร่วมมือด้านพลังงานกับสาธารณรัฐเกาหลี เมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม 2555 เพื่อหาแนวทางการร่วมมือด้านพลังงานโดยเฉพาะด้านพลังงานทดแทน ซึ่งกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับด้านพลังงานทดแทนไว้ว่า พพ. จะให้ความสนใจกับพลังงานประเภทใหม่ที่มีในรูปแบบเดิมๆ โดยเป็นพลังงานที่น่าสนใจ และน่าจะพัฒนาให้เกิดขึ้นในประเทศได้อย่างมีศักยภาพหากได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยี หรือได้รับความร่วมมือจากประเทศที่มีเทคโนโลยีที่สูงกว่า ได้แก่ เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง (pellet) พลังงานจากคลื่นทะเล (tidal power and ocean current power) แก๊สจากหลุมฝังกลบขยะมูลฝอย (landfill gas) และระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (smart grid) [1] ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลังงานจากชีวมวลเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่ได้ถูกให้ความสนใจในหลายๆ ประเทศ สำหรับประเทศไทยซึ่งประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม พลังงานจากชีวมวลยิ่งได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากมีชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรในปริมาณมาก โดยเฉพาะชีวมวลของแข็ง (solid biomass) อาทิเช่น พางข้าว ชังข้าวโพด แกลบ ชี้อ้อย และเปลือกไม้ชนิดต่างๆ เป็นต้น แต่ทว่าชีวมวลของแข็งที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยมากมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก ทำให้มีความหนาแน่นของพลังงานต่ำ การลำเลียงเพื่อจำหน่ายจ่ายแจกก็เป็นไปได้ยากลำบากและไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งนำไปสู่ต้นทุนด้านการขนส่งและเก็บรักษาที่สูง การแปรรูปชีวมวลของแข็งเหล่านี้ให้มีรูปร่างสม่ำเสมอ และมีความหนาแน่นของพลังงานสูงขึ้น เช่น การอัดแท่ง (pelletization) จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ชีวมวลของแข็งที่ผ่านการแปรรูปดังกล่าวแล้วจะอยู่ในรูปของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (pellet) หรือหากชีวมวลของแข็งนั้นได้มาจากส่วนประกอบของไม้ก็จะเรียกว่าเชื้อเพลิงไม้อัดแท่ง (wood pellet)

ในการที่จะนำไม้อัดแท่ง (Wood pellet) มาเป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการผลิตแก๊สร้อน เพื่อนำไปใช้ในหม้อไอน้ำ (Boiler) จำเป็นต้องหาเทคโนโลยี หรือเทคนิคมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบหัวเผาที่มีความเหมาะสม ซึ่งเทคนิคการเผาไหม้แบบใช้หัวเผานั้นเหมาะสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีลักษณะเป็นผงบดละเอียด [2] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจกับหัวเผาเชื้อเพลิงแข็งในลักษณะที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นผง (pulverized burner) ซึ่งจะทำการศึกษา ออกแบบ และพัฒนาหัวเผา (burner) ให้มีความเหมาะสมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ถูกบดให้เป็นผง โดยจะเป็นการศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อการออกแบบหัวเผา และการศึกษาเชิงทดลอง ถึงอิทธิพลของเงื่อนไขการดำเนินการที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะด้านต่างๆ ซึ่งจะนำไปสู่สมรรถนะการเผาไหม้ที่เหมาะสมจากการทำงานของหัวเผา ซึ่งคาดว่าจะในอนาคตจะสามารถนำหัวเผาที่ถูกสร้างขึ้นมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ต่อไป

## 1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อออกแบบ และพัฒนาหัวเผา (burner) ให้มีความเหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง และเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับหม้อน้ำชนิดท่อไฟแบบวางนอน (Horizontal fire tube boiler)
2. เพื่อทำการศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขการดำเนินการที่มีผลต่อสมรรถนะด้านต่างๆของหัวเผา ได้แก่ อิทธิพลของขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงต่อลักษณะของเปลวไฟ อิทธิพลขององศาใบปิดต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วย และอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ และเชื้อเพลิงต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ และพฤติกรรมการหมุนวนของแก๊สร้อนภายในหัวเผา ซึ่งจะนำไปสู่สมรรถนะการเผาไหม้ที่เหมาะสมกับการทำงานของหัวเผาที่ได้รับการพัฒนา
3. ทำการทดลองเพื่อหาค่าการทำงานที่หัวเผาสามารถให้การเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง และมีเสถียรภาพ
4. เพื่อศึกษา และวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สไอเสีย ที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งบดละเอียด

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. ถ้าแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผง [3] ที่ใช้ในการจำลองเพื่อทำนายปรากฏการณ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นภายในหัวเผามีความแม่นยำ แล้วหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ที่ทำการออกแบบจะมีย่านการทำงาน ซึ่งให้การเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่เกิดปรากฏการณ์เป่าดับอยู่ระหว่าง 250 kW จนถึง 1 MW.
2. ถ้าองศาของใบปิดส่งผลต่อการหมุนวนของอากาศ และความปั่นป่วนภายในห้องเผาไหม้ช่วย แล้วการปรับเปลี่ยนองศาของใบปิดจะส่งผลให้สมรรถนะการเผาไหม้เปลี่ยนไป โดยที่มุมองศาใบปิดสูงๆ จะให้การหมุนวนและความปั่นป่วนสูง ซึ่งจะส่งผลให้สมรรถนะในการเผาไหม้ดีขึ้นตามไปด้วย

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบ และพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ให้มีความเหมาะสมสำหรับเตาขนาด 1 MW.
2. ใช้เชื้อเพลิงแก๊สธรรมชาติเหลว (LPG) และชีวมวลอัดแท่งจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้
3. สภาวะการทำงานอย่างต่อเนื่องของหัวเผา และชุดทดสอบคือ การที่ชุดทดสอบสามารถทำงานที่อัตราการเผาไหม้ อุณหภูมิ และความดัน ณ จุดต่างๆที่เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สมรรถนะการเผาไหม้ที่จะต้องทำการศึกษา ได้แก่ การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ช่วย ประสิทธิภาพการเผาไหม้ องค์ประกอบของแก๊สไอเสีย ย่านการทำงานที่ทำให้การเผาไหม้ที่มีเสถียรภาพ และปลอดภัย เป็นต้น
5. อุณหภูมิสูงสุดภายในห้องเผาไหม้ต้องไม่เกิน 1300 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่ผนังเตาเผาสามารถทนได้โดยไม่เกิดความเสียหาย
6. มุมของไบบิตคือมุมระหว่างไบบิตกับเส้นแนวรัศมี

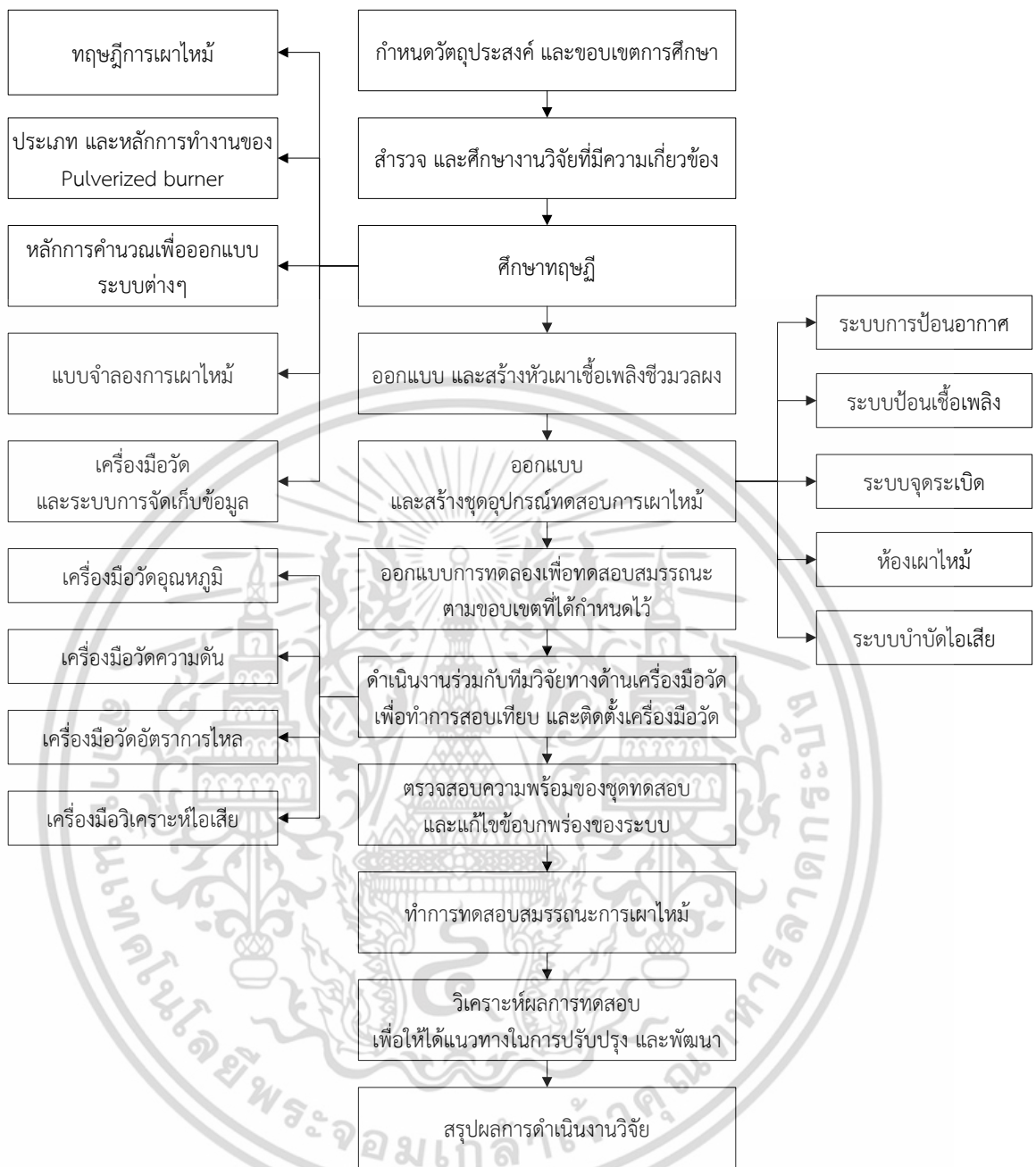
## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. กำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัย
2. สำรวจ และศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับหัวเผาเชื้อเพลิงแข็งในลักษณะที่เป็นผง (pulverized burner) และเชื้อเพลิงชีวมวลผง
3. ศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้ หลักการทำงาน หลักการคำนวณเพื่อการออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงแข็งในลักษณะที่เป็นผง และแบบจำลองการไหลในรูปแบบต่างๆที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย
4. ออกแบบ และสร้างหัวเผา ที่มีความเหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งบดละเอียด (pulverized wood pellet)
5. ออกแบบการทดลองพร้อมทั้งสร้าง และติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบ อาทิเช่น ระบบป้อนอากาศ ระบบป้อนเชื้อเพลิง ระบบจุดระเบิด ห้องเผาไหม้ และระบบบำบัดไอเสีย เป็นต้น
6. ดำเนินการร่วมกับทีมวิจัยทางด้านเครื่องมือวัด เพื่อทำการสอบเทียบ (calibrate) และติดตั้งชุดเครื่องมือวัด
7. ตรวจสอบความพร้อมของชุดอุปกรณ์ทดลอง และปรับปรุงข้อผิดพลาดของระบบต่างๆ
8. ทำการทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะของหัวเผาตามสมมติฐาน และขอบเขตที่ได้กำหนดไว้
9. วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนา และปรับปรุง พร้อมทั้งสรุปผลการดำเนินโครงการ

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการนำเชื้อเพลิงพลังงานทางเลือกที่เป็นพลังงานหมุนเวียน ซึ่งหาได้ง่ายจากวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร และได้เทคโนโลยีที่สามารถนำพลังงานจากเชื้อเพลิงดังกล่าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เพื่อทดแทนแหล่งพลังงานหลักที่มีใช้อยู่เดิม
2. ได้ต้นแบบหัวเผา (burner) ที่มีความเหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งบดละเอียด (pulverized wood pellet) เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง ใช้เชื้อเพลิงให้เกิดความคุ้มค่าอย่างสูงสุด และในทางตรงข้ามที่ต้องให้เกิดมลพิษทางอากาศน้อยที่สุด
3. เพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมพลังงานทางเลือกของไทย ให้สามารถผลิตและจำหน่ายหัวเผาที่มีศักยภาพ ทดแทนหัวเผาเชื้อเพลิงน้ำมันเตา ช่วยลดการนำเข้าหัวเผา และอุปกรณ์จ่ายเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ และสามารถแข่งขันกับประเทศในกลุ่มอาเซียน อันเนื่องมาจากการเปิดเสรีทางการค้า AEC ในปี พ.ศ.2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

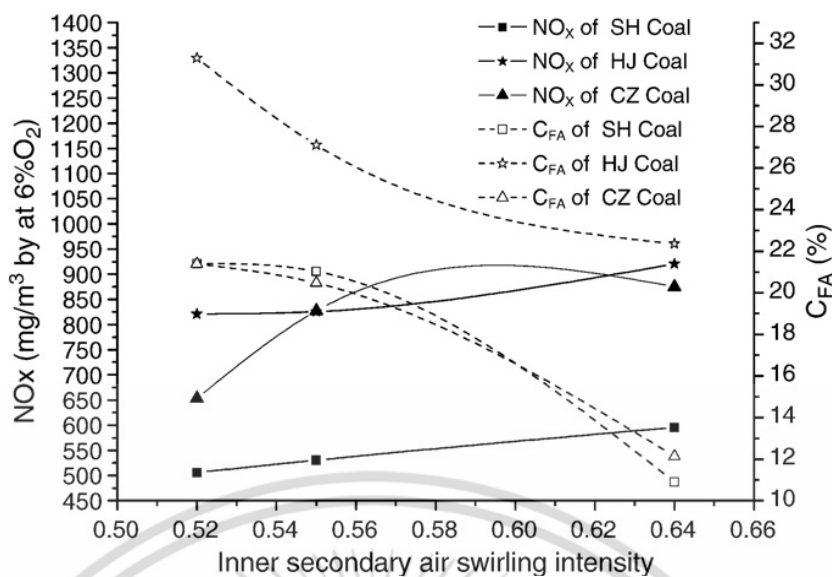
## บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์

จากบทที่หนึ่งได้ทราบแล้วว่างานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นในด้านการออกแบบ และพัฒนาหัวเผา (burner) ให้มีความเหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งบดละเอียด (pulverized wood pellet) นอกจากนี้ยังมุ่งเน้นที่จะศึกษาให้ทราบถึงย่านการทำงาน และสมรรถนะของหัวเผาดังกล่าวอีกด้วย ซึ่งในการออกแบบนั้น จำเป็นต้องทำการศึกษาถึงหลักการการทำงานของหัวเผา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งต้องศึกษางานวิจัยที่มีผู้ทำมาก่อน เพื่อให้ทราบถึงแนวคิด สมบัติ และปัจจัยต่างๆที่อาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของหัวเผา นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันการละเมิดสิทธิบัตรของผู้วิจัยท่านอื่น ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันนั้นมีนักวิจัยทั้งใน และต่างประเทศได้ศึกษาในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่คุณวิจัยกำลังศึกษามากมาย อาทิเช่น

Roberto Garcia และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตร และอุตสาหกรรมแปรรูปสินค้าเกษตรกรรมในประเทศสเปน พบว่าชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน ( $N$ ) และซัลเฟอร์ ( $S$ ) ในปริมาณน้อย ซึ่งจะส่งผลให้มีการปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในปริมาณที่น้อยเช่นกัน ในขณะที่อุกฤษฏ์ สหพันธ์สมบัติ และคณะ [5] ทำการศึกษาเบื้องต้นถึงคุณภาพของชีวมวลสำหรับเชื้อเพลิงไม้อัดแท่งในประเทศไทย พบว่าทางปาล์ม ลำต้นปาล์ม และทะลายปาล์ม มีองค์ประกอบทางเคมี (ตัวอย่างเช่น potassium และ sulfur เป็นต้น) ที่ก่อให้เกิดขี้เถ้า ตะกรัน มลพิษทางอากาศ และการกัดกร่อนของชิ้นส่วนอุปกรณ์ อยู่ในปริมาณที่ต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษ ซึ่งปริมาณ potassium ที่สูงในวัสดุติดจะส่งผลให้อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของเถ้า (ash melting point) น้อยลง นอกจากนี้ค่าพลังงานความร้อนก็ยังต่ำกว่ามาตรฐานอีกด้วย ส่วนน้ำยาเคมีที่ใช้กับไม้ยางพารามีองค์ประกอบของโลหะหนักจำพวก zinc lead อยู่สูง ซึ่งจะก่อให้เกิดขี้เถ้า และมลพิษทางอากาศมากขึ้น

K.D. Tiggesa และคณะ [6] ได้ศึกษาเทคโนโลยีการเผาไหม้ถ่านหินปนในโรงไฟฟ้าถ่านหินขนาดใหญ่ โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างการเผาไหม้ภายใต้สภาวะ oxyfuel-fired และ air-fired ประกอบกับการที่หัวเผามีอุปกรณ์สร้างอากาศหมุนควง (swirl) ประกอบอยู่ด้วยจะส่งผลให้อากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้เกิดการหมุนวนทำให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม ในขณะที่ Shan Xue และคณะ [7] ได้ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ และปริมาณคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอย ของการเผาไหม้ถ่านหินภายในเตาขนาด 1 MW พบว่าอัตราส่วนอากาศปฐมภูมิ อากาศหตุยภูมิ swirl number และองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ล้วนส่งผลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ และคาร์บอนคงเหลือทั้งสิ้น แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 2.1 อิทธิพลของอากาศหมุนควงต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) และคาร์บอน ( $C_{FA}$ ) ที่ปนไปกับไอเสีย พบว่าเมื่อความรุนแรงของอากาศหมุนควงเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณคาร์บอน ( $C_{FA}$ ) ที่ปนไปกับไอเสียลดน้อยลง เนื่องจากความรุนแรงของอากาศที่หมุนควงที่เพิ่มขึ้น จะเหนี่ยวนำให้เกิดพฤติกรรมการหมุนวนของแก๊สร้อน ความปั่นป่วน และการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศในอัตราที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ จึงทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามกลับทำให้ไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจาก thermal  $NO_x$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

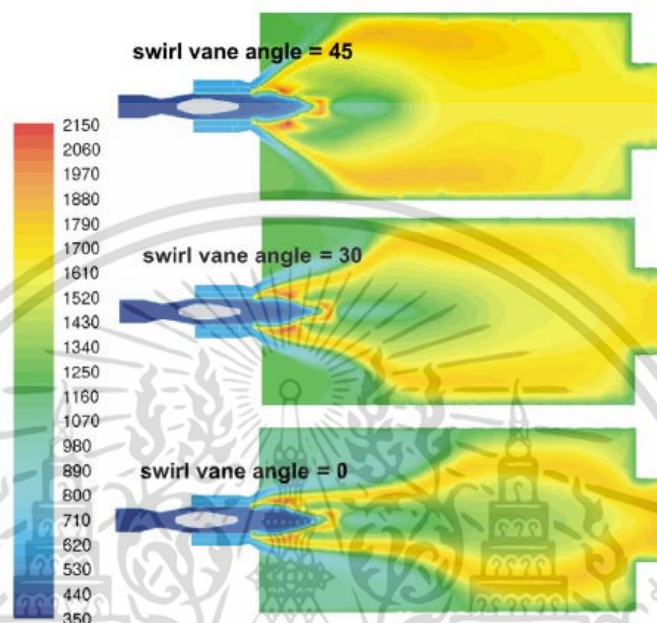


รูปที่ 2.1 ความรุนแรงของอากาศหมุนควงต่อไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และคาร์บอน (C<sub>FA</sub>) ในไอเสีย

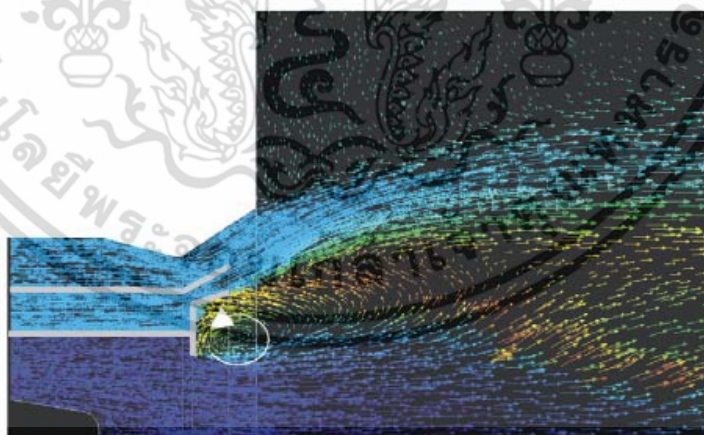
ธิติพัทธ์ ลิ้มกุล และคณะ [8] พบว่าลักษณะพฤติกรรมการไหลของอากาศที่เกิดจากการใช้หลักการหมุนควง ส่งผลดีต่อปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงขึ้น เนื่องจากลักษณะการไหลแบบหมุนควงของอากาศและเชื้อเพลิง ทำให้มีระยะทางในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาที่อากาศและเชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาที่มากขึ้น เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้นานขึ้น เมื่ออากาศและเชื้อเพลิงสามารถเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้นานขึ้น ย่อมส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาสูงขึ้น และสูงพอที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ลักษณะการไหลแบบหมุนควงของอากาศและเชื้อเพลิง จะช่วยเพิ่ม ความรุนแรงของความปั่นป่วนของกระแสการไหล ซึ่งจะกระตุ้นให้ถ้าที่เกาะอยู่ที่ผิวด้านนอกของเชื้อเพลิง หลุดออกทำให้อากาศสามารถเข้าทำปฏิกิริยาด้านในของเชื้อเพลิงได้ ช่วยให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากขึ้น เช่นเดียวกับ Norbert Modlinski [9] ที่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบมุมมองของไบ บิดต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ถ่านหินผง ซึ่งพบว่าอากาศหมุนควงจะส่งผลต่อเสถียรภาพของเปลวไฟ บริเวณหัวฉีดเชื้อเพลิง เมื่อมุมของไบบิดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การลุกติดไฟของเชื้อเพลิงเกิดเร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวยังส่งผลต่อตำแหน่งของฐานเปลวไฟ โดยอิทธิพลของอากาศที่หมุนควงจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนของแก๊สร้อนบริเวณใกล้หัวฉีด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่ถูกพ่นออกมาจากหัวฉีดเกิดการผสมกับกระแสของแก๊สร้อน สารระเหยจะถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคเชื้อเพลิง และเกิดการติดไฟในที่สุด จึงทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง

กัณฑ์ อุดมโชคปิติ [10] ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อการออกแบบหัวเผาถ่านหินผงที่มีการหมุนวนแก๊สไอเสีย พบว่าลักษณะการเผาไหม้ถ่านหินแบบที่มี และไม่มี การหมุนเวียนของไอเสียมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งหัวเผาถ่านหินที่ไม่มี การหมุนเวียนไอเสียจะมีการเผาไหม้ที่รุนแรงกว่า อันเนื่องมาจากไม่มีไอเสียมาชะลอการเผาไหม้ เป็นผลให้ power output ที่ได้มีค่าสูง แต่ทว่าที่เงื่อนไขการทำงานเดียวกันค่าการปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ของกรณีที่มีการหมุนเวียนแก๊สไอเสียจะต่ำกว่ากรณีที่ไม่มี การหมุนวนแก๊สไอเสีย เนื่องจากอุณหภูมิของการเผาไหม้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ไม่มีการหมุนวนแก๊สไอเสียมีอุณหภูมิที่สูงกว่า บวกกับการที่การหมุนวนแก๊สไอเสียในห้องเผาไหม้นั้นเป็นการเจือจางความเข้มข้นของออกซิเจน ซึ่งเป็นการลดโอกาสที่ไนโตรเจนจากเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน นอกจากนี้ยังให้ข้อสรุปอีกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ไนโตรเจนออกไซด์ส่วนใหญ่จะเกิดจากองค์ประกอบไนโตรเจนของเชื้อเพลิง (fuel  $\text{NO}_x$ ) นั่นเอง



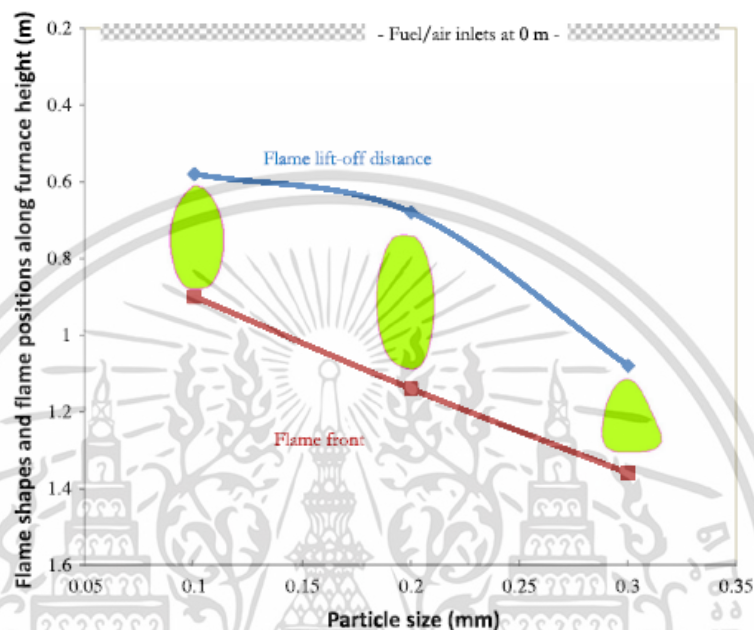
รูปที่ 2.2 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ (K) ที่มุมใบพัดต่างกัน [9]



รูปที่ 2.3 เส้นทางการไหลของแก๊สร้อน [9]

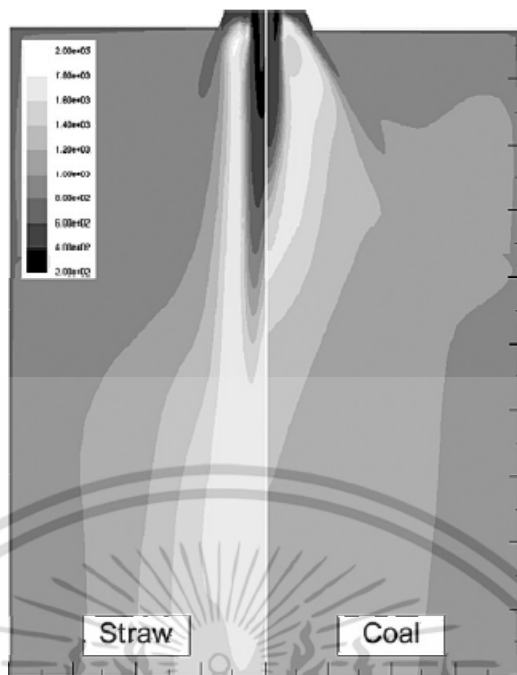
ซึ่งนอกเหนือจากอิทธิพลของอากาศหมุนวนที่ส่งผลต่อการเผาไหม้แล้ว สำหรับเชื้อเพลิงแข็ง ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงก็เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการเผาไหม้ โดย Jun Li และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงต่อพฤติกรรมของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล และสังเกตเห็นว่าเมื่ออนุภาคเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่ขึ้น ฐานของเปลวไฟจะเอียงมากขึ้นเป็นเอียงที่สวมนิวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่อยๆเลื่อนออกไปสู่บริเวณส่วนปลายของห้องเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เนื่องจากเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ต้องการใช้ระยะเวลาในกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยที่ค่อนข้างนาน ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ช้าลงเกิดล่าช้าตามไปด้วย นอกจากนี้หากทำการทดลองที่สภาวะเดียวกัน การเผาไหม้ออนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กจะให้อุณหภูมิที่สูงกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงขนาดใหญ่ ซึ่งบ่งชี้ว่าอนุภาคเชื้อเพลิงขนาดเล็กจึงมีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สั้นกว่า

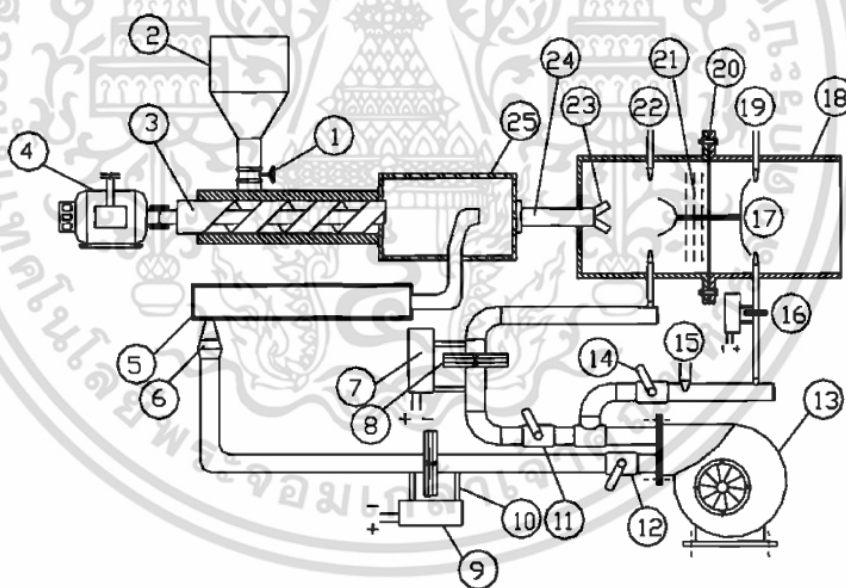


รูปที่ 2.4 ตำแหน่งของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ออนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดต่างกัน [11]

M Mando และคณะ [12] ได้ทำการศึกษการเผาไหม้ของฟางข้าวบดละเอียด (pulverized straw) โดยใช้หัวเผาถ่านหินปน ซึ่งพบว่าหัวเผาเชื้อเพลิงถ่านหินปน สามารถนำมาใช้กับฟางข้าวบดละเอียดได้ แต่เมื่อทดสอบที่สภาวะการทำงานเดียวกัน พบว่าเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวจะมีความยาวมากกว่าเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยขนาดของอนุภาคฟางข้าวปนนั้นมีผลต่อความรุนแรงของการเผาไหม้ ซึ่งหากอนุภาคมีขนาดใหญ่ความรุนแรงของการเผาไหม้จะลดลง M. M. Kamal [13] ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้และเปลวไฟ ที่เกิดจากการผสมถ่านหินและไม่มีการผสมถ่านหินของหัวเผาถ่านหิน ได้แก่ องค์การฉีดเชื้อเพลิง ลักษณะของรูปปั้นเชื้อเพลิง เป็นต้น ซึ่งได้นำเสนอชุดทดสอบ และส่วนประกอบของชุดทดสอบสมรรถนะของหัวเผาที่มีความเหมาะสมกับเชื้อเพลิงร่วมแก๊สและถ่านหิน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งชุดทดสอบดังกล่าวถือเป็นแนวทางสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้กับการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งชนิดอื่นๆได้ เช่นเดียวกับ Akio Nishiyama และคณะ [14] ที่ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของเชื้อเพลิงและมลพิษของเครื่องยนต์ Stirling ที่ขับเคลื่อนด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลไม้บดละเอียด ซึ่งได้นำเสนอถึงการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลไม้บดละเอียด และชุดทดสอบสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และพบว่าห้องเผาไหม้ที่มีความยาว 3 เมตรมีความเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดน้อยกว่า 500 ไมโครเมตร

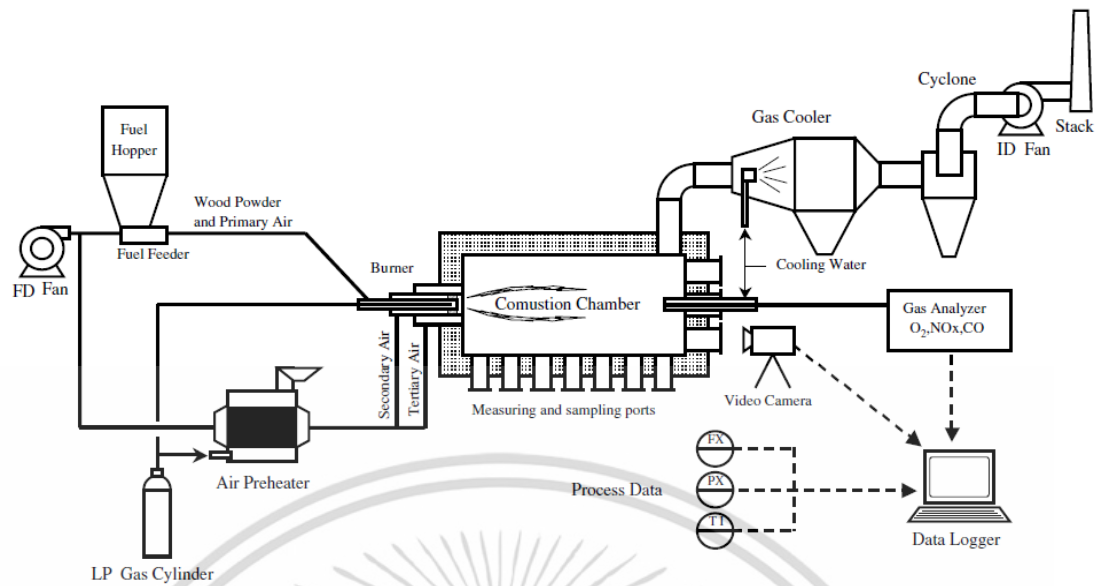


รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุกรมของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลกับถ่านหิน [12]



รูปที่ 2.6 ลักษณะของชุดทดสอบการเผาไหม้ของ M. M. Kamal [13] (1) Needle valve; (2) hopper; (3) lead screw; (4) variable speed motor; (5) air delivery tube; (6) air delivery nozzle; (7) pressure transducer; (8) orifice plate; (9) pressure transducer; (10) manometer tapings; (11) ball valve; (12) ball valve; (13) blower; (14) ball valve; (15) fuel nozzle; (16) orifice arrangement; (17) curved end; (18) combustion chamber; (19) mixture ports; (20) perforated plate; (21) porous plates; (22) nozzle; (23) burner end; (24) delivery tube; (25) coal delivery chamber.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงของ Akio Nishiyama [14]

จากข้อมูลโดยรวมอาจจะกล่าวได้ว่า หัวเผาเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้อยู่ในปัจจุบันยังไม่เหมาะสมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากส่วนใหญ่จะทำการประยุกต์ใช้หัวเผาเชื้อเพลิงถ่านหินมาใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวล อย่างไรก็ตาม ธนภัทร์ ภักดีวรวงศ์ [3] ซึ่งเป็นหนึ่งในทีมวิจัย ได้พบว่าการใช้แบบจำลองการเผาไหม้ species transport แบบจำลองการปั่นป่วน  $k-\epsilon$  Standard โดยมีการเพิ่มค่าคงที่ของอัตราการแพร่ออกซิเจนภายในพื้นผิวอนุภาคคาร์บอน และอัตราจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนในอัตราส่วน 2.5 เท่าของค่าเริ่มต้น และใช้แบบจำลองติดตามแบบสุ่ม (random walk) ให้ผลการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผง ที่มีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองอย่างน่าพอใจ และแบบจำลองดังกล่าวถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง เพื่อทำการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงสำหรับหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ขนาด 1 MW ที่ทำการออกแบบ และกำหนดขนาด (dimension) ไว้ในเบื้องต้น พบว่าหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วยที่มีมุมผนังบริเวณทางออกเท่ากับ 90 องศา ทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการฟุ้งกระจายที่มากขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย ส่งผลให้อนุภาคสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง จึงนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเผาไหม้ ซึ่งช่วยให้สามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ โดยไม่เกิดปรากฏการณ์เป่าดับ (blow off)

## บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้จะนำเสนอถึงทฤษฎีต่างๆที่ใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบชุดทดสอบการเผาไหม้ เชื้อเพลิงชีวมวลผง ได้แก่ การขนถ่ายวัสดุ การถ่ายเทความร้อน เชื้อเพลิง และการเผาไหม้ เป็นต้น

### 3.1 สกรูขนถ่ายวัสดุ (Screw Conveyors) [15, 16]

สกรูขนถ่ายวัสดุ เป็นอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุที่มีใช้งานมานานกว่า 2,000 ปีแล้ว โดยในยุคแรกใช้สำหรับขนถ่ายของเหลว และสิ่งปฏิกูล แต่ในปัจจุบันจะนิยมใช้กับการขนถ่ายวัสดุปริมาณมวล โดยส่วนประกอบหลักของสกรูขนถ่ายวัสดุนั้นแสดงดังรูปที่ 3.1



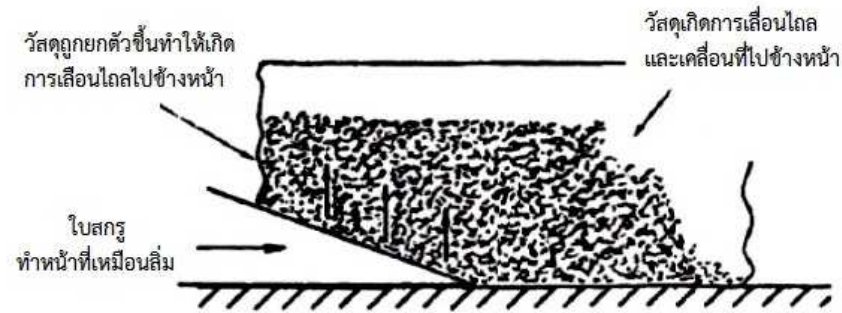
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของสกรูขนถ่าย

#### 3.1.1 หลักการทำงาน และการใช้งาน

สกรูขนถ่ายวัสดุเป็นอุปกรณ์ในการขนถ่ายวัสดุ ที่เหมาะสำหรับขนถ่ายวัสดุที่มีสมบัติในการไหลดี ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การหมุนของใบเกลียวจะทำให้เกิดการยกวัสดุขึ้นเหมือนลักษณะลิ้ม การเคลื่อนที่ขึ้นของวัสดุจะทำให้วัสดุเกิดการเลื่อนไหลไปข้างหน้าได้ และการหมุนของใบเกลียวจะทำงานเสมือนลิ้มที่ทำหน้าที่ผลักดัน และตัดเฉือนวัสดุจากการหมุนของใบเกลียวทำให้วัสดุเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้อย่างต่อเนื่อง

ตัวรางของสกรูขนถ่ายวัสดุโดยทั่วไปสามารถแบ่งเป็นสองชนิด คือรางแบบกลม และรางรูปตัวยู ซึ่งรางแบบกลมจะเป็นสกรูที่ใช้ความเร็วรอบสูง เป็นแบบที่เคลื่อนที่ได้ สามารถนำไปใช้ในสถานที่ต่างๆได้ และยังใช้สำหรับการขนถ่ายวัสดุตามแนวตั้งได้อีกด้วย ส่วนรางแบบตัวยูจะใช้ความเร็วต่ำกว่า และเป็นแบบที่ติดตั้งอยู่กับที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุบนใบเกลียว

### 3.1.2 ชนิดของใบเกลียว

ใบเกลียว (screw flight) ของสกรูขนถ่ายวัสดุโดยทั่วไปจะมีขนาดเท่ากับระยะพิตช์ของใบเกลียว อาจเป็นเกลียวขวาหรือเกลียวซ้าย ซึ่งกำหนดโดยการหมุนของใบสกรู ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ลักษณะ และรูปแบบการใช้งานของใบสกรูมีมากมาย ขึ้นอยู่กับความต้องการการใช้งาน รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างลักษณะรูปร่างของใบสกรูประเภทต่างๆ



รูปที่ 3.3 ลักษณะใบเกลียวซ้าย และเกลียวขวา



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างลักษณะรูปร่างของใบสกรูประเภทต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การแบ่งประเภทของวัสดุ

การแบ่งประเภทของวัสดุจะช่วยให้ในการตัดสินใจเลือกสกรูขนถ่ายวัสดุ และกำหนดอัตรา การขนถ่ายวัสดุ ซึ่งวัสดุจะถูกแบ่งออกเป็นสี่ชนิดหลักๆ ดังนี้

ประเภทที่ 1 วัสดุเบา ไหลได้ดี ไม่มีความคม เช่น เมล็ดข้าวสาลี ฝักข้าวโพด และแกรไฟต์

ประเภทที่ 2 วัสดุไม่มีความคม คุณสมบัติในการไหลได้น้อยกว่าวัสดุประเภทที่ 1 (วัสดุ ก้อนเล็กผสมกับวัสดุละเอียด) เช่น แป้งอบขนมปัง ถ่านหินบดละเอียด และข้าวโพดบด เป็นต้น

ประเภทที่ 3 คุณสมบัติการไหลคล้ายแบบประเภทที่ 2 แต่มีคมมากกว่า ต้องการความเร็ว รอบของสกรูต่ำ เช่น ซีเมนต์แห้ง ปูนซีเมนต์ เกลือ ถ่านไม้ และซอล์กบด เป็นต้น

ประเภทที่ 4 วัสดุมีความคม และคุณสมบัติการไหลไม่ดี เช่น ถ่านหิน กากถ่านหิน กากแร่จากเตาอะลูมินา (alumina) และทรายแห้ง เป็นต้น

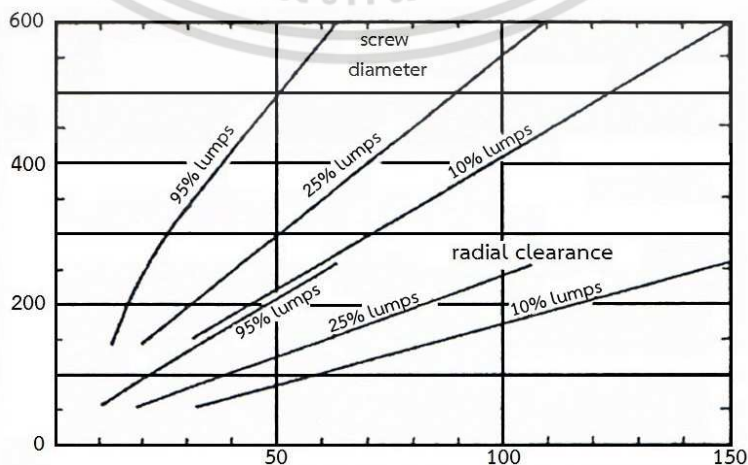
### 3.1.4 ข้อกำหนดเกี่ยวกับขนาดของวัสดุ

ขนาดของสกรูขนถ่ายวัสดุไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับอัตราการขนถ่ายวัสดุที่ต้องการเท่านั้น แต่ยัง ขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุที่จะขนถ่ายด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีข้อกำหนดเรื่องขนาดของวัสดุที่ขนถ่าย ด้วย ขนาดของก้อนวัสดุสามารถแบ่งเป็นสามชนิดดังต่อไปนี้

3.1.4.1 วัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนปนอยู่กับวัสดุละเอียด โดยที่วัสดุก้อนใหญ่สุดถึงขนาด ครึ่งหนึ่งของขนาดก้อนใหญ่สุดไม่เกิน 10% ของวัสดุทั้งหมด และเป็นวัสดุก้อนเล็กกว่าครึ่งหนึ่งของ วัสดุขนาดใหญ่สุดอีก 90% ของวัสดุทั้งหมด (เรียกว่า 10% lump)

3.1.4.2 วัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนปนอยู่กับวัสดุละเอียด โดยที่วัสดุก้อนใหญ่สุดถึงขนาด ครึ่งหนึ่งของขนาดก้อนใหญ่สุดไม่เกิน 25% ของวัสดุทั้งหมด และเป็นวัสดุก้อนเล็กกว่าครึ่งหนึ่งของ วัสดุขนาดใหญ่สุดอีก 75% ของวัสดุทั้งหมด (เรียกว่า 25% lump)

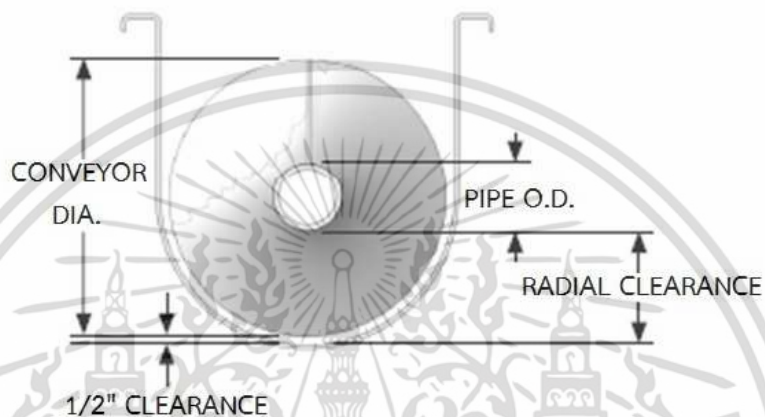
3.1.4.3 วัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนปนอยู่กับวัสดุละเอียด โดยที่วัสดุก้อนใหญ่สุดถึงขนาด ครึ่งหนึ่งของขนาดก้อนใหญ่สุดไม่เกิน 95% ของวัสดุทั้งหมด และเป็นวัสดุก้อนเล็กมากกว่าครึ่งหนึ่ง ของวัสดุขนาดใหญ่สุดอีก 5% ของวัสดุทั้งหมด (เรียกว่า 95% lump)



รูปที่ 3.5 ขนาดก้อนวัสดุใหญ่ที่สุดและขนาดของสกรูที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารได้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูงและต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 เป็นขนาดวัสดุก้อนใหญ่สุดที่มีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรู และระยะว่างตามแนวรัศมี (radial clearance) ของสกรูขนถ่ายวัสดุ เช่น วัสดุขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ประเภท 25% lump จะต้องใช้สกรูขนถ่ายวัสดุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรู 300 มิลลิเมตร (ประมาณ 12 นิ้ว) และมีระยะว่างรัศมี (radial clearance) 125 มิลลิเมตร (ประมาณ 5 นิ้ว) ดังนั้นในกรณีที่สกรูขนถ่ายวัสดุทำการขนถ่ายวัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อน จะสามารถใช้รูปที่ 3.5 สำหรับกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรูได้ โดยที่ช่องว่างระหว่างใบสกรูกับรางสกรูจะมีค่าประมาณ 12-15 มิลลิเมตร (ประมาณ 1/2 นิ้ว) ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะหน้าตัดของสกรูขนถ่าย

### 3.1.5 การคำนวณหาอัตราการขนถ่ายวัสดุ

อัตราการขนถ่ายวัสดุของสกรูขนถ่ายวัสดุ หรือสกรูป้อนวัสดุ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. รูปร่างของใบสกรู
2. ความเร็วรอบของสกรู
3. มุมลาดเอียงในการขนถ่ายวัสดุ
4. รูปร่างของถังเก็บวัสดุ และรางสกรูขนถ่ายวัสดุ
5. คุณสมบัติในการไหลของวัสดุ
6. สมบัติประสิทธิผลความเสียหายของวัสดุบนใบสกรูและราง

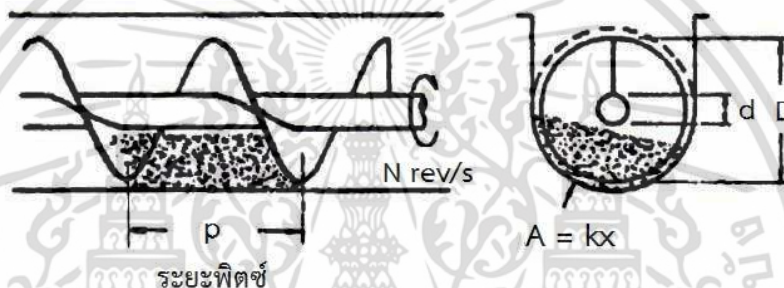
สมาคมผู้ผลิตอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุของอเมริกา (CEMA) ได้มีการพิมพ์ตารางอัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงปริมาตรสำหรับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุถึง 45% ซึ่งคิดตามพื้นที่หน้าตัดเต็มของใบสกรู และไม่คำนึงถึงวัสดุที่อยู่ตรงช่องว่างระหว่างใบสกรูกับตัวรางสกรูภายใต้สภาพการใช้งานทั่วไป การที่ไม่คำนึงถึงปริมาตรของวัสดุดังกล่าว เป็นเรื่องไม่สำคัญนักในกรณีที่วัสดุเป็นผงละเอียด ส่วนใหญ่มักจะหยุดอยู่ตามช่องว่างนั้น หรืออาจจะเคลื่อนที่เข้ามาๆ อย่างไม่รู้ทิศทางวัสดุบางชนิด เช่น วัสดุก้อนขนาดใหญ่ หรือวัสดุที่เป็นเส้นใยจะสามารถเคลื่อนที่ไปด้วยกันทั้งหมดในช่องว่าง ดังนั้นอัตราการขนถ่ายเชิงปริมาตร จะสูงกว่าค่าที่ปรากฏอยู่ในตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แฟกเตอร์ระยะพิตช์ใบสกรู

รายละเอียดของระยะพิตช์	CF <sub>1</sub>
ระยะพิตช์= เส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรู	1.00
ระยะพิตช์= 2/3 เส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรู	1.50
ระยะพิตช์= 1/2 เส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรู	2.00
ระยะพิตช์= 3/2 เส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรู	0.67

การคำนวณหาอัตราการขนถ่ายวัสดุของสกรูขนถ่ายวัสดุ สามารถหาได้จากรูปแบบการขนถ่ายวัสดุในรูปที่ 3.7 การหมุนของสกรูจะทำให้วัสดุเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่อง ด้วยความเร็วโดยประมาณเท่ากับความเร็วรอบของสกรูที่กำลังหมุนอยู่ ทำให้ความเร็วเฉลี่ยในการขนถ่ายวัสดุ ( $v$ ) และความเร็วรอบของสกรูเป็นดังนี้



รูปที่ 3.7 หลักการคำนวณหาอัตราการขนถ่ายวัสดุ

$$v = pN \tag{3.1}$$

เมื่อ  $v$  คือความเร็วเฉลี่ยในการขนถ่ายวัสดุ (m/s)  $p$  คือระยะพิตช์สกรู (m) และ  $N$  คือความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายวัสดุ (Hz) ดังนั้นอัตราการขนถ่ายวัสดุ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2)

$$V = pNA \tag{3.2}$$

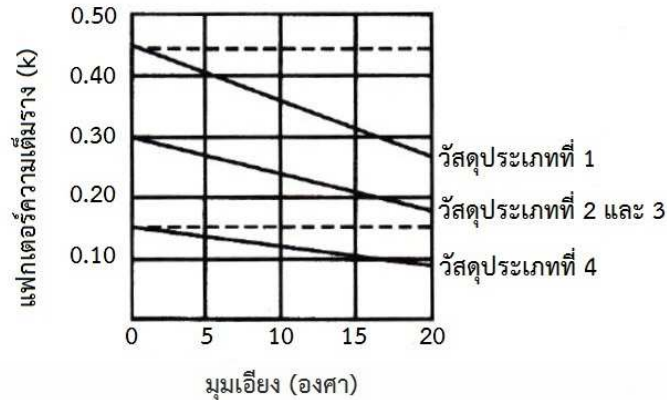
เมื่อ  $V$  คืออัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงปริมาตร และอัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงมวล ( $m^3/s$ )

$$m_s = \rho_b pNA \tag{3.3}$$

เมื่อ  $m_s$  คืออัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงมวล (kg/s)  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของใบสกรูขนถ่ายวัสดุ ( $m^2$ ) และ  $\rho_b$  คือความหนาแน่นของวัสดุ ( $kg/m^3$ )

ในทางปฏิบัติ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุจะมีค่าไม่เท่ากับพื้นที่หน้าตัดของรางสกรู ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นจึงต้องคูณพื้นที่หน้าตัดของสกรูขนถ่ายวัสดุด้วย แฟกเตอร์ความเต็มราง ( $k$ ) ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



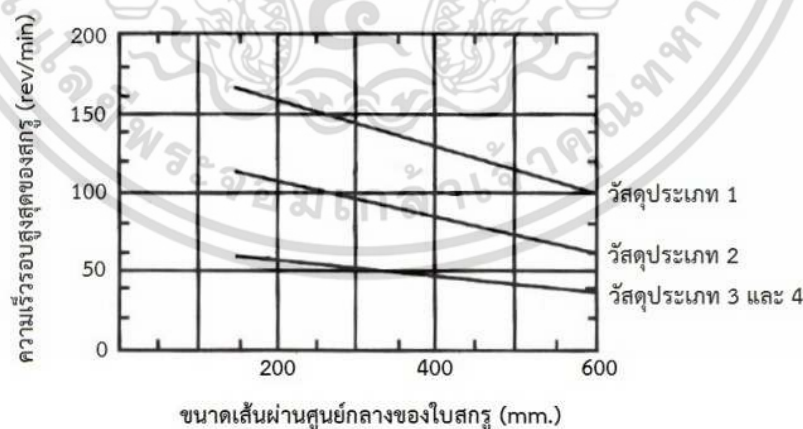
รูปที่ 3.8 แพกเตอร์ความเต็มราง ( $k$ )

จากรูปที่ 3.8 สามารถสรุปการนำค่าแพกเตอร์ความเต็มรางไปใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุ ดังนั้นเมื่อแทนค่าพื้นที่หน้าตัดของใบสกรูชนถ่ายวัสดุ และรวมค่าแพกเตอร์ความเต็มรางเข้าไป จะได้เป็นสมการที่ 3.4

$$m_s = \frac{\rho_b \pi (D^2 - d^2) k p N}{4} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $D$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรู (m) และ  $d$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา (m)

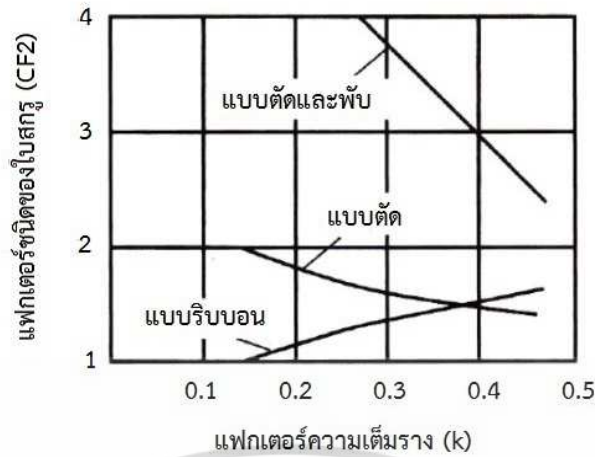
ในการเลือกและการออกแบบสกรูชนถ่ายวัสดุ ความเร็วรอบสูงสุดที่สามารถทำงานได้นั้น จะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรู ปริมาณวัสดุในรางสกรูและคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งสามารถค่าความเร็วรอบสูงสุดของสกรูชนถ่ายวัสดุได้จากรูปที่ 3.9



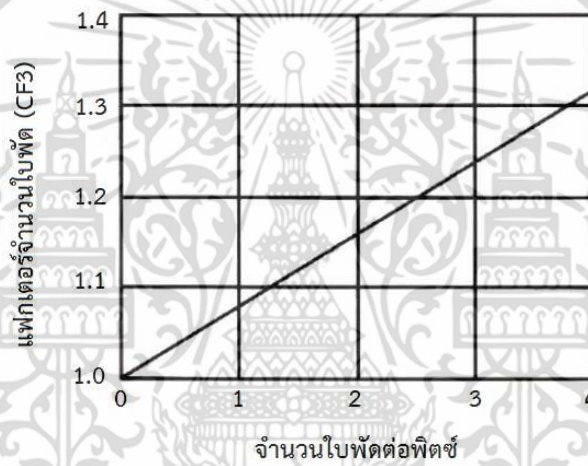
รูปที่ 3.9 ความเร็วรอบสูงสุดของสกรูชนถ่ายวัสดุ

จากรูปที่ 3.7 เมื่อพิจารณาการหมุนของสกรู 1 รอบวัสดุจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเท่าระยะพิทช์ ดังนั้นในกรณีที่สกรูหมุนไป 1 รอบแต่วัสดุไม่ได้เคลื่อนที่ไปเท่ากับระยะพิทช์ ก็จะต้องคำนึงถึงระยะพิทช์ใบสกรูด้วย ซึ่งแพกเตอร์ระยะพิทช์ใบสกรู ( $CF_1$ ) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แפקเตอร์ชนิดของใบสกรู



รูปที่ 3.11 แפקเตอร์จำนวนใบพัด

ชนิดของใบสกรูก็เป็นแפקเตอร์ที่มีผลต่ออัตราการขนถ่ายวัสดุเช่นกัน ซึ่งแפקเตอร์ชนิดของใบสกรูนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของใบสกรู ( $CF_2$ ) และจำนวนใบพัดสำหรับการกวาดหรือผสมวัสดุต่อระยะพิตช์ ( $CF_3$ ) โดยแפקเตอร์ทั้งสองนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 ตามลำดับ การคำนวณหาอัตราการขนถ่ายวัสดุเมื่อรวมเอาแפקเตอร์ต่างๆ ไว้แล้วจะคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3.5

$$m_s = \frac{\rho_b \pi (D^2 - d^2) k p N}{4CF_1 CF_2 CF_3} \quad (3.5)$$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ 3.5 เมื่อกำหนดอัตราการขนถ่ายวัสดุ และขนาดของใบสกรูมาแล้ว ก็จะสามารถคำนวณหาความเร็วรอบของสกรูได้จากสมการที่ 3.6

$$N = \frac{4m_s CF_1 CF_2 CF_3}{\rho_b \pi (D^2 - d^2) k p} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.16 การหากล้างขับ

กำลังขับสกรูขนถ่ายวัสดุโดยทั่วไปแล้วอาจแบ่งได้เป็นสามประเภทหลักๆ ได้แก่ กำลังขับสำหรับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่างๆ ของชิ้นส่วนสกรูขนถ่ายวัสดุที่เคลื่อนที่ กำลังขับสำหรับขนถ่ายวัสดุ และกำลังขับสำหรับการยกวัสดุขึ้นตามแนวตั้ง

กำลังขับสำหรับเอาชนะสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่างๆ จะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบสกรู ความยาวของสกรูขนถ่ายวัสดุ และความเร็วรอบของเพลาสกรู สมการที่ 3.7 ได้จากการทดลองซึ่งสามารถให้ผลการคำนวณที่เชื่อถือได้ และเป็นสมการรูปแบบที่ง่าย

$$P_f = 75.7LND^{1.7} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $P_f$  คือกำลังขับสำหรับเอาชนะความเสียดทาน (Watt)  $L$  คือความยาวสกรูขนถ่ายวัสดุ (m)  $N$  คือความเร็วรอบของเพลาสกรู (Hz) และ  $D$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรู (m)

ในส่วนของการหากล้างขับสำหรับการขนถ่ายวัสดุ โดยทั่วไปแล้วจะขึ้นอยู่กับอัตราการขนถ่ายวัสดุ ความหนาแน่นของวัสดุ และระยะทางขนถ่ายวัสดุ ดังนั้นจึงสามารถประมาณค่ากำลังขับสำหรับการขนถ่ายวัสดุได้จากสมการที่ 3.8

$$P_m = F_f F_p F_m m_s g L \quad (3.8)$$

เมื่อ  $P_m$  คือกำลังขับที่ใช้ขนถ่ายวัสดุ (watt)  $F_f$  คือแฟกเตอร์ใบสกรู (ตารางที่ 3.2)  $F_p$  คือแฟกเตอร์ใบพัด (ตารางที่ 3.4)  $F_m$  คือแฟกเตอร์วัสดุ (ตารางที่ 3.3)  $\rho_b$  คือความหนาแน่นวัสดุ ( $\text{kg/m}^3$ )  $V$  คืออัตราการขนถ่ายเชิงปริมาตร ( $\text{m}^3/\text{sec}$ ) และ  $L$  คือระยะทางขนถ่ายวัสดุ (m)

และจะสามารถทราบค่าโดยประมาณของแฟกเตอร์วัสดุได้จากชนิดของวัสดุ ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.5 ส่วนกำลังขับสำหรับยกวัสดุขึ้นตามแนวตั้งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.9

$$P_v = m_s g H \quad (3.9)$$

เมื่อ  $P_v$  คือกำลังขับสำหรับยกวัสดุขึ้นตามแนวตั้ง (Watt) และ  $H$  คือระยะทางตามแนวตั้ง (m)

ดังนั้นกำลังขับรวมสำหรับสกรูขนถ่ายวัสดุ สามารถคำนวณได้จากการรวมกำลังขับทั้งสามประกอบเข้าด้วยกันแล้วคูณด้วยแฟกเตอร์กำลัง ( $F_o$ ) และหารด้วยประสิทธิภาพการส่งกำลังขับ ( $\eta$ )

$$P = \frac{(P_f + P_m + P_v) F_o}{\eta} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $P$  คือกำลังขั้วรวม (watt)  $F_o$  คือแฟกเตอร์กำลังขั้ว (รูปที่ 3.12) ถ้า  $P_f + P_m$  มีค่ามากกว่า 4 kW ให้ใช้ค่า  $F_o = 1.0$  และ  $\eta$  คือประสิทธิภาพการส่งรับกำลังขั้ว (โดยทั่วไปมีค่า 0.85-0.95)

ตารางที่ 3.2 แฟกเตอร์ชนิดใบสกรู  $F_f$

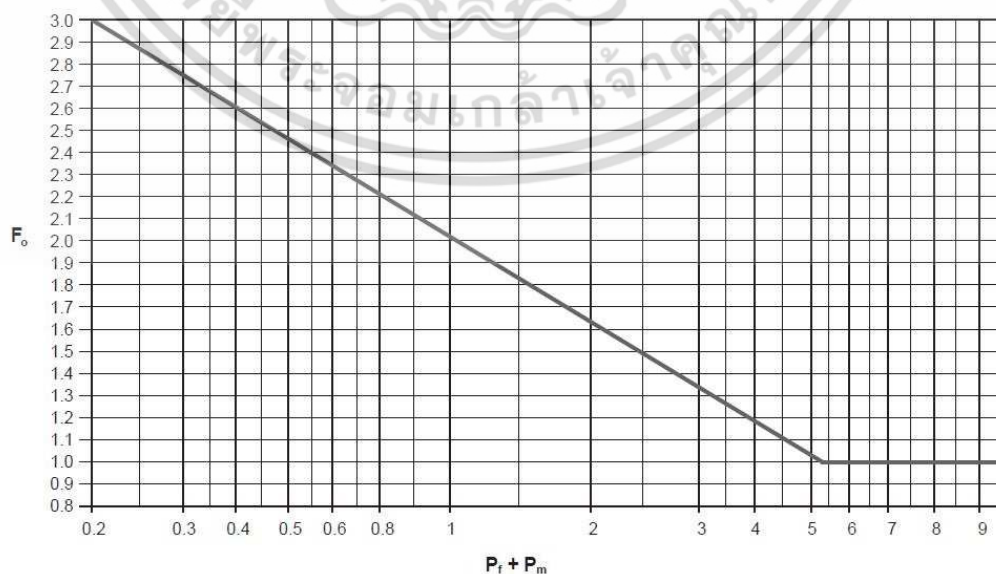
ชนิดของสกรู	แฟกเตอร์ชนิดใบสกรูตามขนาดของแฟกเตอร์ความเต็มรวง			
	15%	30%	45%	95%
ใบสกรูมาตรฐาน	1.0	1.0	1.0	1.0
ใบตัด	1.10	1.15	1.20	1.3
ใบตัดและพับ	N.R.	1.50	1.70	2.2
ใบแบบเรียบอน	1.05	1.14	1.20	-

ตารางที่ 3.3 ค่าประมาณของแฟกเตอร์ของวัสดุ ( $F_m$ )

ประเภทวัสดุ	ค่าแฟกเตอร์วัสดุ ( $F_m$ )
ประเภทที่ 1	0.5 – 1.0
ประเภทที่ 2	1.0 – 2.0
ประเภทที่ 3	2.0 – 3.0
ประเภทที่ 4	3.0 – 4.0

ตารางที่ 3.4 แฟกเตอร์ใบพัด ( $F_p$ )

จำนวนใบพัดต่อระยะพิตช์	0	1	2	3	4
แฟกเตอร์ใบพัด ( $F_p$ )	1.0	1.29	1.58	1.87	2.16



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพียงการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ยัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างแฟกเตอร์วัสดุ ( $F_m$ )

รายชื่อวัสดุ	ความหนาแน่นของวัสดุ ( $\text{kg/m}^3$ )	แฟกเตอร์วัสดุ ( $F_m$ )
Alumina	880-1040	1.8
Ammonium nitrate	720-990	1.3
Barytes (powder)	1920-2880	2.0
Bentonite (powder)	800-960	0.7
Cement (Portland)	1510	1.4
Coal (-15 mm)	780-980	1.0
Cullet (fine)	1280-1920	2.0
Flour (wheat)	530-640	0.6
Fly ash	480-720	2.0
Gypsum (fine)	960-1280	1.6
Oats (crushed or rolled)	300-380	0.6
Peas (dried)	720-800	0.5
PVC (pallets)	320-480	0.6
Rice	700-800	0.4
Sand	1440-1920	1.7-2.6
Sawdust (dry)	160-208	0.7
Soup powder, detergent	240-800	0.9
Sugar (dry granulated)	800-880	1.0-1.2
Talcum powder	800-960	0.8
wheat	720-770	0.4
Wood (flour)	260-580	0.4
Wood (shavings)	130-260	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 เชื้อเพลิงแข็ง [17, 18]

เชื้อเพลิง หมายถึง สารที่สามารถเผาไหม้ได้โดยง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศ หรือออกซิเจน เชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้ตามสภาพทางกายภาพ เป็นเชื้อเพลิงแก๊ส เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง แต่สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเชื้อเพลิงแข็งเท่านั้น

เชื้อเพลิงแข็งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติได้แก่ ไม้ ชีวมวล พืต ถ่านหิน ขยะจากที่อยู่อาศัย และจากอุตสาหกรรมบางประเภทก็จัดว่าเป็นเชื้อเพลิงแข็งเช่นเดียวกัน องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งนอกจากจะประกอบด้วยคาร์บอน และไฮโดรเจนเป็นส่วนมากแล้วยังประกอบด้วยออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน น้ำ และเถ้าอีกด้วย ตัวอย่างเช่นไม้มีออกซิเจนอยู่ถึง 45% (โดยมวลและไมรวมน้ำกับเถ้า) ในขณะที่ถ่านหินแอนทราไซต์มีอยู่เพียง 2% เท่านั้นดังแสดงในตารางที่ 3.6

ความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งปรากฏอยู่สองรูปแบบ รูปแบบแรกเป็นน้ำอิสระ (free water) แทรกตัวอยู่ระหว่างผนังเซลล์ของไม้ หรือในรูพรุนเล็กๆของถ่านหิน ซึ่งน้ำจะถูกดูดซับเข้าไปโดยอิทธิพลของความตึงผิว (capillary effect) รูปแบบที่สองเป็นน้ำที่ถูกดูดกลืนไว้อย่างเชิงกายภาพ (physical absorption หรือ bound water) ความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งมีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการเผาไหม้ และประสิทธิภาพโดยรวมของการเผาไหม้

เถ้าในเชื้อเพลิงแข็งคือสารอนินทรีย์ที่เหลืออยู่หลังจากที่เชื้อเพลิงเผาไหม้หมดแล้ว ไม้มีเถ้าเล็กน้อย ในขณะที่ถ่านหินมีสูงถึง 10% หรือมากกว่า คุณลักษณะของเถ้ามีความสำคัญอย่างมากในการออกแบบอุปกรณ์เผาไหม้ และอุปกรณ์การถ่ายโอนความร้อน ทั้งนี้เพื่อหาทางลดปัญหาจากการเกิดเป็นสแลก (slag fouling) การกัดกร่อน (erosion) และการผุกร่อน (corrosion) ลงได้

ตารางที่ 3.6 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่างๆ

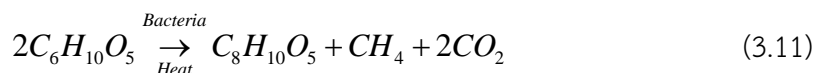
เชื้อเพลิง	ออกซิเจน, % (หลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า)	ความชื้น, % (ไม่คิดเถ้า)	เถ้า, % (หลักอ้างอิงแห้ง)
ไม้	45	15-50	0.1-1.0
พืต	35	90	0.1-10
ถ่านหินลิกไนต์	25	30	> 5
ถ่านหินบิทูมินัส	5	5	> 5
ถ่านหินแอนทราไซต์	2	4	> 5
เชื้อเพลิงจากขยะ	40	24	10-15

องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งจะถูกรายงานในลักษณะตามที่ได้รับมา (as-received basis) หรือในลักษณะหลักอ้างอิงแห้ง (dry basis) หรือในลักษณะหลักอ้างอิงแห้ง และไม่คิดเถ้า (dry, ash-free basis) ดังนั้นการระบุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งต้องระบุเงื่อนไขให้ถูกต้องเพราะเกี่ยวข้องกับการคำนวณหาค่าความร้อนทางสูง และทางต่ำโดยตรง ทำให้ช่วยพิจารณาได้อย่างถูกต้องว่าความร้อนแฝงของน้ำที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นอิสระ (free water) หรือน้ำที่ถูกดูดกลืนในเชื้อเพลิง (bound water) หรือน้ำที่เกิดจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง

### 3.2.1 ประเภท และลักษณะของเชื้อเพลิงแข็ง

#### 3.2.1.1. พีต (Peat)

พีตเกิดจากไม้หรือเซลลูโลสที่อยู่ในบริเวณอับอากาศ และหมักหมมเป็นเวลานานจนเกิดการเน่าสลายทางเคมีโดยแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการ



ซึ่งพีตจะมีสีดำปนน้ำตาล มีรูพรุนและความชื้นสูงถึง 80-90% จึงจำเป็นต้องตากแห้งหรือผ่านกระบวนการอบแห้งก่อนนำมาใช้

#### 3.2.1.2. ถ่านหิน (Coal)

ถ่านหินเกิดจากไม้ และชีวมวลชนิดอื่นๆที่ทับถมกัน และอัดแน่นเป็นเวลานานมากจนกระทั่งกลายเป็นหิน โดยเริ่มจากพีตในที่ชื้นแฉะ และอับอากาศแล้วเกิดการสลายตัวทางเคมีชีวภาพ (biochemical decomposition) พร้อมกับมีการทับถมกันของพีชชนิดต่างๆเพิ่มเติมเข้ามาจนมีความลึกมากขึ้นเรื่อยๆทำให้พีตมีความชื้น ความพรุน (porosity) ปริมาณสารระเหย (volatile matter content) พร้อมกับปริมาณของออกซิเจน และไฮโดรเจนลดลง ในขณะที่มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น พีตจะเปลี่ยนเป็นถ่านหินที่มีศักดิ์ (rank of coal) สูงขึ้นตามลำดับ คือ ลิกไนต์ บิทูมินัส และแอนทราไซนในที่สุด เรียกกระบวนการเปลี่ยนแปลงนี้ว่าการเกิดถ่านหิน (coalification) ถ่านหินมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และสารอนินทรีย์อื่นๆในปริมาณเล็กน้อย ที่จะกลายเป็นเถ้าหลังการเผาไหม้ เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม แมงกานีส ฟอสฟอรัส และออกไซด์ของซิลิกอน เป็นต้น ตารางที่ 3.8 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างองค์ประกอบทางเคมีของไม้สน (pine) กับของถ่านหินบิทูมินัส

คุณภาพของถ่านหินแบ่งเป็นสองแบบคือ แบ่งตามศักดิ์ของถ่านหิน (rank of coal) กับแบ่งตามเกรดของถ่านหิน (grade of coal) ศักดิ์ของถ่านหินพิจารณาจากค่าความร้อนของถ่านหิน และจากปริมาณคาร์บอนคงตัวภายใต้เงื่อนไขหลักอ้างอิงแห้ง และไม่คิดเถ้า (dry, free ash basis) ตารางที่ 3.9 แสดงการแบ่งชนิดของถ่านหิน โดยศักดิ์ของถ่านหิน สำหรับเกรดของถ่านหินพิจารณาจากปริมาณเถ้า จุดหลอมของเถ้า (ash fusion temperature) ปริมาณกำมะถัน และสารประกอบคุณภาพต่างๆ ซึ่งเป็นหลักที่ไม่เกี่ยวกับศักดิ์ของถ่านหินแต่ประการใด การเพิ่มเกรดของถ่านหินทำได้หลายวิธีทั้งทางกล และทางเคมีเพื่อลดปริมาณสิ่งต่างๆที่ได้กล่าวมาให้น้อยลง เช่น โดยการบดถ่านหินให้ป่นเป็นผงขนาด 10 mm แล้วล้างด้วยน้ำก็สามารถลดปริมาณเถ้าให้เหลือน้อยกว่า 1% ได้ หรือใช้วิธีแยกตามความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ (gravity separation) เพื่อให้สิ่งเจอปนที่มีน้ำหนักมากกว่าถ่านหินตกตะกอนแยกออกมาจากถ่านหิน เป็นต้น

ตารางที่ 3.7 ลักษณะของถ่านหิน

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

ตารางที่ 3.8 ตัวอย่างเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างไม้สนกับถ่านหินบิทูมินัส

ธาตุ	ไม้สน [ppm]	ถ่านหินบิทูมินัส [ppm]
Ca	760	>5000
Na	28	200-5000
K	39	200-5000
Mg	110	200-5000
Mn	97	6-210
Fe	10	>5000
P	40	10-340
Si	-	>5000
Al	6	>5000
Cl	48	200-1000

ตารางที่ 3.9 การแบ่งชนิดของถ่านหินโดยศักดิ์ของถ่านหิน (หลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1.3. เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) [19]

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



กากใยปาล์ม

ไม้พิน

ซังข้าวโพด

เหง้ามันสำปะหลัง

กะลามะพร้าว

แกลบ

รูปที่ 3.13 ชีวมวลในประเทศไทย

#### ชีวมวลจากข้าว

แกลบ จากข้อมูลพบว่ามีปริมาณการผลิตข้าวทั้งประเทศเท่ากับ 28.61 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณแกลบเท่ากับ 3.95 ล้านตัน โดยมีการนำแกลบเหล่านี้มาใช้งานคิดเป็นปริมาณรวม 0.86 ล้านตัน หากนำปริมาณแกลบคงเหลือดังกล่าวมาหักด้วยปริมาณการสูญเสียของแกลบที่เกิดจากการขัดสี การฟุ้งกระจายทั้งในระหว่างกระบวนการต่างๆ และการขนส่ง ดังนั้นปริมาณแกลบคงเหลือที่สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.09 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 843 ktoe และมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 320 MW

ฟางข้าว จากข้อมูลสามารถประเมินปริมาณฟางข้าวเท่ากับ 34.04 ล้านตันเมื่อนำมาคิดปริมาณที่เก็บรวบรวมได้ (ฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม 10%) ปริมาณฟางข้าวคงเหลือที่สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.40 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 926.10 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 352 MW

#### ชีวมวลจากข้าวโพด

ซังข้าวโพด พบว่ามีปริมาณการผลิตข้าวโพดทั้งประเทศเท่ากับ 4.40 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณซังข้าวโพดเท่ากับ 0.84 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้ในภาคต่างๆ คิดเป็นปริมาณรวม 74,000 ตัน ทำให้ปริมาณชีวมวลคงเหลือมีค่าเท่ากับ 0.43 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 124.6 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 47.31 MW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ชีวมวลจากอ้อย

ยอดและใบอ้อย จากข้อมูลพบว่าปริมาณการผลิตอ้อยทั้งประเทศเท่ากับ 70 ล้านตัน คิดเป็นชีวมวลประเภทยอดและใบอ้อยเท่ากับ 16.8 ล้านตัน เมื่อนำมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 6.72 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 1,935.7 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 735 MW

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

### ชีวมวลจากมันสำปะหลัง

ลำต้นมันสำปะหลัง จากข้อมูลพบว่าปริมาณการผลิตมันสำปะหลังทั้งประเทศเท่ากับ 17.6 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณลำต้นมันสำปะหลัง 2.11 ล้านตัน เมื่อนำปริมาณชีวมวลคงเหลือดังกล่าวมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 0.84 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 198 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 75 MW

เหง้ามันสำปะหลัง จากข้อมูลผลผลิตเหง้ามันสำปะหลังสามารถประเมินปริมาณเหง้ามันได้เท่ากับ 1.76 ล้านตัน เมื่อนำปริมาณชีวมวลคงเหลือดังกล่าวมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 0.7 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 131 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 50 MW ในปัจจุบันแทบไม่มีการนำเอาเหง้ามันสำปะหลังมาใช้ผลิตพลังงาน เนื่องจากการเก็บรวบรวมมีความยากลำบาก และต้นทุนการขนส่งสูง

### ชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน

ทางใบและก้านปาล์ม จากข้อมูลพบว่าปริมาณการผลิตปาล์มน้ำมันทั้งประเทศเท่ากับ 8.75 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณทางใบและก้านเท่ากับ 2.36 ล้านตัน เมื่อคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (65%) และการนำไปใช้ประโยชน์จะมีปริมาณชีวมวลคงเหลือสุทธิ 1.54 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 481 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า 183 MW

กากใยปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตของกรมส่งเสริมการเกษตร ปาล์มน้ำมันมีปริมาณของกากใยปาล์มที่ได้เท่ากับ 1.31 ล้านตัน โดยชีวมวลประเภทนี้จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม เมื่อหักปริมาณที่ถูกใช้งานออกจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 0.23 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 81.3 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 31 MW

กะลาปาล์ม จากข้อมูลสามารถประเมินปริมาณกะลาปาล์มได้เท่ากับ 0.53 ล้านตัน โดยมีการใช้ชีวมวลประเภทนี้ในภาคอุตสาหกรรมเพื่อเป็นเชื้อเพลิงคิดเป็นปริมาณรวม 18,000 ตัน และใช้ในประเภทอื่นๆ 147,000 ตัน ดังนั้นจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 0.31 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 114 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 43 MW

ทะลายปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตปาล์มน้ำมันของกรมส่งเสริมการเกษตร สามารถประเมินปริมาณของทะลายปาล์มได้เท่ากับ 2.01 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลประเภทนี้ถูกนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าคิดเป็นปริมาณรวม 80,000 ตัน และใช้ในประเภทอื่นๆเช่น ทำปุ๋ย และเพาะเห็ดคิดเป็นปริมาณ 160,000 ตัน ดังนั้นจะมี ชีวมวลคงเหลือสุทธิ 1.13 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 385 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 146 MW

#### ชีวมวลจากไม้ยางพารา

ชี้เลื่อยและเศษไม้ยางพารา จากรายงานของสถาบันวิจัยยางพาราทำให้ทราบว่าในแต่ละปีจะมีต้นยางพาราที่มีอายุเกิน 25 ปี ซึ่งครบรอบที่จะต้องทำการตัด คิดเป็นพื้นที่ยางพาราที่ถูกตัดฟัน 500,000 ไร่ต่อปี จะได้ปริมาณของไม้ยางพารา 200 ล้านตัน ซึ่งไม้ยางพาราที่ถูกตัดจะนำไปเข้ากระบวนการแปรรูปไม้เพื่อผลิตเฟอร์นิเจอร์ ดังนั้นจะมีชีวมวลที่ได้ภายหลังกระบวนการผลิตคิดเป็นเศษไม้ 3.6 ล้านตัน และชี้เลื่อย 8 ล้านตัน เมื่อหักปริมาณที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์จะมีเศษไม้คงเหลือ 3.55 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 1,862 ktoe และพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 707 MW ในส่วนของชี้เลื่อยจะมีปริมาณคงเหลือ 1,037 ktoe และพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 394 MW

#### ชีวมวลที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัส

ไม้ยูคาลิปตัสจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเป็นส่วนใหญ่ โดยผลผลิตของไม้ยูคาลิปตัสทั้งประเทศมีปริมาณรวม 6.8 ล้านตันต่อปี มีชีวมวลเกิดขึ้นคือไม้ฟืนและเปลือกไม้ โดยไม้ฟืนจะถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า สำหรับเปลือกไม้จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน เมื่อประเมินจำนวนของชีวมวลคงเหลือพบว่าจะมีไม้ฟืนคงเหลือเท่ากับ 0.57 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 167 ktoe และพลังงานไฟฟ้า 63.5 MW สำหรับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีปริมาณคงเหลือ 0.61 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 186 ktoe และพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 70.5 MW

**ตารางที่ 3.10** ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของ RDF และเชื้อเพลิงต่างๆ (หลังอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็ง

การวิเคราะห์ และทดสอบเชื้อเพลิงแข็งสามารถทำได้โดยใช้วิธีการตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึงแต่เฉพาะที่เห็นว่าสำคัญๆ เช่น การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ค่าความร้อน และอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้า (ash fusion temperature) เป็นต้น

