

การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น
DEVELOPMENT OF THE PULVERIZED BIOMASS BURNER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น

DEVELOPMENT OF THE PULVERIZED BIOMASS BURNER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการค้นคว้าวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอสงวนสิทธิ์ในการนำปริญญานิพนธ์ไปใช้

ปีการศึกษา 2557

DEVELOPMENT OF THE PULVERIZED BIOMASS BURNER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2014

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น
DEVELOPMENT OF THE PULVERIZED BIOMASS BURNER

ผู้จัดทำ

1. นาย กุลพัฒน์ กุลกำมธร รหัสประจำตัว 54010121
2. นาย สุรวิษฐ์ กลั่นเลี้ยง รหัสประจำตัว 54011427
3. นาย อภิชา เลิศพรเจริญ รหัสประจำตัว 54011483



อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

(รศ.ดร.จาวุฒิกรเจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF THE PULVERIZED BIOMASS BURNER

Kullapat	Kulkumthorn	54010121
Surawit	Klanliang	54011427
Apicha	Lertphorncharoen	54011483
Assoc.Prof.Dr.Jarawat	Charoensuk	Advisor
Year 2014		

ABSTRACT

Nowadays, the demand of using energy is getting higher unlimitedly, but the resources are inadequate so the objective of this thesis is to develop the pulverized biomass fuel burner by considering and testing the factors which have the effect on the efficiency of the burner. The 0.5 mm. sawdust pulverized biomass fuel is used for the experiment at 6.14:1 air-fuel ratio with 15% excess air for 300-500kW rate of thermal throughput, 0.134-0.223 kg/s mass flow rate of air and 0.019-0.032 kg/s mass flow rate of fuel are needed. The maximum air and fuel flow rate of the system are 0.345 kg/s and 0.076 kg/s respectively which are enough for maximum thermal throughput. Before the combustion process of the biomass, the burner must be preheated by LPG gas then the biomass fuel is injected, the LPG gas line will be closed when the appropriate temperature is reached. After the burner was tested with swirl blade angle of 65-100 degree, the 100 degree shows the best result in turbulent air inside the burner and the burner has the operating range between 300-500 kW

Keywords: biomass burner development

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณความเอาใจใส่ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในด้านต่างๆ เสมอมาจาก รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข เป็นอย่างมาก อีกทั้งขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ นาย ชินภัทร ชูระการ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ความรู้ ในเรื่องการทำเนิงานการทดลอง ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณพี่พี พี่แชมป์ พี่เบล ดี ไอศ ป่อม ชมรมยานยนต์ และห้องพัสดุภาควิศวกรรมเครื่องกลที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้โอกาสผู้ทำปริญญาานิพนธ์เข้ารับการศึกษาและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณคณาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาทุกท่าน ที่ได้มอบความรู้ และอบรมสั่งสอนอย่างสุดความสามารถ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมาในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายกุลพัฒน์ กุลกำมัธร์
นายสุรวิษฐ์ กลั่นเลี้ยง
นายอภิชา เลิศพรเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	1
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เชื้อเพลิงแข็ง.....	3
2.1.1 ประเภทและลักษณะของเชื้อเพลิงแข็ง.....	4
2.1.2 การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิง.....	11
2.2 สมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิง.....	12
2.2.1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง.....	12
2.2.2 ความสามารถในการระเหย.....	13
2.2.3 ความถ่วงจำเพาะ.....	13
2.2.4 ความหนืด.....	13
2.2.5 จุดน้ำมันเป็นฝ้า.....	13
2.2.6 จุดไหล.....	13
2.2.7 จุดวาบไฟ.....	13
2.2.8 จุดติดไฟ.....	13
2.2.9 จุดติดไฟด้วยตัวเอง.....	13
2.3 การเผาไหม้.....	14
2.3.1 สตอยซิโอเมตรีของการเผาไหม้.....	15
2.3.2 Enthalpy of Combustion และ ค่าความร้อน.....	16
2.3.3 อุลทิมูมิเปลา Adiabatic.....	18
2.3.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้.....	19
2.3.4.1 ระยะเวลาในการเผาไหม้.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อธิการบดีไม่รับผิดชอบเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4.2	ระยะเวลาในการเผาไหม้.....	20
2.3.4.3	อุณหภูมิของการเผาไหม้.....	20
2.3.4.4	ความปั่นป่วนของการเผาไหม้.....	20
2.4	การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	20
2.4.1	การทำแห้งของเชื้อเพลิงแข็ง.....	20
2.4.2	การปล่อยสารระเหย.....	21
2.4.3	การเผาไหม้ถ่านชาร์.....	22
2.4.4	ลักษณะและพฤติกรรมของเศษถ่าน.....	26
2.5	การปล่อยมลพิษและการควบคุม.....	27
2.5.1	บทนำ.....	27
2.5.2	ผลกระทบของมลพิษ.....	28
2.5.3	ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO _x)	28
2.5.4	คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide)	34
2.5.5	ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO _x)	35
2.5.6	ฝุ่นและเขม่า.....	36
2.6	ระบบป้อนอากาศ.....	38
2.6.1	ทฤษฎีการวัดด้วยแผ่นออริฟิส.....	38
2.6.2	ตำแหน่งสำหรับวัดความดันแตกต่างกัน.....	39
2.6.3	การติดตั้งแผ่นออริฟิส.....	39
บทที่ 3	การคำนวณระบบของหัวเผาชีวมวลแบบฝุ่น.....	41
3.1	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง.....	41
3.2	เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วอากาศเข้าหัวเผาชีวมวล.....	42
บทที่ 4	การติดตั้งและวิธีการทดลอง.....	44
4.1	การประกอบขาเตา.....	44
4.1.1	ขั้นตอนการทำ.....	44
4.2	ขั้นตอนการติดตั้งเตาเผา.....	44
4.3	การติดตั้งระบบป้อนอากาศและวิธีการทดลอง.....	46
4.3.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอากาศ.....	47
4.3.2	ขั้นตอนการติดตั้งระบบป้อนอากาศ.....	47
4.3.3	การทดลองปรับค่าอัตราการไหลของอากาศ.....	50
4.3.4	ขั้นตอนการทดลองและบันทึกค่า.....	50
4.4	การทดลองขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงที่เหมาะสม.....	51
4.4.1	เงื่อนไขการทดลอง.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทางสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอสงวนสิทธิ์ในการนำไปใช้

4.4.2	ขั้นตอนการทดลองและบันทึกค่า.....	51
4.5	การจุดหัวเผาและการอุ่นหัวเผาด้วยแก๊สLPG.....	51
4.5.1	อุปกรณ์ควบคุมแก๊สแอลพีจี.....	51
4.5.2	ขั้นตอนการจุดหัวเผา.....	52
4.5.3	การอุ่นหัวเผา.....	52
4.6	วิธีการวัดไอเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย.....	52
4.6.1	อุปกรณ์การวัดไอเสีย.....	52
4.6.2	ขั้นตอนการวัดไอเสีย.....	54
4.7	วิธีการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ 250, 300, 400 และ 500 kW.....	55
4.8	วิธีการทดลององศาใบพัดของหัวเผาที่สภาวะ 300 kW.....	56
บทที่ 5	ผลการทดลองและการอภิปราย.....	57
5.1	ลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละขนาด.....	57
5.2	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศสำหรับหัวเผา.....	58
5.3	องศาใบพัดของหัวเผา.....	61
5.3.1	ทดสอบที่ 250 kW.....	61
5.3.2	ทดสอบที่ 300 kW.....	61
5.4	พฤติกรรมการณ์การเผาไหม้ที่ 400 kW และ 500 kW.....	62
5.4.1	ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ.....	62
5.4.2	พฤติกรรมการณ์การเผาไหม้ที่ 400 kW.....	63
5.4.3	พฤติกรรมการณ์การเผาไหม้ที่ 500 kW.....	68
5.5	การทำงานที่ย่าน 250, 300, 400 และ 500 kW.....	72
5.5.1	ลักษณะการทำงานที่ 250 kW.....	72
5.5.2	ลักษณะการทำงานที่ 300 kW.....	72
5.5.3	ลักษณะการทำงานที่ 400 kW.....	72
5.5.4	ลักษณะการทำงานที่ 500 kW.....	72
5.6	ผลการทดลองการวัดไอเสีย.....	72
บทที่ 6	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	75
6.1	สรุปผลการทดลอง.....	75
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	75

ภาคผนวก ก. ตารางและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์องศาการเปิดวาล์วและอัตรา การไหลเชิงทวลของอากาศ.....	78
ภาคผนวก ข. ข้อมูลไอเสีย.....	86
ภาคผนวก ค. การคำนวณ Ultimate Analysis เพื่อหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (AF Ratio).....	87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่างๆ.....	4
2.2 ลักษณะของถ่านหิน.....	5
2.3 ตัวอย่างเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างไม้สนกับถ่านหินบิทูมินัส.....	6
2.4 การแบ่งชนิดของถ่านหินโดยศักดิ์ของถ่านหิน (หลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า).....	6
2.5 ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ของ RDF และเชื้อเพลิงต่างๆ (หลังอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า).....	10
2.6 จุดวาบไฟและจุดติดไฟด้วยตัวเองของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ.....	14
2.7 ระยะห่าง Upstream และDownstream.....	40
3.1 ผลของการคำนวณองค์ประกอบเชื้อเพลิง.....	41
3.2 แสดงอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้งสามเส้นทางสำหรับการเผาไหม้.....	43
4.1 เงื่อนไขการทดลองอัตราการไหลอากาศ.....	50
4.2 เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วเส้นทางอากาศที่สภาวะ 300 kW, 400 kW และ 500 kW.....	50
5.1 เงื่อนไขในการทดลองจากการคำนวณ.....	60
5.2 องศาการเปิดวาล์วสำหรับการทดลอง.....	60
5.3 ค่าปริมาณไอเสีย.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
2.1 ชีวมวลในประเทศไทย.....	7
2.2 ห้องปฏิกรณ์ที่มีการไหลสม่ำเสมอเพื่อใช้ในการหาค่าความร้อนจากการเผาไหม้.....	16
2.3 Enthalpy of combustion ของมีเทน - อากาศ ที่สภาวะ stoichiometric ซึ่งนำไป ผลิตก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้อยู่ในสถานะไอ.....	17
2.4 กราฟแสดงการหาค่าอุณหภูมิเปลว adiabatic ในแกนอ้างอิง $h-T$	19
2.5 กลไกการเผาไหม้สำหรับอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็ก	20
2.6 เปรียบเทียบโปรไฟล์ $Y_o(r)$ และ $T(r)$ ตามแนวรัศมีของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งธรรมดา ระหว่างการ เผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ และการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยจลน์ทางเคมี.....	23
2.7 เปรียบเทียบอัตราการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งธรรมดาที่มีลักษณะการเผาไหม้ที่ถูก ควบคุมโดยการแพร่ และโดยจลน์ทางเคมี	23
2.8 รูปแบบทั่วไปสำหรับกระบวนการเผาไหม้บริเวณผิวของอนุภาคคาร์บอน.....	24
2.9 กลไกในการเกิดเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวล	27
2.10 ความเข้มข้นที่สมดุลของ NO_2 ที่มีส่วนประกอบของออกซิเจนในแก๊สที่แตกต่างกัน	29
2.11 ผลการคำนวณ และผลการทดลองหาค่า thermal NO และ prompt NO ของเปลวไฟมีเทน กับอากาศในเตาเผาไหม้แบบกวน, λ หมายถึงอัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศทางทฤษฎี	32
2.12 การเกิด NO ที่ขับเคลื่อนด้วยกลไกของ Zeldovich.....	33
2.13 แผนผังระบบป้อนอากาศ.....	38
2.14 แสดงการไหลผ่านแผ่นออริฟิส.....	39
2.15 แสดงตำแหน่งการวัดความดันแตกต่างกัน	39
2.16 แสดงรูปแบบท่อต่างๆ.....	40
3.1 แสดงขั้นตอนวิธีการคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง.....	41
3.2 แสดงขั้นตอนการกำหนดเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วอากาศเข้าหัวเผาชีวมวล	42
4.1 ขาดังเตาเผา.....	44
4.2 เตาเผาเมื่อติดประเก็น	44
4.3 เตาเผาระหว่างทำการประกอบ.....	45
4.4 เตาเผาหลังการประกอบ	45
4.5 สกรูพืดและถังพักขี้เถ้า.....	45
4.6 มอเตอร์หลังการติดตั้งเข้ากับสกรูระบายเถ้าหนัก.....	46
4.7 เตาเผาและระบบสกรูระบายเถ้าหนัก.....	46
4.8 การเตรียมท่อตามขนาด.....	47
4.9 วาล์วลิ้นปีกผีเสื้อหลังการติดตั้ง.....	47
4.10 แผ่นออริฟิสหลังการติดตั้ง	48

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และไม่รับผิดชอบต่อการใช้งานโดยไม่ถูกต้อง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทางสำนักพิมพ์ไม่มีหน้าที่รับผิดชอบต่อเนื้อหาและต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11 ตำแหน่งรองรับท่ออากาศ	48
4.12 ระบบอากาศโดยรวม	48
4.13 เส้นทางท่อ flexible จาก blower	49
4.14 เส้นทางท่อ flexible เข้าสู่หัวเผา.....	49
4.15 แผนผังระบบแก๊ส	51
4.16 อุปกรณ์สำหรับจุดหัวเผา	52
4.17 ท่อลดอุณหภูมิไอเสีย	52
4.18 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)	53
4.19 เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย	53
4.20 ตำแหน่งการวัดไอเสีย	54
4.21 ตัวอย่างขั้นตอนวัดไอเสีย.....	54
4.22 ตัวอย่างองค์ประกอบภายในไอเสียหลังการเผาไหม้	54
4.23 ภาพตัดด้านหน้าและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของหัวเผา	55
4.24 ภาพตัดด้านบนและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของหัวเผา	55
4.25 ตำแหน่งการวัดมุมมองสตาโบแพดภายในหัวเผา	56
5.1 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลขนาด 1.5 มม.	57
5.2 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลขนาด 1.0 มม.	57
5.3 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลขนาด 0.5 มม.	58
5.4 อัตราการไหลเชิงมวลของ Primary Air	59
5.5 อัตราการไหลเชิงมวลของ Secondary Air	59
5.6 อัตราการไหลเชิงมวลของ Tertiary Air	59
5.7 เปลวไฟที่ออสตาโบแพด	61
5.8 ลักษณะการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหยตามแนว Axial ของเตาเผา.....	61
5.9 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของชาร์ (Particle Char Fraction).....	62
5.10 ภาพด้านข้าง ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิล	62
5.11 ภาพด้านบน ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ.....	63
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 400 kW ..	63
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 400 kW ..	64
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 400 kW ..	64
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 400 kW ..	65
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 400 kW ..	66
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัวที่ 400 kW.....	66
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตามแนวแกนของเทอร์โมคัปเปิลตัว 1 ถึงตัวที่ 9 ที่ 400 kW....	67
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในห้องเผาของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัวที่ 400 kW	67
5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 500 kW ..	68
5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 500 kW ..	68
5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 500 kW ..	69
5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 500 kW ..	69

5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 500 kW ..	70
5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัวที่ 500 kW.....	70
5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตามแนวแกนของเทอร์โมคัปเปิลตัว 1 ถึงตัวที่ 9 ที่ 500 kW....	71
5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในห้องเผาของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัวที่ 500 kW.....	71
5.28 ปริมาณ O ₂ ในไอเสีย.....	73
5.29 ปริมาณ CO ในไอเสีย.....	73
5.30 ปริมาณ NO _x ในไอเสีย	74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในอดีตมนุษย์ได้ค้นพบการนำพลังงานจากทรัพยากรธรรมชาติมาใช้ โดยการเปลี่ยนแปลงรูป วัตถุประสงค์เหล่านั้นผ่านกรรมวิธีต่างๆให้เป็นพลังงาน แต่เนื่องด้วยทรัพยากรธรรมชาติที่มีจำนวนจำกัด บวกกับความต้องการพลังงานอย่างไม่มีที่สิ้นสุด ซึ่งส่งผลให้ค่าครองชีพสูงขึ้น จึงเกิดแนวคิดที่จะแปร รูปพลังงานจากแหล่งอื่น และเลือกใช้พลังงานทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ เช่น พลังงานทดแทนจาก แสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานคลื่นและ พลังงานชีวมวล จากการศึกษาวิจัยหัวเผาชีวมวลชนิดฝุ่นที่ ผ่านมาในปีการศึกษา 2556 ได้มีการออกแบบสร้างหัวเผาและเริ่มกระบวนการอุ่นเตาโดยใช้ก๊าซ LPG เพื่อวัตถุประสงค์ที่ตำแหน่งต่างๆภายในหัวเผา ในปีการศึกษา 2557 ผู้วิจัยจึงจะทำการประกอบระบบ ป้อนเชื้อเพลิงผงกับเตาเผาเพื่อศึกษาและทดลองจุดเตาพร้อมกับป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงเพื่อใช้ เป็นพลังงานในการเผาไหม้หลักพร้อมกับปรับอัตราการไหลของอากาศโดยการควบคุมวาล์วปีกผีเสื้อ ปรับองศาใบพัดเพื่อให้เกิดการหมุนควงของอากาศภายในหัวเผาและหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ในการเผาไหม้ เพื่อให้หัวเผาสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพทุกช่วงการใช้งาน อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนมาเป็นพลังงานในรูปอื่นเพื่อลดมลพิษและค่าใช้จ่ายในงาน อุตสาหกรรม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ทราบองศาของใบพัดสำหรับปรับค่าความปั่นป่วนของอากาศที่เหมาะสมในการเผาไหม้เชื้อเพลิง ชีวมวลฝุ่น
2. ติดตั้งและปรับค่าความต้องการระบบอากาศและเชื้อเพลิงให้สามารถทำงานในช่วง 250-500kW

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการนำวัสดุที่เหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมมาเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตพลังงาน
2. เพื่อพัฒนาหัวเผาและการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลให้สามารถนำไปใช้งานได้ ในภาคอุตสาหกรรม

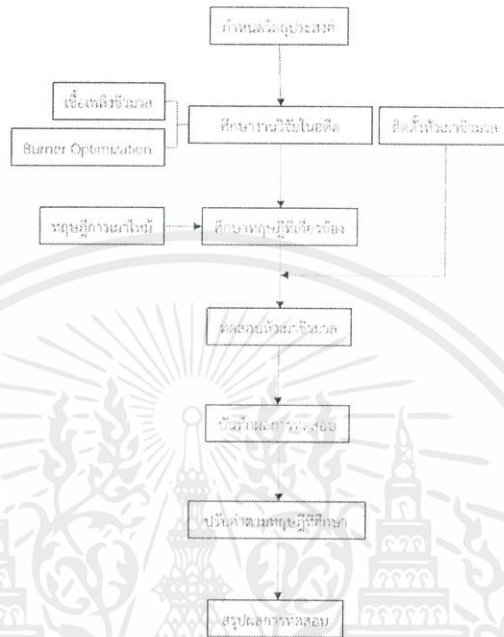
1.4 ขอบเขตการศึกษา

1. ติดตั้งหัวเผากับเตาเผาและสามารถใช้งานได้
2. ศึกษาและทดลองช่วงการทำงานของหัวเผา
3. ศึกษาและทดลององศาควบคุมใบพัดสำหรับปรับค่าความปั่นป่วนของอากาศภายในหัวเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการศึกษาและการวิเคราะห์รวมถึงการสร้างหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นจำเป็นต้องมีการวางแผนและกำหนดระยะเวลาในการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เชื้อเพลิงแข็ง [3]

เชื้อเพลิงแข็งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติได้แก่ ไม้ ชีวมวล พืช ถ่านหินลิกไนต์ ถ่านหินบิทูมินัส ถ่านหินแอนทราไซต์ ขยะจากที่อยู่อาศัย และจากอุตสาหกรรมบางประเภทก็จัดว่าเป็นเชื้อเพลิงแข็งเช่นเดียวกัน องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งนอกจากจะประกอบด้วยคาร์บอน และไฮโดรเจนเป็นส่วนมากแล้วยังประกอบด้วยออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน น้ำ และเถ้าอีกด้วย ตัวอย่างเช่นไม้มีออกซิเจนอยู่ถึง 45% (โดยมวลและไม่รวมน้ำกับเถ้า) ในขณะที่ถ่านหินแอนทราไซต์มีอยู่เพียง 2% เท่านั้นดังแสดงในตารางที่ 3.6

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่างๆ

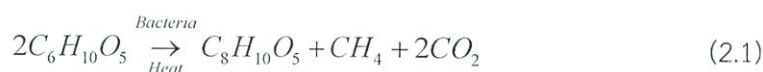
เชื้อเพลิง	ออกซิเจน, % (หลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า)	ความชื้น, % (ไม่คิดเถ้า)	เถ้า, % (หลักอ้างอิงแห้ง)
ไม้	45	15-50	0.1-1.0
พีต	35	90	0.1-10
ถ่านหินลิกไนต์	25	30	> 5
ถ่านหินบิทูมินัส	5	5	> 5
ถ่านหินแอนทราไซต์	2	4	> 5
เชื้อเพลิงจากขยะ	40	24	10-15

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

2.1.1 ประเภท และลักษณะของเชื้อเพลิงแข็ง

1. พีต (Peat)

พีตเกิดจากไม้หรือเซลลูโลสที่อยู่ในบริเวณอับอากาศ และหมักหมมเป็นเวลานานจนเกิดการเน่าสลายทางเคมีโดยแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการ



ซึ่งพีตจะมีสีดำปนน้ำตาล มีรูพรุนและความชื้นสูงถึง 80-90% จึงจำเป็นต้องตากแห้งหรือเอกสารนี้ผ่านกระบวนการอบแห้งก่อนนำมาใช้ ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ถ่านหิน (Coal)

ถ่านหินเกิดจากไม้ และชีวมวลชนิดอื่นๆที่ทับถมกัน และอัดแน่นเป็นเวลานานมากจนกระทั่งกลายเป็นหิน โดยเริ่มจากพืชในที่ชื้นแฉะและอับอากาศแล้วเกิดการสลายตัวทางเคมีชีวภาพ (biochemical decomposition) พร้อมกับมีการทับถมกันของพืชชนิดต่างๆเพิ่มเติมเข้ามาจนมีความลึกมากขึ้นเรื่อยๆทำให้พืชมีความชื้น ความพรุน (porosity) ปริมาณสารระเหย (volatile matter content) พร้อมกับปริมาณของออกซิเจน และไฮโดรเจนลดลง ในขณะที่มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น พืชจะเปลี่ยนเป็นถ่านหินที่มีศักดิ์ (rank of coal) สูงขึ้นตามลำดับ คือ ลิกไนต์ บิทูมินัส และแอนทราไซท์ในที่สุด 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 และสารประกอบคุณภาพต่ำต่างๆ ซึ่งเป็นหลักที่ไม่เกี่ยวกับศักดิ์ของถ่านหินแต่ประการใด การเพิ่มเกรดของถ่านหินทำได้หลายวิธีทั้งทางกลและทางเคมีเพื่อลดปริมาณสิ่งต่างๆที่ได้กล่าวมาให้น้อยลง เช่น โดยการบดถ่านหินให้ป่นเป็นผงขนาด 10 mm แล้วล้างด้วยน้ำก็สามารถลดปริมาณเถ้าให้เหลือน้อยกว่า 1% ได้ หรือใช้วิธีแยกตามความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ (gravity separation) เพื่อให้สิ่งเจือปนที่มีน้ำหนักมากกว่าถ่านหินตกตะกอนแยกออกมาจากถ่านหิน เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของถ่านหิน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 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 2.4 การแบ่งชนิดของถ่านหินโดยศักดิ์ของถ่านหิน (หลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า)