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

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3176 เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ผลระบุถึงปริมาณธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น โดยระบุในลักษณะหลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า ปริมาณคาร์บอนและปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงถูกกำหนดโดยการเผาเชื้อเพลิงตัวอย่างในภาชนะปิดที่บรรจุออกซิเจนไว้อย่างเพียงพอแล้ววัดองค์ประกอบของไอเสียเพื่อคำนวณย้อนกลับไปหาปริมาณคาร์บอนและปริมาณไฮโดรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงนั้น ไนโตรเจนและกำมะถัน จะถูกกำหนดโดยอาศัยวิธีการทางเคมี ในขณะที่ออกซิเจนจะถูกระบุโดยค่า 100 ลบด้วยปริมาณของธาตุ C H N และ S

การกำหนดค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (ASTM D2105) ทำได้โดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ซึ่งจะได้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ค่าปริมาตรคงที่ ซึ่งจะไม่แตกต่างไปจากค่าที่ความดันคงที่

การกำหนดอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้า (ASTM D1857) โดยการนำเถ้าของถ่านหินที่พิจารณามาผสมกับสารละลายของ dextrin เพื่อทำให้เป็นของเหลวหนืด แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์มาตรฐานตามที่กำหนดเพื่อทำให้เป็นรูปกรวยตันแหลม จากนั้นไปทำให้ร้อนขึ้นอย่างช้าๆในเตาอบแบบเปิดสู่อากาศ (oxidizing) หรือแบบลดอากาศ (reducing) ก็ได้แล้วแต่กำหนด แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงรูปทรงกรวยละลายขึ้นของเถ้า อุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าจะมีหลายค่า กล่าวคือ อุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าคืออุณหภูมิที่ค่าต่างๆกัน (จากน้อยไปหามาก) ที่ทำให้เถ้าเริ่มเปลี่ยนรูปทรงเป็นแบบต่างๆกันตามลำดับ คือ กรวยปลายมนเล็กน้อย หลอมเป็นแท่งทรงกระบอกปลายมน หลอม เป็นรูปครึ่งทรงกลม และสุดท้ายหลอมละลายแบนราบติดกับพื้น อุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเถ้า เช่น เถ้าที่ประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{TiO}_2$  จะมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูง ในขณะที่เถ้าที่ประกอบด้วยออกไซด์มูลฐาน เช่น  $\text{Fe}_2\text{O}_3$   $\text{CaO}$   $\text{MgO}$   $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$  เป็นต้น จะมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าจะต่ำกว่าอุณหภูมิของเปลวไฟแต่จะสูงกว่าอุณหภูมิของไอน้ำและผนังเตา

### 3.2.3 สมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิง

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

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

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

3.2.3.2 ความสามารถในการระเหย (volatility) บอกให้ทราบถึงการระเหยของเชื้อเพลิงเหลวว่ายากหรือง่ายเพียงใด ระบุโดยค่าความดันไอ และมวลระเหยออกเป็นไอที่อุณหภูมิต่างๆ

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

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

3.2.3.4 ความหนืด (viscosity) คือความต้านทานการไหลของเชื้อเพลิงเหลว มีอิทธิพลต่อการส่งเชื้อเพลิงเหลวให้ไหลไปตามท่อ ขณะเดียวกันก็มีผลต่อกระบวนการแตกตัวเป็นละอองด้วยความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นหลัก ดังนั้นในการกำหนดค่าความหนืดจึงมักจะต้องบอกถึงอุณหภูมิกำกับด้วย โดยทั่วไปเชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงจะมีความหนืดสูง ส่วนเชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำจะมีความหนืดต่ำและจะเผาไหม้ได้ง่ายกว่า

3.2.3.5 จุดน้ำมันเป็นฝ้า คืออุณหภูมิที่เริ่มเกิดฝ้าขุ่นมัวในื่อน้ำมัน เนื่องจากเริ่มเกิดผลึกซีฟิ่งหรือไขน้ำมันเมื่ออุณหภูมิน้ำมันต่ำลง เป็นสาเหตุทำให้ไส้กรองน้ำมันอุดตันได้

3.2.3.6 จุดไหล (pour point) คืออุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงเหลวจะไหลได้ จุดไหลเป็นสมบัติของเชื้อเพลิงเหลวที่สำคัญ เพราะถ้าอุณหภูมิของเชื้อเพลิงเหลวต่ำกว่าจุดไหล เชื้อเพลิงเหลวจะไหลยากซึ่งอาจส่งผลให้ระบบส่งเชื้อเพลิงเหลวอุดตันได้

3.2.3.7 จุดวาบไฟ (flash point) คืออุณหภูมิต่ำสุดที่ไอระเหยของเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งระเหยผสมกับอากาศแล้วทำให้เกิดการติดไฟได้เมื่อสัมผัสกับเปลวไฟจากภายนอก เชื้อเพลิงเหลวที่มีจุดวาบไฟต่ำต้องได้รับการดูแลเป็นพิเศษ การทราบค่าจุดวาบไฟทำให้ทราบว่าควรอุ่นเชื้อเพลิงเหลวให้ร้อนได้ถึงระดับใดเพื่อลดความหนืด อุณหภูมิของเชื้อเพลิงเหลวที่ใช้ควรจะต่ำกว่าจุดวาบไฟประมาณ 4-5°C เพื่อความปลอดภัย

3.2.3.8 จุดติดไฟ คืออุณหภูมิที่สูงกว่าจุดวาบไฟเล็กน้อยที่เมื่อมีเปลวไฟจากแหล่งภายนอกมาสัมผัสกับไอน้ำมันทำให้เกิดการติดไฟ และการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง

3.2.3.9 จุดติดไฟด้วยตัวเอง (auto-ignition temperature) คืออุณหภูมิต่ำสุดของเชื้อเพลิงที่ยังคงทำให้เกิดการติดไฟ และการเผาไหม้ขึ้นด้วยตัวเองได้ ภายในภาวะมาตรฐานและความดันปกติ โดยไม่มีการสปาร์กด้วยไฟฟ้า หรือเปลวไฟจากแหล่งภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง

ตารางที่ 3.11 จุดวาบไฟและจุดติดไฟด้วยตัวเองของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

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

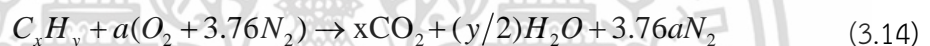
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การเผาไหม้ (Combustion) [17, 20, 21, 22]

การเผาไหม้ (combustion) เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเชื้อเพลิงหรือสารที่สามารถเผาไหม้กับโมเลกุลของออกซิไดเซอร์ ซึ่งปกติคือออกซิเจนจากอากาศ โดยสารที่สามารถเผาไหม้ได้ในเชื้อเพลิงคือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และกำมะถัน (S) เป็นต้น ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงภายในเวลาอันรวดเร็ว และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนให้พลังงานจากการเผาไหม้ออกมา ซึ่งลักษณะของปฏิกิริยามีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพ และทางเคมีของสภาวะตั้งต้น ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีปัจจัยครบสามอย่างนั่นคือ เชื้อเพลิง ออกซิไดเซอร์ และสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องสมบูรณ์ เช่น แหล่งความร้อน ประกายไฟ และการสร้างสภาวะกอดัดให้มีความดันสูง อุณหภูมิสูง เพื่อจุดติดไฟ เป็นต้น

#### 3.3.1 สตอยชิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion Stoichiometry)

การเผาไหม้ที่ stoichiometry เป็นการคำนวณปริมาณออกซิไดเซอร์ที่พอดีในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นถ้าปริมาณออกซิไดเซอร์มากกว่าที่สภาวะ stoichiometry นั้นหมายถึงการเผาไหม้นั้นมีส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงแบบบาง (fuel lean) ในทางกลับกัน เมื่อมีปริมาณออกซิไดเซอร์น้อยกว่าที่สภาวะ stoichiometry หมายถึงมีส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงแบบหนา (fuel rich) การหาความสัมพันธ์แบบ stoichiometry ทำได้โดยการเขียนสมการเผาไหม้ สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน ( $C_xH_y$ ) จะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ได้ดังนี้



เมื่อ 
$$a = x + y/4 \quad (3.15)$$

สัดส่วนของปริมาณออกซิเจนในอากาศซึ่งมักนิยมพิจารณาให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เป็นอากาศแห้งประกอบไปด้วยออกซิเจน 21% โดยปริมาตร และไนโตรเจน 79% โดยปริมาตร นั่นคือแต่ละโมลของออกซิเจนมีไนโตรเจน 3.76 โมล ซึ่งการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ตามทฤษฎีหรือตาม stoichiometry สามารถหาได้จาก

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

เมื่อ  $MW_{\text{air}}$  และ  $MW_{\text{fuel}}$  เป็นน้ำหนักโมเลกุลของอากาศ และเชื้อเพลิงตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีปริมาณอื่นๆที่เกี่ยวข้องดังนี้

อัตราส่วนสมมูล (equivalent ratio,  $\Phi$ ) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกว่าส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นแบบstoichiometry หนา หรือบาง ซึ่งมีนิยามดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

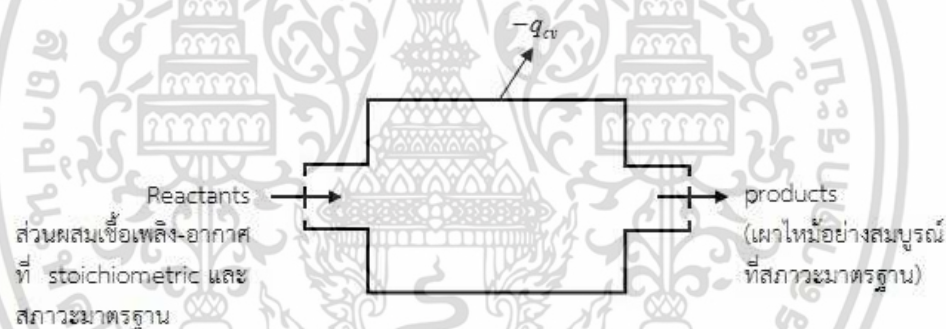
จากนิยามจะเห็นได้ว่า สำหรับส่วนผสมหนา (fuel rich) จะมีค่า  $\Phi > 1$  ส่วนผสมบาง (fuel lean) จะมี  $\Phi < 1$  และสำหรับ stoichiometry จะมี  $\Phi = 1$  ซึ่งอัตราส่วนผสมนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่มีประโยชน์มากในการบ่งบอกสมรรถนะของพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ % stoichiometry air คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้คิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศต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

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

และเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (% excess air) คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินกี่เปอร์เซ็นต์โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100

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

### 3.3.2 Enthalpy of Combustion และค่าความร้อน (Heating values)



รูปที่ 3.14 ห้องปฏิกรณ์ที่มีการไหลสม่ำเสมอเพื่อใช้ในการหาค่าความร้อนจากการเผาไหม้

พิจารณาห้องปฏิกรณ์ (reactor) ที่มีการไหลแบบสม่ำเสมอแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งของผสมที่เป็นสารตั้งต้น (reactants) ในสภาวะ stoichiometric ไหลเข้า และมีสารผลิตภัณฑ์ (product) ไหลออก โดยทั้งคู่อยู่ในสภาวะมาตรฐาน ( $25^{\circ}\text{C}$  และ  $1 \text{ atm}$ ) หากสมมติว่ากระบวนการเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ นั่นคือ เชื้อเพลิงคาร์บอนทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และเชื้อเพลิงไฮโดรเจนทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ถ้าสารผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ไหลออกมาตรงทางออกมีอุณหภูมิเดียวกันกับสารตั้งต้นที่ไหลเข้า ดังนั้นความร้อนจะไหลออกจากปฏิกรณ์ ปริมาณความร้อนที่ไหลออกจะสัมพันธ์กับ standardized enthalpies ของสารตั้งต้น และสารผลิตภัณฑ์ หากใช้กฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์สำหรับการไหลแบบสม่ำเสมอ จะได้สมการ

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

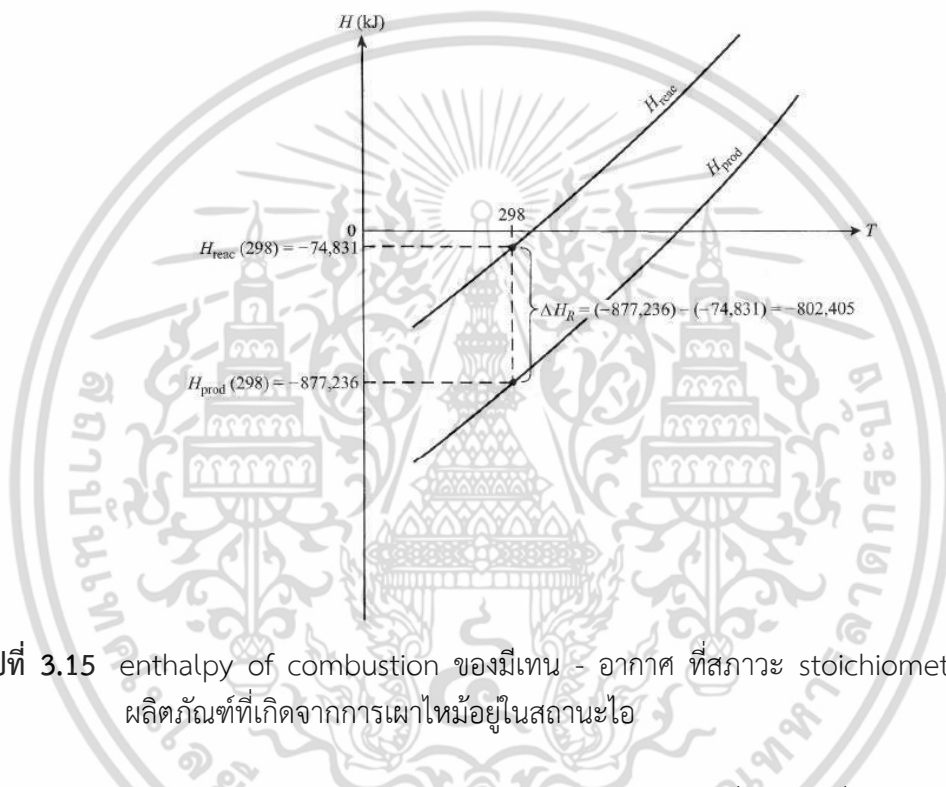
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถให้นิยามของ enthalpy of reaction หรือ enthalpy of combustion,  $\Delta h_R$  (ต่อมวลของของผสม) ได้ดังนี้

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

หรือในเทอมของคุณสมบัติ Extensive จะได้

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



รูปที่ 3.15 enthalpy of combustion ของมีเทน - อากาศ ที่สภาวะ stoichiometric ซึ่งนำไปในผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ในสถานะไอ

ค่า enthalpy of combustion สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15 เนื่องจากความร้อนไหลออกจากระบบจึงมีค่าติดลบ และทำให้ absolute enthalpy ของสารผลิตภัณฑ์อยู่ต่ำกว่าของสารตั้งต้น ซึ่งจะพบว่า enthalpy of combustion ของปฏิกิริยาดังกล่าวมีค่าเท่ากับ -802,405 kJ/kmol of fuel โดยสามารถเปลี่ยนค่าดังกล่าวให้เป็นต่อหน่วยมวลของเชื้อเพลิงได้ดังนี้

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

ค่าดังกล่าวสามารถเปลี่ยนให้คิดต่อหน่วยมวลของของผสมได้ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

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

ซึ่งค่า enthalpy of combustion จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่พิจารณา เนื่องจากทั้งค่า enthalpy ของสารตั้งต้น และสารผลิตภัณฑ์ ต่างก็เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

ค่าความร้อนของการเผาไหม้ (heat of combustion หรือ heating values) หรือ  $\Delta h_c$  มีค่าเท่ากับ enthalpy of combustion เพียงแค่คิดเครื่องหมายเป็นบวก สามารถแบ่งค่าความร้อนของการเผาไหม้ได้เป็น ค่าความร้อนสูง (higher heating value, HHV) และค่าความร้อนต่ำ (lower heating value, LHV) โดยค่าความร้อนสูงเป็นค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ โดยสมมติว่าน้ำทั้งหมดในสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้นั้นควบแน่นเป็นของเหลว ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยามีการปลดปล่อยพลังงานออกมาทั้งหมด ในขณะที่ค่าความร้อนต่ำนั้น น้ำในสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้จะไม่มีการควบแน่น สำหรับ  $CH_4$  ค่าความร้อนสูงจะมีค่ามากกว่าค่าความร้อนต่ำอยู่ ~ 11 %

### 3.3.3 อุณหภูมิเปลว adiabatic (Adiabatic Flame Temperatures)

อุณหภูมิเปลว adiabatic คืออุณหภูมิสุดท้ายภายหลังจากเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน และไกล์จะเข้าสู่สมดุลทางเคมี ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ อุณหภูมิเปลว adiabatic สำหรับการเผาไหม้แบบความดันคงที่ และสำหรับการเผาไหม้แบบปริมาตรคงที่

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

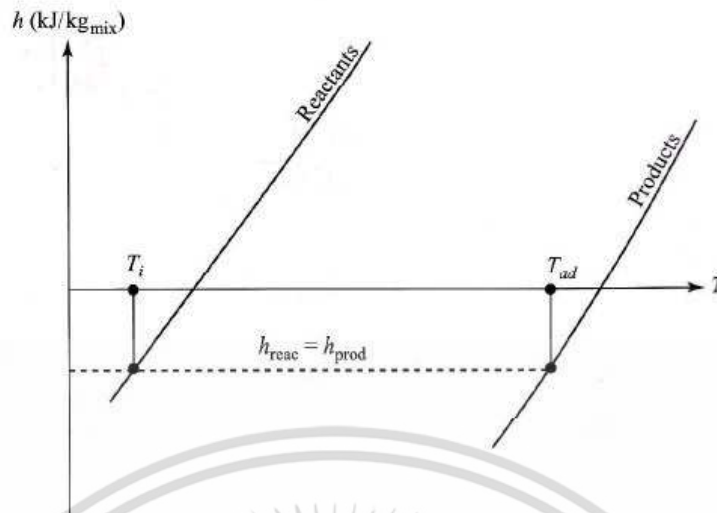
$$H_{react}(T_i, P) = H_{prod}(T_{ad}, P) \quad (3.26)$$

ค่า  $T_{ad}$  ที่ปรากฏในสมการที่ 3.26 จะเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการเผาไหม้ และเรียกอุณหภูมิเปลว adiabatic แบบความดันคงที่ (constant pressure adiabatic flame temperature) และสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.16 ซึ่งตัวอย่างของกระบวนการเผาไหม้แบบความดันคงที่ ได้แก่ การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แก๊สเทอร์ไบน์ หรือในเครื่องกำเนิดไอน้ำ เป็นต้น

จากที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้วว่าอุณหภูมิเปลว adiabatic เป็นอุณหภูมิสูงสุดของระบบที่จะทำได้ภายใต้เงื่อนไขในอุดมคติ (ไม่มีการสูญเสียความร้อน และการเผาไหม้เกิดขึ้นเร็วมาก) แต่ในความเป็นจริงแล้วอุณหภูมิเปลวไฟจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเปลว adiabatic มากเนื่องจาก

- ระบบไม่ได้เป็น adiabatic จึงมีการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศรอบข้าง มีงานกระทำต่อสิ่งแวดล้อม และกระบวนการเผาไหม้มีความเร็วที่จำกัด
- การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้มีสารตั้งต้นบางส่วนซึ่งยังไม่ถูกเผาไหม้
- มีสารเจือจาง (dilutents) เช่น  $N_2$  ในอากาศซึ่งไม่มีส่วนช่วยในการผลิตความร้อนแต่ประการใด แต่กลับทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มภาระความร้อน ( $\rho C_p$ ) ให้กับระบบ ส่งผลให้อุณหภูมิสุดท้ายของระบบต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงการหาค่าอุณหภูมิเปลว adiabatic ในแกนอ้างอิง  $h-T$

### 3.3.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้

3.3.4.1 ปริมาณอากาศที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ (Sufficient air to combustion) ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้สมบูรณ์จำเป็นต้องมีสัดส่วนของอากาศหรือออกซิเจนที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ โดยปริมาณอากาศที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์เรียกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี ซึ่งสามารถคำนวณได้จากหัวข้อที่ผ่านมา

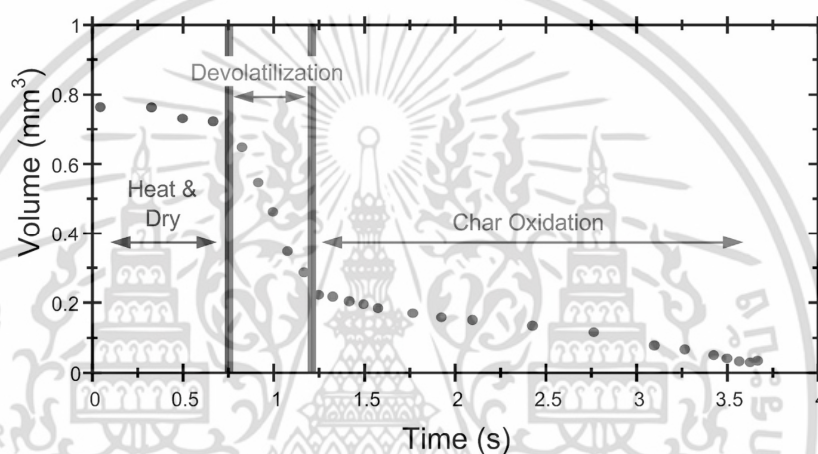
3.3.4.2 ระยะเวลาในการเผาไหม้ (Burning time) เนื่องจากในการทำปฏิกิริยาจำเป็นต้องอาศัยเวลาเพื่อที่จะทำให้ได้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งหาระยะเวลาในการเผาไหม้ไม่เพียงพอจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงต่ำ และนับว่าเป็นการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงด้วย

3.3.4.3 อุณหภูมิของการเผาไหม้ (Combustion Temperature) เป็นที่ทราบกันดีว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งความเร็วของการเกิดปฏิกิริยานั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยานั้นเป็นสำคัญด้วย โดยหากอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าสูง ความเร็วของการเผาไหม้ก็จะมีค่ามาก

3.3.4.4 ความปั่นป่วนระหว่างการเผาไหม้ (Turbulent) เนื่องจากในการเผาไหม้นั้นเป็นการทำปฏิกิริยาของเชื้อเพลิง และออกซิเจนในอากาศ ซึ่งหากระหว่างการเผาไหม้มีความปั่นป่วนเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการคลุกเคล้ากันอย่างดีของเชื้อเพลิงและออกซิเจน ทำให้โอกาสที่ออกซิเจนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง และเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มีมากขึ้น

### 3.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuel Combustion)

เมื่อเชื้อเพลิงอยู่ท่ามกลางกระแสการไหลของอากาศร้อน เชื้อเพลิงจะเกิดการสูญเสียมวลในสามช่วงได้แก่ (i) การทำแห้ง (drying) จากนั้นอนุภาคจะได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่สามารถเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) (ii) การปล่อยสารระเหย (devolatilization) อนุภาคเชื้อเพลิงเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน ได้สารระเหยอินทรีย์ที่เผาไหม้ได้ และถ่านชาร์ (char) เป็นผลิตภัณฑ์ (iii) การเผาไหม้ถ่านชาร์ (char combustion) เกิดขึ้นหลังจากการแยกสลายด้วยความร้อนสิ้นสุดลง โดยที่สารระเหยจะถูกเผาไหม้พร้อมๆกันกับกระบวนการเผาไหม้ถ่านชาร์ ความสำคัญของแต่ละช่วงต่อการสูญเสียมวลจะขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบของเชื้อเพลิงว่ามี ความชื้น สารระเหยอินทรีย์ ถ่านคงตัว และเศษเถ้าอยู่มากน้อยเพียงใด สำหรับอนุภาคขนาดเล็กกระบวนการทั้งสามจะเกิดขึ้นตามลำดับกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 กลไกการเผาไหม้สำหรับอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็ก [23]

#### 3.4.1 การทำแห้งของเชื้อเพลิงแข็ง (Drying)

ความชื้นมีอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งได้ 2 รูปแบบ คือ น้ำอิสระ (free water) อยู่ภายในช่องว่างเล็กๆในเชื้อเพลิง และน้ำยึดเหนี่ยว (bound water) ซึ่งเป็นน้ำที่ถูกดูดซับไว้บนโครงสร้างพื้นผิวภายในของเนื้อเชื้อเพลิง พิจารณาอนุภาคเชื้อเพลิงขนาดเล็กที่อยู่ภายใต้แก๊สร้อน จะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา และการแผ่รังสีไปยังพื้นผิวของอนุภาคเชื้อเพลิง ส่งผลให้อุณหภูมิของอนุภาคสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำ จนน้ำเกิดการระเหย และถูกไล่ออกมาภายนอก

#### 3.4.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization)

เมื่อการทำแห้งสิ้นสุดลง ในขณะที่อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เชื้อเพลิงจะเริ่มการย่อยสลายด้วยความร้อน ในกระบวนการนี้จะมีสารระเหยอินทรีย์ออกมาภายนอกเชื้อเพลิง กระบวนการปลดปล่อยสารระเหยนี้จึงอาจถูกเรียกว่าเป็นช่วงไพโรไลซิส (pyrolysis) อัตราการปล่อยสารระเหยและผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และชนิดของเชื้อเพลิง สารระเหยที่ปล่อยออกมาจะผสมกับอากาศที่แพร่เข้ามารอบๆ เมื่ออุณหภูมิถึงจุดติดไฟก็จะเกิดเป็นเปลวไฟขึ้นรอบๆอนุภาคเชื้อเพลิงแข็ง เปลวไฟที่เกิดขึ้นก็ให้ความร้อนกับไปยังเชื้อเพลิง ส่งเสริมให้การปล่อยสารระเหยดีขึ้น สำหรับเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ ความชื้นจะถูกขับออกมาพร้อมกับสารระเหย ความชื้นนี้จะส่งผลให้อุณหภูมิของเปลวไฟที่เกิดขึ้นรอบๆเชื้อเพลิงต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการปล่อยสารระเหย หรือการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสอาจจะนำเสนอได้ด้วยสมการปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง ดังนี้

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

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

การจุดติดไฟของเชื้อเพลิงแข็งสามารถเกิดขึ้นได้กับ การจุดติดไฟของถ่านชาร์บนผิวของเชื้อเพลิง และการจุดติดไฟของสารระเหยบนชั้นขีดขอบรอบๆผิวของเชื้อเพลิง แบบใดจะเกิดก่อนขึ้นอยู่กับอัตราการพา และการแผ่รังสีความร้อนไปยังเชื้อเพลิงแข็ง ถ้าการแผ่รังสีความร้อนมีค่าสูง ผิวของเชื้อเพลิงก็จะร้อนขึ้นเร็ว แต่สารระเหยที่ปล่อยออกมาจะถูกพัดออกไปก่อนที่จะมีส่วนผสมที่เผาไหม้ได้เกิดขึ้น การติดไฟจึงเกิดขึ้นที่ผิวก่อน ถ้าอัตราการให้ความร้อนที่ผิวของเชื้อเพลิงต่ำ สารระเหยจะจุดติดไฟได้ก่อน เพราะสารระเหยมีอุณหภูมิจุดติดไฟต่ำกว่าชาร์ สารระเหยเหล่านี้เผาไหม้รวดเร็ว และให้พลังงานความร้อนออกมาเมื่อเทียบกับคาร์บอนคงตัว หรือถ่านชาร์ที่เหลืออยู่หลังกระบวนการปล่อยสารระเหย โดยที่เวลาล่าช้าในการจุดติด (ignition time delay) จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค การแพร่ทางความร้อน อัตราการให้ความร้อน และอัตราการเกิดไพโรไลซิส เป็นต้น

### 3.4.3 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Burning of Carbon)

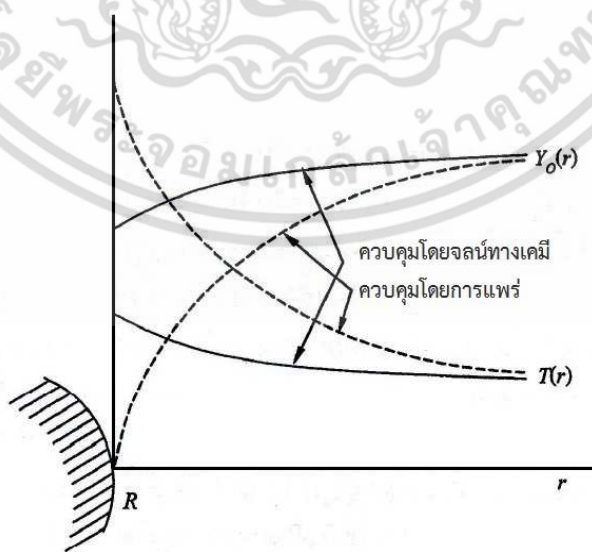
ขั้นตอนสุดท้ายของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง คือการเผาไหม้ถ่านชาร์ ลักษณะของถ่านชาร์จะมีความพรุน (porous) สูงมาก ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวภายในมากในระดับ 100 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับชาร์จากถ่านหิน และ 10,000 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับถ่านชาร์จากไม้ เมื่อไม่มีสารระเหยปล่อยออกมาแล้ว ออกซิเจนในอากาศก็สามารถแพร่เข้าไปด้านในของถ่านชาร์ได้ การเผาไหม้ของถ่านชาร์แบบนี้เป็นกระบวนการเผาไหม้พื้นผิวสัมผัส (surface burning) ระหว่างสองสถานะที่ไม่เหมือนกัน หรืออาจจะเรียกว่าการเผาไหม้แบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous combustion) ซึ่งมีขั้นตอนสำคัญดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

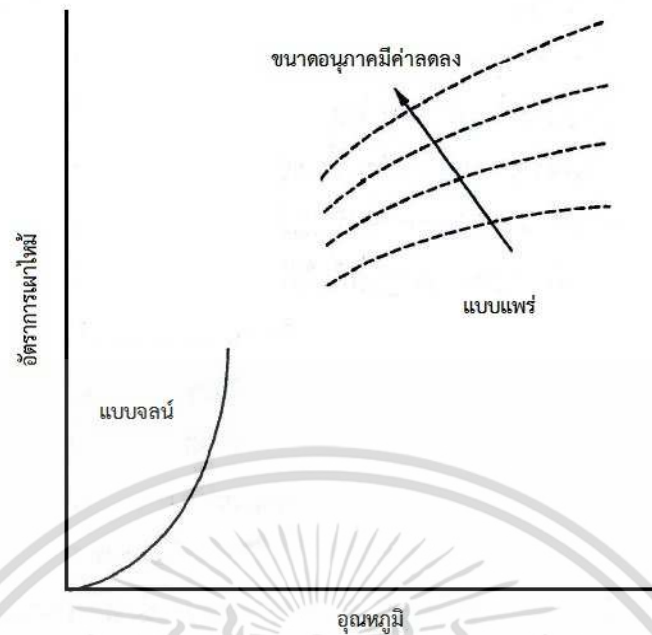
ขั้นตอนเหล่านี้เกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับ ขั้นตอนไหนเกิดขึ้นช้าที่สุดจะเป็นตัวกำหนดอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงนั้น ยกตัวอย่าง เช่น ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็ก อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ และการไหลของของไหลรอบอนุภาคเป็นไปอย่างช้าๆ จะพบว่าขั้นตอน ค. (ปฏิกิริยาการเผาไหม้) จะเกิดขึ้นช้ากว่าขั้นตอน จ. (การแพร่ออกไปจากผิวเชื้อเพลิงของสารผลิตภัณฑ์) ดังนั้นอัตราการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยอัตราจลน์ทางเคมี (chemical kinetics หรือ kinetically control) เป็นหลัก ซึ่งอัตราการเผาไหม้ขึ้นกับอุณหภูมิ exponential โดยไม่ขึ้นกับขนาดอนุภาค และการไหลแต่อย่างใด นอกจากนี้ จากการที่อัตราการแพร่สูงกว่าอัตราการเผาไหม้ ทำให้ความเข้มข้นของการเผาไหม้ที่ผิวเชื้อเพลิงไม่ได้แตกต่างจากบริเวณกระแสนิ่งที่อยู่ห่างออกไปจากผิวเชื้อเพลิงมากนัก รูปที่ 3.18 เปรียบเทียบโปรไฟล์เศษส่วนมวลของออกซิเจน  $Y_o(r)$  และอุณหภูมิ  $T(r)$  ตามรัศมีของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งธรรมดาที่มีลักษณะการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยจลน์ทางเคมี และถูกควบคุมโดยการแพร่ในส่วนรูปที่ 3.19 แสดงอัตราการเผาไหม้ของอนุภาคดังกล่าว ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิของอนุภาค

ในทางตรงกันข้าม ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง และการไหลโดยรอบอนุภาคเป็นไปอย่างรวดเร็ว จะได้ว่าขั้นตอน ค. (ปฏิกิริยาการเผาไหม้) จะเกิดเร็วกว่าขั้นตอน ก. และ จ. มาก (การแพร่เข้าหาผิวเชื้อเพลิงของออกซิเจน และการแพร่ออกไปจากผิวเชื้อเพลิงของสารผลิตภัณฑ์) ดังนั้น อัตราการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ผิวของเชื้อเพลิง (diffusionally control) เป็นหลัก ซึ่งอัตราการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคมากกว่าขึ้นกับอุณหภูมิ นอกจากนี้ จากการที่อัตราการเผาไหม้สูงกว่าอัตราการแพร่จะส่งผลให้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ผิวเชื้อเพลิงมีค่าน้อยมากจนอาจตัดทิ้งได้ เพราะถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้ที่ผิวเชื้อเพลิงเกือบหมดนั่นเอง เมื่อพิจารณารูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 ตามลำดับ จะพบว่าลักษณะการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ผิวของเชื้อเพลิง (เส้นประ) อัตราการเผาไหม้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง และขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ทั้งนี้เพราะถ้าอุณหภูมิเชื้อเพลิงต่ำ การเผาไหม้จะเปลี่ยนไปเป็นลักษณะที่ถูกกำหนดด้วยจลน์ทางเคมี ทำให้อนุภาคสูญเสียความร้อนอย่างมาก และรวดเร็วจนเกิดปรากฏการณ์เป่าดับได้ในที่สุด

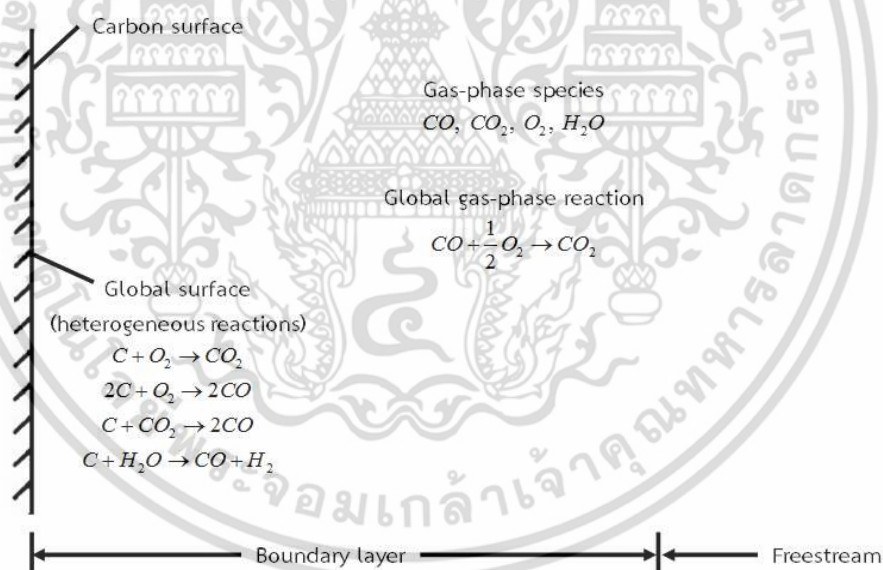


รูปที่ 3.18 เปรียบเทียบโปรไฟล์  $Y_o(r)$  และ  $T(r)$  ตามแนวรัศมีของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งธรรมดา

ระหว่างการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการแพร่และการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยจลน์ทางเคมี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 เปรียบเทียบอัตราการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งธรรมดาที่มีลักษณะการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ และโดยจลน์ทางเคมี



รูปที่ 3.20 รูปแบบทั่วไปสำหรับกระบวนการเผาไหม้บริเวณผิวของอนุภาคคาร์บอน

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.20 ที่แสดงถึงการเผาไหม้บริเวณผิวของอนุภาคคาร์บอน จะพบว่าปฏิกิริยาบนผิวระหว่างคาร์บอนของถ่านชาร์กับออกซิเจนจะได้  $CO$  ออกมาเป็นหลัก แล้วจะทำปฏิกิริยาภายนอกให้กลายเป็น  $CO_2$  ในที่สุด สำหรับการเผาไหม้บริเวณพื้นผิวของถ่านชาร์ในบรรยากาศที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนเป็น  $p_{m\infty}$  ที่อัตรามวลคงที่โดยความเข้มข้นของออกซิเจนบริเวณผิวเป็น  $p_m$  ดังนั้นอัตราการเผาไหม้ถ่านชาร์ ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวสัมพันธ์ตามจลน์เคมีระดับที่หนึ่ง ซึ่งหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

จะได้

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

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

เมื่อ

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

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

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

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

โดยที่  $Sc = 0.73$  และ  $\phi$  สำหรับถ่านชาร์มีค่าประมาณ 0.9

จากสมการที่ 3.31 ให้  $CO$  เกิดขึ้นที่ผิว และใช้ความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศรอบๆ อัตราการเผาไหม้ชาร์รวมสามารถหาได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

พิจารณา

- I. กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคคงที่ (ความหนาแน่นลดลง) เราสามารถอินทิเกรตสมการที่ 3.34 ได้เลย ซึ่งจะได้เวลาในการเผาไหม้หมดเป็น

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

- II. กรณีความหนาแน่นของอนุภาคคงที่ (เส้นผ่านศูนย์กลางลดลง)

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

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

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

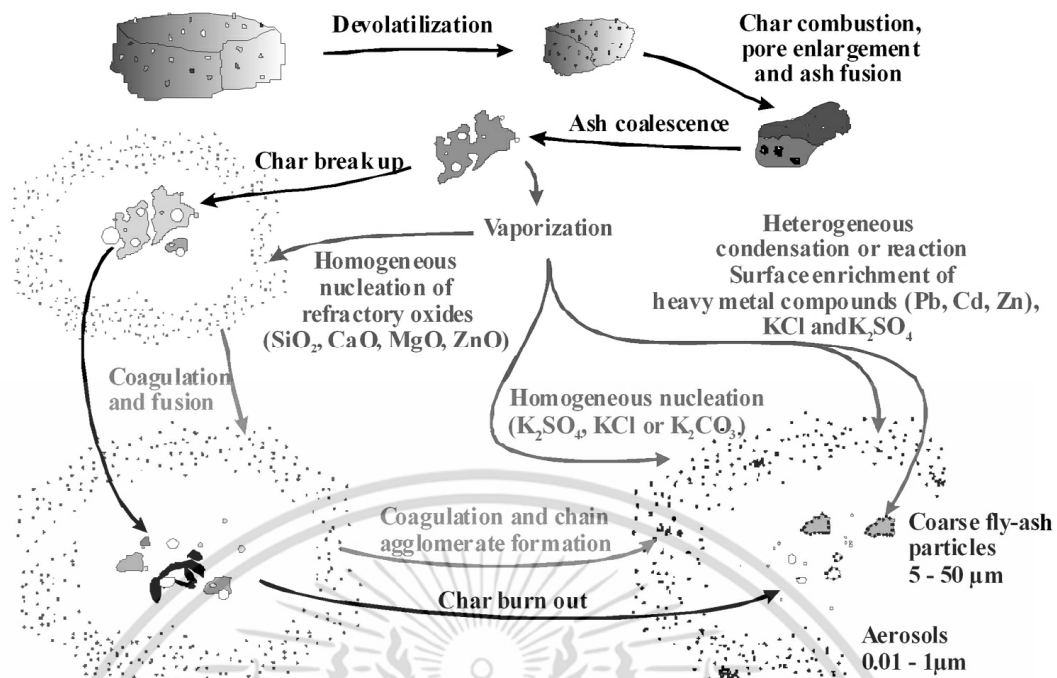
ภายใต้สภาวะเคมีจลน์เป็นกลไกจำกัดอัตรา ( $h_D \gg k_c$ ) เช่น อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำ อนุภาคมีขนาดเล็ก จะได้เวลาในการเผาไหม้หมดเป็น

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

### 3.4.4 ลักษณะและพฤติกรรมของเศษเถ้า

เศษเถ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาเผา มันสามารถเกาะฝังตัวบนพื้นผิวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ผนัง ท่อแก๊ส และยังสามารถเกาะตัวบนผิวท่อไต้ ซึ่งโดยรวมจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน และอายุการใช้งานของระบบ การเกาะตัวของเศษเถ้ามีอยู่สองลักษณะหลักๆ ได้แก่ แบบสแลกกิ้ง (slagging) และแบบฟาวลิ่ง (fouling) ซึ่งแบบสแลกกิ้งจะเกี่ยวข้องกับการเยิ้มติดของเศษเถ้า ในขณะที่ฟาวลิ่งจะเกี่ยวข้องกับการฝังตัวของเศษเถ้าที่ไม่หลอมตัวโดยการตกกระทบ หรือการแพร่ไปเกาะ ซึ่งความรุนแรงของปัญหาอยู่ที่ธรรมชาติของสารแร่ในเศษเถ้า อุณหภูมิ และความเร็ว ซึ่งกลไกในการเกิดเถ้าสำหรับเชื้อเพลิงแข็งแสดงดังรูปที่ 3.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 กลไกในการเกิดเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวล [23]

เมื่อเกิดการเผาไหม้สารแร่ที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิง สารแร่จะเปลี่ยนสภาพไปเป็นเศษเถ้า ซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกา อลูมินา เหล็กออกไซด์ แคลเซียม และแมกนีเซียม เป็นต้น เศษเถ้าเหล่านี้อาจมีการเกาะติดกันทางเคมีโดยการหลอมตัว (sintering) ที่อุณหภูมิประมาณ  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  เมื่ออุณหภูมิเกิน  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  เศษเถ้าจะเริ่มเกิดการหลอมละลาย และที่อุณหภูมิ  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  สลักของเศษเถ้าเหลวจะเกิดขึ้น ซึ่งวิธีการแก้ไขปัญหานี้คือ การใช้กระแสไอน้ำ หรืออากาศความเร็วสูงฉีดเพื่อแยกเศษเถ้าที่เกาะบนผนังท่อให้หลุดออกมา การควบคุมอัตราการเผาไหม้ให้ได้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเศษเถ้า และการใช้เชื้อเพลิงแข็งที่มีปัญหาของเศษเถ้าน้อย เป็นต้น

### 3.5 การปล่อยมลพิษและการควบคุม (Pollutants Emission and Control) [20]

#### 3.5.1 บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าสารมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน เป็นสาเหตุหลักของการทำลายสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ยิ่งปริมาณการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นเท่าไรก็จะยิ่งทำลายมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นการเปลี่ยนรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนโดยการเผาไหม้เพื่อการดำรงอยู่ของมนุษย์จะไม่มี ความหมายเลยถ้ามนุษย์ไม่ตระหนักถึงผลกระทบจากมลพิษที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

แม้ว่าแก๊สส่วนใหญ่ที่เกิดจากการเผาไหม้คือคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และไอน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งไม่เป็นพิษ ในปัจจุบันแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้กลายเป็นสาเหตุหลักของการเกิดสภาวะเรือนกระจก ดังนั้นจึงเป็นประเด็นสำคัญที่จะต้องหาทางควบคุมการปล่อยปริมาณแก๊สดังกล่าว ซึ่งได้รับการขานรับจากหลายประเทศทั่วโลกจนนำไปสู่ข้อตกลงในพิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) เมื่อปี ค.ศ.1995 นอกจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว ยังมีแก๊สอื่นๆที่เกิดจากการเผาไหม้ และเป็นมลพิษ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างมากคือ ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) ฝุ่นเขม่า และออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO<sub>x</sub>) ประเด็นสำคัญคือแก๊สเหล่านี้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างไร มีกลไกการเกิดขึ้นได้อย่างไร จะลดปริมาณให้น้อยลงได้อย่างไร นับได้ว่าเป็นหัวข้อที่มีความสำคัญอย่างยิ่งเกี่ยวกับการเผาไหม้ ดังที่จะได้กล่าวโดยละเอียดต่อไป

### 3.5.2 ผลกระทบของมลพิษ [20]

ตัวอย่างผลกระทบที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เช่น

3.5.2.1 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางลบของสภาพแวดล้อมทางอากาศ การเพิ่มขึ้นของปัญหาหมอกควัน บดบังปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ส่องมายังพื้นดิน ทัศนวิสัยลดลง และมีผลต่อสภาพบรรยากาศโลกโดยรวม

3.5.2.2 ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการเจ็บป่วย และการเสียชีวิตของมนุษย์ที่ได้รับมลพิษทั้งทางตรงและทางอ้อม

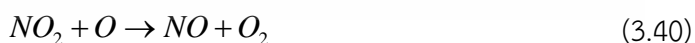
3.5.2.3 เป็นอันตรายต่อเหล่าพืชพันธุ์ หน้าที่ป่า ท้องทุ่ง แนวปะการัง และแหล่งนิเวศวิทยาอื่นๆ เนื่องจากมีสารเป็นพิษจำพวก SO<sub>2</sub> PAN และ C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> เป็นต้น ที่เป็นอันตรายต่อระบบสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช

3.5.2.4 การตกสัมผัสหรือฝังตัวของมลพิษบนพื้นผิวสิ่งปลูกสร้าง อนุสรณ์สถาน วัสดุต่างๆ ทำให้เสื่อมสภาพ และอาจสีกร่อนได้ ดูไม่สวยงาม

### 3.5.3 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>)

ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนนั้นได้รับการพิจารณาว่าเป็นสาเหตุของการเกิดหมอกทางโฟโตเคมี หรือแก๊สโอโซนในระดับต่ำ (ground level ozone) ซึ่งเกิดจาก NO<sub>x</sub> และ HC ที่มาจากไอเสียของรถยนต์เป็นส่วนใหญ่ มาทำปฏิกิริยากันในวันที่มีแสงแดดจ้า จนเกิดเป็นโอโซน O<sub>3</sub> ซึ่งมักก่อตัวในบริเวณที่มีอากาศนิ่งเหนือเมืองใหญ่ๆที่มีการจราจรหนาแน่น โดยหมอกทางโฟโตเคมีจะทำให้มีปัญหากับระบบทางเดินหายใจ และไปลดหน้าที่ของเม็ดเลือดแดงในการนำออกซิเจนไปเลี้ยงสมอง เป็นต้น

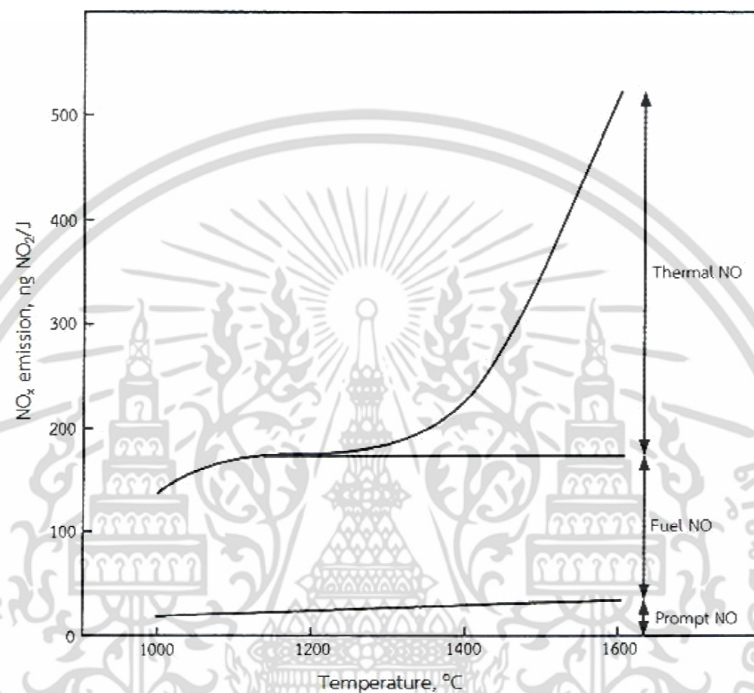
NO<sub>x</sub> นอกจากจะเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโอโซนในระดับต่ำที่เป็นพิษแล้ว ยังเป็นตัวทำลายโอโซนที่เป็นประโยชน์ซึ่งอยู่ในระดับชั้นบรรยากาศ stratosphere ของโลกอีกด้วย ดังสมการ



สังเกตเห็นได้ว่า NO เพียงโมเลกุลเดียวมีผลต่อการทำลาย O<sub>3</sub> อย่างต่อเนื่องโดยปฏิกิริยารีดอกซ์ เพราะ NO<sub>2</sub> ที่เกิดจากสมการ 3.39 จะถูกรีดิวซ์มาเป็น NO ตามสมการ 3.40 เพื่อย้อนกลับไปทำลาย O<sub>3</sub> ให้เป็น O<sub>2</sub> ต่อไปตามสมการ 3.39 ซึ่งเกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่เช่นนี้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม โอโซนในระดับสูงเป็นประโยชน์ต่อมนุษย์ในการลดความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) จากดวงอาทิตย์ที่ส่องสู่ผิวโลก ช่วยลดการเป็นโรคมะเร็งผิวหนังได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการหาวิธีลดปริมาณการปล่อย  $\text{NO}_x$  สู่บรรยากาศจึงได้กลายเป็นหัวข้อที่สำคัญที่สุดของการเผาไหม้ การที่จะกระทำเช่นนั้นได้ต้องอาศัยความเข้าใจอย่างถ่องแท้ถึงกลไกจลน์ทางเคมีของการเกิด  $\text{NO}_x$  พร้อมทั้งเข้าใจถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างจลน์ทางเคมีกับพลศาสตร์ของไหลด้วยเช่นกัน สิ่งเหล่านี้จะเป็นตัวชี้นำไปสู่การค้นพบวิธีการใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณการปล่อย  $\text{NO}_x$  จากการเผาไหม้ได้ ซึ่ง  $\text{NO}_x$  ที่พบในแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้แบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลักๆคือ thermal  $\text{NO}_x$ , prompt  $\text{NO}_x$ , fuel nitrogen oxides และ  $\text{N}_2\text{O}$



รูปที่ 3.22 ความเข้มข้นที่สมดุลของ  $\text{NO}_2$  ที่มีส่วนประกอบของออกซิเจนในแก๊สที่แตกต่างกัน

รูปที่ 3.22 แสดงค่าประมาณของการเกิด thermal  $\text{NO}_x$ , prompt  $\text{NO}_x$  และ fuel  $\text{NO}_x$  ที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ถ่านหินซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ จะพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  กลไกการเกิด thermal  $\text{NO}_x$  จะน้อยมากเมื่อเทียบกับอีกสองชนิด ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น thermal  $\text{NO}_x$  ก็เพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากกลไกการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนทั้งสามชนิดมีจลน์เคมีที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีอัตราการเกิดที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะได้แยกพิจารณากลไกการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนทั้งสามชนิดดังกล่าว

### 3.5.3.1 Thermal $\text{NO}_x$

Thermal  $\text{NO}_x$  หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Zeldovich  $\text{NO}_x$  มีสมการพื้นฐานดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } k_1 &= 1.8 \times 10^{14} \exp(-318 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} / (RT)) \quad \text{cm}^3 / (\text{mol} \cdot \text{s}) \\ k_2 &= 9.0 \times 10^9 \exp(-27 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} / (RT)) \quad \text{cm}^3 / (\text{mol} \cdot \text{s}) \\ k_3 &= 2.8 \times 10^{13} \quad \text{cm}^3 / (\text{mol} \cdot \text{s}) \end{aligned}$$

สาเหตุที่ได้ชื่อว่า thermal  $\text{NO}_x$  เพราะว่า NO ที่เกิดจากสมการที่ 3.41 นั้นต้องใช้พลังงานกระตุ้นที่สูงมากเมื่อเทียบกับสมการที่ 3.40 ทั้งนี้เพราะต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของ  $\text{N}_2$  ซึ่งเป็นแบบไตรพันธะ (triple bond) ขณะเดียวกันสมการที่ 3.41 จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้ต่อเมื่ออุณหภูมิสูงเท่านั้น ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นตัวควบคุมการเกิด NO ตามสมการที่ 3.41 ผ่านค่าคงตัวของปฏิกิริยา  $k_1$  ซึ่งแปรผกผันกับ  $1/T$  ในการทำนายปริมาณการเกิด  $\text{NO}_x$  ในปฏิกิริยาการเผาไหม้ ไม่ควรใช้วิธีการทำสมดุลเคมีเหมือนการหาปริมาณ  $\text{H}_2\text{O}$  หรือ  $\text{CO}_2$  เพราะจะเกิดความผิดพลาดอย่างมาก เนื่องจากสมดุลเคมีจะเกิดขึ้นได้นั้นต้องใช้เวลาที่ค่อนข้างนาน และนานกว่าเวลาที่อยู่ในเปลวไฟอุณหภูมิสูงเสียอีก จากสมการเคมีกลไกของ Zeldovich สามารถหาอัตราการเกิด  $\text{NO}_x$  ได้คือ

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] \quad (3.44)$$

เนื่องจากว่าอัตราการเกิดอะตอมของไนโตรเจนขณะเกิดปฏิกิริยา ในสภาวะเสถียรคือ

$$\frac{d[N]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] \approx 0 \quad (3.45)$$

ดังนั้นได้อัตราการเกิด NO คือ

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[O][N_2] \quad (3.46)$$

จะเห็นได้ว่าการที่จะลดปริมาณ thermal  $\text{NO}_x$  ได้นั้นมีเพียงสองวิธีคือ ลด  $[\text{N}_2]$  และ  $[O]$  หรือลด  $k_1$  ซึ่งมีความหมายคือต้องลดอุณหภูมิในการเผาไหม้นั่นเอง

### 3.5.3.2 Prompt $\text{NO}_x$ (Fermimore $\text{NO}_x$ )

เมื่อทำการวัดหาปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ของเปลวไฟแบบราบเรียบจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน จากจุดที่ห่างจากปลายของเปลวไฟเข้าหาแนวของเปลวไฟพบว่าปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ไม่ได้มีค่าลดลงเข้าสู่ใกล้ศูนย์แต่ประการใดเหมือนที่ทำนายโดยกลไกของ Zeldovich แต่กลับพบว่าไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด (promptly) ที่บริเวณใกล้แนวของเปลวไฟซึ่ง มีความซับซ้อนมากกว่า thermal  $\text{NO}_x$  ทั้งนี้เพราะว่า prompt  $\text{NO}_x$  เกิดจากอนุมูลอิสระ CH<sub>3</sub> ที่เกิดขึ้นในลักษณะเป็นสารชั้นกลางที่บริเวณแนวของเปลวไฟ จากนั้น CH<sub>3</sub>

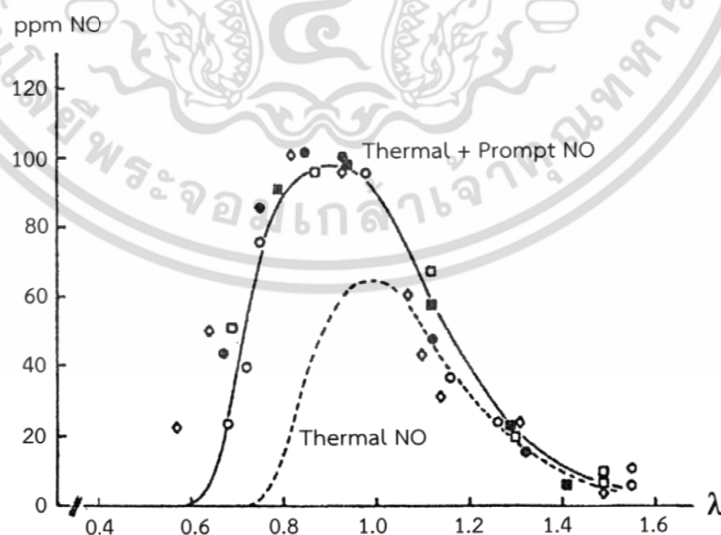
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนในอากาศ ทำให้ได้กรดไฮโดรไซยานิก (HCN) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไปจนเกิด NO ดังสมการต่อไปนี้



prompt  $NO_x$  มักเกิดในสภาวะการเผาไหม้แบบผสมก่อนเท่านั้น ทั้งนี้เพราะอนุมูลอิสระ CH จะเกิดจากอะซีทีลีน ( $C_2H_2$ ) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารที่เกิดก่อนหน้า ดังนั้น prompt  $NO_x$  จะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า thermal  $NO_x$  เพราะปฏิกิริยาต้องใช้พลังงานกระตุ้นที่น้อยกว่า ที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำประมาณ 1000 K เท่านั้น รูปที่ 3.23 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณ และผลการทดลองหาค่า thermal  $NO_x$  และ prompt  $NO_x$  ของเปลวไฟมีเทนกับอากาศในเตาเผาแบบกวน (well-stirred reactor) ผลการคำนวณกระทำในสองลักษณะคือ คำนวณโดยกลไกทางความร้อน (Zeldovich mechanism) อย่างเดียว และคำนวณโดยกลไกผสมระหว่าง Zeldovich + Fernimore จะเห็นได้ว่าส่วนต่างระหว่าง thermal-prompt  $NO_x$  กับ thermal  $NO_x$  ก็คือ prompt  $NO_x$  นั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองนี้



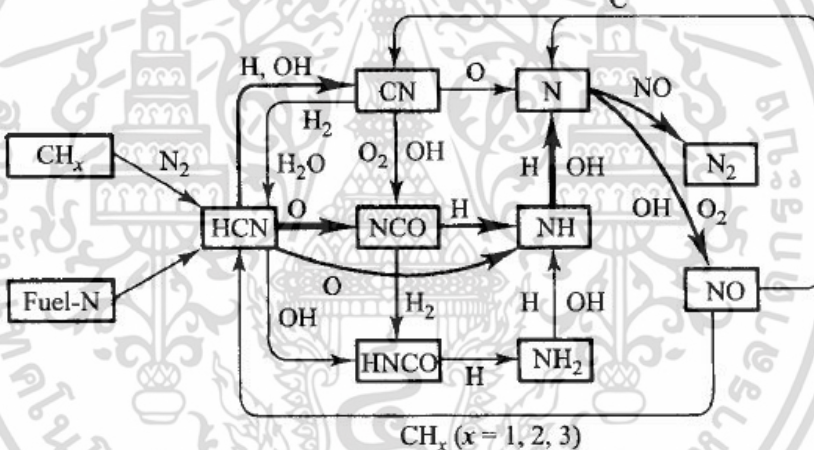
รูปที่ 3.23 ผลการคำนวณ และผลการทดลองหาค่า thermal  $NO$  และ prompt  $NO$  ของเปลวไฟมีเทนกับอากาศในเตาเผาไหม้แบบกวน  $\lambda$  หมายถึงอัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.3.3 Fuel NO<sub>x</sub> [20]

สำหรับเชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบได้แก่ เชื้อเพลิงชีวมวล และถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งถ่านหินอาจมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบได้ถึงร้อยละ 2 ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปเป็น HCN ในเปลวไฟซึ่งจะเปลี่ยนต่อไปเป็น NH หรือ NH<sub>2</sub> จากนั้นทั้งคู่ก็จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และทำให้เกิด NO+H<sub>2</sub>O หรืออาจทำปฏิกิริยากับ NO แล้วเปลี่ยนเป็น N<sub>2</sub> และ H<sub>2</sub>O ดังนั้น สัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่หลุดออกมาจากเปลวไฟกลายเป็น NO นั้นจะเป็นอิสระต่ออัตราส่วนระหว่าง NO/O<sub>2</sub> ในเปลวไฟ นั่นคือหากรักษาให้สัดส่วนของออกซิเจนในแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงในเปลวไฟให้ต่ำไว้ ก็จะทำให้ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเปลี่ยนไปเป็น NO น้อยลงตามไปด้วย

สัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนเป็น NO<sub>x</sub> ในแก๊สไอเสียนั้นประมาณได้ว่า มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 20 ถึง 50 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะของเตาเผา และอาจขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของไนโตรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงอีกด้วย จะเห็นได้ว่าแม้จะทำการวิเคราะห์และศึกษากลไกการเกิด NO แต่ละประเภทแยกออกจากกัน แต่ทั้ง thermal NO<sub>x</sub>, prompt NO<sub>x</sub> และ Fuel NO<sub>x</sub> ต่างก็เกิดขึ้นพร้อมๆกัน และมีกลไกการเกิดร่วมกัน



รูปที่ 3.24 การเกิด NO ที่ขับเคลื่อนด้วยกลไกของ Zeldovich [21]

### 3.5.3.4 NO<sub>x</sub> ที่เกิดจาก N<sub>2</sub>O

thermal NO<sub>x</sub> เกิดขึ้นได้ดีภายใต้สภาวะการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (>1700 K) ในขณะที่ prompt NO<sub>x</sub> เกิดขึ้นได้ดีภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบผสมหนา แต่สำหรับไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดผ่าน N<sub>2</sub>O จะเกิดได้ดีที่สภาวะการเผาไหม้แบบผสมบาง และอุณหภูมิต่ำ เช่นในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันแก๊สที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าที่จะส่งผลให้เกิด thermal NO<sub>x</sub> ขณะเดียวกัน การเผาไหม้ที่สภาวะส่วนผสมบางยังป้องกันไม่ให้เกิดอนุมูลอิสระของ CH ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการป้องกันการเกิด prompt NO<sub>x</sub> โดยอัตโนมัติ ดังนั้นไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดผ่าน N<sub>2</sub>O นี้จะมีความคล้ายคลึงกับการเกิด thermal NO<sub>x</sub> ในแง่ที่ว่าอะตอมของออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโมเลกุลของไนโตรเจน แต่ต้องอาศัยโมเลกุลที่สาม (M) เป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิด N<sub>2</sub>O จากนั้น N<sub>2</sub>O จะทำปฏิกิริยากับอะตอมของออกซิเจนต่อไปจนเกิดเป็น NO ตามสมการดังนี้



ยิ่งความดันการเผาไหม้มีค่าสูงเท่าไร NO ที่เกิดขึ้นก็จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น เพราะไม่เพียงแต่มีพลังงานกระตุ้นที่ต่ำแล้ว อุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำก็ไม่ได้มีผลต่อการยับยั้งการเกิด NO เหมือนเช่น thermal NO<sub>x</sub> อีกต่อไป ดังนั้น NO ที่เกิดผ่าน N<sub>2</sub>O จึงเป็นสาเหตุหลักของการเผาไหม้ที่ส่วนผสมบางที่ถูกเจือจางด้วยอากาศมากๆ

### 3.5.4 คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) [20]

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้มีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น สถานะการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป การผสมคลุกเคล้ากันไม่ดีพอ ปริมาณอากาศไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงจนทำให้เกิดการแตกสลายของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) มาเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ได้ดังสมการ



สาเหตุที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้เกิด CO คือการมีเวลาสั้นเกินไปในโซนการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากต้องระบายไอเสียออกทันที อุณหภูมิ และความดันเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ดังนั้น CO จะอยู่ในสถานะสมดุลบางส่วนมากกว่าที่จะอยู่ในสถานะสมดุลอย่างสมบูรณ์ ทำให้การเปลี่ยนแปลงจาก CO เป็น CO<sub>2</sub> เกิดขึ้นไม่เต็มที่ เพราะถูกจำกัดด้วยการแย่งเข้าทำปฏิกิริยาของ OH กับ H



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

### 3.5.5 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO<sub>x</sub>)

เป็นที่ทราบกันดีว่าออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO<sub>x</sub>) นอกจากจะมีผลต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังสามารถทำลายอุปกรณ์การเผาไหม้ และอุปกรณ์อื่นๆให้ผุกร่อนเสียหายได้ ออกไซด์ของซัลเฟอร์มีที่มาจากซัลเฟอร์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ในระหว่างการเผาไหม้ โดยจะได้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) เป็นสารประกอบหลัก มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) อยู่เล็กน้อย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอื่นๆเช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) คาร์บอนิลซัลไฟด์ (COS) ซึ่งเรียกรวมกันว่า SO<sub>x</sub> ซึ่งเชื้อเพลิงเกือบทั้งหมดที่ใช้โดยมนุษย์ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ ไม้ และสารอินทรีย์อื่นๆ เป็นต้น ล้วนมีซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบ เชื้อเพลิงไม้อาจมีอยู่ในปริมาณน้อยเพียงร้อยละ 0.1 ในขณะที่ถ่านหินเกือบทุกชนิดอาจมีอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 0.5 ถึง ร้อยละ 3 ในขณะที่น้ำมันโดยทั่วไปจะมีซัลเฟอร์มากกว่าไม้แต่จะน้อยกว่าที่มีในถ่านหิน ถ้าทำการเผาไหม้ไม้ ซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในไม้เกือบทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ดังสมการต่อไปนี้

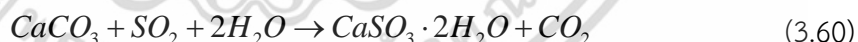


ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO<sub>x</sub>) ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วกลายเป็นกรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดฝนกรด

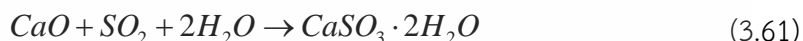


ซึ่งน้ำที่ทำปฏิกิริยากับ SO<sub>3</sub> คือน้ำที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ และมีอยู่แล้วในแก๊สไอเสียพร้อมกับ SO<sub>3</sub> นั่นเอง SO<sub>2</sub> ที่เกิดจากการเผาไหม้จะมีปริมาณมากกว่าแก๊ส SO<sub>3</sub> ดังนั้น SO<sub>2</sub> จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็น SO<sub>3</sub> โดยอนุมูลของ OH ก่อนทำปฏิกิริยากับ H<sub>2</sub>O เป็นกรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ต่อไป ซึ่งวิธีการทั่วไปที่ใช้กำจัด SO<sub>x</sub> จากแก๊สไอเสียคือใช้หินปูน (limestone, CaCO<sub>3</sub>) หรือใช้ปูนขาว (lime, CaO) ผสมน้ำจนเป็นโคลนเหลวแล้วพ่นเข้าไปในหอที่แก๊สไอเสียไหลผ่าน ซึ่ง SO<sub>x</sub> จะถูกกำจัด ดังสมการต่อไปนี้

กรณีใช้โคลนเหลวของหินปูน (aqueous slurry of limestone)



กรณีใช้โคลนเหลวของหินขาว (aqueous slurry of lime)



นอกจากการใช้หินปูนหรือปูนขาวผสมน้ำ (แบบเปียก) กำจัด SO<sub>2</sub> ได้แล้ว ยังสามารถกำจัด SO<sub>2</sub> ด้วยหินปูนหรือปูนขาวในรูปแบบผง (แบบแห้ง) ได้อีกด้วย ซึ่งกรณีแบบเปียกต้องรอให้ calcium sulfite dihydrate (CaSO<sub>3</sub> · 2H<sub>2</sub>O) ตกตะกอนในถังพักเสียก่อนแล้วค่อยแยกน้ำออกเพื่อขนย้ายออกไปกำจัดโดยการฝังต่อไป ส่วนในกรณีแบบแห้งนั้นใช้เครื่องแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อแยกผง CaSO<sub>3</sub> ออกไปเสียก่อนแล้วจึงนำไปกำจัดต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.6 ฝุ่นและเขม่า (Particulates and Soot)

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

เขม่า (soot) คืออนุภาคคาร์บอนที่มีส่วนของไฮโดรเจนรวมอยู่อย่างน้อย 1% โดยมวล คิดเป็นสูตรทางเคมีอย่างง่ายคือ  $\text{C}_8\text{H}$  เขม่าจึงไม่ใช่คาร์บอนบริสุทธิ์ มักเกิดในบริเวณที่มีเชื้อเพลิงอยู่อย่างเข้มข้น (fuel-rich regions) เสมอ ซึ่งเป็นธรรมชาติของกลไกการเผาไหม้ที่ส่วนผสมของเชื้อเพลิงและออกซิไดซ์จะไม่สม่ำเสมอเท่ากันหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกลไกการผสมหรือความปั่นป่วน สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ เขม่าเกิดขึ้นได้ง่ายในเปลวไฟชนิดแพร่มากกว่าในเปลวไฟชนิดผสมก่อน ขั้นตอนการเกิดเขม่า (soot formation) แบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

1. การเกิดขึ้นเป็นอนุภาค (particle inception) ระหว่างปฏิกิริยาการเผาไหม้ ขั้นเริ่มต้นของการเกิดเขม่าต้องมีโมเลกุลสารอนุมูลเป็นสารตั้งต้น ก่อตัวเป็นนิวเคลียส (nucleation) หรือเป็นอนุภาคที่เล็กมากระดับโมเลกุล นิวเคลียสดังกล่าวมักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน เช่น polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) ซึ่งถือเป็นสารขั้นกลาง (intermediates) ทำหน้าที่เป็นสารเกิดก่อนเขม่า จากนั้นอะเซทิลีน ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) จะเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบห่วง แล้วรวมตัวกันเป็นก้อนโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น จนนำไปสู่การเติบโตเป็นอนุภาคเขม่าในขั้นตอนต่อไป
2. การเติบโตของผิวรอบนอก (surface growth) แต่ละจะเกิดการขยายใหญ่ขึ้นด้วยการเกาะตัวของสารขั้นกลางต่างๆบนผิว ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นอะเซทิลีน ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) ที่มีมากถึง 85% ของมวลรวม
3. การเกาะรวมตัวกัน (coagulation) อนุภาคเขม่าแต่ละก้อน เคลื่อนที่ชนกัน และเกาะรวมกันเป็นกลุ่ม เกิดเป็นอนุภาคจลสารรูปร่างลักษณะคล้ายห่วงโซ่
4. การออกซิไดซ์เขม่า (soot oxidation) ภายหลังที่เขม่าเกิดขึ้นแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งมักเกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของ reaction zone ที่อยู่ตรงปลายของเปลวไฟ (flame tip) เขม่าจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นกระแสผ่านเข้าไปในบริเวณการเผาไหม้ที่ปลายของเปลวไฟนั้น ถ้าเขม่าถูกเผาไหม้จนหมดจะเรียกเปลวไฟนั้นว่าเปลวไฟไร้เขม่า ในขณะที่ถ้าเขม่าเผาไหม้ไม่หมดจะเกิดเปลวไฟมีเขม่า

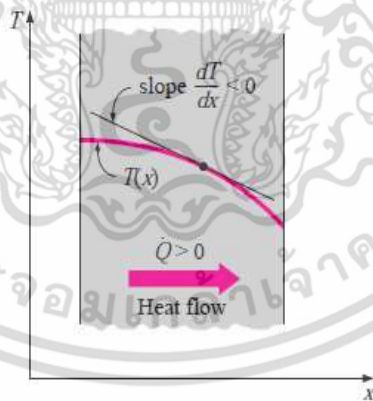
### 3.6 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Conduction Heat Transfer) [24]

เมื่อจุดสองจุดมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จะมีพลังงานถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า พลังงานที่เคลื่อนที่ไปด้วยอิทธิพลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้เรียกว่าความร้อน โดยที่การถ่ายเทความร้อนจะสิ้นสุดลงเมื่ออุณหภูมิของทั้งสองบริเวณมีค่าเท่ากัน กลไกของการถ่ายเทความร้อนมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ การนำความร้อน (conduction), การพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสีความร้อน (radiation) ในการออกแบบระบบความร้อน และการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะต้องเข้าใจในกลไก และต้องทราบถึงความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนแบบนั้นๆ สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกฎเกณฑ์สำคัญๆ ของการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เท่านั้น

การนำความร้อนหมายถึงการส่งถ่ายพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลาง อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยส่งถ่ายความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งสู่อีกโมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่อง อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนคำนวณจากกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ซึ่งการนำความร้อนในทิศทาง  $x$  ภายใต้สภาวะคงตัว (steady state) สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{cond,x} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.62)$$

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



รูปที่ 3.25 การนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติพิกัด  $x$

ฟลักซ์ความร้อนผ่านตัวกลางสามารถคำนวณได้จาก

$$q''_{cond,x} = \frac{\dot{Q}_{cond,x}}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.63)$$

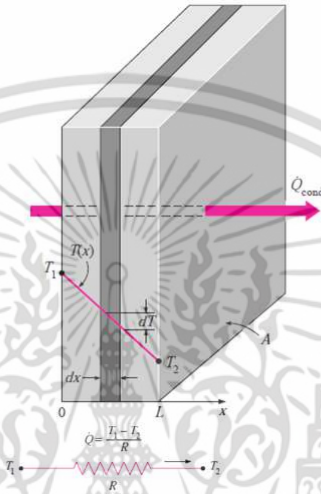
เมื่อ  $q''_{cond,x}$  คือฟลักซ์ความร้อน ( $W/m^2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.25 ถ้าอุณหภูมิของตัวกลางลดลงตามทิศทาง  $+x$  พบว่าค่าของ  $dT/dx$  จะเป็นลบ ดังนั้นถ้า  $\dot{Q}_{cond,x}$  หรือ  $q''_{cond,x}$  มีทิศการไหลในทิศ  $+x$

### 3.6.1 การนำความร้อนผ่านผนังแผ่นระนาบ (Heat Conduction in Plane Wall)

พิจารณาการนำความร้อนผ่านแผ่นระนาบหนา  $L$  ภายใต้สภาวะคงตัวในพิกัดฉากบนแกน  $x$  ไม่มีแหล่งผลิตความร้อนในแผ่นระนาบนั้น จะเกิดการกระจายอุณหภูมิเป็นสมการเชิงเส้น ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 การเปรียบเทียบการนำความร้อนกับวงจรไฟฟ้า

หากเปรียบเทียบกับวิชาทางไฟฟ้า อัตราความร้อนไหลผ่านตัวกลาง ( $\dot{Q}_x$ ) เปรียบเสมือนเป็นกระแสไฟฟ้า ผลต่างของอุณหภูมิเปรียบเสมือนความต่างศักย์ไฟฟ้า พจน์ของ  $L/kA$  ในสมการฟูเรียร์เปรียบเสมือนความต้านทาน

จากกฎของฟูเรียร์ตามสมการที่ 3.62 จะได้

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.64)$$

$$\frac{\dot{Q}_x}{A} = -\frac{k}{L} (T_2 - T_1) \quad (3.65)$$

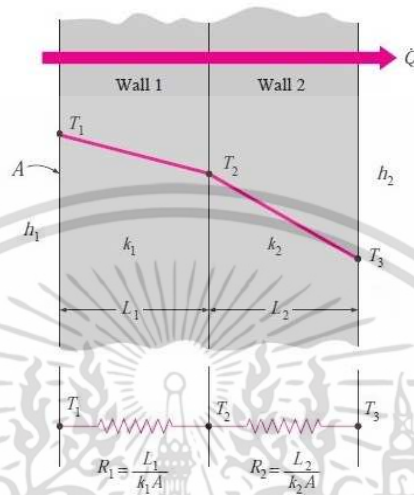
$$\dot{Q}_x = \frac{(T_1 - T_2)}{(L/kA)} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{cond}} \quad (3.66)$$

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \quad (3.67)$$

เมื่อ  $R_{cond}$  เรียกว่าความต้านทานต่อการนำความร้อน ( $K/W$ ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2 การนำความร้อนในผนังราบที่เรียงซ้อนกันแบบอนุกรม (Multilayer Plane Wall)

ถ้าหากความร้อนไหลผ่านผนังที่เรียงซ้อนกันหลายชั้นโดยการนำ เช่น ผนังของอาคารบ้านเรือนแล้ว การวิเคราะห์เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนจะยากขึ้น ในกรณีที่มีสถานะต่างๆ คงที่หรือไม่แปรผันตามเวลาแล้วนั้น อัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนังแต่ละชั้นจะมีขนาดที่เท่าๆ กัน



รูปที่ 3.27 แสดงการนำความร้อนแบบมิติเดียวที่ไหลผ่านผนังหลายชั้น

ความลาดชันของอุณหภูมิในผนังแต่ละชั้นมีค่าแตกต่างกัน ในกรณีนี้ อัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนังแต่ละชั้นของรูปที่ 3.27 จะมีค่าเป็น

$$\dot{Q}_{cond} = -\left(\frac{kA}{L_1}\right)_A (T_2 - T_1) = -\left(\frac{kA}{L_2}\right)_B (T_3 - T_2) \quad (3.68)$$

เมื่อทำการหาผลเฉลยของสมการที่ 3.68 จะได้สมการการถ่ายเทความร้อนดังนี้

$$\dot{Q}_{cond} = -\frac{T_3 - T_1}{(L_1 / kA)_A + (L_2 / kA)_B} \quad (3.69)$$

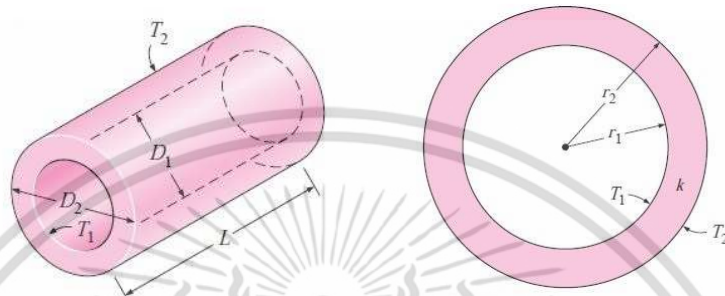
สำหรับในกรณีที่ผนังเรียงซ้อนกัน  $n$  ชั้น และแต่ละชั้นสัมผัสกันเต็มพื้นที่แล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ไหลผ่านผนังจำนวน  $n$  ชั้นก็จะมีค่าเป็น

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^{i=n} (L / kA)_i} \quad (3.70)$$

เมื่อ  $T_1$  คืออุณหภูมิของผิวผนังชั้นแรก และ  $T_{n+1}$  คืออุณหภูมิของผิวผนังชั้นที่  $n$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.3 การนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก (Heat Conduction in Cylinders)

พิจารณาการนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอกยาวที่มีรัศมีภายใน  $r_1$  รัศมีภายนอก  $r_2$  และมีความยาว  $L$  ภายใต้สภาวะคงตัว และไม่มีแหล่งผลิตความร้อนภายในพิกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.28 ซึ่งพบว่าทรงกระบอกที่มีความยาวมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง การไหลของความร้อนจะอยู่ในทิศทางของแนวรัศมีเท่านั้น และเมื่อแทนความสัมพันธ์ของพื้นที่การไหลของความร้อนในระบบทรงกระบอกลงในสมการของฟูเรียร์ จะได้



รูปที่ 3.28 การนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก

$$\dot{Q}_{cond,cyl} = -kA \frac{dT}{dr} \quad (3.71)$$

หาผลเฉลยของสมการที่ 3.71 ด้วยเงื่อนไข  $r = r_1$  ที่  $T(r_1) = T_1$  ถึง  $r = r_2$  ที่  $T(r_2) = T_2$  จะได้

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{\dot{Q}_{cond,cyl}}{A} dr = - \int_{T_1}^{T_2} k dT \quad (3.72)$$

แทนค่า  $A = 2\pi rL$

$$\dot{Q}_{cond,cyl} = 2\pi Lk \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2/r_1)} \quad (3.73)$$

สำหรับกรณีที่มี  $k$  เท่ากับค่าคงตัวจะได้

$$\dot{Q}_{cond,cyl} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cyl}} \quad (3.74)$$

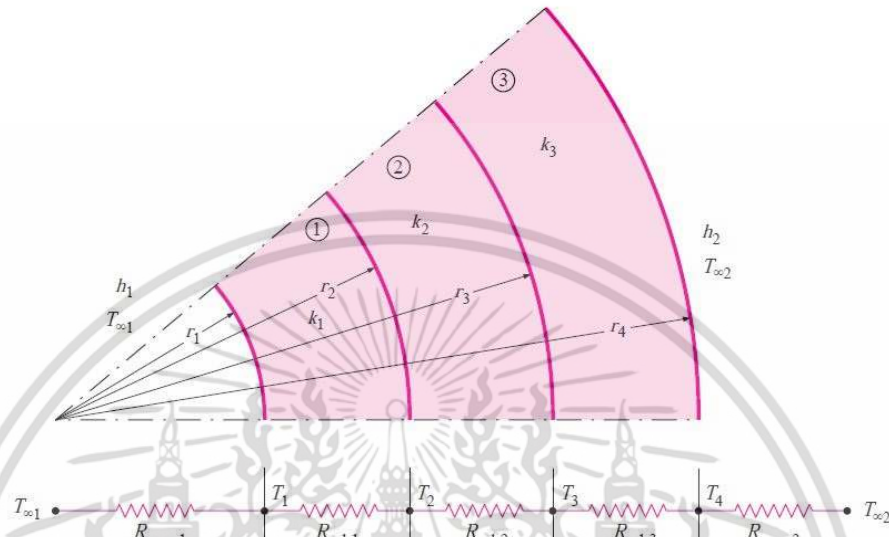
โดยที่  $R_{cyl}$  คือความต้านทานการนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก ( $K/W$ )

$$R_{cyl} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (3.75)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.4 ทรงกระบอกหลายชั้น (Multilayer Cylinders)

การนำความร้อนในผนังร่ายที่ใช้การเปรียบเทียบกับวงจรไฟฟ้าสามารถนำไปใช้แก้ปัญหาเกี่ยวกับวัตถุทรงกระบอกกลางที่มีหลายชั้นได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น การไหลของของไหลที่หุ้มด้วยฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านทรงกระบอกกลางหลายชั้น

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}} \quad (3.76)$$

เมื่อ  $R_{total}$  คือผลรวมของค่าความต้านทานทางความร้อน (the total thermal resistance)

$$\begin{aligned} R_{total} &= R_{conv,1} + R_{cyl,1} + R_{cyl,2} + R_{cyl,3} + R_{conv,2} \\ &= \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi L k_3} + \frac{1}{h_2 A_2} \end{aligned} \quad (3.77)$$

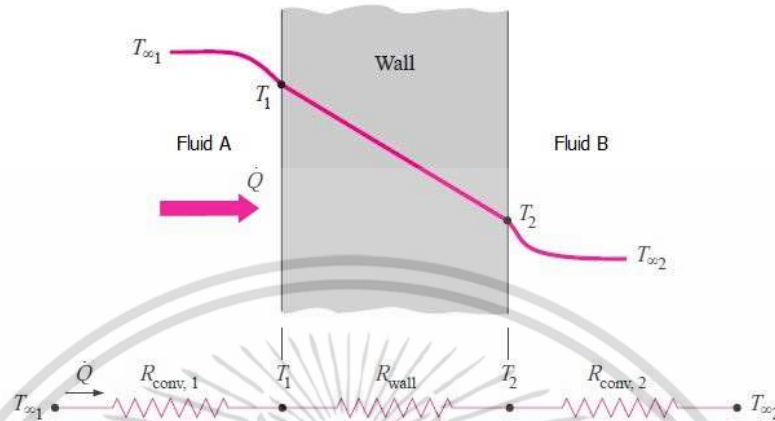
ในกรณีที่ความร้อนต้องไหลผ่านวัสดุที่ละชั้น ความต้านทานความร้อนจึงเป็นการต่อแบบอนุกรม ดังนั้นสมการอัตราการถ่ายเทความร้อนจะเป็นดังสมการ

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \frac{T_{\infty 1} - T_1}{R_{conv,1}} = \frac{T_{\infty 1} - T_2}{R_{conv,1} + R_{cyl,1}} = \frac{T_1 - T_3}{R_{cyl,1} + R_{cyl,2}} \\ &= \frac{T_2 - T_3}{R_{cyl,2}} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{R_{cyl,2} + R_{cyl,3} + R_{conv,2}} \end{aligned} \quad (3.78)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient)

พิจารณาผนังระนาบดังแสดงในรูปที่ 3.30 ซึ่งมีของไหลร้อน A สัมผัสอยู่ด้านหนึ่ง และของไหล B สัมผัสอีกด้านหนึ่ง สมการการถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะคงที่ เขียนได้ดังนี้



รูปที่ 3.30 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังระบบ

$$\dot{Q} = h_1 A (T_{\infty 1} - T_1) = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = h_2 A (T_2 - T_{\infty 2}) \quad (3.79)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \frac{T_{\infty 1} - T_1}{1/h_1 A} = \frac{T_1 - T_2}{L/kA} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{1/h_2 A} \\ &= \frac{T_{\infty 1} - T_1}{R_{conv,1}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{wall}} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{R_{conv,2}} \end{aligned} \quad (3.80)$$

การถ่ายเทความร้อนรวมคำนวณได้จากอัตราส่วนของอุณหภูมิแตกต่างทั้งหมดหารด้วยผลรวมของความต้านทานของความร้อน

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}} \quad (3.81)$$

เมื่อ

$$R_{total} = R_{conv,1} + R_{wall} + R_{conv,2} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \quad (3.82)$$

สังเกตได้ว่าค่า  $R_{conv} = 1/hA$  คือค่าความต้านทานความร้อนของการพาความร้อน การถ่ายเทความร้อนรวมทั้งหมดได้จากผลรวมของค่าการนำความร้อนกับการพาความร้อนให้อยู่ในเทอมของสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวม (overall heat transfer coefficient),  $U$  ซึ่งมีหน่วยเป็น  $W/m^2 \cdot K$  ซึ่งกำหนดได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{Q} = UA\Delta T \quad (3.83)$$

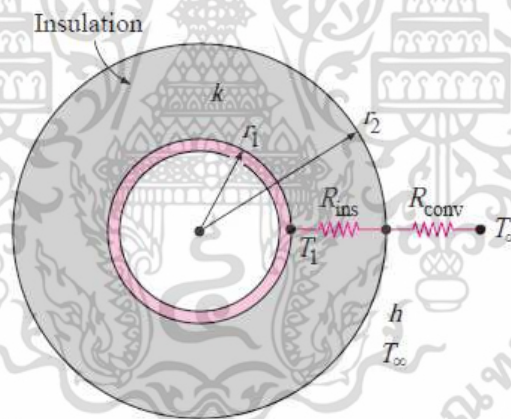
เมื่อพิจารณาสมการที่ 3.81-3.83 จะได้ว่า

$$UA = \frac{1}{R_{total}} \quad (3.84)$$

สังเกตได้ว่า หากพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนคงที่ สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวม จะแปรผกผันกับความต้านทานความร้อนรวมของระบบ

### 3.6.6 ความหนาวิกฤติของฉนวน (Critical Radius of Insulation)

เมื่อพิจารณาทรงกระบอกกลวง ที่ทำจากวัสดุความต้านทานต่ำที่มีฉนวนหุ้ม และฉนวนนั้นถูกล้อมรอบด้วยของไหล รัศมีภายในท่อ  $r_1$  อุณหภูมิ  $T_1$  หุ้มด้วยฉนวนความร้อนมีค่า thermal conductivity ( $k$ ) รัศมีภายนอก  $r_2$  อุณหภูมิผิวด้านนอกของฉนวนที่หุ้มท่อคืออุณหภูมิสม่ำเสมอ  $T_2$  และมีการพาความร้อนออกสู่บรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.31 สามารถเขียนสมการทั่วไปกรณีมีการหุ้มฉนวนดังสมการที่ 3.85

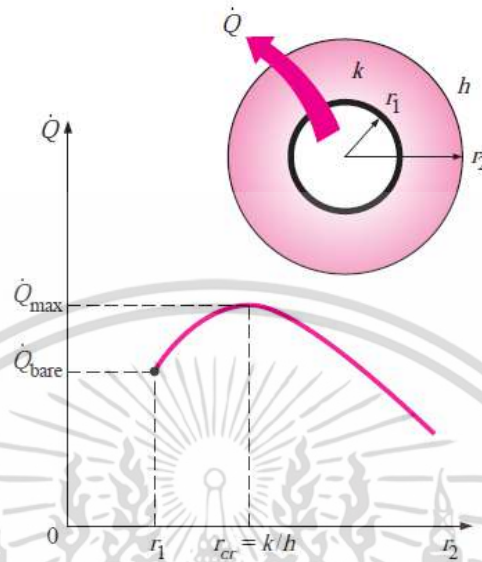


รูปที่ 3.31 ความหนาวิกฤติของฉนวนหุ้มท่อ

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_\infty}{R_{ins} + R_{conv}} = \frac{T_1 - T_\infty}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} + \frac{1}{h(2\pi r_2 L)}} \quad (3.85)$$

การหุ้มฉนวนกันความร้อนให้กับผนังราบจะทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงเนื่องจากค่าความต้านทานทางความร้อนของผนังเพิ่มขึ้น ในขณะที่พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนคงที่ แต่สำหรับกรณีท่อทรงกระบอก การเพิ่มฉนวนกันความร้อนจะทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงเนื่องจากค่าความต้านทานทางความร้อนของผนังเพิ่มขึ้น แต่การใช้ฉนวนกันความร้อนทำให้พื้นที่ผิวด้านนอกของท่อเพิ่มขึ้น ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจากท่อทรงกระบอกที่หุ้มฉนวนอาจเพิ่มขึ้นเมื่อมีการหุ้มฉนวนที่มากเกินไป ซึ่งอัตราการพาความร้อนจากฉนวนสู่บรรยากาศรอบข้างแสดงดังรูปที่ 3.32 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.85 สามารถคำนวณหาความหนาวิกฤติของฉนวนด้วยการ differential เทียบกับรัศมีภายนอกของฉนวน  $d\dot{Q}/dr_2 = 0$  ซึ่งจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ซึ่งให้ผลเฉลยออกมาดังนี้



รูปที่ 3.32 อัตราการพาความร้อนจากฉนวนสู่บรรยากาศ

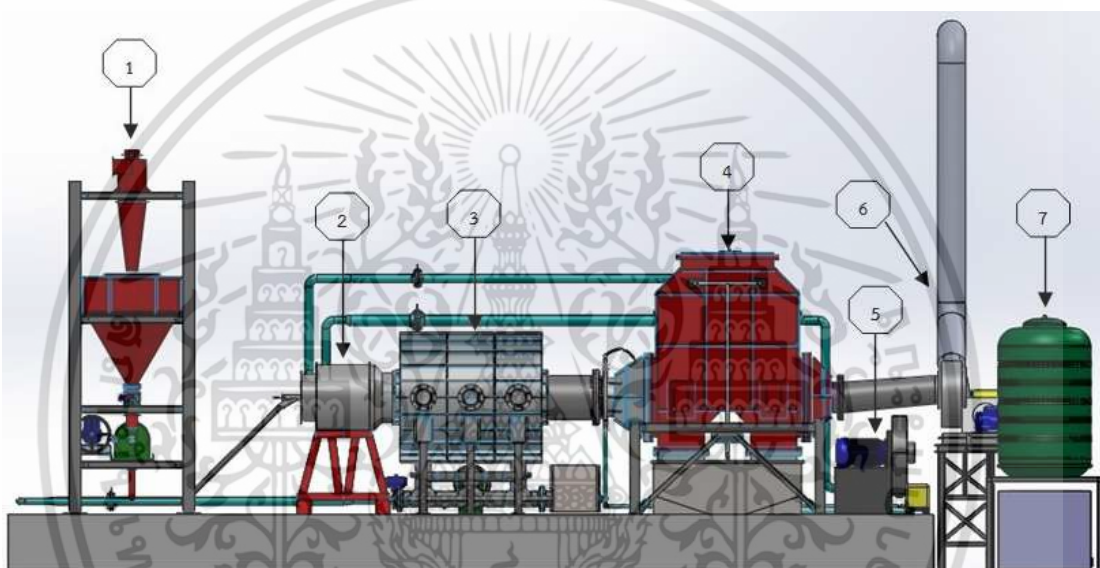
$$r_{cr, cylinder} = \frac{k}{h} \quad (3.86)$$

จากสมการที่ 3.86 จะเห็นว่ารัศมีวิกฤติของฉนวน จะขึ้นอยู่กับค่าสภาพนำความร้อนของฉนวน ( $k$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา ( $h$ ) ซึ่งรัศมีวิกฤติของฉนวนจะมีค่ามากเมื่อค่าสภาพนำความร้อนของฉนวนมีค่ามาก หรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา สู่บรรยากาศมีค่าน้อย นั่นเอง

## บทที่ 4

### การคำนวณ และการออกแบบชุดทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงรายละเอียดการคำนวณโดยอ้างอิงทฤษฎีต่างๆ ได้แก่ การเผาไหม้ เชื้อเพลิงแข็ง สมการการเผาไหม้ กลศาสตร์ของไหล หลักการขนถ่ายวัสดุ และการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น เพื่อให้ได้มาซึ่งชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ซึ่งนอกเหนือจากหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นหัวข้อหลักของงานวิจัยแล้ว ทางที่วิจัยจะต้องออกแบบระบบป้อนเชื้อเพลิง ห้องเผาไหม้ ระบบลดอุณหภูมิ และระบบบำบัดไอเสีย เพื่อมาลองรับการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งรูปแบบของชุดทดสอบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.1



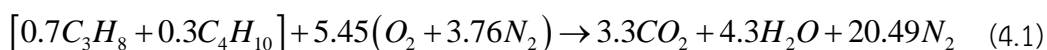
รูปที่ 4.1 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง (1) ระบบบด และป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง, (2) หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล, (3) ห้องเผาไหม้, (4) ระบบบำบัดไอเสีย wet scrubber, (5) ระบบป้อนอากาศ, (6) พัดลมดูดอากาศ และปล่องควัน, (7) บ่อตกตะกอน และระบบหมุนเวียนน้ำ

#### 4.1 สมการการเผาไหม้

ในการออกแบบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้นั้น ผู้วิจัยควรทราบถึงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สมการการเผาไหม้ และให้ได้มาซึ่งอัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิง สำหรับงานวิจัยนี้หัวเผาชนิตห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ถูกออกแบบมาเพื่อให้มีความเหมาะสมกับเชื้อเพลิงชีวมวลผง แต่ทว่าตอนเริ่มต้นจุดเตานั้นจะต้องใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงในการอุ่นให้ผนังเตาร้อน จนอุณหภูมิของผนังเตาส่งกว่าอุณหภูมิจุดติดไฟของเชื้อเพลิงชีวมวลผง แล้วเชื้อเพลิงชีวมวลจึงจะถูกป้อนให้เกิดการเผาไหม้ในเตาต่อไป ดังนั้นเชื้อเพลิงที่จะถูกนำมาใช้ในการทดสอบคือ แก๊ส LPG และเชื้อเพลิงชีวมวลผง 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 หญ้าเนเปียร์ (Napier grass) ซึ่งตารางที่ 4.1 แสดงถึงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์ ซึ่งกรณีศึกษานี้จะทำการวิเคราะห์การเผาไหม้ที่สภาวะ stoichiometry โดยการวิเคราะห์สมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะคิดที่สภาวะที่ได้รับ ดังนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวลอัดแท่งจากหญ้าเนเปียร์

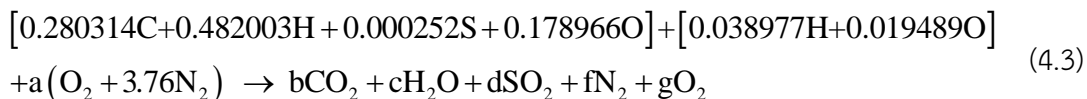
คุณสมบัติ	สภาพที่ได้รับ	หลักอ้างอิงแห่ง
การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis)		
ความชื้น,%	4.57	-
สารระเหย,%	66.91	70.11
ถ่านคงตัว,%	20.22	21.19
เถ้า,%	8.30	8.70
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)		
ไฮโดรเจน,%	6.58	6.36
คาร์บอน,%	45.92	48.12
ไนโตรเจน,%	0.00	0.00
ออกซิเจน,%	39.09	36.71
ซัลเฟอร์,%	0.11	0.11
ค่าความร้อนสูง, kcal/kg	4,120	4,320
ค่าความร้อนต่ำ, kcal/kg	3,790	3,970

ที่มา : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

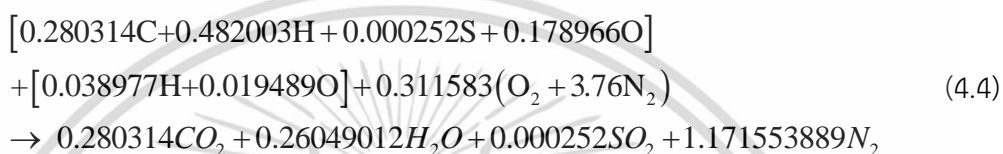
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2.1 ณ สภาพที่ได้รับ (ความชื้น 4.57 %) ที่สภาวะ stoichiometry

เมื่อวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพนำส่งตามที่แสดงไว้ดังตารางที่ 4.1 จะสามารถเขียนสมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง ได้ดังนี้



ทำการสมดุลสมการจะได้สมการการเผาไหม้ที่สภาวะ stoichiometry ดังนี้



จากการวิเคราะห์สมการการเผาไหม้จะทำให้ได้อัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิง (AF ratio) ที่สภาวะ Stoichiometry ประมาณ 5.572 kg<sub>air</sub>/kg<sub>fuel</sub> ซึ่งตัวเลขนี้จะนำไปสู่การคำนวณเพื่อออกแบบหัวเผาต่อไป

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณไอเสียที่ 100 % Stoichiometry

สารประกอบ	สัดส่วนโดยโมล	สัดส่วนโดยมวล
CO <sub>2</sub>	0.129	0.197
H <sub>2</sub> O	0.120	0.074
SO <sub>2</sub>	0.000116	0.000257
N <sub>2</sub>	0.705	0.680
O <sub>2</sub>	0.043	0.048
ผลรวมของเลขดุลหน้าสารประกอบ 2.158		
มวลโมเลกุลของไอเสีย = 29.041 kg <sub>ไอเสีย</sub> /kmol <sub>ไอเสีย</sub>		

## 4.2 การออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง

### 4.2.1 แนวคิดในการออกแบบ

ก่อนที่จะทำการออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลนั้น ควรที่จะทำการศึกษางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้อง เพื่อจำกัดกรอบแนวคิดให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้น จากการสำรวจงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์ จะพบว่าหัวเผาที่มีการไหลหมุนควงของอากาศ (swirl) ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคของเชื้อเพลิงที่ผสมผสาน [6] ส่งผลดีต่อกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงขึ้น [10] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยบางส่วนสนับสนุนว่าหัวเผาเชื้อเพลิงถ่านหินปน สามารถนำมาใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียดได้ แต่เมื่อทดสอบที่สภาวะการทำงานเดียวกันพบว่า เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจะมีความยาวมากกว่าเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน [12] ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อน (heating value) ที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับถ่านหิน หากจะทำการเผาไหม้ที่กำลังความร้อนเดียวกัน กรณีของเชื้อเพลิงชีวมวลจึงต้องป้อนเชื้อเพลิง และอากาศในปริมาณที่มากกว่าถ่านหิน จึงส่งผลให้เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลมีความยาวที่มากกว่า และเมื่อสังเกตบริเวณหัวเผาในกรณีของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล จะพบว่าระยะฐานของเปลวไฟ (flame lift off distance) จะเลื่อนออกห่างจากหัวเผา และสังเกตเห็นบริเวณใกล้หัวเผาระบายตัวของอนุภาคจะค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกรณีถ่านหิน เนื่องจากในกรณีของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจะมีการพัดพาของมวลอากาศเย็นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในบริเวณที่ค่อนข้างสูง ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้จึงล่าช้า ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3.17 ที่แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นเชื้อเพลิงที่ต้องอาศัยระยะเวลาในกระบวนการ Heat and Dry ที่ค่อนข้างนานเมื่อเทียบกับกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization) จึงทำให้บริเวณใกล้หัวเผามีอนุภาคที่ต่ำ โดยลักษณะเช่นนี้จะส่งผลเสียต่อการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนที่ค่อนข้างต่ำ การรักษาเสถียรภาพฐานของเปลวไฟจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้นทางที่วิจัยจึงจะทำการออกแบบหัวเผาให้มีลักษณะเป็นห้องเผาไหม้ช่วยที่ประกอบไปด้วยใบพัด (swirl pre-chamber) โดยห้องเผาไหม้ช่วยจะทำหน้าที่เป็นห้องที่ทำหน้าที่รักษาเสถียรภาพฐานของเปลวไฟ เพื่อชดเชยปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างล่าช้า และชดเชยระยะฐานของเปลวไฟ (flame lift off distance) ที่จะเลื่อนออกห่างจากหัวเผา ในขณะที่ใบพัดจะเป็นตัวช่วยให้เกิดอากาศในลักษณะหมุนควงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย และเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนบริเวณ IRZ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เพื่อให้กระแสของแก๊สร้อนเกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับอนุภาคของเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ และเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง

เนื่องจากในการออกแบบ และพัฒนาหัวเผา (burner) นั้นมีจุดมุ่งหมายสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับหม้อน้ำชนิดท่อไฟแบบวางนอน (horizontal fire tube boiler) ทดแทนหัวเผาเชื้อเพลิงแก๊ส หรือหัวเผาน้ำมันเตา ซึ่งเป็นหัวเผาที่สามารถตอบสนองต่อการปรับเปลี่ยกำลังความร้อนได้อย่างรวดเร็ว โดยหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) จะรักษาเสถียรภาพฐานของเปลวไฟโดยอาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาความร้อน (convection heat transfer) ระหว่างกระแสหมุนวนของแก๊สร้อน และอนุภาคของเชื้อเพลิงบริเวณ IRZ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จึงสามารถตอบโจทย์ในเรื่องของการตอบสนองต่อการปรับเปลี่ยงานการทำงานได้อย่าง

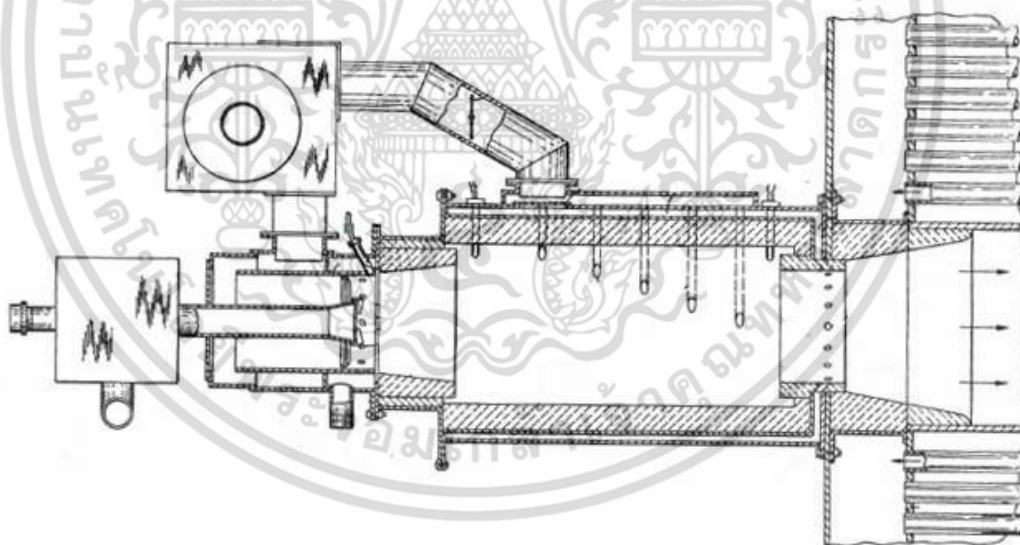
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวดเร็ว เนื่องจากกระแสหมุนวนของแก๊สร้อนภายในห้องเผาไหม้ช่วยมีความเร็วที่ค่อนข้างสูง จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนเกิดขึ้นในอัตราที่สูง ในขณะที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วยจะมีมวลของอากาศเย็นไหลเข้าอยู่ตลอดเวลา อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยไม่สูงมากนัก อัตราการแผ่รังสีความร้อนจึงเกิดขึ้นในปริมาณต่ำเมื่อเทียบกับการพาความร้อน (อัตราการแผ่รังสีความร้อนแปรผันตามกำลังสี่ของอุณหภูมิ) รวมถึงห้องเผาไหม้ช่วยเป็นห้องเผาไหม้ที่มีขนาดเล็ก อัตราการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนบริเวณเปลือกของห้องเผาไหม้ช่วยจึงค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับห้องเผาไหม้ขนาดใหญ่ จากข้อมูลข้างต้นทำให้ได้ข้อสรุปของการออกแบบหัวเผาดังนี้

1. ออกแบบหัวเผาไหม้ห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ซึ่งเป็นห้องที่ช่วยในการรักษาเสถียรภาพฐานของเปลวไฟ

2. แบ่งอากาศออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

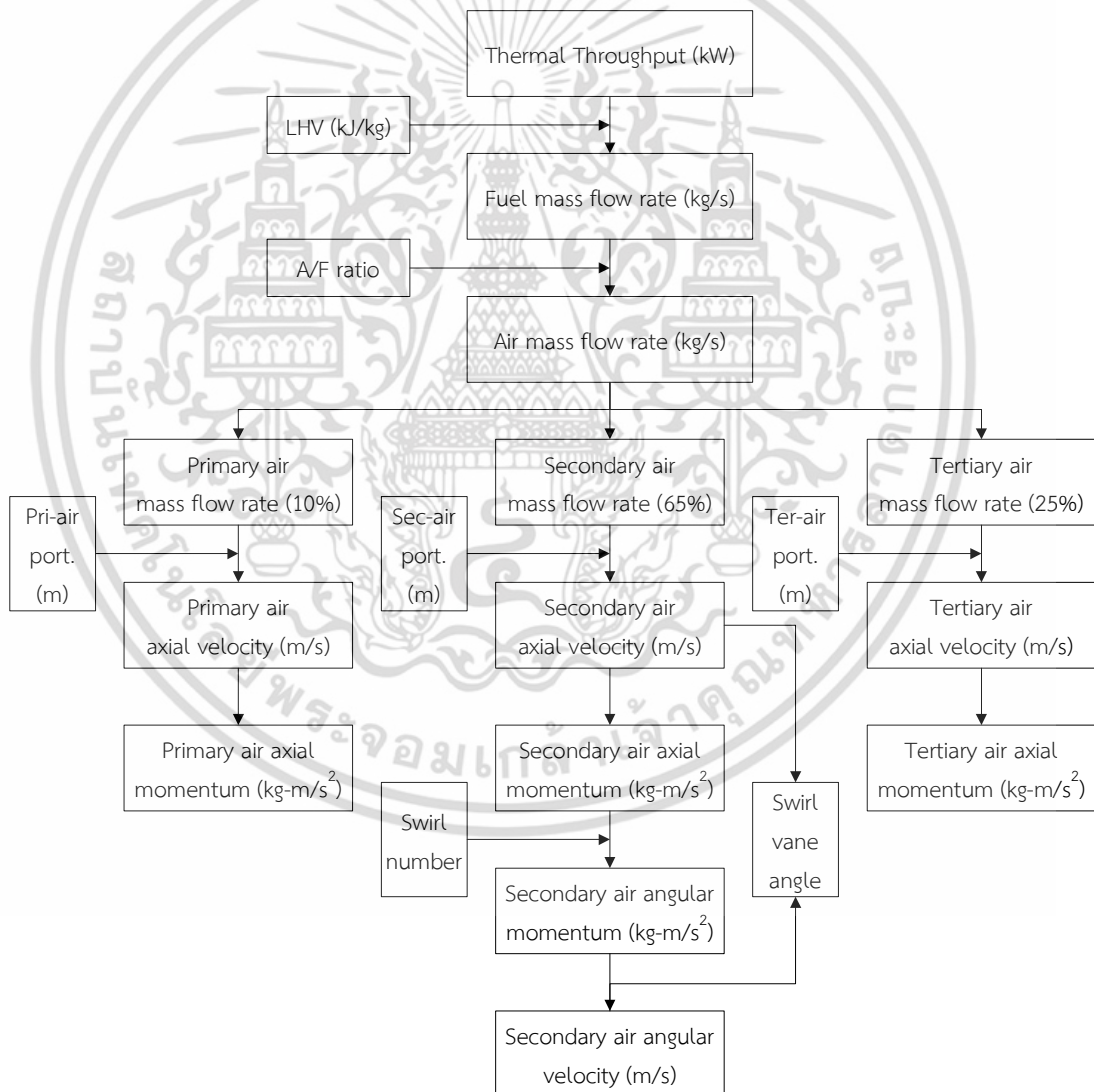
- อากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air) เป็นอากาศที่นำเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้
- อากาศส่วนที่สอง (secondary air) เป็นอากาศหลักที่ใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งจะออกแบบให้อากาศไหลผ่านใบพัด (swirl blades) ส่งผลให้อากาศส่วนนี้เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยในลักษณะที่มีการหมุนควง
- อากาศส่วนที่สาม (tertiary air) ทำหน้าที่หล่อเย็นห้องเผาไหม้ช่วย และเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ช่วย



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย [30]

#### 4.2.2 การคำนวณเพื่อการออกแบบ

จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ทราบถึง อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล และข้อสรุปของแนวคิดในการออกแบบหัวเผา เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 ขั้นตอนในการคำนวณเพื่อออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล พบว่าสิ่งแรกที่ต้องทราบคือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (LHV) และอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ซึ่งจะเป็นตัวแปรที่จะนำไปสู่การคำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้ รวมไปถึงการคำนวณขนาดของส่วนประกอบต่างๆของหัวเผา สำหรับการคำนวณในเบื้องต้นจะใช้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 4.1 และใช้ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.4 ซึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อให้ได้กำลังความร้อนที่ 1 MW จะได้ผลการคำนวณออกแบบดังตารางที่ 4.3 โดยที่แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการหาขนาด และปริมาณของห้องเผาไหม้ช่วยที่มีความเหมาะสม รายละเอียดดังแสดงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.3 ขั้นตอนในการคำนวณเพื่อออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

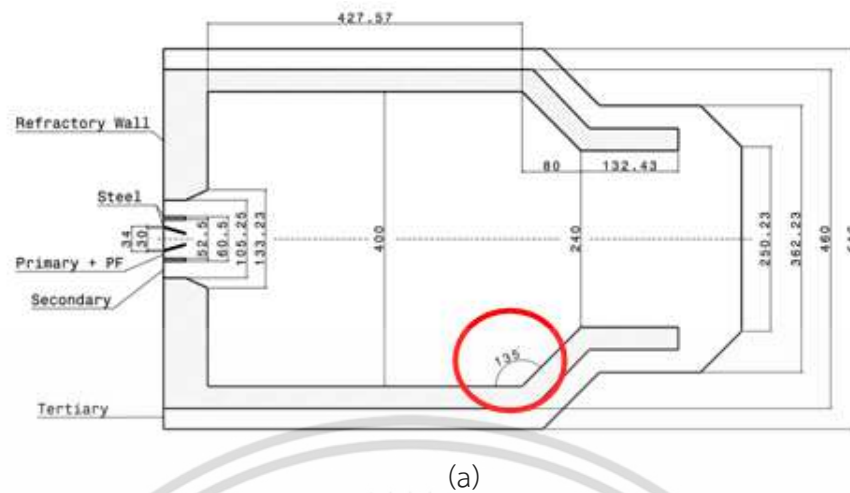
**ตารางที่ 4.3** ผลการคำนวณการออกแบบหัวเผาขนาด 1 MW ภายใต้สภาวะอากาศเกิน 30%

Fuel mass flow rate, kg/sec		0.06
Air flow rate, kg/sec		0.46
Air volume flow, m <sup>3</sup> /sec		0.40
พิจารณาที่ Primary Air	Pri. air volume flow, m <sup>3</sup> /sec	0.04
	Pri. air port, m <sup>2</sup>	9.40x10 <sup>-4</sup>
	Pri. Air axial Velocity, m/sec	42.63
	Pri. Air axial momentum, kg-m/s <sup>2</sup>	1.94
พิจารณาที่ Secondary Air	Sec. air volume flow, m <sup>3</sup> /sec	0.267
	Sec. air port, m <sup>2</sup>	0.011
	Sec. Air axial Velocity, m/sec	23.77
	Sec. air axial momentum, kg-m/s <sup>2</sup>	7.04
	Sec. air Angular momentum, kg-m/s <sup>2</sup>	7.26
	Sec. air Angular velocity, m/sec	24.48
	Swirl vane angle	50.8°
พิจารณาที่ Tertiary Air	Ter. air volume flow, m <sup>3</sup> /sec	0.10
	Ter. air port, m <sup>2</sup>	0.025
	Ter. air axial Velocity, m/sec	3.92
	Ter. air axial momentum, kg-m/s <sup>2</sup>	0.45

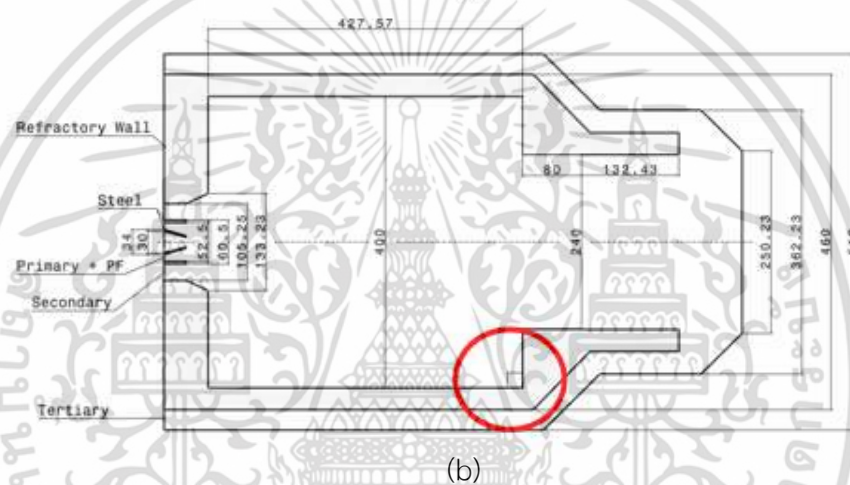
#### 4.2.3 การจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง [3]

หลังจากที่ได้ทำการคำนวณเพื่อออกแบบหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) จนได้ข้อมูลการออกแบบในเบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 4.3 สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงการนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง มาทำนายถึงความเป็นไปได้ในการเผาไหม้ และปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย จะส่งผลให้ได้มาซึ่งขนาด (dimension) ของหัวเผา และห้องเผาไหม้ รวมไปถึงค่าตัวแปรต่างๆที่จะนำไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ส่วนอื่นๆต่อไป

สำหรับการจำลองในเบื้องต้นได้รับความร่วมมือจาก ธนภัทร์ รักดีวรวงศ์ [3] ซึ่งเป็นหนึ่งในทีมวิจัย ได้นำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้ ที่ผ่านการจำลองเทียบเคียงกับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผงมาประยุกต์ใช้กับการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง สำหรับหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ขนาด 1 MW โดยได้ทำการเปรียบเทียบหัวเผาที่มีมุมผนังทางออกที่แตกต่างกันระหว่างมุม 135 องศา กับมุม 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



(a)



(b)

รูปที่ 4.4 ลักษณะของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (unit in mm.) (a) หัวเผาที่มีมุมผนังทางออก 135 องศา และ (b) หัวเผาที่มีมุมผนังทางออก 90 องศา

#### 4.2.3.1 เงื่อนไขในการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง [3]

สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่ถูกนำมาใช้ในการจำลองคือหญ้าเนเปียร์ คุณสมบัติของหญ้าเนเปียร์แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์เชื้อเพลิงโดย Thailand Institute of Scientific and Technological Research สำหรับเงื่อนไขในการจำลอง ได้แก่ การไหลกำหนดให้เป็นแบบสมมาตรรอบแนวแกน 2 มิติ (2D Axis Symmetric) ที่สภาวะคงตัว (Steady State) แบบจำลองการเผาไหม้ Species Transport และแบบจำลองการปั่นป่วน  $k-\epsilon$  Standard โดยมีการเพิ่มค่าคงที่ของอัตราการแพร่ออกซิเจนภายในพื้นผิวอนุภาคคาร์ ( $C_1$ ) และอัตราจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของคาร์ ( $C_2$ ) เพิ่มขึ้น 2.5 เท่าจากค่าเริ่มต้น และใช้แบบจำลองการติดตามแบบสุ่ม (Random Walk) ในขณะที่ขนาดของอนุภาค (Particle Size Distribution) และ Kinetic Parameters ได้ถูกกำหนดให้ใช้ในลักษณะเดียวกันกับกรณีถ่านหิน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.6 ตามลำดับ โดยเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการจำลองของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลถูกสรุปไว้ในตารางที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของถ่านหิน [3]

Particle Size Distribution ( $\mu\text{m}$ )	(% โดยน้ำหนัก)
0-10	15.0
10-25	25.0
25-40	20.0
40-75	20.0
>75	20.0

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขการจำลองสำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล [3]

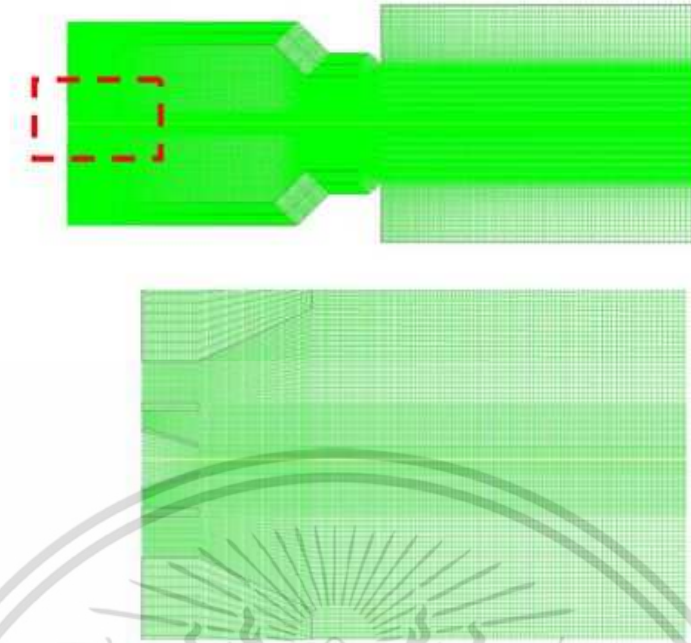
Primary pipe:	Air flow rate (kg/s)	$6.613 \times 10^{-2}$
	Swirl number	-
	อุณหภูมิ (K)	308
	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/s)	$5.807 \times 10^{-2}$
Secondary pipe:	Air flow rate (kg/s)	$2.645 \times 10^{-1}$
	Swirl number	1.03
	อุณหภูมิ (K)	308
Tertiary pipe:	Air flow rate (kg/s)	$1.102 \times 10^{-1}$
	Swirl number	-
	อุณหภูมิ (K)	308
อากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (%)		30

ตารางที่ 4.6 Kinetic Parameters สำหรับแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหิน [3]

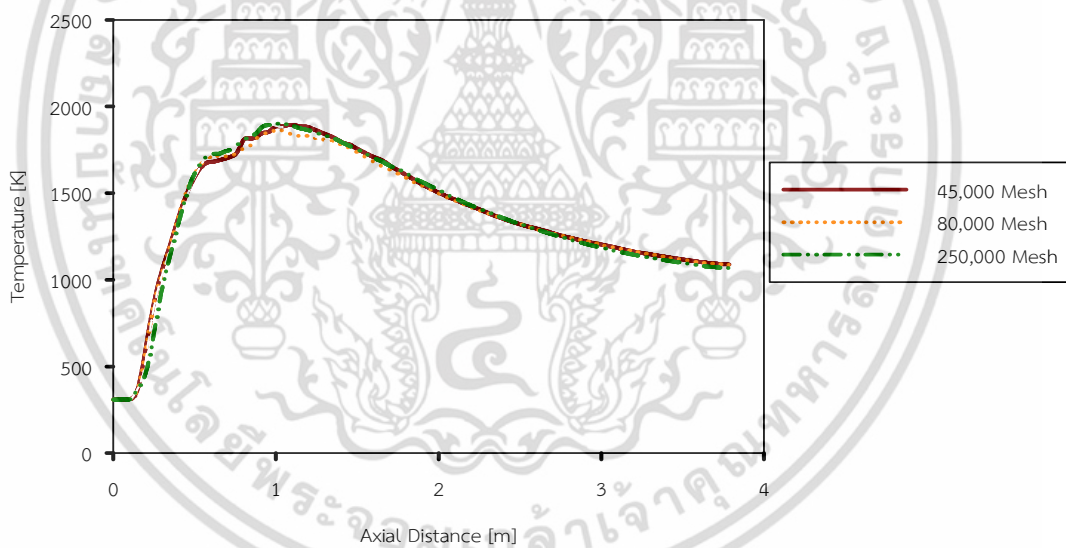
Kinetic parameters :	
Devolatilization, $E_{dvol}$ (J/kg-mol)	$7.40 \times 10^7$
Pre-Exponential Factor	$3.82 \times 10^5$
Char reaction, $E$ (J/kg-mol)	$7.90 \times 10^7$

#### 4.2.3.3 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการจำลอง

สำหรับกริดที่ใช้ในการจำลองนั้น จะมีความละเอียดประมาณ 45,000 และมีความละเอียดมากเป็นพิเศษที่บริเวณหัวเผา เนื่องจากบริเวณนี้เป็นจุดที่คาดว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลในอัตราที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งตัวเลขความละเอียดดังกล่าว เคยผ่านการพิสูจน์โดยทำการเปรียบเทียบกับกริดที่มีความละเอียดประมาณ 250,000 ก่อนหน้านี้แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยให้ผลของการจำลองที่ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงได้ใช้กริดที่มีความละเอียดเท่ากับ 45,000 ในการจำลอง เพื่อที่จะลดระยะเวลาในการคำนวณ



รูปที่ 4.5 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

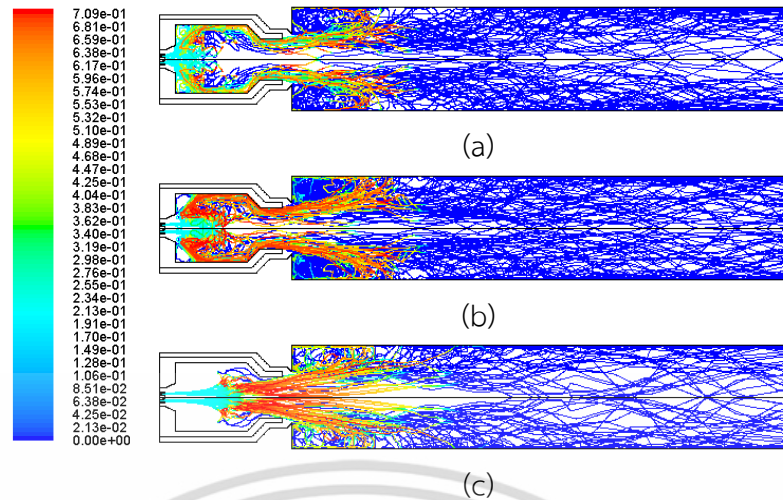


รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์จำนวนกริดที่เหมาะสมโดยพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนว Axial ของเตาเผา

#### 4.2.3.4 ผลการจำลองของหัวเผาที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 135 และ 90 องศา

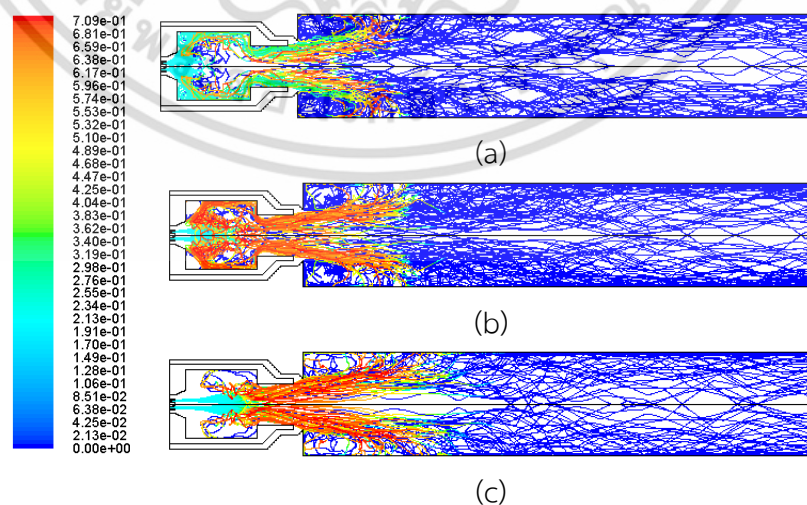
จากผลการจำลองของหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 องศา พบว่าหัวเผาไม่สามารถคงความเสถียรภายในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการเป่าดับ เนื่องจากระยะเวลาการเผาไหม้ และการฟุ้งกระจายของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้อาจจะน้อยเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จึงทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงหลุดลอยออกจากช่วงที่มีการผสมผสานกันระหว่างการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุทำให้ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิจุดติด (Ignition) เอาไว้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



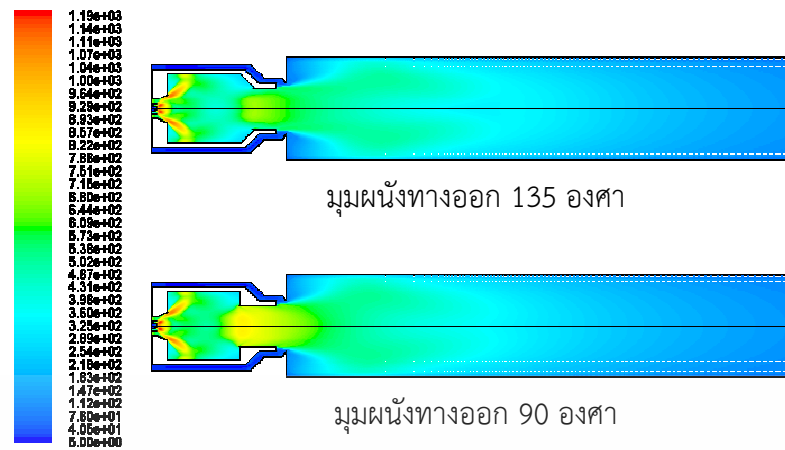
รูปที่ 4.7 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคซาร์ (มุมผนัง  $135^\circ$ ); (a) อนุภาคขนาดเล็ก 10 - 30, (b) กลาง 40 - 70 และ (c) ใหญ่ 80 - 100 ไมครอน

หลังจากที่ทราบถึงสาเหตุของปรากฏการณ์การเป่าดับ จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนมุมของผนังบริเวณทางออกเป็น  $90^\circ$  องศา โดยหวังว่าจะเป็นการเพิ่มการฟุ้งกระจายของอนุภาค และระยะเวลาในการเผาไหม้ ซึ่งผลก็ปรากฏว่าหัวเผาที่มุมผนังดังกล่าวสามารถรักษาความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้โดยไม่มีเกิดการปรากฏการณ์การเป่าดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปที่ 4.7 กับรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงเส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคซาร์ระหว่างการเผาไหม้สำหรับหัวเผาท้องเผาไหม้ช่วยที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก  $135^\circ$  และ  $90^\circ$  องศาตามลำดับ โดยที่สังเกตเห็นว่าทั้งสองรูปมีการกระจายตัวของอนุภาคบริเวณ IRZ และ ERZ ภายในห้องเผาไหม้ แต่จะพบว่าผนัง  $90^\circ$  องศาจะเป็นตัวขวางกั้นให้อนุภาคขนาดใหญ่มีการฟุ้งกระจายภายในเตามากกว่ากรณีมุมผนัง  $135^\circ$  องศา ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นของความปั่นป่วน พบว่าห้องเผาไหม้ช่วยที่มีผนังทางออก  $90^\circ$  องศาจะมีความเข้มข้นของความปั่นป่วนสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน



รูปที่ 4.8 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคซาร์ (มุมผนัง  $90^\circ$ ); (a) อนุภาคขนาดเล็ก 10 - 30, (b) กลาง 40 - 70 และ (c) ใหญ่ 80 - 100 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นของความปั่นป่วน

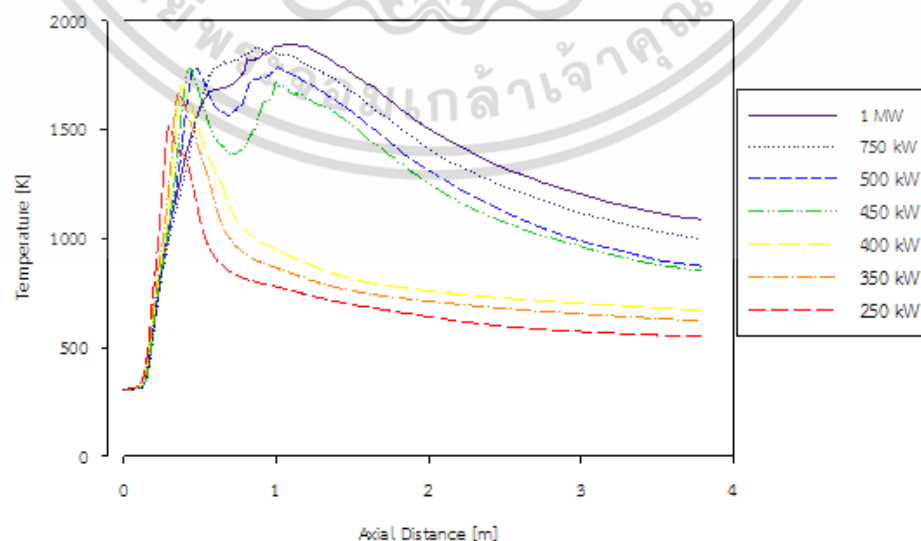
#### 4.2.4 การจำลองย่านการทำงานของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา

##### 4.2.4.1 ผลการจำลองย่านการทำงานของหัวเผา

จากผลการจำลองในหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าหัวเผาห้องเผาไหม้ช่วย ขนาด 1 MW ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา สามารถรักษาเสถียรภาพของการเผาไหม้ไว้ได้ โดยไม่เกิดปรากฏการณ์เป่าดับ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการจำลองเพื่อหาย่านการทำงานที่มีความเหมาะสมกับหัวเผาดังกล่าว โดยใช้เงื่อนไขการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ

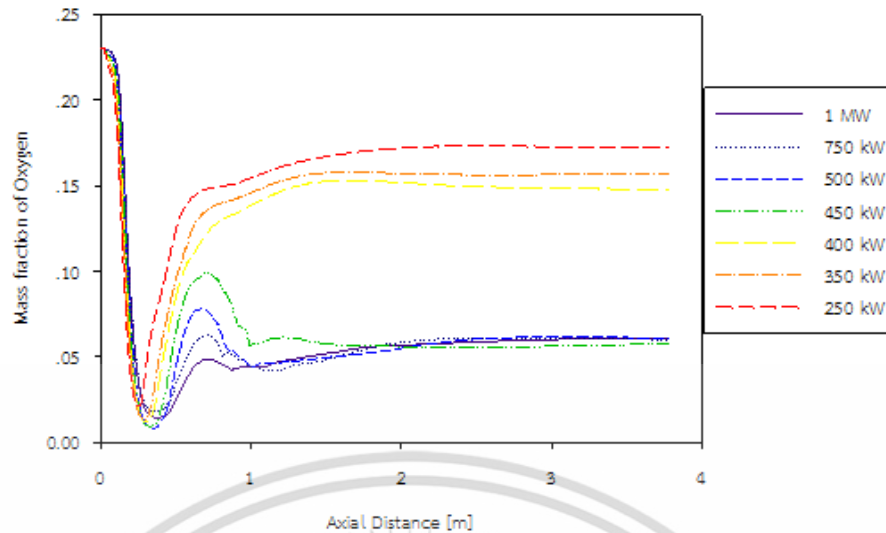
4.2.3.1 ซึ่งจะทำการจำลองที่ค่ากำลังความร้อนจากการเผาไหม้ในช่วง 250 kW จนถึง 1.25 MW

จากรูปที่ 4.10 - 4.12 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ การกระจายตัวของความเข้มข้นของออกซิเจน และการกระจายตัวของสารระเหยตามแนวแกนของเตาเผาตามลำดับ ซึ่งจากรูปทั้งสามจะสังเกตเห็นพฤติกรรมการเผาไหม้เป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นการเผาไหม้ในช่วง 450 kW ถึง 1 MW และกลุ่มที่สองในช่วง 250 kW ถึง 400 kW

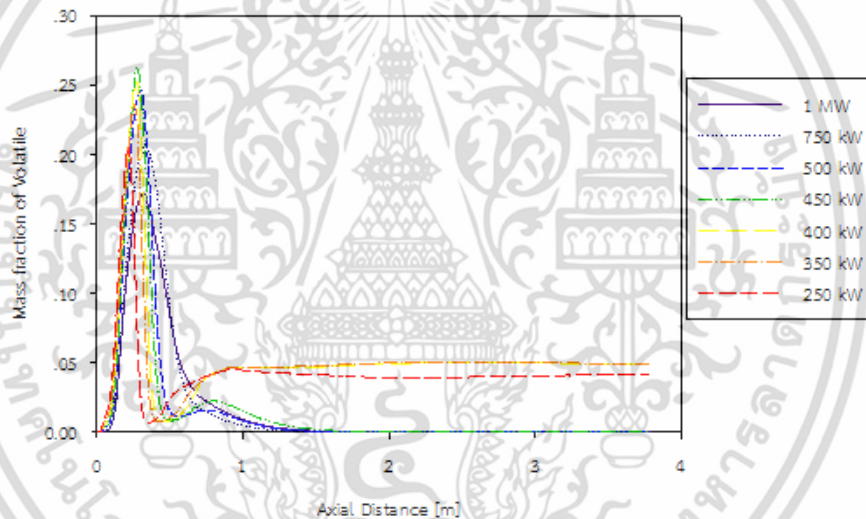


รูปที่ 4.10 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



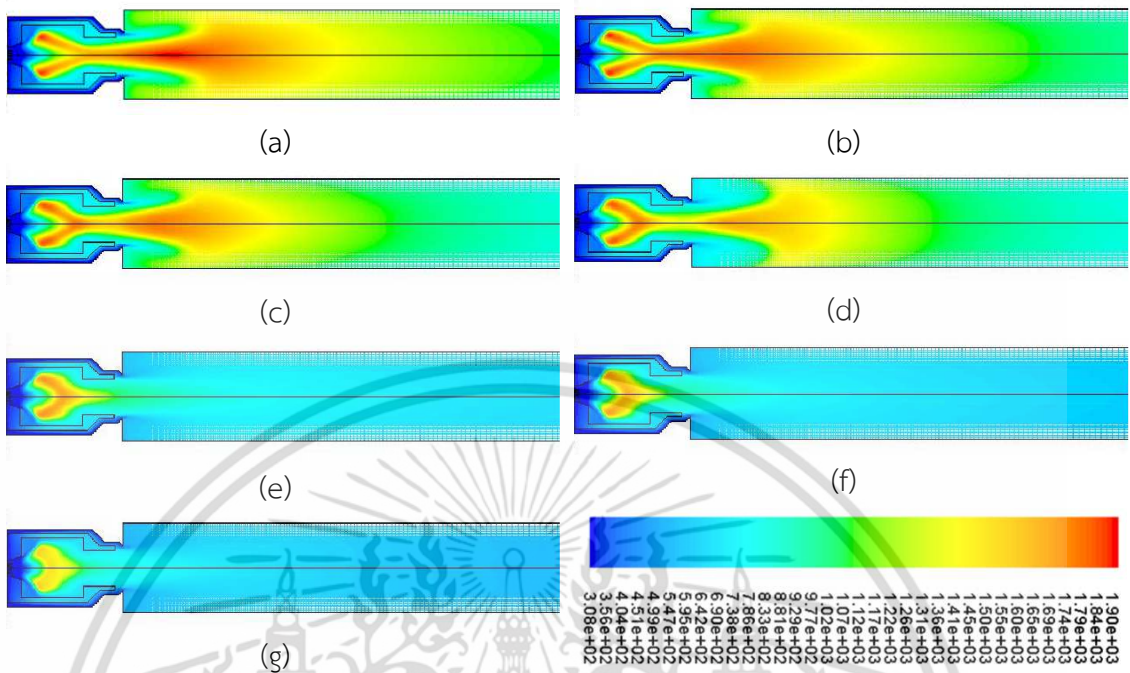
รูปที่ 4.11 ลักษณะการกระจายตัวของความเข้มข้นของออกซิเจนตามแนวแกนของเตาเผา



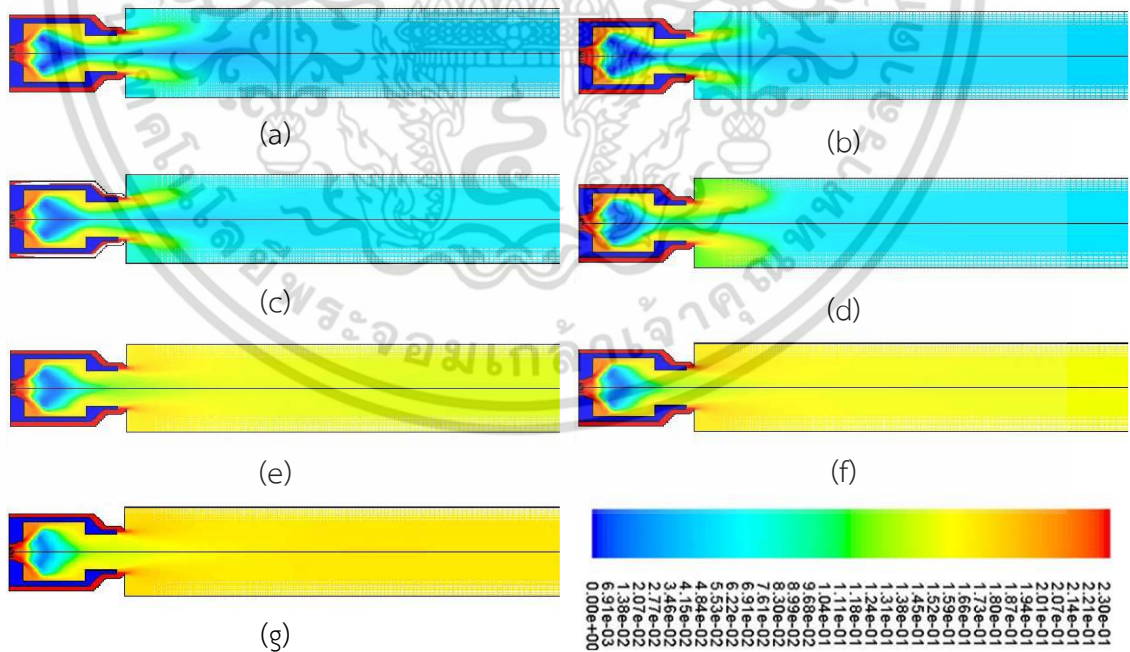
รูปที่ 4.12 ลักษณะการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหยตามแนวแกนของเตาเผา

กลุ่มที่หนึ่งในช่วง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของเปลวไฟที่ 1 MW จะมีค่าสูงที่สุด ในขณะที่สภาวะ 450 kW จะให้อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดในกลุ่ม ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน และสารระเหย เมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงการเผาไหม้ยิ่งเกิดความร้อนแรงมากขึ้น ดังนั้นปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนและสารระเหยที่สภาวะ 1 MW จึงมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่นๆในกลุ่ม เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ จะพบว่าการเผาไหม้ในเตาจะเกิดขึ้นสองช่วง การเผาไหม้ช่วงแรกจะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ช่วย ในขณะที่จะมีอนุภาคของเชื้อเพลิงบางส่วนถูกอิทธิพลของอากาศที่หมุนควงเหวี่ยงไปชนกับผนังของห้องเผาไหม้ช่วย และวิ่งขนานกับผนังออกไป ส่งผลให้อนุภาคส่วนนี้จึงไม่ได้รับการเผาไหม้ในช่วงดังกล่าว ในส่วนของการเผาไหม้ช่วงที่สองจะเกิดขึ้นในบริเวณส่วนต้นของท่อไฟใหญ่ ซึ่งอนุภาคเชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ในช่วงแรกจะถูกเผาไหม้ในบริเวณนี้จนหมด ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของสารระเหยที่ลดลงจนหมดหลังจากผ่านบริเวณนี้ไป ซึ่งถือได้ว่าพฤติกรรมการเผาไหม้ของกลุ่มนี้เป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

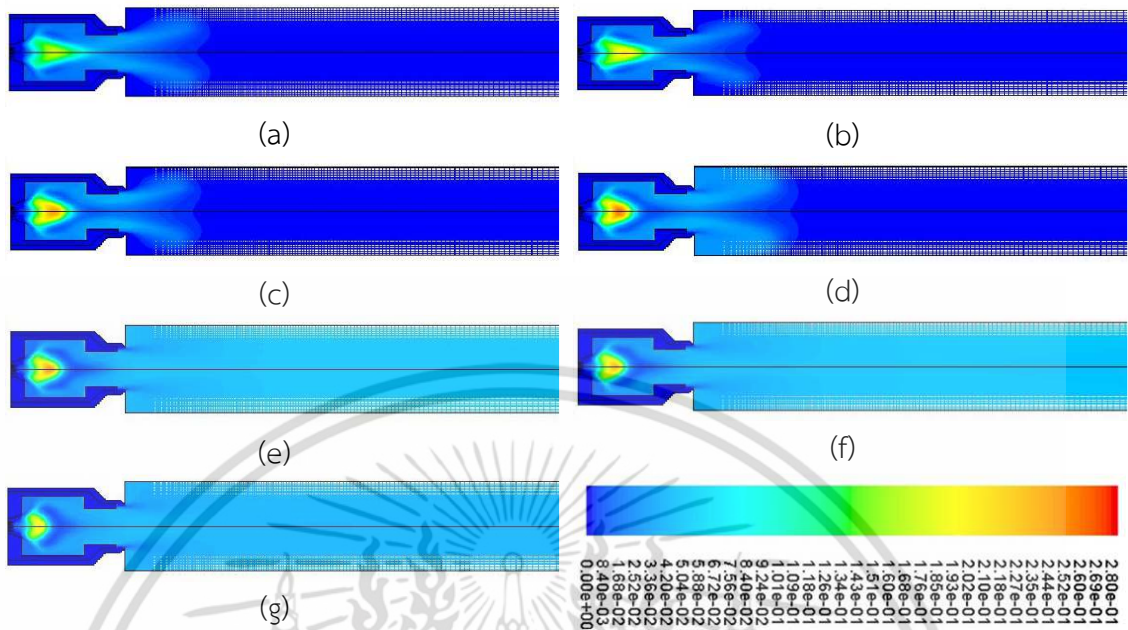


รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของอุณหภูมิ [K] (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW

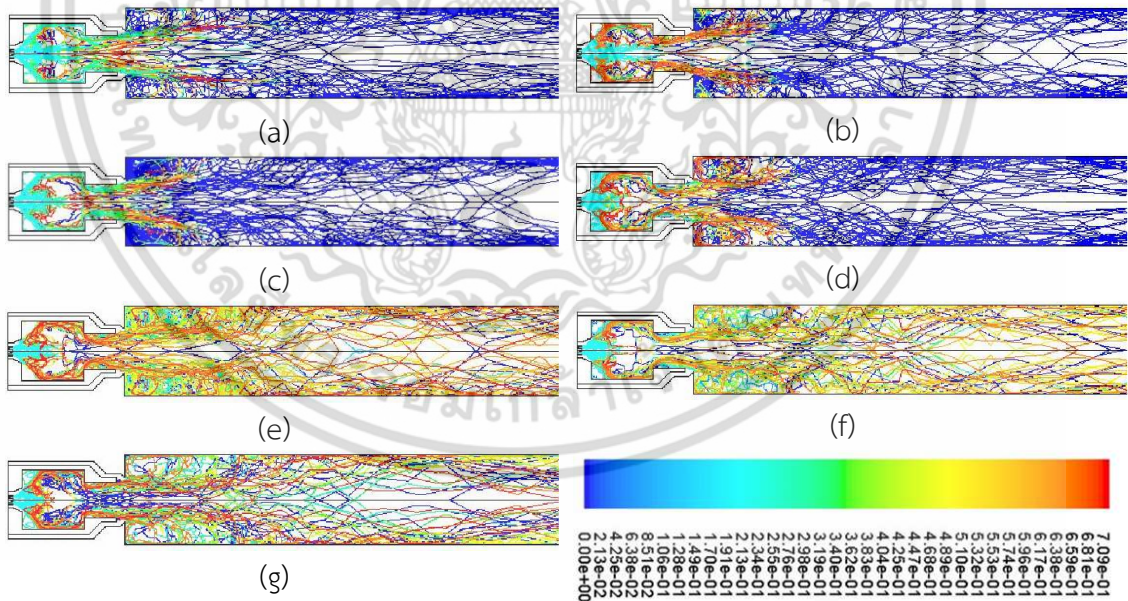


รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของความเข้มข้นออกซิเจน (Mass Fraction) (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย (Mass Fraction) (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW



รูปที่ 4.16 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของชาร์ (Particle Char Fraction) (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการพิจารณาการเผาไหม้ของกลุ่มที่สองจะเป็นการเผาไหม้ที่สภาวะ 250 kW ถึง 400 kW ซึ่งอุณหภูมิของการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกลุ่มแรก เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ จะพบว่าการเผาไหม้จะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ช่วยเพียงช่วงเดียว ส่งผลให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่ถูกอิทธิพลของอากาศหมุนควงเหวี่ยงไปชนกับผนังของห้องเผาไหม้ช่วยจะไม่ได้รับการเผาไหม้ จึงทำให้มีปริมาณสารระเหยหลงเหลืออยู่ ดังนั้นอาจถือได้ว่าพฤติกรรมการเผาไหม้ของกลุ่มนี้เป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.16 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของชาร์ (Particle Char Fraction) พบว่าที่สภาวะ 1 MW, 750 kW, 500 kW และ 450 kW อนุภาคชาร์จะถูกเผาไหม้จนหมด ในขณะที่สภาวะ 400 kW 350 kW และ 250 kW นั้นจะเหลืออนุภาคชาร์ที่ไม่ได้รับการเผาไหม้หลงเหลืออยู่พอสมควร ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิงที่ถูกอิทธิพลของ swirl เหวี่ยงไปชนกับผนังของห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำจึงไม่ได้รับการเผาไหม้ ซึ่งเป็นเหตุผลที่สอดคล้องกับปริมาณสารระเหยที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้น นอกจากนี้เมื่อทำการจำลองการเผาไหม้ที่สภาวะ 1.25 kW พบว่าหัวเผาไม่สามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์การเป่าดับ (Blow-Off) ในลักษณะเช่นเดียวกับกรณี ของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วยที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 องศาเนื่องจากความเร็วก๊าซสูงเกินไปภายในห้องเผาไหม้ จึงทำให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงหลุดลอยออกจากบริเวณที่ต้องการให้มีการผสมผสานกันระหว่างการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมินั้นไม่อาจรักษาการจุดติด (Ignition) ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ลักษณะดังกล่าว

#### 4.2.4.2 สรุปผลการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

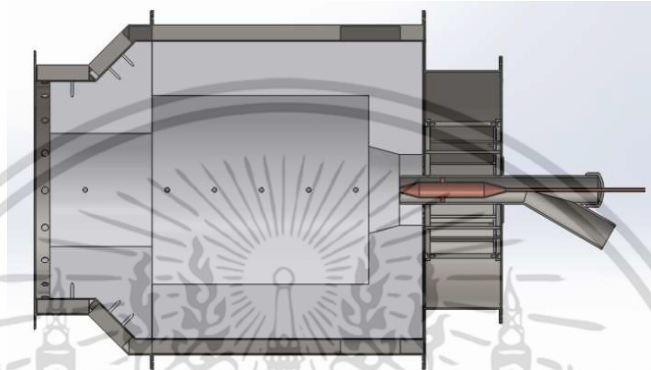
จากผลการจำลองสำหรับหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วยที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา สามารถทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคมากขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย เนื่องจากผนัง บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ช่วยได้กั้นขวางเส้นทางเดินของอนุภาคได้บางส่วน จึงเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิบางส่วนมีเส้นทางเดินแบบย้อนกลับและมีระยะเวลาในการเดินทางของอนุภาคมากขึ้น จึงทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ (residence time) ภายในห้องเผาไหม้ช่วยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็วภายในห้องเผาไหม้ช่วย และทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิสูงขึ้นในบริเวณนี้เท่ากับ 1894 K ในทำนองเดียวกันนั้นสามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้โดยไม่มีการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ เมื่อทำการศึกษาเพื่อหาขนาดการทำงานที่เหมาะสมสำหรับหัวเผาที่ทำการศึกษา จากผลการจำลองพบว่าหัวเผานี้มีขนาดการทำงานอยู่ระหว่าง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งจะเป็นช่วงที่หัวเผาสามารถรักษาเสถียรภาพในการเผาไหม้ และให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งหากเพิ่มกำลังความร้อนจากการเผาให้สูงกว่า 1 MW จะเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ แต่หากลดกำลังความร้อนจนต่ำกว่า 450 kW จะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้มีอนุภาคชาร์และสารระเหยหลงเหลือ ซึ่งถือเป็นการทิ้งพลังงานในส่วนดังกล่าวไปโดยไร้ประโยชน์

จากที่ผ่านมามาดูจะเห็นว่าทางทีมีวิจัยทำการพัฒนาหัวเผาโดยใช้เชื้อเพลิง 2 ชนิด คือ ถ่านหินกับหญ้าเนเปียร์ โดยใช้ผลการจำลองการเผาไหม้ถ่านหิน และหญ้าเนเปียร์ที่มีข้อมูลมาจาก [3] ดังนั้นต้นแบบหัวเผาที่จะทำการผลิตขึ้น จะต้องได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถเผาไหม้ได้ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองหรือไม่ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงที่จะนำมาทดสอบ ซึ่งในอนาคตต้องมีการปรับปรุงคุณลักษณะของเชื้อเพลิงในแบบจำลองอีกครั้ง หลังจากที่ได้ทำการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 รายละเอียดแบบสิ่งผลิต (Details Drawing) สำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

หลังจากที่ทำการคำนวณเพื่อออกแบบ และทำการจำลองเพื่อทำนายปรากฏการณ์ แนวโน้ม หรือความเป็นไปได้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงของหัวเผา รวมไปถึงสมรรถนะ และย่านการทำงานที่มีความเหมาะสมกับหัวเผา จนได้ผลที่หน้าพอใจแล้ว ลำดับต่อไปจะขั้นตอนของการเขียนแบบสำหรับสิ่งผลิตหัวเผาดังกล่าว โดยที่การเขียนแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงกระบวนการผลิต ชิ้นส่วนมาตรฐานในตลาดอุตสาหกรรมของประเทศ ต้องให้รายละเอียดที่มีถูกต้อง และความชัดเจน และนอกจากนี้ในการออกแบบยังต้องคำนึงถึงความสะดวกในการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนต่างๆของหัวเผาอีกด้วย



รูปที่ 4.17 แสดงภาพตัดของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber)



รูปที่ 4.18 ส่วนประกอบของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ลักษณะของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) พบว่าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลักๆ 8 ชิ้นด้วยกัน ดังนี้

1. Burner Nozzle Jacket คือ ชิ้นส่วนที่ใช้เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างหัวเผา (burner) กับเตาเผา ซึ่งตรงส่วนนี้จะมีครีปที่เป็นตัวรับน้ำหนักของปูนทนไฟ และคอยช่วยกำหนดทิศทางของอากาศส่วนที่สามติดอยู่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Refractory Nozzle Sheet คือ แบบสำหรับการหล่อปูนทนไฟบริเวณทางออกของหัวเผา ซึ่งผนังทางออก 90 องศาจะติดอยู่กับชิ้นส่วนนี้

3. Burner Main Jacket คือ ช่องทางเข้าของอากาศส่วนที่สาม ซึ่งภายในจะมีครีปที่เป็นตัวรับน้ำหนักของปูนทนไฟ และคอยควบคุมทิศทางการไหลติดอยู่

4. Main Refractory Wall ทำหน้าที่เป็นเปลือกของห้องเผาไหม้ช่วย และเป็นแบบสำหรับหล่อผนังปูนทนไฟ

5. Swirl Box คือ ช่องทางเข้าของอากาศส่วนที่สอง ก่อนจะป้อนเข้าสู่ Swirl Unit

6. Swirl Unit คือ อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยแผ่นใบพัด และกลไกปรับมุมของใบพัด เพื่อช่วยให้อากาศส่วนที่สองเกิดการหมุนควงก่อนเข้าห้องเผาไหม้ช่วย

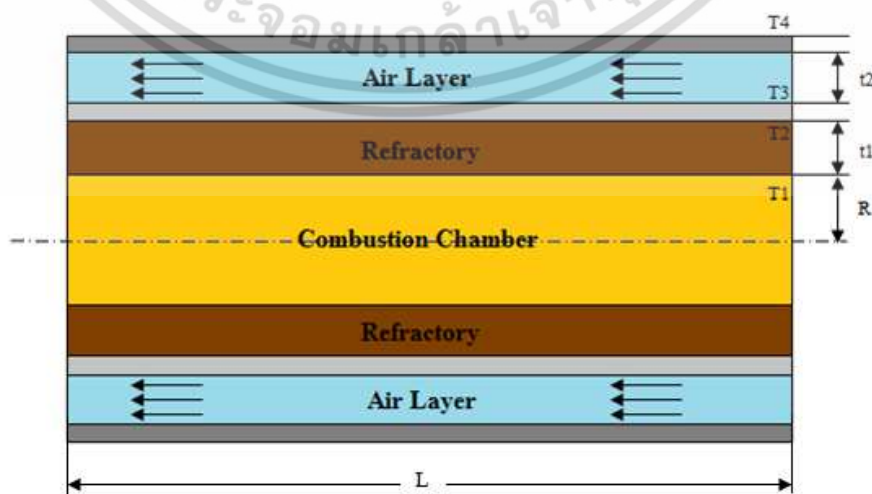
7. End Plate คือแผ่นปิด Swirl Box

8. Pulverized Nozzle คือ หัวฉีดเชื้อเพลิงฝุ่นชีวมวล

ซึ่งการแยกส่วนประกอบของหัวเผาเป็นหลายชิ้นก็เพื่อให้ง่ายต่อการสร้าง การประกอบ และการบำรุงรักษา รวมไปถึงการปรับปรุงชิ้นส่วนต่างๆสำหรับการทดลองในอนาคต เช่น มุมทางออกของอากาศส่วนที่สามที่สามารถเปลี่ยนได้โดยการทำชิ้นส่วนหมายเลข 2 ให้มีมุมเปลี่ยนไป เป็นต้น

#### 4.2.6 การคำนวณความหนาของผนังห้องเผาไหม้ช่วย

ผนังปูนทนไฟของห้องเผาไหม้ช่วย นั้นเป็นส่วนที่ช่วยเก็บความร้อน และแผ่รังสีความร้อนให้กับอนุภาคเชื้อเพลิงผงที่ถูกพ่นเข้ามาให้ห้องเผาไหม้ ซึ่งจะเป็นตัวช่วยในการรักษาเสถียรภาพฐานของเปลวไฟเอาไว้ด้วย นอกจากนี้ผนังปูนทนไฟยังเปรียบเสมือนเป็นฉนวนกันความร้อนที่ห่อหุ้มห้องเผาไหม้เอาไว้ โดยการหุ้มฉนวนนั้นหากทำการหุ้มฉนวนที่มีความหนามากเกินไปจะส่งผลให้หัวเผามีพื้นที่ผิวด้านนอกที่มากขึ้น การสูญเสียความร้อนให้กับบรรยากาศก็จะมีมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการหล่อผนังปูนทนไฟควรคำนวณความหนาให้มีความเหมาะสม เพื่อเป็นการลดการสูญเสียความร้อน และเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการขึ้นรูปชิ้นงานอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.19 จะพบว่าผนังของห้องเผาไหม้ช่วยจะแบ่งออกเป็น 4 ชั้น (layer) ประกอบด้วยชั้นของปูนทนไฟ (refractory wall) ชั้นของ stainless steel ซึ่งเป็นเสื้อของปูนทนไฟ ชั้นของอากาศส่วนที่ 3 และชั้นของเหล็กซึ่งเป็นเปลือกนอกสุดของห้องเผาไหม้ช่วย โดยรูปที่ 4.20 แสดงวิธีการคำนวณเพื่อหาค่าความหนาของผนังปูนทนไฟ



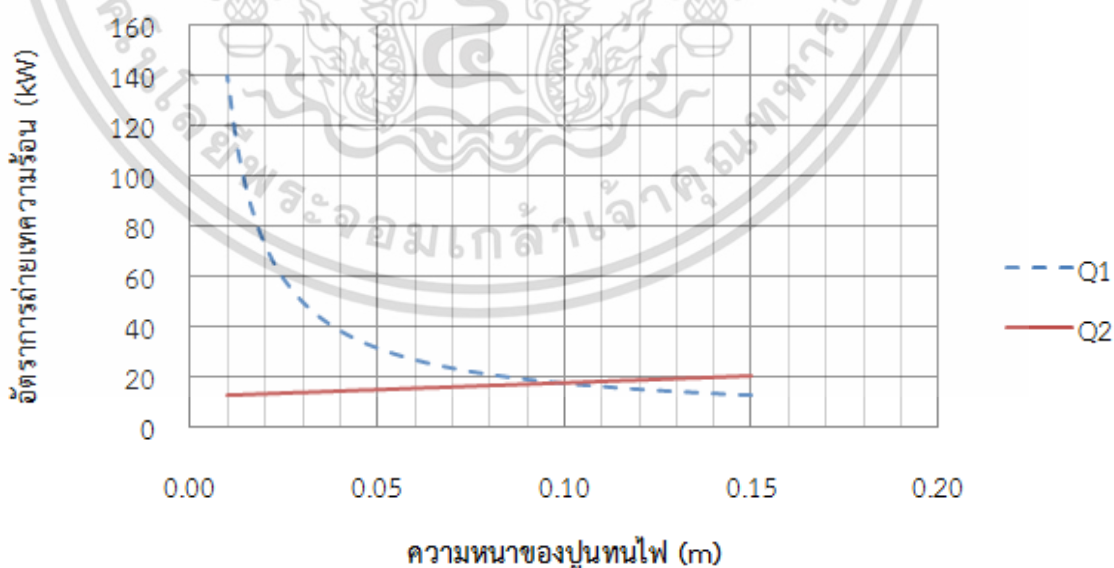
รูปที่ 4.20 การคำนวณหาความหนาผนังปูนของห้องเผาไหม้ช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่าตัวแปรควบคุมที่ใช้คำนวณหาความหนาของผนังห้องเผาไหม้ช่วย

Parameter	Value	Units
Chamber Radiance (R)	0.200	m
Air Layer Distance ( $t_2$ )	0.030	m
Stainless Steel Layer Distance	0.003	m
Steel Layer Distance	0.003	m
Chamber Length (L)	0.460	m
Combustion Temperature ( $T_1$ )	1500	$^{\circ}\text{C}$
Outside Brick Temperature ( $T_2$ )	150	$^{\circ}\text{C}$
Outside Stainless Steel Layer Temperature ( $T_3$ )	146	$^{\circ}\text{C}$
Outside Steel Layer Temperature ( $T_4$ )	100	$^{\circ}\text{C}$
Air Temperature ( $T_{\text{air}}$ )	40	$^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity of Refractory Brick @ $1200^{\circ}\text{C}$	1.800	$\text{W/m.}^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity of Stainless Steel	15	$\text{W/m.}^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity of Steel	60	$\text{W/m.}^{\circ}\text{C}$

ในกรณีที่ผนังห้องเผาไหม้ช่วยมีหลายชั้น ดังนั้นความร้อนจึงต้องไหลผ่านวัสดุทีละชั้น ความต้านทานทางความร้อนจึงเป็นการต่อแบบอนุกรม อัตราการถ่ายเทความร้อนในแต่ละชั้นของผนังจึงมีค่าเท่ากัน เมื่อทำการคำนวณตามขั้นตอนดังรูปที่ 4.21 โดยแทนค่าตัวแปรในตารางที่ 4.7 จะได้ผลการคำนวณดังนี้



รูปที่ 4.21 ผลการคำนวณหาความหนาผนังปูนทนไฟของห้องเผาไหม้ช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 4.21 ผลการคำนวณหาความหนาของผนังห้องเผาไหม้ช่วย จะพบว่าความหนาของปูนทนไฟที่ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังปูนทนไฟ (Q1) เท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง stainless steel (Q2) จะมีค่าประมาณ 0.1 m ซึ่งเป็นจุดที่กราฟของทั้งสองสมการมาตัดกันนั่นเอง แต่เมื่อทำการสำรวจขนาดมาตรฐานของอิฐทนไฟที่มีจำหน่ายในประเทศจะไม่มีขนาดดังกล่าว ดังนั้นจึงต้องทำการเลือกใช้นิยามมาตรฐานของอิฐทนไฟที่มีความใกล้เคียงกับการคำนวณที่สุด นั่นคืออิฐขนาด 115 mm. นั่นเอง

เมื่อทำการคำนวณเพื่อออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย จนได้ผลการคำนวณ และขนาดต่างๆที่เป็นที่น่าพอใจแล้ว ลำดับต่อไปจะเข้าสู่ขั้นตอนการเขียนแบบสิ่งผลิตและสิ่งขึ้นรูปหัวเผาต่อไป ซึ่งแบบสิ่งผลิตของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นแสดงในภาคผนวก ก1