ศักดิ์ของถ่านหิน	คาร์บอนคงตัว [%]	ค่าความร้อนทางสูง [MJ/kg]
เมตา-แอนทราไซต์	>98	
แอนทราไซต์	92-98	
เซมิแอนทราไซต์	86-92	
บิทูมินัสสารระเหยต่ำ	78-86	
บิทูมินัสสารระเหยปานกลาง	69-78	
บิทูมินัสสารระเหยสูง A		>32
บิทูมินัสสารระเหยสูง B		30-32

บิโหมินัสสารระเหยสูง C		27-30
ซับบิโหมินัส A		24-27
ซับบิโหมินัส B		22-24
ซับบิโหมินัส C		19-22
ลิกไนต์ A		15-19
ลิกไนต์ B		<15

3. เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) [2]

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



กากใยปาล์ม



ไม้ฟัน



ซังข้าวโพด



เห่ง้ำมันสำปะหลัง



กะลามะพร้าว



แกลบ

รูปที่ 2.1 ชีวมวลในประเทศไทย [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชีวมวลจากข้าว

แกลบ จากข้อมูลพบว่ามีปริมาณการผลิตข้าวทั่วประเทศเท่ากับ 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 พบว่ามีปริมาณการผลิตข้าวโพดทั่วประเทศเท่ากับ 4.40 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณซังข้าวโพดเท่ากับ 0.84 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้ในภาคต่างๆคิดเป็นปริมาณรวม 74,000 ตัน ทำให้ปริมาณชีวมวลคงเหลือมีค่าเท่ากับ 0.43 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 124.6 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 47.31 MW

ชีวมวลจากอ้อย

ยอดและใบอ้อย จากข้อมูลพบว่ามีปริมาณการผลิตอ้อยทั่วประเทศเท่ากับ 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 จึงทำให้ชีวมวลประเภทนี้หมดไปกับการใช้ในโรงงานเป็นหลัก แม้แต่มีความต้องการใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอื่นๆ แต่ก็ไม่มีวัตถุดิบมาป้อน หลายโรงได้เริ่มเสาะหาเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆมาใช้ร่วมกับกากอ้อยเนื่องจากภาวะขาดแคลนของกากอ้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชีวมวลจากมันสำปะหลัง

ลำต้นมันสำปะหลัง จากข้อมูลพบว่ามีปริมาณการผลิตมันสำปะหลังทั้งประเทศเท่ากับ 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 จากข้อมูลพบว่ามีปริมาณการผลิตปาล์มน้ำมันทั้งประเทศเท่ากับ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชีวมวลจากไม้ยางพารา

ชี้เลื่อยและเศษไม้ยางพารา จากรายงานของสถาบันวิจัยยางพาราทำให้ทราบว่าในแต่ละปีจะมีต้นยางพาราที่มีอายุเกิน 25 ปี ซึ่งครบรอบที่จะต้องทำการตัด คิดเป็นพื้นที่ยางพาราที่ถูกตัดพื้น 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 สำหรับเปลือกไม้จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนแต่ยังมีปริมาณการใช้งานน้อย เมื่อประเมินจำนวนของชีวมวลคงเหลือพบว่าจะมีไม้ฟืนคงเหลือเท่ากับ 0.57 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 167 ktoe และพลังงานไฟฟ้า 63.5 MW สำหรับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีปริมาณคงเหลือ 0.61 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 186 ktoe และพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 70.5 MW

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของ RDF และเชื้อเพลิงต่างๆ (หลังอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า)

องค์ประกอบ	ชนิดเชื้อเพลิง				เชื้อเพลิงจากขยะ (RDF)
	ไม้	ฟืด	ถ่านหินลิกไนต์	ถ่านหินบิทูมินัส	
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

เอกสารนี้เป็นไฮโดรเจนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.1.2 การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็ง

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

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

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3176 เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ผลระบุถึงปริมาณธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น โดยระบุในลักษณะหลัก อ่างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า ปริมาณคาร์บอนและปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงถูกกำหนด โดยการเผาเชื้อเพลิงตัวอย่างในภาชนะปิดที่บรรจุออกซิเจนไว้อย่างเพียงพอแล้ววัดองค์ประกอบของไอเสียเพื่อคำนวณย้อนกลับไปหาปริมาณคาร์บอนและปริมาณไฮโดรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงนั้น

ไนโตรเจนและกำมะถัน จะถูกกำหนดโดยอาศัยวิธีการทางเคมี ในขณะที่ออกซิเจนจะถูกระบุโดยค่า

100 ลบด้วยปริมาณของธาตุ C, H, N และ S ที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

การกำหนดค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (ASTM D2105) ทำได้โดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ซึ่งจะได้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ค่าปริมาตรคงที่ ซึ่งจะแตกต่างไปจากค่าที่ความดันคงที่

การกำหนดอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้า (ASTM D1857) โดยการนำเถ้าของถ่านหินที่พิจารณา มาผสมกับสารละลายของ dextrin เพื่อทำให้เป็นของเหลวหนืด แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์มาตรฐานตามที่กำหนดเพื่อทำให้เป็นรูปทรงยัดแน่น จากนั้นไปทำให้ร้อนขึ้นอย่างช้าๆ ในเตาอบแบบเปิดสู่อากาศ (oxidizing) หรือแบบลดอากาศ (reducing) ก็ได้แล้วแต่กำหนด แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงรูปทรงการขยายตัวของเถ้า อุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าจะมีหลายค่า กล่าวคือ อุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าคืออุณหภูมิที่ค่าต่างๆกัน (จากน้อยไปหามาก) ที่ทำให้เถ้าเริ่มเปลี่ยนรูปทรงเป็นแบบต่างๆกันตามลำดับ คือ การขยายมนเล็กน้อย หลอมเป็นแท่งทรงกระบอกปลายมน หลอม เป็นรูปครึ่งทรงกลม และสุดท้ายหลอมละลายแบนราบติดกับพื้น อุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเถ้า เช่น เถ้าที่ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 และ TiO_2 จะมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูง ในขณะที่เถ้าที่ประกอบด้วยออกไซด์มูลฐาน เช่น Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O และ K_2O เป็นต้น จะมีอุณหภูมิลดลง โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าจะต่ำกว่าอุณหภูมิของเปลวไฟแต่จะสูงกว่าอุณหภูมิของไอน้ำและผนังเตา

2.2 สมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิง

2.2.1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง คือค่าปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิงที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ในสภาวะเริ่มต้นที่ 25°C ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับออกซิเจนได้ สารผลิตภัณฑ์ที่เย็นตัวลงมาที่ 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

$$LHV = HHV - \left(\frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{fuel}}} \right) h_{fg} \quad (2.2)$$

เมื่อ h_{fg} คือค่าความร้อนแฝงในการระเหยของน้ำที่ 25°C มีค่าเท่ากับ $2,440 \text{ kJ/kg}$, $m_{\text{H}_2\text{O}}$ คือมวลของน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้โดยรวมถึงน้ำที่มาจากความชื้นในเชื้อเพลิง และที่เกิดจากปฏิกิริยากับไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง, m_{fuel} คือมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงหาได้จากการทดลองโดยชุดอุปกรณ์ที่เรียกว่าแคลอรีมิเตอร์ หรือคำนวณหาโดยวิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์เมื่อทราบส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงนั้น

2.2.2 ความสามารถในการระเหย (volatility) บอกให้ทราบถึงการระเหยของเชื้อเพลิงเหลว ว่ายากหรือง่ายเพียงใด ระบุโดยค่าความดันไอ และมวลระเหยออกเป็นไอที่อุณหภูมิต่างๆ

2.2.3 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity, (Sp.Gr)) คือการเปรียบเทียบความหนาแน่น หรือ ความหนักเบาของเชื้อเพลิงเหลวเมื่อเทียบกับน้ำที่ปริมาตรและอุณหภูมิเดียวกันคือ 15°C

$$Sp.Gr = \left(\frac{\rho_{oil}}{\rho_{water}} \right)_{@15^{\circ}C} \quad (2.3)$$

2.2.4 ความหนืด (viscosity) คือความต้านทานการไหลของเชื้อเพลิงเหลว มีอิทธิพลต่อการส่งเชื้อเพลิงเหลวให้ไหลไปตามท่อ ขณะเดียวกันก็มีผลต่อกระบวนการแตกตัวเป็นละอองด้วย ความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นหลัก ดังนั้นในการกำหนดค่าความหนืดจึงมักจะต้องบอกถึงอุณหภูมิกำกับด้วย โดยทั่วไปเชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงจะมีความหนืดสูง ส่วนเชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำจะมีความหนืดต่ำและจะเผาไหม้ได้ง่ายกว่า

2.2.5 จุดน้ำมันเป็นฝ้า คืออุณหภูมิที่เริ่มเกิดฝ้าขุ่นมัวในเนื่อน้ำมัน เนื่องจากเริ่มเกิดผลึกซีฟี่งหรือไขน้ำมันเมื่ออุณหภูมิน้ำมันต่ำลง เป็นสาเหตุทำให้ไส้กรองน้ำมันอุดตันได้

2.2.6 จุดไหล (pour point) คืออุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงเหลวจะไหลได้ จุดไหลเป็นสมบัติของเชื้อเพลิงเหลวที่สำคัญ เพราะถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าจุดไหล เชื้อเพลิงเหลวจะไหลยากซึ่งอาจส่งผลให้ระบบส่งเชื้อเพลิงเหลวอุดตันได้

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

2.2.8 จุดติดไฟ คืออุณหภูมิที่สูงกว่าจุดวาบไฟเล็กน้อยที่เมื่อมีเปลวไฟจากแหล่งภายนอกมาสัมผัสกับน้ำมันทำให้เกิดการติดไฟ และการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง

2.2.9 จุดติดไฟด้วยตัวเอง (auto-ignition temperature) คืออุณหภูมิต่ำสุดของเชื้อเพลิงที่ยังคงทำให้เกิดการติดไฟ และการเผาไหม้ขึ้นด้วยตัวเองได้ ภายในภาชนะมาตรฐานและความดันปกติ โดยไม่มีการสปาร์กด้วยไฟฟ้าหรือเปลวไฟจากแหล่งภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.6 จุดวาบไฟและจุดติดไฟด้วยตัวเองของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

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

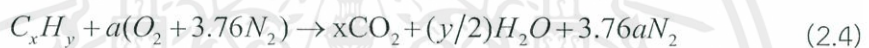
2.3 การเผาไหม้ (Combustion) [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การเผาไหม้ (combustion) เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเชื้อเพลิงหรือสารที่สามารถเผาไหม้กับโมเลกุลของออกซิไดเซอร์ ซึ่งปกติคือออกซิเจนจากอากาศ โดยสารที่สามารถเผาไหม้ได้ในเชื้อเพลิงคือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และกำมะถัน (S) เป็นต้น ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นที่

อุณหภูมิสูงภายในเวลาอันรวดเร็ว และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนให้พลังงานจากการเผาไหม้ออกมา ซึ่งลักษณะของปฏิกิริยามีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพ และทางเคมีของสภาวะตั้งต้น ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีปัจจัยครบสามอย่างนั่นคือ เชื้อเพลิง ออกซิไดเซอร์ และสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องสมบูรณ์ เช่นแหล่งความร้อน ประกายไฟ และการสร้างสภาวะกอดัดให้มีความดันสูง อุณหภูมิสูง เพื่อจุดติดไฟ เป็นต้น

2.3.1 สตอยซิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion Stoichiometry)

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



เมื่อ

$$a = x + y/4 \quad (2.5)$$

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

$$(A/F)_{\text{stoic}} = \left(\frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}} \right) = \frac{7.76a}{1} \frac{MW_{\text{air}}}{MW_{\text{fuel}}} \quad (2.6)$$

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

อัตราส่วนสมมูล (equivalent ratio, Φ) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกว่าส่วนผสมระหว่างอากาศกับ

เชื้อเพลิงเป็นแบบstoichiometry หนา หรือบาง ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\Phi = \frac{(A/F)_{\text{stoic}}}{(A/F)} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{\text{stoic}}} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง (A/F) จะต้อง (F/A) จึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

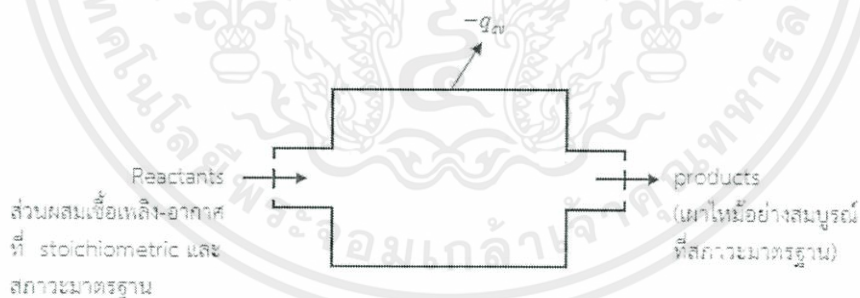
จากนิยามจะเห็นได้ว่า สำหรับส่วนผสมหนา (fuel rich) จะมีค่า $\Phi > 1$, ส่วนผสมบาง (fuel lean) จะมี $\Phi < 1$ และสำหรับ stoichiometry จะมี $\Phi = 1$ ซึ่งอัตราส่วนสมมูลนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่มีประโยชน์มากในการบ่งบอกสมรรถนะของพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ % stoichiometry air คือ ปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้คิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศตาม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

$$\%stoichiometry\ air = \frac{100\%}{\Phi} \quad (2.8)$$

และเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (% excess air) คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินกี่เปอร์เซ็นต์โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100

$$\%excess\ air = \frac{(1-\Phi)}{\Phi} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

2.3.2 Enthalpy of Combustion และค่าความร้อน (Heating values)



รูปที่ 2.2 ห้องปฏิกรณ์ที่มีการไหลสม่ำเสมอเพื่อใช้ในการหาค่าความร้อนจากการเผาไหม้

พิจารณาห้องปฏิกรณ์ (reactor) ที่มีการไหลแบบสม่ำเสมอแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งของผสมที่เป็นสารตั้งต้น (reactants) ในสภาวะ stoichiometric ไหลเข้า และมีสารผลิตภัณฑ์ (product) ไหลออก โดยทั้งคู่อยู่ในสภาวะมาตรฐาน (25°C และ 1 atm) หากสมมติว่ากระบวนการเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ นั่นคือ เชื้อเพลิงคาร์บอนทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

และเชื้อเพลิงไฮโดรเจนทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นน้ำ (H_2O) ถ้าสารผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ไหลออกมาตรงทางออกมีอุณหภูมิเดียวกันกับสารตั้งต้นที่ไหลเข้า ดังนั้นความร้อนจะไหลออกจากปฏิกิริยา ปริมาณความร้อนที่ไหลออกจะสัมพันธ์กับ standardized enthalpies ของสารตั้งต้น และสารผลิตภัณฑ์ หากใช้กฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์สำหรับการไหลแบบสม่ำเสมอ จะได้สมการ

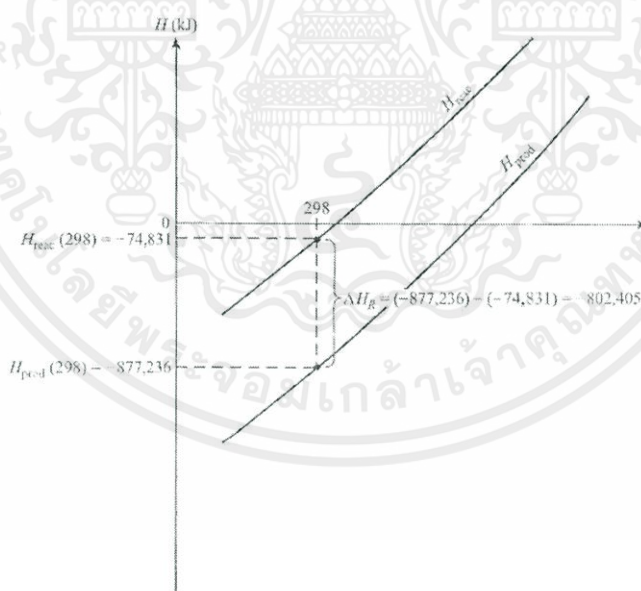
$$q_{cv} = h_o - h_i = h_{prod} - h_{reac} \quad (2.10)$$

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

$$\Delta h_R \equiv q_{cv} = h_{prod} - h_{reac} \quad (2.11)$$

หรือในเทอมของคุณสมบัติ Extensive จะได้

$$\Delta H_R = H_{prod} - H_{reac} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.3 enthalpy of combustion ของมีเทน - อากาศ ที่สภาวะ stoichiometric ซึ่งน้ำในผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้อยู่ในสถานะไอ

ค่า enthalpy of combustion สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15 เนื่องจากความร้อนไหลออกจากระบบจึงมีค่าติดลบ และทำให้ absolute enthalpy ของสารผลิตภัณฑ์อยู่ต่ำกว่าของสารตั้งต้น

ซึ่งจะพบว่า enthalpy of combustion ของปฏิกิริยาดังกล่าวมีค่าเท่ากับ $-802,405 \text{ kJ/kmol}$ of fuel โดยสามารถเปลี่ยนค่าดังกล่าวให้เป็นต่อหน่วยมวลของเชื้อเพลิงได้ดังนี้

$$\Delta h_R \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{fuel}}} \right) = \frac{\Delta H_R}{MW_{\text{fuel}}} \quad (2.13)$$

ค่าดังกล่าวสามารถเปลี่ยนให้คิดต่อหน่วยมวลของของผสมได้ดังนี้

$$\Delta h_R \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{mix}}} \right) = \Delta h_R \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{fuel}}} \right) \frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{mix}}} \quad (2.14)$$

โดยที่

$$\frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{mix}}} = \frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{air}} + m_{\text{fuel}}} = \frac{1}{(A/F) + 1} \quad (2.15)$$

ซึ่งค่า enthalpy of combustion จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่พิจารณา เนื่องจากทั้งค่า enthalpy ของสารตั้งต้น และสารผลิตภัณฑ์ ต่างก็เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

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

2.3.3 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

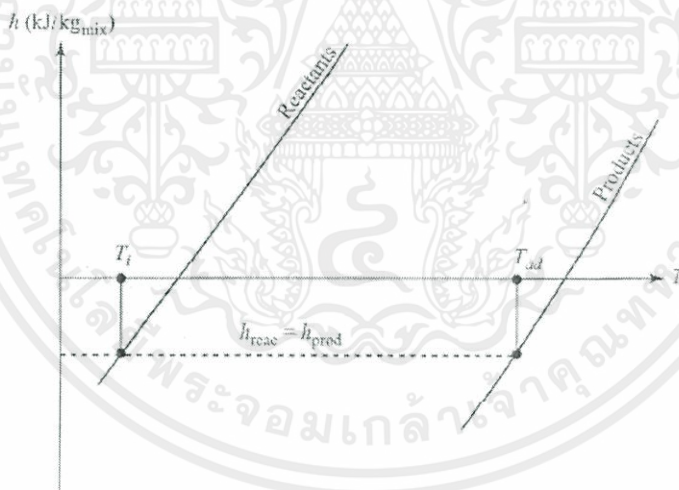
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{\text{react}}(T_i, P) = H_{\text{prod}}(T_{\text{ad}}, P) \quad (2.16)$$

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

จากที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้วว่าอุณหภูมิเปลว adiabatic เป็นอุณหภูมิสูงสุดของระบบที่จะทำได้ ภายใต้เงื่อนไขในอุดมคติ (ไม่มีการสูญเสียความร้อน และการเผาไหม้เกิดขึ้นเร็วมาก) แต่ในความเป็นจริงแล้วอุณหภูมิเปลวไฟจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเปลว adiabatic มากเนื่องจาก

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



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงการหาค่าอุณหภูมิเปลว adiabatic ในแกนอ้างอิง $h-T$

2.3.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้

2.3.4.1 ปริมาณอากาศที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ (Sufficient air to combustion) ใน

เอกสารนี้ การเผาไหม้เชื้อเพลิงให้สมบูรณ์จำเป็นต้องมีส่วนของอากาศหรือออกซิเจนที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ โดยปริมาณอากาศที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์เรียกว่า ปริมาณอากาศทางทฤษฎี ซึ่งสามารถคำนวณได้จากหัวข้อที่ผ่านมา

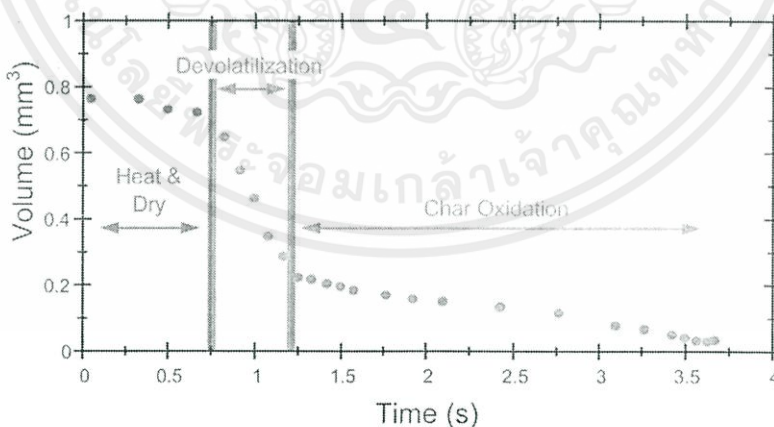
2.3.4.2 ระยะเวลาในการเผาไหม้ (Burning time) เนื่องจากในการทาปฏิกิริยาจำเป็นต้องอาศัยเวลาเพื่อที่จะทำให้ได้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งหาระยะเวลาในการเผาไหม้ไม่เพียงพอจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงต่ำ และนับว่าเป็นการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงด้วย

2.3.4.3 อุณหภูมิของการเผาไหม้ (Combustion Temperature) เป็นที่ทราบกันดีว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งความเร็วของการเกิดปฏิกิริยานั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยานั้นเป็นสำคัญด้วย โดยหากอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าสูงความเร็วของการเผาไหม้ก็จะมีความเร็ว