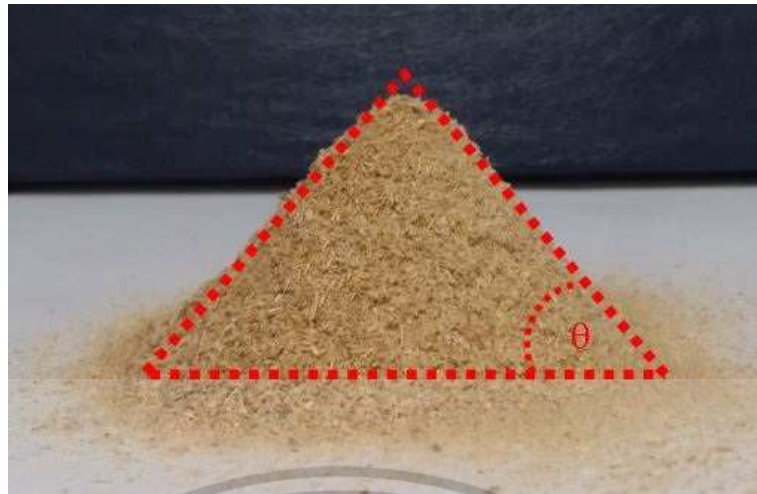
### 4.3 การออกแบบระบบป้อนเชื้อเพลิง

จากที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้ว นอกเหนือจากหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแล้ว ทางทีมีวิจัยภายใต้ความร่วมมือของนักศึกษาปริญญาตรี [26] จะต้องออกแบบระบบสนับสนุนการเผาไหม้ เพื่อให้ระบบสามารถทำการทดสอบได้ ซึ่งรูปแบบของชุดทดสอบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.1 สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบป้อนเชื้อเพลิง ซึ่งการออกแบบระบบนั้นควรจะออกแบบให้มีความเหมาะสมกับชนิดของเชื้อเพลิงที่จะใช้ ซึ่งในที่นี้คือเชื้อเพลิงชีวมวลผง โดยแนวคิดในการออกแบบจะเป็นการสร้างระบบโดยใช้ ไฮโคลน ถังพักเชื้อเพลิง (hopper) สกรูลำเลียง และการขนถ่ายด้วยลม มาประยุกต์รวมกันในการออกแบบครั้งนี้ เพื่อให้สามารถป้อนระบบเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง โดยขอบเขตของการออกแบบประกอบไปด้วย

1. ระบบป้อนเชื้อเพลิงจะใช้กับชีวมวลแบบผง
2. ทำการออกแบบสร้างระบบป้อนเชื้อเพลิงผงเข้าสู่เตาเผาไหม้ชีวมวลในอัตราการไหลเชิงมวลอยู่ที่ประมาณ 0.942 - 3.78 kg/min ซึ่งเมื่อนำไปเผาไหม้จะเทียบเป็นกำลังความร้อนเท่ากับ 250 kW ถึง 1 MW นั่นเอง
3. ถังพักเชื้อเพลิง (hopper) ที่ใช้เก็บเชื้อเพลิง จะต้องสามารถสำรองเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการเผาไหม้ (ที่กำลังความร้อน 1 MW) ได้อย่างต่อเนื่อง 30 นาที

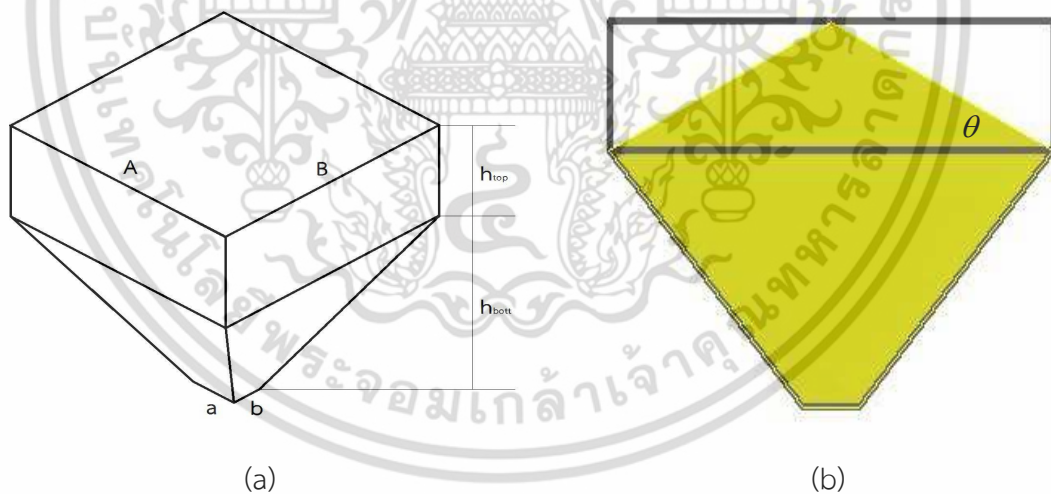
#### 4.3.1 การออกแบบถังพักเชื้อเพลิง

ในการออกแบบถังพักเชื้อเพลิงนั้น มีหลายปัจจัยที่ต้องทำการพิจารณาก่อนทำการออกแบบ ไม่ว่าจะเป็นปริมาตรที่ต้องการ สมบัติของวัสดุ ความหนาแน่น และมุมกองของวัสดุ เป็นต้น สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ใช้ในการทดสอบการเผาไหม้จะมีความหนาแน่นประมาณ  $232 \text{ kg/m}^3$  และมีค่าความร้อน (LHV) ประมาณ 15.8 MJ/kg โดยจากขอบเขตที่กำหนดไว้ในข้างต้น อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงสูงสุดจะอยู่ที่ 3.78 kg/min และต้องสำรองเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบการเผาไหม้เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 30 นาที นั่นคือจะต้องจัดเก็บเชื้อเพลิงจำนวน 113.4 kg ดังนั้นถังพักเชื้อเพลิงจะต้องมีปริมาตรอย่างน้อย  $0.489 \text{ m}^3$



รูปที่ 4.22 มุมกองของวัสดุ

มวลวัสดุเมื่อถูกเทออกจากภาชนะบรรจุก็จะเกิดการเลื่อนไหลกลายเป็นกองวัสดุตามธรรมชาติ มุมที่พื้นผิวของวัสดุกระทำกับพื้นราบจะ เรียกว่า มุมกองวัสดุ (angle of repose) ซึ่งมุมกองวัสดุนี้จะสามารถบอกถึงคุณสมบัติในการไหลของวัสดุ สามารถนำไปคำนวณหาปริมาตรของวัสดุที่อยู่บนอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ และในถังเก็บวัสดุได้อีกด้วย เมื่อพิจารณารูปที่ 4.22 แสดงมุมกองของกลุ่มตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลผง ซึ่งจากรูปจะพบว่าเชื้อเพลิงดังกล่าวจะมีมุมกองของวัสดุ ( $\theta$ ) อยู่ที่ประมาณ 50 องศา ซึ่งมุมนี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณปริมาตรถังพักเชื้อเพลิงต่อไป



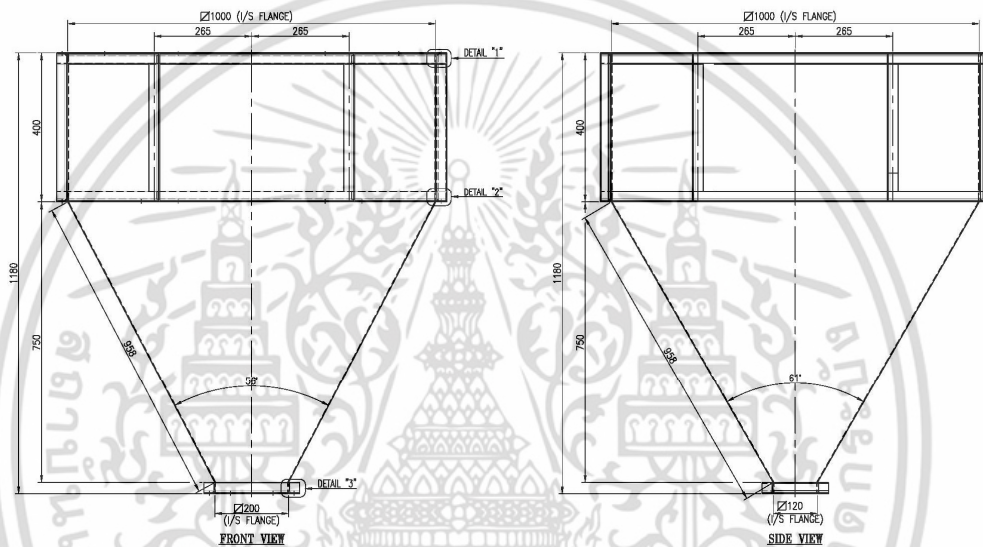
รูปที่ 4.23 ลักษณะของถังพักเชื้อเพลิง (hopper) ; (a) ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณขนาด (b) ลักษณะการกองของเชื้อเพลิงที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในถังพัก (hopper)

จากรูปที่ 4.23 กำหนดให้หน้าตัดของช่องทางเข้าเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ระยะ A และ B เท่ากับ 1 เมตร และกำหนดระยะช่องทางออก a และ b ให้เท่ากับ 0.2 และ 0.12 เมตร ตามลำดับ จากนั้นใช้หลักการพื้นฐานทางเลขาคณิตของรูปทรงพีระมิดปลายตัดในการคำนวณหาความสูงของถังพักเชื้อเพลิง ซึ่งการคำนวณจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขของมุมกองของวัสดุ และปริมาตรที่ต้องการ (การคำนวณโดยละเอียดสามารถศึกษาได้จาก แหล่งอ้างอิงที่ [24]) จะได้ขนาดของถังพักเชื้อเพลิงดังแสดง

เอกสารนี้ในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.24 ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณขนาดถังพักเชื้อเพลิง (hopper)

Parameter	Value	Units
ความกว้างของช่องทางเข้าของเชื้อเพลิง (A)	1,000	mm.
ความยาวของช่องทางเข้าของเชื้อเพลิง (B)	1,000	mm.
ความกว้างของช่องทางออกของเชื้อเพลิง (a)	200	mm.
ความยาวของช่องทางออกของเชื้อเพลิง (b)	120	mm.
ความสูงถังพักช่วงบน ( $h_{top}$ )	400	mm.
ความสูงถังพักช่วงล่าง ( $h_{bott}$ )	750	mm.
ปริมาตรความจุ	0.444	$m^3$



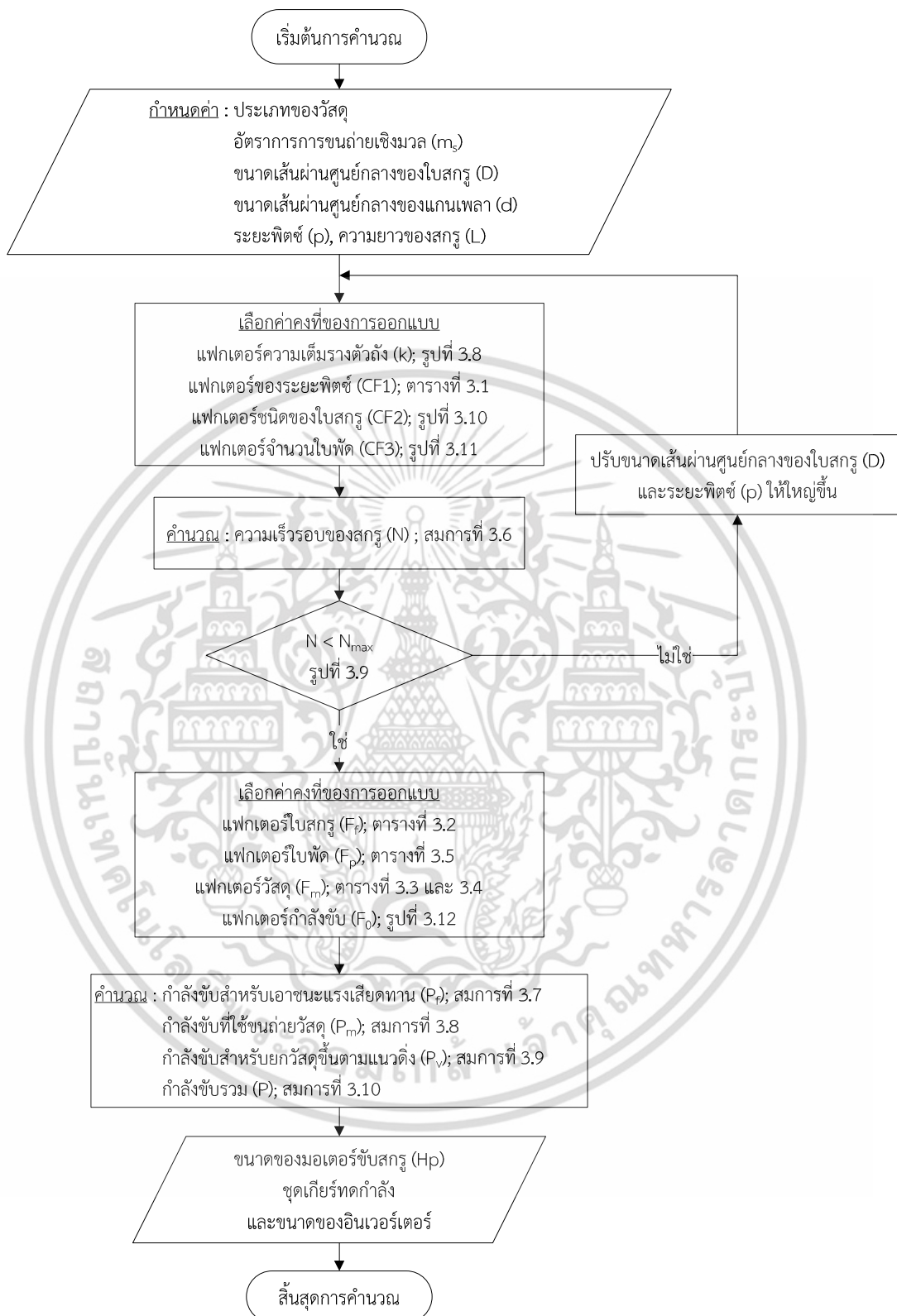
รูปที่ 4.24 ขนาดของถังพักเชื้อเพลิง (hopper)

หลังจากที่ได้ทำการคำนวณจนได้ขนาดของถังพักเชื้อเพลิงเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปต้องทำการเขียนแบบสำหรับสิ่งผลิตถังพักดังกล่าว โดยในการเขียนแบบสิ่งผลิตนั้น ต้องคำนึงถึงวัสดุขนาดมาตรฐานในตลาดอุตสาหกรรมของประเทศ เพื่อให้ง่ายต่อการสั่งซื้อ และนอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงกระบวนการผลิต ดังนั้นในการเขียนแบบต้องให้รายละเอียดที่มีถูกต้อง และชัดเจน รูปที่ 4.24 นั้นแสดงลักษณะของถังพักเชื้อเพลิงที่ทำการเขียนขึ้นด้วยโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ ซึ่งรายละเอียดของแบบ (detail drawing) ในการสิ่งผลิตนั้นแสดงไว้ในภาคผนวกที่ ก2

### 4.3.2 การออกแบบสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิง

สกรูขนถ่ายวัสดุเป็นหนึ่งในวิธีขนถ่ายวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นระบบที่มีความคงทน ง่ายต่อการบำรุงรักษา สามารถกำหนดอัตราการขนถ่ายได้ ขนถ่ายวัสดุได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุหลากหลายชนิด ซึ่งในออกแบบสกรูขนถ่ายนั้นจำเป็นต้องทราบถึงสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ทำการขนถ่าย เพื่อนำไปใช้ในจำแนกประเภทของวัสดุ โดยประเภทของวัสดุนั้นจะเป็นตัวช่วยในการเลือกชนิดของสกรู วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปใบสกรู และช่วยกำหนดตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณขนาดของสกรูนั่นเอง ซึ่งวิธีการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุนั้น แสดงดังรูปที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



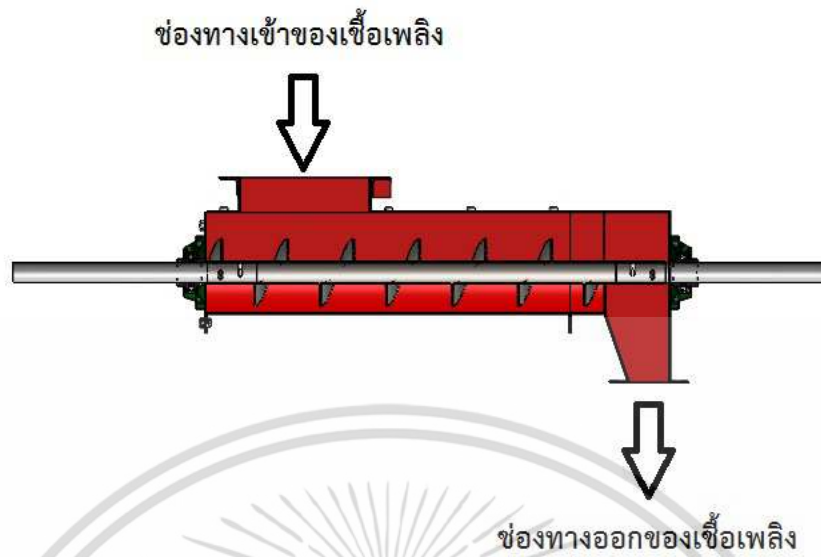
รูปที่ 4.25 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อออกแบบสปริงขนถ่ายวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

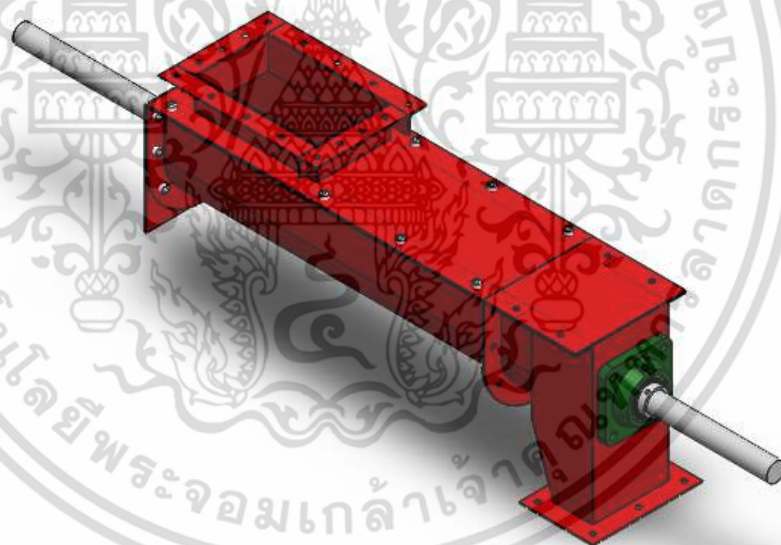
ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุ

Parameter	Symbol	Value	Unit
<b>การคำนวณอัตราการขนถ่าย</b>			
Fuel density	r	400.00	kg/m <sup>3</sup>
อัตราการขนถ่ายเชิงน้ำหนัก	m <sub>s</sub>	226.59	kg/h
ขนาด Diameter ของเกลียวสกรู	D	0.10	m
ขนาด Diameter ของแกนเพลลา	d	0.034	m
ระยะพิตช์	p	0.10	m
พื้นที่หน้าตัดของใบสกรู	A	0.007	m <sup>2</sup>
แฟกเตอร์ความเต็มรางตัวถัง	k	0.30	
แฟกเตอร์ของระยะพิตช์	CF1	1	
แฟกเตอร์ชนิดของใบสกรู	CF2	1	
แฟกเตอร์จำนวนใบพัด	CF3	1	
<b>ความเร็วรอบของสกรูหมุน</b>	N	<b>45.31</b>	rev/min
<b>การหาค่ากำลังขับ</b>			
ความยาวขนถ่าย	L	1.50	m
กำลังขับสำหรับเอาชนะแรงเสียดทาน	P <sub>f</sub>	102.65	Watt
แฟกเตอร์ใบสกรู	F <sub>f</sub>	1	
แฟกเตอร์ใบพัด	F <sub>p</sub>	1.29	
แฟกเตอร์วัสดุ	F <sub>m</sub>	0.40	
กำลังขับที่ใช้ขนถ่ายวัสดุ	P <sub>m</sub>	0.48	Watt
แฟกเตอร์กำลังขับ	F <sub>0</sub>	2	
ประสิทธิภาพการส่งกำลัง	h	0.50	
<b>กำลังขับรวม</b>	P	<b>412.50</b>	Watt
		<b>0.55</b>	Hp

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.9 จะพบว่าหากต้องทำการขนถ่ายเชื้อเพลิงด้วยอัตรา 226.56 kg/hr จะต้องใช้มอเตอร์ที่มีขนาด 0.55 Hp เป็นอย่างน้อย และความเร็วรอบของสกรูจะอยู่ที่ 45.31 rev/min ซึ่งในที่นี้เลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1 Hp ในการขับเพลลาของสกรู แต่ทว่ามอเตอร์โดยทั่วไปจะมีความเร็วรอบ 1450 rev/min ที่ความถี่ไฟฟ้า 50 Hz ดังนั้นจึงต้องทำการลดความเร็วรอบของมอเตอร์ลงเพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่ต้องการใช้งาน ซึ่งได้เลือกใช้มอเตอร์เกียร์อัตราทด 1:10 ให้ความเร็วรอบลดลงเหลือ 145 rev/min แล้วจึงใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบโดยละเอียดอีกครั้ง เพื่อให้ง่ายต่อการปรับลดความเร็วรอบ ตามปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามตัวเลขความเร็วรอบที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.9 นั้นยังเป็นเพียงค่าประมาณการเท่านั้น ซึ่งต้องทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายต่อความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายต่อไป



รูปที่ 4.26 ภาพตัด และทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงผ่านสกรูขนถ่าย



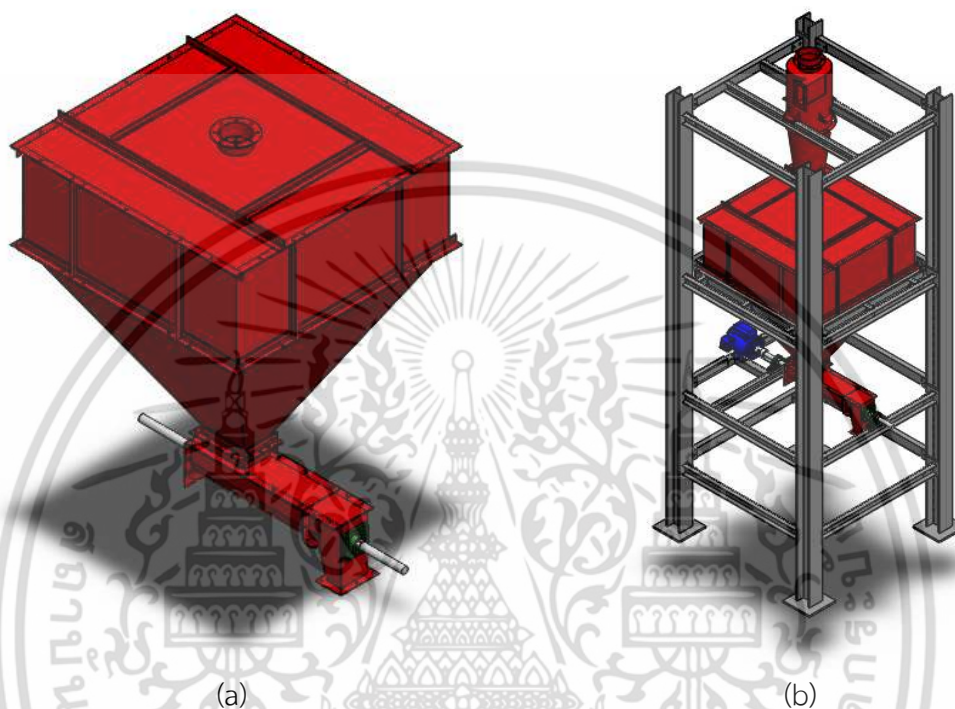
รูปที่ 4.27 ลักษณะของสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงที่ทำการออกแบบ

ทิศทางการขนถ่ายเชื้อเพลิง ช่องทางเข้า และออกของเชื้อเพลิงผ่านสกรูขนถ่ายแสดงดังรูปที่ 4.26 โดยที่ลักษณะโดยรวมของสกรูขนถ่ายแสดงดังรูปที่ 4.27 จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสกรูขนถ่ายมีส่วนประกอบที่สามารถถอดประกอบได้หลายชิ้น เพื่อให้ง่ายต่อการซ่อมบำรุง ซึ่งสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวกที่ ก2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 ภาพรวมของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบถังพัก และสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ทางทีมวิจัยต้องทำการออกแบบโครงสร้างของระบบ เพื่อที่จะยึดส่วนประกอบทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน โดยได้รับความร่วมมือจากคุณธวัชชัย จำนงค์ ซึ่งเป็นหนึ่งในทีมวิจัย ในการออกแบบ และเขียนแบบโครงสร้างเพื่อรองรับระบบดังกล่าว รูปที่ 4.28 แสดงลักษณะชุดป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ติดตั้งเข้ากับโครงสร้าง

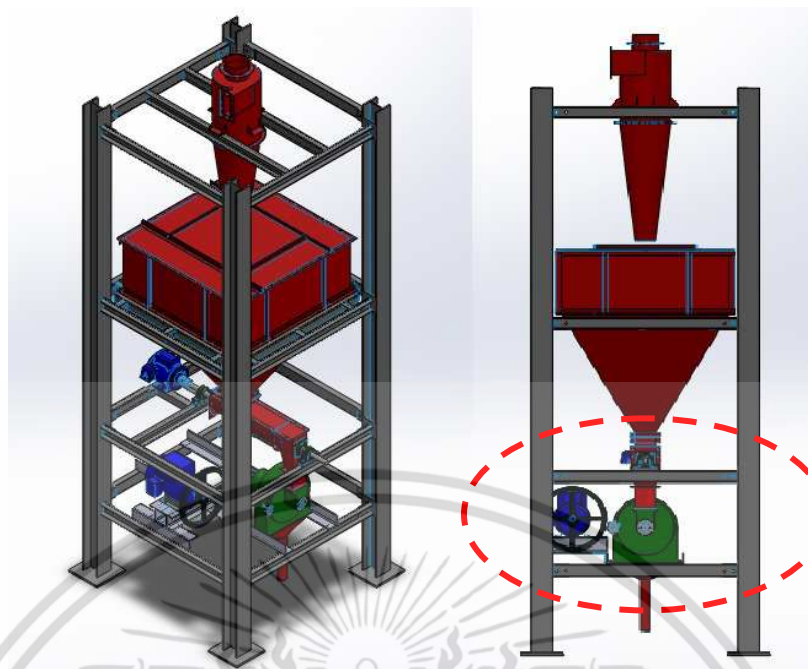


รูปที่ 4.28 (a) การประกอบถังพักเชื้อเพลิงกับชุดสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิง (b) ลักษณะชุดป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ติดตั้งเข้ากับโครงสร้าง

### 4.3.4 การเลือก และติดตั้งเครื่องบดเชื้อเพลิงผง

จากเดิมแนวคิดของระบบจัดเก็บ และป้อนเชื้อเพลิงได้กำหนดไว้ว่า เมื่อเชื้อเพลิงแห้ง ตะเกียบ (wood pellets) ถูกบดให้เป็นผงโดยเครื่องบด แล้วจะถูกส่งไปจัดเก็บในถังเก็บเชื้อเพลิง ซึ่งการเก็บเชื้อเพลิงในลักษณะที่เป็นผงละเอียดนั้นยากต่อการควบคุมคุณภาพของเชื้อเพลิง เนื่องจากสภาพแวดล้อมเป็นผลให้เชื้อเพลิงมีลักษณะทางกายภาพ และคุณสมบัติที่เปลี่ยนไป รวมไปถึงการจัดเก็บในลักษณะดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อการติดไฟได้เองของเชื้อเพลิง ด้วยเหตุผลนี้จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนการจัดเก็บเชื้อเพลิง ให้อยู่ในรูปแบบเชื้อเพลิงแห้งตะเกียบแทนรูปแบบเดิม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มกระบวนการบด โดยทำการติดตั้งเครื่องบดเชื้อเพลิงเข้าไปบริเวณใต้ถังเก็บเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 4.29

โดยที่ในการเลือกชนิดและประเภทของเครื่องบดนั้น ต้องคำนึงถึงประเภทของวัสดุที่จะนำมาบด ความละเอียดของผงวัสดุที่ต้องการ และกำลังในการบดให้สอดคล้องกับความต้องการในการบริโภคเชื้อเพลิงของหัวเผา ซึ่งประเภทของเครื่องบดของแห้งที่สนใจมีดังนี้



รูปที่ 4.29 แสดงตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องบด และชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องบด

1. Hammer mill คือเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง มีลักษณะหัวบดเป็นหัวค้อนติดอยู่บนเพลลา อาศัยหลักการเหวี่ยงกระแทก ทำให้วัสดุแตกเป็นชิ้นเล็กๆ และมีตะแกรงเจาะรูเป็นตัวกรองให้เครื่องบด บดวัสดุให้ได้ขนาดตามต้องการจึงปล่อยออก

2. Ball mill คือ เครื่องบดแบบลูกบอลประกอบด้วยภาชนะปิดหลังหม้อบด หมุนอย่างช้าๆในแนวอนภายในมีลูกบดที่เป็นบอลโลหะ อาศัยการกระแทกของลูกบดกับวัสดุที่ต้องการบด

3. Pin mill หลักการทำงานคือ วัสดุถูกใส่ลงมาจากบนสุดลงมาด้านล่าง โดยครั้งแรกจะถูกบดด้วย แรงเนื่องจากหัวบดที่หมุนอยู่ในจานเป็นผงละเอียด และร่วงลงด้านล่างผ่านตะแกรง ส่วนที่ไม่สามารถผ่านตะแกรงลงไปได้ต้องถูกหมุนต่อไปจนกว่าจะกลายเป็นผงและผ่านตะแกรงได้

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องบด [27]

สิ่งที่พิจารณา	ชนิดเครื่อง		
	Hammer mill	Ball mill	Pin mill
ขนาดเครื่อง	ปานกลาง	ใหญ่	ปานกลาง
ความละเอียดของการบด	หยาบ	ปานกลาง	ละเอียด

จากการเปรียบเทียบดังกล่าว จึงเลือกใช้เครื่องบดประเภท Pin mill เนื่องจากขนาดของเชื้อเพลิงผงที่ใช้ในการเผาไหม้ต้องมีขนาดที่ค่อนข้างละเอียด รวมไปถึงข้อจำกัดของพื้นที่ในการติดตั้งเครื่องบด เมื่อพิจารณาข้อมูลจำเพาะของเครื่องบดยี่ห้อ BONNY ดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าเครื่องบดรุ่น YPT-302 (F/S) มีกำลังการผลิต อยู่ในช่วงที่สามารถบด และป้อนเชื้อเพลิงผงเข้าสู่หัวเผาได้ในอัตรา 56.52-226.8 kg/hr ซึ่งจะผลิตกำลังความร้อนได้ 0.25 kW ถึง 1 MW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องบด ยี่ห้อ BONNY

รุ่น MODEL	กำลังการผลิต* CAPACITY (kg/hr)	มอเตอร์ POWER (hp : kW )	รอบเครื่อง* SPEED (RPM)	สัดส่วน* DIMENSION (W × D × H : cm)
YPS-102 (F/S)	10-50	2 : 1.5	6000	95 × 55 × 130
YPT-202 (F/S)	50-150	3 : 2.2	5000	115 × 65 × 140
YPT-302 (F/S)	150-300	5 : 3.7	4000	115 × 65 × 160
YPK-401 (F/S)	300-500	10 : 7.5	3500	75 × 70 × 115 (ไม่รวมแท่น)
YPK-501 (F/S)	500-1000	20 : 15	3500	90 × 80 × 135 (ไม่รวมแท่น)

\* ตัวเลขโดยประมาณ (Approximately)



รูปที่ 4.30 แสดงเครื่องบด ยี่ห้อ BONNY รุ่น YPT-302 (F/S)



รูปที่ 4.31 แสดงลักษณะภายในเครื่องบด ยี่ห้อ BONNY รุ่น YPT-302 (F/S)

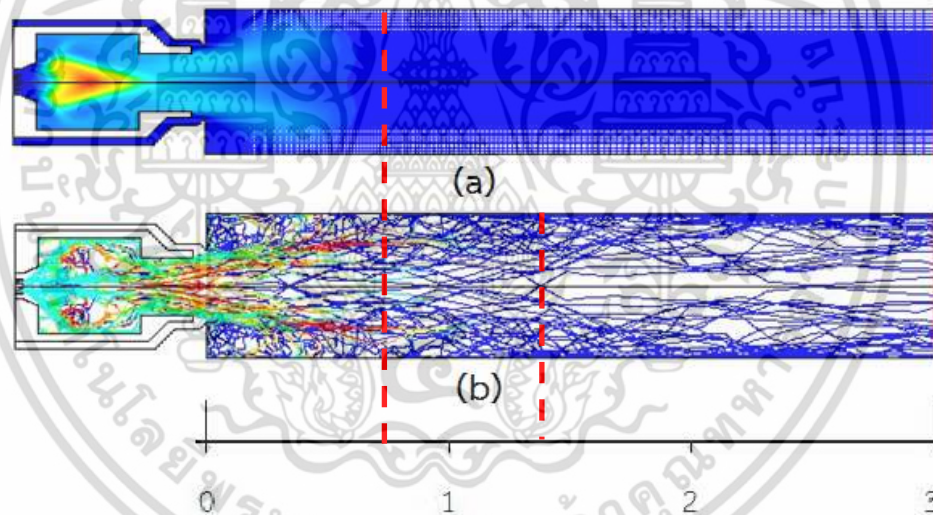
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การออกแบบห้องเผาไหม้

ห้องเผาไหม้หลักเป็นห้องที่ใช้รองรับความยาวของเปลวไฟที่พุ่งออกมาจากหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) โดยอนุภาคเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมด และหลุดออกมาจากห้องเผาไหม้ช่วยจะถูกเผาไหม้ซ้ำภายในห้องเผาไหม้หลัก สำหรับห้องเผาไหม้หลักจะต้องทำการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ มีผนังที่ทนต่อการปะทะเสียดสีของเชื้อเพลิง และต้องมีระบบระบายไถ่หนกออกจากเตา

##### 4.4.1 การกำหนดความยาวของห้องเผาไหม้

ความยาวของห้องเผาไหม้นั้นเป็นตัวแปรหนึ่งที่ต้องทำการพิจารณาเพื่อออกแบบ เนื่องจากถ้าห้องเผาไหม้มีความยาวที่สั้นจนเกินไป ผนังส่วนท้ายจะถูกเปลวไฟ และอนุภาคของเชื้อเพลิงวิ่งปะทะ ซึ่งอาจเป็นผลให้อายุการใช้งานของปูนทนไฟสั้นลง และนอกจากนี้ห้องเผาไหม้ที่สั้นอาจส่งผลให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ยังไม่สิ้นสุดภายในเตา ซึ่งจะเป็นผลให้มีคาร์บอนคงเหลือที่ปะปนไปกับเถ้าลอยเข้าสู่ห้องบำบัด แต่หากห้องเผาไหม้มีความยาวที่มากจนเกินไปอาจส่งผลให้สิ้นเปลืองงบประมาณในการก่อสร้าง โดยที่ขนาด และความยาวของห้องเผาไหม้หลักนั้นถูกออกแบบไปพร้อมกับการจำลองเพื่อออกแบบหัวเผาในหัวข้อที่ 4.2



รูปที่ 4.32 ระยะการสิ้นสุดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (a) การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย (Mass Fraction) และ (b) เส้นทางการเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์ระหว่างกาเผาไหม้

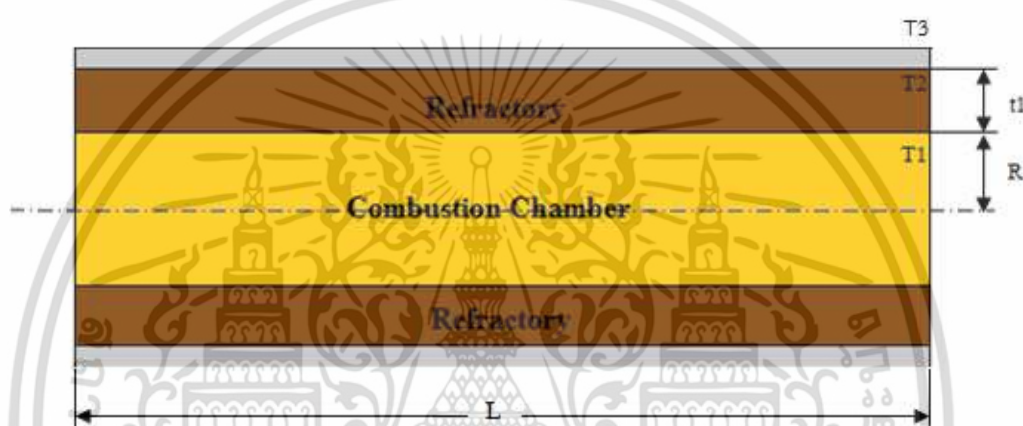
ในการจำลองเพื่อออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วยนั้น ได้กำหนดความยาวของห้องเผาไหม้หลักไว้ที่ 3 เมตร เมื่อพิจารณารูปที่ 4.32(a) และ(b) ซึ่งแสดงเส้นทางการเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์ระหว่างกาเผาไหม้ และการกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหยตามลำดับ จะพบว่าสารระเหยจะสิ้นสุดปฏิกิริยาการเผาไหม้อยู่ที่ระยะประมาณ 0.6 เมตรภายในห้องเผาไหม้หลัก ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.11 ที่ความเข้มข้นของสารระเหยจะถูกเผาไหม้จนหมดไป ที่ระยะประมาณ 1.4 เมตร (หัวเผายาว 0.786 เมตร) ในขณะที่อนุภาคคาร์จะสิ้นสุดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ระยะประมาณ 1.25 เมตร เนื่องจากอนุภาคคาร์ต้องการระยะเวลาใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่าสารระเหย จึงต้องใช้ระยะในการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่า ดังนั้นจึงกำหนดความยาวของห้องเผาไหม้โดยอ้างอิงจากระยะในการทำปฏิกิริยาของอนุภาคคาร์ ซึ่งจะออกแบบให้ห้องเผาไหม้มีความยาวประมาณ 1.5 เมตร

#### 4.4.2 การคำนวณความหนาของผนังห้องเผาไหม้

สำหรับการคำนวณความหนาของผนังห้องเผาไหม้นั้น จะใช้หลักการเดียวกันกับการคำนวณในหัวข้อที่ 4.2.6 การหาความหนาของผนังห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งขั้นตอนในการคำนวณสามารถนำวิธีการดังรูปที่ 4.19 มาประยุกต์ให้เข้ากับขอบเขตของผนังห้องเผาไหม้ที่ประกอบด้วยชั้นของปูนทนไฟ และชั้นของเซรามิก ไฟเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.33 โดยแทนค่าตัวแปรในตารางที่ 4.12 ซึ่งจะได้ผลการคำนวณดังนี้

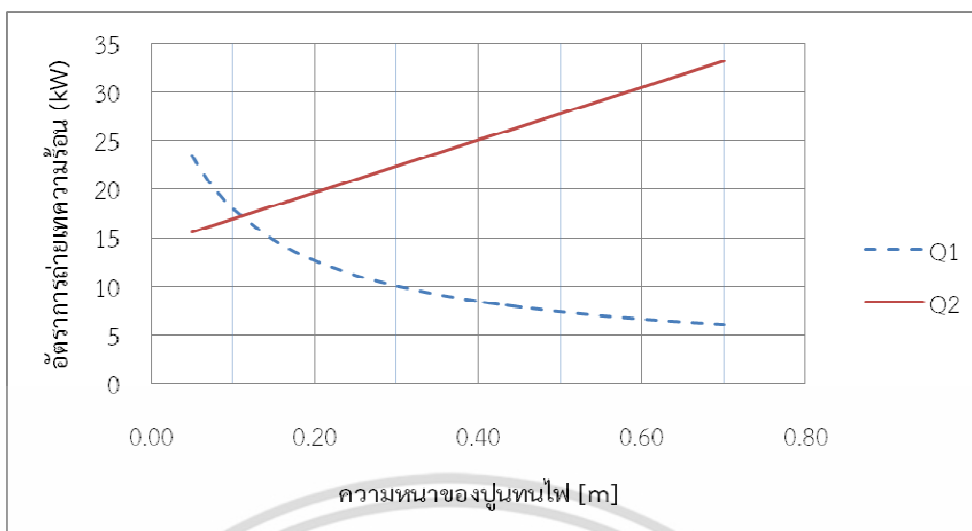


รูปที่ 4.33 ลักษณะขอบเขตของผนังห้องเผาไหม้

ตารางที่ 4.12 ค่าตัวแปรควบคุมที่ใช้คำนวณหาความหนาของผนังห้องเผาไหม้

Parameter	Value	Units
Chamber Radiance (R)	0.50	m
Ceramic Fiber Layer Distance	0.05	m
Chamber Length (L)	1.50	m
Thermal Conductivity of Refractory Brick @ 1200 °C	1.50	W/m.K
Thermal Conductivity of Ceramic Fiber @ 1000 °C	0.30	W/m.K
Combustion Temperature (T1)	1300.00	°C
Outside Brick Temperature (T2)	600.00	°C
Outside Stainless Ceramic Fiber Temp. (T3)	120.00	°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

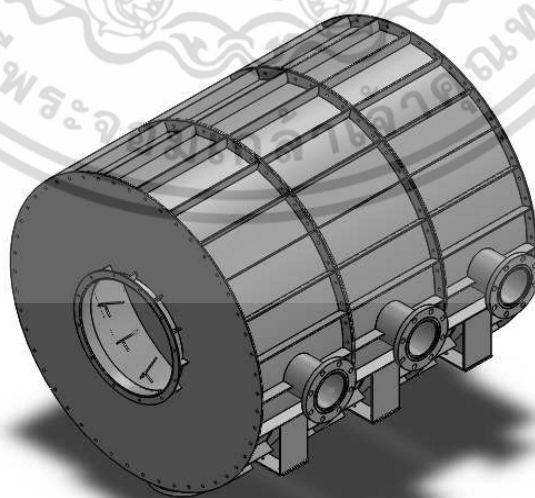


รูปที่ 4.34 ผลการคำนวณหาความหนาผนังปูนทนไฟของห้องเผาไหม้

พิจารณารูปที่ 4.34 ผลการคำนวณหาความหนาของผนังห้องเผาไหม้ จะพบว่าความหนาของปูนทนไฟที่ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังปูนทนไฟ (Q1) เท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังชั้นใยหิน (Q2) จะมีค่าประมาณ 0.27 m ซึ่งเป็นจุดที่กราฟของทั้งสองสมการมาตัดกันนั่นเอง

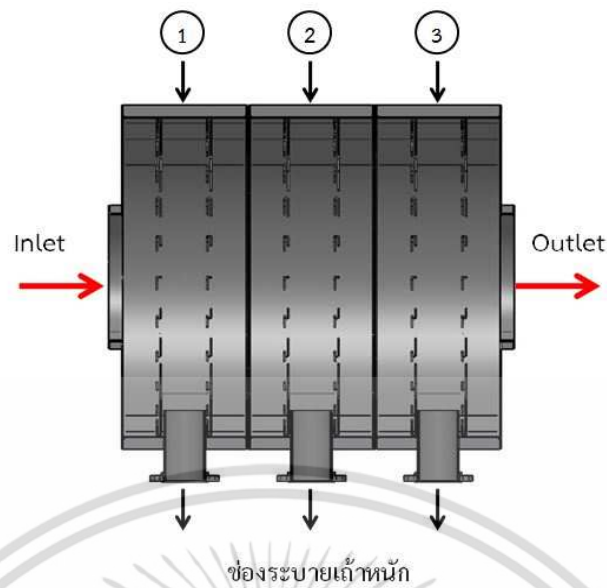
#### 4.4.3 รายละเอียดแบบสั่งผลิตสำหรับห้องเผาไหม้

เมื่อทำการคำนวณเพื่อออกแบบห้องเผาไหม้ จนได้ผลการคำนวณ และขนาดต่างๆที่เป็นที่น่าพอใจแล้ว ลำดับต่อไปจะเข้าสู่ขั้นตอนการเขียนแบบสั่งผลิต และสั่งขึ้นรูปห้องเผาไหม้ โดยได้รับความอนุเคราะห์จากคุณธวัชชัย จำนงค์ ซึ่งเป็นหนึ่งในทีมวิจัย ในการออกแบบรูปร่าง และเขียนแบบห้องเผาไหม้ รวมไปถึงการออกแบบโครงสร้างของห้องเผาไหม้ด้วย ลักษณะของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง แสดงดังรูปที่ 4.35



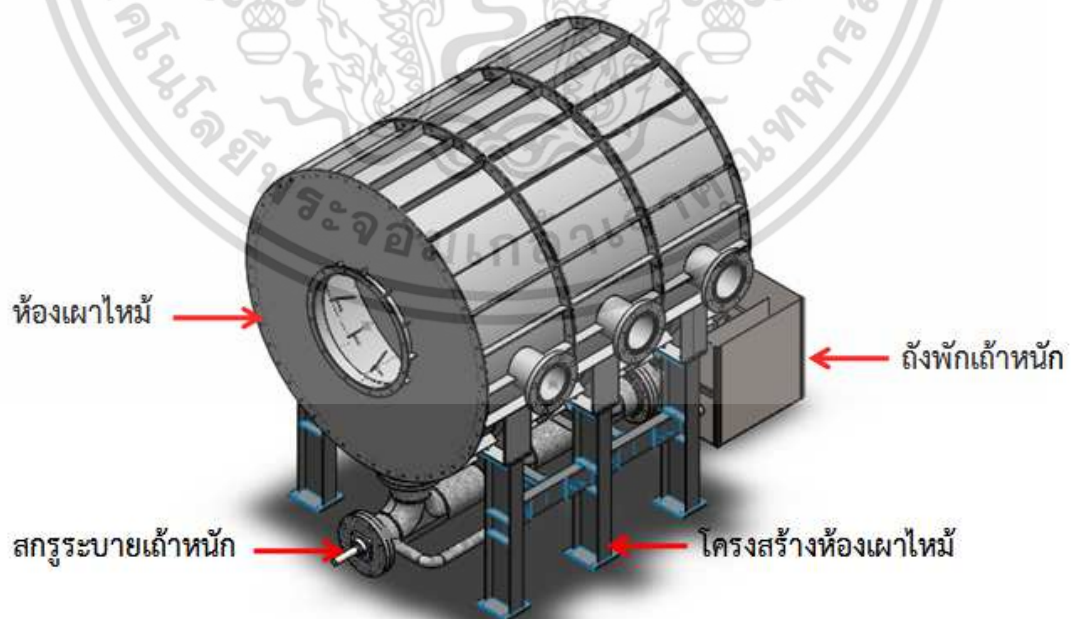
รูปที่ 4.35 ลักษณะของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 ภาพตัดแสดงลักษณะภายในของเปลือกห้องเผาไหม้

เพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูปชิ้นงาน การถอดประกอบ การหล่อปูนทนไฟ รวมไปถึงการขยายความยาวของห้องเผาไหม้ในอนาคต จึงได้ออกแบบให้ห้องเผาไหม้สามารถถอดประกอบได้เป็นท่อนๆ ซึ่งแต่ละท่อนจะมีลักษณะที่มีความสมมาตรกัน เมื่อพิจารณารูปที่ 4.36 แสดงลักษณะภายในของเปลือกห้องเผาไหม้ จะพบว่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ท่อน ท่อนละ 0.5 เมตร ด้านล่างของห้องเผาไหม้จะมีช่องสำหรับระบายไอน้ำเข้าสู่สกรูระบายไอน้ำ ในขณะที่ภายในของเปลือกห้องเผาไหม้ จะทำการเชื่อมหนาแน่นเตยไว้เพื่อใช้เป็นตัวยึดปูนทนไฟ ซึ่งแบบสั่งผลิตโดยละเอียดของห้องเผาไหม้ และสกรูระบายไอน้ำสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากภาคผนวกที่ ก3 และภาคผนวกที่ ก4 ตามลำดับ

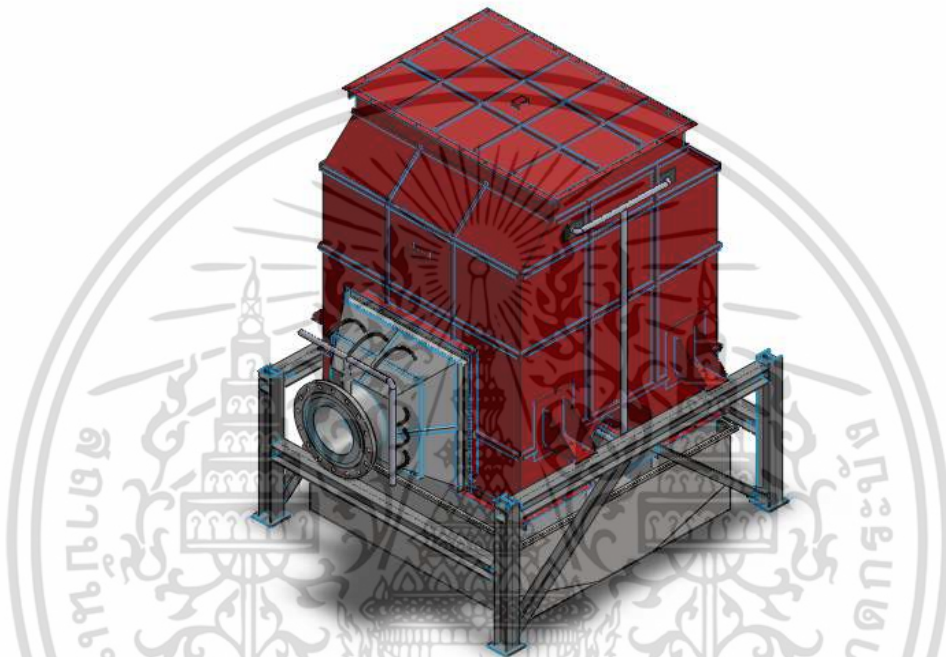


รูปที่ 4.37 ส่วนประกอบของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

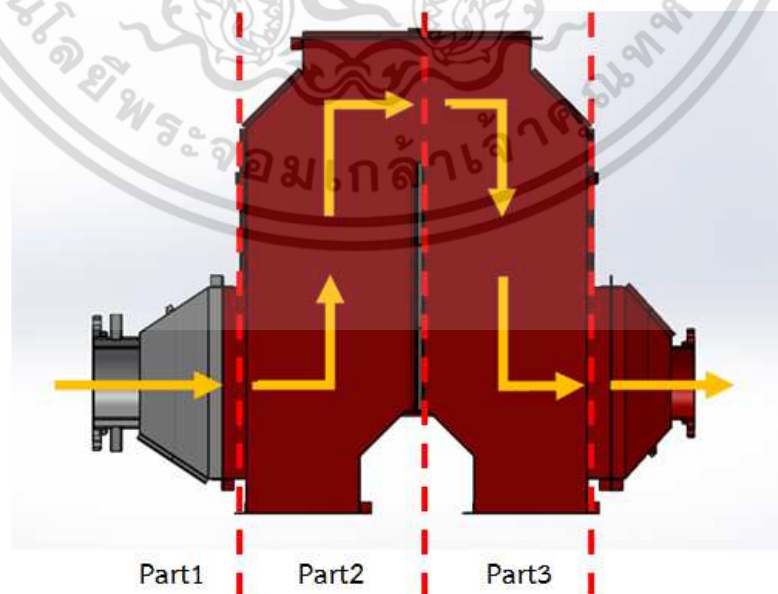
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การออกแบบระบบบำบัดไอเสีย

สำหรับระบบนี้จะออกแบบโดยทำการรวมระบบลดอุณหภูมิไอเสีย นั่นคือ evaporative cooling และระบบกำจัดฝุ่น wet scrubber เข้าไว้ด้วยกัน เนื่องจากข้อจำกัดในด้านงบประมาณ และพื้นที่ในการติดตั้งเครื่องจักร ซึ่งแนวคิดในการออกแบบนั้นจะต้องออกแบบช่องการไหลของแก๊สไอเสีย ให้แก๊สมีระยะเวลาที่อยู่ในห้องบำบัดนานที่สุด เพื่อให้ไอเสียสัมผัสกับละอองน้ำให้มากที่สุด ซึ่งลักษณะระบบบำบัดไอเสียแสดงดังรูปที่ 4.38 และทิศทางการไหลของแก๊สร้อนภายในห้องบำบัดแสดงดังรูปที่ 4.39

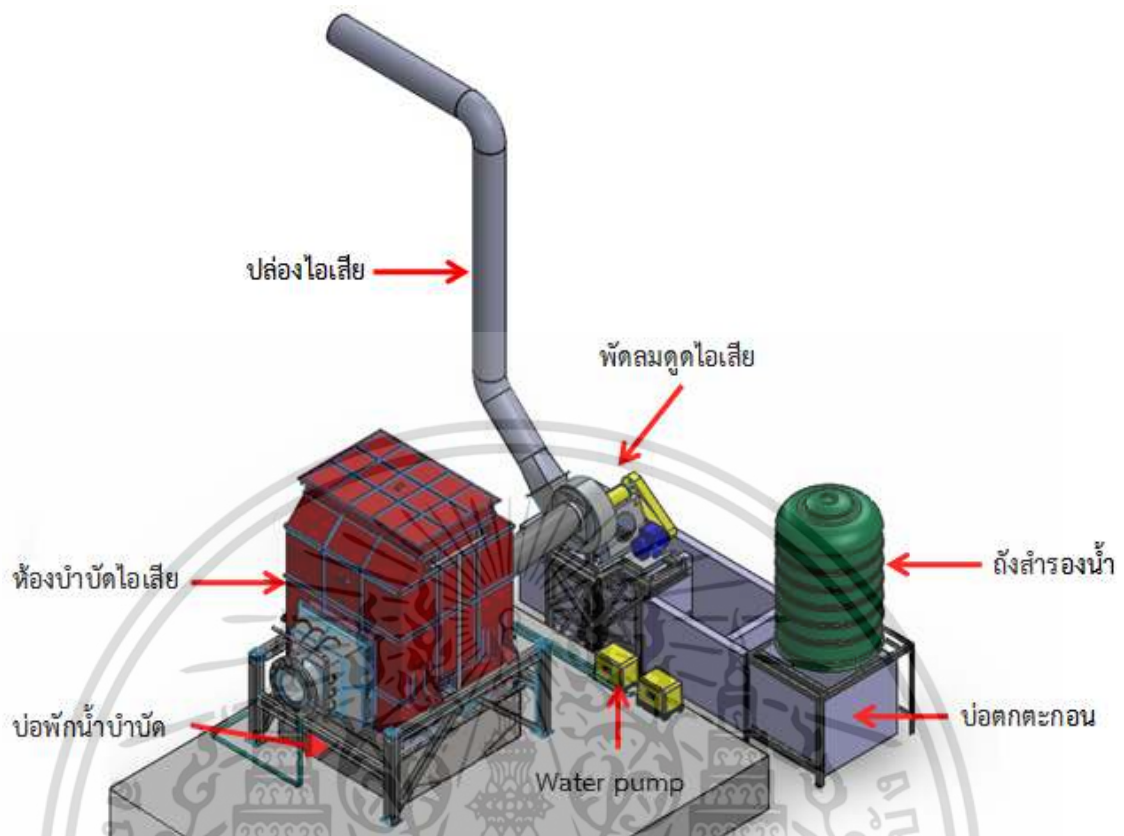


รูปที่ 4.38 ลักษณะระบบบำบัดไอเสีย



รูปที่ 4.39 ทิศทางการไหลของแก๊สร้อนภายในห้องบำบัดไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 ลักษณะการจัดวางตำแหน่งของระบบบำบัดไอเสีย

แบบสั่งผลิตโดยรายละเอียดของระบบบำบัดไอเสีย นั้นแสดงดังภาคผนวก ก5 ซึ่งนอกเหนือจากการออกแบบถังบำบัดไอเสียแล้ว จำเป็นต้องทำการติดตั้งหัวฉีด ระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้สำหรับบำบัดไอเสีย รวมไปถึงการคำนวณเพื่อเลือกซื้อพัดลมดูดไอเสียให้กับระบบ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.39 สามารถสังเกตทิศทางการไหลของแก๊สร้อนภายในห้องบำบัดไอเสียได้จากสัญลักษณ์เส้นสีเหลือง ซึ่งภายในห้องบำบัดไอเสียจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 (part 1) เป็นส่วนของการระเหยน้ำเพื่อลดอุณหภูมิของแก๊สไอเสีย น้ำจะถูกสเปรย์ในลักษณะที่เป็นม่านตั้งฉากกับทิศทางการไหลของแก๊สไอเสีย ความร้อนจะถูกถ่ายเทสู่น้ำเพื่อใช้ในการระเหยเป็นไอ อุณหภูมิของแก๊สไอเสียจึงลดลง ในขณะที่ส่วนที่ 2 และ 3 (part 2 และ 3) จะเป็นบริเวณของการดักจับเถ้าลอย โดยจะทำการสเปรย์น้ำในลักษณะที่ตั้งฉากกับการไหลของแก๊สไอเสีย เมื่อเถ้าลอยวิ่งปะทะกับม่านน้ำจะส่งผลให้น้ำหนักของเถ้ามากขึ้น และจะตกลงสู่บ่อพักน้ำบำบัด ซึ่งในการพิจารณาเลือกหัวฉีดสำหรับสเปรย์ม่านน้ำนั้น ต้องพิจารณาหัวฉีดที่สามารถสเปรย์ม่านน้ำให้ครอบคลุมพื้นที่หน้าตัดของถังบำบัดไอเสีย

เมื่อเถ้าลอยถูกม่านน้ำดักให้ตกลงสู่บ่อพักน้ำบำบัดแล้ว น้ำบำบัดจะถูกดูดไปยังบ่อตกตะกอนเพื่อทำการตกตะกอนของเถ้า โดยจะทำการหมุนเวียนน้ำกลับมาสเปรย์ในถังบำบัดอีกครั้ง ซึ่งถังบำบัดไอเสียจะถูกกำหนดให้ใช้ปั้มน้ำจำนวน 2 เครื่อง ปั้มน้ำเครื่องแรกจะดูดน้ำสะอาดจากถังสำรองน้ำเพื่อใช้ในการสเปรย์เข้าสู่ส่วนที่ 1 ของห้องบำบัด เนื่องจากบริเวณดังกล่าวน้ำจะถูกทำให้ระเหยเป็นไอน้ำหากใช้น้ำที่มีตะกอนเจือปน เมื่อน้ำระเหยเป็นไอน้ำแล้วจะส่งผลให้ปริมาณอนุภาคในแก๊สไอเสียเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอัตราการไหลของน้ำผ่านปั้มน้ำเครื่องแรกจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของแก๊สไอเสีย ในส่วนของปั้มน้ำที่สองจะดูดน้ำจากบ่อตกตะกอนเพื่อนำมาสเปรย์ในส่วนที่ 2 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของห้องบำบัดไอเสียต่อไป ดังนั้นในการกำหนดปริมาณของบ่อตกตะกอนจึงคำนึงถึงปริมาณการใช้น้ำของหัวฉีดในส่วนของ 2 และ 3 โดยในที่นี้ได้กำหนดให้บ่อตกตะกอนมีปริมาตร  $2.5 \text{ m}^3$  และอัตราการไหลของน้ำผ่านปั้มน้ำตัวที่สองจะอยู่ที่  $2 \text{ m}^3/\text{hr}$



รูปที่ 4.41 ขั้นตอนในการคำนวณหาปริมาณของแก๊สไอเสีย

ในการเลือกซื้อพัดลมสำหรับดูดไอเสีย (ID fan) นั้น จำเป็นต้องทราบค่าปริมาณของไอเสียก่อน โดยการคำนวณหาปริมาณของไอเสียนั้นแสดงดังรูปที่ 4.41 ซึ่งปริมาณรวมที่ได้จากการคำนวณนั้น จะเป็นปริมาณที่รวมการระเหยของไอน้ำภายในถังบำบัดไอเสียเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ตารางที่ 4.13 แสดงผลการคำนวณหาปริมาณรวมของไอเสีย

ตารางที่ 4.13 แสดงการคำนวณปริมาณไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้

Parameter	Value	Unit
Burner capacity	1000	kW
	859845.23	kcal/hr
คำนวณปริมาณแก๊สไอเสีย		
Fuel heating value	3970	kcal/kg
Fuel consumption	216.59	kg/hr
A/F ratio	5.60	
Excess air	30	%
Air for combustion	1576.74	kg/hr
Total flue gas @ 25 °C	1793.33	kg/hr
Flue gas density	1.32	kg/Nm <sup>3</sup>
Flue gas volume flow rate @ 25 °C	1358.58	Nm <sup>3</sup> /hr
Flue gas density	200	°C
Flue gas volume flow rate @ 800 °C	2156.41	m <sup>3</sup> /hr
	1269.21	cfm
ปริมาณน้ำที่ฉีด	1000	kg/hr
Specific volume	2.17	m <sup>3</sup> /kg
ปริมาตรไอน้ำ	2172.49	m <sup>3</sup> /hr
	1278.60	cfm
ปริมาตรของไอเสียรวม	4328.90	m <sup>3</sup> /hr
	2547.90	cfm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5 อุปกรณ์ เจือนไซ และวิธีการทดลอง

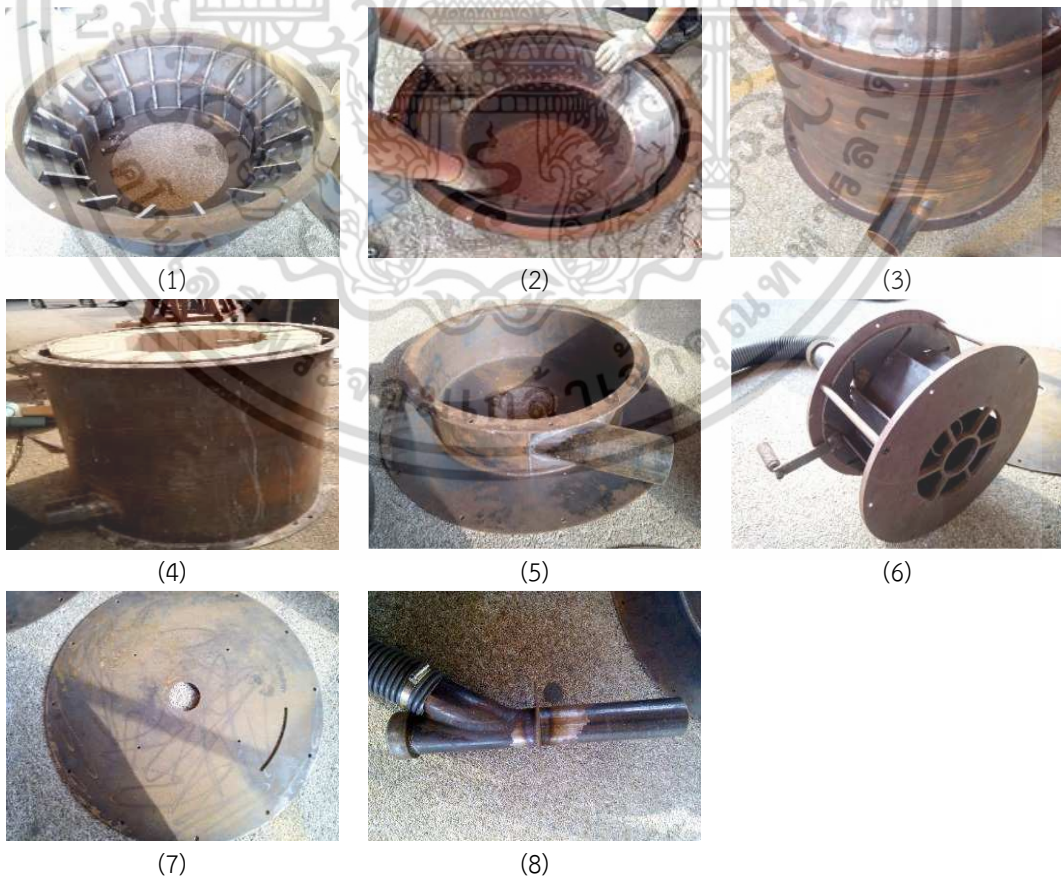
สำหรับบทนี้จะนำเสนอถึงการขึ้นรูปชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง จากแบบผลิตภัณฑ์ผ่านการคำนวณออกแบบในบทก่อนหน้า นอกจากนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ในการบันทึกข้อมูล และเครื่องมือวัดต่างๆ รวมทั้งวิธีการทดลองเพื่อทดสอบหาสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิง และหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) เป็นต้น

### 5.1 การขึ้นรูปชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

หลังจากที่ทำการคำนวณ และออกแบบชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง จนได้ขนาดที่ต้องการสำหรับเขียนแบบสิ่งผลิตแล้ว หัวข้อนี้จะนำเสนอถึงผลลัพธ์ของการส่งแบบสิ่งผลิตให้กับผู้รับเหมาเพื่อทำการขึ้นรูปชุดอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ตัวอย่างเช่น หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ถังพักเชื้อเพลิง ระบบสกรูขนถ่าย และห้องเผาไหม้ เป็นต้น

#### 5.1.1 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber)

เพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูป การประกอบ และการซ่อมบำรุง หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลจึงถูกออกแบบให้ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักๆ 9 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 5.1 แสดงชิ้นส่วนหลักของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.1 แสดงชิ้นส่วนหลักของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย หลังจากผ่านการขึ้นรูปเป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยรายละเอียดของแต่ละชิ้นส่วนแสดงในหัวข้อที่ 4.2.5 ซึ่งก่อนที่จะทำการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน จะต้องทำการหล่อปูนทนไฟในชิ้นส่วนที่ต้องสัมผัสกับเปลวไฟ นั่นคือชิ้นส่วนหมายเลข 2 และหมายเลข 4 ซึ่งรายละเอียดในการหล่อปูนทนไฟ และขั้นตอนการประกอบหัวเผาสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [28] เมื่อทำการประกอบทุกชิ้นส่วนเข้าด้วยกันจะได้หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (ด้านหน้า)

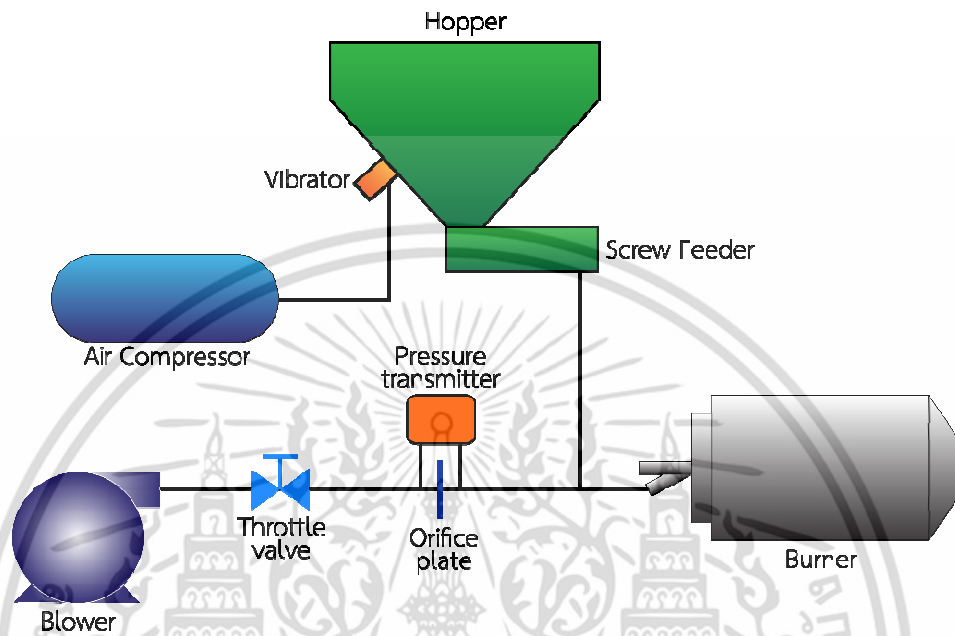


รูปที่ 5.3 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (ด้านหลัง)

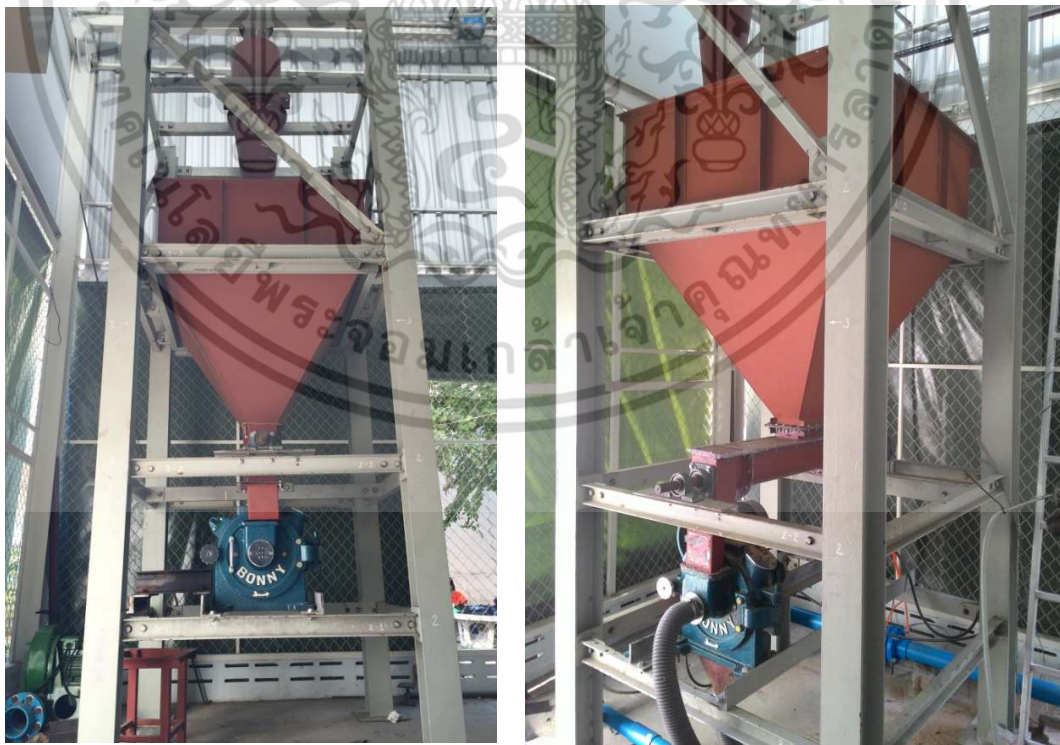
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง

สำหรับชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ระบบป้อนเชื้อเพลิงถือเป็นระบบหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก และเป็นระบบที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ย่อยหลายส่วน ซึ่งองค์ประกอบย่อยของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง แสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แผนภาพองค์ประกอบย่อยของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง [27]



รูปที่ 5.5 ลักษณะถังพักเชื้อเพลิงชีวมวลผง (hopper) และสกรูลำเลียงที่ติดตั้งเข้ากับโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 ระบบลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผง

สำหรับถังพักเชื้อเพลิง และสกรูลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผง ที่แสดงในรูปที่ 5.5 และ 5.6 นั้นถูกสร้างขึ้นตามแบบสั่งผลิตที่ได้คำนวณไว้ในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งถังดังกล่าวมีความจุประมาณ  $0.5 \text{ m}^3$  สามารถสำรองเชื้อเพลิงชีวมวลผงสำหรับการทดสอบการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน  $1 \text{ MW}$  ได้นานสูงสุด 45 นาที นอกจากนี้บริเวณผนังด้านข้างของถังพักเชื้อเพลิงได้ถูกติดตั้งอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนด้วยลมชนิดเคาะ หรือทุบโดยตรง (Impact Hammer) โดยใช้ลมจากเครื่องอัดอากาศที่ความดัน  $4 \text{ bar}$  เพื่อให้การไหลของเชื้อเพลิงภายในถังเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และลดการติดค้างของเชื้อเพลิงในถังพัก ซึ่งลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับถังพักเชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แสดงอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนด้วยลมที่เลือกใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



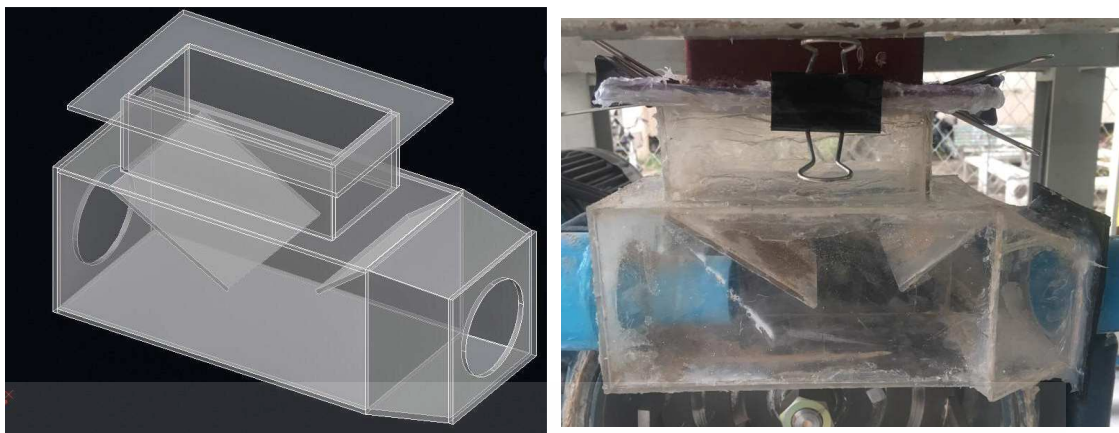
รูปที่ 5.8 เครื่องอัดอากาศสำหรับอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ 5.9 โบลเวอร์ และวาล์วปรับอัตราการไหลอากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air)

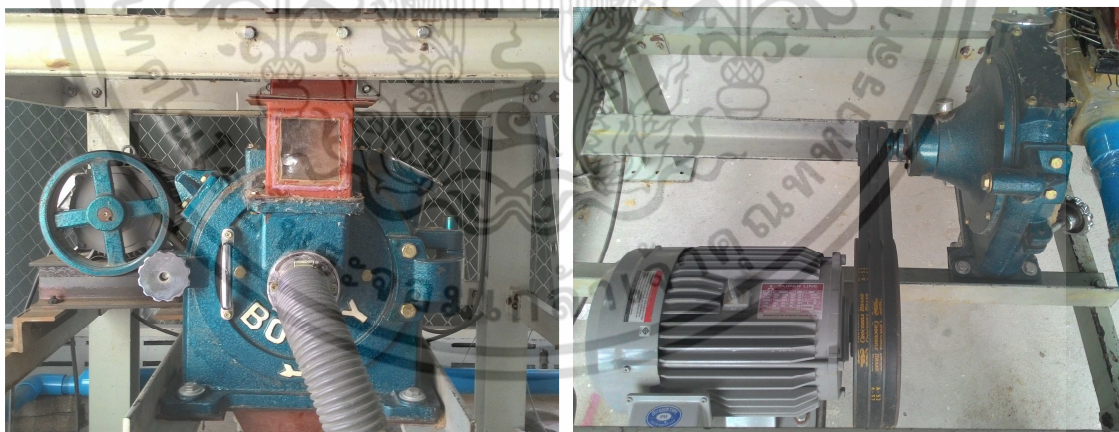
เชื้อเพลิงชีวมวลผงจะถูกควบคุมอัตราการขนถ่ายด้วยความเร็วรอบของสกรูขนถ่าย แล้วจะถูกส่งเข้าสู่หัวเผาด้วยวิธีการขนถ่ายด้วยลม รูปที่ 5.9 แสดงลักษณะของโบลเวอร์ (blower) สำหรับอากาศส่วนที่หนึ่ง ซึ่งเป็นอากาศที่ทำหน้าที่นำเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และลักษณะของวาล์วปีกผีเสื้อที่ใช้สำหรับควบคุมอัตราการไหลของอากาศเพื่อให้เกิดความเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ในยานต่างๆ เมื่อเชื้อเพลิงถูกลำเลียงผ่านสกรูลำเลียงแล้วจะตกลงสู่กล่องผสม (mixing box) ซึ่งเป็นกล่องที่มีหน้าผสมอากาศ และเชื้อเพลิงผง เชื้อเพลิงที่ตกลงมากจากปากของสกรูขนถ่ายจะถูอากาศเหนี่ยวนำให้พุ่งเข้าสู่ห้องเผาไหม้ โดยลักษณะของกล่องผสมแสดงดังรูปที่ 5.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 อุปกรณ์สำหรับลำเลียงเชื้อเพลิง และอากาศเข้าสู่หัวเผา [27]

นอกเหนือจากอุปกรณ์ที่แสดงในรูปที่ 5.4 แล้ว ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงยังประกอบไปด้วยอุปกรณ์อีกหนึ่งอย่างคือ เครื่องบดเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งชุดเครื่องบดนี้จะถูกติดตั้งเข้ากับโครงสร้างของถังพักเชื้อเพลิง และจะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ตามที่ได้ระบุไว้ในข้อมูลจำเพาะของเครื่องบด ดังแสดงในตารางที่ 4.11 หากเครื่องบดที่ได้มาจากผู้ผลิตสามารถที่จะบดเชื้อเพลิงได้ในอัตราการผลิตที่ระบุไว้ในข้อมูลจำเพาะ ระบบป้อนเชื้อเพลิงจะสามารถเปลี่ยนการจัดเก็บเชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปแบบเม็ด (pellet) ก่อนจะเข้าเครื่องบด แล้วส่งเข้าห้องเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่องที่กำลังความร้อน 1 MW แต่อย่างไรก็ตามควรจะต้องมีการทดสอบอัตราการบดที่แท้จริงที่ได้จากการบดเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง เพื่อประเมินถึงศักยภาพของเครื่องบดด้วย ซึ่งการทดสอบขีดความสามารถของเครื่องบดจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 5.3.1.3

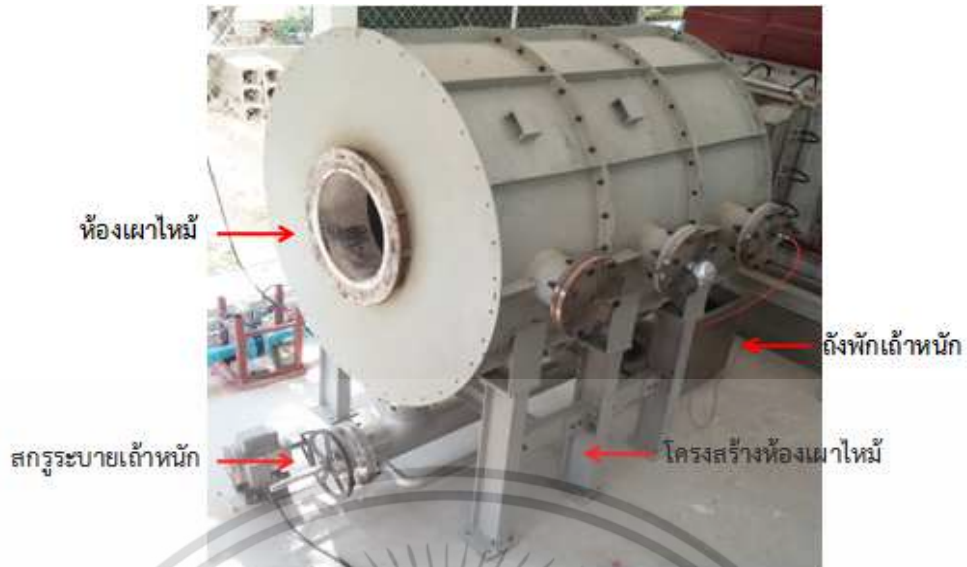


รูปที่ 5.11 เครื่องบดเชื้อเพลิงที่ถูกติดตั้งกับระบบป้อนเชื้อเพลิง

### 5.1.3 ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

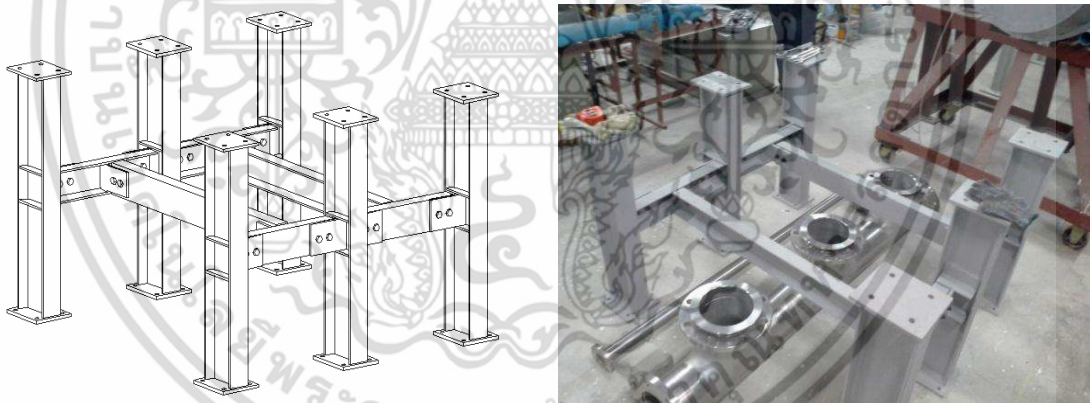
สำหรับอุปกรณ์ชิ้นที่สามของชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง คือ ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลนั้นจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ 4 ส่วนได้แก่ ห้องเผาไหม้ โครงสร้างห้องเผาไหม้ ถังพักถ่านหิน และชุดสกรูระบายถ่านหิน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ลักษณะของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