2.3.4.4 ความปั่นป่วนระหว่างการเผาไหม้ (Turbulent) เนื่องจากในการเผาไหม้นั้นเป็นการทำปฏิกิริยาของเชื้อเพลิง และออกซิเจนในอากาศ ซึ่งหากระหว่างการเผาไหม้มีความปั่นป่วนเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการคลุกเคล้ากันอย่างดีของเชื้อเพลิงและออกซิเจน ทำให้โอกาสที่ออกซิเจนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง และเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มีมากขึ้น

2.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuel Combustion) [4]

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 3.15



รูปที่ 2.5 กลไกการเผาไหม้สำหรับอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็ก [5]

2.4.1 การทำแห้งของเชื้อเพลิงแข็ง (Drying)

ความชื้นมีอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งได้ 2 รูปแบบ คือ น้ำอิสระ (free water) อยู่ภายในช่องว่างเล็กๆในเชื้อเพลิง และน้ำยึดเหนี่ยว (bound water) ซึ่งเป็นน้ำที่ถูกดูดซับไว้บนโครงสร้างพื้นผิว

ภายในของเนื้อเชื้อเพลิง พิจารณาอนุภาคเชื้อเพลิงขนาดเล็กที่อยู่ภายใต้แก๊สร้อน จะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา และการแผ่รังสีไปยังพื้นผิวของอนุภาคเชื้อเพลิง ส่งผลให้อุณหภูมิของอนุภาคสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำ จนน้ำเกิดการระเหย และถูกไล่ออกมาภายนอก

2.4.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization)

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

อัตราการปล่อยสารระเหย หรือการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสอาจจะนำเสนอได้ด้วยสมการปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง ดังนี้

$$\frac{dm_v}{dt} = -m_v k_{pr} \quad (2.17)$$

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

การจุดติดไฟของเชื้อเพลิงแข็งสามารถเกิดขึ้นได้กับ การจุดติดไฟของถ่านชาร์บนผิวของเชื้อเพลิง และการจุดติดไฟของสารระเหยบนชั้นขีดขอบรอบๆผิวของเชื้อเพลิง แบบใดจะเกิดก่อนขึ้นอยู่กับอัตราการพา และการแผ่รังสีความร้อนไปยังเชื้อเพลิงแข็ง ถ้าการแผ่รังสีความร้อนมีค่าสูง ผิวของเชื้อเพลิงก็จะร้อนขึ้นเร็ว แต่สารระเหยที่ปล่อยออกมาจะถูกพัดออกไปก่อนที่จะมีส่วนผสมที่เผาไหม้ได้เกิดขึ้น การติดไฟจึงเกิดขึ้นที่ผิวก่อน ถ้าอัตราการให้ความร้อนที่ผิวของเชื้อเพลิงต่ำ สารระเหยจะจุดติดไฟได้ก่อน เพราะสารระเหยมีอุณหภูมิจุดติดไฟต่ำกว่าชาร์ สารระเหยเหล่านี้เผาไหม้รวดเร็ว และให้พลังงานความร้อนออกมามากเมื่อเทียบกับคาร์บอนคงตัว หรือถ่านชาร์ที่เหลืออยู่หลัง

กระบวนการปล่อยสารระเหย โดยที่เวลาล่าช้าในการจุดติด (ignition time delay) จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค การแพร่ทางความร้อน อัตราการให้ความร้อน และอัตราการเกิดไพโรไลซิส เป็นต้น

2.4.3 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Burning of Carbon)

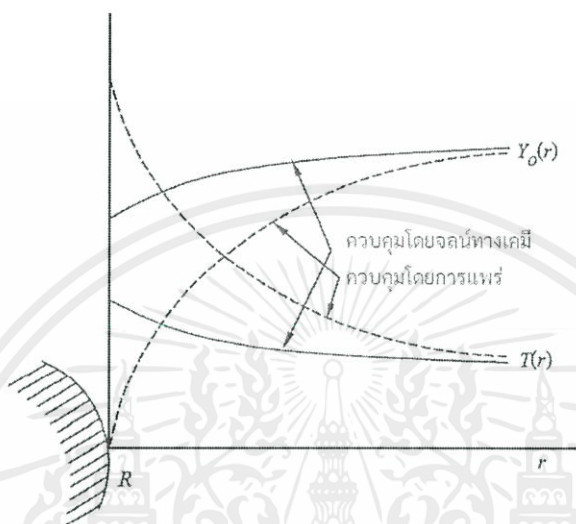
ขั้นตอนสุดท้ายของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง คือการเผาไหม้ถ่านชาร์ ลักษณะของถ่านชาร์จะมีความพรุน (porous) สูงมาก ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวภายในมากในระดับ 100 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับชาร์จากถ่านหิน และ 10,000 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับถ่านชาร์จากไม้ เมื่อไม่มีสารระเหยปล่อยออกมาแล้ว ออกซิเจนในอากาศก็สามารถแพร่เข้าไปด้านในของถ่านชาร์ได้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

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

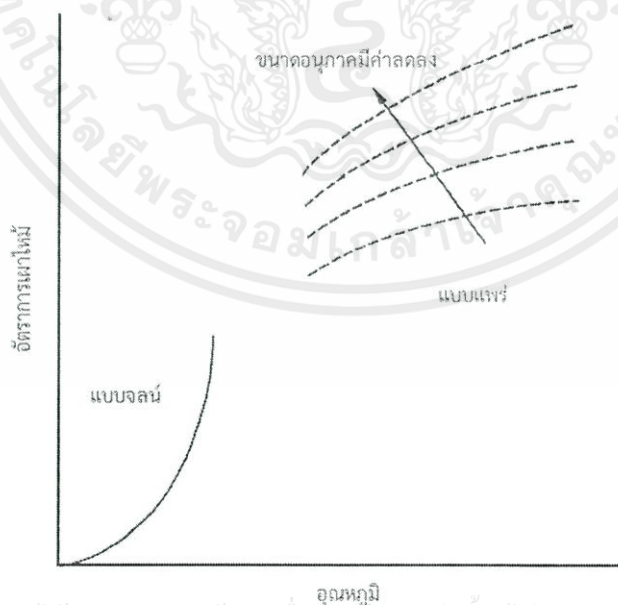
ขั้นตอนเหล่านี้เกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับ ขั้นตอนไหนเกิดขึ้นช้าที่สุดจะเป็นตัวกำหนดอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงนั้น ยกตัวอย่าง เช่น ถ้าวณูภาคมีขนาดเล็ก อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ และการไหลของของไหลรอบอนุภาคเป็นไปอย่างช้าๆ จะพบว่าขั้นตอน ค. (ปฏิกิริยาการเผาไหม้) จะเกิดขึ้นช้ากว่าขั้นตอน จ. (การแพร่ออกไปจากผิวเชื้อเพลิงของสารผลิตภัณฑ์) ดังนั้นอัตราการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยอัตราจลน์ทางเคมี (chemical kinetics หรือ kinetically control) เป็นหลัก ซึ่งอัตราการเผาไหม้ขึ้นกับอุณหภูมิ exponential โดยไม่ขึ้นกับขนาดอนุภาค และการไหลแต่อย่างใด นอกจากนี้จากการที่อัตราการแพร่สูงกว่าอัตราการเผาไหม้ ให้ความเข้มข้นของการเผาไหม้ที่ผิวเชื้อเพลิงไม่ได้แตกต่างจากบริเวณกระแสอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิวเชื้อเพลิงมากนัก รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบโปรไฟล์เศษส่วนมวลของออกซิเจน $i_O(r)$ และอุณหภูมิ $T(r)$ ตามรัศมีของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งธรรมดาที่มีลักษณะการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยจลน์ทางเคมี และถูกควบคุมโดยการแพร่ ในส่วนรูปที่ 2.19 แสดงอัตราการเผาไหม้ของอนุภาคดังกล่าว ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิของอนุภาค

ในทางตรงกันข้าม ถ้าวณูภาคมีขนาดใหญ่ มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง และการไหลโดยรอบอนุภาคเป็นไปอย่างรวดเร็ว จะได้ว่าขั้นตอน ค. (ปฏิกิริยาการเผาไหม้) จะเกิดเร็วกว่าขั้นตอน ก. และ จ. มาก (การแพร่เข้าหาผิวเชื้อเพลิงของออกซิเจน และการแพร่ออกไปจากผิวเชื้อเพลิงของสารผลิตภัณฑ์) ดังนั้น อัตราการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ผิวของเชื้อเพลิง (diffusionally control) เป็นหลัก ซึ่งอัตราการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคมากกว่าขึ้นกับอุณหภูมิ นอกจากนี้จากการที่อัตราการเผาไหม้สูงกว่าอัตราการแพร่จะส่งผลให้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ผิวเชื้อเพลิงมีค่าน้อยมากจนอาจตัดทิ้งได้ เพราะถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้ที่ผิวเชื้อเพลิงเกือบหมดนั่นเอง เมื่อพิจารณารูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 ตามลำดับ จะพบว่าลักษณะการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการแพร่

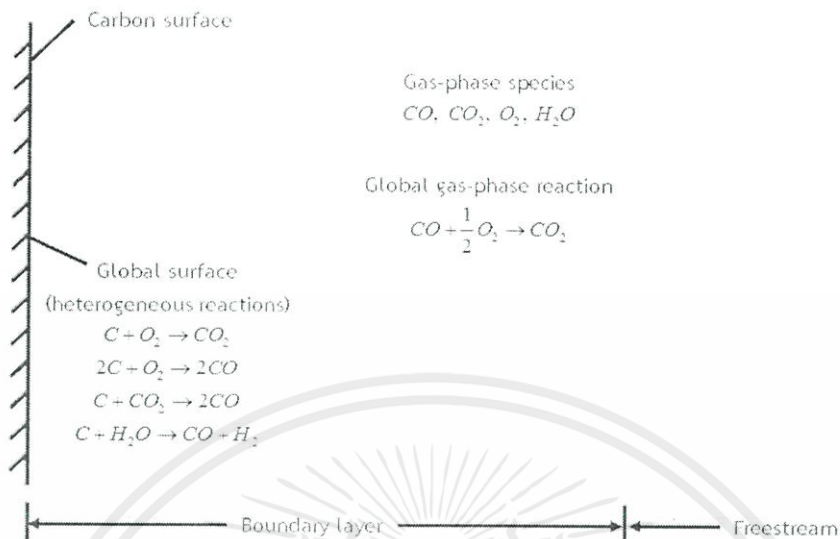
ของออกซิเจนเข้าสู่ผิวของเชื้อเพลิง (เส้นประ) อัตราการเผาไหม้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง และขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ทั้งนี้เพราะถ้าอุณหภูมิเชื้อเพลิงต่ำ การเผาไหม้จะเปลี่ยนไปเป็นลักษณะที่ถูกกำหนดด้วยจลน์ทางเคมี ทำให้อนุภาคสูญเสียความร้อนอย่างมาก และรวดเร็วจนเกิดปรากฏการณ์เป่าดับได้ในที่สุด



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบโปรไฟล์ $Y_0(r)$ และ $T(r)$ ตามแนวรัศมีของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งธรรมดา ระหว่างการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ และการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยจลน์ทางเคมี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบอัตราการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งธรรมดาที่มีลักษณะการเผาไหม้ที่ถูก
ควบคุมโดยการแพร่ และโดยจลน์ทางเคมี



รูปที่ 2.8 รูปแบบทั่วไปสำหรับกระบวนการเผาไหม้บริเวณผิวของอนุภาคคาร์บอน

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.8 ที่แสดงถึงการเผาไหม้บริเวณผิวของอนุภาคคาร์บอน จะพบว่าปฏิกิริยาบนผิวระหว่างคาร์บอนของถ่านชาร์กับออกซิเจนจะได้ CO ออกมาเป็นหลัก แล้วจะทำปฏิกิริยาภายนอกให้กลายเป็น CO_2 ในที่สุด สำหรับการเผาไหม้บริเวณพื้นผิวของถ่านชาร์ในบรรยากาศที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนเป็น pm_∞ ที่อัตรามวลคงที่โดยความเข้มข้นของออกซิเจนบริเวณผิวเป็น pm_s ดังนั้นอัตราการเผาไหม้ถ่านชาร์ ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวสัมผัสตามจลน์เคมีระดับที่หนึ่ง ซึ่งหาได้จาก

$$\frac{dm_c}{dt} = -i \left(\frac{M_c}{M_{O_2}} \right) A_p k_c pm_s \tag{2.18}$$

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

$$A_p k_c pm_s = A_p h_D \rho (m_\infty - m_s) \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารและข้อมูลเชิงวิชาการของเอกสารทุกครั้งที่มีวางจำหน่าย

จะได้

$$m_s = \left(\frac{h_D}{k_c + h_D} \right) m_\infty \quad (2.20)$$

$$\frac{dm_c}{dt} = -i \left(\frac{M_c}{M_{O_2}} \right) A_p K \rho m_\infty \quad (2.21)$$

เมื่อ

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_c} + \frac{1}{h_D} \quad (2.22)$$

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

h_D ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลแบบการพา ซึ่งสามารถหาได้จากการใช้สมการสหสัมพันธ์ที่
 เชื่อมโยง เช่น เลขเชอร์วูด ($Sh = h_D d / D$) โดยที่ d เป็นขนาดของอนุภาค และ D เป็น
 ความสามารถในการแพร่เชิงมวลของแก๊ส ซึ่งพบว่า

$$Sh = (2 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3}) \phi \quad (2.23)$$

โดยที่ $Sc \approx 0.73$ และ ϕ สำหรับถ่านชาร์มีค่าประมาณ 0.9

จากสมการที่ 2.31 ให้ CO เกิดขึ้นที่ผิว และใช้ความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศ
 รอบๆ อัตราการเผาไหม้ชาร์รวมสามารถหาได้จาก

$$\frac{dm_c}{dt} = - \left(\frac{3}{4} \right) \pi d^2 K \rho m_\infty \quad (2.24)$$

พิจารณา

- I. กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคคงที่ (ความหนาแน่นลดลง) เราสามารถอินทิเกรต
 สมการที่ 2.24 ได้เลย ซึ่งจะได้เวลาในการเผาไหม้หมดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ $t_c = \frac{\rho_a d_{pm}^2}{4.5 K \rho m_\infty}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 (2.25)
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

II. กรณีความหนาแน่นของอนุภาคคงที่ (เส้นผ่านศูนย์กลางลดลง)

$$d = \left(\frac{6m_c}{\rho_c \pi} \right)^{1/3} \quad (2.26)$$

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

$$t_c = \frac{\rho_c d_i^2}{6D\rho m_\infty} \quad (2.27)$$

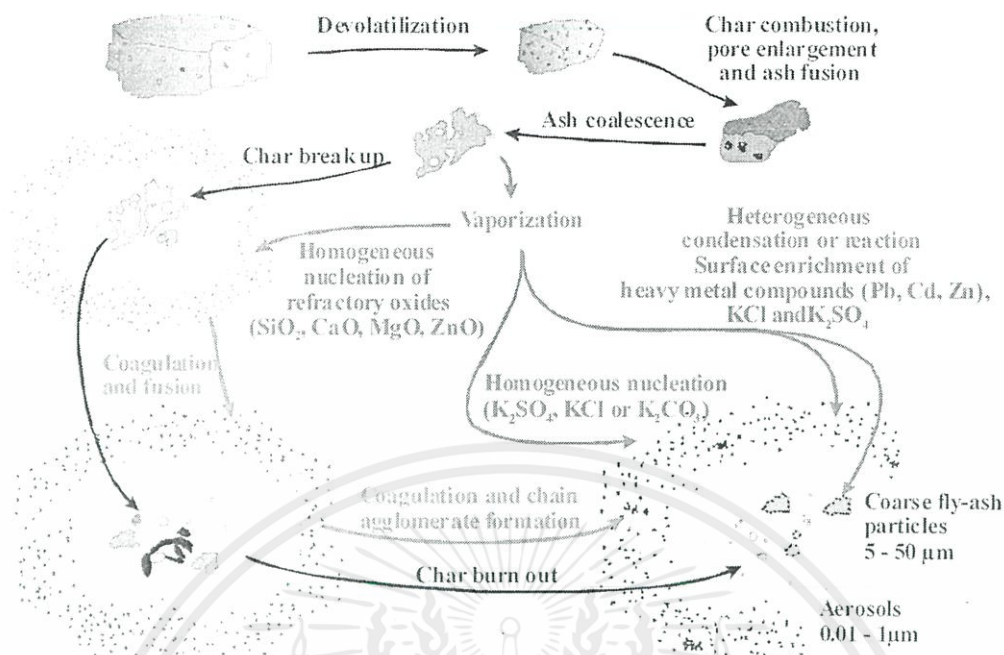
ภายใต้สภาวะเคมีจลน์เป็นกลไกจำกัดอัตรา ($h_D \gg k_c$) เช่น อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำ อนุภาคมีขนาดเล็ก จะได้เวลาในการเผาไหม้หมดเป็น

$$t_c = \frac{\rho_c d_i}{1.5k_c \rho m_\infty} \quad (2.28)$$

2.4.4 ลักษณะและพฤติกรรมของเศษเถ้า

เศษเถ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาเผา มันสามารถเกาะพื้นผิวบนพื้นผิวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ผนัง ท่อแก๊ส และยังสามารถเกาะที่กร่อนของผิวท่อได้ ซึ่งโดยรวมจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน และอายุการใช้งานของระบบ การเกาะตัวของเศษเถ้ามีอยู่สองลักษณะหลักๆ ได้แก่ แบบสแลกกิ้ง (slagging) และแบบฟาวลิ่ง (fouling) ซึ่งแบบสแลกกิ้งจะเกี่ยวข้องกับการเยิ้มติดของเศษเถ้า ในขณะที่ฟาวลิ่งจะเกี่ยวข้องกับการฝังตัวของเศษเถ้าที่ไม่หลอมตัวโดยการตกกระทบ หรือการแพร่ไปเกาะ ซึ่งความรุนแรงของปัญหาอยู่ที่ธรรมชาติของสารแร่ในเศษเถ้า อุณหภูมิ และความเร็ว ซึ่งกลไกในการเกิดเถ้าสำหรับเชื้อเพลิงแข็งแสดงดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กลไกในการเกิดเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวล

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

2.5 การปล่อยมลพิษและการควบคุม (Pollutants Emission and Control) [6]

2.5.1 บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าสารมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน เป็นสาเหตุหลักของการทำลายสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ยิ่งปริมาณการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นเท่าไรก็จะยิ่งทำลายมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นการเปลี่ยนรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนโดยการเผาไหม้เพื่อการดำรงอยู่ของมนุษย์จะไม่มี ความหมายเลยถ้ามนุษย์ไม่ตระหนักถึงผลกระทบจากมลพิษที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น แม้ว่าแก๊สส่วนใหญ่ที่เกิดจากการเผาไหม้คือคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) ซึ่งไม่ใช่เป็นพิษ ในปัจจุบันแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้กลายเป็นสาเหตุหลักของการเกิดสภาวะเรือนกระจก

ดังนั้นจึงเป็นประเด็นสำคัญที่จะต้องหาทางควบคุมการปล่อยปริมาณแก๊สดังกล่าว ซึ่งได้รับการขานรับจากหลายประเทศทั่วโลกจนนำไปสู่ข้อตกลงในพิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) เมื่อปี ค.ศ.1995 นอกจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว ยังมีแก๊สอื่นๆที่เกิดจากการเผาไหม้ และเป็นมลพิษอย่างมาก คือ ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) ฝุ่นเขม่า และออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) ประเด็นสำคัญคือแก๊สเหล่านี้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างไร มีกลไกการเกิดขึ้นได้อย่างไร จะลดปริมาณให้น้อยลงได้อย่างไร นับได้ว่าเป็นหัวข้อที่มีความสำคัญอย่างยิ่งเกี่ยวกับการเผาไหม้ ดังที่จะได้กล่าวโดยละเอียดต่อไป

2.5.2 ผลกระทบของมลพิษ

ตัวอย่างผลกระทบที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เช่น

2.5.2.1 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางลบของสภาพแวดล้อมทางอากาศ การเพิ่มขึ้นของปัญหาหมอกควัน บดบังปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ส่องมายังพื้นดิน ทัศนวิสัยลดลง และมีผลต่อสภาพบรรยากาศโลกโดยรวม

2.5.2.2 ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการเจ็บป่วย และการเสียชีวิตของมนุษย์ที่ได้รับมลพิษทั้งทางตรงและทางอ้อม

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

2.5.2.4 การตกสัมผัสหรือฝังตัวของมลพิษบนพื้นผิวสิ่งปลูกสร้าง อนุสรณ์สถาน วัสดุต่างๆทำให้เสื่อมสภาพ และอาจสึกกร่อนได้ ดูไม่สวยงาม

2.5.3 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)

ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนนั้น ได้รับการพิจารณาว่าเป็นสาเหตุของการเกิดหมอกทางโฟโตเคมี หรือแก๊สโอโซนในระดับต่ำ (ground level ozone) ซึ่งเกิดจาก NO_x และ HC ที่มาจากไอเสียของรถยนต์เป็นส่วนใหญ่ มาทำปฏิกิริยากันในวันที่มีแสงแดดจ้า จนเกิดเป็นโอโซน O_3 ซึ่งมักก่อตัวในบริเวณที่มีอากาศนิ่งเหนือเมืองใหญ่ๆที่มีการจราจรหนาแน่น โดยหมอกทางโฟโตเคมีจะทำให้มีปัญหากับระบบทางเดินหายใจ และปลด

เอกสารนี้ หน้าที่ของเม็ดเลือดแดงในการนำออกซิเจนไปเลี้ยงสมอง เป็นต้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

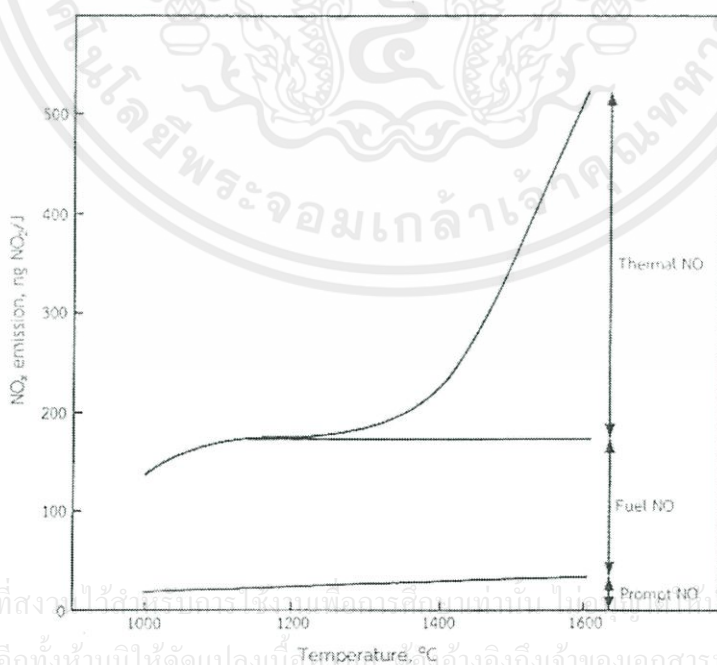
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO_x นอกจากนี้จะเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโอโซนในระดับต่ำที่เป็นพิษแล้ว ยังเป็นตัวทำลายโอโซนที่เป็นประโยชน์ซึ่งอยู่ในระดับชั้นบรรยากาศ stratosphere ของโลกอีกด้วย ดังสมการ