หลังจากที่ทำการขึ้นรูปเปลือกของห้องเผาไหม้ตามแบบสั่งผลิตเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปจะเป็นกระบวนการทำสี หล่อผนังปูนทนไฟ และการประกอบแต่ละท่อนเข้าด้วยกัน ซึ่งนอกเหนือจากการขึ้นรูป และประกอบห้องเผาไหม้แล้วจะต้องทำการขึ้นรูปโครงสร้าง และระบบสกรูระบายไถ่ ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [29]



รูปที่ 5.13 โครงสร้างห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง [29]



รูปที่ 5.14 สกรูระบายไถ่หนัก และถังพักไถ่หนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



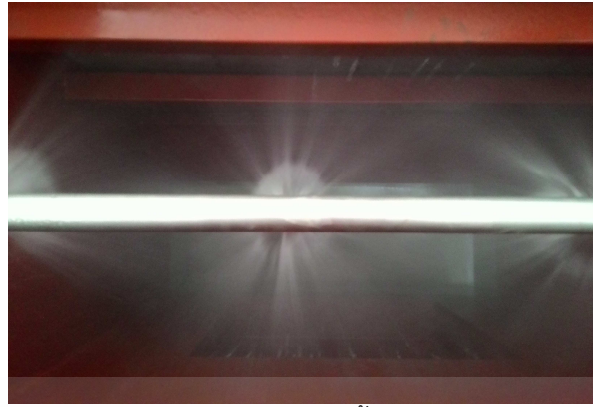
รูปที่ 5.15 มอเตอร์สกรูระบายถ่ายหนัก

#### 5.1.4 ระบบบำบัดไอเสีย

สำหรับแนวคิดในการออกแบบระบบบำบัดไอเสียนั้นถูกกล่าวไว้ในหัวข้อ 4.5 ซึ่งหัวใจของระบบนั้นอยู่ที่ห้องบำบัดซึ่งเป็นการรวมระบบลดอุณหภูมิไอเสีย (evaporative cooling) และระบบกำจัดฝุ่นแบบเปียก (wet scrubber) เข้าไว้ด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.37 สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการส่งแบบสั่งผลิตดังแสดงในภาคผนวก ก5 ให้กับผู้รับเหมาเพื่อทำการขึ้นรูปขึ้นส่วน รูปที่ 5.16 แสดงห้องบำบัดไอเสียที่ทำการขึ้นรูป และประกอบจนแล้วเสร็จ และนอกเหนือจากถังบำบัด ทางที่มวิจัยยังต้องทำการติดตั้งหัวฉีดน้ำ ระบบหมุนเวียนน้ำ รวมไปถึงการติดตั้งพัดลมดูดแก๊สไอเสีย และปล่องไอเสีย เป็นต้น ซึ่งลักษณะในการจัดวางตำแหน่งของระบบบำบัดไอเสียแสดงดังรูปที่ 4.39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5.16 ถังบำบัดไอเสีย (evaporative scrubber) ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



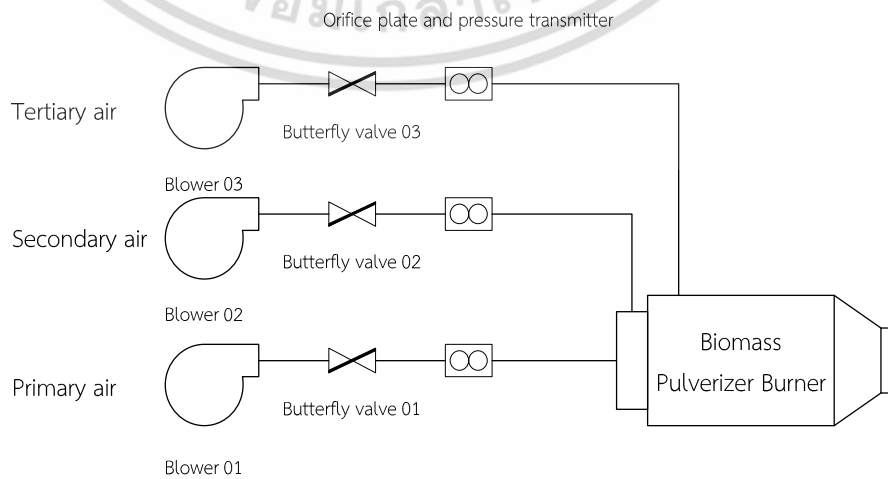
รูปที่ 5.17 ลักษณะของม่านน้ำสำหรับดับเพลิง



รูปที่ 5.18 บ่อดักตะกอน และพัดลมดูดไอเสีย

## 5.2 อุปกรณ์วัด ควบคุม และบันทึกผล

### 5.2.1 ระบบป้อนอากาศ

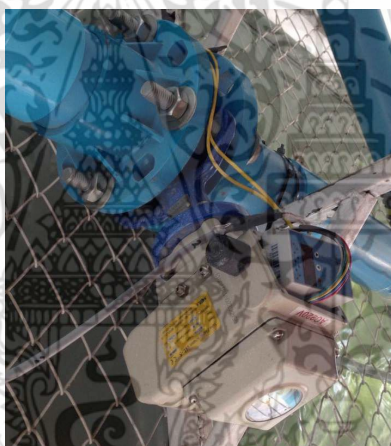


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 รูปที่ 5.19 ระบบป้อนอากาศสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

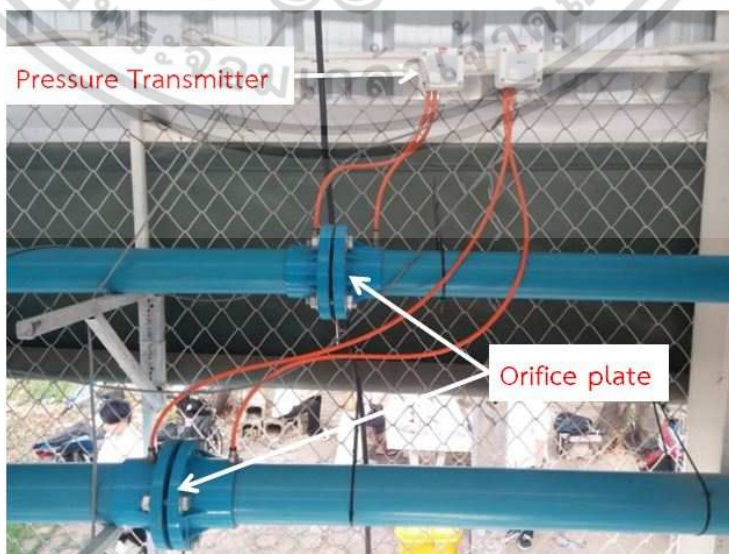
ระบบป้อนอากาศสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง ถูกออกแบบให้อากาศแบ่งออกเป็นสามส่วนตามหน้าที่ของการทำงาน ได้แก่

1. อากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air) ใช้สำหรับจุดติดหัวเผา และออกแบบไว้ให้อากาศที่นำเชื้อเพลิงชีวมวลผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้
2. อากาศส่วนที่สอง (secondary air) เป็นอากาศหลักที่ใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งจะออกแบบให้อากาศไหลผ่านใบพัด (swirl blades) ก่อนเข้าสู่หัวเผา ส่งผลให้อากาศส่วนนี้เข้าสู่ห้องเผาไหม้ในลักษณะที่มีการหมุนควง
3. อากาศส่วนที่สาม (tertiary air) ทำหน้าที่หล่อเย็นห้องเผาไหม้ช่วย และเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber)

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.19 จะพบว่าอุปกรณ์การควบคุมอากาศประกอบไปด้วย พัดลม (blower) สามเครื่องสำหรับอากาศทั้งสามส่วน วาล์วปีกผีเสื้อ (butterfly valve) orifice plate และ pressure transmitter เป็นต้น



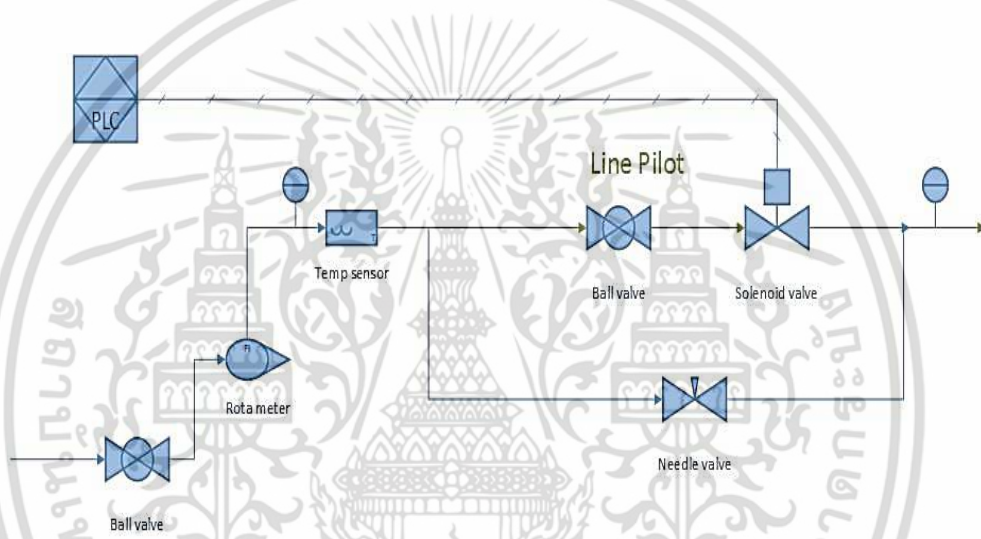
รูปที่ 5.20 วาล์วปีกผีเสื้อ (butterfly valve) หลังการติดตั้ง



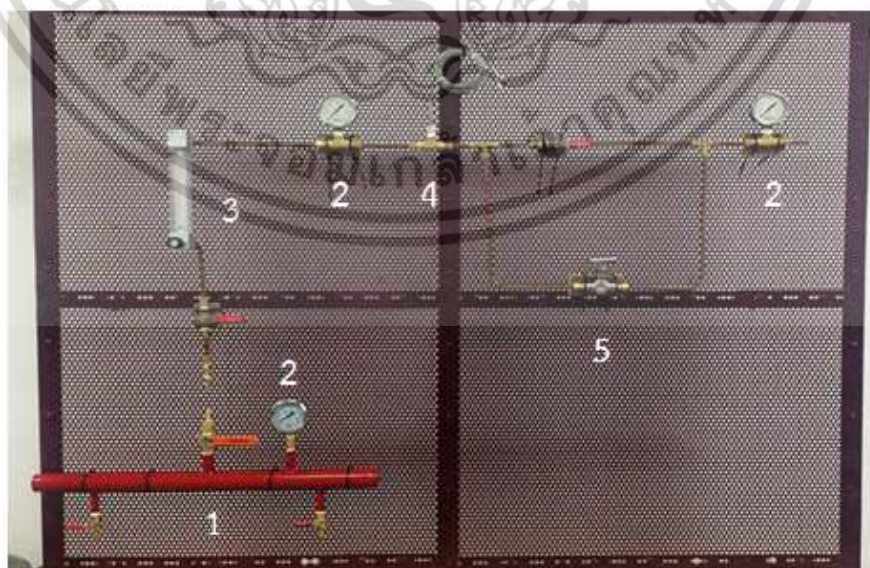
รูปที่ 5.21 ลักษณะการติดตั้ง Orifice plate และ Pressure Transmitter เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากภาควิชาฯ ถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากภาควิชาฯ ถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากภาควิชาฯ ถือว่าผิดกฎหมาย

### 5.2.2 ระบบทางเดินแก๊ส LPG

ทางเดินท่อแก๊ส LPG ทำขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมการจุดระเบิดของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง เมื่อพิจารณารูปที่ 5.22 แก๊สจะถูกส่งผ่านจากตัว Header โดยมี Ball valve เป็นตัวควบคุมเพื่อเปิด-ปิดแก๊สให้ผ่านไปยัง Rota meter เพื่อวัดอัตราการไหลของแก๊ส และวัดแรงดันโดย Pressure gauge ก่อนเข้าอุปกรณ์ Temperature sensor จากนั้นก่อนเข้าหัวเผาจะมีท่อทางเดินแก๊ส 2 ทาง คือ ทางที่ใช้ Solenoid valve ซึ่งจะใช้ไฟฟ้าในการสั่งการเปิดปิดวาล์ว และทางที่ใช้ Needle valve ในการเปิด-ปิดแก๊สซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยมือ ข้อดีของการมีทางเดินแก๊ส 2 ทาง คือเพื่อสะดวกในการซ่อมบำรุง เช่น หาก Solenoid valve มีปัญหาไม่ว่าจะเนื่องจากไฟฟ้าดับ หรือตัว Solenoid valve เสียก็ยังสามารถใช้ Needle valve ในการทำงานต่อไปได้ และก่อนเข้าหัวเผาได้ติดตั้ง Pressure gauge เพื่อวัดแรงดันก่อนเข้าหัวเผาอีกครั้งเพื่อดูว่าความดันของแก๊สก่อนที่จะเข้าหัวเผาเป็นไปตามที่ต้องการ



รูปที่ 5.22 แผนภาพการทำงานของทางเดินท่อแก๊สก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง



รูปที่ 5.23 แผงควบคุมแก๊ส LPG ก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง

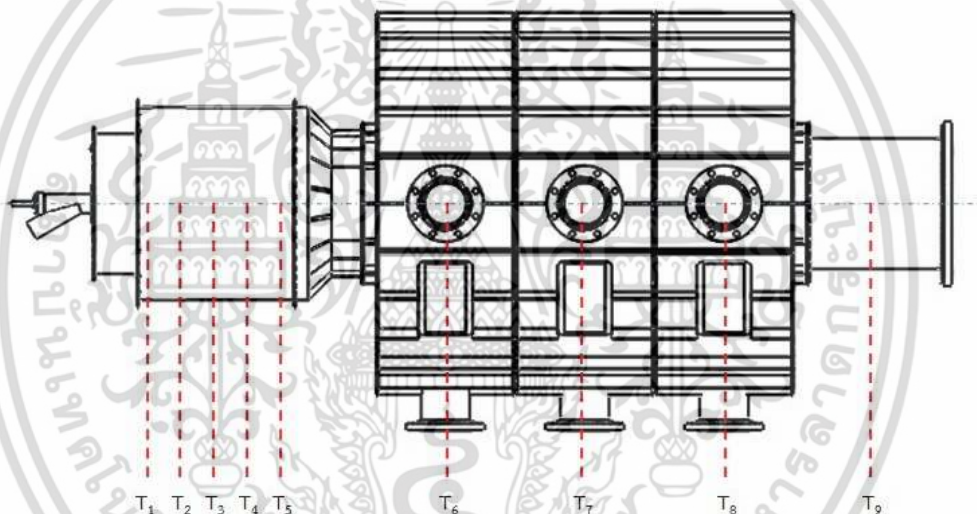
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 U/min
4. Temperature sensor type K
5. Needle valve รุ่น SINV3-F-4N-SS

### 5.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

ในการบันทึกค่าอุณหภูมิจะเก็บบันทึกทั้งหมด 10 ตำแหน่งตามระยะแนวแกนของชุดทดสอบการเผาไหม้ดังแสดงในรูปที่ 5.24 โดยแบ่งเป็นที่บริเวณหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลจำนวน 5 ตำแหน่ง บริเวณห้องเผาไหม้ 3 ตำแหน่ง บริเวณทางช่องทางออกแก๊สไอเสีย และปล่องไอเสียบริเวณละ 1 ตำแหน่ง ซึ่งในการตรวจวัดทำโดยใช้ thermocouple type K เชื่อมต่อกับหน่วยแสดงผล YOKOGAWA รุ่น XL100 และเก็บบันทึกผลเมื่อการเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงที่



รูปที่ 5.24 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิ



รูปที่ 5.25 thermocouple type K และหน่วยแสดงผล YOKOGAWA XL 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.4 อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สไอเสีย

ตำแหน่งที่จะทำการตรวจวัดแก๊สไอเสียคือบริเวณช่องทางออกของแก๊สไอเสีย ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งวัดอุณหภูมิ  $T_9$  ดังแสดงในรูปที่ 5.24 โดยจะทำการตรวจวัด และบันทึกผลเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนหลังการเผาไหม้ ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ และสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดได้แก่เครื่องวัดแก๊ส Testo รุ่น 350 XL แต่เนื่องด้วยตำแหน่งที่จะทำการวัดไอเสียดังกล่าว เป็นบริเวณที่แก๊สไอเสียมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง ( $900-1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) จึงต้องทำการดูดแก๊สไอเสียออกมาวัดภายนอก ดังนั้นจึงได้เพิ่มอุปกรณ์ช่วยในการวัดค่า ได้แก่ หลอดพักและลดอุณหภูมิไอเสีย และปั๊มสุญญากาศดังแสดงในรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.26 เครื่องวัดแก๊สไอเสีย Testo รุ่น 350 XL



(a)

(b)

รูปที่ 5.27 อุปกรณ์ช่วยในการวัดค่าแก๊สไอเสีย (a) หลอดพัก และลดอุณหภูมิไอเสีย และ (b) ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2.5 อุปกรณ์วัด และควบคุมอื่นๆ

### 5.2.5.1 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

สำหรับชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงนั้น ระบบที่มีความจำเป็นต้องทำการควบคุมความเร็วรอบจะประกอบไปด้วยสกรูชนถ่ายเชื้อเพลิง และพัดลมดูดแก๊สไอเสีย ซึ่งทั้งสองระบบจะถูกควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ที่แสดงดังรูปที่ 5.28 และ 5.29 ตามลำดับ



รูปที่ 5.28 อินเวอร์เตอร์ (inverter) ยี่ห้อ Schneider รุ่น ATV312



รูปที่ 5.29 อินเวอร์เตอร์ (inverter) ยี่ห้อ Winner รุ่น WIN-V63

### 5.2.5.2 เครื่องวัดความเร็วรอบ



รูปที่ 5.30 เครื่องวัดความเร็วรอบ (tachometer) ยี่ห้อ Digicon รุ่น DT-245P

สำหรับย่านการทำงาน (ranges) ค่าความแม่นยำ (accuracy) และค่าความละเอียด (resolution) ของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองสามารถตรวจสอบได้ดังตารางที่ 5.1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ค่าความละเอียด และความแม่นยำของเครื่องมือวัด

รายการ	ย่านการทำงาน (Ranges)	ค่าความแม่นยำ (Accuracy)	ค่าความละเอียด (Resolution)
Pressure gauge ยี่ห้อ Nuova fima	0-4 bar	$\pm 1.6 \%$	0.1 bar
Rota meter ยี่ห้อ Nitto รุ่น K200	0-10 l/min	$\pm 5.0 \%$	0.2 l/min
Data logger YOKOGAWA รุ่น XL100 + thermocouple type K	-	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$
Difference pressure transmitter ยี่ห้อ KIMO รุ่น CP 112	0-10 mbar	$\pm 1.5 \%$	0.01 mbar
Difference pressure transmitter ยี่ห้อ KIMO รุ่น CP 115	0-2000 mbar	$\pm 1.5 \%$	1 mbar
Gas analyzer Testo 350 XL	O <sub>2</sub> ; 0-25 Vol.%	$\pm 0.8 \%$	0.1 Vol.%
	CO ; 0-10000 ppm	$\pm 5.0 \%$	1 ppm
	NO ; 0-3000 ppm	$\pm 5.0 \%$	1 ppm
Inverter ยี่ห้อ Schneider รุ่น ATV312	0-50 Hz.	$\pm 0.2 \%$	0.1 Hz.
Inverter ยี่ห้อ Winner รุ่น WIN-V63	0-50 Hz.	$\pm 5.0 \%$	0.01 Hz.
Tachometer ยี่ห้อ Digicon DT-245P	5-99,999 RPM	$\pm 0.05 \%$	0.1 RPM

### 5.2.6 ชุดทดสอบ Sieve analysis

สำหรับชุดทดสอบ sieve analysis จะประกอบไปด้วยเครื่องเขย่าคัดขนาด จาน และถาดรองตะแกรงเบอร์#40, #50, #60, #100, #140 และ#200 ตามลำดับ



รูปที่ 5.31 ชุดทดสอบ sieve analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 เงื่อนไข และวิธีการทดลอง

สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงเงื่อนไข และขั้นตอนในการทดสอบสมรรถนะของชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเน้นที่การทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล และหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) เป็นหลัก ในขณะที่ระบบบำบัดไอเสียนั้นถูกออกแบบ และสร้างขึ้นมาเพื่อให้สามารถใช้งานได้เป็นหลัก โดยที่ยังมิได้มีการทดสอบถึงสมรรถนะการทำงาน

#### 5.3.1 การทดสอบสมรรถนะระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง

ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงถือเป็นระบบหนึ่งที่มีความสำคัญต่อชุดทดสอบการเผาไหม้เป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นระบบที่ส่งผลต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของหัวเผาโดยตรง ดังนั้นระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ดีต้องสามารถลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนอัตราการป้อนได้อย่างรวดเร็ว สำหรับการทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นจะเริ่มต้นตั้งแต่การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของสกรูต่อการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ อัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง และอัตราการผลิตที่แท้จริงของเครื่องบด เป็นต้น

##### 5.3.1.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (RPM - Hz)

เนื่องจากความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายนั้น จะถูกควบคุมด้วยการปรับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์กำลังโดยการใช้อินเวอร์เตอร์ (inverter) ถึงแม้ว่าจะทราบอัตราทด และความเร็วรอบสูงสุดของมอเตอร์เกียร์ แต่เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการทดลองในลำดับถัดไป จึงต้องมีการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าว

##### เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (RPM)

ตัวแปรตาม : ความเร็วรอบของสกรูขนถ่าย

ตัวแปรควบคุม : ตำแหน่งในการวัดความเร็วรอบ

##### วิธีการทดลอง

1. เปิด switch มอเตอร์ของสกรูขนถ่าย และอินเวอร์เตอร์
2. ใช้อินเวอร์เตอร์ (inverter) ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรู โดยเริ่มต้นที่ 1 Hz
3. ใช้เครื่องวัดความเร็วรอบ (tachometer) วัดความเร็วรอบที่แกนเพลลา ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยบันทึกค่าลงในตาราง
4. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 3-5 โดยปรับเพิ่มความถี่ของกระแสไฟฟ้าขึ้นทีละ 5 Hz จนถึง 50 Hz

##### 5.3.1.2 การทดลองหาอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงชีวมวล

เมื่อพิจารณาสมการที่ 3.4 การคำนวณอัตราการการขนถ่ายตามทฤษฎี จะพบว่า มีสองตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราการขนถ่าย คือความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ( $\rho_b$ ) และแฟกเตอร์ความเต็มของ วัสดุ ( $k$ ) นั่นคือถึงแม้ว่าจะใช้ระบบสกรูขนถ่ายชุดเดียวกัน แต่เมื่อทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการขนถ่ายก็จะเปลี่ยนไป ดังนั้นหัวข้อนี้จึงเป็นการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่าย (kg/s) กับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz) ของเชื้อเพลิงสามชนิดที่มีความแตกต่างกัน ได้แก่ ไร่หยาบ ขี้เลื่อยบดละเอียด และขี้เลื่อยอัดแท่ง ซึ่งจะนำไปสู่การสร้างความสัมพันธ์หรือความเชื่อมโยงระหว่างชุดสกรูลำเลียงที่ได้ทำการออกแบบ กับเชื้อเพลิงแต่ละประเภท

#### เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : ชนิดของเชื้อเพลิง และความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (RPM)

ตัวแปรตาม : น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ถูกป้อนสู่ภาชนะบรรจุ (kg)

ตัวแปรควบคุม : เวลาในการขนถ่ายเชื้อเพลิงที่ 1 นาที

#### วิธีการทดลอง

1. บรรจุเชื้อเพลิงลงในถังพักเชื้อเพลิง (hopper)
2. ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรู ซึ่งการทดลองจะเริ่มต้นที่ 1 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 1 Hz ถึง 5 Hz
7. เมื่อทำการทดลองครบแล้ว ให้ทำความสะอาดสกรูขนถ่าย และทำการเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิง แล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-6

#### **5.3.1.3 การทดสอบกำลังการผลิตของเครื่องบด**

เครื่องบดที่ทำการติดตั้งเข้ากับระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงนั้น เป็นเครื่องบดสำเร็จรูปที่ได้รับมาจากทางผู้ผลิต และเมื่อพิจารณาข้อมูลจำเพาะของเครื่องบดที่แสดงในตารางที่ 4.11 จะพบว่ากำลังการผลิตที่ได้ระบุไว้ในตารางนั้นถูกระบุหมายเหตุไว้ว่าเป็นค่าโดยประมาณ ซึ่งทางผู้ผลิตไม่ได้ระบุไว้ว่าเป็นค่าที่มาจากทดสอบบดวัสดุชนิดใด หรือใช้รูตะแกรงขนาดเท่าไร ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบกำลังการผลิตที่เครื่องบดสามารถทำได้จริงกับเชื้อเพลิงที่จะนำมาทดสอบนั่นคือขี้เลื่อยอัดแท่ง เพื่อเป็นการประเมินถึงสมรรถนะของเครื่องบด และแนวทางในการทดลองในลำดับถัดไปด้วย

#### เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : ขนาดของรูตะแกรงเครื่องบด 0.5 mm 1.0 mm และ 1.5 mm. ตามลำดับ

ตัวแปรตาม : อัตราการบดเชื้อเพลิง (kg/min)

ตัวแปรควบคุม : เวลาในการขนถ่ายเชื้อเพลิงที่ 1 นาที

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

#### วิธีการทดลอง

1. บรรจุขี้เลื่อยอัดแท่ง (pellet) ลงในถังพักเชื้อเพลิง (hopper)
2. ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรู โดยเริ่มต้นที่ 0.5 Hz
3. เปิด switch มอเตอร์ของสกรูขนถ่าย และอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เชื้อเพลิงถูกป้อนไปยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใจและต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องบด แล้วปิดการจ่ายกระแสที่อินเวอร์เตอร์

4. นำภาชนะมารองรับเชื้อเพลิงที่ออกจากเครื่องบด ที่ใช้ตะแกรงที่มีรูขนาด 0.5 mm โดยจับเวลา 1 นาที แล้วปิดการจ่ายกระแสที่อินเวอร์เตอร์

5. นำเชื้อเพลิงที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย และบันทึกค่าลงในตาราง

6. ทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-5 โดยปรับเพิ่มความถี่ของกระแสไฟฟ้าขึ้นทีละ 0.5 จนถึง 5 Hz

7. ทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-6 โดยเปลี่ยนตะแกรงเป็นขนาดรู 1 mm. และ 1.5 mm.

ตามลำดับ

#### 5.3.1.4 การทดสอบขนาดของเชื้อเพลิงที่ผ่านการบด

หลักจากที่ได้ทราบกำลังการผลิตสูงสุดที่เครื่องบดสามารถทำได้ และได้ทำการทดสอบการเผาไหม้ไปแล้วในเบื้องต้น หัวข้อนี้จะเป็นการนำตัวอย่างของเชื้อเพลิงที่บดผ่านตะแกรงที่มีขนาด 0.5 mm. มาทำการวิเคราะห์แยกขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิง ซึ่งค่าสัดส่วนของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงที่ได้มานั้นจะถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลต่อไป

##### เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : ความละเอียดของตะแกรง

ตัวแปรตาม : น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ตกค้างบนตะแกรง (kg)

ตัวแปรควบคุม : น้ำหนักตัวอย่างเชื้อเพลิงเริ่มต้น 100 กรัม

เวลาในการลอง 10 นาที

ชีวมวลจากซีลี้อยู่ในถังพาราที่บดผ่านรูตะแกรงขนาด 0.5 mm.

##### วิธีการทดลอง

1. ทำความสะอาดตะแกรง แล้วทำการชั่งน้ำหนักของตะแกรงแต่ละเบอร์บันทึกค่า
2. นำตะแกรงมาเรียงซ้อนกัน โดยให้ตะแกรงขนาดใหญ่อยู่ชั้นบนสุด ซึ่งสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ #40, #50, #60, #100, #140 และ#200
3. นำเชื้อเพลิงตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 100 กรัม ใส่ไปในตะแกรงชั้นบนสุด ปิดฝาให้แน่น แล้วนำเข้าเครื่องเขย่าใช้เวลาในการเขย่าประมาณ 10 นาที แล้วนำตะแกรงแต่ละอันไปชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักตะแกรงรวมกับเชื้อเพลิงที่ค้างอยู่บนตะแกรง จดบันทึกค่า
4. ทำความสะอาดตะแกรงให้เรียบร้อยก่อนที่จะทำการทดลองครั้งต่อไป
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2-4

#### 5.3.2 การทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

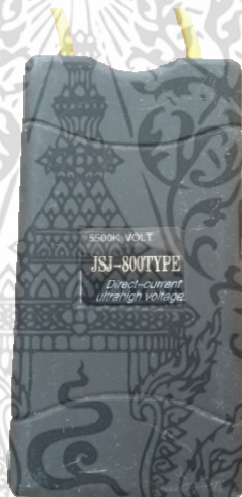
ในการทดสอบการเผาไหม้เพื่อหาสมรรถนะ และย่านการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมานั้น ต้องทำการทดสอบเป็นลำดับขั้น ได้แก่ การทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิง การทดสอบขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีความเหมาะสม และการทดสอบอิทธิพลขององศาใบบิด (swirler blade) เป็นต้น เพื่อนำผลสรุปจากการทดลองนั้นๆไปใช้เป็นตัวแปรควบคุมของการทดลองในขั้นถัดไป ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ในการทดสอบคือผงซีลี้อยู่ในถังพารา

### 5.3.2.1 วิธีการจุดระเบิด และการอุ่นหัวเผา

ก่อนที่จะทำการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง จะต้องทำการอุ่นหัวเผาและห้องเผาไหม้ เพื่อให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) สูงขึ้นจนกระทั่งเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ป้อนเข้าสู่หัวเผาสามารถเกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเองได้ สำหรับการจุด และการอุ่นหัวเผาในเบื้องต้นจะใช้เชื้อเพลิงแก๊ส LPG ซึ่งการทดสอบปริมาณ LPG ที่เหมาะสมกับการอุ่นหัวเผาสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [26] แต่เนื่องจากห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลมีขนาดใหญ่หากใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงในการอุ่นเพียงอย่างเดียว จะต้องใช้แก๊ส LPG ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในช่วงการอุ่นหัวเผาจะต้องให้เชื้อเพลิงชีวมวลผงร่วมด้วย ซึ่งการอุ่นเตามีลำดับขั้นตอนดังนี้

#### การจุดหัวเผา

1. เปิดวาล์วอากาศส่วนที่สองที่ 30% อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 0.057 kg/s
2. เปิดวาล์วแก๊ส ปรับค่าอัตราการไหลแก๊สโดยใช้ needle valve ที่ติดตั้งอยู่บนแผงควบคุมแก๊ส LPG ดังแสดงในรูปที่ 5.23 โดยปรับอัตราการไหลที่ 1 L/min
3. ทำการเปิดอุปกรณ์ขยายแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้เกิดประกายไฟบริเวณเคี้ยวจุด



รูปที่ 5.32 อุปกรณ์ขยายแรงดันไฟฟ้าสำหรับจุดประกายไฟ

#### การอุ่นหัวเผา

เมื่อทำการจุดไฟที่หัวเผาแก๊ส LPG เป็นที่เรียบร้อยแล้วจะทำการเพิ่มอัตราการไหลของ LPG เป็น 5 L/min ทำการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องจนอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว อุณหภูมิสูงสุดบริเวณแกนกลางห้องเผาไหม้ช่วยประมาณ 400 - 500 °C ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นจะทำการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง อากาศส่วนที่หนึ่ง และอากาศส่วนที่สามเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอุ่นหัวเผาจะเทียบเท่าการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 300 kW ทำการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องจนอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว อุณหภูมิสูงสุดบริเวณแกนกลางห้องเผาไหม้ช่วยจะอยู่ที่ประมาณ 800 °C จึงหยุดปล่อยแก๊ส LPG

### 5.3.2.2 การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงต่อพฤติกรรมการเผาไหม้

สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการนำเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีขนาดของอนุภาคแตกต่างกัน ป้อนสู่หัวเผา และทดสอบความสามารถในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เพื่อหาขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งการทดลองนี้จะมีลำดับขั้นตอนเหมือนขั้นตอนการอุ่นหัวเผา เพียงแต่จะทำการปรับเปลี่ยนขนาดของอนุภาค และลดกำลังความร้อนในการเผาไหม้ลงเหลือ 100 kW

#### เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : ขนาดของเชื้อเพลิงที่ผ่านรูตะแกรงเครื่องบด 0.5, 1.0 และ 1.5 mm.

ตัวแปรตาม : ลักษณะของเปลวไฟจากการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิง

ตัวแปรควบคุม : แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขในการทดลอง (ตัวแปรควบคุม) เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิง

อัตราการไหลของแก๊ส LPG, L/min	5.00
อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล, kg/min (Hz)	0.38 (0.30)
อากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air)	ใช้อากาศที่ก่อกำเนิดโดยเครื่องบด
อากาศส่วนที่สอง (secondary air), kg/s (%valve)	0.055 (30)
พัดลมดูดอากาศ, Hz	30

#### วิธีการทดลอง

1. บรรจุเชื้อเพลิงไม้ยางพาราอัดแท่งลงในถังพักเชื้อเพลิง (hopper)
  2. ตรวจสอบตะแกรงของเครื่องบด โดยเริ่มทดลองที่ขนาดรูตะแกรงเท่ากับ 1.5 mm.
  3. ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรูขนถ่ายตามเงื่อนไขการทดลอง
  4. เปิด switch พัดลมอากาศส่วนที่สอง และปรับวาล์วตามเงื่อนไขการทดลอง
  5. ทำการจุดไฟ และอุ่นหัวเผาด้วยแก๊ส LPG
  6. เปิด switch มอเตอร์ของสกรูขนถ่าย และอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เชื้อเพลิงถูกลำเลียงไปยังเครื่องบด และลมจากเครื่องบดจะเป็นตัวส่งเชื้อเพลิงผงเข้าสู่หัวเผา
  7. บันทึกภาพลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้
  8. ทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-7 โดยเปลี่ยนใช้ขนาดรูตะแกรง 1 mm. และ 0.5 mm.
- ตามลำดับ

### 5.3.2.3 การศึกษาอิทธิพลขององศาใบพัด (swirl blades) ต่อพฤติกรรมการเผาไหม้

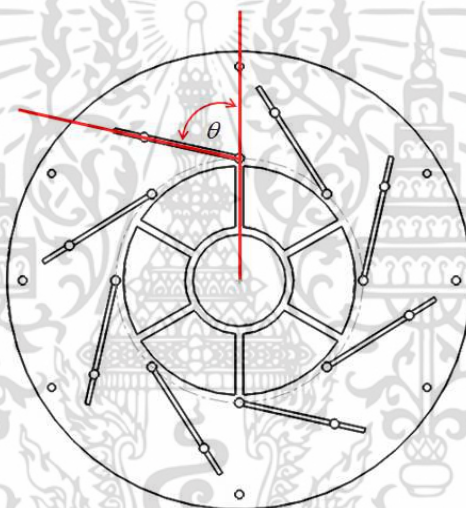
สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบสมรรถนะของใบพัดในการสร้างกระแสอากาศที่มีลักษณะหมุนควงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย โดยจะทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย ที่องศาของใบพัดที่แตกต่างกันสามระดับคือมุม 100 องศา 85 องศา และ 60 องศา ตามลำดับ ซึ่งเป็นย่านการปรับองศาที่ใบพัดจะสามารถทำได้ ลักษณะในการอ้างอิงมุมแสดงดังรูปที่ 5.33 โดยจะทำการทดสอบการเผาไหม้ที่ กำลังความร้อน 300 kW เงื่อนไขการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

ตัวแปรควบคุม	200 kW	300 kW	400 kW	500 kW
Biomass Fuel, kg/s (Hz)	0.0127 (1)	0.0189 (1.45)	0.0251 (1.95)	0.0314 (2.40)
Primary Air, kg/s (%valve1)	0.0089 (25)	0.0134 (31)	0.0178 (36)	0.0223 (43)
Secondary Air, kg/s (%valve2)	0.0580 (30)	0.0869 (38)	0.1159 (46)	0.1449 (54)
Tertiary Air, kg/s (%valve3)	0.0223 (25)	0.0334 (30)	0.0446 (40)	0.0557 (50)

\*\*Operate at 30 Hz ID Fan

\*\*Excess air = 15 %



รูปที่ 5.33 ลักษณะการอ้างอิงมุมของใบพัด

เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : องศาของใบพัด (swirl blades) ที่ 100, 85 และ 60 องศา ตามลำดับ

ตัวแปรตาม : ลักษณะของเปลวไฟ และพฤติกรรมของการเผาไหม้ภายในหัวเผา

ตัวแปรควบคุม : ชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่บดผ่านรูตะแกรงขนาด 0.5 mm.

อัตราการป้อนอากาศ และเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่ 300 kW. ดังแสดงในตารางที่ 5.3

วิธีการทดลอง

1. บรรจุเชื้อเพลิงชีวมวลลงในถังพักเชื้อเพลิง (hopper)
2. ปรับองศาของใบพัดไปที่ตำแหน่งมุม 100 องศา.
3. ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรูขนถ่ายตามเงื่อนไขการทดลอง
4. เปิด switch พัดลมอากาศส่วนที่สอง และปรับวาล์วตามเงื่อนไขการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### วิธีการทดลอง

1. บรรจุเชื้อเพลิงชีวมวลผงลงในถังพักเชื้อเพลิง (hopper)
2. ปรับองศาของใบพัดไปที่ตำแหน่งมุม 100 องศา.
3. ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรูขนถ่ายตามเงื่อนไขการทดลอง
4. เปิด switch พัดลมอากาศส่วนที่สอง และปรับวาล์วตามเงื่อนไขการทดลอง
5. ทำการจุดไฟ และอุ่นหัวเผาด้วยแก๊ส LPG
6. เปิด switch มอเตอร์ของสกรูขนถ่าย และอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เชื้อเพลิงถูกลำเลียงไปยังกล่องผสม และลมจากเครื่องบดจะเป็นตัวส่งเชื้อเพลิงผงเข้าสู่หัวเผา
7. เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถเผาไหม้ด้วยตัวเองได้อย่างต่อเนื่อง ให้ทำการปิดแก๊ส LPG เมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้คงที่ ให้ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิทั้ง 20 ตำแหน่ง และบันทึกภาพลักษณะของเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้ช่วย
8. ทำการบันทึกค่าไอเสีย
9. ทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-8 โดยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ และเชื้อเพลิงไปที่ 500 kW

#### 5.3.2.5 การศึกษาย่านการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย

ในการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงนั้น จะถูกจำกัดการทดสอบด้วยปัจจัยในหลายๆ ด้าน เช่น ความสามารถในการบดเชื้อเพลิงของเครื่องบด ขนาดของโบลเวอร์ (blower) และขีดความสามารถของชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้ที่ทำการออกแบบขึ้น เป็นต้น ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาศักยภาพการเผาไหม้ในช่วง 200 kW ถึง 500 kW โดยใช้องศาใบพัดที่ 100 องศา และใช้เงื่อนไขการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.3

### เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : อัตราการป้อนอากาศ และเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตัวแปรตาม : การกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน ( $^{\circ}\text{C}$ )

ตัวแปรควบคุม : ชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่บดผ่านรูตะแกรงขนาด 0.5 mm.

มุมองศาใบพัดที่ 100 องศา

สัดส่วนของอากาศ อากาศส่วนที่ 1 10%

อากาศส่วนที่ 2 65%

อากาศส่วนที่ 3 25%

อากาศส่วนเกินที่ 15 % ดังแสดงในตารางที่ 5.3

สำหรับวิธีการทดลองนั้นจะดำเนินการเหมือนในหัวข้อที่ผ่านมา แต่จะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิเฉพาะบริเวณแกนกลางของหัวเผา และห้องเผาไหม้ทั้งหมด 10 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งในการบันทึกอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 5.24

## บทที่ 6

### ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง

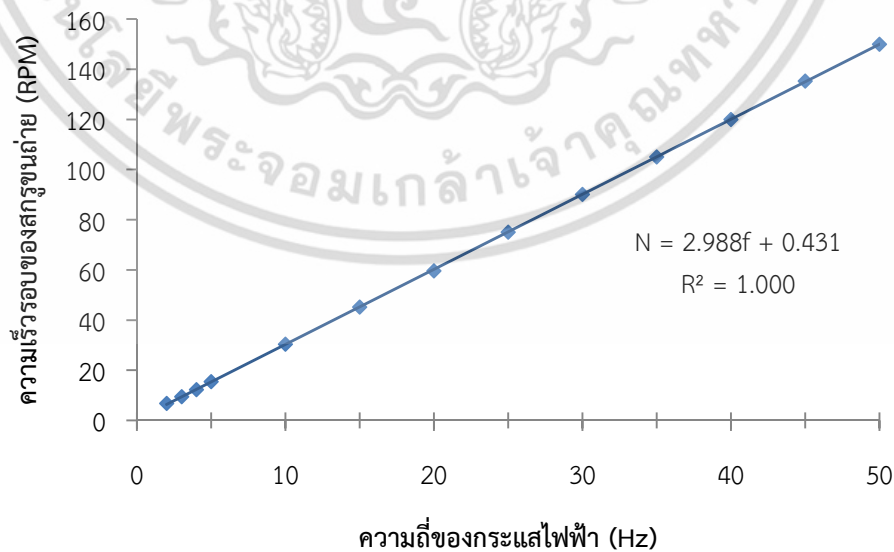
จากบทที่ผ่านมาเราได้ทราบถึงหลักการในการออกแบบชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง รวมไปถึงวิธีการทดสอบการทำงานของชุดทดสอบ และเงื่อนไขการทดสอบการเผาไหม้ของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว สำหรับบทนี้จึงเป็นการนำเสนอผลการทดลอง และการอภิปรายผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจะนำไปสู่ข้อสรุปทางด้านสมรรถนะการทำงานของระบบต่างๆ รวมไปถึงสมรรถนะ และย่านการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วยต่อไป

#### 6.1 ผลการทดสอบระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง

ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงถือเป็นระบบหนึ่งที่มีความสำคัญต่อชุดทดสอบการเผาไหม้เป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นระบบที่ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของหัวเผา หากเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าสู่เตาในลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง อาจส่งผลให้การเผาไหม้เกิดความไม่ต่อเนื่อง ความดันหรือพฤติกรรมของการเผาไหม้ภายในหัวเผาเปลี่ยนแปลงไปอย่างกะทันหัน ซึ่งอาจจะนำไปสู่ปรากฏการณ์เป่าดับได้ ดังนั้นระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ดีต้องสามารถลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถตอบสนองการเปลี่ยนอัตราการป้อนได้อย่างรวดเร็ว

##### 6.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบสกรุนถ่ายกับความถี่ของกระแสไฟฟ้า

เนื่องจากการทดลอง สามารถปรับความเร็วรอบของสกรุนถ่ายได้ด้วยการปรับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์โดยการใช้อินเวอร์เตอร์ (inverter) ดังนั้นจึงต้องทราบค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการควบคุมอัตราการขนถ่ายของสกรู



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของสกรุนถ่าย (RPM) - ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณารูปที่ 6.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของสกรูขนถ่าย (RPM) กับความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz) ที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรูขนถ่าย จะพบว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้น ซึ่งได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$N = 2.988f + 0.431 \tag{6.1}$$

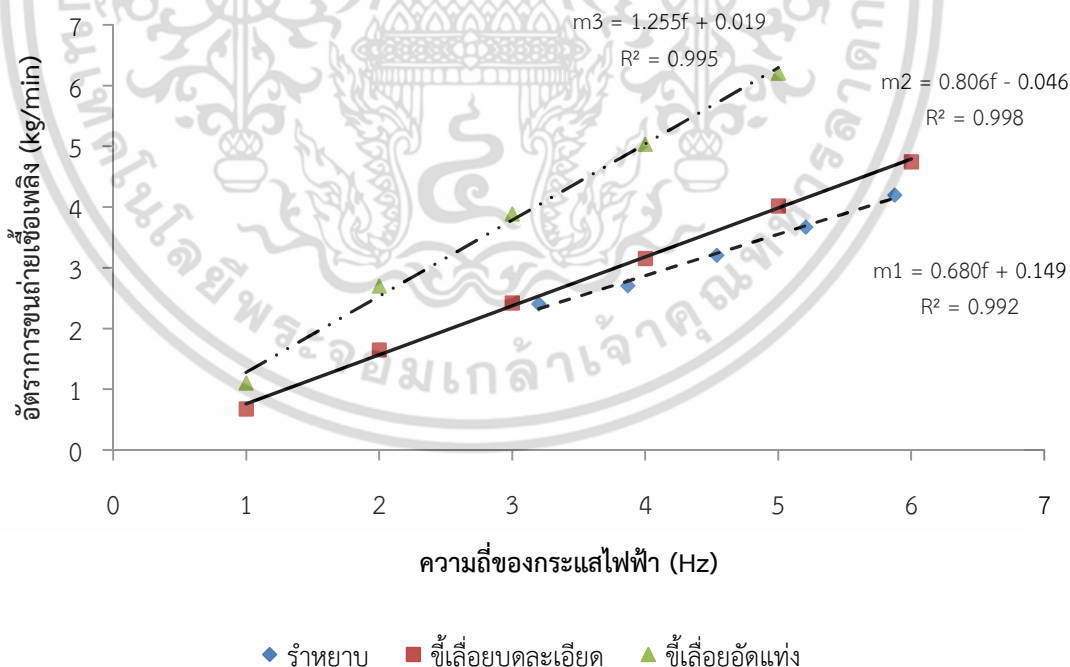
เมื่อ  $N$  คือความเร็วรอบของสกรูขนถ่าย (RPM)

$f$  คือความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz)

เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ (inverter) ที่นำมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของสกรูขนถ่าย มีค่าความละเอียดในการปรับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.5 Hz นั้นจะสามารถปรับกระแสที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ได้ในย่าน 0.5 - 50 Hz ซึ่งจากสมการความสัมพันธ์ที่ 6.1 จะพบว่าความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายที่สามารถควบคุมได้คือ 1.925 - 149.831 รอบต่อนาที

### 6.1.2 การทดลองหาอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงชีวมวล

จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ทราบแล้วว่า ตัวแปรต้นที่เป็นตัวกำหนดหรือควบคุมความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายคือความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์ เพื่อความสะดวกในการใช้ข้อมูลจึงต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่าย (kg/min) ต่อความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz) ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง (kg/min) - ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz)

จากรูปที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง (kg/min) ต่อความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz) ของเชื้อเพลิงสามชนิดที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน คือ ราหยาบ ขี้เลื่อย บดละเอียด และขี้เลื่อยอัดแท่ง ซึ่งเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดจะแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นเชิงเส้นระหว่างตัวแปรทั้งสอง แต่ความชันของความเป็นเชิงเส้นจะแตกต่างกัน ซึ่งได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$m_1 = 0.680f + 0.149 \text{ (kg/min)} \quad (6.2)$$

$$m_2 = 0.806f + 0.046 \text{ (kg/min)} \quad (6.3)$$

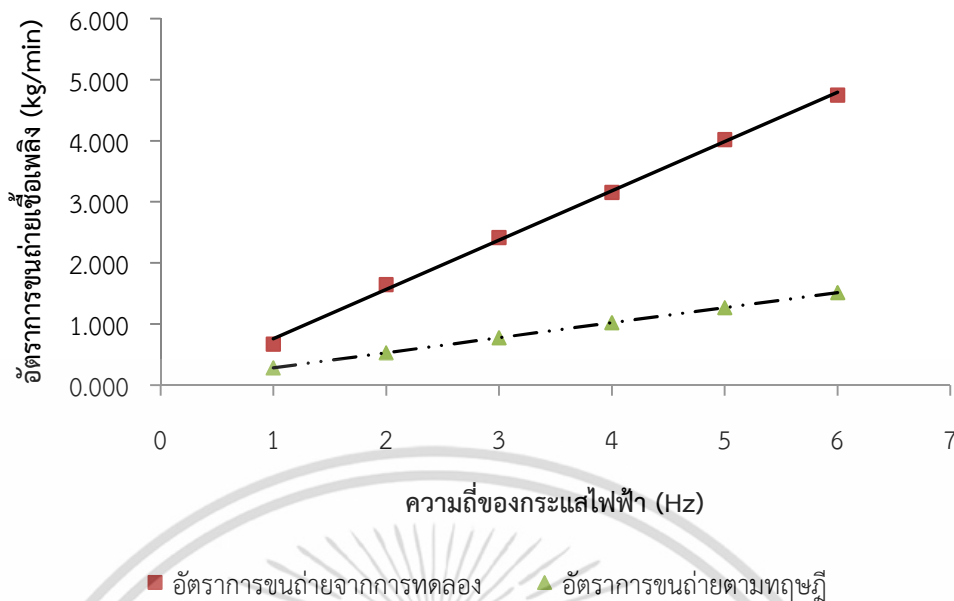
$$m_3 = 1.255f + 0.019 \text{ (kg/min)} \quad (6.4)$$

โดยที่  $m_1$ ,  $m_2$  และ  $m_3$  คืออัตราการขนถ่ายของราหยาบ ขี้เลื่อยบดละเอียด และขี้เลื่อยอัดแท่ง (pellet) ตามลำดับ หากต้องการทราบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายต่อความเร็วรอบของใบสกรูสามารถนำความสัมพันธ์สมการที่ 6.1 แทนค่าในสมการที่ 6.2 6.3 และ 6.4 ได้ ตัวอย่างเช่นเมื่อแทนค่าสมการที่ 6.1 ในสมการที่ 6.3 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายต่อความเร็วรอบใบสกรู ของขี้เลื่อยบดละเอียดดังนี้

$$m_2 = 0.269N + 0.07 \text{ (kg/min)} \quad (6.5)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 3.4 การคำนวณอัตราการขนถ่ายตามทฤษฎี จะสังเกตเห็นว่ามีสองตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราการขนถ่าย คือความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ( $\rho_b$ ) และแฟกเตอร์ความเต็มรางของ วัสดุ ( $k$ ) ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน ก็จะทำให้พฤติกรรมความเป็นเชิงเส้นที่มีความแตกต่างกัน เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าระหว่างความหนาแน่นของเชื้อเพลิง กับแฟกเตอร์ความเต็มรางของวัสดุ ตัวแปรใดที่มีอิทธิพลต่ออัตราการขนถ่ายมากกว่ากัน จึงต้องทำการศึกษาเปรียบเทียบอัตราขนถ่ายทางทฤษฎีที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.4 กับอัตราขนถ่ายจากการทดลองของสกรูลำเลียงที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยทำการพิจารณาอัตราการขนถ่ายของเชื้อเพลิงที่จะถูกนำไปใช้ในการทดลองการเผาไหม้ต่อไป นั่นคือขี้เลื่อยบดละเอียด ที่มีความหนาแน่นประมาณ  $396 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งได้ผลการเปรียบเทียบดังรูปที่ 6.3

จากผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 6.3 พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบเท่ากัน อัตราการขนถ่ายที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากกว่าอัตราการขนถ่ายที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองคือ ค่าแฟกเตอร์ความเต็มรางของวัสดุ ( $k$ ) (แฟกเตอร์ความเต็มรางที่ใช้ในการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 0.3 ) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการขนถ่าย ถ้าค่าแฟกเตอร์ความเต็มรางของวัสดุยิ่งมากจะทำให้วัสดุขนถ่ายไหลตัวได้ดี มีผลทำให้อัตราการขนถ่ายสูงขึ้นด้วย จากผลการทดลองเราสามารถคำนวณย้อนกลับเพื่อหาแฟกเตอร์ความเต็มรางของวัสดุได้จากสมการที่ 3.4 ซึ่งผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.3 เปรียบเทียบอัตราการขนถ่ายจากการทดลอง กับอัตราการขนถ่ายตามทฤษฎี (k=0.3)

ตารางที่ 6.1 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาแฟกเตอร์ความเต็มรวงของสกรูขนถ่าย

ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz)	ความเร็วรอบของสกรูขนถ่าย (RPM)	ขี้เลื่อยอัดแท่ง (pellet)		ขี้เลื่อยบดละเอียด	
		อัตราการขนถ่าย (kg/min)	แฟกเตอร์ความเต็มรวง (k)	อัตราการขนถ่าย (kg/min)	แฟกเตอร์ความเต็มรวง (k)
1.00	3.420	1.100	0.713	0.673	0.715
2.00	6.410	2.697	0.932	1.646	0.933
3.00	9.400	3.885	0.915	2.418	0.935
4.00	12.390	5.033	0.899	3.154	0.925
5.00	15.380	6.208	0.894	4.017	0.950

ในการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาแฟกเตอร์ความเต็มรวงของสกรูนั้น ได้ทำการคำนวณเปรียบเทียบเชื้อเพลิงสองชนิดที่มีขนาด และความหนาแน่นที่ต่างกัน ได้แก่ ขี้เลื่อยอัดแท่ง และขี้เลื่อยบดละเอียด ที่มีความหนาแน่นประมาณ 650 และ 396 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ จากตารางที่ 6.1 จะพบว่าค่าแฟกเตอร์ความเต็มรวงเฉลี่ยของขี้เลื่อยอัดแท่งจะอยู่ที่ 0.871 ในขณะที่ขี้เลื่อยบดละเอียดจะมีแฟกเตอร์ความเต็มรวงเฉลี่ยประมาณ 0.899 ซึ่งค่าทั้งสองมีความใกล้เคียงกันมากจนอาจจะกำหนดให้มีค่าเท่ากันที่ประมาณ 0.9

สาเหตุหลักที่ส่งผลให้แฟกเตอร์ความเต็มรวงของวัสดุสองชนิดที่มีลักษณะทางกายภาพ และความหนาแน่นที่ต่างกันค่อนข้างมาก มีค่าใกล้เคียงกันอาจจะเนื่องมาจากสกรูขนถ่ายที่ทำการออกแบบมีรูปร่างที่สั้น ส่งผลให้การสูญเสียระหว่างการขนถ่ายเกิดขึ้นน้อยมาก จนอาจจะกล่าวได้ว่าสำหรับสกรูขนถ่ายที่มีความยาวไม่มาก แฟกเตอร์ความเต็มรวงของวัสดุแทบจะไม่ส่งผลต่ออัตราการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนถ่ายวัสดุเลย ดังนั้นตัวแปรต้นที่ส่งผลต่ออัตราการขนถ่ายวัสดุจะถูกตัดเหลือเพียงตัวแปรเดียวนั้น คือ ความหนาแน่นของวัสดุ ( $\rho_b$ ) เมื่อทำการแทนค่าคงที่ของการออกแบบสกรูขนถ่ายดังตารางที่ 4.9 ลงในสมการที่ 3.4 จะทำให้ได้สมการในการประมาณค่าอัตราการขนถ่ายของชุดสกรูขนถ่ายที่ทำการออกแบบไว้ดังนี้

$$m_s = 0.000632\rho_b N \text{ (kg/min)} \quad (6.6)$$

หรือ

$$m_s = \rho_b(0.0019f + 0.0003) \text{ (kg/min)} \quad (6.7)$$

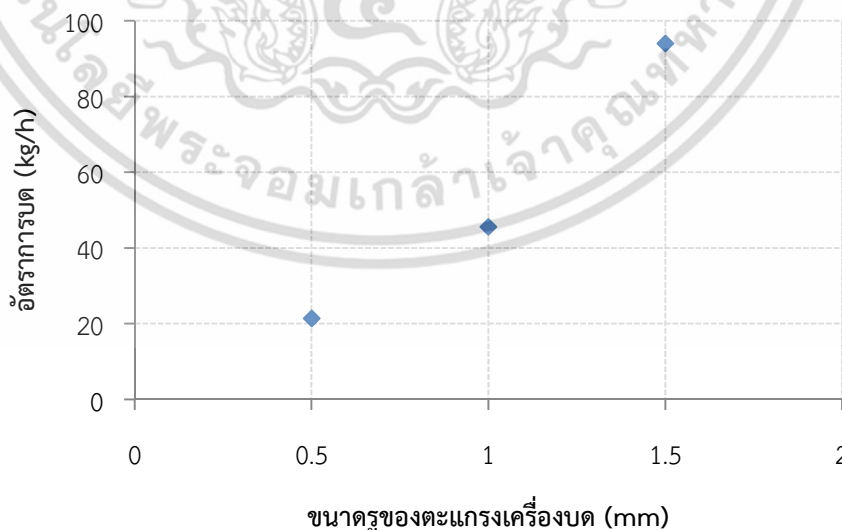
แต่อย่างไรก็ตามสมการ 6.6 และ 6.7 เป็นเพียงสมการที่ใช้ในการประมาณค่าอัตราการขนถ่ายของสกรูขนถ่ายเครื่องนี้เท่านั้น ซึ่งสมการทั้งสองจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (% error) ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่ใช้ขนถ่าย หากต้องการความแม่นยำของอัตราการขนถ่ายควรจะทำทดลองเพื่อหาอัตราการขนถ่ายซ้ำอีกครั้งหนึ่ง

### 6.1.3 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องบด

เครื่องบดเป็นอุปกรณ์ที่ถูกเพิ่มเติมเข้ามาเพื่อแก้ปัญหาคุณภาพของเชื้อเพลิงดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.3.4 และเนื่องจากเครื่องบดที่ทำการติดตั้งนั้น เป็นเครื่องบดสำเร็จรูปที่ได้รับมาจากผู้ผลิต จึงต้องทำการทดสอบสมรรถนะต่างๆของเครื่อง ได้แก่ อัตราการผลิต และการวิเคราะห์ขนาดของเชื้อเพลิงที่ผ่านการบด เป็นต้น

#### 6.1.3.1 การทดสอบความสามารถของเครื่องบด

เป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบอัตราการผลิตที่แท้จริง เมื่อขนาดของตะแกรงเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 6.4 การเปรียบเทียบอัตราการผลิตของเครื่องบดต่อขนาดรูของตะแกรงเครื่องบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบกำลังการผลิตจริงกับข้อมูลจากผู้ผลิต

รุ่น MODEL	มอเตอร์ POWER (Hp : kW )	รอบเครื่อง* SPEED (RPM)	กำลังการผลิต CAPACITY (kg/hr)			
			จากผู้ผลิต	จากการทำงานจริง ตามขนาดตะแกรง		
				0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm
YPT-302 (F/S)	5 : 3.7	4000	150-300	21.42	45.60	93.96

จากการทดสอบการทำงานของเครื่องบดแบบ Pin mill ที่มีความเร็วรอบของจานหมุนประมาณ 4000 รอบต่อนาที ใช้มอเตอร์ขนาด 5 Hp โดยใช้ตะแกรงที่มีขนาดรู 0.5 mm, 1 mm, และ 1.5 mm. พบว่าเมื่อตะแกรงมีขนาดรูที่ใหญ่ขึ้น เครื่องบดจะมีอัตราการบดที่มากขึ้น แต่เมื่อเทียบกับกำลังการผลิตที่ได้จากผู้ผลิต จะเห็นได้ว่ากำลังการผลิตจริงของเครื่องบดนั้นน้อยมาก สาเหตุเนื่องจากขนาดตะแกรงที่ทางผู้ผลิตรับรองอัตราการผลิตมานั้นอาจจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่ใช้ในการทดสอบมาก หรือเนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ในการบดนั้นมีคุณสมบัติที่ต่างกัน อีกทั้งเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้นเป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใย และมีความเหนียวสูง จึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งของอัตราการบดที่ต่ำ ซึ่งลักษณะเชื้อเพลิงชีวมวลก่อนและหลังการบดแสดงดังรูปที่ 6.5



(a)



(b)

รูปที่ 6.5 ลักษณะเชื้อเพลิงชีวมวล (a) ลักษณะเชื้อเพลิงก่อนกระบวนการบด และ (b) ลักษณะเชื้อเพลิงหลังผ่านกระบวนการบด

#### 6.1.3.2 การทดสอบขนาดของเชื้อเพลิงที่ผ่านการบด

จากการนำตัวอย่างเชื้อเพลิงที่บดผ่านตะแกรงที่มีขนาดรู 0.5 mm ซึ่งเชื้อเพลิงที่ผ่านตะแกรงนั้นจะต้องมีขนาดเล็กกว่า 0.5 mm เมื่อนำไปทดสอบขนาดของเชื้อเพลิงที่แท้จริงผ่านวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (sieve analysis) จะได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 6.3 ซึ่งพบว่าอนุภาคเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.180-0.299 mm คิดเป็น 25.53 % รองลงมาคือขนาดเล็กกว่า 0.075 mm คิดเป็น 24.39 % ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.425 mm. จะมีสัดส่วนอยู่เพียง 2.57 % เท่านั้น แสดงว่าเชื้อเพลิงที่ได้มีความละเอียดกว่าขนาดที่ต้องการคือขนาด 0.5 mm ซึ่งจะส่งผลดีต่อระบบการเผาไหม้ นั่นคือความละเอียดของเชื้อเพลิงชีวมวล ทำให้พื้นที่ผิวในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาไหม้มีมากขึ้นเทียบกับเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่กว่าในปริมาตรที่เท่ากัน ทำให้ระบบเผาไหม้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ซึ่งค่าสัดส่วนของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงที่ได้มานั้นจะถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงต่อไป

**ตารางที่ 6.3** ผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่ผ่านการบด

ขนาดอนุภาคเชื้อเพลิง	% by mass
425 - 500 $\mu\text{m}$	2.57
300 - 424 $\mu\text{m}$	16.83
180 - 299 $\mu\text{m}$	25.53
150 - 179 $\mu\text{m}$	12.56
75 - 149 $\mu\text{m}$	18.12
0 - 74 $\mu\text{m}$	24.39

### 6.1.3.3 วิเคราะห์การทำงานของเครื่องบด

เนื่องจากในการทดสอบการเผาไหม้นั้นต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีความละเอียดที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงต้องใช้ตะแกรงที่มีขนาดรู 0.5 mm. แต่เนื่องจากตะแกรงขนาดดังกล่าวส่งผลให้เชื้อเพลิงจะค้างอยู่ในเครื่องบดเป็นเวลานาน และอัตราการบดของเครื่องบดค่อนข้างที่จะต่ำ ไม่เพียงพอต่อการป้อนเชื้อเพลิงเพื่อทดสอบการเผาไหม้ที่กำลังความร้อนสูงๆ (200 kW ขึ้นไป) หากทำการป้อนเชื้อเพลิงแบบเม็ดลงมาสู่เครื่องบดอย่างต่อเนื่อง ด้วยอัตราที่สูงกว่ากำลังผลิตของเครื่องบด จะทำให้เกิดการอัดแน่นของเชื้อเพลิงภายในเครื่องบด งานหมุนไม่สามารถทำงานได้เป็นผลทำให้เครื่องบดนั้นหยุดการทำงาน นั่นคือ การทำงานที่เกินขีดจำกัดของเครื่องบด โดยระยะเวลาก่อนที่เครื่องบดนั้นจะทำงานเกินขีดจำกัดนั้นน้อยกว่าระยะเวลา 30 นาที ที่ต้องการให้ระบบทำงานต่อเนื่อง เพื่อไม่ให้เครื่องบดเป็นอุปสรรคของงานวิจัย และให้ระบบทั้งหมดทำงานให้อย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ในขอบเขตการศึกษา จึงได้ทำการแยกเครื่องบดออกจากระบบ และทำการบดเชื้อเพลิงเก็บสะสมไว้ จนได้ปริมาณที่เพียงพอต่อการใช้งานทดสอบการเผาไหม้

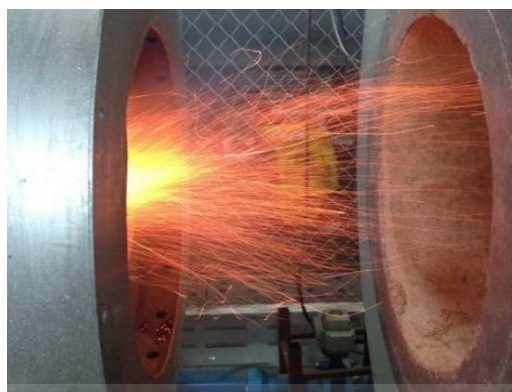
## 6.2 ผลการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

ในการทดสอบการเผาไหม้เพื่อหาสมรรถนะ และย่านการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง ชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมานั้น ต้องทำการทดสอบเป็นลำดับขั้น ได้แก่การทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิง การทดสอบขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีความเหมาะสม และการทดสอบอิทธิพลขององศาใบบิด (swirler blade) เป็นต้น เพื่อนำผลสรุปจากการทดลองนั้นๆไปใช้เป็นตัวแปรควบคุมของการทดลองในขั้นถัดไป

### 6.2.1 อิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงต่อพฤติกรรมการเผาไหม้

จากผลการทดสอบระบบป้อนเชื้อเพลิงในหัวข้อข้างต้น ทำให้ทราบถึงกำลังการผลิตสูงสุดของเครื่องบดในแต่ละขนาดของรูตะแกรง โดยหากจะเปรียบเทียบกำลังการผลิตของเครื่องบดต่อการผลิตกำลังความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ จะพบว่าเครื่องบดที่ใช้รูตะแกรงขนาด 0.5 mm, 1 mm. และ 1.5 mm. จะสามารถบด และป้อนเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกำลังความร้อนได้ประมาณ 100 kW 200 kW และ 400 kW ตามลำดับ ดังนั้นหัวข้อนี้จึงเป็นการตรวจสอบพฤติกรรมการเผาไหม้ของหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ที่ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน เพื่อระบุขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีความเหมาะสมกับหัวเผา โดยจะทำการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงขนาดดังกล่าว ซึ่งคาดหวังว่าการทดลองในลำดับถัดไปจะสามารถใช้อนุภาคเชื้อเพลิงขนาด 1.5 mm. ได้หากอนุภาคเชื้อเพลิงขนาด 1.5 mm. สามารถที่จะเผาไหม้ได้ดีภายในห้องเผาไหม้ช่วย จะส่งผลให้ประหยัดเวลา และพลังงานในการบดเชื้อเพลิงเก็บก่อนทำการทดลอง หรืออาจจะทำให้สามารถบดเชื้อเพลิงแล้วป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยได้โดยตรง

เมื่ออนุภาคเชื้อเพลิงวิ่งเข้าปะทะกับเปลวไฟนำร่องของแก๊ส LPG อนุภาคเชื้อเพลิงจะเข้าสู่กระบวนการทำแห้ง (drying) อุณหภูมิของอนุภาคสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำ จนน้ำเกิดการระเหย จากนั้นอุณหภูมิจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่กระบวนการปลดปล่อยสารระเหย (devolatilization) กระบวนการเผาไหม้สารระเหย และการเผาไหม้ถ่านชาร์ (char combustion) ตามลำดับ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิดกระบวนการ (resident time) เหล่านี้ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วของแก๊สร้อนที่พัดพาอนุภาค และขนาดของอนุภาค เป็นต้น เมื่อพิจารณาลักษณะเปลวไฟบริเวณช่องทางออกของหัวเผาดังแสดงในรูปที่ 6.6 พบว่าลักษณะของเปลวไฟที่เกิดจากอนุภาคเชื้อเพลิงที่ลอดผ่านรูตะแกรงขนาด 1.5 mm. จะมีลักษณะที่เป็นเส้นทางเดินของปฏิกิริยาการเผาไหม้ของอนุภาคชาร์อย่างเห็นได้ชัดเจน นั้นแสดงว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (resident time) ภายในห้องเผาไหม้ช่วยสั้นกว่าระยะเวลาที่อนุภาคขนาดดังกล่าวต้องการใช้ในการเผาไหม้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วยจะเป็นเพียงปฏิกิริยาการทำแห้ง และปฏิกิริยาการปลดปล่อยสารระเหย ในส่วนของปฏิกิริยาการเผาไหม้ถ่านชาร์จะหลุดออกมาเกิดบริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งพฤติกรรมนี้จะส่งผลให้การเผาไหม้อาจเกิดขึ้นแบบไม่สมบูรณ์ และเมื่อเพิ่มกำลังความร้อนให้สูงขึ้นความเร็วของแก๊สภายในห้องเผาไหม้ช่วยก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้การรักษาเสถียรภาพของฐานของเปลวไฟเป็นไปได้ยาก โอกาสในการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับก็มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้สูงเช่นกัน



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 6.6 เปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีขนาดของอนุภาคต่างกัน (a) อนุภาคขนาด 1.5 mm., (b) อนุภาคขนาด 1.0 mm. และ (c) อนุภาคขนาด 0.5 mm.