สังเกตเห็นได้ว่า NO เพียงโมเลกุลเดียวมีผลต่อการทำลาย O_3 อย่างต่อเนื่องโดยปฏิกิริยารีดอกซ์ เพราะ NO_2 ที่เกิดจากสมการ 2.39 จะถูกรีดิวซ์มาเป็น NO ตามสมการ 2.40 เพื่อย้อนกลับไปทำลาย O_3 ให้เป็น O_2 ต่อไปตามสมการ 2.39 ซึ่งเกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่เช่นนี้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม โอโซนในระดับสูงเป็นประโยชน์ต่อมนุษย์ในการลดความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) จากดวงอาทิตย์ที่ส่องสู่ผิวโลก ช่วยลดการเป็นโรคมะเร็งผิวหนังได้

ดังนั้นการหาวิธีลดปริมาณการปล่อย NO_x สู่บรรยากาศจึงได้กลายเป็นหัวข้อที่สำคัญที่สุดของการเผาไหม้ การที่จะกระทำเช่นนั้นได้ต้องอาศัยความเข้าใจอย่างถ่องแท้ถึงกลไกจลนทางเคมีของการเกิด NO_x พร้อมทั้งเข้าใจถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างจลนทางเคมีกับพลศาสตร์ของไหลด้วยเช่นกัน สิ่งเหล่านี้จะเป็นตัวนำไปสู่การค้นพบวิธีการใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณการปล่อย NO_x จากการเผาไหม้ได้ ซึ่ง NO_x ที่พบในแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้แบบออกเป็น 4 ประเภทหลักๆคือ thermal NO_x , prompt NO_x , fuel nitrogen oxides และ N_2O



รูปที่ 2.10 ความเข้มข้นที่สมดุลของ NO_2 ที่มีส่วนประกอบของออกซิเจนในแก๊สที่แตกต่างกัน

รูปที่ 2.10 แสดงค่าประมาณของการเกิด thermal NO_x, prompt NO_x และ fuel NO_x ที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ถ่านหินซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ จะพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1300 °C กลไกการเกิด thermal NO_x จะน้อยมากเมื่อเทียบกับอีกสองชนิด ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น thermal NO_x ก็จะเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากกลไกการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนทั้งสามชนิดมีจลนเคมีที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีอัตราการเกิดที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะได้แยกพิจารณาการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนทั้งสามชนิดดังกล่าว

2.5.3.1 Thermal NO_x

Thermal NO_x หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Zeldovich NO_x มีสมการพื้นฐานดังนี้



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

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

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

สาเหตุที่ได้ชื่อว่า thermal NO_x เพราะว่า NO ที่เกิดจากสมการที่ 2.41 นั้นต้องใช้พลังงานกระตุ้นที่สูงมากเมื่อเทียบกับสมการที่ 2.40 ทั้งนี้เพราะต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของ N₂ ซึ่งเป็นแบบไตรพันธะ (triple bond) ขณะเดียวกันสมการที่ 2.41 จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้ต่อเมื่ออุณหภูมิสูงเท่านั้น ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นตัวควบคุมการเกิด NO ตามสมการที่ 2.41 ผ่านค่าคงตัวของการเกิดปฏิกิริยา k_1 ซึ่งแปรผกผันกับ $1/T$ ในการทำนายปริมาณการเกิด NO_x ในปฏิกิริยาการเผาไหม้ ไม่ควรใช้วิธีการทำสมดุลเคมีเหมือนการหาปริมาณ H₂O หรือ CO₂ เพราะจะเกิดความผิดพลาดอย่างมาก เนื่องจากสมดุลเคมีจะเกิดขึ้นได้นั้นต้องใช้เวลาที่ค่อนข้างนาน และนานกว่าเวลาที่

อยู่ในเปลวไฟอุณหภูมิสูงเสียอีก จากสมการเคมีกลไกของ Zeldovich สามารถหาอัตราการเกิด NO_x ได้คือ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] \quad (2.34)$$

เนื่องจากว่าอัตราการเกิดอะตอมของไนโตรเจนขณะเกิดปฏิกิริยา ในสภาวะเสถียรคือ

$$\frac{d[N]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] \approx 0 \quad (2.35)$$

ดังนั้นได้อัตราการเกิด NO คือ

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[O][N_2] \quad (2.36)$$

จะเห็นได้ว่าการที่จะลดปริมาณ thermal NO_x ได้นั้นมีเพียงสองวิธีคือ ลด [N₂] และ [O] หรือลด k₁ ซึ่งมีความหมายคือต้องลดอุณหภูมิในการเผาไหม้นั่นเอง

2.5.3.2 Prompt NO_x (Fermore NO_x)

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

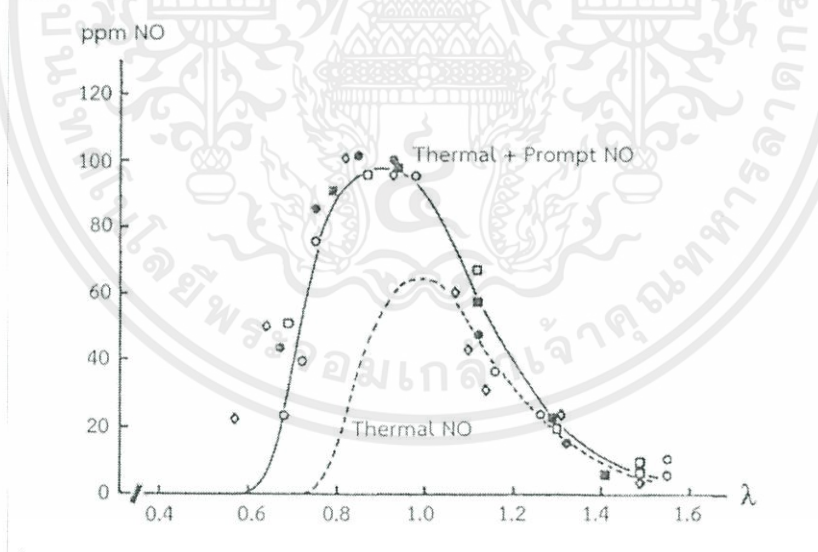


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ออกให้ฟรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





prompt NO_x มักเกิดในสภาวะการเผาไหม้แบบผสมเท่านั้น ทั้งนี้เพราะอนุมูลอิสระ CH จะเกิดจากอะซีทีลีน (C_2H_2) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารที่เกิดก่อนหน้า ดังนั้น prompt NO_x จะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า thermal NO_x เพราะปฏิกิริยาต้องใช้พลังงานกระตุ้นที่น้อยกว่า ที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ประมาณ 1000 K เท่านั้น รูปที่ 2.23 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



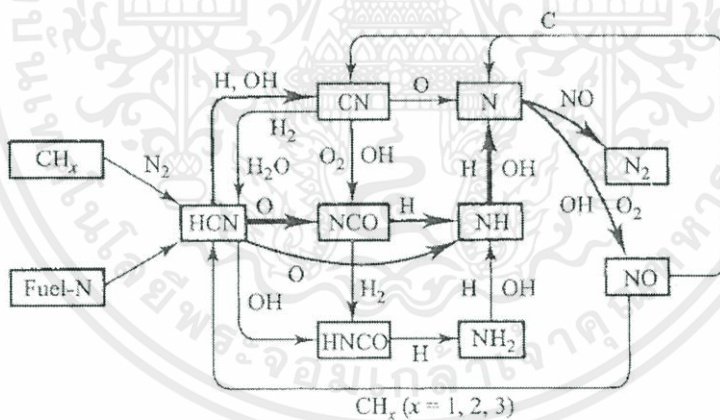
รูปที่ 2.11 ผลการคำนวณ และผลการทดลองหาค่า thermal NO และ prompt NO ของเปลวไฟมีเทนกับอากาศในเตาเผาไหม้แบบกวน, λ หมายถึงอัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3.3 Fuel NO_x

สำหรับเชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบได้แก่ เชื้อเพลิงชีวมวล และถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งถ่านหินอาจมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบได้ถึงร้อยละ 2 ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปเป็น HCN ในเปลวไฟซึ่งจะเปลี่ยนต่อไปเป็น NH หรือ NH₂ จากนั้นทั้งคู่ก็จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และทำให้เกิด NO+H₂O หรืออาจทำปฏิกิริยากับ NO แล้วเปลี่ยนเป็น N₂ และ H₂O ดังนั้นสัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่หลุดออกมาจากเปลวไฟกลายเป็น NO นั้นจะเป็นอิสระต่ออัตราส่วนระหว่าง NO/O₂ ในเปลวไฟ นั่นคือหากรักษาให้สัดส่วนของออกซิเจนในแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงในเปลวไฟให้ต่ำไว้ ก็จะทำให้ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเปลี่ยนไปเป็น NO น้อยลงตามไปด้วย

สัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนเป็น NO_x ในแก๊สไอเสียนั้นประมาณได้ว่า มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 20 ถึง 50 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะของเตาเผา และอาจขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของไนโตรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงอีกด้วย จะเห็นได้ว่าแม้จะทำการวิเคราะห์และศึกษากลไกการเกิด NO แต่ละประเภทแยกออกจากกันทั้ง thermal NO_x, prompt NO_x และ Fuel NO_x ต่างก็เกิดขึ้นพร้อมๆกัน และมีกลไกการเกิดร่วมกัน



รูปที่ 2.12 การเกิด NO ที่ขับเคลื่อนด้วยกลไกของ Zeldovich

2.5.3.4 NO_x ที่เกิดจาก N₂O

thermal NO_x เกิดขึ้นได้ดีภายใต้สภาวะการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (>1700 K) ในขณะที่ prompt NO_x เกิดขึ้นได้ดีภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบผสมหนา แต่สำหรับไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดผ่าน N₂O จะเกิดได้ดีที่สภาวะการเผาไหม้แบบผสมบาง และอุณหภูมิต่ำ เช่นในการเผา

ไหม้ของเครื่องยนต์กักกันแก๊สที่มีอุณหภูมิไม่สูงมากพอที่จะส่งผลให้เกิด thermal NO_x ขณะเดียวกัน การเผาไหม้ที่สภาวะส่วนผสมบางยังป้องกันไม่ให้เกิดอนุมูลอิสระของ CH ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการป้องกันการเกิด prompt NO_x โดยอัตโนมัติ ดังนั้นไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดผ่าน N_2O นี้จะมีความคล้ายคลึงกับการเกิด thermal NO_x ในแง่ที่ว่าอะตอมของออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโมเลกุลของไนโตรเจน แต่ต้องอาศัยโมเลกุลที่สาม (M) เป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิด N_2O [Wolfrum, 1972] จากนั้น N_2O จะทำปฏิกิริยากับอะตอมของออกซิเจนต่อไปจนเกิดเป็น NO [Malte et al., 1974] ตามสมการดังนี้



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

2.5.4 คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide)

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้มีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่นสภาวะการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป การผสมคลุกเคล้ากันไม่ดีพอ ปริมาณอากาศไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงจนทำให้เกิดการแตกสลายของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มาเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ได้ดังสมการ



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



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

2.5.5 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x)

เป็นที่ทราบกันดีว่าออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) นอกจากจะมีผลต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังสามารถทำลายอุปกรณ์การเผาไหม้ และอุปกรณ์อื่นๆ ให้ผุกร่อนเสียหายได้ ออกไซด์ของซัลเฟอร์มีที่มาจากซัลเฟอร์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างการเผาไหม้ โดยจะได้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) เป็นสารประกอบหลัก มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) อยู่เล็กน้อย และอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) คาร์บอนิลซัลไฟด์ (COS) ซึ่งเรียกรวมกันว่า SO_x ซึ่งเชื้อเพลิงเกือบทั้งหมดที่ใช้โดยมนุษย์ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ ไม้ และสารอินทรีย์อื่นๆ เป็นต้น ล้วนมีซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบ เชื้อเพลิงไม้อาจมีอยู่ในปริมาณน้อยเพียงร้อยละ 0.1 ในขณะที่ถ่านหินเกือบทุกชนิดอาจมีอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 0.5 ถึง ร้อยละ 3 ในขณะที่น้ำมันโดยทั่วไปจะมีซัลเฟอร์มากกว่า ไม้แต่จะน้อยกว่าที่มีในถ่านหิน ถ้าทำการเผาไหม้ ซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในไม้เกือบทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ดังสมการต่อไปนี้



ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วกลายเป็นกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดฝนกรด

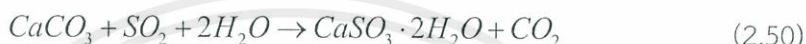


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาสาระของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้



ซึ่งน้ำที่ทำปฏิกิริยากับ SO_3 คือน้ำที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ และมีอยู่แล้วในแก๊สไอเสีย พร้อมกับ SO_3 นั่นเอง SO_2 ที่เกิดจากการเผาไหม้จะมีปริมาณมากกว่าแก๊ส SO_3 ดังนั้น SO_2 จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็น SO_3 โดยอนุมูลของ OH ก่อนทำปฏิกิริยากับ H_2O เป็นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ต่อไป ซึ่งวิธีการทั่วไปที่ใช้กำจัด SO_x จากแก๊สไอเสียคือใช้หินปูน (limestone, CaCO_3) หรือใช้ปูนขาว (lime, CaO) ผสมน้ำจนเป็นโคลนเหลวแล้วพ่นเข้าไปในท่อที่แก๊สไอเสียไหลผ่าน ซึ่ง SO_x จะถูกกำจัดดังสมการต่อไปนี้

กรณีใช้โคลนเหลวของหินปูน (aqueous slurry of limestone)



กรณีใช้โคลนเหลวของหินขาว (aqueous slurry of lime)



นอกจากการใช้หินปูนหรือปูนขาวผสมน้ำ (แบบเปียก) กำจัด SO_2 ได้แล้ว ยังสามารถกำจัด SO_2 ด้วยหินปูนหรือปูนขาวในรูปแบบผง (แบบแห้ง) ได้อีกด้วย ซึ่งกรณีแบบเปียกต้องรอให้ calcium sulfite dihydrate ($\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ตกตะกอนในถังพักเสียก่อนแล้วค่อยแยกน้ำออกเพื่อขนย้ายออกไปกำจัดโดยการฝังต่อไป ส่วนในกรณีแบบแห้งนั้นใช้เครื่องแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อแยกผง CaSO_3 ออกไปเสียก่อนแล้วจึงนำไปกำจัดต่อไป

2.5.6 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 ถุงกรอง (bag filter), เครื่องแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) และไซโคลน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสาร เเขม่า (soot) คืออนุภาคคาร์บอนที่มีส่วนของไฮโดรเจนรวมอยู่อย่างน้อย 1% โดยมีมวลคิดเป็นสูตรทางเคมีอย่างง่ายคือ C_8H เเขม่าจึงไม่ใช่คาร์บอนบริสุทธิ์ มักเกิดในบริเวณที่มีเชื้อเพลิงอยู่อย่างเข้มข้น (fuel-rich regions) เสมอ ซึ่งเป็นธรรมชาติของกลไกการเผาไหม้ที่ส่วนผสมของเชื้อเพลิง

และออกซิไดซ์จะไม่สม่ำเสมอเท่ากันหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกลไกการผสมหรือความปั่นป่วน สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพ เขม่าเกิดขึ้นได้ง่ายในเปลวไฟชนิดแพร่มากกว่าในเปลวไฟชนิดผสมก่อนขั้นตอนการเกิดเขม่า (soot formation) แบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

1. การเกิดขึ้นเป็นอนุภาค (particle inception) ระหว่างปฏิกิริยาการเผาไหม้ ชั้นเริ่มต้นของการเกิดเขม่าต้องมีโมเลกุลสารอนุมูลเป็นสารตั้งต้น ก่อตัวเป็นนิวเคลียส (nucleation) หรือเป็นอนุภาคที่เล็กมากระดับโมเลกุล นิวเคลียสดังกล่าวมักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน เช่น polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) ซึ่งถือเป็นสารชั้นกลาง (intermediates) ทำหน้าที่เป็นสารเกิดก่อนเขม่า จากนั้นอะเซทิลีน (C_2H_2) จะเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบห่วง แล้วรวมตัวกันเป็นก้อนโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น จนนำไปสู่การเติบโตเป็นอนุภาคเขม่าในขั้นตอนต่อไป
2. การเติบโตของผิวรอบนอก (surface growth) แต่ละจะเกิดการขยายใหญ่ขึ้นด้วยการเกาะตัวของสารชั้นกลางต่างๆบนผิว ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นอะเซทิลีน (C_2H_2) ที่มีมากถึง 85% ของมวลรวม
3. การเกาะรวมตัวกัน (coagulation) อนุภาคเขม่าแต่ละก้อน เคลื่อนที่ชนกัน และเกาะรวมกันเป็นกลุ่ม เกิดเป็นอนุภาคจุดสารรูปร่างลักษณะคล้ายห้วงโซ่
4. การออกซิไดซ์เขม่า (soot oxidation) ภายหลังจากที่เขม่าเกิดขึ้นแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งมักเกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของ reaction zone ที่อยู่ตรงปลายของเปลวไฟ (flame tip) เขม่าจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นกระแสผ่านเข้าไปในบริเวณการเผาไหม้ที่ปลายของเปลวไฟนั้น ถ้าเขม่าถูกเผาไหม้จนหมด จะเรียกเปลวไฟนั้นว่าเปลวไฟไร้เขม่า ในขณะที่ถ้าเขม่าเผาไหม้ไม่หมดจะเกิดเปลวไฟมีเขม่า

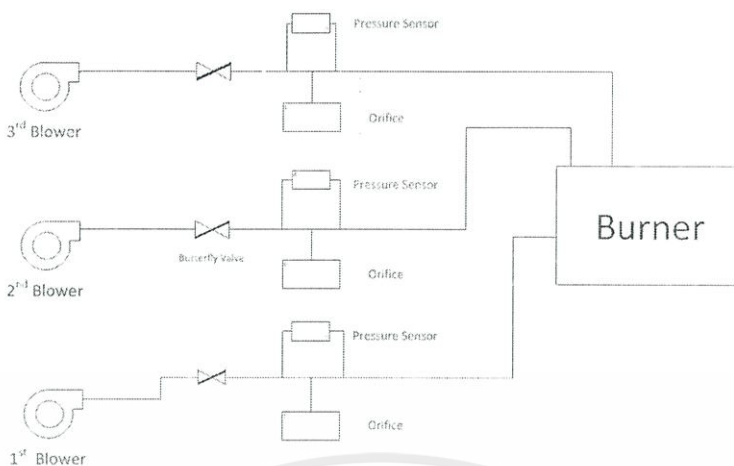
2.6 ระบบป้อนอากาศ

เส้นทางอากาศที่ 1 : เป็นเส้นทางอากาศหลัก(Primary Air) ใช้สำหรับการลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลลงเข้าสู่เตาเผา (Burner)

เส้นทางอากาศที่ 2 : เส้นทางจ่ายอากาศสำหรับการอุ่นห้องเผาไหม้ด้วยแก๊ส LPG และทำให้เกิดการหมุนควงของอากาศภายในหัวเผาชีวมวล (Secondary Air)

เส้นทางอากาศที่ 3 : เส้นทางอากาศสำหรับการหล่อเย็นหัวเผาชีวมวล (Tertiary Air)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แผนผังระบบป้อนอากาศ

2.6.1 ทฤษฎีการวัดด้วยแผ่นออริฟิส [7]

ของไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงความดันเมื่อมีการไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดที่แตกต่างกัน แผ่นออริฟิสจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดความดัน แล้วนำค่าความแตกต่างความดันนี้มาใช้คำนวณอัตราการไหลโดยใช้สมการของแบร์นูลลี ดังนี้

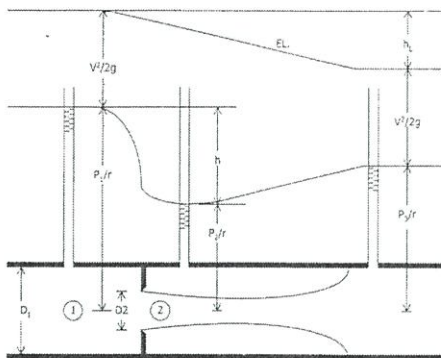
$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \tag{2.52}$$

$$Q_1 = Q_2 = A_1 V_1 = A_2 V_2 \tag{2.53}$$

$$Q_2 = \frac{CA_2}{\sqrt{1-\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^4}} \sqrt{2g \left(\left(\frac{P_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + z_2 \right) \right)} \tag{2.54}$$

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| เมื่อ Q = อัตราการไหล | D = ขนาดท่อ |
| A = ขนาดพื้นที่หน้าตัด | g = แรงโน้มถ่วง |
| V = ความเร็วของไหลในท่อ | P = ความดันที่จุดต่าง |
| C = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล | Z = ระดับจากจุดอ้างอิง |
| γ = น้ำหนักจำเพาะ | ρ = ความหนาแน่นของอากาศ |
| v = ความเร็วของอากาศ | μ = ความหนืดสัมบูรณ์ |

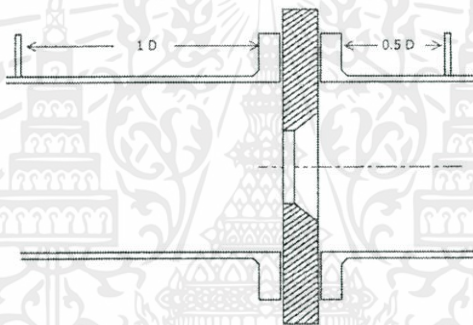
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงการไหลผ่านแผ่นออริฟิส

2.6.2 ตำแหน่งสำหรับวัดความดันแตกต่าง

ระยะห่างของอุปกรณ์วัดแรงดัน(Pressure Transmitters) คือระยะ D ทางด้านหน้า และ $0.5D$ ทางด้านหลังของแผ่นออริฟิส

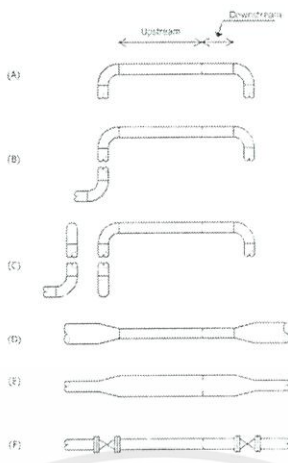


รูปที่ 2.15 แสดงตำแหน่งการวัดความดันแตกต่าง [7]

2.6.3 การติดตั้งแผ่นออริฟิส

แผ่นออริฟิสจะถูกติดตั้งในตำแหน่งที่รูปแบบการไหลที่คงที่เพื่อความแม่นยำในการวัด ซึ่งจะมีการเว้นระยะท่อด้านหน้า(Upstream) และด้านหลัง(Downstream) มาตรฐานดังรูปที่ 2.16 และตารางที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงรูปแบบท่อต่างๆ [7]