เมื่อพิจารณาการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงที่ลอดผ่านรูตะแกรงขนาด 1 mm. ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มไปในทางที่ดีกว่าเปลวไฟที่เกิดจากอนุภาคขนาด 1.5 mm. คือปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งทั้งสามปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย แต่ยังคงปรากฏเห็นเส้นทางเดินของปฏิกิริยาการเผาไหม้อนุภาคชาร์ที่หลุดออกมาจากห้องเผาไหม้ช่วยมากพอสมควร ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้ชาร์จะเลื่อนเข้าไปเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย แต่จากลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นคาดการณ์ว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้ชาร์นั้นน่าจะเกิดขึ้นที่บริเวณผนังทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย หรือส่วนปลายของห้องเผาไหม้ช่วย จึงทำให้ยังสังเกตเห็นเส้นทางเดินของปฏิกิริยาดังกล่าว ถึงแม้ว่าจะใช้ของศำไปปิดที่ทำให้เกิดการหมุนควงของอากาศมากที่สุดเท่าที่หัวเผาจะทำได้แล้ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็ตาม ในขณะที่เมื่อพิจารณาการเผาไหม้ออนุภาคเชื้อเพลิงที่ลอดผ่านรูตะแกรงขนาด 0.5 mm. ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มไปในทางที่ดีกว่าเปลวไฟที่เกิดจากอนุภาคสองขนาดที่ผ่านมา สังเกตเห็นเส้นทางเดินของปฏิกิริยาการเผาไหม้ซาร์บ้างเล็กน้อย ซึ่งคาดการณ์ว่าน่าจะเกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.30 mm. ขึ้นไปซึ่งมีปะปนอยู่ประมาณ 20 % ของกลุ่มอนุภาคเชื้อเพลิง สอดคล้องกับทฤษฎีการเผาไหม้ออนุภาคเชื้อเพลิงแข็ง ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณผิวภายนอกของอนุภาค แล้วค่อยๆลามเข้าหาใจกลางของอนุภาค และเมื่อพิจารณารูปที่ 2.4 จะสังเกตเห็นว่าเมื่ออนุภาคเชื้อเพลิงมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ฐานของเปลวไฟจะค่อยๆเลื่อนออกไปสู่บริเวณส่วนปลายของห้องเผาไหม้ เนื่องจากที่สภาวะการเผาไหม้เดียวกัน เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ต้องการใช้ระยะเวลาในกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยที่ค่อนข้างนาน ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ซาร์เกิดล่าช้าตามไปด้วย นอกจากนี้การเผาไหม้ออนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กจะให้อุณหภูมิที่สูงกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงขนาดใหญ่ ซึ่งบ่งชี้ว่าอนุภาคเชื้อเพลิงขนาดเล็กจึงมีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สั้นกว่า และจากลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการทดลองทำให้คาดการณ์ได้ว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งทั้งสามปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย และด้วยอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กจึงถูกอิทธิพลของอากาศที่หมุนควงเหวี่ยงให้เกิดการคลุกเคล้าภายในห้องเผาไหม้ช่วย จึงเป็นเหตุผลให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ซาร์ส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วยนั่นเอง

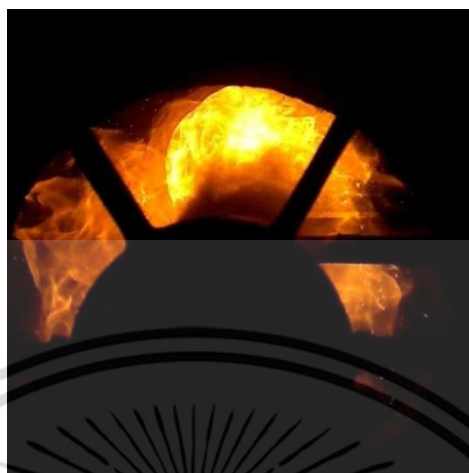
จากพฤติกรรมของเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ออนุภาคเชื้อเพลิงทั้งสามกรณี จึงได้ตั้งสนใจเลือกใช้เชื้อเพลิงที่ลอดผ่านรูตะแกรงขนาด 0.5 mm. เพื่อทำการทดสอบการเผาไหม้สำหรับการทดลองในขั้นถัดไป เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มกำลังความร้อนในการเผาไหม้ให้สูงขึ้น จะส่งผลให้ความเร็วของกระแสแก๊สร้อน และของไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยจะสูงขึ้นตามไปด้วย ถ้าอนุภาคเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่จนเกินไปการรักษาเสถียรภาพฐานของเปลวไฟอาจทำได้ยากยิ่งขึ้น การเผาไหม้อาจจะไม่ต่อเนื่องจนไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) ของการเผาไหม้ หรืออาจเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ (blow off) ได้ ด้วยข้อจำกัดในด้านกำลังการผลิตของเครื่องบดที่หากต้องการเชื้อเพลิงที่มีความละเอียดกว่านี้จะต้องใช้ระยะเวลาในการบดเชื้อเพลิงเป็นเวลานาน และสิ้นเปลืองพลังงาน และต้องใช้เครื่องบดที่มีสมรรถนะที่ดีกว่านี้ รวมไปถึงปริมาณเชื้อเพลิงที่ได้รับมามีอยู่อย่างจำกัด จึงไม่อาจเสี่ยงทำการทดสอบกับอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ได้

### 6.2.2 อิทธิพลขององศาใบพัด (swirl blade) ต่อพฤติกรรมการเผาไหม้

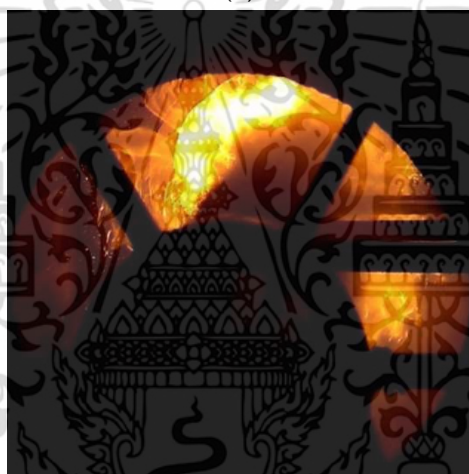
การทดสอบในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะของใบพัดในการสร้างกระแสอากาศที่มีลักษณะหมุนควงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย โดยจะทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย ที่องศาของใบพัดที่แตกต่างกันสามระดับระหว่างมุม 100 องศา ถึง 60 องศา ซึ่งเป็นย่านการปรับองศาที่ใบพัดจะสามารถทำได้

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น เมื่อเชื้อเพลิงแข็งเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (reacting zone) เชื้อเพลิงจะเริ่มกระบวนการทำแห้ง (drying) และกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย ตามลำดับ เมื่อพิจารณารูปที่ 6.7 แสดงพฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ที่องศาของใบพัดต่างกัน โดยทำการบันทึกภาพบริเวณด้านหลังของหัวฉีดเชื้อเพลิงชีวมวลผง เมื่อผงเชื้อเพลิงถูกพ่นออกจากหัวฉีด จะสังเกตเห็นลำของเชื้อเพลิงที่มีลักษณะคล้ายหมอกสีเทา ซึ่งบริเวณนี้ถูกคาดการณ์ว่าจะเป็นบริเวณของการเกิดกระบวนการทำแห้ง และการปลดปล่อยระเหย ดังนั้นกลุ่มหมอกดังกล่าวก็คือกลุ่มของไอน้ำ และสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิงนั่นเอง ซึ่งปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับผลการจำลองการเผาไหม้ในรูปที่ 6.8 การ

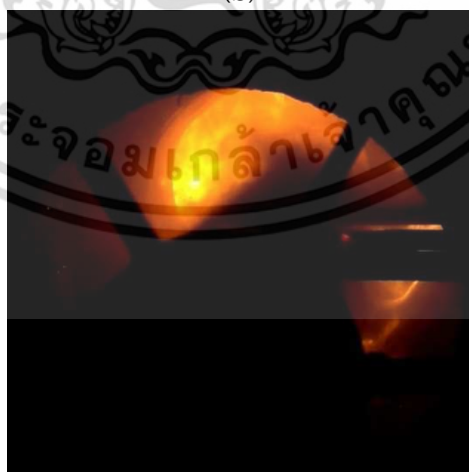
กระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหยภายในห้องเผาไหม้ช่วย ที่พบว่าบริเวณที่เกิดหมอกนั้นจะเป็นบริเวณที่เกิดกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย และเป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารระเหยมากที่สุด



(a)



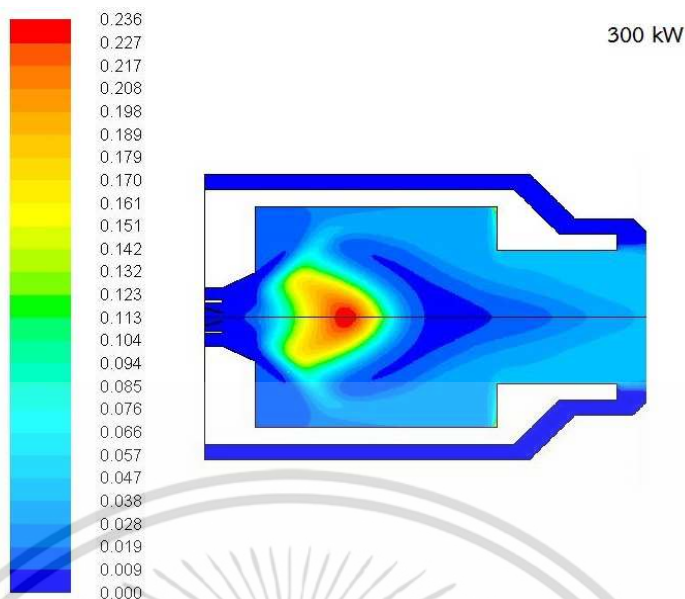
(b)



(c)

**รูปที่ 6.7** พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ที่ห้องของไบบิตต่างกัน (a) ไบบิต 100 องศา, (b) ไบบิต 85 องศา และ (c) ไบบิต 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย (Mass Fraction) ภายในหัวเผา

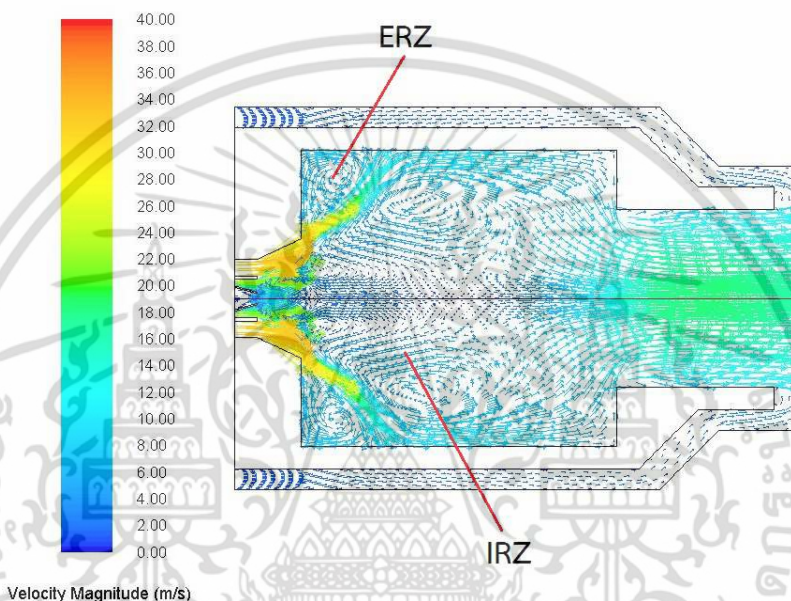
ระหว่างที่กระบวนการปลดปล่อยสารระเหยดำเนินการอยู่นั้น สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาก่อนนั้นจะถูกเผาไหม้บริเวณผิวโดยรอบอนุภาคเชื้อเพลิงซึ่งจะส่งผลให้อนุภาคโดยรอบอนุภาคสูงขึ้น และจะเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ซ้ำต่อไป จากรูปที่ 6.7 จะเห็นได้ว่าหมอกสีเทา หรือกลุ่มของอนุภาคที่ปกคลุมด้วยไอน้ำ และสารระเหยจะถูกล้อมรอบด้วยเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้สารระเหยดังกล่าว หากกระแสการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยได้รับอิทธิพลของอากาศหมุนควงที่มีความรุนแรงที่มากพอ จะเหนี่ยวนำให้เกิดการหมุนวนของกระแสบริเวณแกนกลางของห้องเผาไหม้ช่วย (internal recirculation zone, IRZ) และการหมุนวนของกระแสภายนอกแกนกลางของเตาเผา (external recirculation zone, ERZ) ดังแสดงในรูปที่ 6.9 กระแสการหมุนวนทั้งสองบริเวณนี้จะส่งผลให้กลุ่มอนุภาคเชื้อเพลิงที่ลุกไหม้ และติดไฟแล้วเหวี่ยงกลับมาชนกับกลุ่มหมอกอนุภาคที่ถูกส่งเข้ามาใหม่ ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ จนนำไปสู่การเผาไหม้อย่างต่อเนื่องได้

เมื่อพิจารณารูปที่ 6.7a พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่มุมไบปิด 100 องศาจะพบว่าเมื่อผงเชื้อเพลิงถูกพ่นออกจากหัวฉีด อนุภาคของเชื้อเพลิงจะได้รับอิทธิพลของอากาศหมุนควง (swirl) จนสามารถมองเห็นถึงความปั่นป่วนของเปลวไฟได้อย่างชัดเจน เปลวไฟมีลักษณะที่บานออก และห่อหุ้มหมอกของอนุภาคเชื้อเพลิง ซึ่งคาดว่าความรุนแรงของกระแสอากาศหมุนควงที่เกิดจากไบปิดที่มุมองศานี้ จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนที่บริเวณ IRZ และ ERZ จึงทำให้การเผาไหม้จะเกิดขึ้นบริเวณกลางค่อนมาหาส่วนต้นของห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งการที่จุดเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ หรือฐานของเปลวไฟอยู่ที่บริเวณส่วนต้นของหัวเผาเช่นนี้ จะส่งผลดีต่อเสถียรภาพของการเผาไหม้ จนส่งผลให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องได้โดยไม่เกิดปรากฏการณ์เป่าดับ

ในขณะที่เมื่อพิจารณารูปที่ 6.7b พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่มุมไบปิด 85 องศา ที่มุมนี้ความรุนแรงของกระแสอากาศหมุนควงจะมีค่าน้อยกว่าที่มุมไบปิด 100 องศา ซึ่งน้อยจนไม่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนที่บริเวณ ERZ ส่งผลให้บริเวณการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เลื่อนไปอยู่กลางค่อนไปหาส่วนท้ายของหัวเผา แต่อย่างไรก็ตามความรุนแรงของกระแสไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น มิใช่ให้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วยได้ จึงทำให้ฐานของเปลวไฟยังคงอยู่ภายในห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งหากทำการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 300 kW พฤติกรรมของเปลวไฟเช่นนี้จะยังคงรักษาเสถียรภาพของการเผาไหม้เอาไว้ได้ และยังเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง แต่หากทำการเผาไหม้ที่กำลังความร้อนที่สูงขึ้นกว่านี้ ปริมาณเชื้อเพลิงและความเร็วของลำเชื้อเพลิงที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดจะมากกว่านี้ ถึงแม้ว่าความเร็วของอากาศที่หมุนควงจะสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน แต่โอกาสที่ฐานของเปลวไฟจะหลุดออกนอกห้องเผาไหม้ช่วยนั้นมีความเป็นไปได้สูง ดังนั้นการเผาไหม้ที่กำลังความร้อนสูงๆมุมไบบิตที่ 85 องศา อาจจะสร้างความรุนแรงของอากาศหมุนควงที่ไม่เพียงพอ ซึ่งเสี่ยงต่อการรักษาเสถียรภาพของการเผาไหม้ จนนำไปสู่ปรากฏการณ์เป่าดับได้



รูปที่ 6.9 เวกเตอร์ความเร็วของแก๊สภายในหัวเผา pre-chamber

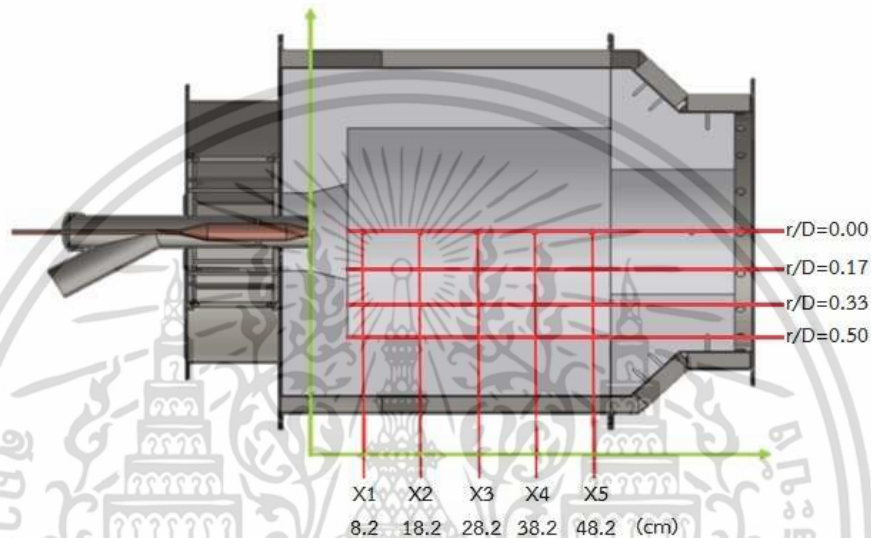
แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 6.7c พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่มุมไบบิต 60 องศา พบว่าอากาศหมุนควงที่เกิดจากมุมไบบิตนี้มีความรุนแรงที่น้อยมาก จนไม่สามารถสร้างกระแสความปั่นป่วนของอากาศภายในห้องเผาไหม้ช่วยได้ ปฏิกริยาการเผาไหม้จึงไม่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย ลำของอนุภาคเชื้อเพลิงที่พุ่งออกจากหัวฉีดจะวิ่งไปปะทะกับผนังทางออก แต่ด้วยอิทธิพลของม่านอากาศส่วนที่สาม จึงทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงเกิดการคลุกเคล้า และอุณหภูมิผนังที่ยังสูงเนื่องจากการทดลองก่อนหน้า จึงทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงติดไฟในที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อคงการเผาไหม้ที่สภาวะนี้ไว้ อุณหภูมิของผนัง และเปลวไฟจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆ ซึ่งเป็นสัญญาณของการเข้าสู่วิวัฒนาการของปรากฏการณ์การเป่าดับนั่นเอง

ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Norbert Modlinski [9] ซึ่งพบว่าอากาศหมุนควงจะส่งผลต่อเสถียรภาพของเปลวไฟบริเวณหัวฉีดเชื้อเพลิง เมื่อมุมของไบบิตเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การลุกติดไฟของเชื้อเพลิงเกิดเร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวยังส่งผลต่อตำแหน่งของฐานเปลวไฟ โดยอิทธิพลของอากาศที่หมุนควงจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนของแก๊สร้อนบริเวณใกล้หัวฉีด (IZR) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งส่งผลให้อนุภาคของเชื้อเพลิงที่ถูกพ่นออกมาจากหัวฉีดเกิดการผสมกับกระแสของแก๊สร้อน สารระเหยจะถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาค

เชื้อเพลิง และเกิดการติดไฟในที่สุด จึงทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.3 พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย

สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 400 kW และ 500 kW โดยในการบันทึกค่าของอุณหภูมิ จะทำการบันทึกการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งหมด 20 ตำแหน่งภายในห้องเผาไหม้ช่วยคือ 5 ตำแหน่งตามแนวแกน ตำแหน่งละ 4 ระนาบตามแนวรัศมี เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของห้องเผาไหม้ช่วย (D) ซึ่งตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิ

#### 6.2.3.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยตามระยะแนวแกน

จากรูปที่ 6.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยตามระยะแนวแกน เมื่อทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ 400 kW และ 500 kW จะพบว่าทั้งสองย่านการเผาไหม้จะมีแนวโน้มการกระจายตัวของอุณหภูมิไปในทิศทางเดียวกัน ในทุกระนาบแนวรัศมี ( $r/D$ ) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าทั้งสองย่านการเผาไหม้นั้น จะมีพฤติกรรม และลักษณะอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic) ของการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่คล้ายคลึงกัน

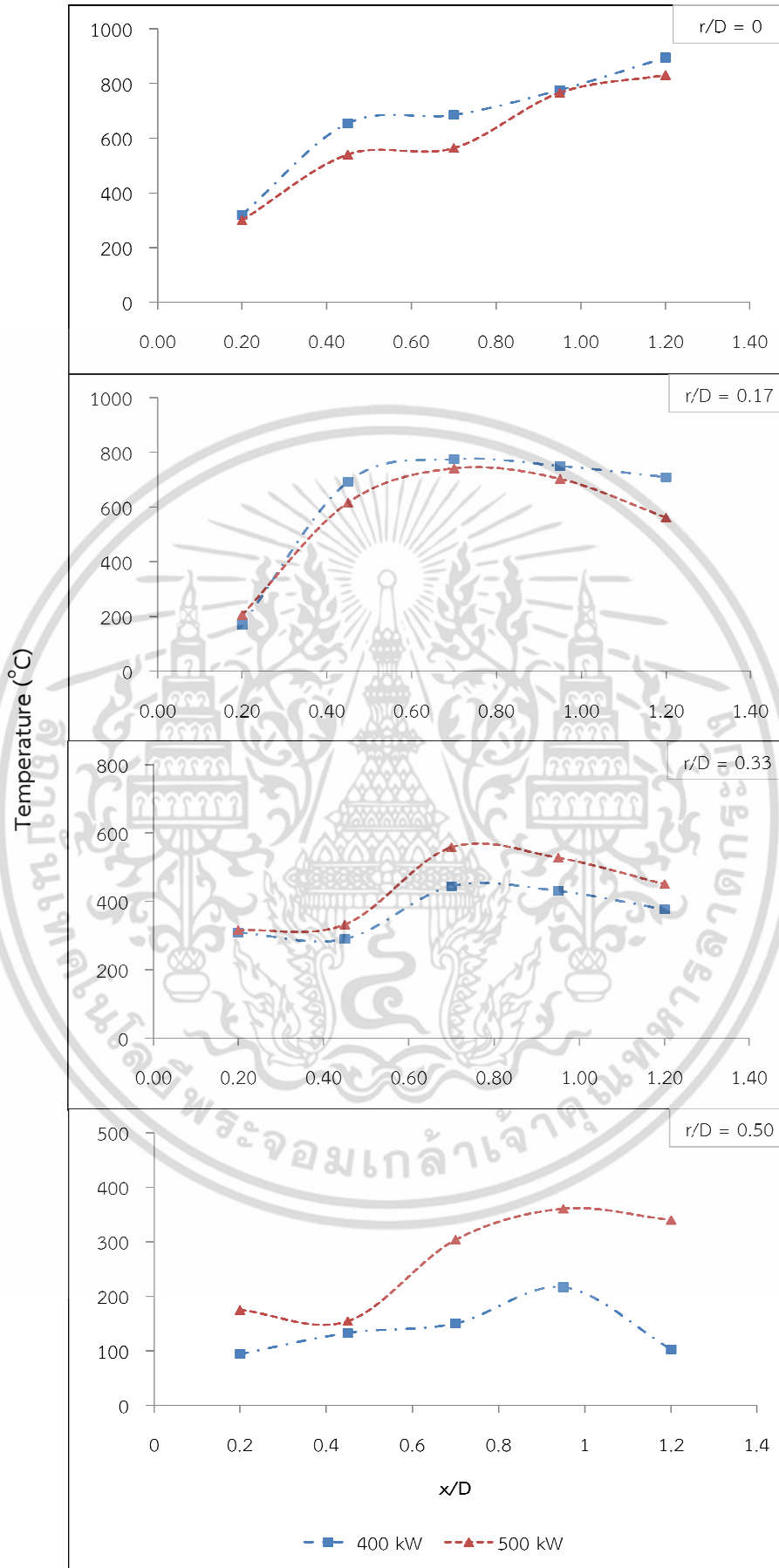
เมื่อพิจารณาที่ระนาบ  $r/D=0$  หรือระนาบแนวแกนของห้องเผาไหม้ช่วย ที่ตำแหน่ง  $x/D = 0.20$  เป็นตำแหน่งที่เชื้อเพลิงจะถูกพ่นออกมาจากท่อหัวฉีดพร้อมกับอากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air) ทั้งที่เป็นตำแหน่งต้นๆที่เชื้อเพลิงถูกพ่นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย แต่อุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้กลับสูงถึงประมาณ  $300^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากบริเวณนี้ได้รับอิทธิพลของกระแสหมุนวนบริเวณ IRZ ที่พากระแสของแก๊สร้อนกลับมาปะทะ และถ่ายเทความร้อนให้กับเชื้อเพลิงที่ถูกพ่นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย เมื่ออนุภาคเชื้อเพลิงปะทะเข้ากับแก๊สร้อนที่อุณหภูมิดังกล่าว จะส่งผลให้ความชื้น และสารระเหยที่อยู่ภายในอนุภาคถูกปลดปล่อยออกมาภายนอก ซึ่งมีลักษณะเป็นหมอกสีเทาดังแสดงในรูปที่ 6.6 สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะเกิดการเผาไหม้และลุกติดไฟบริเวณโดยรอบผิวของอนุภาคเชื้อเพลิงส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง (ประมาณ  $650^{\circ}\text{C}$  ที่ 400 kW และประมาณ  $550^{\circ}\text{C}$  ที่ 500 kW) และจากนั้นอุณหภูมิจะคงที่จนกว่ากระบวนการการปลดปล่อยสารระเหยจะสิ้นสุดลง จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลให้อุณหภูมิที่บันทึกได้จากตำแหน่ง  $x/D = 0.70$  และตำแหน่ง  $x/D = 0.95$  มีค่าใกล้เคียงกัน หลังพ้นจากระยะนี้ อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่เหลือ และกระแสของแก๊สร้อนที่ถูกอิทธิพลของอากาศหมุนควง (swirl) เหวี่ยงไปชนกับผนังของห้องเผาไหม้จะช่วยจะม้วนมารวมกันก่อนจะออกไปสู่ส่วนปลายของห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งระยะที่เกิดการร่วมตัวกันของกระแสแก๊สร้อนที่สภาวะ 400 kW และ 500 kW น่าจะมีระยะที่ใกล้เคียงกันจึงส่งผลให้อุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $x/D = 0.95$  ของทั้งสองสภาวะนั้นเท่ากัน กระบวนเผาไหม้ถ่านชาร์ และสารระเหยที่คงเหลือจะเริ่มขึ้นที่บริเวณนี้ส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ สำหรับที่ระนาบนี้ แนวโน้มของอุณหภูมิที่สภาวะ 400 kW จะสูงกว่าที่ 500 kW ในทุกตำแหน่งของการบันทึกอุณหภูมิ เนื่องจากที่สภาวะ 500 kW อัตราการพัดพาของมวลอากาศเย็นที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้จะช่วยจะสูงกว่าที่สภาวะ 400 kW จึงทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาดำกว่านั่นเอง

เมื่อพิจารณาที่ระนาบ  $r/D=0.17$  จะพบว่าที่ระนาบนี้เป็นระนาบที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดในบรรดาพิกัดที่ทำการศึกษา เนื่องจากเป็นระนาบของการเผาไหม้สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิง ที่ตำแหน่ง  $x/D = 0.20$  ตำแหน่งนี้เป็นยังคงเป็นบริเวณที่เชื้อเพลิงจะถูกพ่นออกมาจากท่อหัวฉีด และถูกอิทธิพลของอากาศส่วนที่สองซึ่งเป็นอากาศหมุนควงเหวี่ยงให้บานออกไปชนกันผนัง จึงทำให้ที่ตำแหน่งนี้มีอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่นๆ แต่แนวโน้มของอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าสู่ตำแหน่ง  $x/D = 0.45$  และอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงตำแหน่ง  $x/D = 0.70$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดของระนาบ เนื่องจากทั้งสองตำแหน่งนี้เป็นบริเวณของการเกิดกระแสหมุนวน IRZ ส่งผลให้แก๊สร้อน และเปลวไฟจากการเผาไหม้สารระเหยจะถูกเหวี่ยงวนกลับมาเพื่อเคลือบเคล้า และถ่ายเทความร้อนให้กับอนุภาคที่ถูกส่งเข้ามาใหม่ เมื่อผ่านพ้นตำแหน่งนี้ไปอุณหภูมิจะเริ่มลดลงเนื่องจากกระแสของแก๊สร้อนจะหุบไปรวมตัวบริเวณแนวแกนก่อนจะออกสู่ส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ช่วย สำหรับที่ระนาบนี้ แนวโน้มของอุณหภูมิที่สภาวะ 400 kW ยังคงสูงกว่าที่ 500 kW ในทุกตำแหน่งของการบันทึกอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการพัดพาของมวลอากาศเย็นที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไปแล้วในย่อหน้าข้างต้น

แนวโน้มของอุณหภูมิที่สภาวะ 500 kW จะเริ่มมีค่าสูงกว่าที่สภาวะ 400 kW ในทุกตำแหน่งของการบันทึกอุณหภูมิที่ระนาบ  $r/D=0.33$  เนื่องจากที่ระนาบนี้จะเป็นบริเวณขอบของเปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 500 kW จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเปลวไฟที่มากกว่า และเปลวไฟจะมีความกว้างสูงสุดบริเวณตำแหน่ง  $x/D = 0.70$  และตำแหน่ง  $x/D = 0.95$  จึงทำให้ที่ตำแหน่งดังกล่าวของระนาบนี้มีอุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ เมื่อผ่านพ้นตำแหน่งนี้ไปอุณหภูมิจะเริ่มลดลงเนื่องจากกระแสของแก๊สร้อนจะหุบไปรวมตัวบริเวณแนวแกนก่อนจะออกสู่ส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ช่วย เมื่อพิจารณาที่ระนาบ  $r/D=0.5$  ซึ่งเป็นระนาบของผนังห้องเผาไหม้ช่วย อุณหภูมิของผนังห้องเผาไหม้ช่วยจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อระยะตามแนวแกนเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิผนังจะมีค่าสูงที่สุดบริเวณตำแหน่งที่  $x/D = 0.95$  เนื่องจากเป็นบริเวณที่เปลวไฟจะมีความกว้างสูงสุด จึงทำให้เปลวไฟสัมผัสกับผนัง แต่เมื่อเข้าสู่ตำแหน่งที่ให้อุณหภูมิผนังจะลดลงเนื่องจากการหุบรวมกันของเปลวไฟในลักษณะเช่นเดียวกับระนาบก่อนหน้า ในขณะที่แนวโน้มของอุณหภูมิที่สภาวะ 500 kW จะมีค่าสูงกว่าที่สภาวะ 400 kW ในทุกตำแหน่งของการบันทึกอุณหภูมิที่ระนาบ เนื่องจากที่ 500 kW กระแสแก๊สร้อนจะมีคาบ (aperture) และความรุนแรงในการหมุนควงมีมากกว่า จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนไปสู่ผนังมีมากกว่า



รูปที่ 6.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยตามระยะแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.3.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยตามระยะแนวรัศมี

หลังจากที่ได้ทราบถึงลักษณะ และพฤติกรรมของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ตามระยะแนวแกนในทุกระนาบแนวรัศมี ( $r/D$ ) แล้ว สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมีในทุกระนาบแนวแกน ( $x/D$ ) โดยจะทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ 400 kW และ 500 kW เพื่อให้มีความเข้าใจชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณารูปที่ 6.12 จะพบว่าทั้งสองย่านการเผาไหม้จะมีแนวโน้มการกระจายตัวของอุณหภูมิไปในทิศทางเดียวกัน ในทุกระนาบแนวแกน ( $x/D$ ) ซึ่งให้เห็นว่าทั้งสองย่านการเผาไหม้นั้นจะมีลักษณะอากาศพลศาสตร์ของการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากหัวข้อข้างต้น

เมื่อพิจารณาที่ระนาบ  $x/D=0.2$  ซึ่งเป็นระนาบที่อยู่ใกล้กับหัวฉีดเชื้อเพลิงชีวมวลมากที่สุด พบว่าตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดของระนาบจะอยู่ที่ตำแหน่งแนวแกน หรือ  $r/D = 0.00$  ถึงแม้ว่าที่ตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่เชื้อเพลิงถูกพ่นออกมาจากหัวฉีดก็ตาม แต่ด้วยอิทธิพลของกระแสอากาศหมุนวนบริเวณ IRZ ที่พากระแสของแก๊สร้อนกลับมาปะทะ ตำแหน่งนี้จึงเป็นบริเวณที่เกิดการถ่ายเทความร้อนจึงส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้น แต่เมื่อเลื่อนเข้าสู่ตำแหน่ง  $r/D = 0.17$  อุณหภูมิจะมีค่าลดลง อันเป็นผลมากระแสอากาศเย็นของอากาศส่วนที่สองที่เข้าสู่หัวเผาตรงกับตำแหน่งนี้ แม้ว่าบริเวณนี้ยังคงได้รับอิทธิพลของกระแสหมุนวน IRZ แต่กระแสอากาศเย็นที่เข้าสู่บริเวณนี้จะมีอัตราที่สูงกว่าในตำแหน่งแรกจึงทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้มีค่าต่ำกว่า แต่เมื่อพ้นระยะของกระแสอากาศเย็นจึงทำให้อุณหภูมิที่บริเวณตำแหน่ง  $r/D = 0.33$  มีค่าสูงขึ้น และนอกจากนี้ที่ตำแหน่ง  $r/D = 0.33$  ยังได้รับอิทธิพลของกระแสหมุนวน ERZ จึงส่งผลให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้ใกล้เคียงกับที่ตำแหน่งแรก และอุณหภูมิจะลดลงอีกครั้งเมื่อเลื่อนเข้าสู่ผนังห้องเผาไหม้

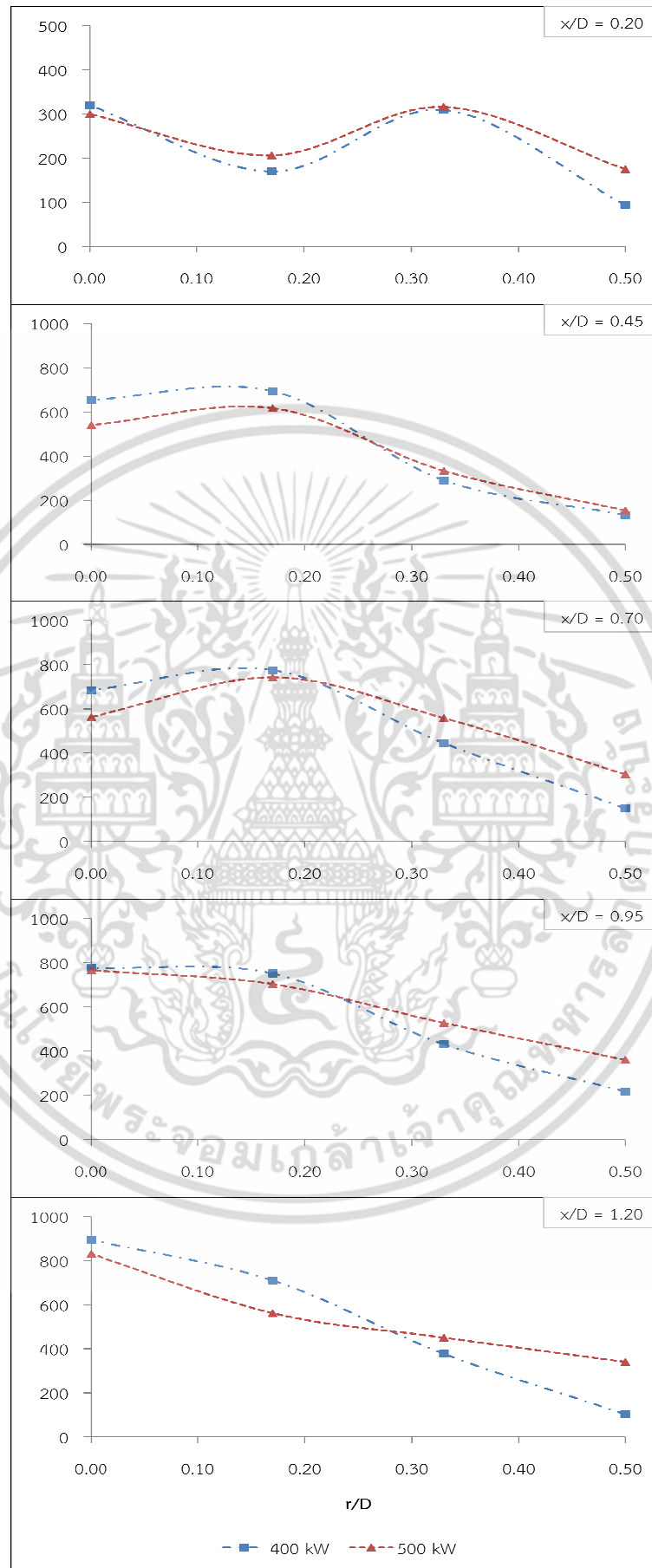
เมื่อพิจารณาที่ระนาบ  $x/D=0.45$  และ  $x/D = 0.70$  ทั้งสองระนาบนี้เป็นระนาบที่อยู่ภายในบริเวณของกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยของอนุภาคเชื้อเพลิง จึงทำให้กราฟของสองระนาบนี้มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยอนุภาคเชื้อเพลิงจะเริ่มเข้าสู่กระบวนการทำแห้ง (drying) และกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยตั้งแต่ระนาบแรกที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาก่อนหน้านั้นจะลุกติดไฟ และเกิดการเผาไหม้บริเวณผิวของอนุภาคเชื้อเพลิง ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณแกนกลางเตาสูงขึ้น และสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงตำแหน่ง  $r/D = 0.17$  ซึ่งเป็นบริเวณที่คาดว่าจะเกิดกระแสหมุนวน IRZ หมอกสีเทาของสารระเหยจะค่อยๆ จางลง และวิวัฒนาการเป็นเปลวไฟสีส้ม อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระแสหมุนวนของแก๊สร้อนกับอนุภาคของเชื้อเพลิงจะเกิดขึ้นสูง จึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นถึงประมาณ  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเข้าสู่ตำแหน่ง  $r/D = 0.33$  และตำแหน่ง  $r/D = 0.50$  ซึ่งเป็นผนังของห้องเผาไหม้ช่วย เนื่องจากทั้งสองตำแหน่งนี้อยู่บนเส้นทางการไหลของอากาศส่วนที่สอง (secondary air) เกิดการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟ หรือกระแสของแก๊สร้อนไปสู่กระแสของอากาศเย็น จึงเป็นเหตุผลให้อุณหภูมิลดลง

เมื่อกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยใกล้จะสิ้นสุดลง อนุภาคของเชื้อเพลิงจะเริ่มเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ถ่านชาร์ สารระเหยที่ยังคงเหลือ และชาร์จะถูกเผาไหม้ไปพร้อมกันจึงส่งผลให้อุณหภูมิในการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณารูปที่ 6.8 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหยทำให้คาดการณ์ได้ว่าที่ระนาบ  $x/D=0.95$  จะเป็นระยะที่กระบวนการปลดปล่อยสารระเหยใกล้จะสิ้นสุดลง อุณหภูมิบริเวณแกนกลางเตาจึงเพิ่มสูงขึ้นไปถึง  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเข้าสู่ตำแหน่ง  $r/D = 0.17$  ของระนาบ หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงเมื่อระยะตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอิทธิพลของอากาศส่วนที่สองซึ่งเป็นอากาศหมุนควง พฤติกรรมที่หมุนควงนี้จะเหนี่ยวนำให้กระแสของแก๊สร้อนเหวี่ยงมารวมกันบริเวณแกนกลางของห้องเผาไหม้ช่วย ก่อนจะเคลื่อนตัวออกไปยังช่องทางออก จึงส่งผลให้ตำแหน่ง  $r/D = 0.17$  มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับบริเวณแกนกลางห้องเผาไหม้ ส่วนตำแหน่ง  $r/D = 0.33$  และผนังห้องเผาไหม้ ( $r/D = 0.50$ ) กระแสของแก๊สร้อนจะโค้งหลบพอดีจึงทำให้อุณหภูมิต่ำลง เมื่อทำการพิจารณาที่ตำแหน่งแกนกลางของห้องเผาไหม้ช่วยที่ระนาบ  $x/D=1.20$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดที่บันทึกค่าได้จากห้องเผาไหม้ช่วย เนื่องจากตำแหน่งนี้เป็นบริเวณที่กระแสของแก๊สร้อนมารวมตัวกันก่อนจะเคลื่อนตัวออกสู่เตาเผา ซึ่งจะส่งผลให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรุนแรงอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นสูงถึง  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  แต่อุณหภูมิของระนาบนี้จะลดลงเรื่อยๆเมื่อระยะตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นบริเวณที่กระแสของแก๊สร้อนจะโค้งหลบเพื่อไปรวมตัวบริเวณแกนกลาง จึงส่งผลให้อุณหภูมิต่ำลงเช่นเดียวกับระนาบก่อนหน้า

ถึงแม้ว่าลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมี ที่สภาวะการเผาไหม้ 400 kW และ 500 kW จะมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันในทุกๆระนาบแนวแกน ( $x/D$ ) แต่ที่ระนาบ  $x/D=0.20$  การกระจายตัวของอุณหภูมิที่สภาวะ 500 kW จะสูงกว่าที่ 400 kW เนื่องจากอิทธิพลของอากาศหมุนควง (swirl) และกระแสอากาศหมุนวนบริเวณ IRZ และ ERZ ที่ 500 kW จะมีความรุนแรงที่มากกว่า จึงเป็นผลให้กระแสของแก๊สร้อนหมุนวนกลับมาถ่ายเทความร้อนให้กับเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยในอัตราที่สูงกว่า ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกันกับการที่บริเวณใกล้ผนังของห้องเผาไหม้ในทุกๆระนาบ  $x/D$  ที่อุณหภูมิของ 500 kW จะสูงกว่าที่ 400 kW เนื่องจากกระแสอากาศหมุนควงที่รุนแรงกว่า เปลวไฟจึงรัศมีเปลวที่กว้างกว่า การถ่ายเทความร้อนจากแก๊สร้อนไปสู่ผนังห้องเผาไหม้ช่วยจึงมีมากกว่านั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณใกล้แกนกลาง และอุณหภูมิสูงสุดที่บันทึกได้จากภายในห้องเผาไหม้ช่วยของที่สภาวะ 400 kW จะสูงกว่าที่ 500 kW อยู่เล็กน้อยซึ่งเป็นผลมาจากที่ 500 kW กระแสอากาศเย็นที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยจะมีปริมาณ และความเร็วที่สูงกว่า ถึงแม้ว่าอากาศหมุนควง (swirl) และกระแสอากาศหมุนวนบริเวณ IRZ และ ERZ ที่ 500 kW จะมีความรุนแรงที่มากกว่า แต่ระยะเวลา (resident time) ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สร้อนกับอนุภาคของเชื้อเพลิงกลับสั้นกว่า จึงทำให้เชื้อเพลิงเคลื่อนตัวออกจากหัวเผาก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้ได้อย่างเต็มที่



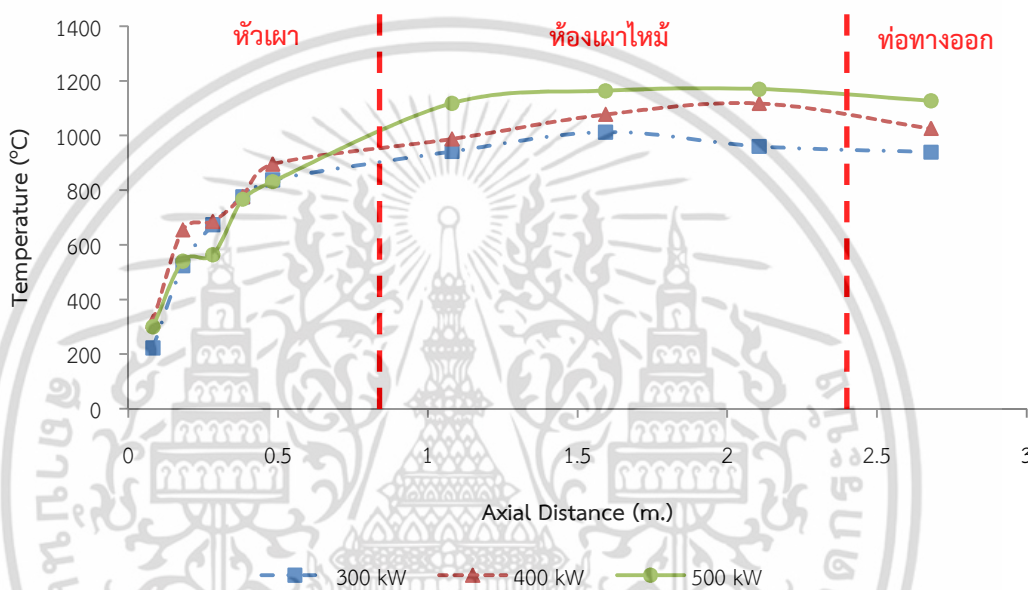
รูปที่ 6.12 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยตามระยะแนวรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.4 การศึกษายานการทำงานหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย

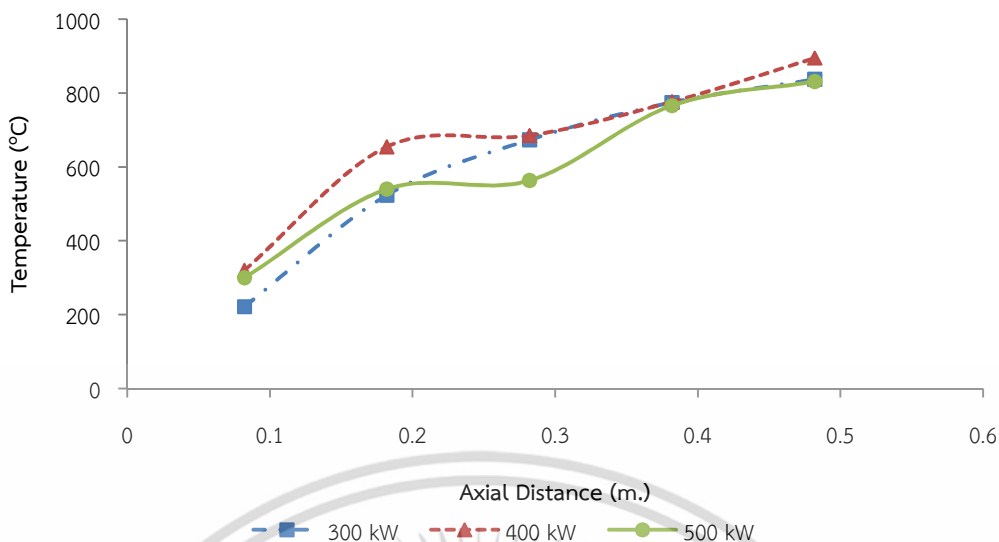
ในการศึกษาเพื่อหาวิธีการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงนั้น จะถูกจำกัดการทดสอบด้วยปัจจัยในหลายๆด้าน เช่น ความสามารถในการบดเชื้อเพลิงของเครื่องบด ขนาดของโบลเวอร์ (blower) และขีดความสามารถของชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้ที่ทำการออกแบบขึ้น เป็นต้น ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ในช่วง 250 kW ถึง 500 kW โดยใช้ องศาไบบิดที่ 100 องศา

#### 6.2.4.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน

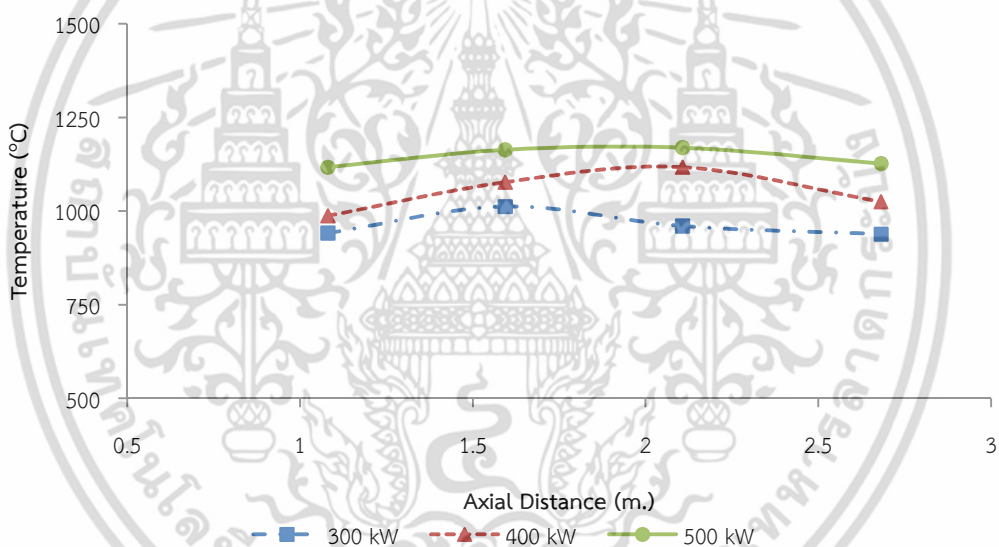


รูปที่ 6.13 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน

สำหรับการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 250 kW ไม่สามารถเก็บข้อมูลการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดจากการเผาไหม้ได้ เนื่องจากที่สภาวะนี้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เกิดควันที่มีลักษณะลอยตัวต่ำ และกลิ่นในปริมาณสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการเผาไหม้ในรูปที่ 4.14 และ 4.15 โดยจากผลการจำลองพบว่าที่สภาวะ 250 kW นั้นจะเหลืออนุภาคคาร์บอนและสารระเหยที่ไม่ได้รับการเผาไหม้หลงเหลืออยู่พอสมควร ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิงที่ถูกอิทธิพลของ swirl เหวี่ยงไปชนกับผนังของห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ จึงไม่ได้รับการเผาไหม้และลอยไปกับไอเสีย



รูปที่ 6.14 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน (ภายในหัวเผา)



รูปที่ 6.15 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน (ภายในห้องเผาไหม้)

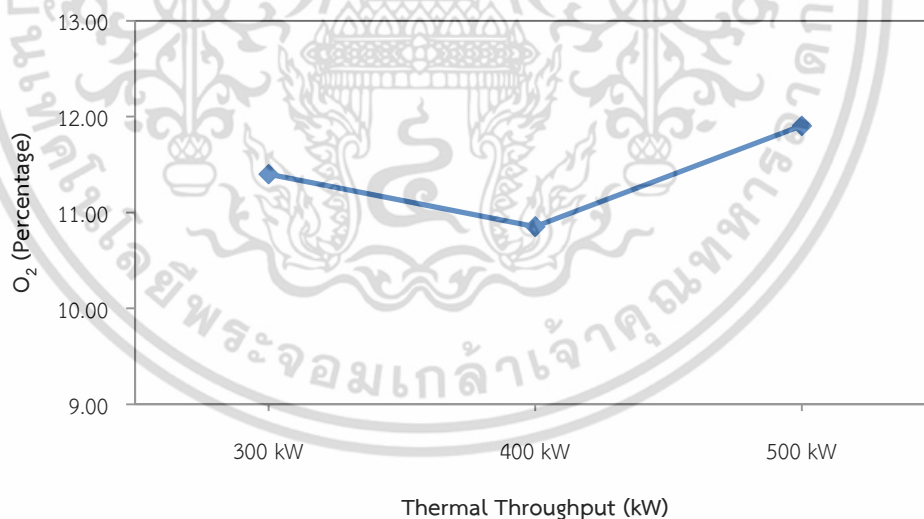
เมื่อพิจารณารูปที่ 6.13 - รูปที่ 6.15 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนที่กำลังการเผาไหม้ 300 kW 400 kW และ 500 kW ตามลำดับ จะพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยของทั้งสามย่านการเผาไหม้มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วยนั้นถูกอธิบายไว้ในหัวข้อข้างต้น แต่ลักษณะที่สังเกตเห็นเพิ่มเติมจากรูปที่ 6.14 คือที่สภาวะ 300 kW ตำแหน่งที่สอง และตำแหน่งที่สามของการบันทึกข้อมูลจะมีค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากที่ 300 kW นี้ความเร็วในการฉีดเชื้อเพลิง (primary air) และอากาศส่วนที่สอง (secondary air) ที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยจะน้อยกว่าที่สภาวะ 400 kW และ 500 kW ส่งผลให้ระยะทางในการปลดปล่อยสารระเหยสั้นกว่า จึงทำให้ระยะในการรวมตัวกันของเปลวไฟ และกระแสของแก๊สร้อน เลื่อนเข้ามาสู่บริเวณกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ช่วย ก่อนจะเคลื่อนตัวออกไปยังห้องเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ (furnace) ดังแสดงในรูปที่ 6.15 ยังคงพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ของทั้งสามย่านการเผาไหม้มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน เส้นแนวโน้มของอุณหภูมิที่ 500 kW จะสูงกว่าที่ 400 kW และ 300 kW ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลที่ทำการบันทึกได้พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ของทั้งสามสถานะจะอยู่ในห้องเผาไหม้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ไม่ได้ถูกเผาไหม้ภายในหัวเผา แต่มาถูกเผาไหม้ภายในเตาเผาแทน นั่นคืออนุภาคเชื้อเพลิง สารระเหย และถ่านชาร์ที่ไม่ได้รับการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วย จะได้รับอิทธิพลของอากาศส่วนที่สาม และเกิดการเผาไหม้ซ้ำอีกครั้งบริเวณห้องเผาไหม้ โดยอุณหภูมิสูงสุดของที่สถานะ 300 kW จะอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางห้องเผาไหม้ และจะลดลงเรื่อยๆก่อนจะถึงบริเวณท่อทางออก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความยาวของเปลวไฟที่สถานะนี้จะอยู่ที่ระยะกึ่งกลางห้องเผาไหม้ค่อนข้างน้อยไปหาส่วนท้ายของเตา ในขณะที่อุณหภูมิสูงสุดที่สถานะ 400 kW และ 500 kW จะเลื่อนมาอยู่บริเวณส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ ซึ่งส่งผลให้เปลวไฟสัมผัสกับช่องผนังบริเวณทางออก โดยเฉพาะที่ 500 kW ซึ่งสามารถสังเกตเห็นการสัมผัสของเปลวไฟกับผนังทางออกอย่างชัดเจน จึงทำให้อุณหภูมิที่วัดได้จากท่อทางออกมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิสูงสุดที่บันทึกได้ภายในห้องเผาไหม้

#### 6.2.4.2 ปริมาณแก๊สไอเสีย

ไอเสียถือเป็นตัวแปรหนึ่งที่สามารถบ่งชี้ถึงสมรรถนะของชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้ได้ หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ดีต้องสามารถเหนี่ยวนำให้อากาศ และเชื้อเพลิงเกิดการผสมผสานจนเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และปลดปล่อยแก๊สพิษ (CO NO<sub>x</sub> และ HC) ในปริมาณต่ำ

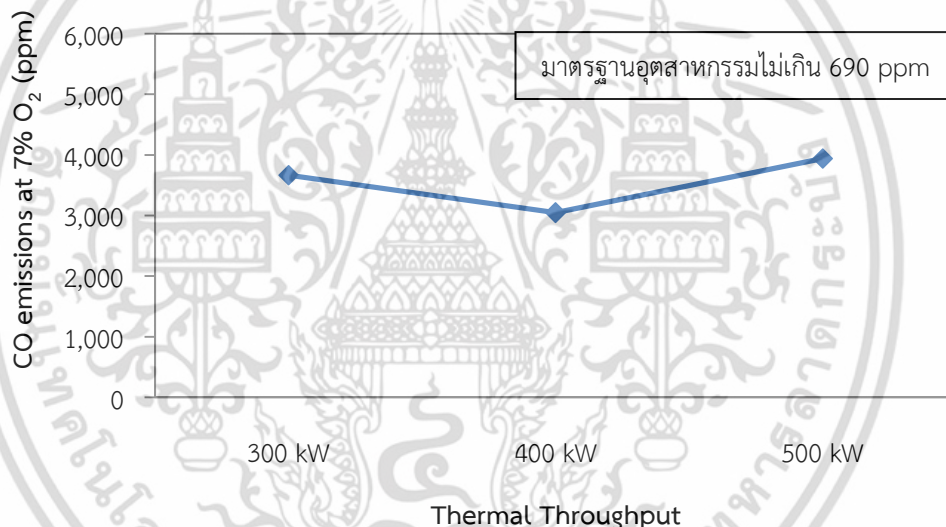


รูปที่ 6.16 แสดงเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) หลังการเผาไหม้

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ที่หลงเหลืออยู่ในแก๊สไอเสียที่สถานะการเผาไหม้ทั้งสามย่านดังแสดงในรูปที่ 6.16 จะพบว่า เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่วัดค่าได้จากไอเสียที่ 300 kW 400 kW และ 500 kW จะมีค่าเท่ากับ 11.40% 10.85% และ 11.90% ตามลำดับ ซึ่งเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่ทำการวัดค่าได้นั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน หากทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาปริมาณอากาศส่วนเกิน (%EA) จริงที่ใช้ในการเผาไหม้จะพบว่าทั้งสามย่านจะใช้อากาศส่วนเกินเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

135% 120% และ 150% ตามลำดับ ทั้งที่ในตอนเริ่มต้นการป้อนอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยถูกควบคุมให้ใช้อากาศส่วนเกินอยู่เพียงแค่ 15% เท่านั้น ซึ่งการที่วัดค่าเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่กับไอเสียได้ในปริมาณที่สูงอาจจะเนื่องมาจากปัจจัยหลายๆด้าน เช่น การที่ชุดทดสอบการเผาไหม้ได้มีการติดตั้งพัดลมดูดแก๊สไอเสีย (ID fan) เอาไว้ จึงทำให้ภายในห้องเผาไหม้เกิดเป็นสูญญากาศขึ้น จึงส่งผลให้อากาศจากภายนอกถูกดูดเข้าไปสู่ห้องเผาไหม้ตรงบริเวณหน้าแปลนต่างๆ รวมไปถึงบริเวณรูเสียบเครื่องมือวัด นอกจากนี้อาจเป็นเพราะความชื้นที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิง และการระเหยของน้ำบริเวณสกรูระบายไถ่หนัก ที่จะส่งผลให้การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จึงทำให้ออกซิเจนถูกดึงไปใช้ในการทำปฏิกิริยาไม่หมด เป็นต้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่ในไอเสียที่สภาวะ 400 kW จะมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งถ้ากำหนดให้เชื้อเพลิงมีความชื้นเท่ากัน ออกไป กำหนดให้อากาศภายนอกที่ถูกดูดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในอัตราที่เท่ากันเนื่องจากความดันภายในติดลบเท่ากัน จะทำให้สามารถสรุปได้ว่าที่การเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 400 kW ออกซิเจนจะถูกดึงเข้าไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ในอัตราส่วนที่มากที่สุด ซึ่งอาจจะสันนิษฐานได้ว่าการเผาไหม้ที่ 400 kW นี้จะให้การเผาไหม้ที่ดีกว่าอีกสองย่านที่เหลือ

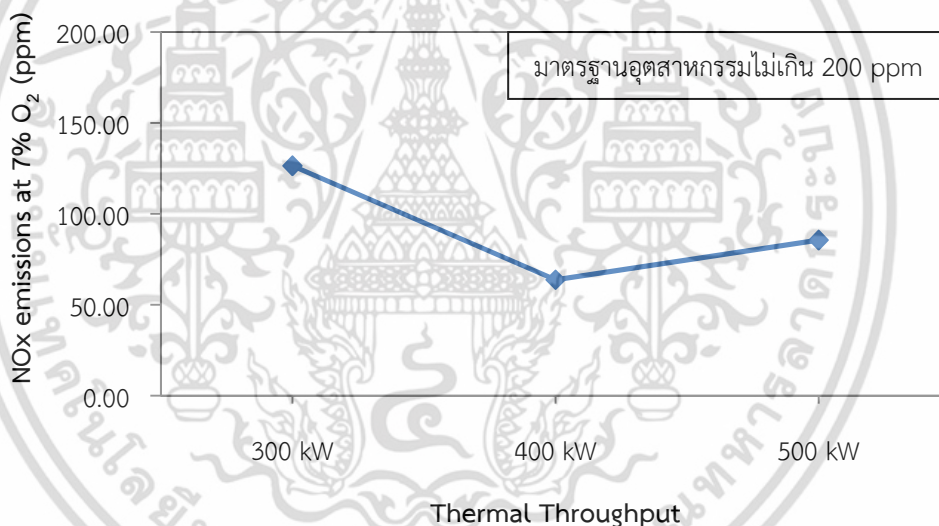


รูปที่ 6.17 แสดงปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หลังการเผาไหม้

แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้อาจจะมีสาเหตุมาจากหลายด้าน เช่น สภาวะการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป ปริมาณอากาศไม่เพียงพอ และการผสมคลุกเคล้ากันไม่ดีพอ เป็นต้น แต่จากที่ได้กล่าวไปในข้างต้น สำหรับการทดสอบการเผาไหม้นี้จะเหลืออากาศส่วนเกินที่ไปกับไอเสียในปริมาณที่ค่อนข้างสูง จึงทำให้ตัดข้อสันนิษฐานในสองประการแรกออกไปได้ ดังนั้นประเด็นที่ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จึงเกิดจากการผสมคลุกเคล้าที่ไม่ดีพอระหว่างอากาศ และอนุภาคของเชื้อเพลิง เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.17 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หลังการเผาไหม้ จะพบว่าสัดส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้จากไอเสียที่ 300 kW 400 kW และ 500 kW จะมีค่าเท่ากับ 3665 ppm 3045 ppm และ 3941 ppm ตามลำดับ โดยที่คาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้จากสภาวะ 400 kW มีค่าต่ำที่สุดซึ่งสอดคล้องกับข้อสันนิษฐานของการใช้ออกซิเจนในหัวข้อข้างต้น

ถึงแม้เปลวไฟของที่ 300 kW จะสั้นกว่าที่สภาวะอื่นๆ แต่ค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้ยังคงมีปริมาณที่สูง เกิดจากการที่เปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วยเกิดการรวมตัวกันอย่างรวมเร็ว จึงทำให้มีอนุภาคเชื้อเพลิง และสารระเหยบางส่วนที่ถูกกระแสนของอากาศเหวี่ยงไปชนกับผนังบริเวณทางออก และเคลื่อนตัวหลบเปลวไฟและเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จึงทำให้อนุภาค และสารระเหยกลุ่มนี้ไม่ได้รับการเผาไหม้ตนเอง

นอกจากนี้สาเหตุที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คือ การมีเวลาสั้นเกินไปในบริเวณของการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากต้องระบายไอเสียออกทันที อุณหภูมิ ความดัน หรือพฤติกรรมในการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่สามารถวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียที่กำลังการเผาไหม้ 400 kW และ 500 kW ได้ในปริมาณที่สูง เนื่องจากเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ของทั้งสองยานั้น พุ่งเข้าสัมผัสกับบริเวณผนังส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ก่อนจะออกสู่ท่อทางออก ซึ่งบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องทางการไหลของแก๊สร้อน จึงทำให้พฤติกรรมของการไหลเปลี่ยนแปลงไปอย่างกะทันหัน บวกกับจุดที่ทำการวัดไอเสีย ปฏิกิริยาการเผาไหม้ยังไม่สิ้นสุด จึงทำให้วัดค่าของคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณที่สูง



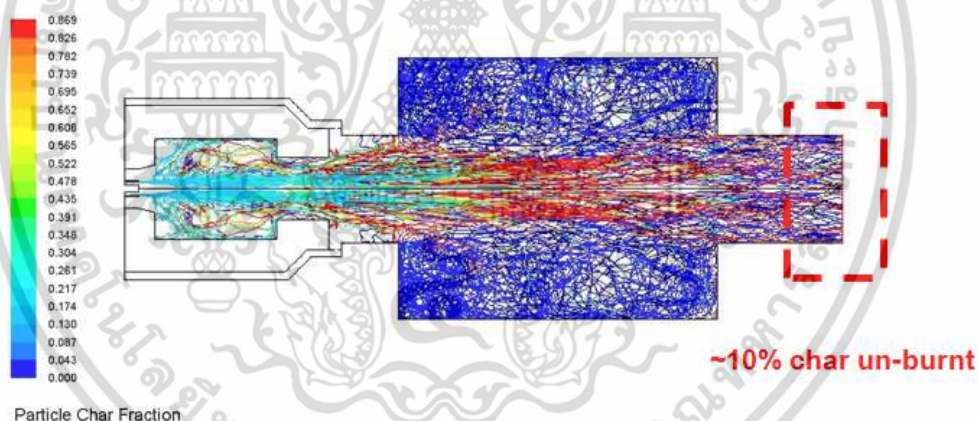
รูปที่ 6.18 แสดงปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) หลังการเผาไหม้

เมื่อพิจารณาปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) ที่ปนอยู่ในแก๊สไอเสียดังรูปที่ 6.17 พบว่าทั้งสามยานการเผาไหม้จะสามารถวัดค่าปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่ปนอยู่ในแก๊สไอเสียได้น้อยมาก เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน (N) ที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับถ่านหิน บวกกับชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ ส่งผลให้การเผาไหม้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่ต่ำ เมื่อพิจารณารูปที่ 3.22 พบว่าถ้าอุณหภูมิของการเผาไหม้ต่ำกว่า 1500 K โอกาสในการเกิด thermal NO<sub>x</sub> จะน้อยมาก ดังนั้นจึงอาจจะสรุปได้ว่าออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) ที่วัดค่าได้นั้นมาจาก Fuel NO<sub>x</sub>

### 6.3 การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง นอกเหนือจากการตรวจวัดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ปนมากับไอเสียแล้ว ยังต้องทำการตรวจวัดปริมาณชาร์ที่ปนมากับเถ้า (char un-burnt) เพื่อคำนวณถึงปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ไม่ได้รับการเผาไหม้ แต่เนื่องจากหัวเผาที่ทำการออกแบบขึ้นนั้น เป็นขนาดที่สามารถนำไปใช้ในหม้อน้ำอุตสาหกรรม ดังนั้นในการทดสอบการเผาไหม้ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จึงไม่สามารถที่จะหยุดการทดสอบเพื่อทำการเก็บตัวอย่างของเถ้าได้ เนื่องจากในการทดสอบแต่ละครั้งต้องใช้ระยะเวลาที่ค่อนข้างนานกว่าที่การเผาไหม้จะเข้าสู่สภาวะคงตัว รวมไปถึงชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ทำการออกแบบขึ้นมานั้นไม่มีระบบสำหรับการเก็บตัวอย่างเถ้าในลักษณะแห้ง

ดังนั้นในการประเมินประสิทธิภาพการเผาไหม้จึงต้องประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลมาเป็นเครื่องมือในการประเมิน ซึ่งในการจำลองนั้นได้รับความร่วมมือจากคุณนิวัฒน์ สุขสาม ซึ่งเป็นหนึ่งในทีมวิจัย เมื่อพิจารณารูปที่ 6.19 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคชาร์ระหว่างการเผาไหม้ที่สภาวะการเผาไหม้ 500 kW พบว่าที่บริเวณท่อทางออกของห้องเผาไหม้จะมีอนุภาคชาร์ที่ไม่ได้รับการเผาไหม้ปนไปกับไอเสียประมาณ 10 % ของปริมาณองค์ประกอบชาร์ในเชื้อเพลิง ซึ่งประสิทธิภาพการเผาไหม้มีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.19 ทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคชาร์ระหว่างการเผาไหม้

Given : อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 500 kW ( $\dot{m}_{fuel}$ ) = 0.0317 kg / s

Assume : เปอร์เซ็นต์อนุภาคชาร์ที่ไม่ได้รับการเผาไหม้ (%char unburnt) = 10 %

Solutions :

สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $\eta_{comb}$ ) จะทำการพิจารณาค่าความร้อนที่สูญเสียไปกับอนุภาคเชื้อเพลิงที่ไม่ได้รับการเผาไหม้ (flue heat losses) ต่อค่ากำลังความร้อนของเชื้อเพลิงที่ป้อนให้กับหัวเผา (fuel heating value) ดังสมการที่ 6.8

$$\text{Combustion Efficiency } (\eta_{comb}) = 100 - \frac{\text{flue heat losses}}{\text{fuel heating value}} \times 100 \quad (6.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิงจะมีปริมาณคาร์บอนที่ประกอบอยู่ 15.23 % นั่นคือจะมีอัตราการก่อกำเนิดคาร์บอนเท่ากับ  $4.828 \times 10^{-3}$  kg/s ดังนั้นจะมีปริมาณคาร์บอนที่ไม่ได้รับการเผาไหม้เหลืออยู่เท่ากับ

$$\dot{m}_{\text{unburn}} = 4.828 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

ค่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้คาร์บอน (heat of reaction for burnout) มีค่าเท่ากับ

$$H_{\text{burnout}} = 32.90 \text{ MJ/kg}$$

คำนวณค่าความร้อนที่สูญเสียไปกับอนุภาคเชื้อเพลิงที่ไม่ได้รับการเผาไหม้

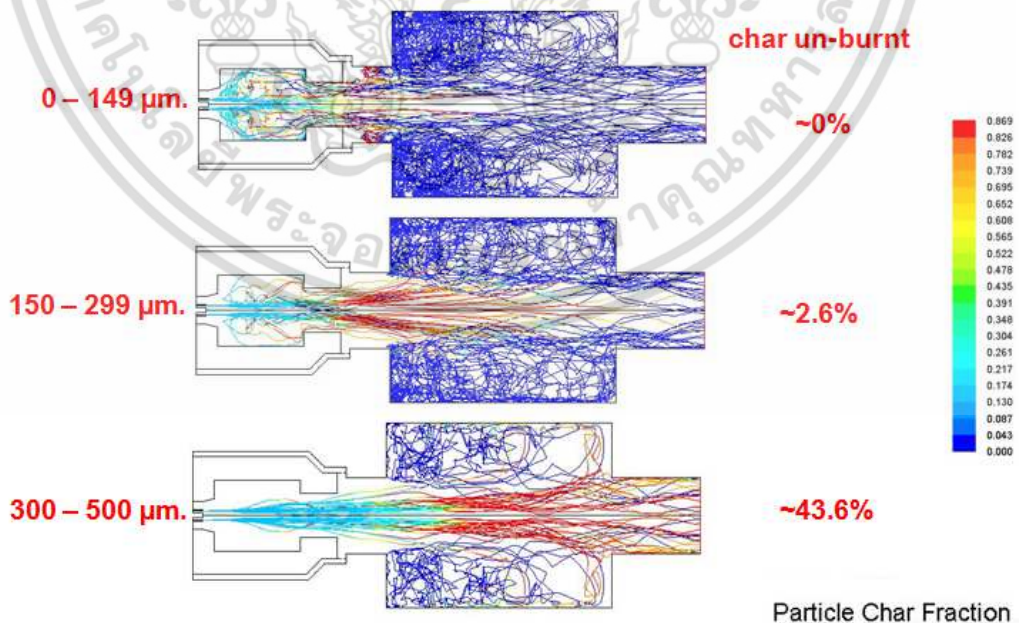
$$\text{flue heat losses} = \dot{m}_{\text{unburn}} \times H_{\text{burnout}} \quad (6.9)$$

$$\text{flue heat losses} = 15.884 \text{ kW}$$

แทนค่า flue heat losses ในสมการที่ 6.9 จะได้

$$\text{Combustion Efficiency } (\eta_{\text{comb}}) = 96.82 \%$$

ซึ่งจากผลการคำนวณจะพบว่า หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ที่ทำการพัฒนานั้นมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $\eta_{\text{comb}}$ ) ประมาณ 96 %



รูปที่ 6.20 เปอร์เซนต์คาร์บอนที่ไม่ได้รับการเผาไหม้โดยแยกตามขนาดอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณารูปที่ 6.20 เปอร์เซนต์คาร์บอนที่ไม่ได้รับการเผาไหม้โดยแยกตามขนาดอนุภาค จะช่วยยืนยันได้ว่าอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กการฟุ้งกระจายจะเกิดขึ้นได้ดีภายในห้องเผาไหม้ช่วย และการเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ อนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กกว่า 0.3 mm. จะพบว่าการเผาไหม้จะเกิดขึ้นเกือบจะสมบูรณ์ และเมื่อพิจารณาตารางที่ 6.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่ผ่านการบดผ่านรูตะแกรงขนาด 0.5 mm. จะพบว่าอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กกว่า 0.3 mm. จะมีสัดส่วนอยู่ถึง 80.6 % นั่นคือหากเลือกใช้เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 mm. มาเป็นเชื้อเพลิงในการทดสอบ จะมีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.3 mm. ซึ่งเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์อยู่เพียงแค่ 19.4 % จึงทำให้โดยรวมแล้วจะเปอร์เซนต์คาร์บอนที่ไม่ได้รับการเผาไหม้เพียง 10 % และให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $\eta_{comb}$ ) ประมาณ 96 %

#### 6.4 การประมาณอัตราการระเหยของน้ำในหม้อน้ำ

เนื่องจากในการทดสอบสมรรถนะการเผาไหม้ของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงนั้น เป็นเพียงการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งยังไม่ได้ถูกนำไปใช้งานจริงในหม้อน้ำอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงต้องทำการประมาณถึงความสามารถของการนำแก๊สร้อนไปใช้สำหรับการผลิตไอน้ำในหม้อน้ำ ด้วยการคำนวณอัตราในการผลิตไอน้ำสำหรับการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 500 kW ซึ่งเป็นกำลังความร้อนสูงสุดที่หัวเผาสามารถทำการเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

Given : กำลังการผลิตของหัวเผา (burner capacity)  $\dot{Q}_m = 500 \text{ kW}$

Assume : ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (combustion efficiency)  $\eta_{comb} = 95\%$

ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน (heat transfer efficiency)  $\eta_{heat} = 80\%$

ความดันใช้งานของหม้อน้ำ  $P_{boiler} = 10 \text{ bar}$

Solutions :

อุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 10 bar

$$T_{sat@10bar} = 179.89 \text{ } ^\circ\text{C}$$

คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในหม้อน้ำ

$$Q_{ex} = Q_{in} \times (\eta_{comb}/100) \times (\eta_{heat}/100) \quad (6.10)$$

จะได้

$$Q_{ex} = 380 \text{ kW}$$

คำนวณหาค่า The enthalpy of vaporization

$$h_{fg} = h_g - h_f$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $h_f$  คือ Saturated liquid enthalpy และ  $h_g$  คือ Saturated vapor enthalpy ซึ่งที่ความดัน 10 bar จะพบว่า

$$h_{f@10bar} = 42.02 \text{ kJ/kg} \text{ และ } h_{g@10bar} = 2777.12 \text{ kJ/kg}$$

จะได้  $h_{fg} = 2735.10 \text{ kJ/kg}$

คำนวณอัตราการระเหยของน้ำ

$$m_{evap} = Q_{ex} / h_{fg} \quad (6.11)$$

จะได้  $m_{evap} = 0.14 \text{ kg / s}$

หรือ  $m_{evap} = 504 \text{ kg / hr}$

สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำอ้างอิงจากโปรแกรม XSteam Excel v2.6 ซึ่งจากผลการคำนวณจะพบว่า หัวเผาที่มีกำลังความร้อนจากการเผาไหม้ 500 kW สามารถที่จะนำไปใช้ผลิตไอน้ำในหม้อน้ำได้ในอัตรา 0.5 ตันต่อชั่วโมง ที่ความดันไอน้ำ 10 bar

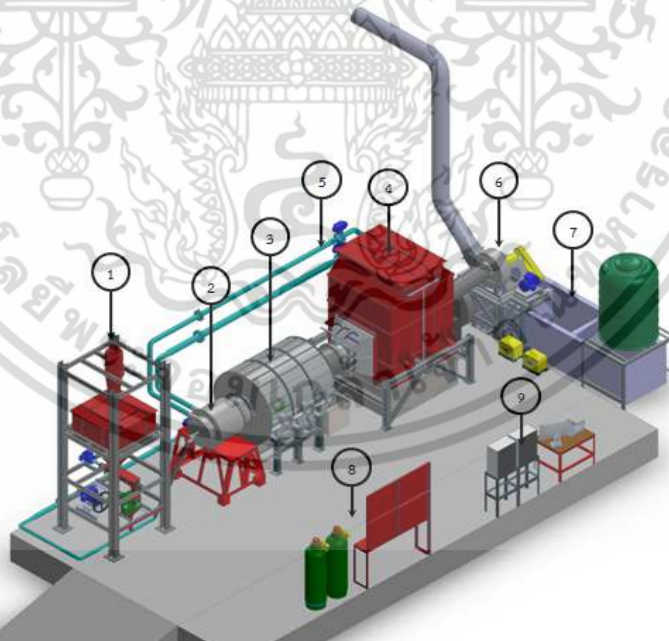
## บทที่ 7

### สรุป และข้อเสนอแนะ

#### 7.1 บทสรุป

การออกแบบ และพัฒนาต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ขนาด 1 MW ได้มีการนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้ ที่ผ่านการจำลองเทียบเคียงกับเตาเผาเชื้อเพลิงถ่านหินผง มาประยุกต์ใช้กับการจำลองเพื่อออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงดังกล่าว จากผลการจำลองพบว่าหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วยที่มีมุมผนังบริเวณทางออกเท่ากับ 90 องศา สามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ โดยไม่เกิดปรากฏการเป่าดับ [3] เมื่อทำการจำลองเพื่อหาขนาดการทำงานที่เหมาะสมสำหรับหัวเผาที่ทำการศึกษา จากผลการจำลองพบว่าหัวเผานี้มีขนาดการทำงานอยู่ระหว่าง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งจะเป็นช่วงที่หัวเผาสามารถรักษาเสถียรภาพในการเผาไหม้ และให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จากข้อมูลดังกล่าวจึงนำไปสู่การผลิตต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง

นอกเหนือจากต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงแล้ว เพื่อให้งานวิจัยสามารถดำเนินการต่อได้ จึงต้องทำการออกแบบระบบสนับสนุนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ซึ่งได้แก่ระบบป้อนเชื้อเพลิงห้องเผาไหม้ และระบบบำบัดไอเสีย เป็นต้น โดยในการออกแบบจะถูกจำกัดขอบเขตด้วยกำลังความร้อนสูงสุดของหัวเผาที่ 1 MW ซึ่งผลลัพธ์ของการออกแบบจะทำให้ได้ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงดังแสดงในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 ชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง (1) ระบบป้อน และป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง, (2) หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล, (3) ห้องเผาไหม้, (4) ระบบบำบัดไอเสีย wet scrubber, (5) ระบบป้อนอากาศ, (6) พัดลมดูดอากาศ และปล่องควัน, (7) บ่อตกตะกอน และระบบหมุนเวียนน้ำ, (8) ชุดควบคุมแก๊ส LPG, (9) ระบบวัด และควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในการสร้างชุดทดสอบดังกล่าวยังได้รับความร่วมมือจากทีมวิจัยทางด้านการวัดและควบคุม ในการจัดทำเครื่องมือวัด และระบบการควบคุมของอุปกรณ์ต่างๆ จึงส่งผลให้ชุดการทดสอบการเผาไหม้ดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบหัวเผาประเภทอื่นๆ ที่มีในภาคอุตสาหกรรมได้

สำหรับการทดสอบสมรรถนะของชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง นอกเหนือจากการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาแล้ว จะเน้นไปที่การทดสอบสมรรถนะของระบบป้อนเชื้อเพลิง เนื่องจากเป็นระบบที่ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของหัวเผา เมื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงต่อความเร็วรอบใบสกรูขนถ่าย จะพบว่าตัวแปรทั้งสองให้ความสัมพันธ์กันในลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยเชื้อเพลิงต่างชนิดกันจะให้อัตราการขนถ่ายที่แตกต่างกัน เนื่องด้วยผลจากแพกเตอร์ความเต็มรางของวัสดุ และความหนาแน่นของวัสดุนั้นๆ และเมื่อศึกษาถึงอิทธิพลของแพกเตอร์ความเต็มรางของวัสดุจะพบว่าแพกเตอร์ความเต็มรางของวัสดุแทบจะไม่ส่งผลต่ออัตราการขนถ่ายวัสดุเลย เนื่องจากสกรูขนถ่ายที่ทำการออกแบบมีรางสกรูที่สั้น ส่งผลให้การสูญเสียระหว่างการขนถ่ายเกิดขึ้นน้อยมาก ดังนั้นตัวแปรต้นที่ส่งผลต่ออัตราการขนถ่ายวัสดุจะถูกตัดเหลือเพียงตัวแปรเดียวนั้นคือ ความหนาแน่นของวัสดุ จึงทำให้สามารถสรุปสมการในการประมาณค่าอัตราการขนถ่ายของชุดสกรูขนถ่ายที่ทำการออกแบบไว้ดังนี้  $m_s = \rho_b(0.0019f + 0.0003)$  หรือ  $m_s = 0.000632\rho_b N$  ในหน่วย kg/min

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงต่อลักษณะของเปลวไฟ โดยทำจากการเปรียบเทียบลักษณะของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้อนุภาคสามขนาด ได้แก่ อนุภาคขนาดเล็กกว่า 1.5 mm, อนุภาคขนาดเล็กกว่า 1.0 mm และอนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.5 mm ตามลำดับ จะพบว่าการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงขนาดเล็กกว่า 0.5 mm, ลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มไปในทางที่ดี ใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สั้น และให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าเปลวไฟที่เกิดจากอีกสองกลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า

เมื่อพิจารณาถึงการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) จะพบว่าชุดใบบิด (swirl blades) ที่ทำการออกแบบ สามารถสร้างกระแสอากาศหมุนควงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยได้ แต่กระแสหมุนควงที่ได้นั้นมีความรุนแรงที่ค่อนข้างต่ำ จากผลการทดสอบพฤติกรรมของเปลวไฟ และการเผาไหม้ที่เกิดจากมุมมองของใบบิดทั้งสามมุมที่ทำการทดสอบ จะพบว่าจะมีเพียงมุมใบบิดที่ 100 องศา ที่จะสามารถสร้างกระแสหมุนควงที่มีความรุนแรงเพียงพอต่อการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวนบริเวณ IRZ และ ERZ จึงทำให้การเผาไหม้จะเกิดขึ้นบริเวณกลางค่อนมาหาส่วนต้นของห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งการที่จุดเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ หรือฐานของเปลวไฟอยู่ที่บริเวณส่วนต้นของหัวเผาเช่นนี้ จะส่งผลดีต่อเสถียรภาพของการเผาไหม้ จนส่งผลให้เกิดการเผาไหม้อย่างมีเสถียรภาพ และต่อเนื่องได้โดยไม่เกิดปรากฏการณ์เป่าดับ และเมื่อทำการทดลองเพื่อหาอัตราการการทำงานที่หัวเผา พบว่าต้นแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย มีอัตราการการทำงานที่มีเสถียรภาพอยู่ที่ 300 kW ถึง 500 kW ซึ่งต่ำกว่าผลที่ได้จากการจำลองไว้ในขั้นตอนของการออกแบบ เนื่องจากตัวแปรควบคุมของทั้งสองกรณีมีความแตกต่างกัน เช่น ชนิด และขนาดของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้มีความแตกต่างกัน รวมไปถึงความรุนแรงของกระแสอากาศหมุนควงของการทดลองจะน้อยกว่าขอบเขตที่ตั้งไว้ในแบบจำลอง เป็นต้น ซึ่งในอนาคตผลการทดลองที่ได้จะถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองให้มีความเหมาะสมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลอีกครั้ง แต่อย่างไรก็ตามย่านการเผาไหม้ดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมขนาดย่อมได้ โดยสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำได้สูงสุดประมาณ 0.5 ตันต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอเสียถือเป็นตัวแปรหนึ่งที่สามารถบ่งชี้ถึงสมรรถนะของชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้ได้ หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ดีต้องสามารถเหนี่ยวนำให้อากาศ และเชื้อเพลิงเกิดการผสมผสานจนเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และปลดปล่อยแก๊สพิษในปริมาณต่ำ เมื่อพิจารณาแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้จะพบว่าสัดส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดค่าได้จากไอเสียที่ 300 kW 400 kW และ 500 kW ค่าเท่ากับ 3665 ppm 3045 ppm และ 3941 ppm ตามลำดับ ประเด็นที่ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณสูง เนื่องจากการผสมคลุกเคล้าที่ไม่ดีพอระหว่างอากาศ และอนุภาคของเชื้อเพลิง บวกกับการที่เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ พุ่งเข้าปะทะกับบริเวณผนังส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ก่อนจะออกสู่ท่อทางออกที่เป็นตำแหน่งในการวัดไอเสีย ดังนั้นตำแหน่งที่ทำการวัดไอเสียจึงเป็นบริเวณที่ปฏิกิริยาการเผาไหม้ยังไม่สิ้นสุด จึงทำให้วัดค่าของคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณที่สูง แต่เมื่อพิจารณาปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ ) พบว่าทั้งสามย่านการเผาไหม้จะสามารถวัดค่าปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่ปนอยู่ในแก๊สไอเสียได้น้อยมาก และต่ำกว่าค่ามาตรฐานอุตสาหกรรม (ไม่เกิน 200 ppm) เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน (N) ที่ค่อนข้างน้อย บวกกับการเผาไหม้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 1500 K จึงทำให้ไม่เกิด thermal  $\text{NO}_x$  ดังนั้นจึงอาจจะสรุปได้ว่าออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ ) ที่วัดค่าได้นั้นมาจาก Fuel  $\text{NO}_x$

เนื่องจากปัญหาในด้านการเก็บตัวอย่างแล้ว ดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพการเผาไหม้จึงต้องประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงมาเป็นเครื่องมือในการประเมิน ซึ่งจากผลการคำนวณจะพบว่า หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ที่ทำการพัฒนานั้นมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $\eta_{comb}$ ) ประมาณ 96 %

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้จะทำการกล่าวถึงข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับระบบทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อประโยชน์สำหรับการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงต่อไปในอนาคต หรือเพื่อนำข้อมูลการวิจัยไปต่อยอด และนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาหัวเผาสำหรับการใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยมีรายละเอียดดังนี้

7.2.1 ควรมีการออกแบบ และปรับเปลี่ยนชุดใบพัด (swirl blades) ให้สามารถสร้างกระแสอากาศหมุนควงที่มีความรุนแรงที่มากขึ้น โดยคาดหวังว่าจะทำให้เกิดความปั่นป่วนที่มากขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย ส่งผลให้สมรรถนะในการเผาไหม้สูงขึ้น และมีงานการทำงานที่กว้าง และหลากหลายมากขึ้น

7.2.2 ควรมีการเปลี่ยนประเภทของเครื่องบดเชื้อเพลิง ให้มีความเหมาะสมสำหรับการบดเชื้อเพลิงชีวมวล และมีอัตราการผลิตที่สูงกว่ากำลังการเผาไหม้สูงสุดที่จะทำการทดสอบ เพื่อให้สามารถบดเชื้อเพลิง และจ่ายเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง

7.2.3 ควรทำการศึกษาสัดส่วนของอากาศทั้งสามส่วน ที่มีความเหมาะสมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่กำลังความร้อนต่างๆ รวมไปถึงศึกษาถึงอากาศส่วนเกินที่มีความเหมาะสมกับหัวเผา และการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

7.2.4 ควรทำการศึกษาถึงศักยภาพด้านการแผ่รังสี และการพาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุง และพัฒนาหัวเผาให้มีศักยภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของแก๊สร้อน และมวลอนุภาคเชื้อเพลิง ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มสมรรถนะ และประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหัวเผา

7.2.4 ควรมีการออกแบบ และปรับปรุงระบบบำบัดไอเสีย โดยการปรับปรุงหัวฉีดน้ำ และควบคุมอัตราการฉีดน้ำให้เกิดความสมดุลกับปริมาณแก๊สร้อนที่กำลังความร้อนต่างๆ เพื่อให้สมรรถนะในการดักฝุ่น และเถ้าลอยสูงขึ้น ช่วยลดปัญหามลพิษทางอากาศ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] อัมพรพรรณ วงษ์ท่าเรือ. 2556. สำนักนโยบายอุตสาหกรรมมหภาค. **การพัฒนาพลังงานทดแทนใหม่ในประเทศไทย**. [online]. Available : <http://www.oie.go.th/>
- [2] The Japan Institute of Energy. 2008. คู่มือสารชีวมวลเอเชีย แนวทางสำหรับการผลิตและการใช้สารชีวมวล. [online]. Available <http://www.jie.or.jp/biomass/>
- [3] ธนภัทร์ ภักดีวรวงศ์. "การจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [4] Roberto et al. "Characterization of Spanish biomass wastes for energy use." **Bioresource Technology** 103, 2012. pp. 249-258.
- [5] อุกฤษฏ์ สหพัฒน์สมบัติ และคณะ. "การศึกษาเบื้องต้นถึงคุณภาพของชีวมวลสำหรับเชื้อเพลิงไม้อัดแท่ง." การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21. 2550. หน้า 36-40.
- [6] K.D. Tiggesa et al. "Conversion of Existing Coal-Fired Power Plants to Oxyfuel Combustion : Case Study with Experimental Result and CFD Simulations." **Energy Procedia** 1. 2009. pp. 549-556.
- [7] Shan Xue et al. "Experimental investigation on NOx emission and carbon burnout from a radially biased pulverized coal whirl burner." **Fuel Processing Technology** 90. 2009. pp. 1142-1147.
- [8] จิตพิพัทธ์ ลิ้มกุล. "การประยุกต์หลักการอากาศไหลหมุนควงในเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล." **วิศวกรรมลาดกระบัง**. ปีที่ 28 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2554.
- [9] Norbert Modlinski." Computational modeling of a utility boiler tangentially-fired furnace retrofitted with swirl burners." **Fuel Processing Technology** 91. 2010. pp. 1601-1608.
- [10] กันตภณ อุดมโชคปิติ. "การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อการออกแบบหัวเผาถ่านหินผงที่มีการหมุนวนก๊าซไอเสีย." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [11] Jun Li et al. " Flame characteristics of pulverized torrefied-biomass combusted with high-temperature air." **Combustion and Flame** 160. 2013. pp.2585-2594.
- [12] M. Mando L et al. "Pulverized straw combustion in a low-NOx multifuel burner : Modeling the transition from coal to straw." **Fuel** 89, 2010. pp. 3051 - 3062.
- [13] M.M. Kamal. "Parametric study of combined premixed and non-premixed flame coal burner." **Fuel** 87, 2008. pp. 1515-1528.
- [14] Akio Nishiyama et al. "Fuel and emissions properties of Stirling engine operated with wood powder." **Fuel** 86, 2007. pp. 2333-2342.
- [15] 34 เรื่องนำรู้การขนถ่ายวัสดุด้วยลม, สายพานลำเลียงระบบขนถ่ายวัสดุทั่วไป. **ขนถ่ายวัสดุ 2**. ครั้งที่1. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน). 2546.

- [16] Conveyor Engineering & Manufacturing. Screw Conveyor Component & Design. Cedar Rapids. Conveyor Eng. & Mfg. Co. 2012.
- [17] สำเร็จ จักรใจ. การเผาไหม้ (Combustion). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.
- [18] สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน. 2555. ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ความร้อน). [online]. Available : <http://www2.dede.go.th/>.
- [19] สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2555. **พลังงานชีวมวล**. [online]. Available : <http://www2.dede.go.th/>
- [20] นคร ทิพย์วงศ์. **พื้นฐานวิศวกรรมกรรมการเผาไหม้**.
- [21] สมรัฐ เกิดสุวรรณ. **การเผาไหม้และการควบคุมมลพิษ**. ปทุมธานี. สกายบุ๊กส์. 2549.
- [22] Stephen R. Turns. **An Introduction to Combustion Concept and Applications**. third edition. Singapore. Mc Graw Hill. 2012.
- [23] Sjaak van Loo. **The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing**. London. Earthscan. 2008.
- [24] Yunus A. Cengel. **Heat and Mass Transfer-A Practical Approach**. Third Edition. Singapore : The McGraw Hill. 2006.
- [25] J. Charoensuk. "The Application of Mathematical Model for Scaling Pulverized coal combustors." Ph.D Thesis, University of London. 1996.
- [26] จารุพงษ์ แดงขนิษฐ, ภูริณัฐ ศิริบุญ, ศุภาพิชญ์ รัตนพลที. **ระบบป้อนเชื้อเพลิงฝุ่นเข้าสู่หัวเผาไหม้ชีวมวล**. ปรินญาณิพนธ์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [27] วันชพร คงนคร, วิศรุต เพ็งบุญมา, ศรีณยู คงสวัสดิ์วรกุล. **การพัฒนาาระบบป้อนและบดเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับหัวเผาชนิดฝุ่น**. ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [28] ฐิติชญาพร สุรเดช, ณัฐวัตร สีลาจินดาไกรฤกษ์, ธรรมชัย จิตตวัฒน์รัตน์. **หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น**. ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [29] กุลพัฒน์ กุลกำจร, สุรวิษฐ์ กลั่นเลี้ยง, อภิชา เลิศพรเจริญ. **การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น**. ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [30] Bernard Fisher. Biomass suspension burner. US. EP 0 143 510 A1. 07 August 1984.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

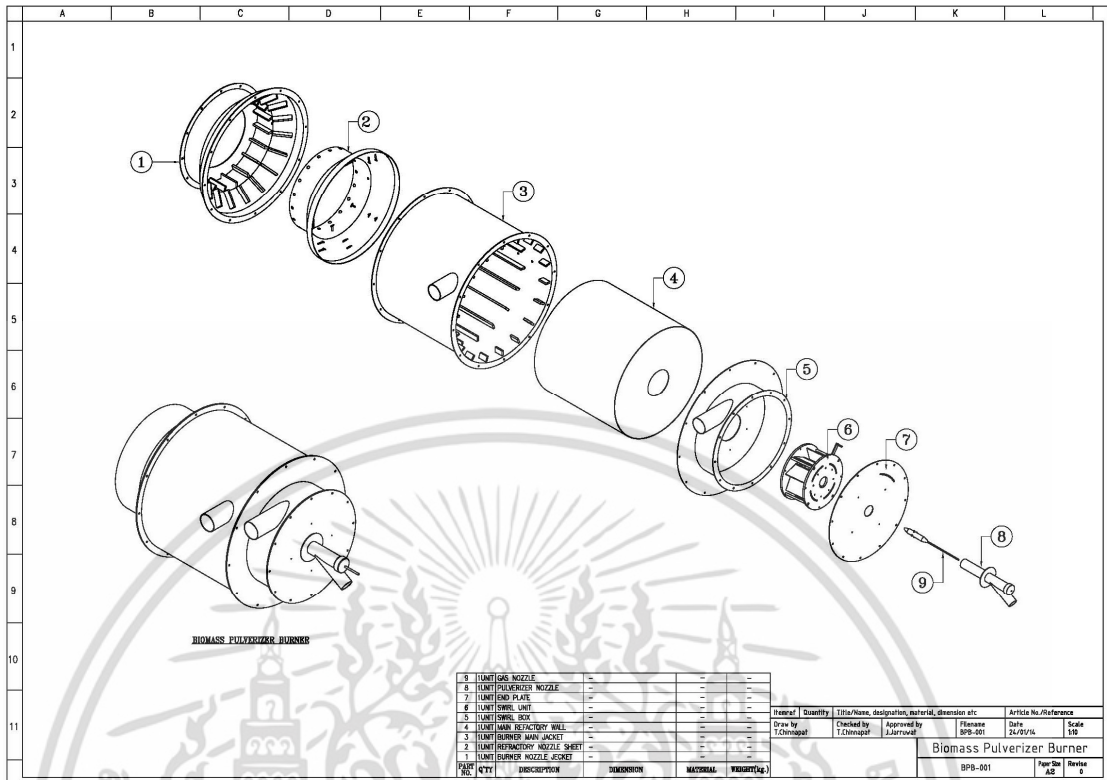


ภาคผนวก ก.  
แบบสั่งผลิต

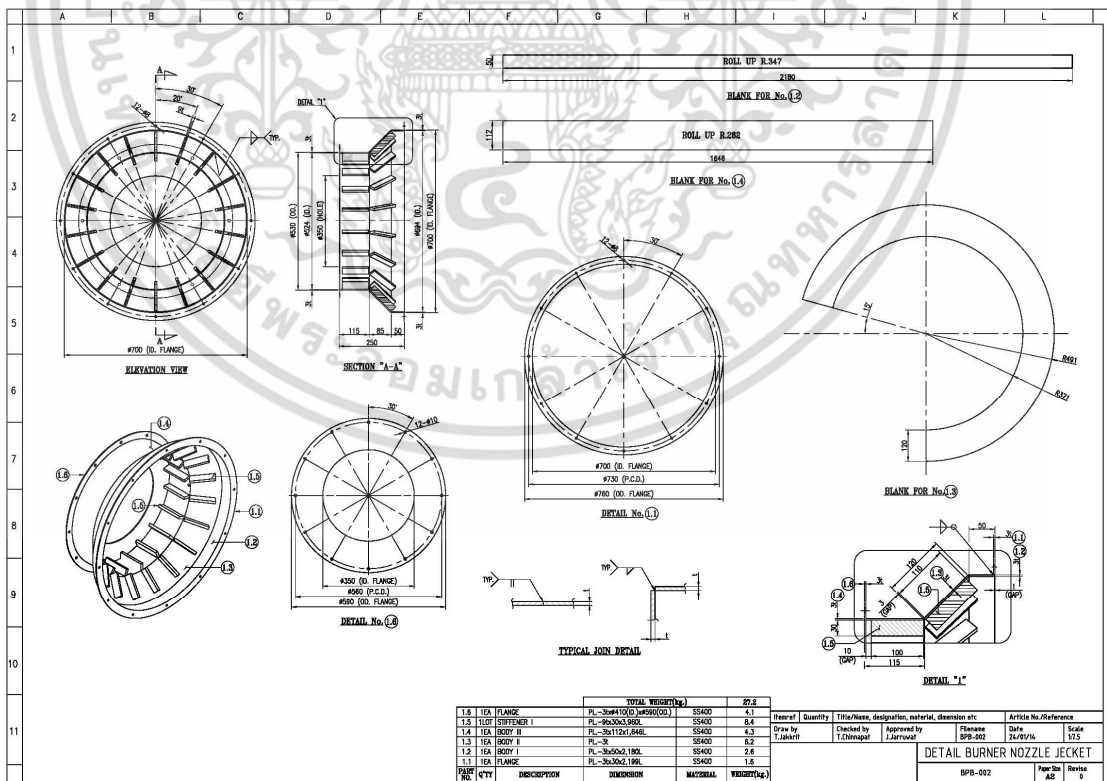
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

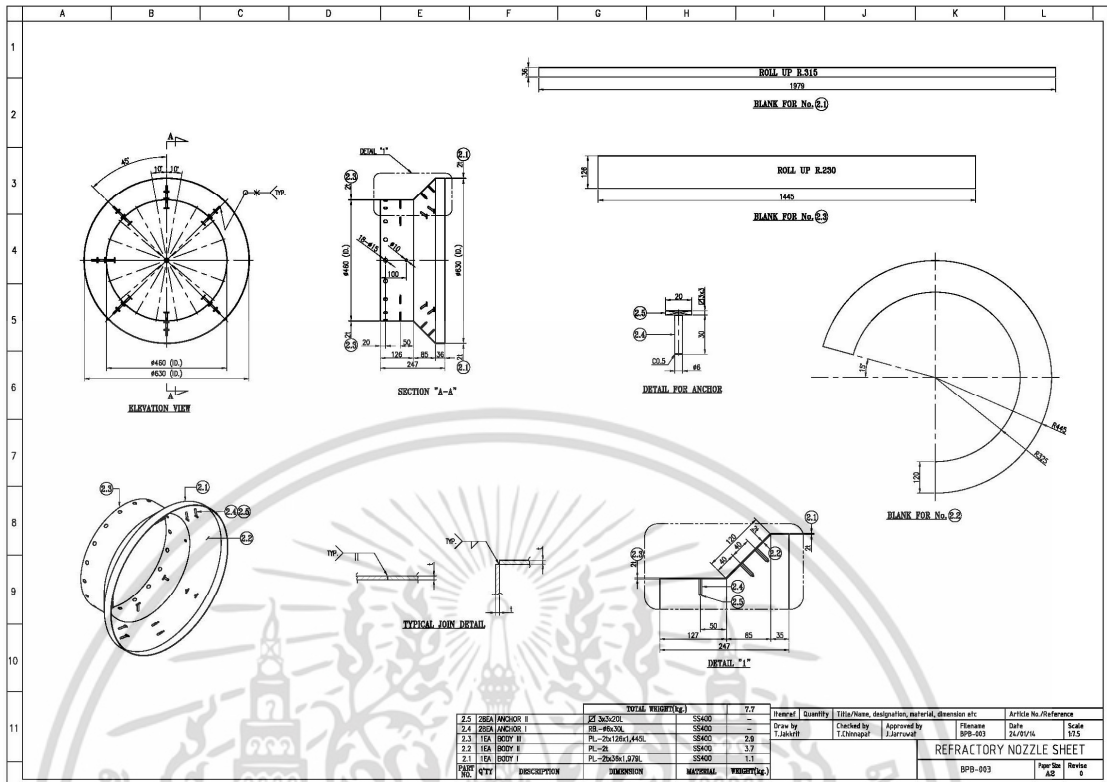


รูปที่ ก1.1 ส่วนประกอบของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

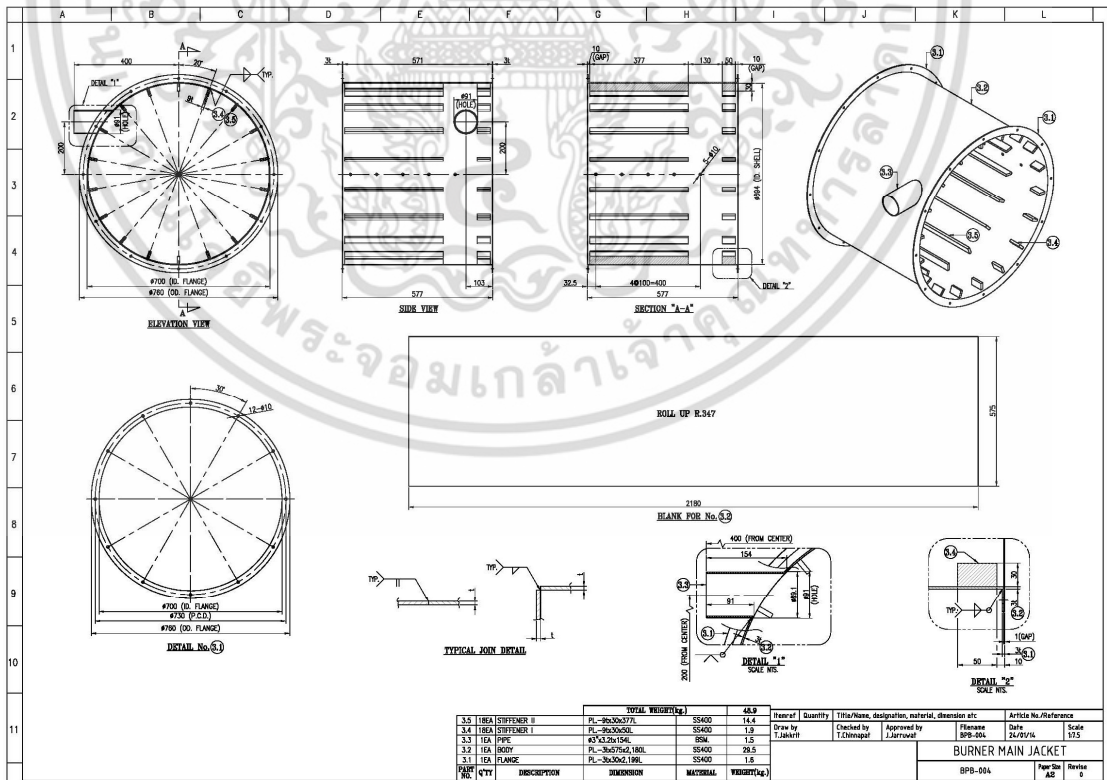


รูปที่ ก1.2 รายละเอียดของชิ้นส่วนหัวเผาหมายเลข 1 burner nozzle jacket

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

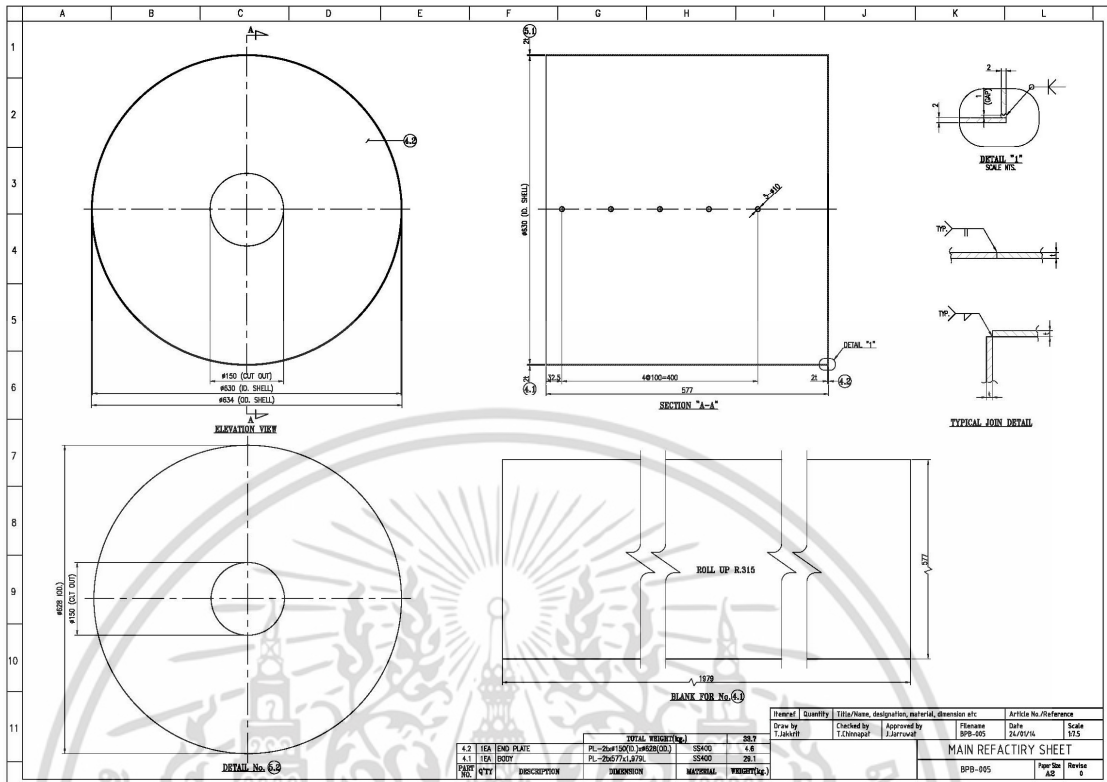


รูปที่ ก1.3 รายละเอียดของชิ้นส่วนหัวเผาหมายเลข 2 refractory nozzle sheet

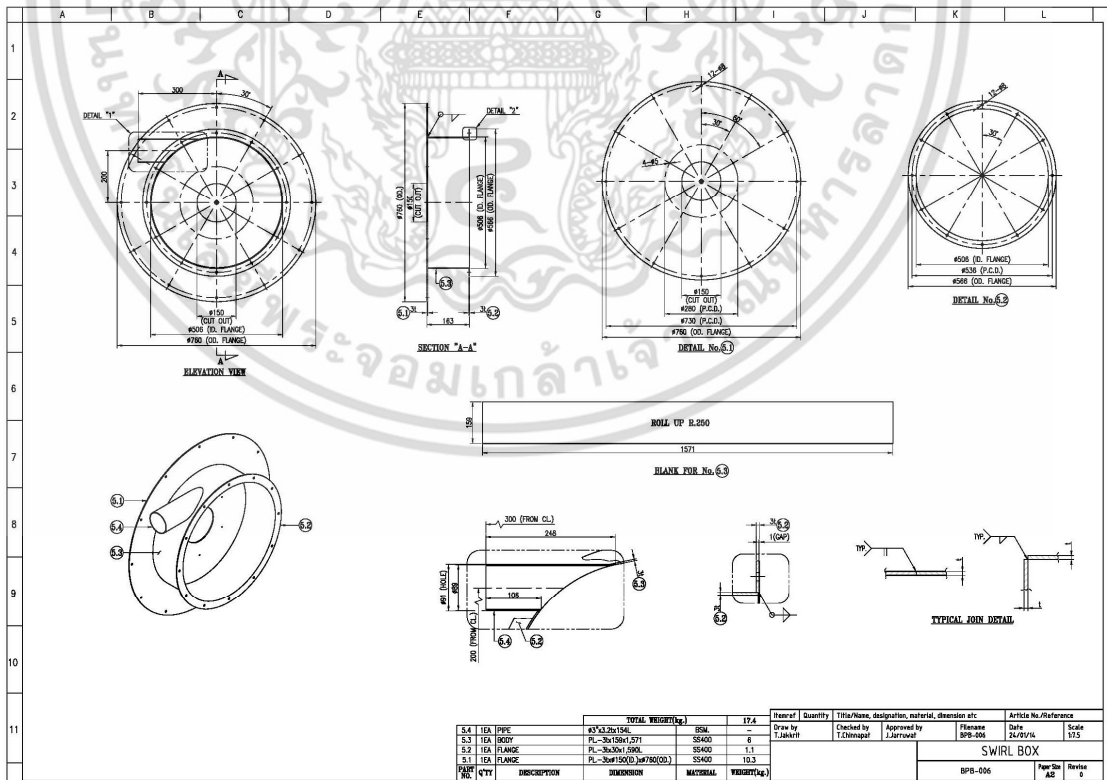


รูปที่ ก1.4 รายละเอียดของชิ้นส่วนหัวเผาหมายเลข 3 burner main jacket

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

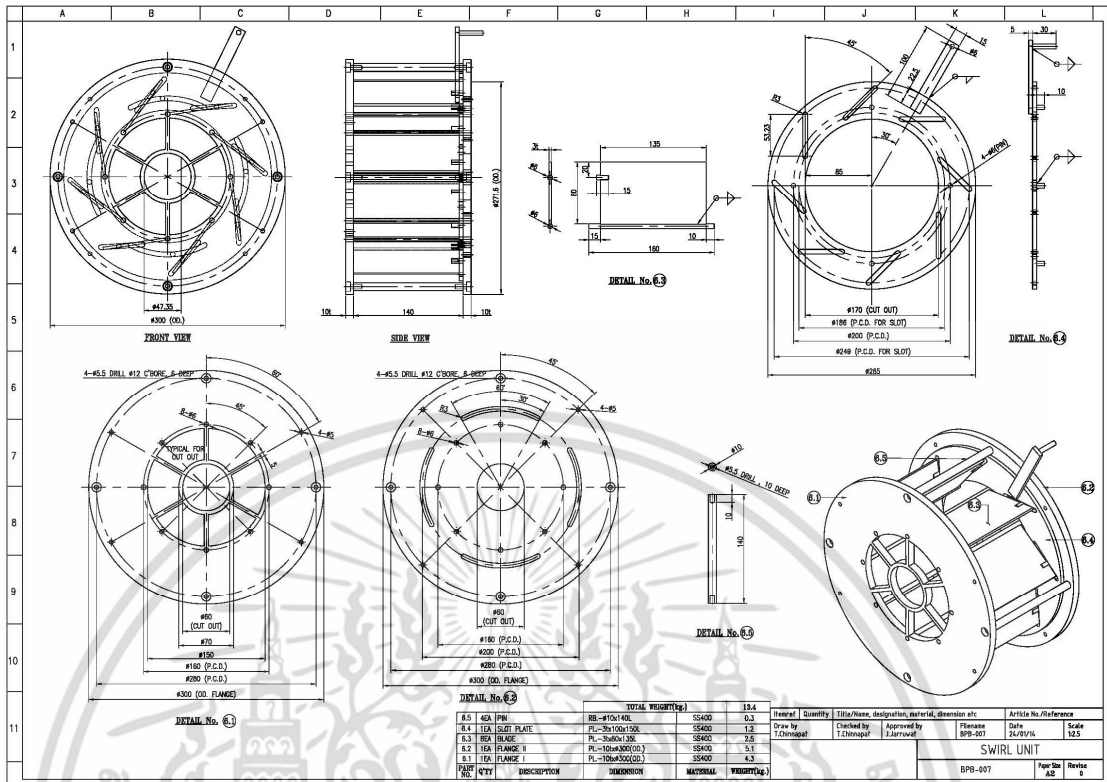


รูปที่ ก1.5 รายละเอียดของชิ้นส่วนหัวเผาหมายเลข 4 main refractory sheet

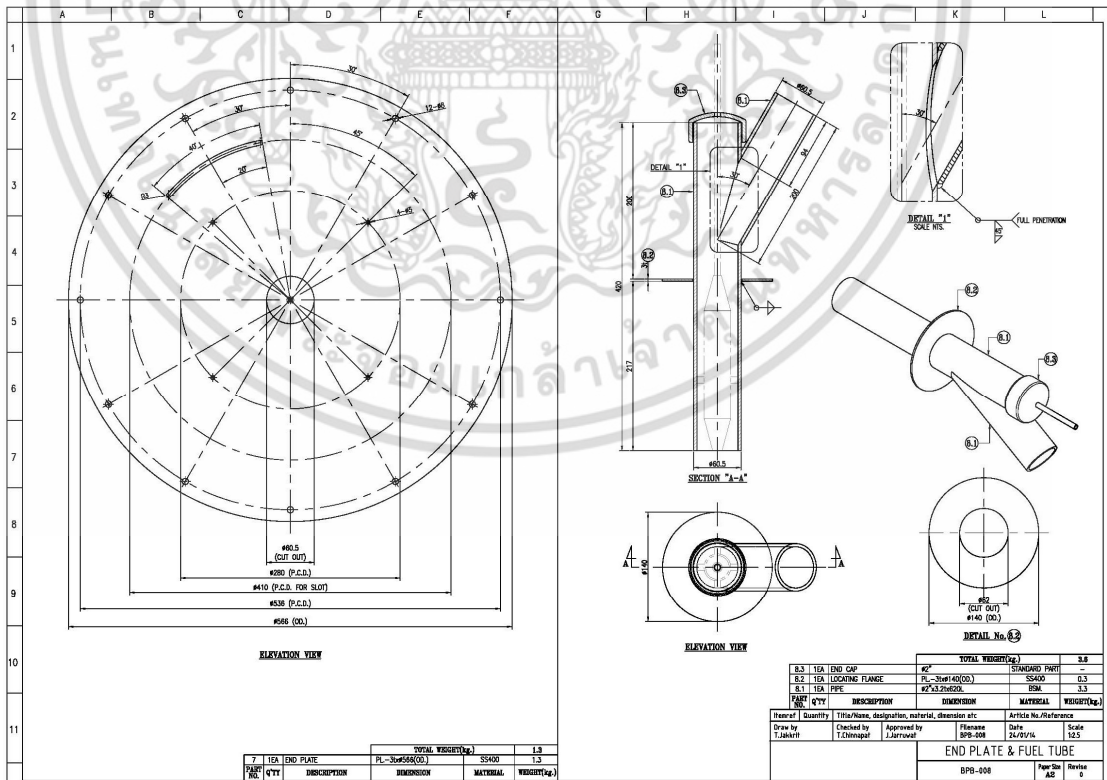


รูปที่ ก1.6 รายละเอียดของชิ้นส่วนหัวเผาหมายเลข 5 swirl box

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.7 รายละเอียดของชิ้นส่วนหัวเผาหมายเลข 6 swirl unit

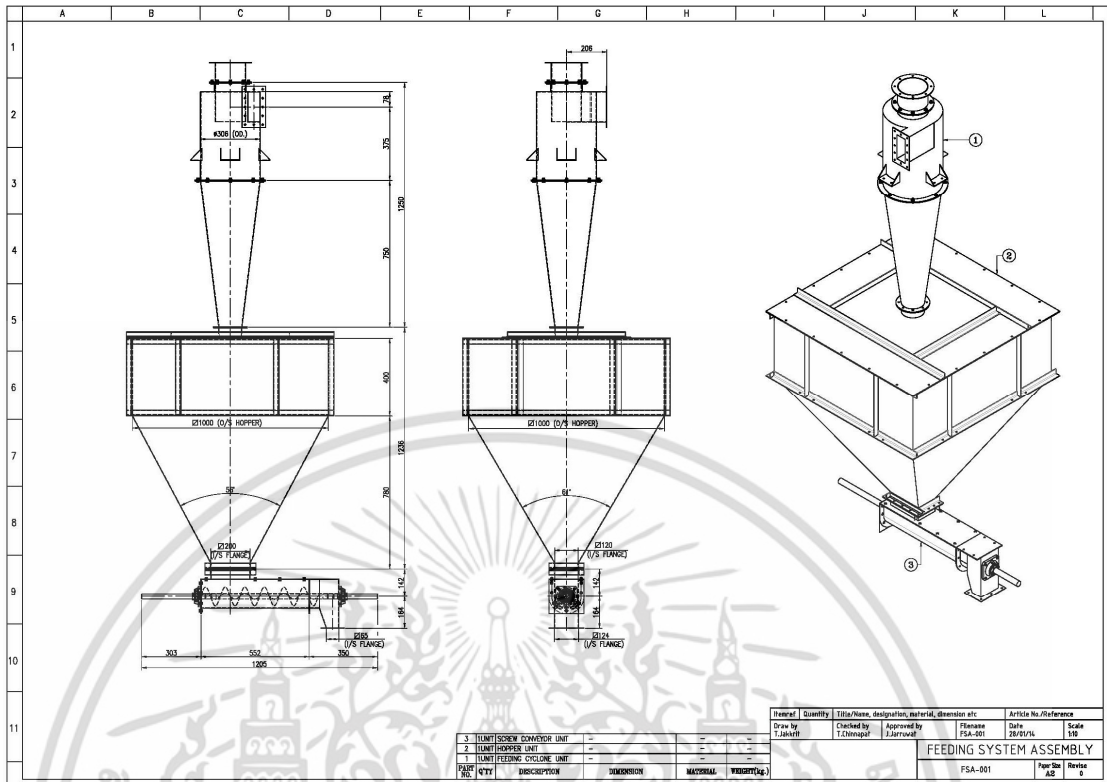


รูปที่ 1.8 รายละเอียดของชิ้นส่วนหัวเผาหมายเลข 7 end plate และหมายเลข 8 fuel tube

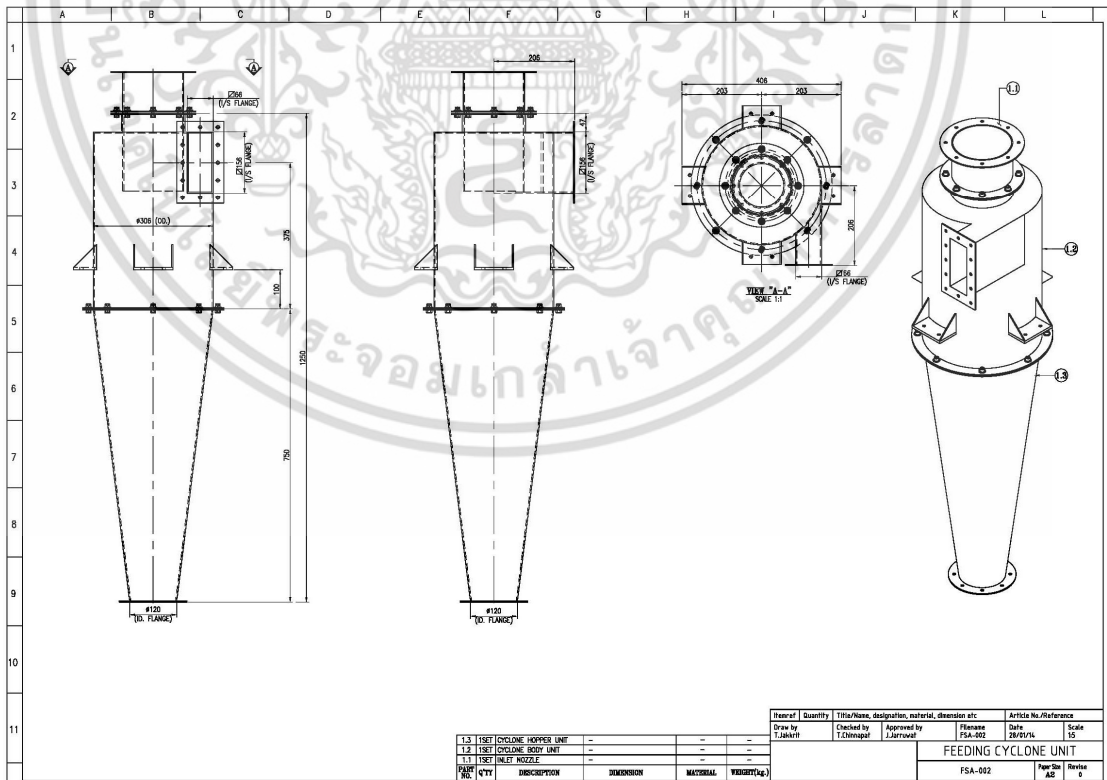
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

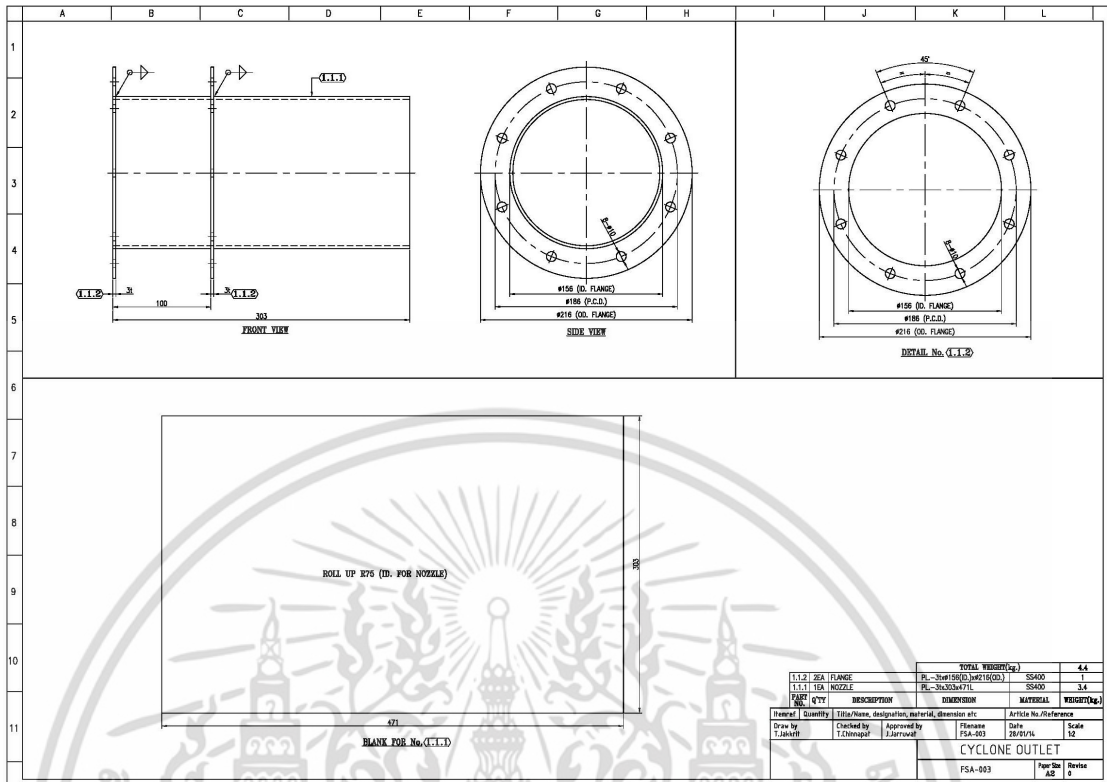


รูปที่ ก2.1 ส่วนประกอบหลักของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง

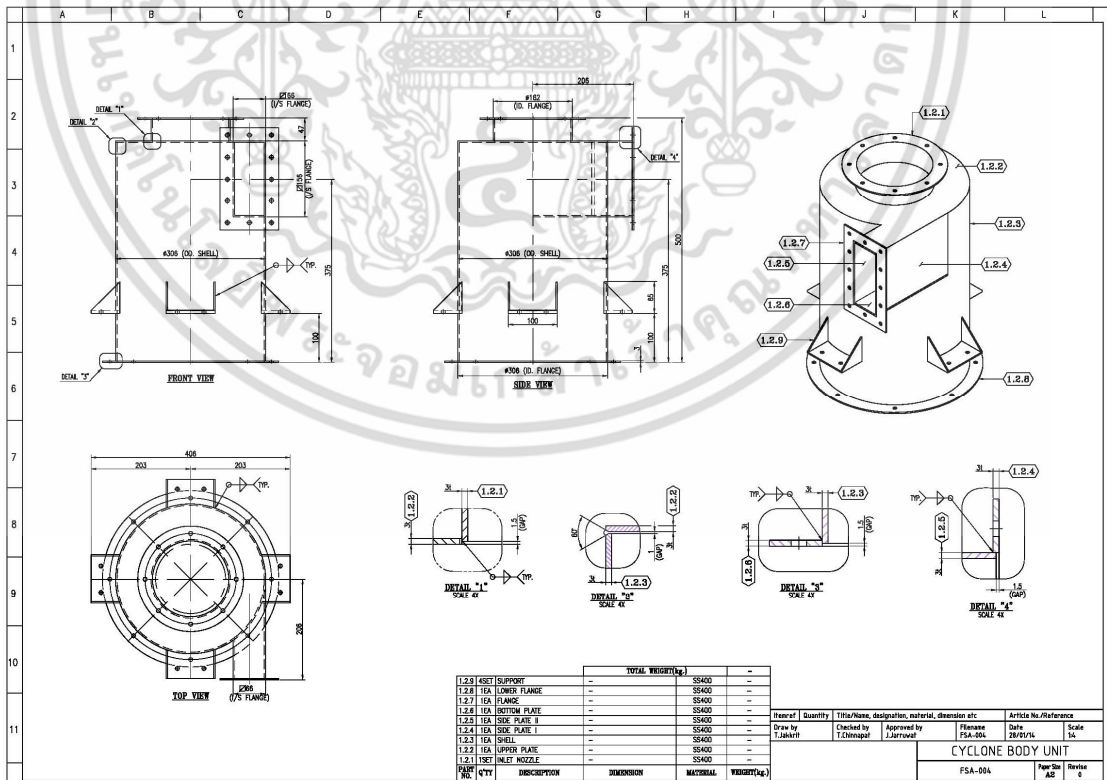


รูปที่ ก2.2 ชิ้นส่วนหมายเลข 1 (ไซโคลน) ของระบบป้อนเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

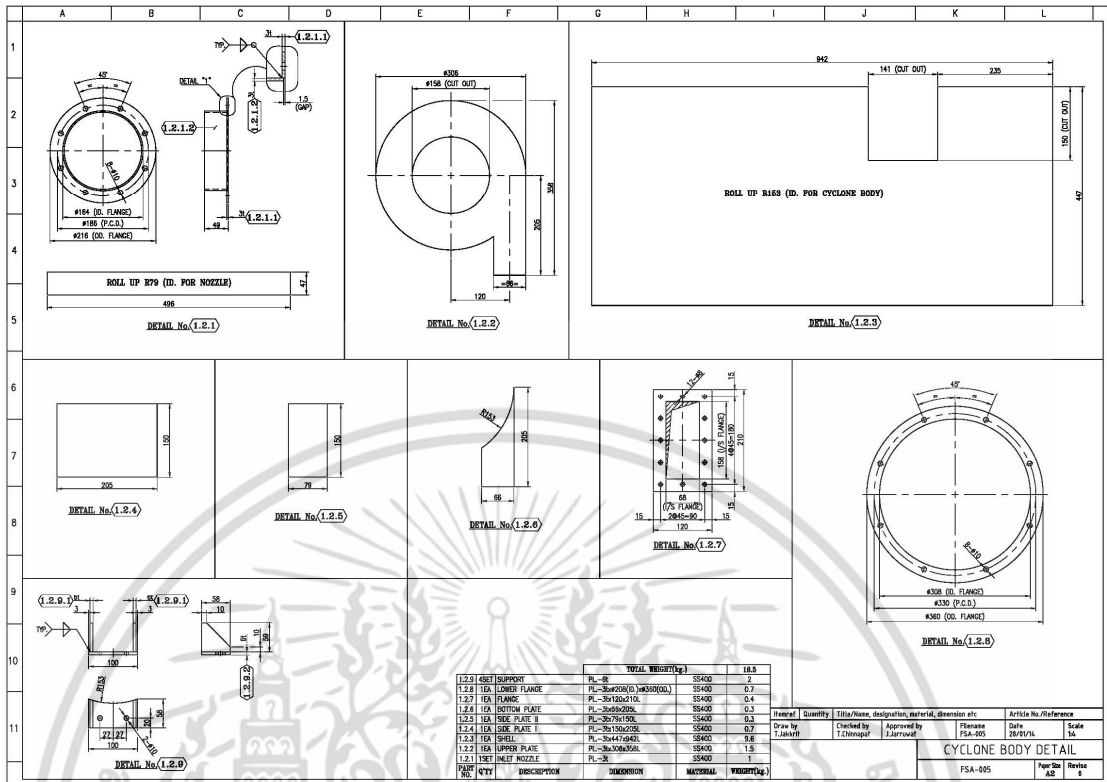


รูปที่ ก2.3 รายละเอียดของหน้าแปลน และช่องทางออกอากาศของไซโคลน

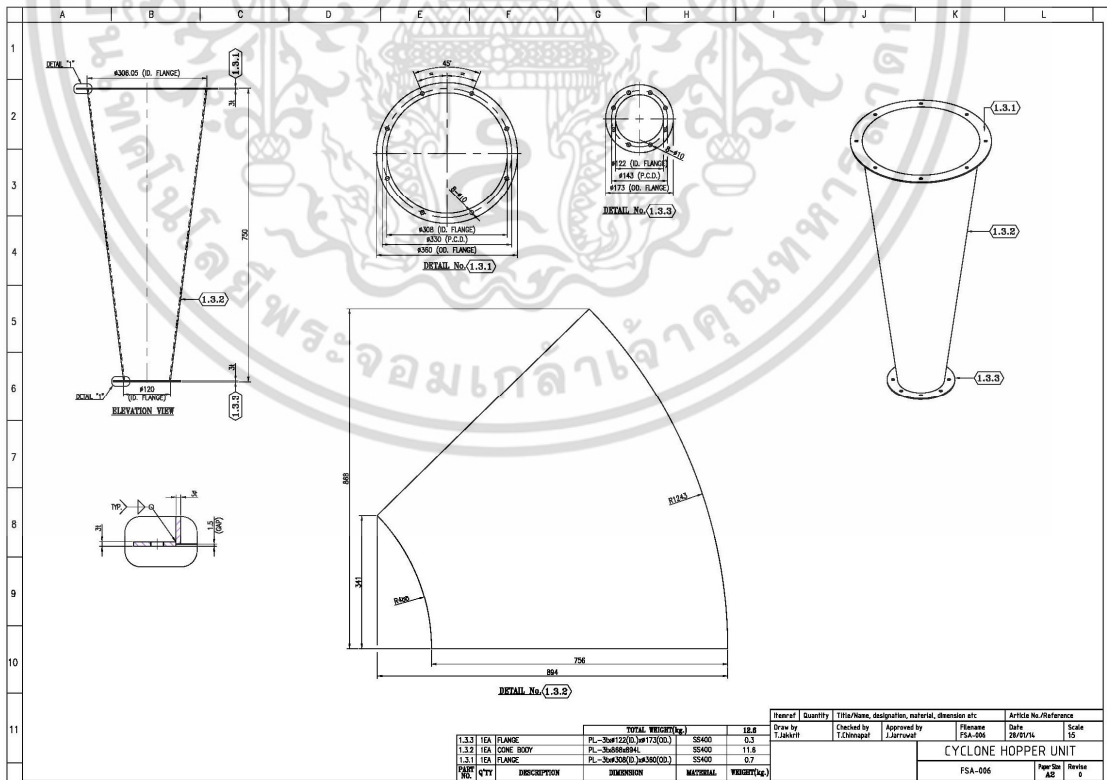


รูปที่ ก2.4 รายละเอียดการเชื่อม และองค์ประกอบส่วนบนของไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

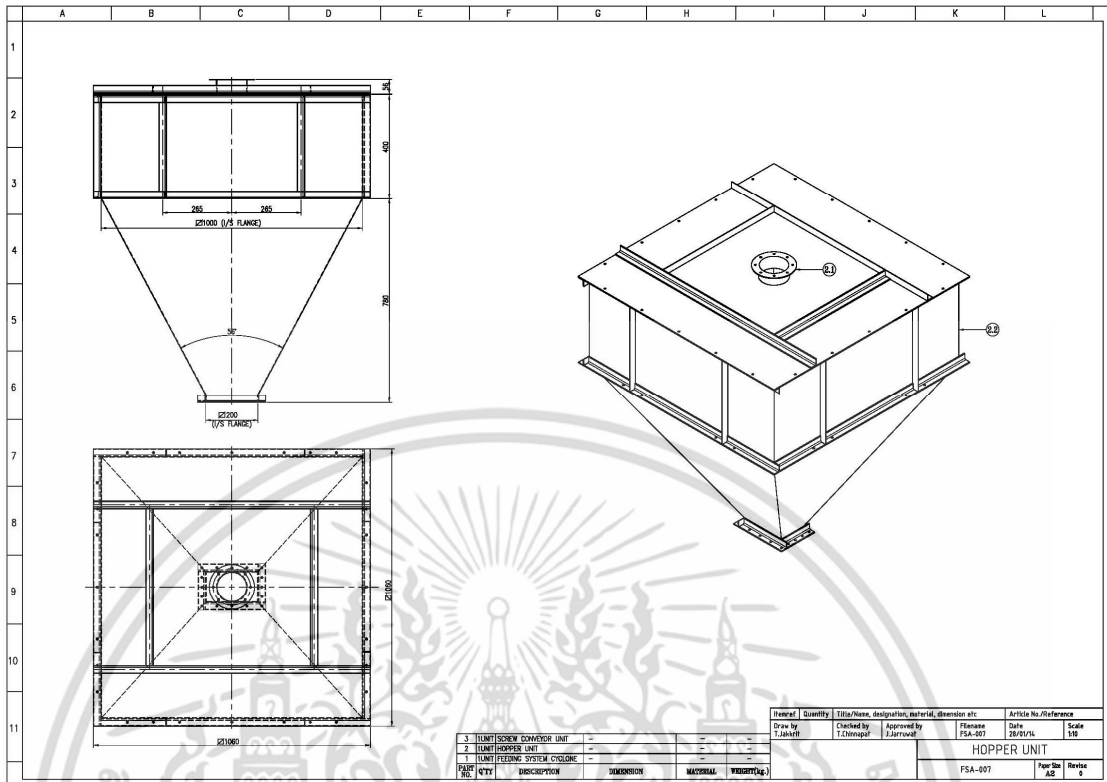


รูปที่ ก2.5 รายละเอียดส่วนบน และช่องทางเข้าอากาศของไซโคลน

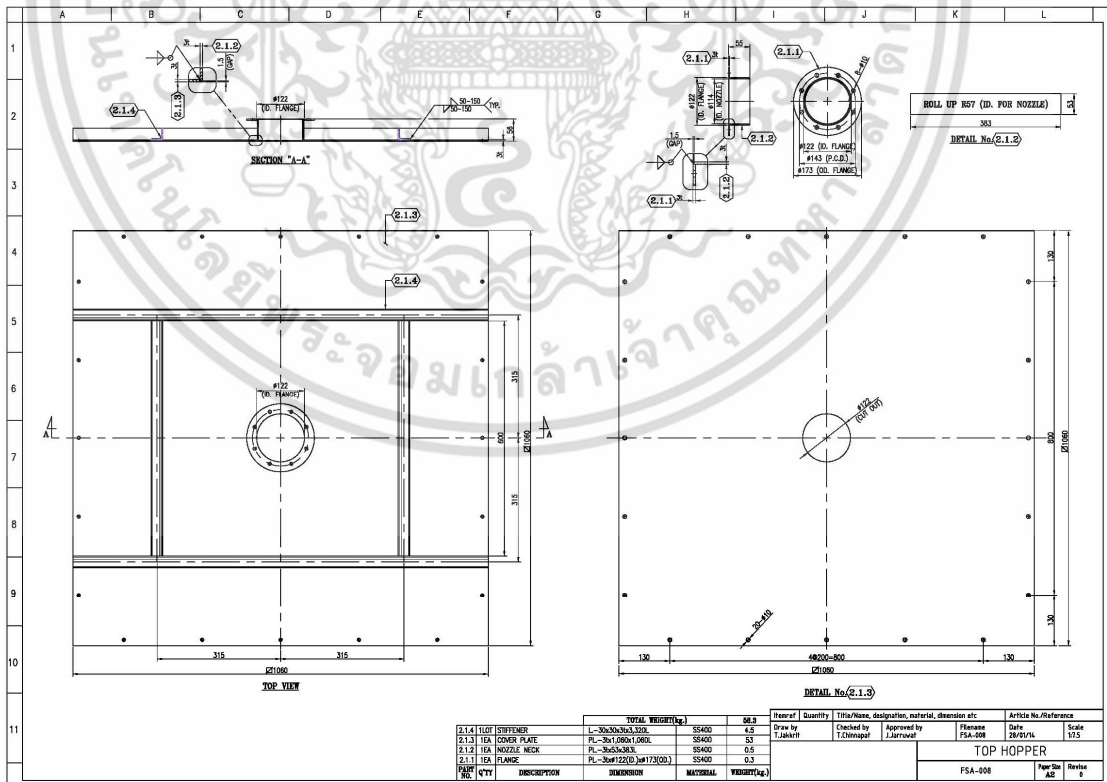


รูปที่ ก2.6 รายละเอียดส่วนล่าง (กรวย) ของไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

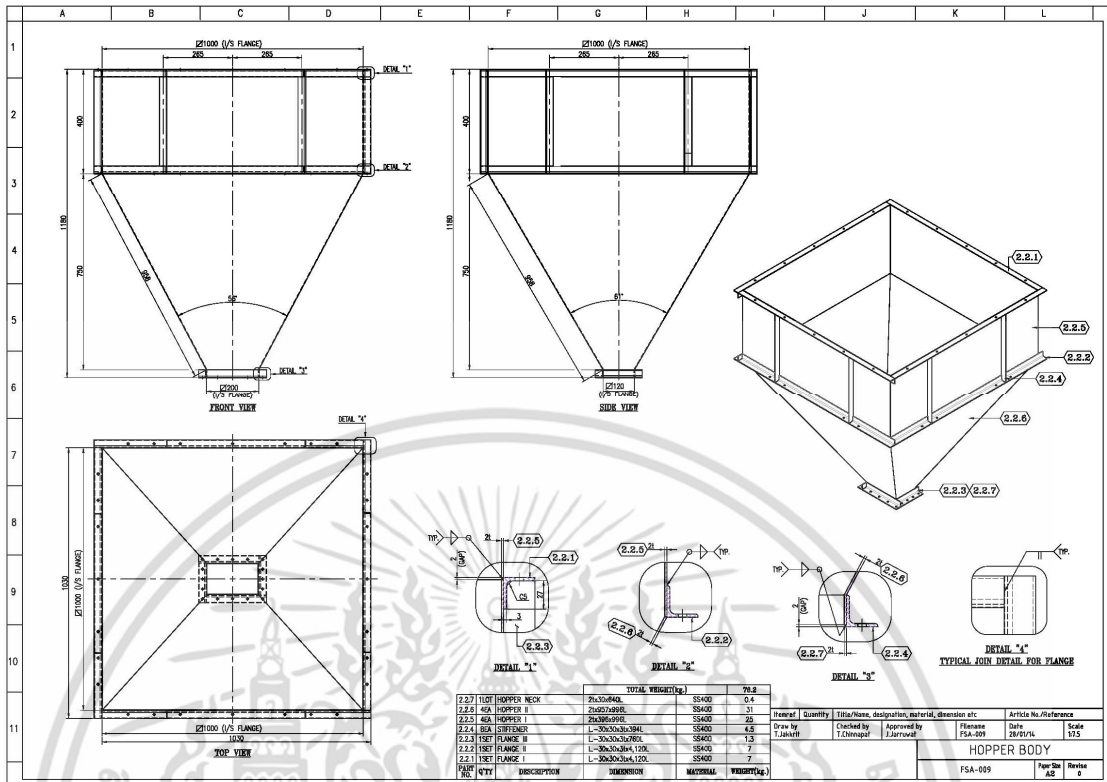


รูปที่ ก2.7 ชิ้นส่วนหมายเลข 2 (ไซโลเก็บเชื้อเพลิง) ของระบบป้อนเชื้อเพลิง

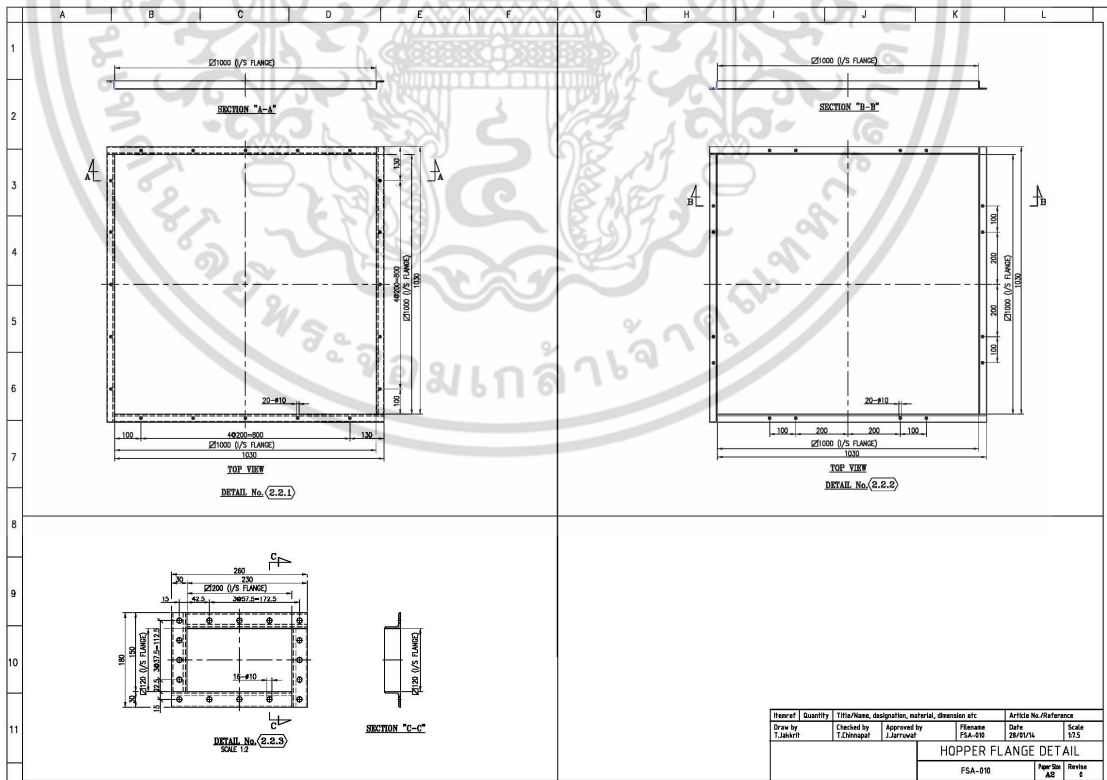


รูปที่ ก2.8 รายละเอียดผาปิดด้านบนของไซโลเก็บเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



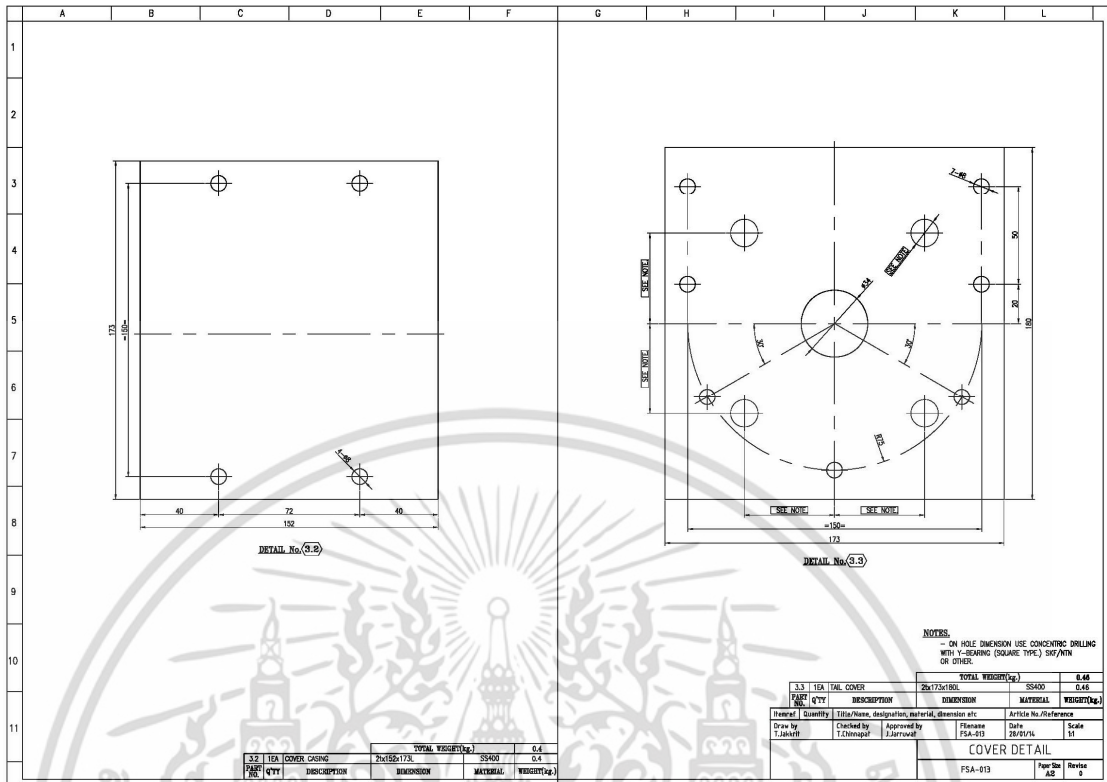
รูปที่ ก2.9 รายละเอียดการเชื่อม และขนาดของไซโลเก็บเชื้อเพลิง



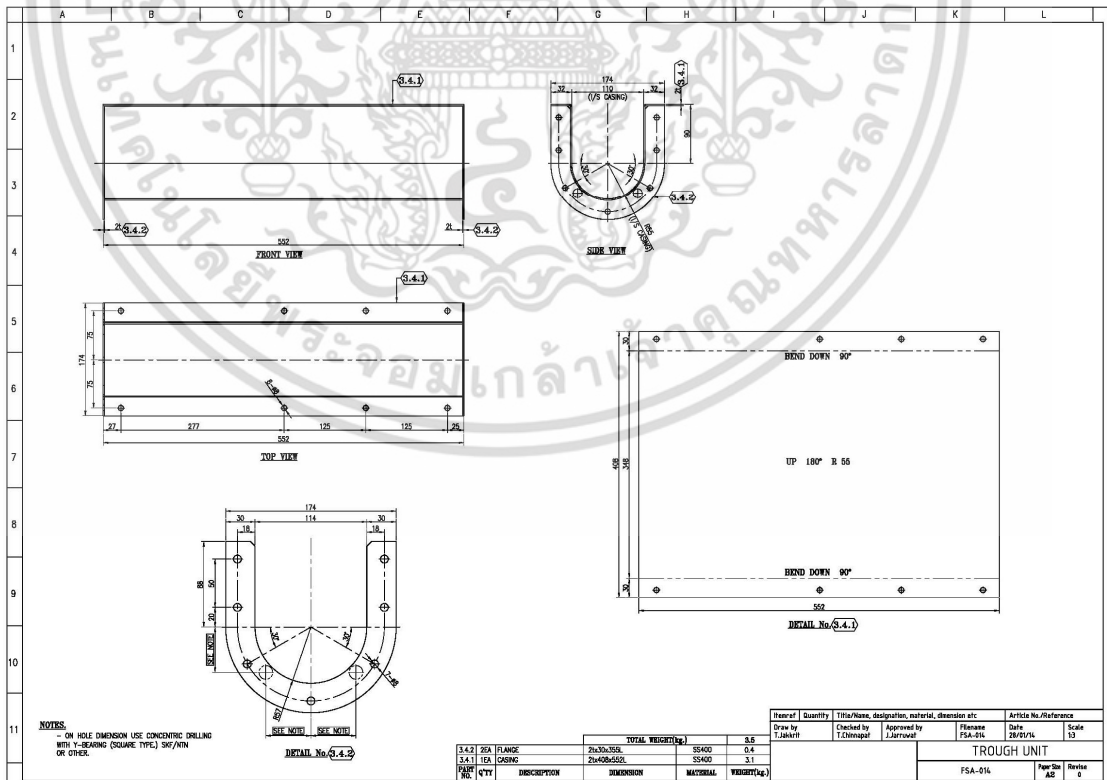
รูปที่ ก2.10 รายละเอียดหน้าแปลนของไซโลเก็บเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



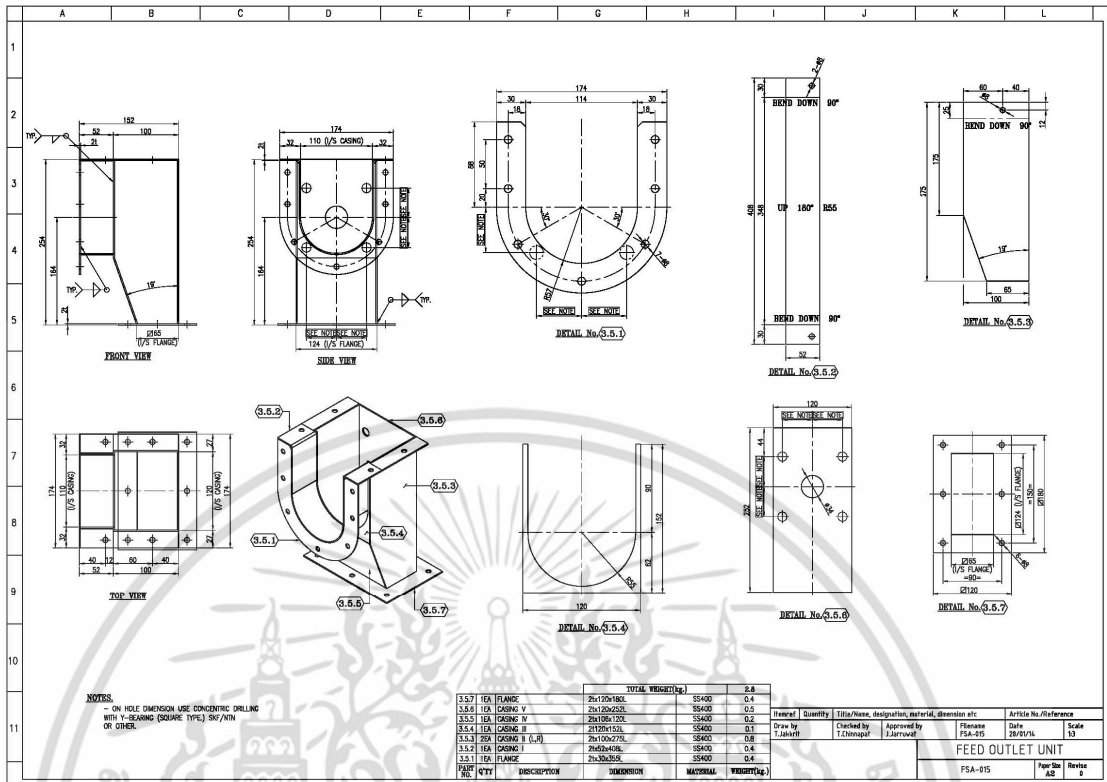


รูปที่ ก2.13 รายละเอียดแผ่นปิดหัว-ท้ายของรางสกรูลำเลียง

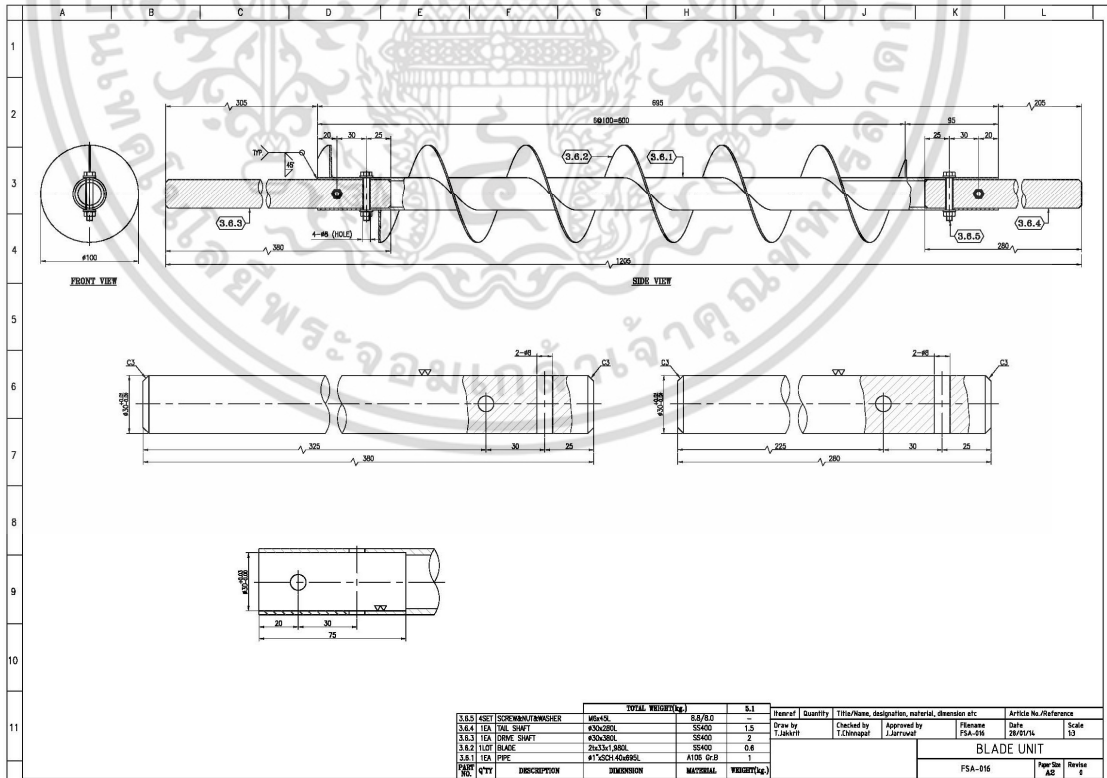


รูปที่ ก2.14 รายละเอียดของรางสกรูลำเลียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก2.15 รายละเอียดของทางออกเชื้อเพลิงของสกรูลำเลียง

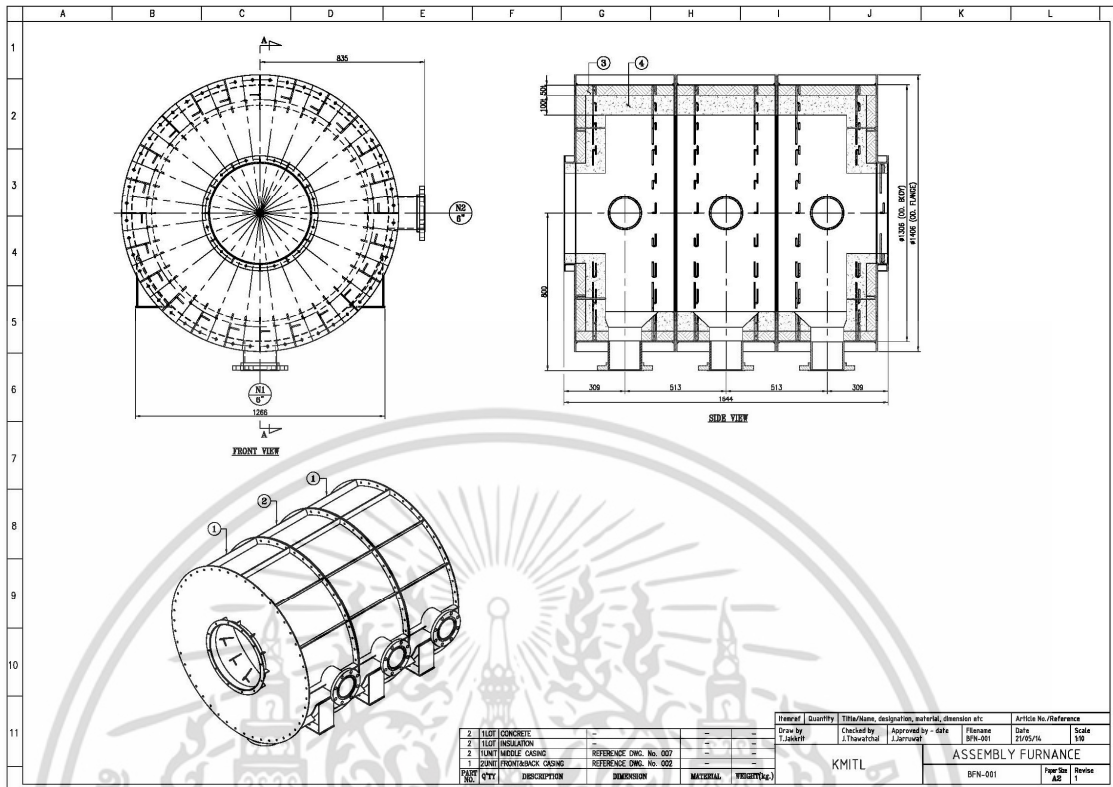


รูปที่ ก2.16 รายละเอียดของเพลาลำเลียงและใบสกรูลำเลียง

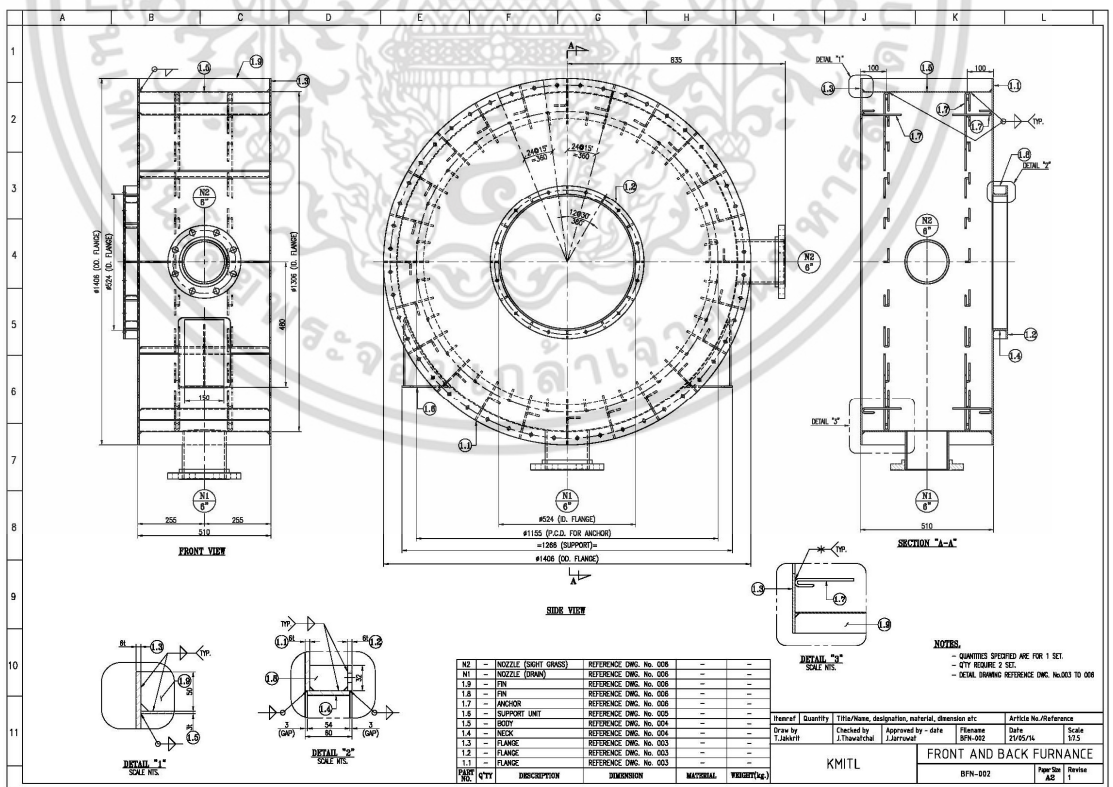
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

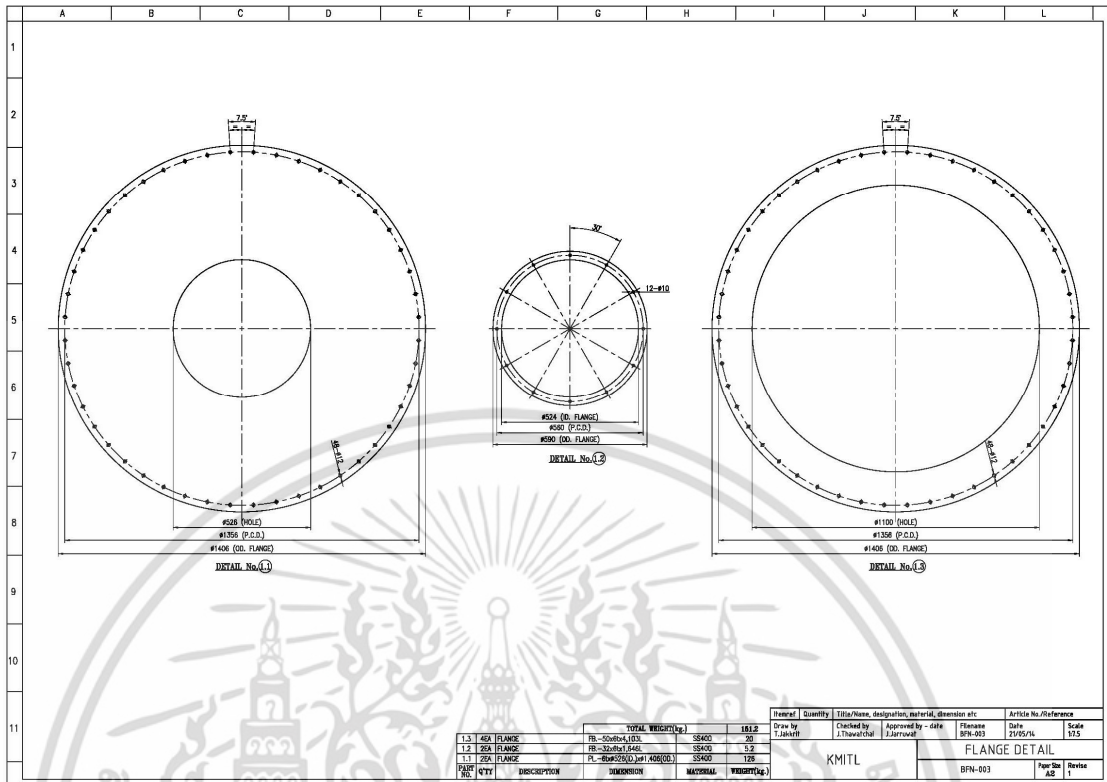


รูปที่ ก3.1 ส่วนประกอบหลักของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

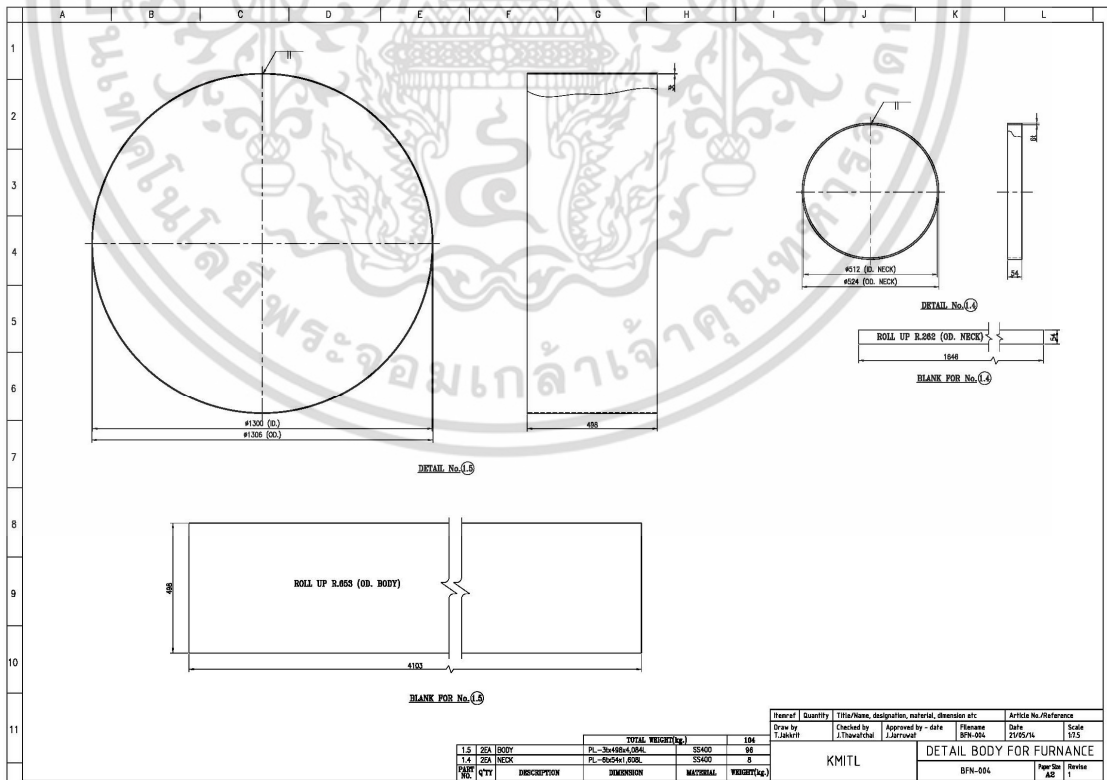


รูปที่ ก3.2 รายละเอียดชิ้นส่วนหมายเลข 1 และ 3 ของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

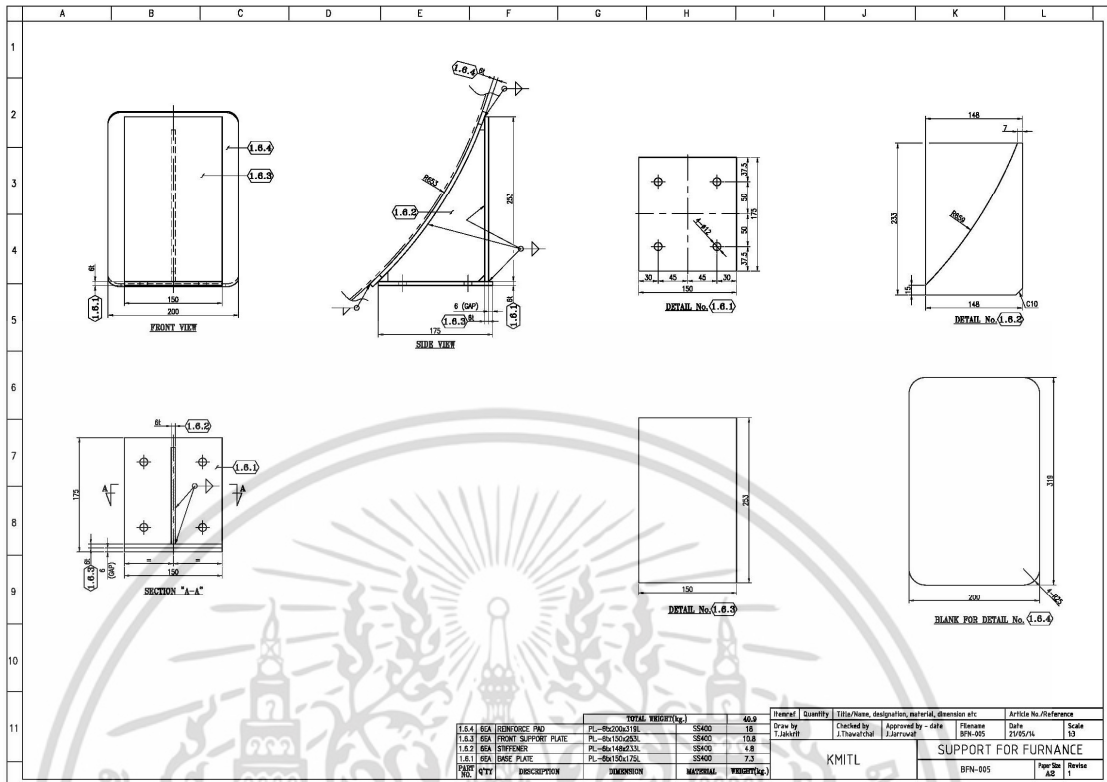


รูปที่ ก3.3 รายละเอียดหน้าแปลนของเตาเผาใหม่เชื้อเพลิงชีวมวลผง

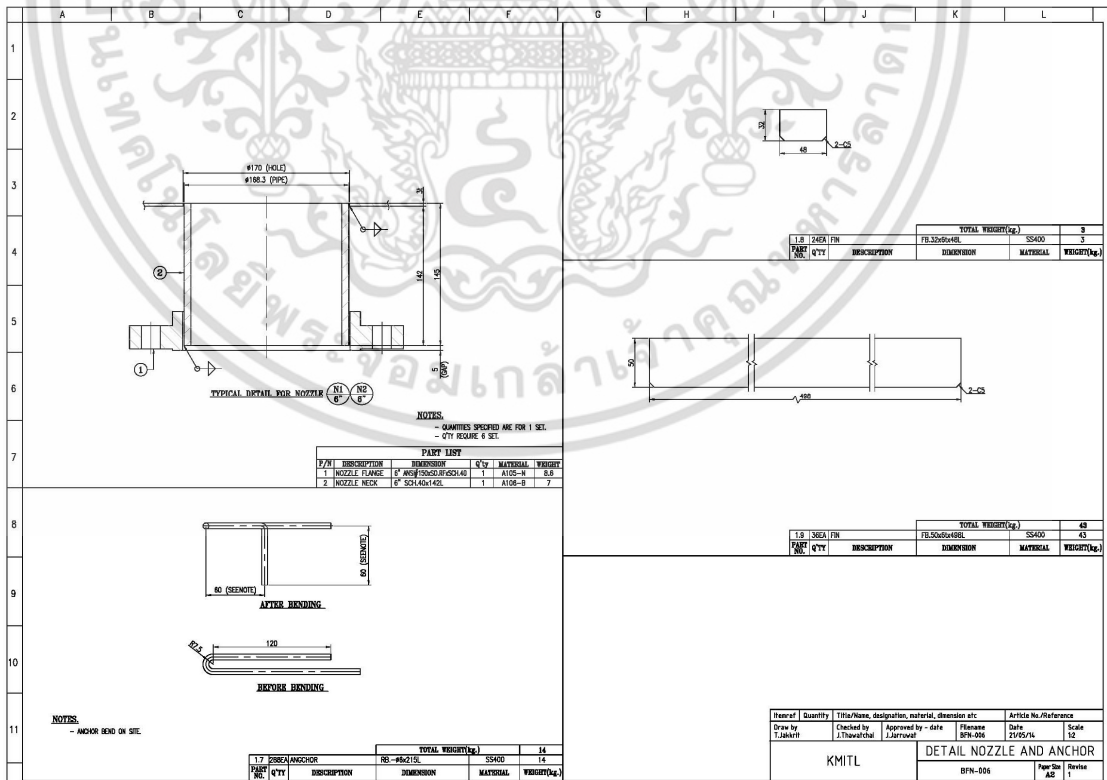


รูปที่ ก3.4 รายละเอียดเปลือก (body) ของเตาเผาใหม่เชื้อเพลิงชีวมวลผง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