ตารางที่ 2.7 ระยะห่าง Upstream และ Downstream

Beta ratio	Upstream (Inlet) side of the primary devices							Downstream (Outlet) side of the primary devices
	Single bend or tee (A)	Two bends in the same plane (B)	Two bends in the different planes (C)	Reducer (D)	Expander (E)	Globe valve fully open (F)	Ball or Gate valve fully open (F)	
0.20	10	14	34	5	16	18	12	4
0.25	10	14	34	5	16	18	12	4
0.30	10	16	34	5	16	18	12	5
0.35	12	16	36	5	16	18	12	5
0.40	14	18	36	5	16	20	12	6
0.45	14	18	38	5	17	20	12	6
0.50	14	20	40	6	18	22	12	6
0.55	16	22	44	8	20	24	14	6
0.60	18	26	48	9	22	26	14	7
0.65	22	32	54	11	25	28	16	7
0.70	28	36	62	14	30	32	20	7
0.75	36	42	70	22	38	36	24	7
0.80	46	50	80	30	54	44	30	7

ระบบป้อนอากาศมีการขยายและหดท่อเป็นไปตามรูปแบบ E ในการคำนวณจะได้ระยะขั้นต่ำ Upstream อยู่ที่ประมาณ 3 เมตร และระยะ downstream อยู่ที่ระยะประมาณ 0.7 เมตรที่ขนาดท่อ 4 นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การคำนวณระบบของห้วเผาชีวมวลแบบฝุ่น

จากเป้าหมายที่ต้องการจะให้ระบบทำงานได้อย่างต่อเนื่องจึงจำเป็นต้องมีการคำนวณปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้แก่ อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้วเผาชีวมวล อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง เพื่อที่จะได้ปริมาณพลังงานที่สูง และมลพิษต่ำ เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดมีองค์ประกอบภายในที่ไม่เหมือนกัน โดยในการทดลองนี้ได้ใช้ชี้เลื่อยจากไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิง

3.1 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

ขั้นตอนการคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนวิธีการคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ผลของการคำนวณองค์ประกอบเชื้อเพลิง [8]

Ultimate Analysis of fuel		
Composition	%m/m(dry)	kmole/kmole reactive species and water content
Carbon	51.190	0.280
Hydrogen	7.170	0.467
Nitrogen	0.190	0.001
oxygen	38.310	0.157
sulfur	0.000	0.000
ash	3.140	-
Moisture	7.98%	
Hydrogen in H ₂ O		0.063
Oxygen in H ₂ O		0.032
Total		1.000
AF Ratio		6.14

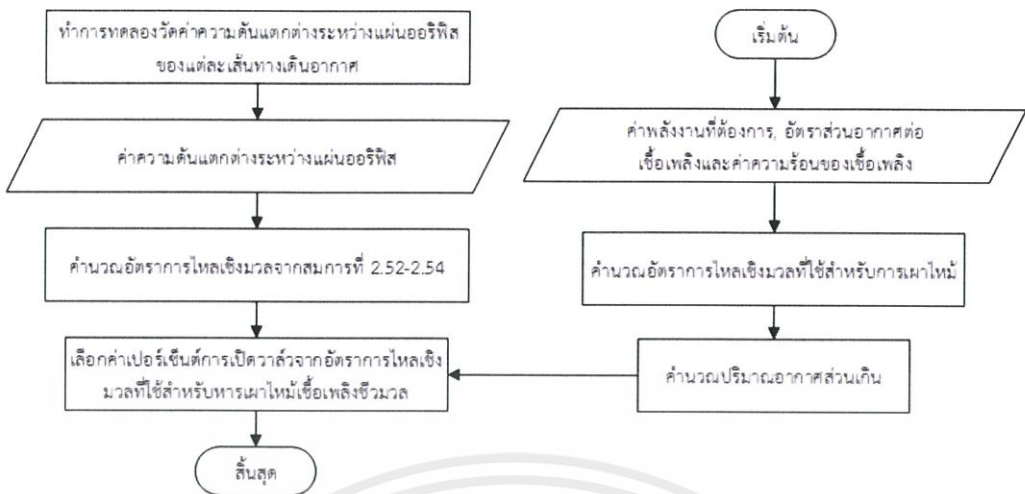
จากการคำนวณเราจะได้อัตราส่วนโดยมวล, อัตราส่วนโดยโมลและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของชีวมวลตามสมการเคมีดังตารางที่ 3

3.2 เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วอากาศเข้าหัวเผาชีวมวล

เพื่อที่จะกำหนดเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์ว จะต้องมีการทดลองเพื่อวัดค่าความดันแตกต่าง

ระหว่างแผ่นออริฟิสในท่ออากาศเข้าทั้งสามเส้นทาง จากนั้นผลที่ได้จะถูกนำมาคำนวณ และเลือกค่าที่เหมาะสม ขั้นตอนเป็นดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการกำหนดเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วอากาศเข้าหัวเผาชีวมวล

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราการใช้มวลของอากาศทั้งสามเส้นทางสำหรับการเผาไหม้

1. Overall requirements & features		Unit	
Fuel LHV	15.787	MJ/kg	
A/F ratio @stoi.	6.14	:1	
Defined excess air	15	%	
Air density@ 25 °C	1.176	kg/m ³	
2. Air splitting configuration (by mass)		Unit	
Primary air flow	10	%	
Secondary air flow	65	%	
Tertiary air flow	25	%	
3. Thermal Throughput (MW)	Primary air flow (kg/s)	Secondary air flow (kg/s)	Tertiary air flow (kg/s)

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้งสามเส้นทางสำหรับการเผาไหม้ (ต่อ)

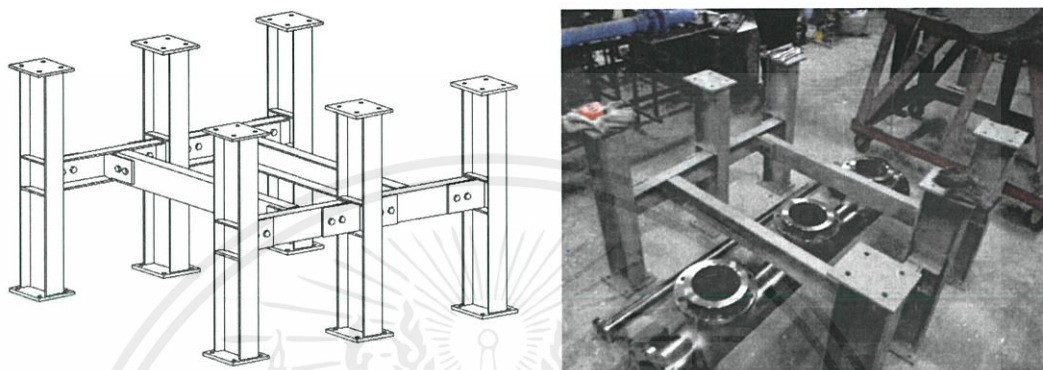
1.00	0.1000	0.6500	0.2500
0.75	0.0750	0.4875	0.1875
0.70	0.0700	0.4550	0.1750
0.60	0.0600	0.3900	0.1500
0.50	0.0500	0.3250	0.1250
0.40	0.0400	0.2600	0.1000
0.30	0.0300	0.1950	0.0750
0.20	0.0200	0.1300	0.0500
0.10	0.0100	0.0650	0.0250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การติดตั้งและวิธีการทดลอง

4.1 การประกอบขาเตา



รูปที่ 4.1 ขาตั้งเตาเผา

4.1.1 ขั้นตอนการทำ

1. ทำการวัดขนาด ตัดเหล็กขาเตา และเหล็กหน้าแปลนตามแบบ
2. เจาะรูยึดจุดต่างๆ
3. ทำการเชื่อมขาเตากับหน้าแปลน และข้อต่อเสา
4. ทำการประกอบแต่ละขาเข้าด้วยกัน

4.2 ขั้นตอนการติดตั้งเตาเผา

- 1 ติดประเก็นเข้ากับหน้าแปลนแต่ละท่อนของเตาเผา



รูปที่ 4.2 เตาเผาเมื่อติดประเก็น

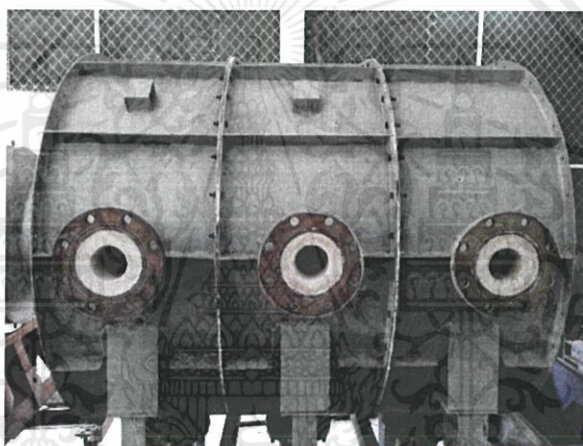
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ยกเตาเผาขึ้นบนขาตั้งด้วยรอกโซ่



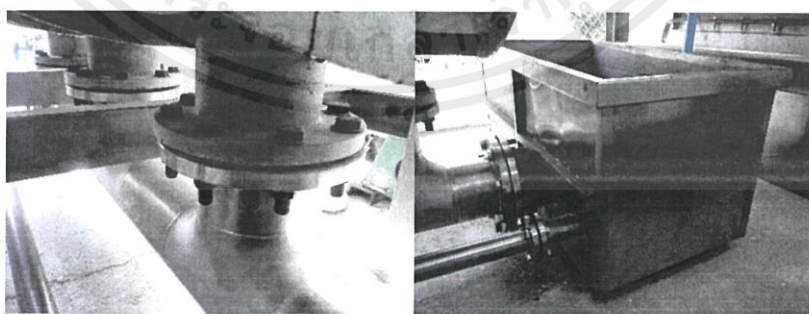
รูปที่ 4.3 เตาเผาระหว่างทำการประกอบ

3. ทำการยึดน็อตขาเตา ตัวเตา และหน้าแปลนแต่ละเตาเข้าด้วยกัน



รูปที่ 4.4 เตาเผาหลังการประกอบ

4. ติดตั้งสกรูระบายไถ่หนัก และถังพักเข้ากับตัวเตา



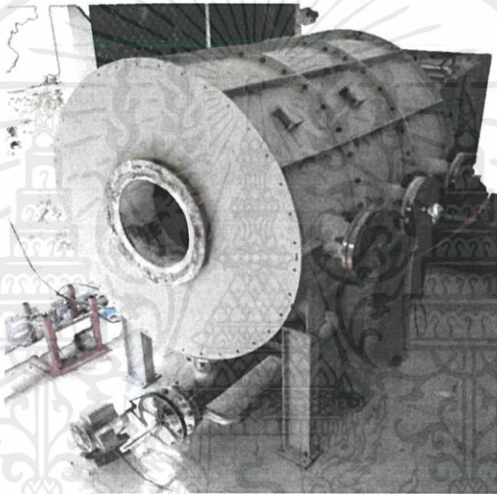
รูปที่ 4.5 สกรูพีดและถังพักซีไถ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ติดตั้งมอเตอร์เข้ากับสกรูพืดเพื่อลำเลียงขี้เถ้า



รูปที่ 4.6 มอเตอร์หลังการติดตั้งเข้ากับสกรูระบายเถ้าหนัก



รูปที่ 4.7 เตาเผาหลังการประกอบ

4.3 การติดตั้งระบบป้อนอากาศและวิธีการทดลอง

ระบบป้อนอากาศทำขึ้นเพื่อป้อนอากาศเข้าสู่หัวเผาเพื่อให้เกิดการเผาไหม้โดย ทางเข้าของอากาศสู่หัวเผาแบ่งเป็น 3 ทางเข้า คือ

1. ทางเข้าที่ 1 (Primary air) ใช้สำหรับการจุดติดหัวเผา และออกแบบไว้เพื่อส่งเชื้อเพลิงชนิดฝุ่นเข้าสู่หัวเผา
2. ทางเข้าที่ 2 (Secondary air) เป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้โดยตรง ซึ่งก่อนเข้าหัวเผาอากาศส่วนนี้จะผ่าน Swirl unit ทำให้เกิดการหมุนควงของอากาศภายในเตา
3. ทางเข้าที่ 3 (Tertiary air) ใช้สำหรับการหล่อเย็นเตา และเป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เหลือจากPre-chamber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอากาศ

1. Blower สำหรับป้อนอากาศส่วนที่ 1
2. Blower สำหรับป้อนอากาศส่วนที่ 2
3. Blower สำหรับป้อนอากาศส่วนที่ 3
4. วาล์วลิ้นปีกผีเสื้อ
5. แผ่นออริฟิสอัตราส่วน $\beta=0.67$
6. Pressure Differential Transducer

4.3.2 ขั้นตอนการติดตั้งระบบป้อนอากาศ

1. เตรียมท่อตามขนาด และความยาวที่ได้กำหนดไว้



รูปที่ 4.8 การเตรียมท่อตามขนาด

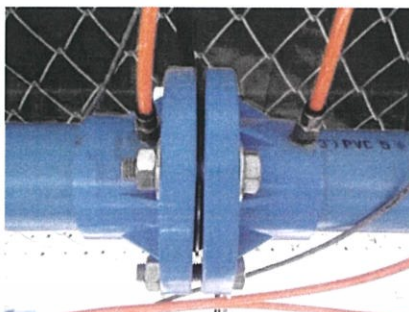
2. ประกอบวาล์วลิ้นปีกผีเสื้อเข้ากับท่อโดยที่มีประก็นยางกันลมรั่วประกบทั้งสองข้าง



รูปที่ 4.9 วาล์วลิ้นปีกผีเสื้อหลังการติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ประกอบแผ่น Orifice เข้ากับท่อตามระยะ Pressure Tapping ที่ได้คำนวณไว้



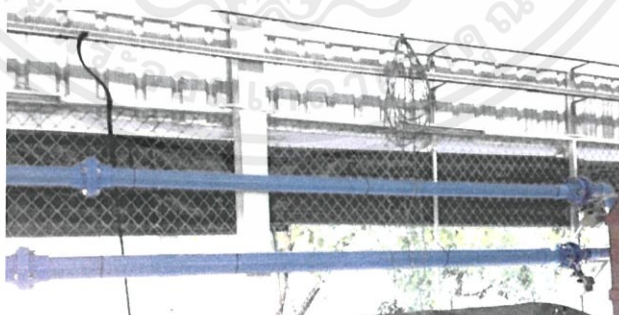
รูปที่ 4.10 แผ่นออริฟิสหลังการติดตั้ง

4. สร้างจุดรองรับท่อโดยการเชื่อมแท่งเหล็กติดกับเสาอาคาร



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งรองรับท่ออากาศ

5. นำท่อที่ประกอบวาล์วปีกผีเสื้อ และแผ่น Orifice ขึ้นวางบนจุดรองรับ



รูปที่ 4.12 ระบบอากาศโดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ต่อท่อ Flexible จาก Blower 1 และ Blower 2 เข้ากับท่อที่ได้เตรียมไว้



รูปที่ 4.13 เส้นทางท่อ flexible จาก blower

7. ต่อท่อ Flexible จากด้านปลายทั้ง 2 เข้าสู่ช่องลม Secondary และ Tertiary ของเตาเผา(Burner)



รูปที่ 4.14 เส้นทางท่อ flexible เข้าสู่หัวเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การทดลองปรับค่าอัตราการไหลของอากาศ

ทำการทดลองเก็บค่าความดันแตกต่างระหว่างแผ่นออริฟิส ทำการคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลเพื่อนำไปใช้สำหรับการทดลองการเผาไหม้(การทดลองที่ 3.3)

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทดลองอัตราการไหลอากาศ

ID Fan (Hz)	Primary Air: Valve 1 (%)
10	0-100
30	0-100
50	0-100
ID Fan (Hz)	Secondary Air: Valve 2 (%)
10	0-100
30	0-100
50	0-100
ID Fan (Hz)	Tertiary Air: Valve 3 (%)
10	0-100
30	0-100
50	0-100

4.3.4 ขั้นตอนการทดลองและบันทึกค่า

1. เปิดวาล์วของเส้นทางอากาศที่หนึ่ง (Primary Air) บันทึกค่าความดันแตกต่างระหว่างแผ่นออริฟิส
2. เปิดวาล์วของเส้นทางอากาศที่สอง (Secondary Air) บันทึกค่าความดันแตกต่างระหว่างแผ่นออริฟิส
3. เปิดวาล์วของเส้นทางอากาศที่สาม (Tertiary Air) บันทึกค่าความดันแตกต่างระหว่างแผ่นออริฟิส
4. คำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศโดยใช้ขั้นตอนจากรูปที่ 3.2
5. ทำการทดสอบผลกระทบจากพัดลมดูด (induced-draft fans) โดยใช้ความถี่ที่ 10Hz, 30Hz และ 50Hz
6. สรุปลผลเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วที่ค่าพลังงาน 300 kW, 400 kW และ 500 kW ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซนต์การเปิดวาล์วเส้นทางอากาศที่สภาวะ 300 kW, 400 kW และ 500 kW

Operating Table			
	300 kW	400 kW	500 kW
Biomass Fuel, Hz (kg/s)	1.45	1.95	2.40
Primary Air, %valve1(kg/s)	(0.0134)	(0.0178)	(0.0223)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ออก (0.0189) ทำาน (0.0251) คไ้ (0.0314) ะโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและด้ 31 อังอิงถึงเจ้า 36 เอกสารทุกค้ 43 ที่มีกรนำ ไปใช้

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วเส้นทางอากาศที่สภาวะ 300 kW, 400 kW และ 500 kW (ต่อ)

Secondary Air, %valve2(kg/s)	38 (0.0869)	46 (0.1159)	54 (0.1449)
Tertiary Air, %vlave3(kg/s)	30 (0.0334)	40 (0.0446)	50 (0.0557)
**Operate at 30Hz ID Fan			

4.4 การทดลองขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงที่เหมาะสม

นำเชื้อเพลิงที่มีขนาดของอนุภาคแตกต่างกันป้อนสู่หัวเผา และทดสอบความสามารถในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เพื่อหาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมสำหรับหัวเผา

4.4.1 เงื่อนไขการทดลอง

ใช้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ แก๊ส LPG และเชื้อเพลิงชีวมวลเท่ากันตลอดทดลอง

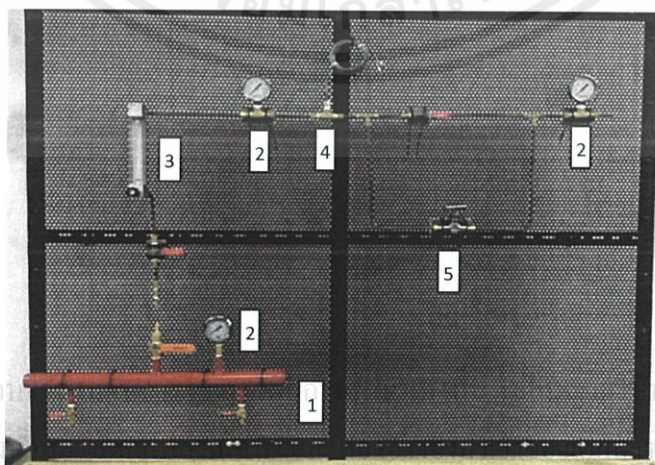
4.4.2 ขั้นตอนการทดลองและบันทึกค่า

1. เปิดวาล์วเส้นทางอากาศที่สอง
2. จุดไฟหัวเผาด้วยแก๊ส LPG
3. ป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่หัวเผา สังเกตเปลวไฟ
4. เปลี่ยนขนาดเชื้อเพลิง

4.5 การจุดหัวเผาและการอุ่นหัวเผาด้วยแก๊สLPG

4.5.1 อุปกรณ์ควบคุมแก๊สแอลพีจี

1. Header สามารถรับแรงดันได้สูงสุด 10 bars
2. Pressure gage ช่วงการทำงาน 0-4 bars
3. Rota meter ช่วงการทำงาน 1-10 L/min
4. Temperature sensor
5. Needle valve รุ่น SINV3-F-4N-SS



รูปที่ 4.15 แผนผังระบบแก๊ส

4.5.2 ขั้นตอนการจุดหัวเผา

1. เปิดอากาศส่วนที่ 2 โดยเปิดวาล์วที่ 30% อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 0.057
2. เปิดแก๊สโดยปรับอัตราการไหลที่ 1 L/min
3. ทำการกดตัวจุดเคี้ยวประกายไฟ



รูปที่ 4.16 อุปกรณ์สำหรับจุดหัวเผา

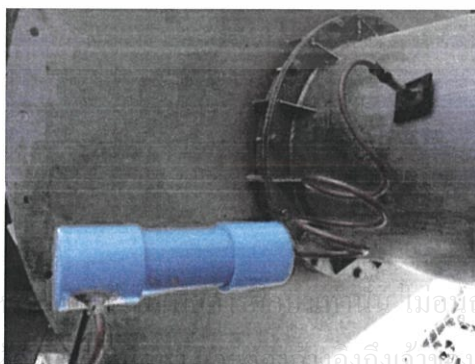
4.5.3 การอุ่นหัวเผา

ใช้ตาต่อลิคเกอร์รับสัญญาณข้อมูลจากหัว thermocouple และบันทึกข้อมูลความร้อนที่ได้ในเตาที่จุดต่างๆ โดยใช้เวลาอุ่นเตาประมาณ 10 นาที เพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในเตาประมาณ 400 องศาเซลเซียส

4.6 วิธีการวัดไอเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย

4.6.1 อุปกรณ์การวัดไอเสีย

1. ท่อลดอุณหภูมิไอเสีย
2. แวคคัมปั้ม (Vacuum Pump)
3. เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Flue Gas Analyzer) โดยใช้เครื่อง Testo 350 XL
4. ท่อลดอุณหภูมิไอเสีย



รูปที่ 4.17 ท่อลดอุณหภูมิไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่เอกสารดังกล่าวโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



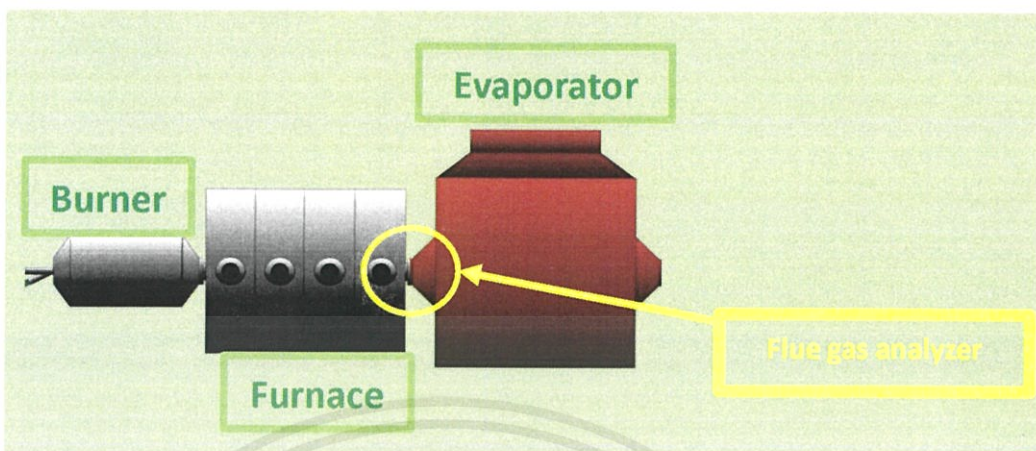
รูปที่ 4.18 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)



รูปที่ 4.19 เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย

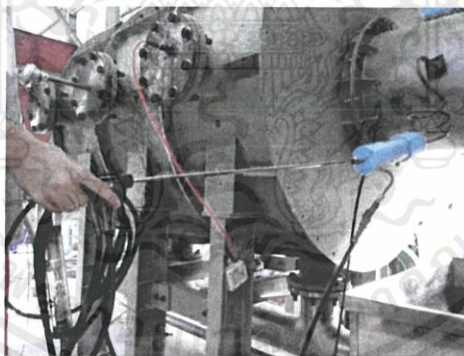
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 ขั้นตอนการวัดไอเสีย



รูปที่ 4.20 ตำแหน่งการวัดไอเสีย

1. ติดตั้งหัววัดกับตัวเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Flue Gas Analyzer) และทำการเปิดเครื่อง
2. เปิดปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)
3. ทำการหล่อเย็นบริเวณท่อขดลวดทองเหลือง
4. ทำการวัดโดยเสียบหัววัดเข้าไปในชุดลดอุณหภูมิไอเสีย
5. รวบรวมค่าการวัดไอเสียคงที่ และบันทึกผลจากเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย



รูปที่ 4.21 ตัวอย่างขั้นตอนวัดไอเสีย

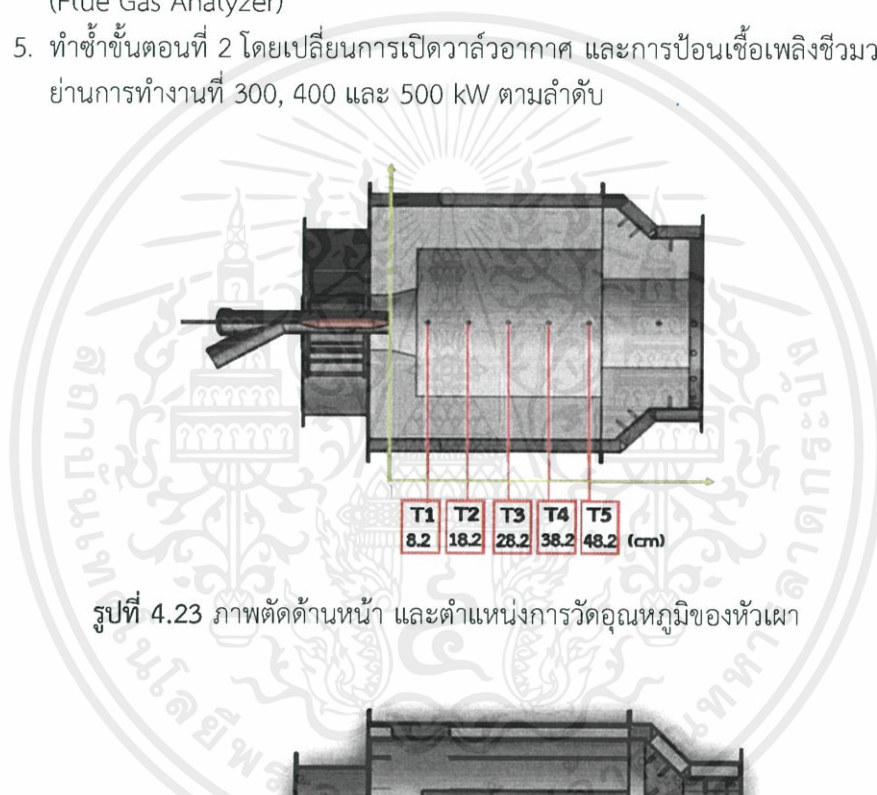


รูปที่ 4.22 ตัวอย่างองค์ประกอบภายในไอเสียหลังการเผาไหม้

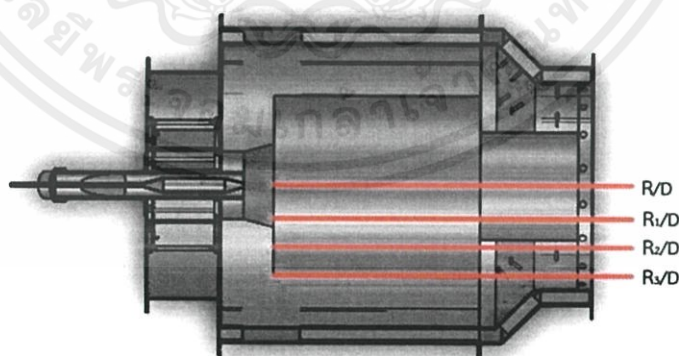
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ยาคำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 วิธีการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ 250, 300, 400 และ 500 kW

1. ทำการอุ่นหัวเผาชีวมวลด้วยการจุดแก๊ส LPG ให้อุณหภูมิภายในหัวเผาสูงพอที่จะให้เชื้อเพลิงชีวมวลเผาไหม้ได้ โดยทำการวัดอุณหภูมิที่ผนังห้องเผาไหม้ด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)
2. ทำการเปิดวาล์วอากาศหลัก และป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลลงเข้าห้องเผาไหม้ โดยควบคุมที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศในย่าน 250 kW
3. เมื่ออุณหภูมิในห้องเผาไหม้คงที่ ทำการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) หัวที่ T1, T2, T3, T4, T5 และที่ตำแหน่ง R/D ถึง R₃/D
4. ตรวจสอบความสมบูรณ์ของการเผาไหม้โดยการวัดไอเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Flue Gas Analyzer)
5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 โดยเปลี่ยนการเปิดวาล์วอากาศ และการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลลง เป็นย่านการทำงานที่ 300, 400 และ 500 kW ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 ภาพตัดด้านหน้า และตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของหัวเผา

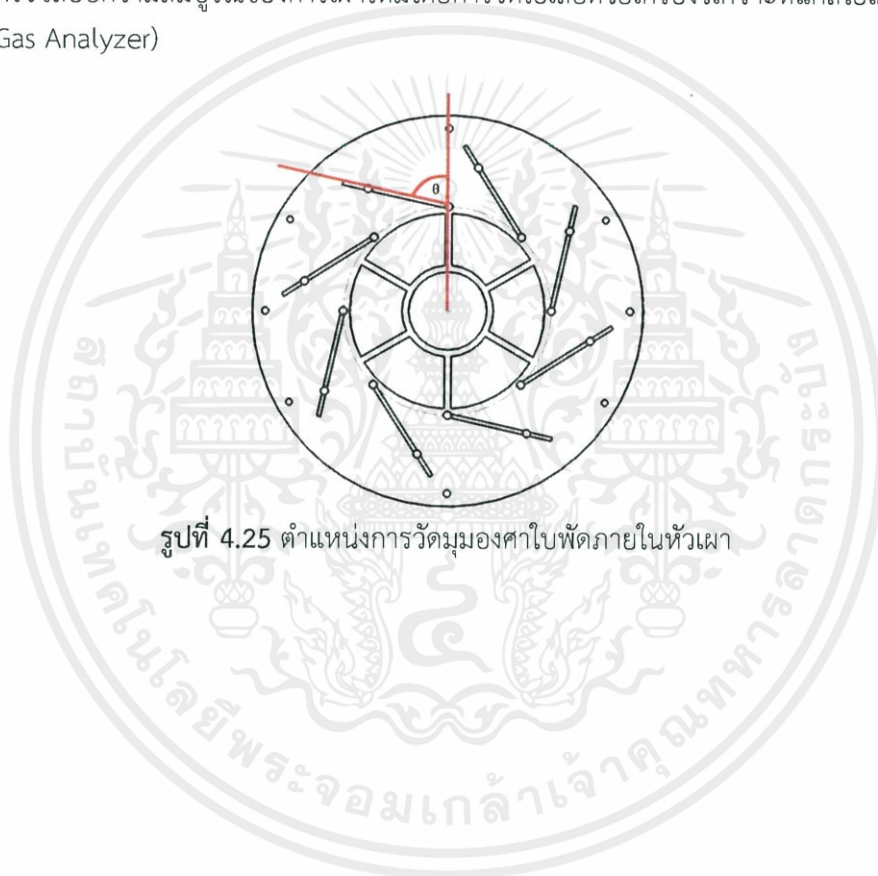


รูปที่ 4.24 ภาพตัดด้านบน และตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของหัวเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 วิธีการทดลององศาใบพัดของหัวเผาที่สภาวะ 300 kW

1. ทำการอุ่นหัวเผาชีวมวลด้วยการจุดแก๊ส LPG ให้อุณหภูมิภายในหัวเผาสูงพอที่จะให้เชื้อเพลิงชีวมวลเผาไหม้ได้ โดยทำการวัดอุณหภูมิที่ผนังห้องเผาไหม้ด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)
2. ทำการเปิดวาล์วอากาศหลักป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลลงเข้าห้องเผาไหม้ โดยควบคุมที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศในย่าน 300 kW เมื่ออุณหภูมิในห้องเผาไหม้คงที่ ทำการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล
3. เปลี่ยนมุมมององศาใบพัดสามครั้งได้แก่ 60, 85 และ 100 องศา แล้วทำการวัดอุณหภูมิ รูปที่ 4.25 แสดงถึงลักษณะการปรับมุมใบพัดภายในหัวเผา
4. ตรวจสอบความสมบูรณ์ของการเผาไหม้โดยการวัดไอเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Flue Gas Analyzer)



รูปที่ 4.25 ตำแหน่งการวัดมุมมององศาใบพัดภายในหัวเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองและการอภิปราย

5.1 ลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละขนาด

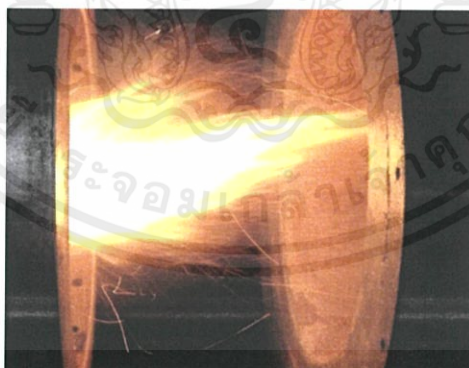
การทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อหาขนาดอนุภาคที่มีความเหมาะสมต่อการเผาไหม้ในหัวเผา

1. ลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแบบฝุ่นที่ขนาดอนุภาค 1.5 มม. การเผาไหม้เกิดขึ้นช้า และเชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 5.1 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลขนาด 1.5 มม.

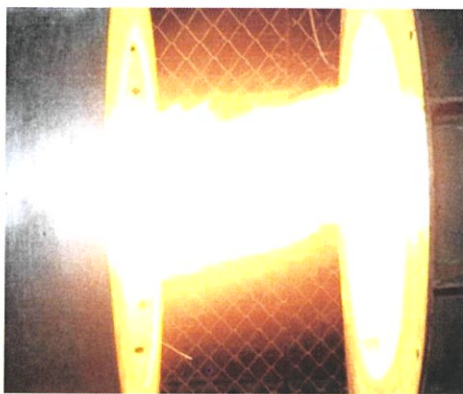
2. ลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแบบฝุ่นที่ขนาดอนุภาค 1.0 มม. การเผาไหม้เกิดขึ้นเร็ว เชื้อเพลิงเผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์ขึ้น



รูปที่ 5.2 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลขนาด 1.0 มม.

3. ลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแบบฝุ่นที่พบว่าเชื้อเพลิงขนาด 0.5 มม. มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลขนาด 0.5 มม.

จากการทดลองเป็นไปตามสมมุติฐานที่ว่าเชื้อเพลิงขนาดเล็กมีการเผาไหม้ที่ดีกว่าเชื้อเพลิงขนาดใหญ่อันเป็นผลมาจาก เชื้อเพลิงขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวในการรับความร้อนมากกว่าเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ ทำให้สามารถระเหยไอน้ำภายในตัวเชื้อเพลิง และเผาไหม้ได้รวดเร็วกว่า

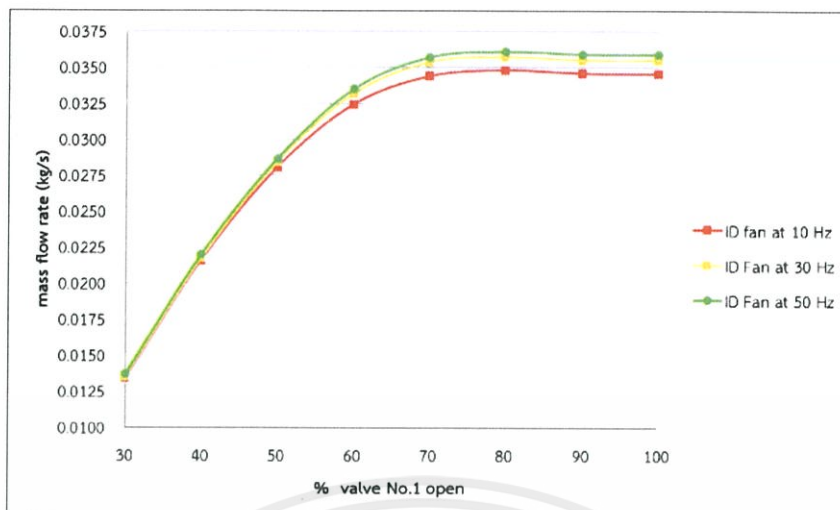
5.2 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศสำหรับหัวเผา

ค่าความดันแตกต่างที่วัดได้จะถูกนำมาคำนวณเป็นอัตราการไหลเชิงมวล จากผลการทดลองระบบป้อนอากาศทั้ง 3 ส่วน อากาศในแต่ละส่วนจะถูกวัด และนำไปใช้แยกกัน

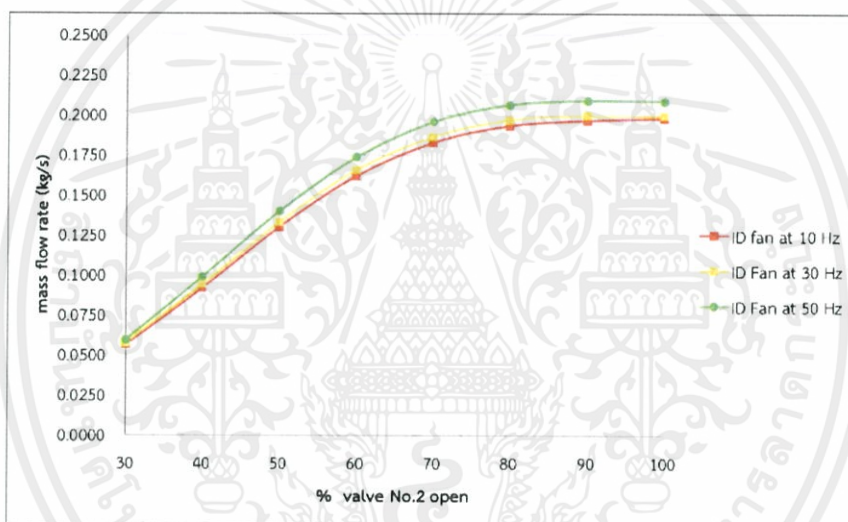
กราฟแสดงอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้ง 3 ส่วนดังรูป 5.4-5.6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ และเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วส่วนที่ 1 ระหว่าง 30 ถึง 100 องศา โดยมีเงื่อนไขการปรับ ID Fan ที่ 10, 30 และ 50 Hz

จากกราฟพบว่าช่วงการใช้งานอยู่ระหว่าง 30 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการปรับวาล์วที่ต่ำกว่า 30 เปอร์เซ็นต์จะเกิดการขวางการไหลของอากาศทำให้เกิดการรับภาระสูงที่ Blower ส่งผลให้ Blower หยุดการทำงาน หลังจากการเปิดวาล์วที่ 60 เปอร์เซ็นต์พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงช้าลง และช่วงการเปิดวาล์วหลัง 80 เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลเชิงมวลจะลดลงอันเป็นผลมาจากลักษณะของก้านวาล์วปีกผีเสื้อที่ใช้ควบคุมมีการขวางทางไหลภายในท่อ จากเงื่อนไขการปรับ ID Fan ที่ 10 30 และ 50 Hz พบว่าเมื่อเปิด ID Fan ที่ 50Hz จะทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมากที่สุด และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้งสามเพียงพอต่อการทำงานในย่าน 250-750 kW

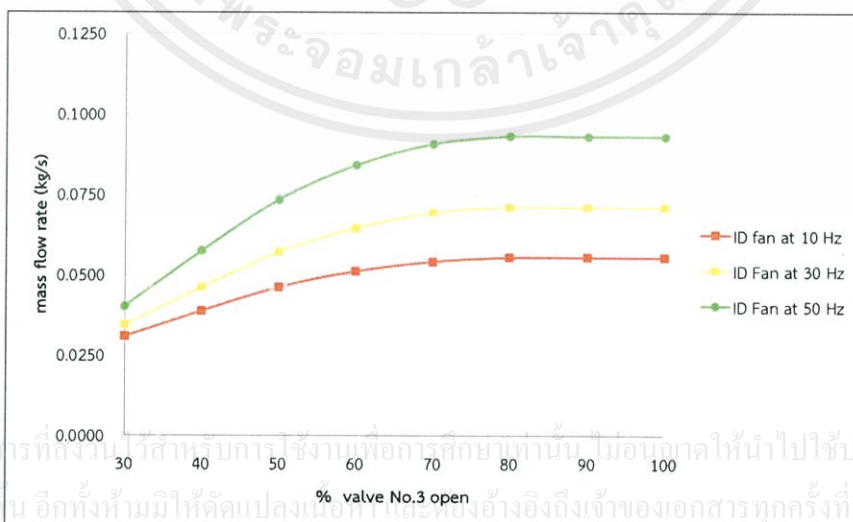
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 อัตราการไหลเชิงมวลของ Primary Air



รูปที่ 5.5 อัตราการไหลเชิงมวลของ Secondary Air



รูปที่ 5.6 อัตราการไหลเชิงมวลของ Tertiary Air

เมื่อได้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแล้ว จึงสรุปองศาการเปิดวาล์วของแต่ละเส้นทางอากาศในแต่ละช่วงพลังงานได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขในการทดลองจากการคำนวณ

Overall requirement & features		
Fuel LHV	15.787	MJ/kg
AVF ratio @stoichiometry	6.14	:1
Defined excess air	15	%
Air density@ 25 °C	1.176	kg/m ³
Ambient Temp.	35	°C
Air splitting config. (by mass)		
Primary air flow	10	%
Secondary air flow	65	%
Tertiary air flow	25	%

ตารางที่ 5.2 องศาการเปิดวาล์วสำหรับการทดลอง

Operating Table			
	300 kW	400 kW	500 kW
Biomass Fuel, Hz (kg/s)	1.45 (0.0189)	1.95 (0.0251)	2.40 (0.0314)
Primary Air, %valve1(kg/s)	31 (0.0134)	36 (0.0178)	43 (0.0223)
Secondary Air, %valve2(kg/s)	38 (0.0869)	46 (0.1159)	54 (0.1449)
Tertiary Air, %valve3(kg/s)	30 (0.0334)	40 (0.0446)	50 (0.0557)
Operate at 30Hz ID Fan			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 องศาใบพัดของหัวเผา

การทดลองนี้เป็นการปรับองศาใบพัดของอากาศเส้นทางที่ 2 ในองศาที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหมุนควง (swirl) ของอากาศที่เกิดขึ้นในหัวเผาขณะเกิดการเผาไหม้

5.3.1 ทดสอบที่ 250 kW

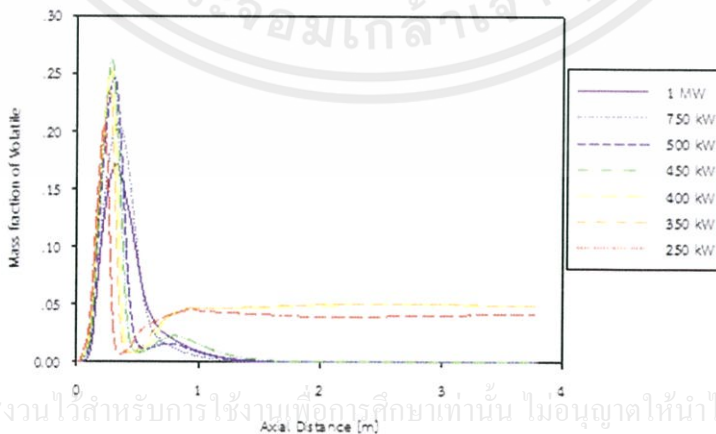
ไม่สามารถเก็บข้อมูลการเผาไหม้ได้ เนื่องจากการหมุนควงของอากาศนั้นไม่เพียงพอ ทำให้มีเชื้อเพลิง และสารระเหยตกค้างอยู่ภายในหัวเผา ส่งผลให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เกิดควัน และกลิ่นในปริมาณสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการเผาไหม้ตามรูปที่ 5.8 และ 5.9

5.3.2 ทดสอบที่ 300 kW

พบว่า การปรับใบพัดที่ 100 องศา เชื้อเพลิงมีการหมุนควง และมีการติดไฟดี ตามรูปที่ 5.7(b) การปรับใบพัดที่ 85 องศา การหมุนควงของเชื้อเพลิงเริ่มลดลง ทำให้เชื้อเพลิงเริ่มมีการโดนเปลวไฟน้อยลง ส่งผลให้การติดไฟของเชื้อเพลิงเริ่มลึกเข้าไปในเตาเผามากขึ้น ตามรูปที่ 5.7(b) การปรับใบพัดที่ 65 องศา การหมุนควงของเชื้อเพลิงน้อยมาก ทำให้เชื้อเพลิงไม่ลุกไหม้ในหัวเผา ส่งผลให้การติดไฟลดลง และเริ่มมีการดับตัว ตามรูปที่ 5.7(c)