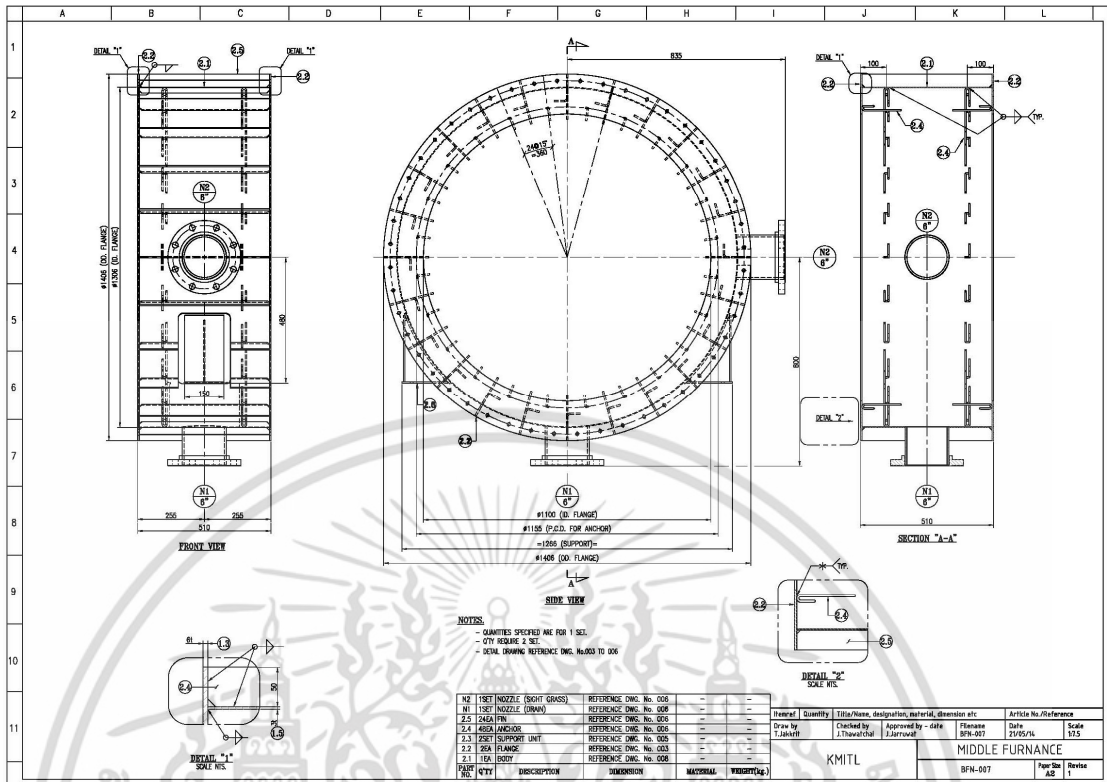


รูปที่ ก3.5 รายละเอียดจุดยึดของเตาเผาใหม่เชื้อเพลิงชีวมวลผง

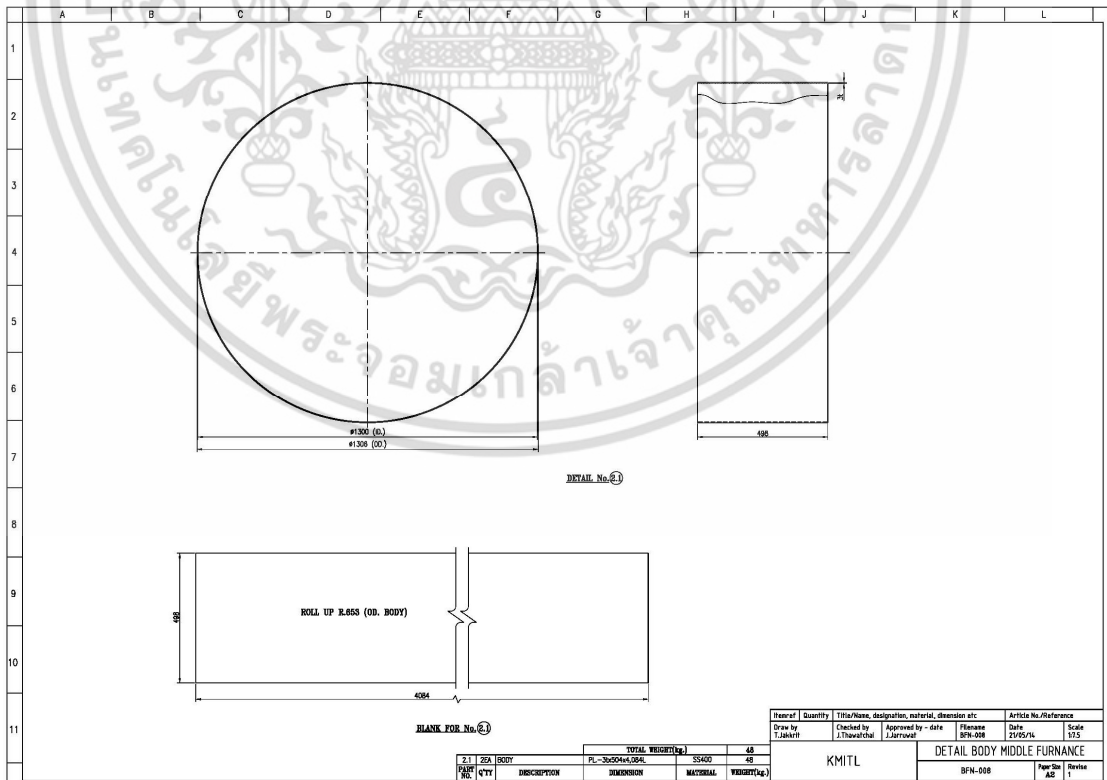


รูปที่ ก3.6 รายละเอียดรูระบายน้ำของเตาเผาใหม่เชื้อเพลิงชีวมวลผง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก3.7 รายละเอียดชิ้นส่วนหมายเลข 2 ของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง



รูปที่ ก3.8 รายละเอียดเปลือกของชิ้นส่วนหมายเลข 2 ของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

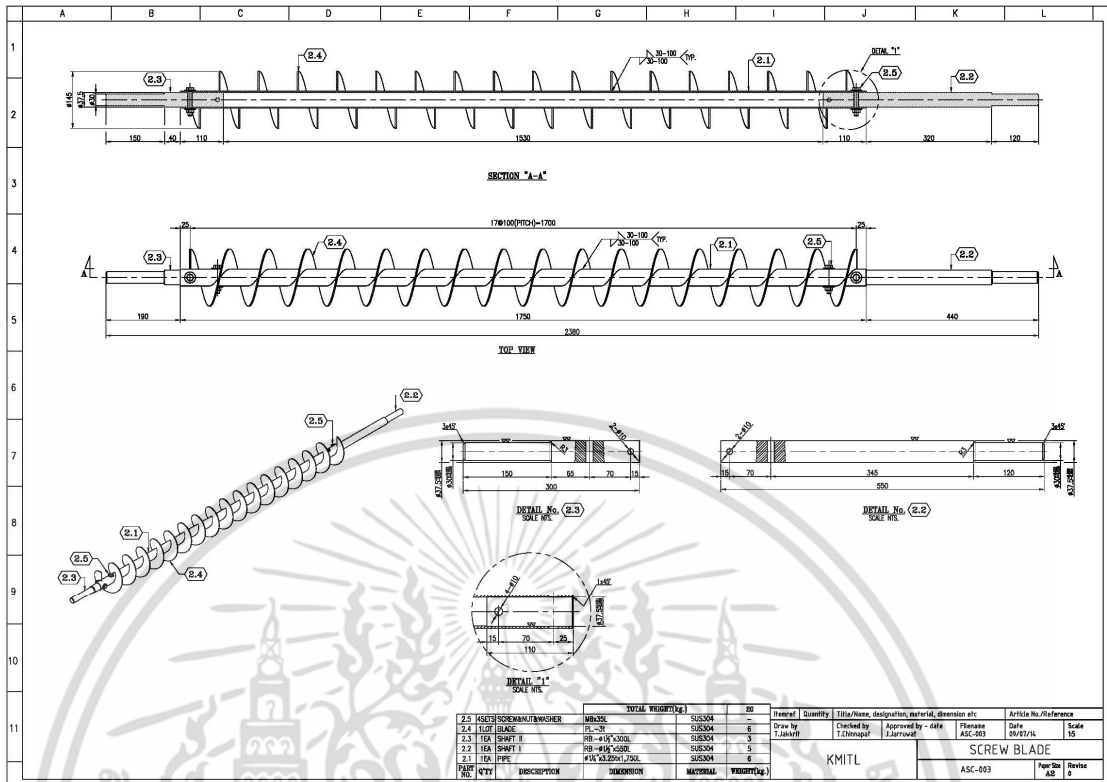
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



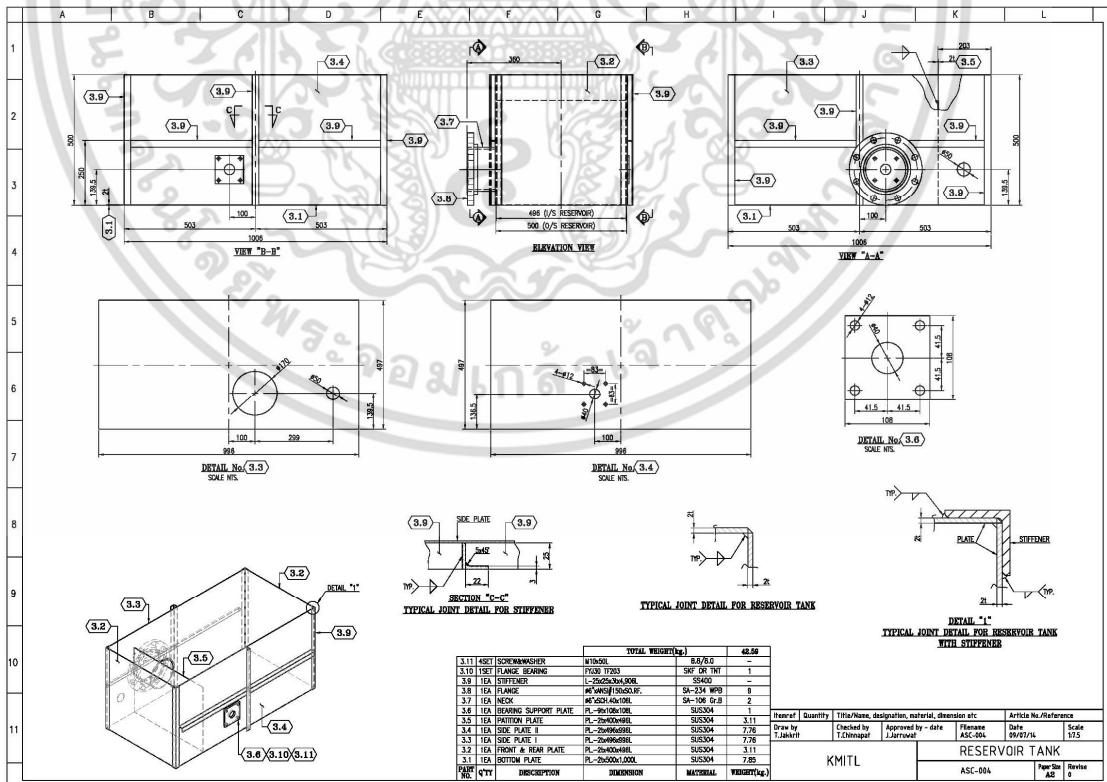
ภาคผนวก ก4.  
แบบส่งผลิตของสกรูระบายเก้าอี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ ก4.3 รายละเอียดขนาดเพลลา และใบของสกรูระบายน้ำ



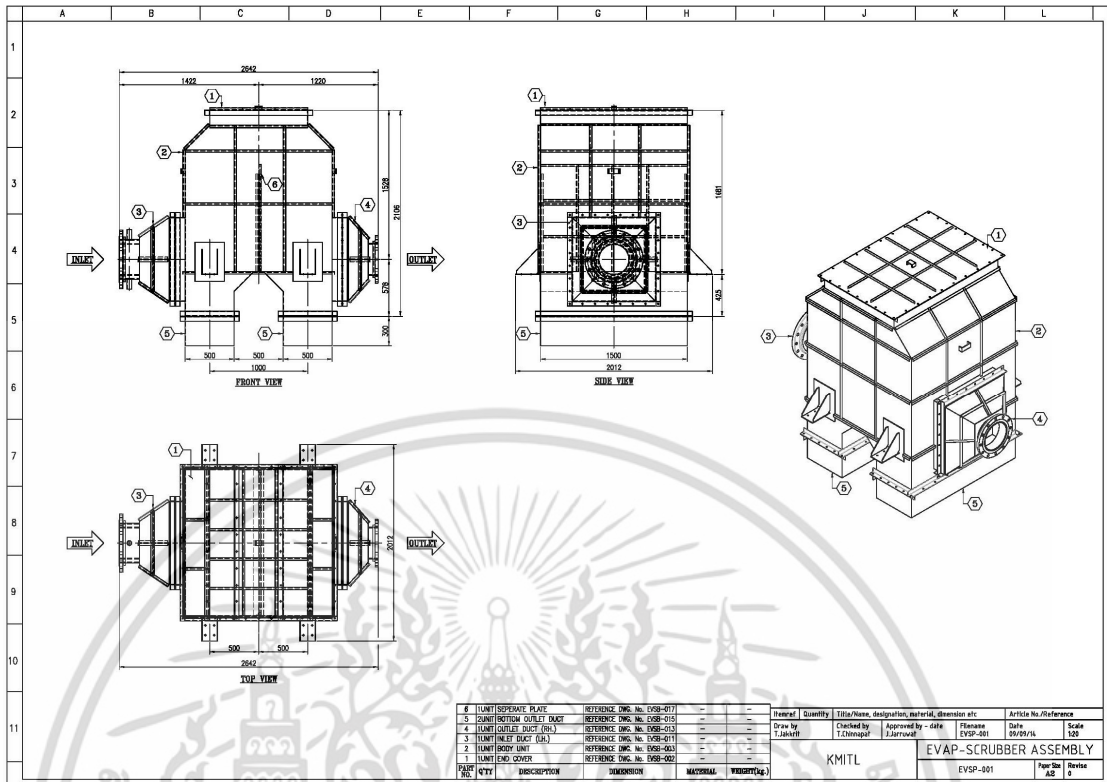
รูปที่ ก4.4 รายละเอียดถังพักน้ำสำหรับหล่อเย็นใบสกรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

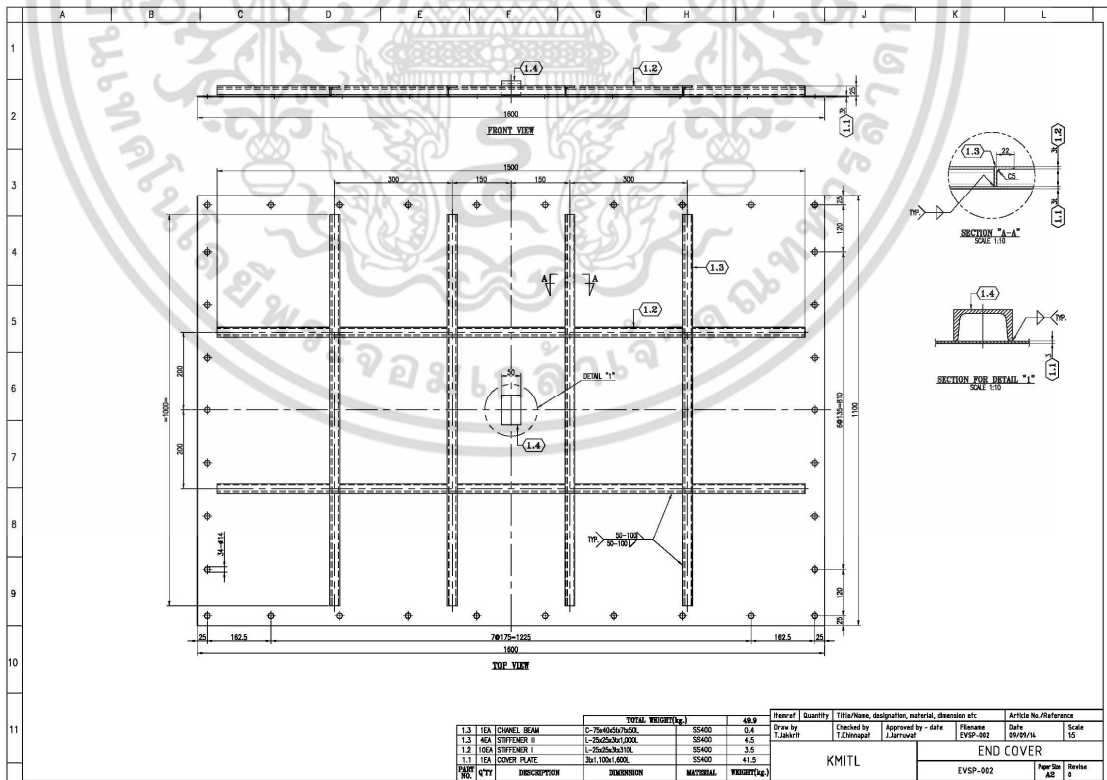


ภาคผนวก ก5.  
แบบสั่งผลิตของระบบบำบัดไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

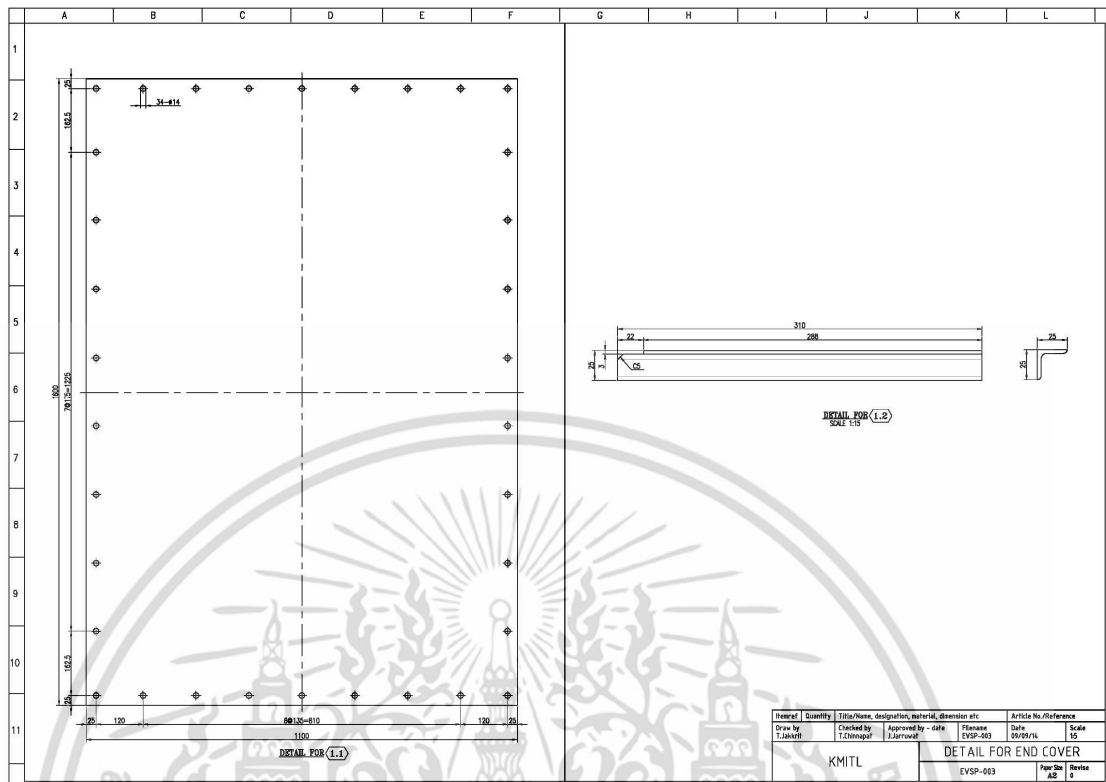


รูปที่ ก5.1 ส่วนประกอบหลักของระบบลดอุณหภูมิ และบำบัดไอเสีย

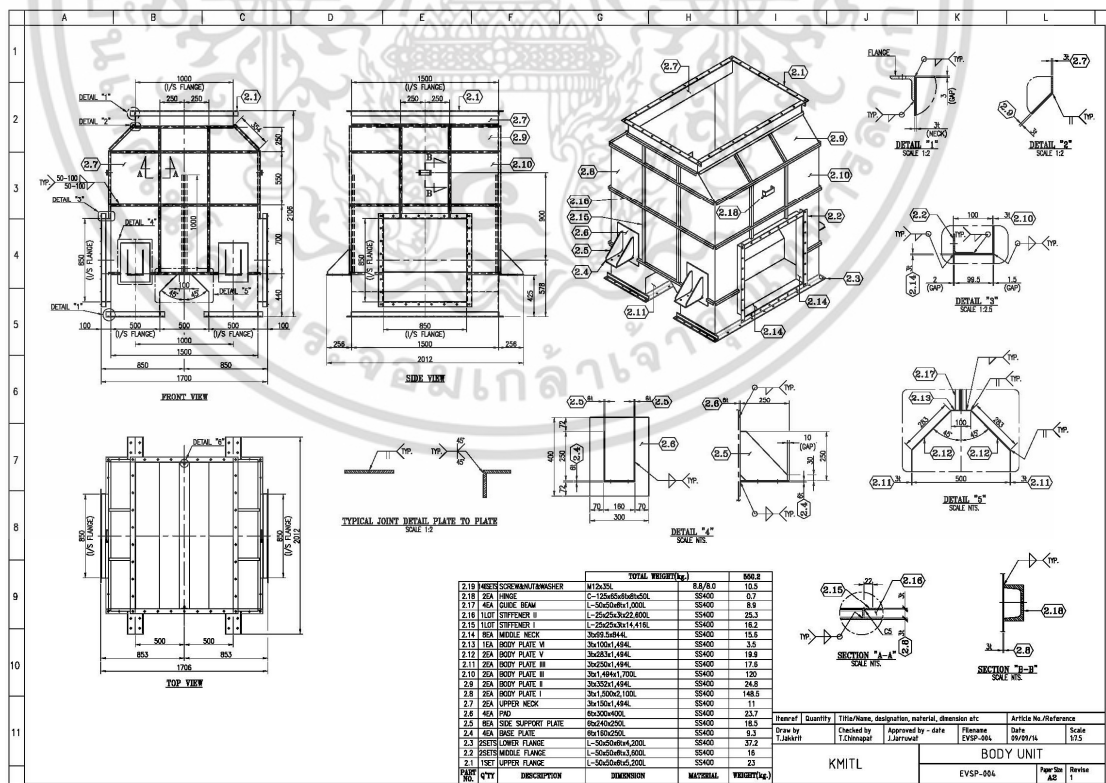


รูปที่ ก5.2 รายละเอียดฝาปิดด้านบนของห้องบำบัดไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

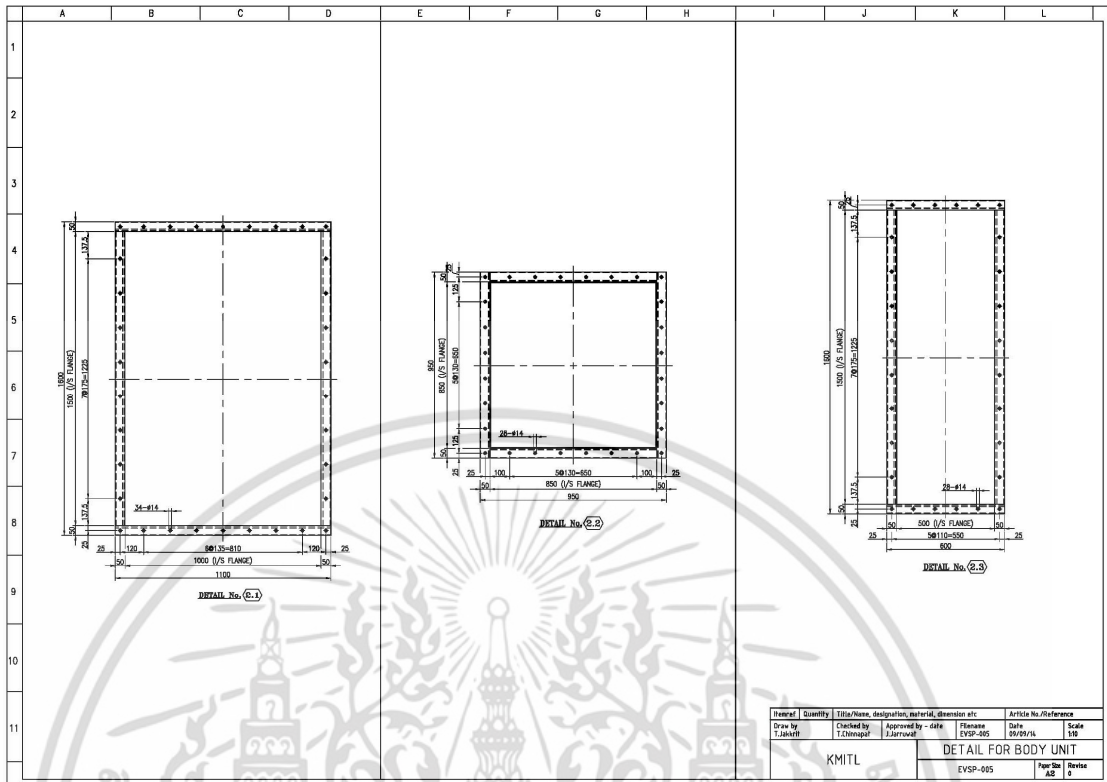


รูปที่ ก5.3 รายละเอียดประตูเจาะ และเหล็กเสริมความแข็งแรงของฝาปิดห้องบำบัดโอเสีย

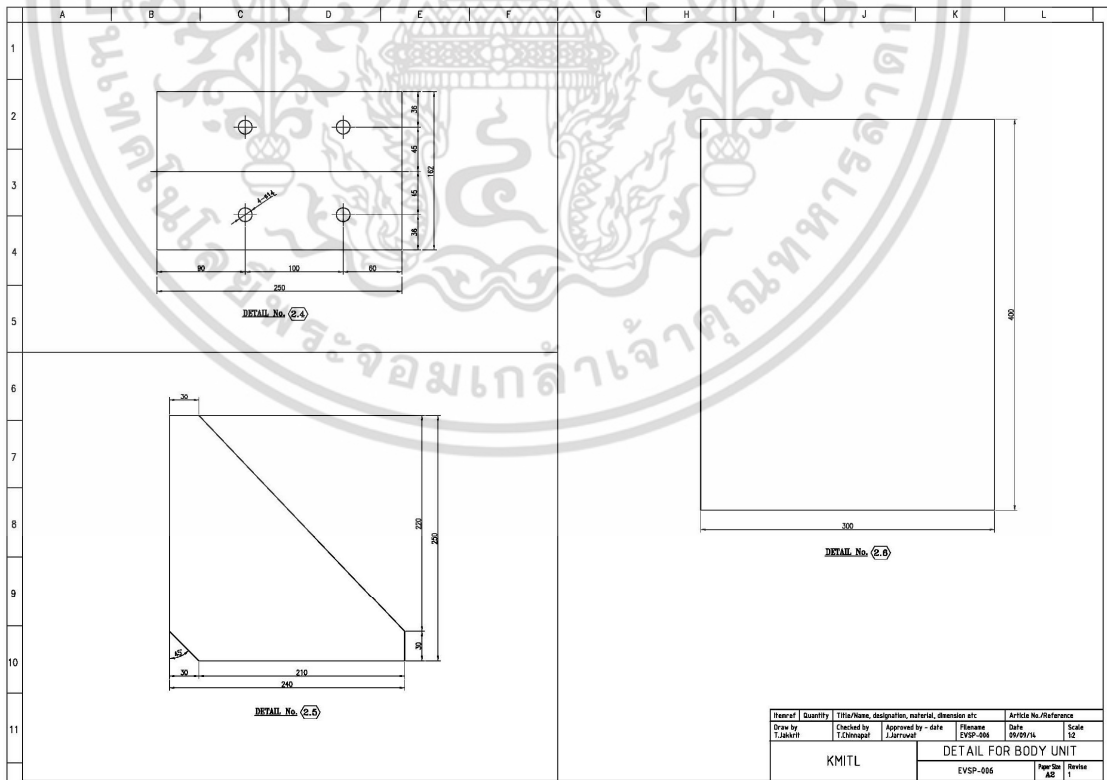


รูปที่ ก5.4 รายละเอียดการเชื่อม และขนาดห้องบำบัดโอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

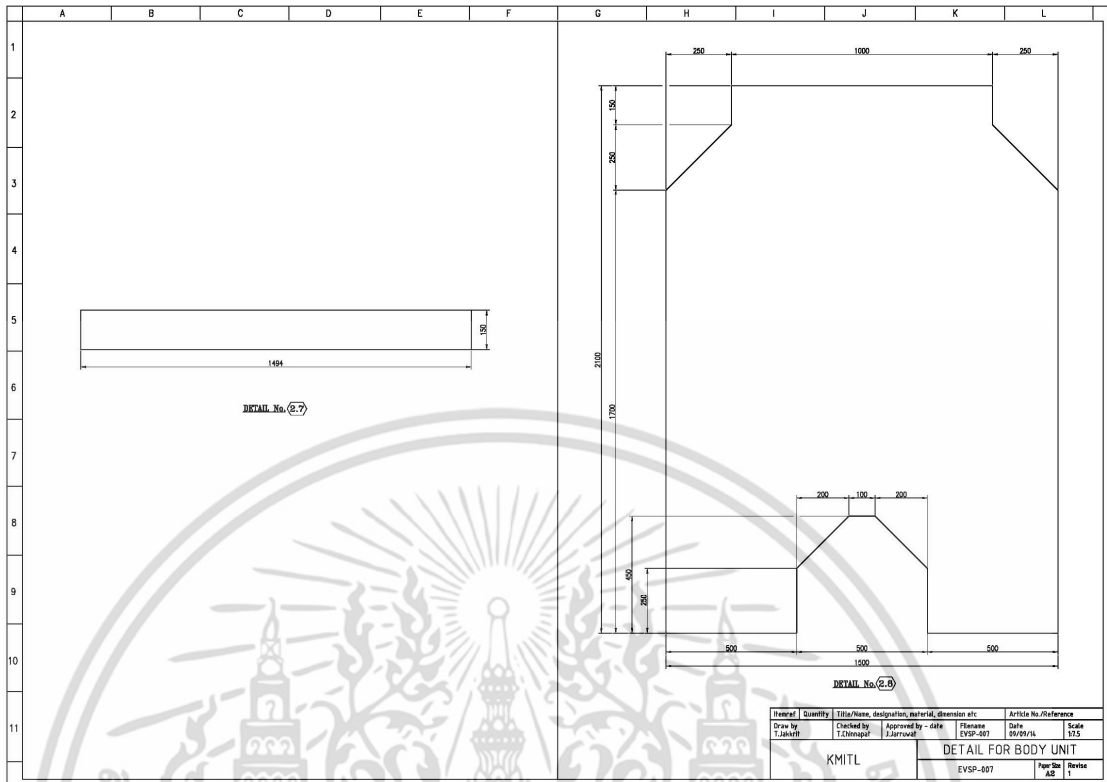


รูปที่ ก5.5 รายละเอียดหน้าแปลนของห้องบำบัดไอเสีย

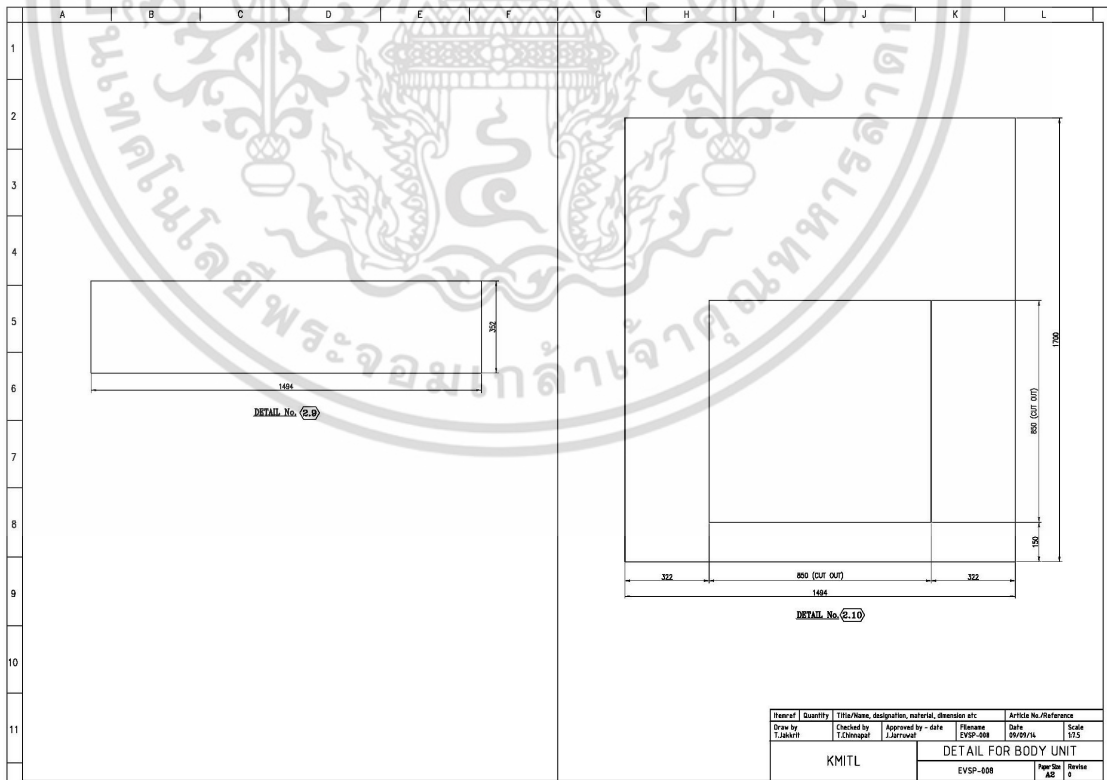


รูปที่ ก5.6 รายละเอียดจุดยึดโครงสร้างของห้องบำบัดไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

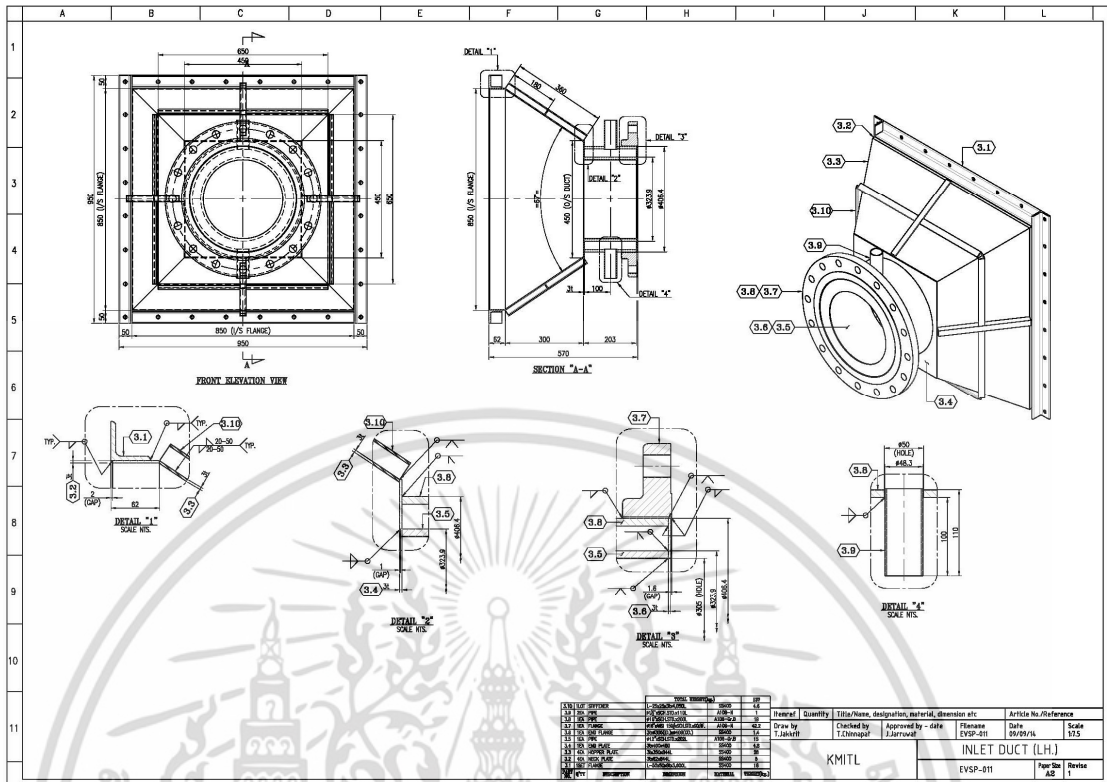


รูปที่ ก5.7 รายละเอียดแผ่นด้านข้างของห้องบำบัดไอเสีย

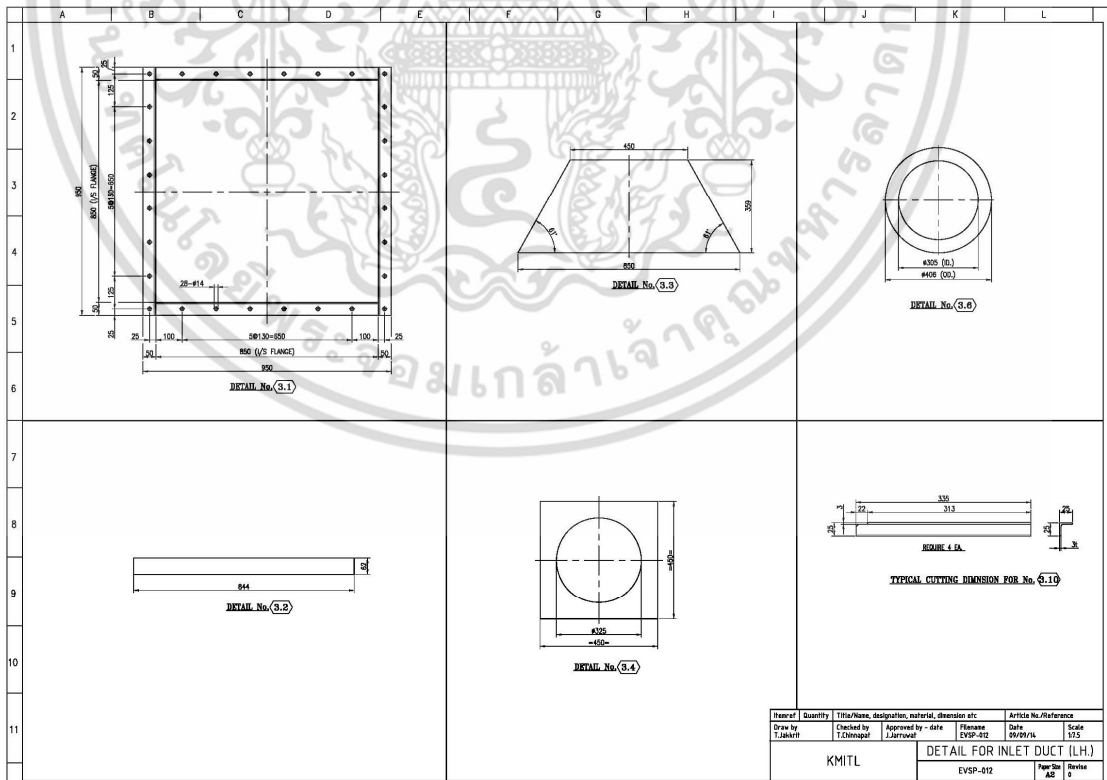


รูปที่ ก5.8 รายละเอียดแผ่นด้านหน้าของห้องบำบัดไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

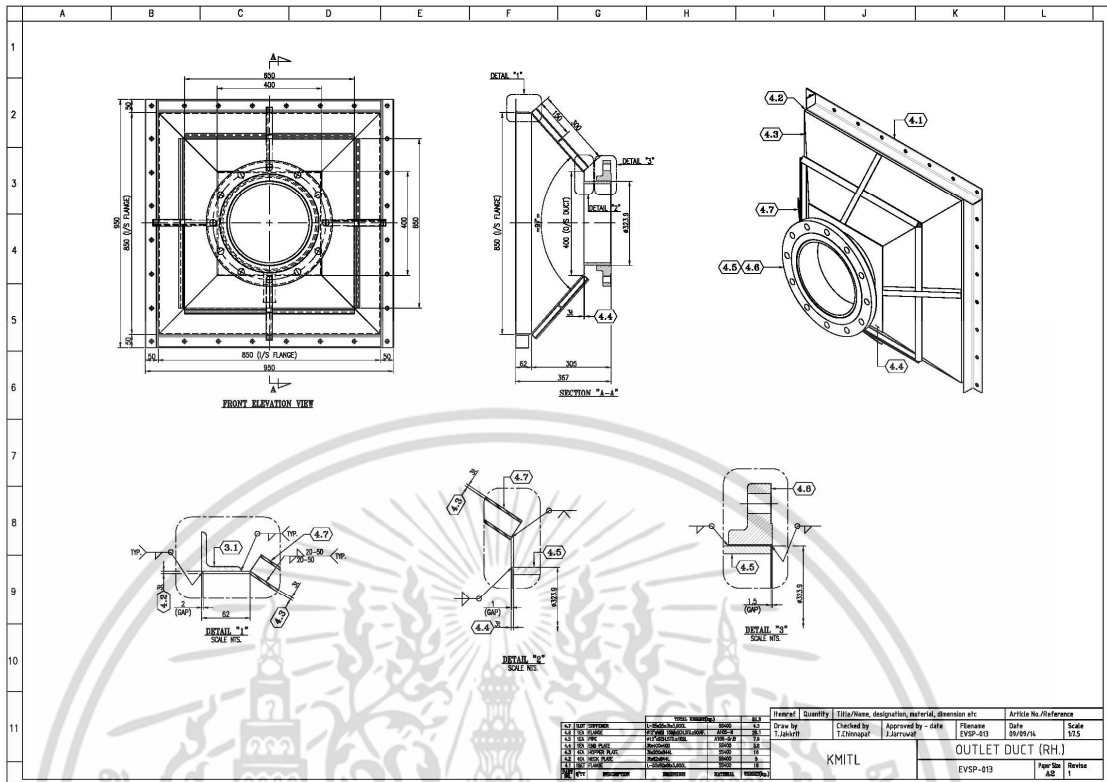


รูปที่ ก5.9 รายละเอียดการเชื่อม และขนาดช่องทางเข้าของแก๊สร้อนของห้องบำบัดไอเสีย

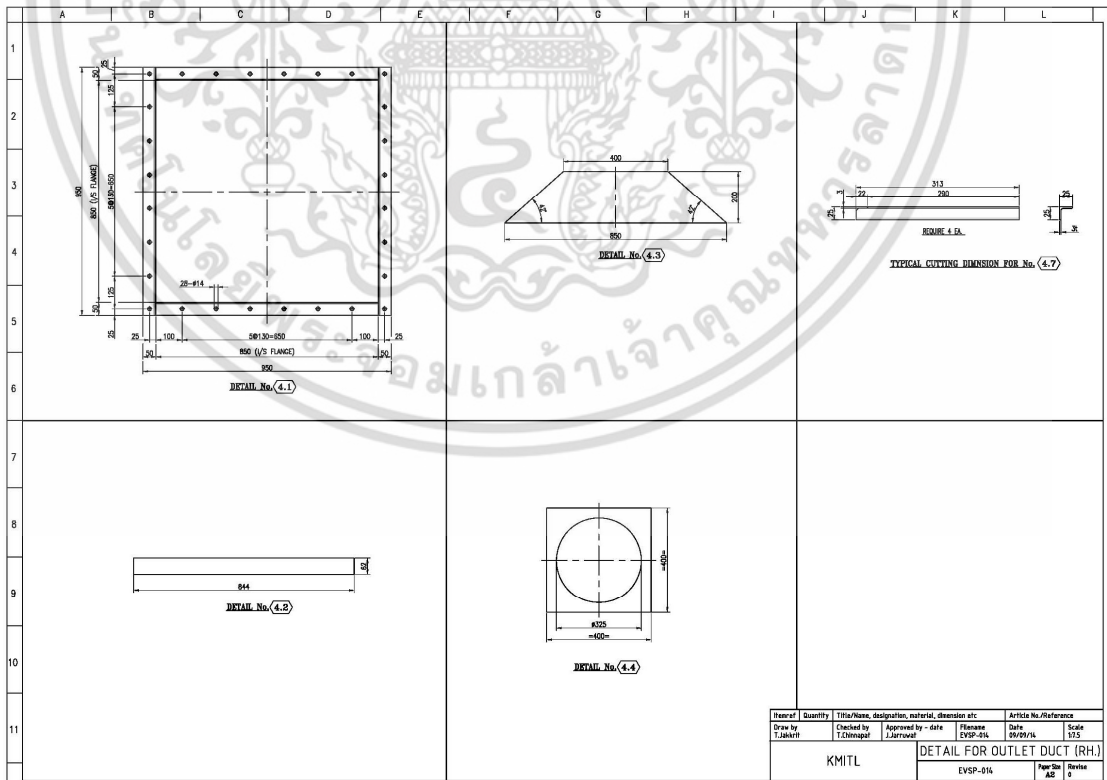


รูปที่ ก5.10 รายละเอียดหน้าแปลนช่องทางเข้าแก๊สร้อนของห้องบำบัดไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



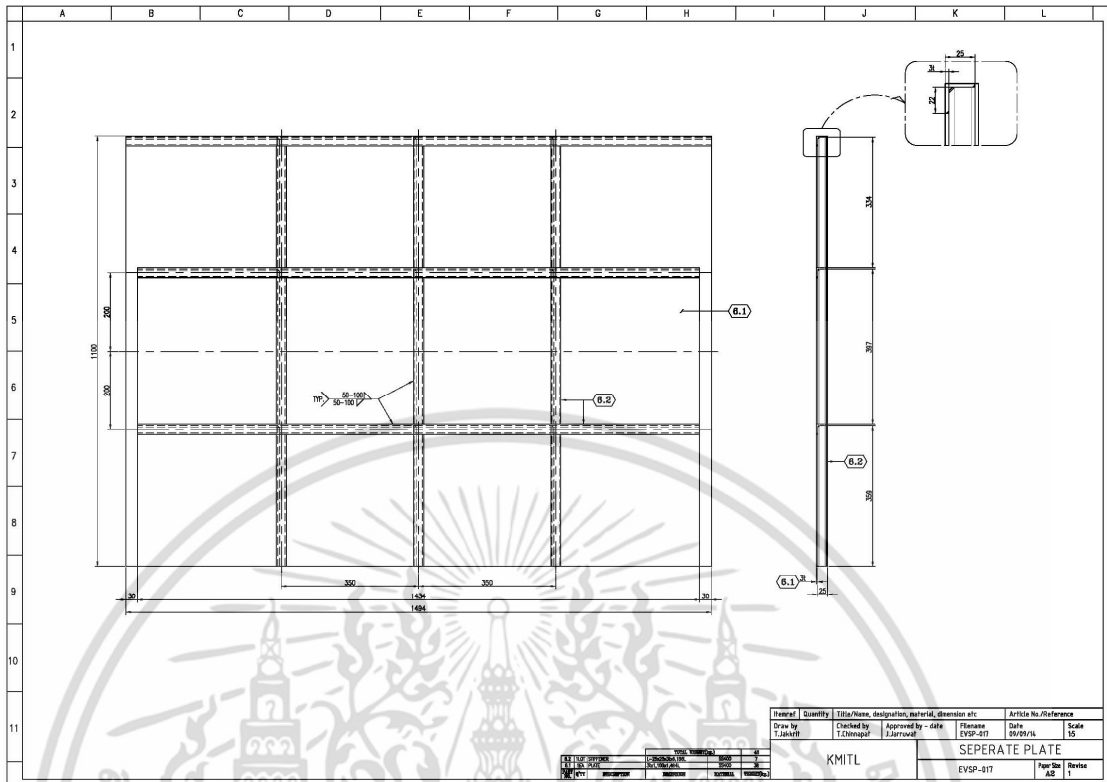
รูปที่ ก5.11 รายละเอียดการเชื่อม และขนาดช่องทางออกของแก๊สไอเสีย



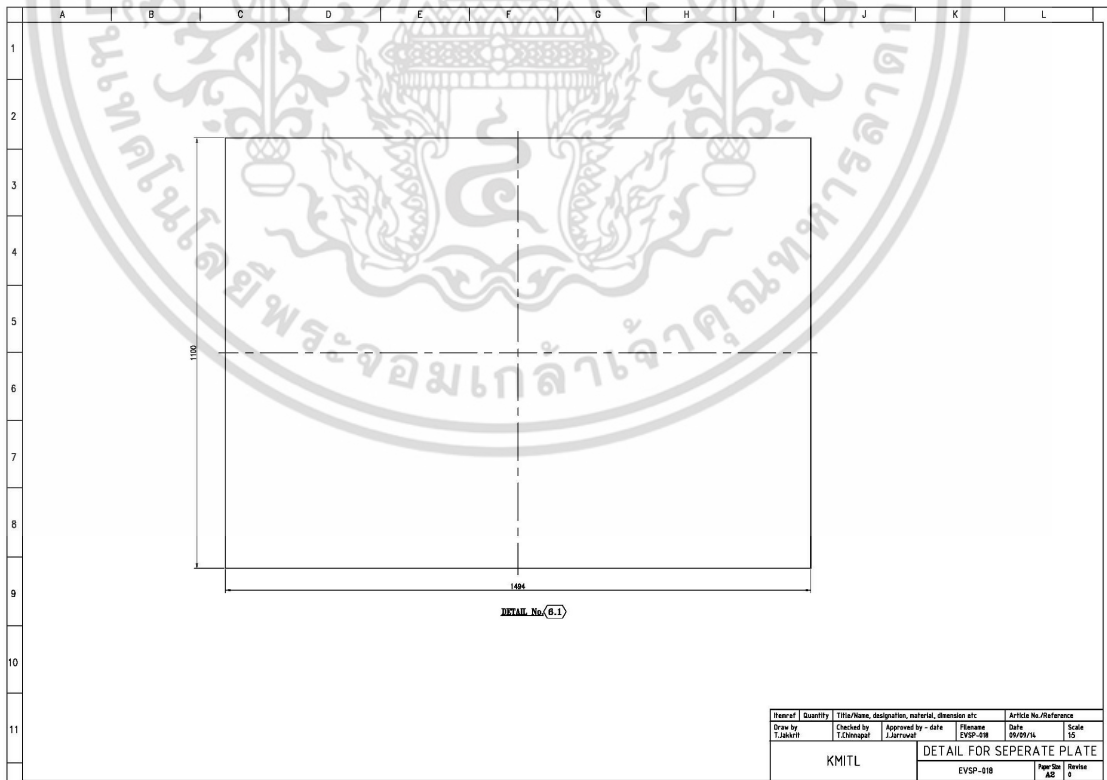
รูปที่ ก5.12 รายละเอียดหน้าแปลนช่องทางออกแก๊สไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ ก5.15 รายละเอียดของแผ่นแบ่งช่องการไหลภายในห้องบำบัดโอเสีย




รูปที่ ก5.16 ขนาดของแผ่นแบ่งช่องการไหลภายในห้องบำบัดโอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

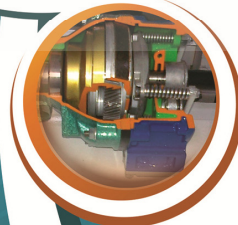
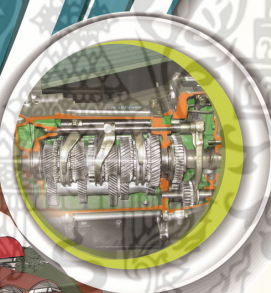


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ME NETT 28**  
KHON KAEN UNIVERSITY

The 28<sup>th</sup> Conference of  
Mechanical Engineering Network of Thailand  
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล  
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28  
วันที่ 15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น



"Driving ME  
Research  
Education  
and Innovation  
Towards Creative  
Economy"



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**AEC-101**

**การศึกษาย่านการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีมุมผนังทางออก 90 องศา**  
**The Investigation on Operation Range of Biomass Pulverized Burner**  
**with 90 Degrees of Outlet Wall Angle**

**ชินภัทร ฐระการ, ธนภัทร ภักดีวรงค์ และ จารุวัตร เจริญสุข\***

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

\*ติดต่อ: โทรศัพท์ : 023 264 197, โทรสาร : 023 264 198, E-mail : kjaruw@kmitl.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อออกแบบและพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง โดยจะเป็นการนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้ ที่ผ่านการจำลองเทียบเคียงกับเตาเผาเชื้อเพลิงถ่านหินผง มาประยุกต์ใช้กับการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงสำหรับหัวเผาแบบ pre-chamber ขนาด 1 MW เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำหัวเผาชนิดนี้มาใช้ในงานจริง จากการศึกษาพบว่าหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออกเท่ากับ 90 องศา ทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีการฟุ้งกระจายที่มากขึ้นภายใน pre-chamber ส่งผลให้อนุภาคสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง จึงนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเผาไหม้ ซึ่งช่วยให้สามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ ในส่วนของการศึกษาเพื่อตรวจสอบย่านการทำงานที่เหมาะสมสำหรับหัวเผาดังกล่าวพบว่าหัวเผานี้มีย่านการทำงานอยู่ระหว่าง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งเป็นช่วงที่หัวเผาสามารถรักษาเสถียรภาพในการเผาไหม้ และให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งหากเพิ่มกำลังความร้อนจากการเผาให้สูงกว่า 1 MW จะเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ (blow-off) แต่หากลดกำลังความร้อนจนต่ำกว่า 450 kW จะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้มีอนุภาคชาร์ และสารระเหยหลงเหลือไปกับไอเสีย ซึ่งถือเป็นการทิ้งพลังงานในส่วนดังกล่าวไปโดยไร้ประโยชน์

**คำหลัก:** กระบวนการเผาไหม้; การจำลอง; เชื้อเพลิงชีวมวล

**Abstract**

This work involves with the design and development of a pulverized biomass burner. In order to assess its capability on real plant, the validated mathematical model for coal combustion was applied for simulation of pulverized biomass fuel with pre-chamber burner with sizing of 1 MW. From simulation, it was found that pre-chamber burner with 90 degrees of outlet wall angle could improve the distribution of particle trajectories and their average residence time was also increased. This improvement had caused particles reacting continuously in the pre-combustion chamber thus enabling combustion stability. As part of a study to investigate the proper operation range for pre-chamber burner with 90 degrees of outlet wall angle, we found that burner can be operated at 450 kW up to 1 MW, which can maintain the stability and provide complete combustion. If increasing the thermal throughput greater than 1 MW, Blow-Off phenomenon would occur. However reducing the thermal throughput less than 450 kW would cause incomplete combustion. A result, char particles and volatile were left unburned at the exhaust indicating loss of energy.

**Keywords:** Combustion; Simulation; Biomass

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**AEC-101**

**1. บทนำ**

ปัจจุบันพลังงานทดแทนถือได้ว่าเป็นตัวเลือกอันดับแรกๆที่ทั่วโลกให้ความสนใจ และได้รับความสำคัญเป็นอย่างมากในประเทศไทย ซึ่งสังเกตได้จากแผนการกำหนดนโยบายในการพัฒนาประเทศที่สนับสนุนให้มีการหาแหล่งพลังงานทดแทนต่างๆ พลังงานชีวมวล (biomass) จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจซึ่งพลังงานชีวมวลนั้นมาจากองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตหรือสารอินทรีย์ต่างๆรวมทั้งวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเช่น ไม้ฟืน แกลบ และกากอ้อย เป็นต้น โดยชีวมวลนั้นมีข้อดีที่จะก่อให้เกิดแก๊สมลพิษ เช่น SO<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub> ในปริมาณที่น้อย

สำหรับการศึกษาในอดีตของทีมีวิจัย ธนภัทร์ ภักดีวรวงค์ และคณะ [1] ได้นำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้ ที่ผ่านการจำลองเชิงเทียบเคียงกับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผง มาประยุกต์ใช้กับการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ผงสำหรับหัวเผา pre-chamber ขนาด 1 MW พบว่า pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศาทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีการพุ่งกระจายที่มากขึ้นภายใน pre-chamber ส่งผลให้อนุภาคสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง และคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้โดยไม่มีการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ (blow-off) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษายานการดำเนินงานของหัวเผาดังกล่าว เพื่อทำนายถึงความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

**2. สมการพื้นฐานของแบบจำลอง**

**2.1 แบบจำลองของแก๊ส [2]**

การเคลื่อนที่ของแก๊สได้อธิบายในระนาบสองมิติ โดยที่ Reynolds - average Navier-Stokes (RANS) ถูกกำหนดให้อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady-State) และเสริมด้วยแบบจำลอง Standard *k-ε* Turbulence ซึ่งสมการควบคุม (Governing Equation) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\nabla \cdot (\rho U \Phi) - \Gamma_{eff} \nabla^2 \Phi = S_\Phi \quad (1)$$

เมื่อ  $\Phi$  คือเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ย,  $\rho$  คือความหนาแน่น และ  $S_\Phi$  คือ source term โดยที่สมการควบคุมที่ใช้สำหรับแก๊สปัญหาการเคลื่อนที่ของแก๊สประกอบด้วย มวล ( $m$ ), ความเร็วตามแนวแกน ( $u, v$ ) พลังงานจลนศาสตร์ของความปั่นป่วน ( $k$ ) อัตราการสลายตัว ( $\epsilon$ ) เอนทัลปี ( $H$ ) และเศษส่วนเชิงมวลของแต่ละสปีชีส์ ( $Y_i$ ) ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่ง  $\mu_t$  คือความหนืดของการปั่นป่วน  $\lambda$  คือ การนำความร้อน และ  $\Gamma$  คือการแพร่ของโมเลกุลของแต่ละสปีชีส์

ตารางที่ 1 ตัวแปร  $\Phi$ ,  $\Gamma_{eff}$  และ  $S_\Phi$  ในสมการควบคุมสำหรับแก๊ส

	$\Phi$	$\Gamma_{eff}$	$S_\Phi$
มวล	1	0	$\dot{m}$ , มวลรวมที่ถ่ายเทออกจากอนุภาค
โมเมนตัม	$u, v$	$\mu + \mu_t$	$F_{D_i}$ , แรงจุด (drag force) ของอนุภาค
พลังงาน	$H$	$\lambda + \frac{\mu_t}{\sigma_H}$	$S_H$ , ปฏิกิริยาทางความร้อน และการพาหรือการแผ่รังสีความร้อนออกจากอนุภาค
สัดส่วนเชิงมวลของแก๊ส $i$	$Y_i$	$\Gamma + \frac{\mu_t}{\sigma_{Y_i}}$	$S_{Y_i}$ , อัตราการทำปฏิกิริยาเคมีของแก๊ส $i$
พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน	$k$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$P_k - \rho \epsilon$
อัตราการกระจายตัวของความปั่นป่วน	$\epsilon$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$C_1 \frac{\epsilon}{k} P - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{K}$

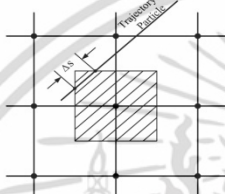
โดย  $\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$ ,  $P_k = (\mu + \mu_t) \nabla U \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T)$   
ค่าคงที่ :  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_1 = 1.44$ ,  $C_2 = 1.92$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**AEC-101**

**2.2 แบบจำลองของอนุภาค [3]**

การกระจายตัวของอนุภาคถูกจำลองโดยใช้วิธี Lagrangian การถ่ายเทมวล โมเมนตัม และพลังงานของอนุภาคที่มีผลต่อแก๊สเฟสจะเกี่ยวข้องกับตำแหน่งที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน สามารถคำนวณได้โดยเทคนิค Particle Source In Cell Techniques (PSICT) [4] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคโดยใช้วิธี Lagrangian ผ่านเซลล์

**2.2.1 สมการอนุรักษ์มวล**

$$\frac{dm_p}{dt} = R_m \tag{2}$$

$R_m$  คืออัตราเชิงปริมาตรของมวลที่ออกจากอนุภาคสู่แก๊ส โดยการปลดปล่อยสารระเหยหรือซาริในการเผาไหม้ โดยที่

$$R_m = k_0 \exp\left(-\frac{E_{dvol}}{R_u T_p}\right) (V^* - V) \tag{3}$$

$V$  คือปริมาณสะสมของสารระเหยที่ปล่อยออกมา,  $V^*$  คือปริมาณทั้งหมดของสารระเหยภายในถ่านหิน,  $R_u$  คือค่าคงที่สากลของแก๊ส,  $T$  คือค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์,  $k_0$  คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลอง และ  $E_{dvol}$  คือพลังงานกระตุ้น

**2.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัมและการเคลื่อนที่เฉลี่ย**

$$\frac{dm_p \tilde{u}_i}{dt} = \sum \bar{F}_i \tag{4}$$

พจน์ทางด้านขวาเกิดจากแรงภายนอก ซึ่งส่วนใหญ่ เกิดจากแรงจุดที่กระทำต่ออนุภาค [1,3]

**2.2.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน**

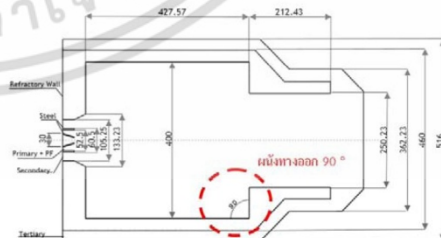
สมดุลพลังงานเกิดจากผลรวมการถ่ายเทความร้อนของอนุภาค ความร้อนจากการเผาไหม้ของซาริและความร้อนจากการระเหยในกระบวนการปล่อยสารระเหย เป็นต้น ดังนั้นสมการอนุรักษ์พลังงานคือ

$$\frac{d(m_p c_p T_p)}{dt} = m_p \dot{Q}_i - c_p T_p \left(-\frac{dm_p}{dt}\right) - L_v \frac{dm_p}{dt} \tag{5}$$

เมื่อ  $L_v$  คือความร้อนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายเชื้อเพลิงในรูปของแข็งกลายเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส (thermal decomposition) (kJ/kmol),  $c_p$  คือความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K),  $T_p$  คืออุณหภูมิ

**3. ลักษณะของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล**

รูปที่ 2 แสดงภาพลักษณะของหัวเผา pre-chamber สำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีขนาดเท่ากับ 1 MW โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหัวเผา pre-chamber มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.4 เมตร และมีความยาวประมาณ 0.8 เมตร ขณะที่ตำแหน่งผนังของ pre-chamber ถูกออกแบบมาเป็นผนังปูนทนไฟ ในขณะที่เตาเผา จะถูกจำลองให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกแนวนอน มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเตาเผาเท่ากับ 0.6 เมตร และมีความยาว 3.0 เมตร



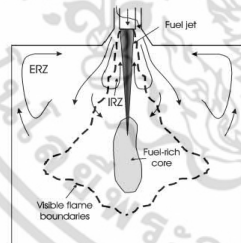
รูปที่ 2 ลักษณะของหัวเผา pre-chamber

**AEC-101**

ลักษณะของอากาศพลศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผงสามารถแบ่งได้เป็นสองลักษณะ คือ บริเวณที่มีการหมุนวนของกระแสภายในแกนกลางของเตาเผา (Internal Recirculation Zone, IRZ) และบริเวณที่มีการหมุนวนของกระแสนอกแกนกลางของเตาเผา (External Recirculation Zone, ERZ) ดังแสดงในรูปที่ 3

**3.1 เงื่อนไขที่ใช้การเผาไหม้ชีวมวล**

การไหลกำหนดให้เป็นแบบสมมาตรรอบแนวแกน 2 มิติ (2D-Axisymmetric) และสภาวะคงตัว (Steady State) โดยมีอัตราการก่อตัวและอัตราการสลายของมวลและความร้อนที่ถ่ายโอนมาจากอนุภาคที่จุดใดๆ ในโดเมนของก๊าซเป็นแบบคงตัวเช่นกัน ในทำนองเดียวกันนั้นใช้แบบจำลองการเผาไหม้ Species Transport แบบจำลองการปั่นป่วน  $k-\epsilon$  Standard โดยมีการเพิ่มค่าคงที่ของอัตราการแพร่ออกซิเจนภายในพื้นผิวอนุภาคคาร์บอน ( $C_1$ ) และอัตราจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอน ( $C_2$ ) ในอัตราส่วน 2.5 เท่าของค่าเริ่มต้น และใช้แบบจำลองการติดตามแบบสุ่ม (Random Walk) โดยที่ค่า Kinetic Parameters ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 3 รูปแบบของกระแสการไหลในเตาเผาไหม้ [5]

ตารางที่ 2 Kinetic Parameters สำหรับแบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

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

สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการศึกษาคือ หญ้าเนเปียร์ ซึ่งมีสมบัติและองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 3 โดยที่เป้าหมายของการจำลองในขั้นต้น หัวเผาจะต้องสามารถเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่องที่กำลังความร้อน 1 MW ตารางที่ 4 แสดงถึงเงื่อนไขในการป้อนอากาศ ปริมาณอากาศ และเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 1MW

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของหญ้าเนเปียร์อัดแท่ง (pellet) (Thailand Institute of Scientific and Technological Research)

การวิเคราะห์โดยประมาณ	(% โดยน้ำหนัก)
สารระเหย	66.91
คาร์บอนคงตัว	20.22
ความชื้น	4.57
ขี้เถ้า	8.30
การวิเคราะห์โดยละเอียด	(% โดยน้ำหนัก)
คาร์บอน	45.92
ไฮโดรเจน	6.58
ไนโตรเจน	8.30
กำมะถัน	0.11
ออกซิเจน	39.09
ปริมาณความร้อน (MJ/kg)	17.22

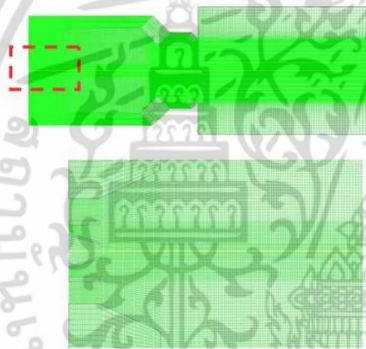
ตารางที่ 4 เงื่อนไขการจำลองสำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

<b>Primary pipe:</b>	Air flow rate (kg/s)	$6.613 \times 10^{-2}$
	Swirl number	0.0
	อุณหภูมิ (K)	308
	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/s)	$5.807 \times 10^{-2}$
<b>Secondary pipe:</b>	Air flow rate (kg/s)	$2.645 \times 10^{-1}$
	Swirl number	1.03
	อุณหภูมิ (K)	308
<b>Tertiary pipe:</b>	Air flow rate (kg/s)	$1.102 \times 10^{-1}$
	Swirl number	0.0
	อุณหภูมิ (K)	308
	อากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (%)	30

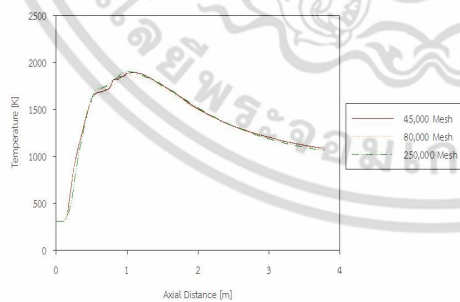
**AEC-101**

**3.2 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการจำลอง**

สำหรับกริดที่ใช้ในการจำลองนั้น จะมีความละเอียดประมาณ 45,000 และมีความละเอียดมากเป็นพิเศษที่บริเวณหัวเผา เนื่องจากบริเวณนี้คาดว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของไหลในอัตราที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ ดังแสดงรูปที่ 4 ซึ่งตัวเลขความละเอียดดังกล่าว เคยผ่านการพิสูจน์โดยทำการเปรียบเทียบกับกริดที่มีความละเอียดประมาณ 250,000 ก่อนหน้านี้แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยให้ผลของการจำลองที่ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงได้ใช้กริดที่มีความละเอียดเท่ากับ 45,000 ในการจำลอง เพื่อที่จะลดระยะเวลาในการคำนวณ



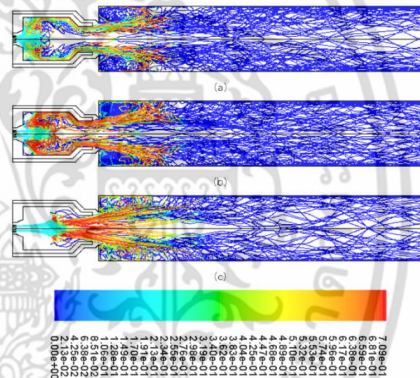
รูปที่ 4 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 5 การวิเคราะห์จำนวน Element ที่เหมาะสม

**4. ผลการจำลองของหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 135 และ 90 องศา (1 MW) [6]**

จากผลการจำลองของหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 องศา พบว่าหัวเผาไม่สามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการเป่าดับ เนื่องจากระยะเวลาการเผาไหม้ และการฟุ้งกระจายของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้อาจจะน้อยเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 6 จึงทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงหลุดลอยออกจากช่วงที่มีการผสมผสานกันระหว่างการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุทำให้ไม่สามารถรักษาอนุภาคมีจุดติด (Ignition) เอาไว้ได้

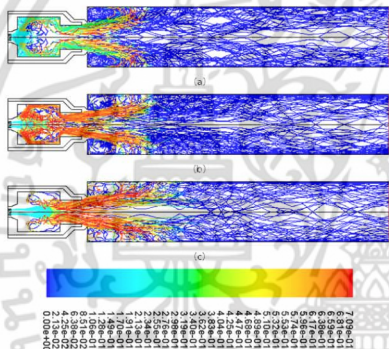


รูปที่ 6 เส้นทางการเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคระหว่างการเผาไหม้ (Pre-Chamber 135°); (a) อนุภาคขนาดเล็ก 10 - 30, (b) กลาง 40 - 70 และ (c) ใหญ่ 80 - 100 ไมครอน

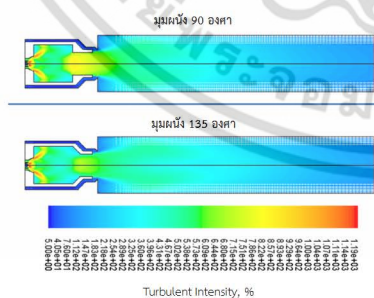
หลังจากที่ทราบถึงสาเหตุของปรากฏการณ์การเป่าดับ จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนมุมของผนังบริเวณทางออกเป็น 90 องศา โดยหวังว่าจะเป็น การเพิ่มการฟุ้งกระจายของอนุภาค และระยะเวลาในการเผาไหม้ ซึ่งผลก็ปรากฏว่าหัวเผาที่มีมุมผนังดังกล่าวสามารถรักษาความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ โดยไม่มีการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปที่ 6 กับรูปที่ 7 ซึ่งแสดงเส้นทางการเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาค

### AEC-101

ระหว่างการเผาไหม้สำหรับหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 และ 90 องศาตามลำดับ โดยที่จะสังเกตเห็นว่าทั้งสองรูปมีการกระจายตัวของอนุภาคบริเวณ IRZ และ ERZ ภายในห้องเผาไหม้ แต่จะพบว่าผนัง 90 องศาจะเป็นตัวขวางกั้นให้อนุภาคขนาดใหญ่มีการฟุ้งกระจายภายในเตามากกว่ากรณีมุมผนัง 135 องศา ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 8 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นของความปั่นป่วน พบว่า pre-chamber ที่มีผนังทางออก 90 องศาจะมีความเข้มข้นของความปั่นป่วนสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน



รูปที่ 7 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์ระหว่างการเผาไหม้ (pre-chamber 90°); (a) อนุภาคขนาดเล็ก 10 - 30, (b) กลาง 40 - 70 และ (c) ใหญ่ 80 - 100 ไมครอน



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นของความปั่นป่วน

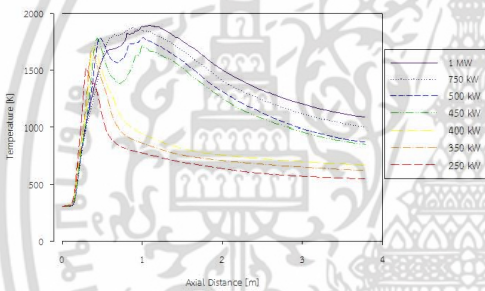
### 5.การจำลองย่านการทำงานของหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา

จากผลการจำลองในหัวข้อข้างต้นทำให้ทราบว่าหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา สามารถรักษาเสถียรภาพของการเผาไหม้เอาไว้ได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการจำลองเพื่อหา ย่านการทำงานที่มีความเหมาะสมกับหัวเผาดังกล่าว ซึ่งจะทำให้การจำลองที่ค่ากำลังความร้อนจากการเผาไหม้ในช่วง 250 kW จนถึง 1.25 MW ซึ่งเงื่อนไขในการจำลองจะทำการคงค่าอากาศส่วนเกิน (excess air) ไว้ที่ 30% แล้วทำการปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิง และอากาศตาม firing rate ในช่วงที่ต้องการศึกษา

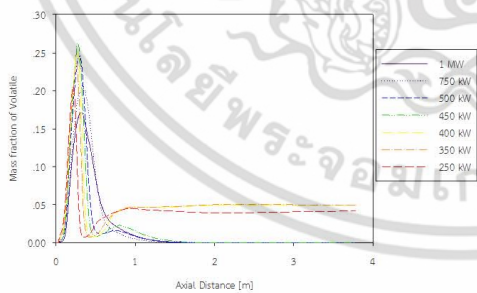
จากรูปที่ 9 และ 10 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ และการกระจายตัวของสารระเหยตามแนวยาวของเตาเผา ตามลำดับ ซึ่งจากรูปทั้งสองจะสังเกตเห็นพฤติกรรมของการเผาไหม้เป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นการเผาไหม้ในช่วง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของเปลวไฟที่ 1 MW จะมีค่าสูงสุดในขณะที่สภาวะ 450 kW จะให้อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดในกลุ่ม ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความเข้มข้นของสารระเหย เมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงการเผาไหม้ยิ่งเกิดความร้อนมากขึ้น ดังนั้นปริมาณความเข้มข้นของสารระเหยที่สภาวะ 1 MW จึงมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่นๆในกลุ่ม เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ จะพบว่าในการเผาไหม้ในเตาจะเกิดขึ้นสองช่วง การเผาไหม้ช่วงแรกจะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของ pre-chamber ในขณะที่จะมีอนุภาคของเชื้อเพลิงบางส่วนถูกอิทธิพลของ swirl เหวี่ยงไปชนกับผนังของ pre-chamber และวิ่งชนกับผนังออกไป ส่งผลให้อนุภาคส่วนนี้จึงไม่ได้รับการเผาไหม้ในช่วงดังกล่าว ในส่วนของการเผาไหม้ช่วงที่สองจะเกิดขึ้นในบริเวณส่วนต้นของท่อไฟใหญ่ ซึ่งอนุภาคเชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ในช่วงแรกจะถูกเผาไหม้ในบริเวณนี้ทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของสารระเหยที่ลดลงจนหมดหลังจากผ่านบริเวณนี้ไป

**AEC-101**

ในส่วนของพฤติกรรมการเผาไหม้กลุ่มที่สอง จะเป็นการเผาไหม้ที่สภาวะ 250 kW ถึง 400 kW ซึ่ง อุณหภูมิของการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกลุ่ม แรก เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ จะพบว่า การเผาไหม้จะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของ pre-chamber เพียงช่วงเดียว ส่งผลให้อุณหภูมิของ เชื้อเพลิงที่ถูกอิทธิพลของ swirl เหวี่ยงไปชนกับผนัง ของ pre-chamber ไม่ได้รับการเผาไหม้ จึงทำให้มี ปริมาณสารระเหยหลงเหลืออยู่เป็นจำนวนมากเมื่อ เทียบกับพฤติกรรมการเผาไหม้กลุ่มแรก ดังนั้นอาจถือ ได้ว่าพฤติกรรมการเผาไหม้ของกลุ่มนี้เป็น การเผาไหม้ ที่ไม่สมบูรณ์



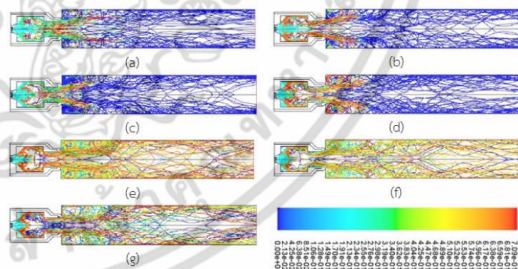
รูปที่ 9 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนว Axial ของเตาเผา



รูปที่ 10 ลักษณะการกระจายตัวของความเข้มข้นของ สารระเหยตามแนว Axial ของเตาเผา

เมื่อพิจารณารูปที่ 11 แสดงเส้นทางเดินของ อนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของชาร์ (Particle Char Fraction) พบว่าที่สภาวะ 1 MW, 750 kW, 500 kW และ 450 kW อนุภาคชาร์จะถูกเผาไหม้จนหมด ในขณะที่สภาวะ 400 kW, 350kW และ 250 kW นั้นจะ เหลืออนุภาคชาร์ที่ไม่ได้รับการเผาไหม้หลงเหลืออยู่ พอสมควร ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิงที่ถูก อิทธิพลของ swirl เหวี่ยงไปชนกับผนังของ pre-chamber ไม่ได้รับการเผาไหม้ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ สอดคล้องกับปริมาณสารระเหยที่ได้กล่าวไว้ใน เบื้องต้น

นอกจากนี้เมื่อทำการจำลองการเผาไหม้ที่ สภาวะ 1.25 kW พบว่าหัวเผาไม่สามารถคงความ เสถียรภายในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็น ปรากฏการณ์การเป่าดับ ในลักษณะเช่นเดียวกับกรณี pre-chamber ที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 องศา เนื่องจากความเร็วก๊าซสูงเกินไปภายในห้องเผา ไหม้ของ pre-chamber จึงทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงหลุด ลอยออกจากบริเวณที่ต้องการให้มีการผสมผสานกัน ระหว่างการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุทำให้ อนุภาคนั้นไม่อาจรักษาการจุดติด (Ignition) ไว้ได้ จึง ทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ลักษณะดังกล่าว



รูปที่ 11 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึง สัดส่วนเชิงมวลของชาร์ (Particle Char Fraction) (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW

## AEC-101

### 6. สรุป

จากผลการจำลองการเผาไหม้ที่ 1 MW สำหรับหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา สามารถทำให้การกระจายตัวของอนุภาคมากขึ้นภายในห้องเผาไหม้ในส่วน of pre-chamber เนื่องจากผนัง ณ บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ pre-chamber ได้กั้นขวางเส้นทางเดินของอนุภาคได้บางส่วน จึงเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคบางส่วนมีเส้นทางเดินแบบย้อนกลับและมีระยะเวลาในการเดินทางของอนุภาคมากขึ้น จึงทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ (residence Time) ภายในห้องเผาไหม้ของ pre-chamber เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้มีการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็วภายในห้องเผาไหม้ของ pre-chamber และทำให้การกระจายตัวของอนุภาคมีสูงขึ้นในบริเวณนี้เท่ากับ 1894 K ในทำนองเดียวกันนั้นสามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้โดยไม่มีการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับเมื่อทำการศึกษาเพื่อหาขนาดการทำงานที่เหมาะสมสำหรับหัวเผาที่ทำการศึกษา จากผลการจำลองพบว่าหัวเผาที่มีขนาดการทำงานอยู่ระหว่าง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งจะเป็นช่วงที่หัวเผาสามารถรักษาเสถียรภาพในการเผาไหม้ และให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งหากเพิ่มกำลังความร้อนจากการเผาให้สูงกว่า 1 MW จะเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ (blow - off) แต่หากลดกำลังความร้อนจนต่ำกว่า 450 kW จะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้มีอนุภาคคาร์บอนและสารระเหยหลงเหลือ ซึ่งถือเป็นการทิ้งพลังงานในส่วนดังกล่าวไปโดยไร้ประโยชน์

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชนภัทร์ ภักดีวงศ์. "การจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [2] 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.
- [3] J.Charoensuk, (1996). *The Application of Mathematical Model for Scaling Pulverized coal combustors*, Ph.D Thesis, University of London.
- [4] S.M.A. Rizvi. (1985). *Prediction of Flow, Combustion and Heat Transfer in Pulverized Coal Flames*, Ph.D. Thesis of University of London and the Diploma of Membership of the Imperial College.
- [5] J. Ballester, J. Barroso, L.M. Cerecedo, R. Ichaso. (2005). Comparative Study of Semi-Industrial-Scale Flames of Pulverized Coals and Biomass, *Combustion and Flame* 141, pp. 204-215.
- [6] M. A. Field. (1969). Rate of Combustion Of Size-Graded Fractions of Char from a Low Rank Coal between 1200 K-2000 K. *Combustion and Flame* 13, pp. 237-252.
- [7] M. M. Baum and P. J. Street. (1971). Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles. *Combust. Sci. Tech.* 3(5):231-243.
- [8] N.Punbusayakul (2004). *Numerical Simulation of Sulfur Dioxide Adsorption in a Vortex Flow Reactor*, Thesis of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [9] อ่ำพล อาภาชนากร นิमित นิพัทธ์ธรรมกุล และ เฉลิมพงษ์ กล้าขยัน (2555). *โครงการนำร่องเพื่อผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลในระดับชุมชน*, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน) และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชินภัทร ชูระการ
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 12 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2531 ที่ขอนแก่น
ที่อยู่	120 หมู่ 14 ถนนมิตรภาพ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
ประวัติการศึกษา	2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล (เกียรตินิยมอันดับ 1) มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2554-2555 ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกล ประจำแผนก Operations-Slider บริษัท ซีเกทเทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด 90 หมู่ 15 ตำบลสูงเนิน อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา 30170



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้