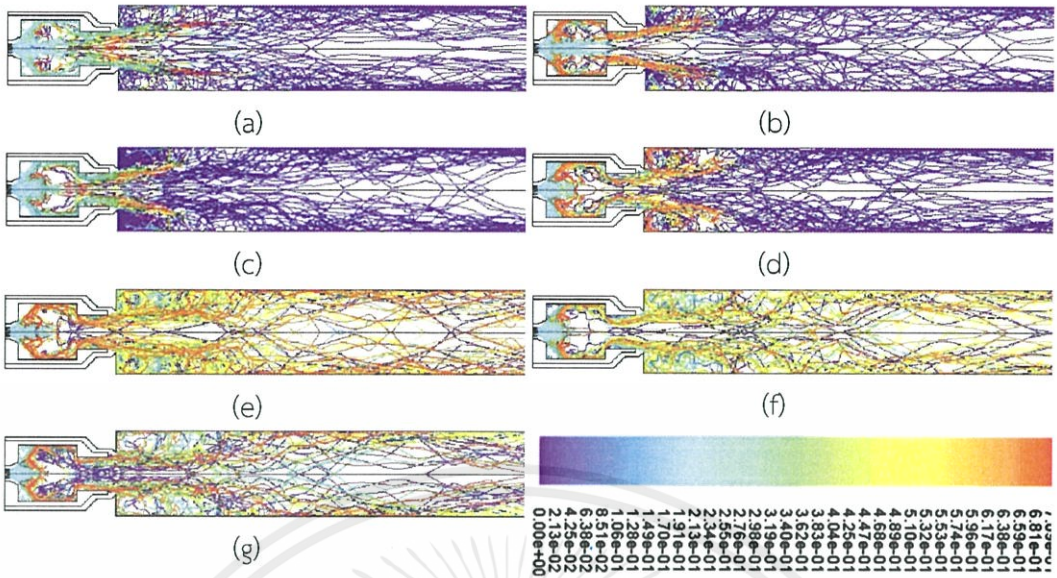


รูปที่ 5.7 เปลวไฟที่องศาใบพัด (a) 65, (b) 85, (c) 100



รูปที่ 5.8 ลักษณะการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหยตามแนว Axial ของเตาเผา [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



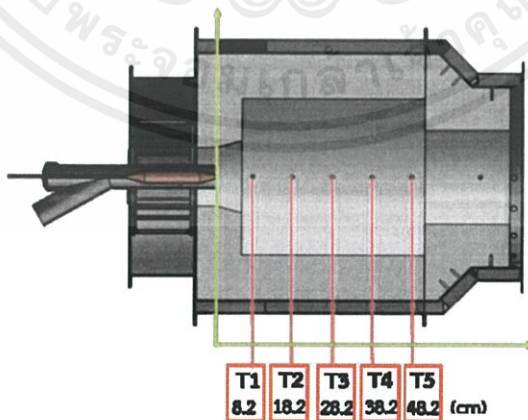
รูปที่ 5.9 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของชาร์ (Particle Char Fraction) (a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW, (e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW [9]

5.4 พฤติกรรมการเผาไหม้ที่ 400 kW และ 500 kW

การทดลองนี้เป็นการวัดอุณหภูมิภายในหัวเผาเพื่อศึกษาลักษณะของเปลวไฟ และความร้อนที่เกิดขึ้นที่ ณ ตำแหน่งต่างๆภายในหัวเผา

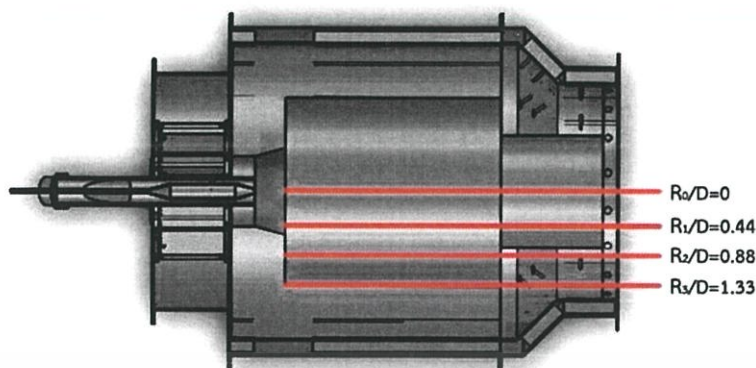
5.4.1 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ

จากรูปที่ 5.10 ภาพด้านข้างของหัวเผาแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1 ด้านซ้าย จนถึงเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5 ด้านขวา และจากรูปที่ 5.11 ภาพด้านบนของหัวเผา แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิจากบริเวณผนังหัวเผา จนถึงบริเวณแกนกลางหัวเผา



รูปที่ 5.10 ภาพด้านข้าง ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิล

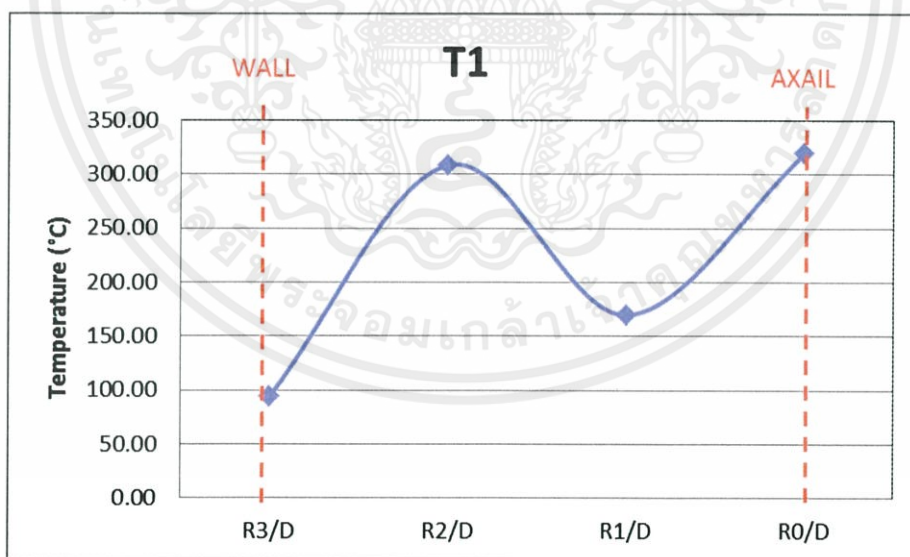
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีผลเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 ภาพด้านบน ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ

5.4.2 พฤติกรรมการเผาไหม้ที่ 400 kW

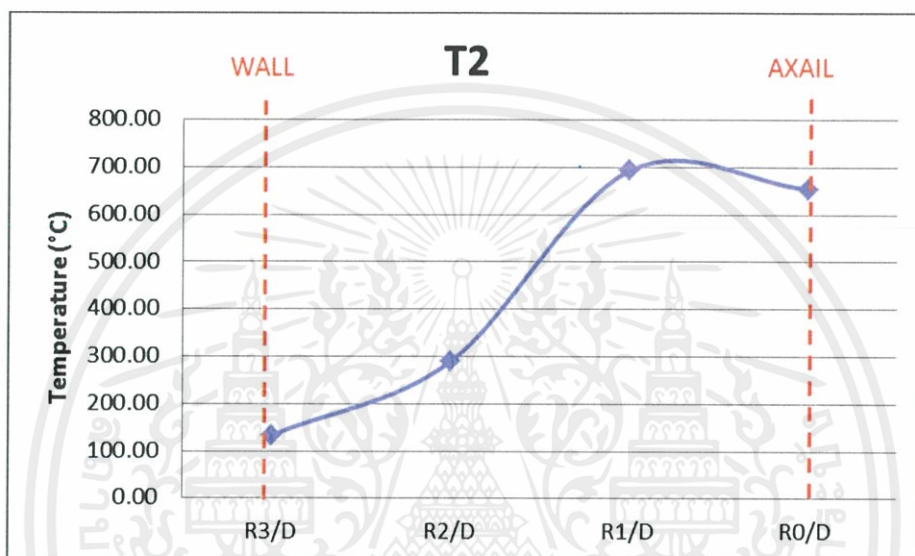
จากรูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งภายในหัวเผาตั้งแต่ผนังหัวเผาจนถึงแกนกลางหัวเผา จากกราฟจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิต้นผนังเตามีอุณหภูมิต่ำ เมื่อเลื่อนไปตำแหน่งที่ 2 อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเนื่องจากเป็นบริเวณที่เชื้อเพลิงเริ่มลุกไหม้ และตกลงที่ตำแหน่งที่ 3 อันเป็นผลมาจากอากาศส่วนที่สองที่เข้ามาในหัวเผาตรงกับตำแหน่งนี้ และกลับขึ้นอีกครั้งหลังจากพ้นตำแหน่งของลม



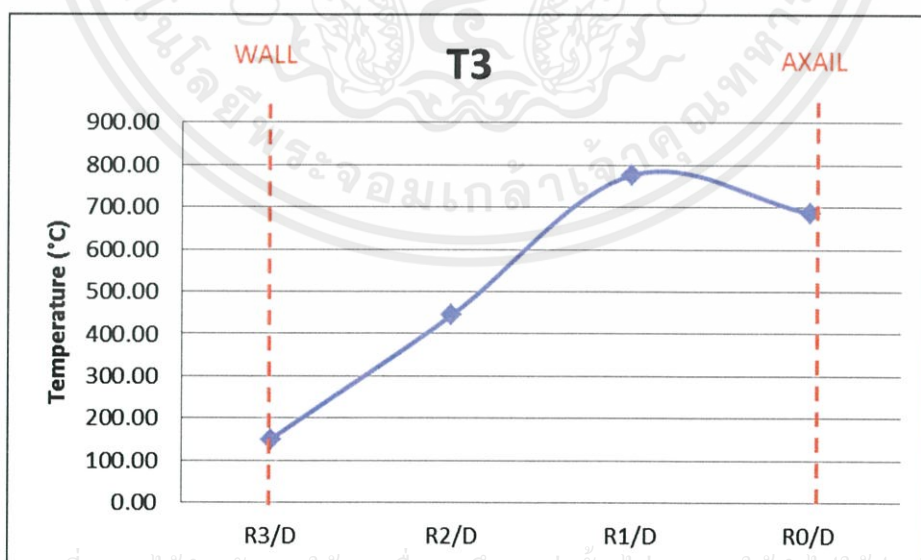
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 400 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.13 และ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล ตัวที่ 2, 3 และตำแหน่งภายในเตาเผา จากกราฟพบว่า ทั้ง 2 กราฟมีลักษณะคล้ายกันคือ อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นจากผนังเตาจนถึงตำแหน่งที่ 3 ก่อนอุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อยเมื่ออยู่แกนกลางของเตาเผา ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศจะป้อนเข้าที่แกนกลางของเตาเผาทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนยังไม่ได้รับผลของความร้อนของอากาศทำให้กระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลยังไม่สมบูรณ์ และมีอุณหภูมิต่ำ

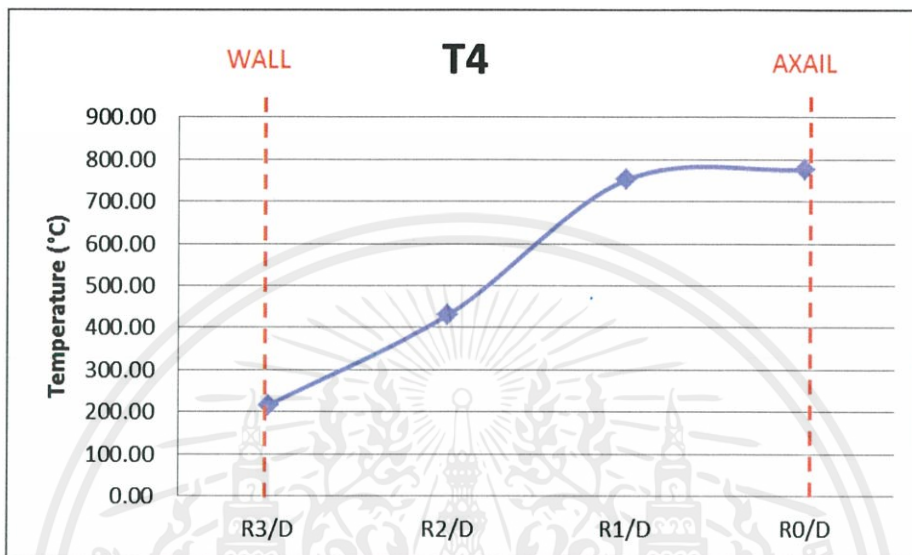


รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 400 kW



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณี รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 400 kW

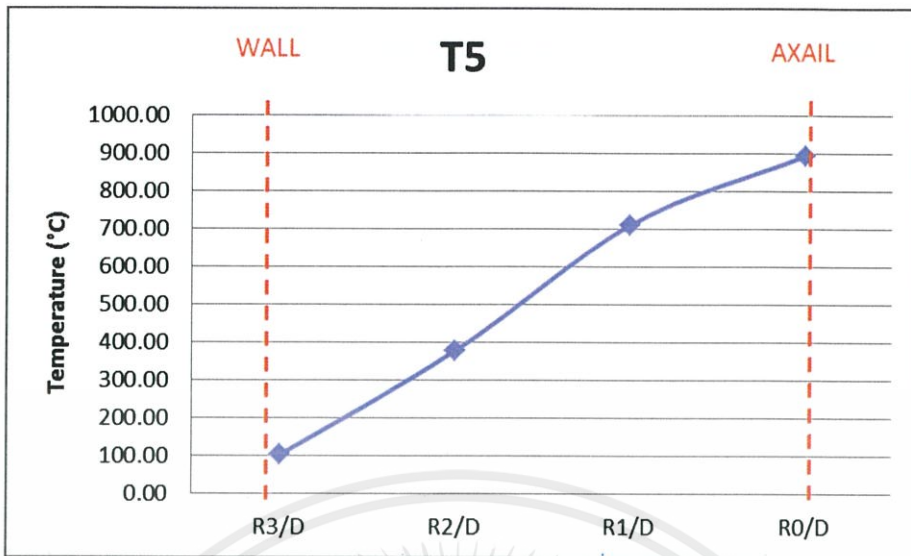
จากรูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4 และตำแหน่งภายในเตาเผา จากกราฟพบว่า อุณหภูมิจะสูงขึ้นจากผนังเตาจนถึงตำแหน่งที่ 3 และเริ่มคงที่จนถึงตำแหน่งแนวแกน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเชื้อเพลิงได้รับผลจากความปั่นป่วนของอากาศทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งแนวแกนมีค่ามากกว่า รูปที่ 5.13 และ 5.14



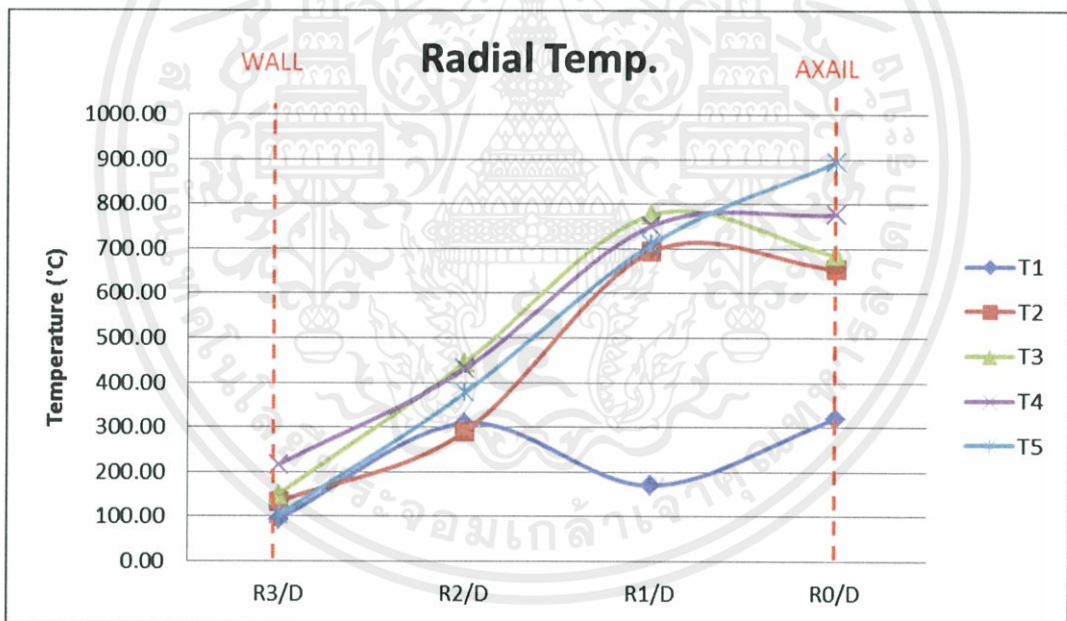
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 400 kW

จากรูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5 และตำแหน่งภายในเตาเผา จากกราฟพบว่า อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นจากผนังเตาจนถึงแกนกลาง เหตุที่ตำแหน่งแกนกลางสูงขึ้นแล้วนั้นเกิดจากการ บริเวณนี้เป็นบริเวณทางออกของหัวเผาทำให้เปลวไฟมารวมตัวกันบริเวณแกนกลางของหัวเผาก่อนออกสู่เตาเผาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 400 kW

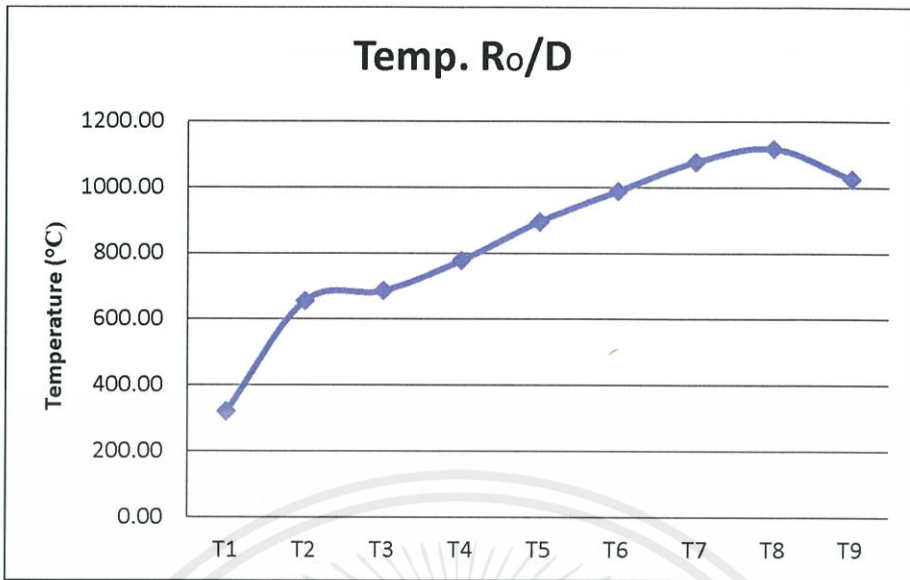


รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตามแนวรัศมีเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัวที่ 400 kW

จากรูปที่ 5.18 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตามแนวแกนของเทอร์โมคัปเปิลตัว 1 ถึงตัวที่ 5 ในหัวเผา และตัวที่ 6 ถึงตัวที่ 9 ในเตาเผาถึงท่อทางออกเตาเผา พบว่าใน

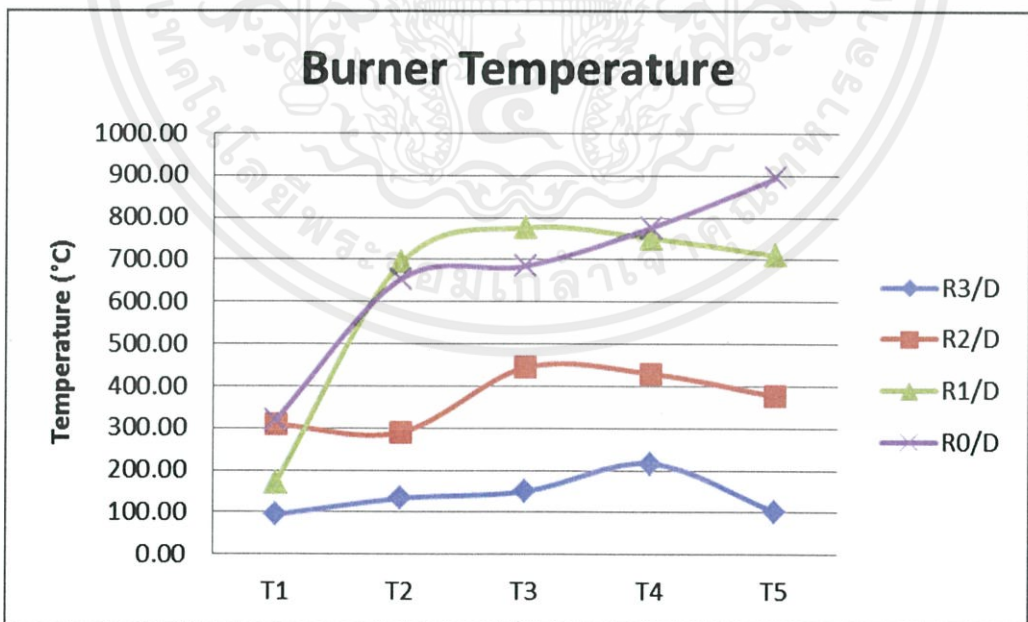
เตาเผามีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1116.93 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตามแนวแกนเทอร์โมคัปเปิลตัว 1 ถึงตัวที่ 9 ที่ 400 kW

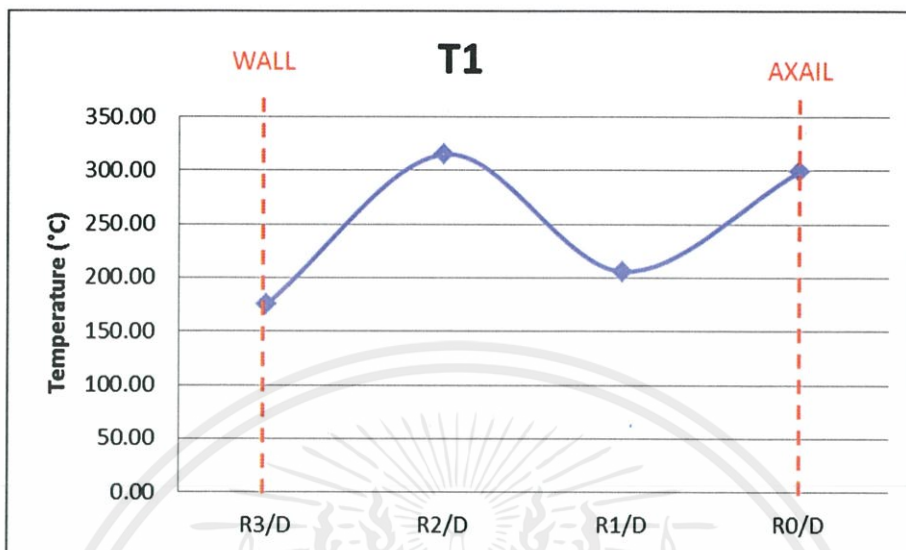
จากรูปที่ 5.19 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในห้องเผาของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัว จากกราฟทำให้ทราบถึงลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในเตาเผา โดยเปลวไฟเริ่มก่อตัวที่แกนกลางของเตา และถูกเหวี่ยงออกไปให้หมุนควงออกไป และกลับมารวมตัวบริเวณแกนกลางที่ปากทางออกอีกครั้ง



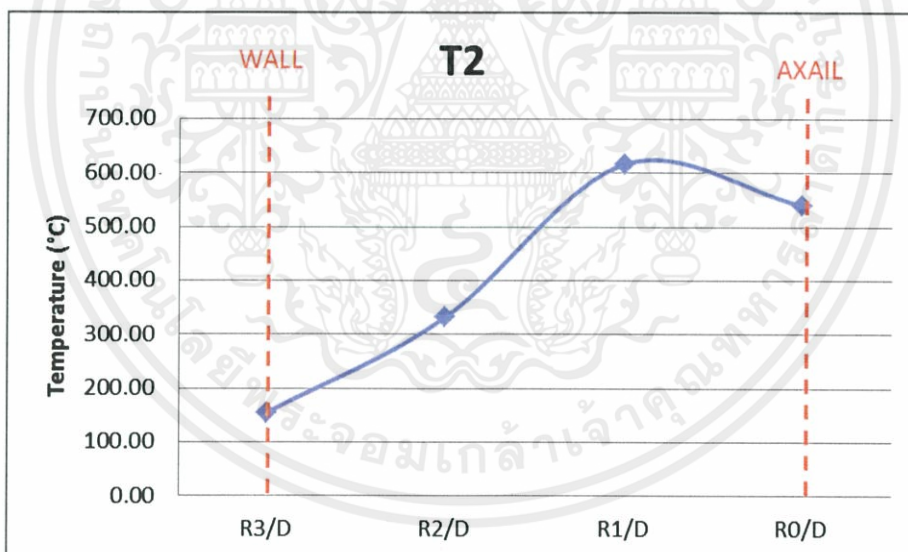
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในห้องเผาเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัวที่ 400 kW

5.4.3 พฤติกรรมการเผาไหม้ที่ 500 kW

จากรูปที่ 5.20 - 5.24 กราฟมีลักษณะเดียวกันกับที่ 400 kW

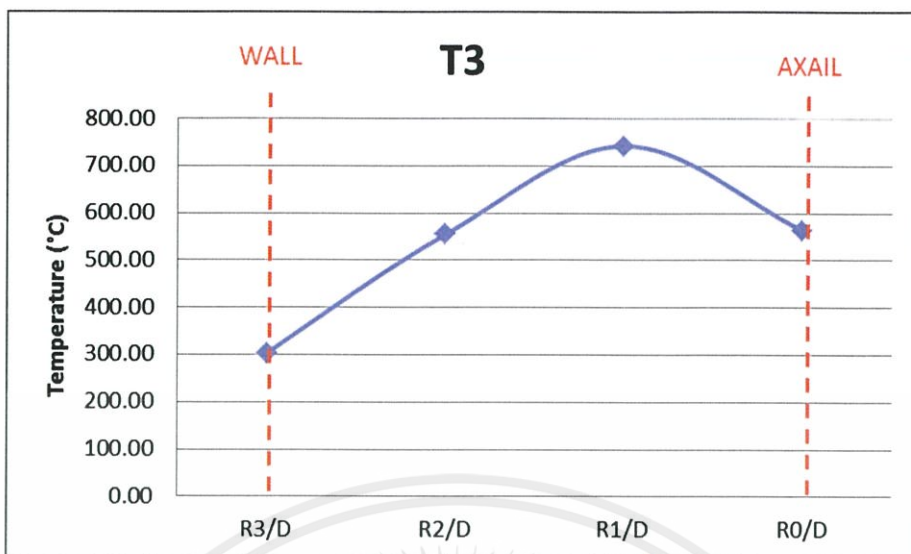


รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 500 kW

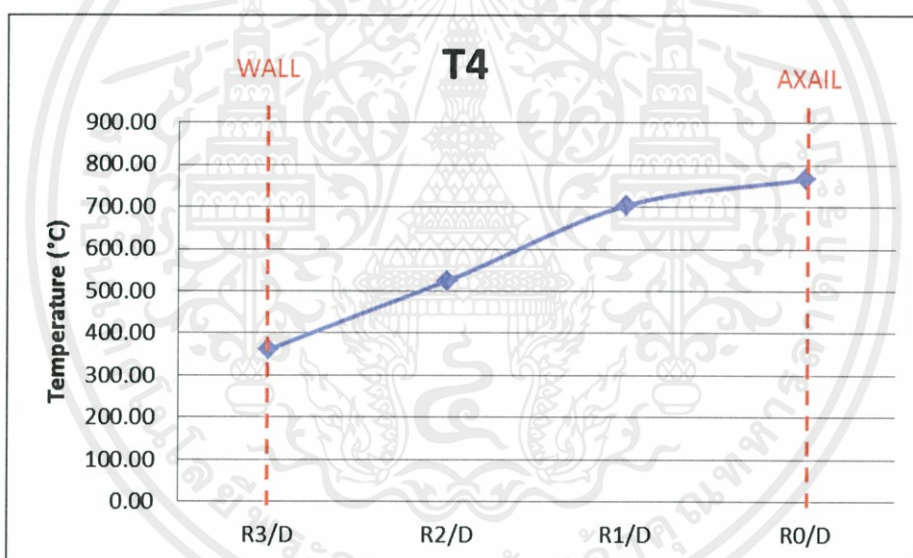


รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 500 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

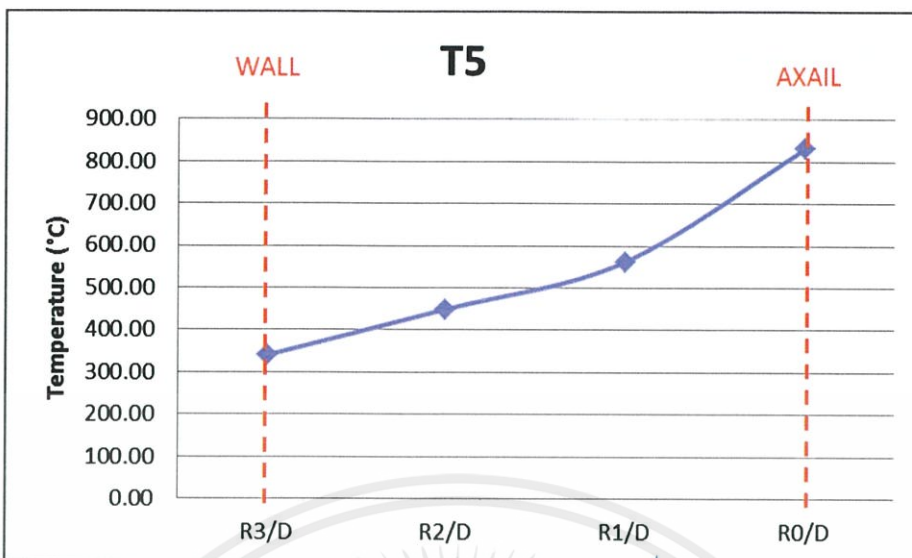


รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 500 kW

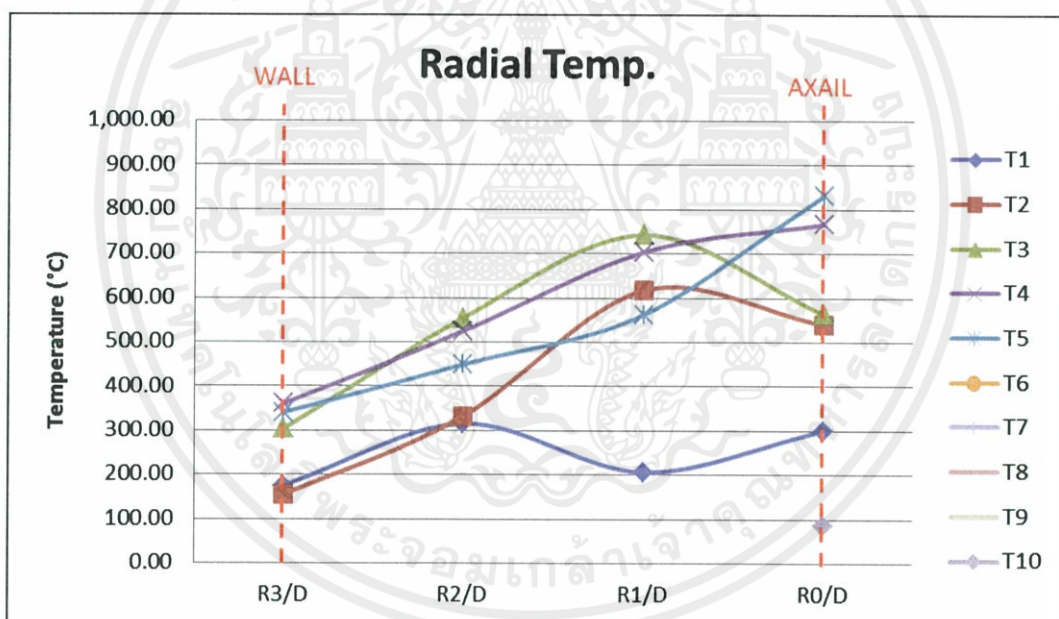


รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 500 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



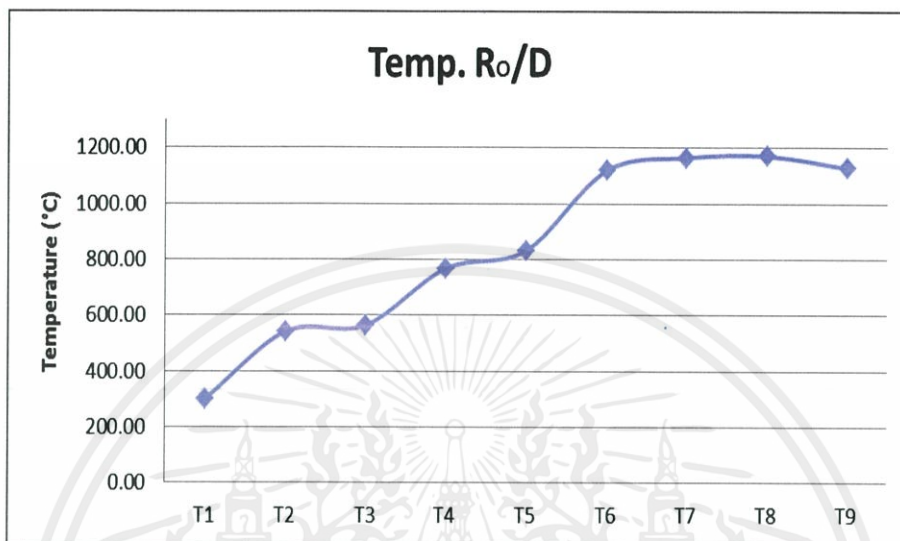
รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5 และตำแหน่งภายในเตาเผาที่ 500 kW



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตามแนวรัศมีเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัวที่ 500 kW

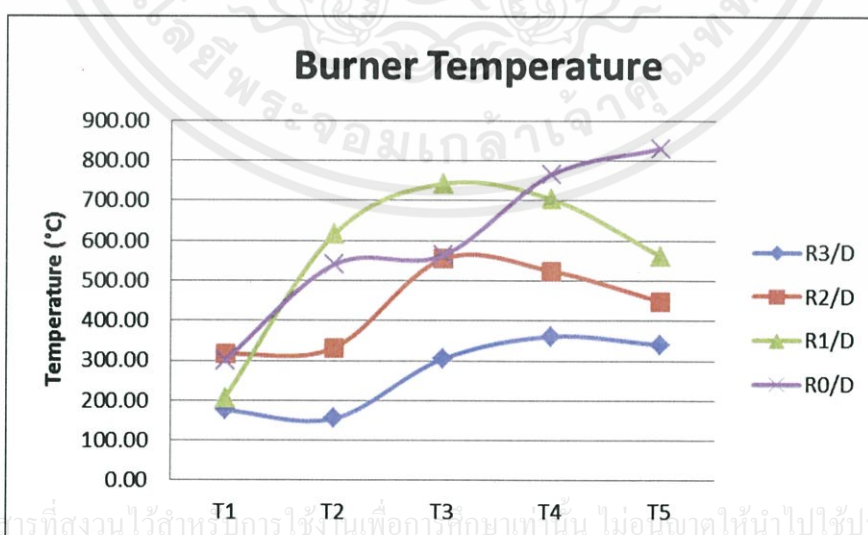
จากรูปที่ 5.26 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตามแนวแกนของเทอร์โมคัปเปิลตัว 1 ถึงตัวที่ 5 ในหัวเผา และตัวที่ 6 ถึงตัวที่ 9 ในเตาเผาถึงท่อทางออกเตาเผา พบว่าในหัวเผาที่ 400 kW มีอุณหภูมิสูงสุดที่ 894.80 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่ 500 kW ที่มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 831.13 องศาเซลเซียส อยู่เล็กน้อยซึ่งเป็นผลมาจากที่ 500 kW มีปริมาณ และความเร็วลมสูง ทำให้เชื้อเพลิงเคลื่อนตัวออกจากหัวเผาก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้ได้อย่างเต็มที่ และในเตาเผาที่ 400 kW มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1116.93 องศาเซลเซียส ในเตาเผาที่ 500 kW มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่

1169.33 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าในเตาเผาที่ 500 kW มีอุณหภูมิที่สูงกว่าพอสสมครอันเป็นผลจากที่ 500 kW ปริมาณเชื้อเพลิงที่มากกว่า และเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ไม่ถูกเผาไหม้ในหัวเผาแต่มาถูกเผาไหม้ภายในเตาเผาแทน



รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตามแนวแกนเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัวที่ 500 kW

จากรูปที่ 5.27 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในห้องเผาของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัว จากกราฟทำให้ทราบถึงลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในเตาเผา โดยที่ 500 kW พบว่าอุณหภูมิมีการกระจายไปที่ผนังเตามากขึ้น อันเป็นผลมาจากการเหวี่ยงตัวของลม และเชื้อเพลิงมีปริมาณมากขึ้น



รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในห้องเผาเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัวที่ 500 kW

5.5 การทำงานที่ย่าน 250, 300, 400 และ 500 kW

5.5.1 ลักษณะการทำงานที่ 250 kW

ไม่สามารถเก็บข้อมูลการเผาไหม้ได้ เนื่องจากการหมุนควงของอากาศนั้นไม่เพียงพอรวมถึงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ต่ำ ทำให้มีเชื้อเพลิง และสารระเหยตกค้างอยู่ในหัวเผา ส่งผลให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เกิดควัน และกลิ่นในปริมาณสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการเผาไหม้

5.5.2 ลักษณะการทำงานที่ 300 kW

ภายในเตามีการหมุนควงของอากาศน้อย ทำให้มีเชื้อเพลิงบางส่วนไม่ถูกเปลวไฟเผาไหม้ภายในเตา ส่งผลให้เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ตามค่าไอเสียที่วัดได้

5.5.3 ลักษณะการทำงานที่ 400 kW

ภายในเตามีการหมุนควงดี ทำให้เชื้อเพลิงถูกเปลวไฟมากมีการเผาไหม้ที่ดีขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิภายในหัวเผาเกิดขึ้นสูง การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้นตามค่าไอเสีย และอุณหภูมิที่วัดได้

5.5.4 ลักษณะการทำงานที่ 500 kW

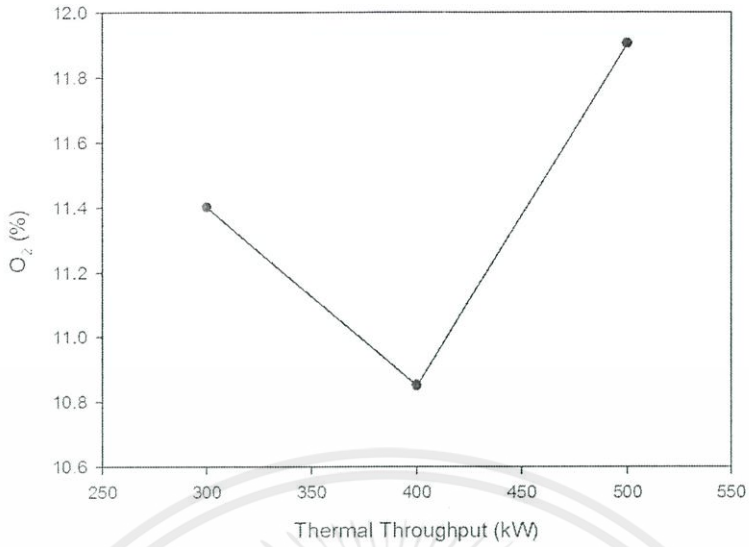
ภายในเตามีการหมุนควงดี แต่การเผาไหม้ในหัวเผาลดลงสังเกตจากเปลวไฟภายในในหัวเผา แต่อุณหภูมิที่วัดภายในเตาเผากลับมีค่าสูงเพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากลมที่มีปริมาณมากนำพาเชื้อเพลิงออกจากหัวเผาเร็วขึ้นซึ่งเชื้อเพลิงแข็งต้องการเวลาในการลุกไหม้ ทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ในบริเวณเตาเผาแทน

5.6 ผลการทดลองการวัดไอเสีย

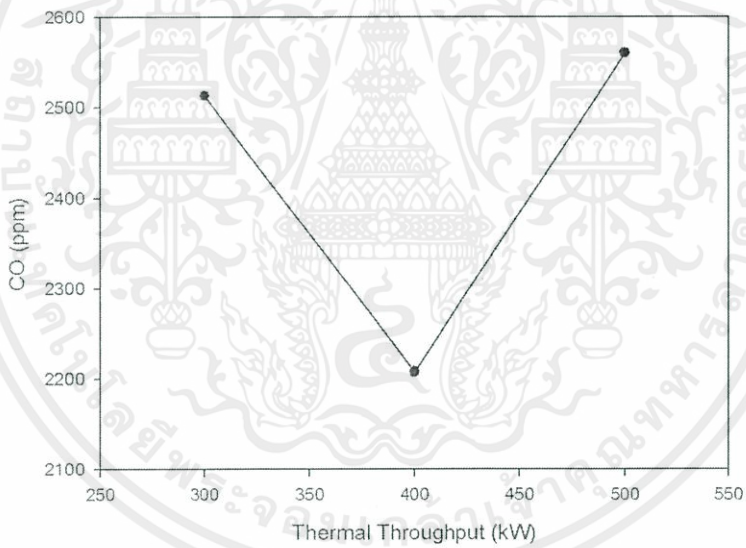
ตารางที่ 5.3 ค่าปริมาณไอเสีย

	O ₂ (%)	CO (ppm)	NO (ppm)	NO _x (ppm)
300kW	11.01	2513.300	68.12	87.17
400kW	10.49	2207.700	51.33	46.30
500kW	11.65	2560.412	53.03	54.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

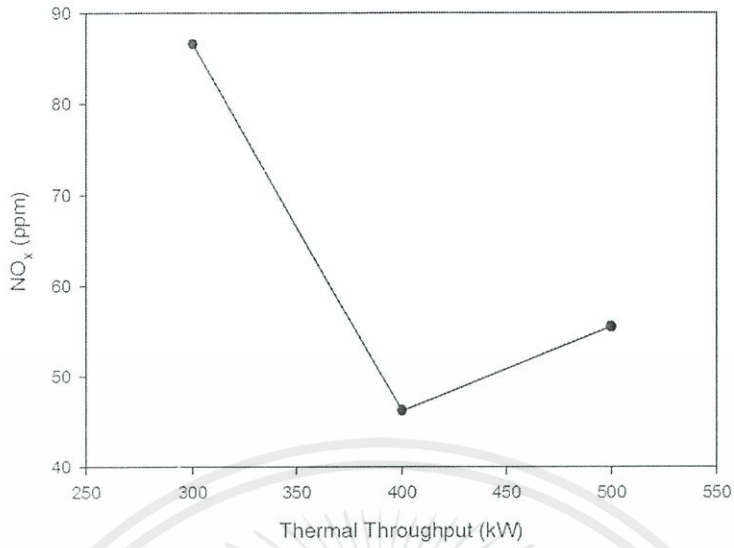


รูปที่ 5.28 ปริมาณ O₂ ในไอเสีย



รูปที่ 5.29 ปริมาณ CO ในไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 ปริมาณ NO_x ในไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 ช่วงการทำงานของหัวเผาชีวมวลชนิดฝุ่นเครื่องนี้อยู่ที่ 300-500 kW ส่วนในช่วงการทำงานนอกเหนือจากนี้ ตัวอย่างเช่น ที่ 250 kW ความปั่นป่วนของอากาศไม่เพียงพอทำให้มีปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลที่ไม่ติดไฟมีจำนวนมาก เกิดควันไอเสียสีดำซึ่งแสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของการเผาไหม้ ที่การทำงานมากกว่า 500 kW มีปริมาณลมจำนวนมากเข้าภายในหัวเผา และเคลื่อนตัวอย่างรวดเร็ว เชื้อเพลิงจึงถูกนำพาออกจากหัวเผา ทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในหัวเผาลดลง และเกิดการเผาไหม้ในเตาเผาแทน ช่วงในการเผาไหม้จึงเกินความยาวของตัวเตาเผา

6.1.2 องศาใบพัดภายในหัวเผาชีวมวลเครื่องนี้มีช่วงการทำงานที่ดีที่สุดอยู่ที่ 100 องศา โดยมีลักษณะการเผาไหม้อยู่ภายในหัวเผา สำหรับองศาใบพัดที่ 65 และ 85 องศา เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่ถูกอากาศพัดเข้าไปเผาไหม้ภายในเตาเผาเนื่องจากความปั่นป่วนของอากาศภายในหัวเผาไม่เพียงพอ

6.1.3 จากการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงขนาด 1.5 1.0 และ 0.5 มม. พบว่า ที่ขนาดเชื้อเพลิง 0.5 มม. มีการเผาไหม้ที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่าเชื้อเพลิงขนาดเล็ก ใช้เวลาในการลุกติด และเผาไหม้รวดเร็ว กว่าเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 สำหรับการวัดไอเสีย เพื่อความแม่นยำ และความถูกต้องควรที่จะนำซีเถ้าที่เหลือภายในเตาเผาหลังการเผาไหม้ไปทดสอบเพื่อองค์ประกอบของคาร์บอนที่เหลือภายในซีเถ้าเพื่อที่จะรู้ว่าระบบการเผาไหม้มีประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่าไร และทำการวัดไอเสียในบริเวณที่มีการเผาไหม้สิ้นสุดแล้ว

6.2.2 ทำการทดสอบ %excess air ที่เงื่อนไขต่างๆ เพื่อให้ได้ค่าพลังงานจากการเผาไหม้ที่สูงที่สุดสำหรับหัวเผา

6.2.3 ทำการทดสอบอัตราส่วนอากาศของเส้นทางอากาศทั้งสาม เพื่อให้ได้ความปั่นป่วนของอากาศที่สูงที่สุด

6.2.4 ควรเก็บรักษาเชื้อเพลิงในพื้นที่ปราศจากความชื้น เพื่อการเผาไหม้ที่ดีของเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ้างอิง

- [1] สำเร็จ จักรใจ. การเผาไหม้. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [2] สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. “พลังงานชีวมวล”, <http://www2.dede.go.th/kmmf/home.html>. 2555.
- [3] กิตติกร สาสุจิตต์. 2552. “การทำอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สุด สำหรับเตาเผา แกลบ
แบบไซโคลน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [4] นคร ทิพย์วงศ์. พื้นฐานวิศวกรรมการเผาไหม้
- [5] Sjaak van Loo and Jaap Koppejan (2008). The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, ISBN 978-1-84407-249-1, Earthscan in the UK and USA in 2008
- [6] สำเร็จ จักรใจ. การเผาไหม้. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [7] ทวิช ชูเมือง (2006). การออกแบบระบบเครื่องมือวัดและควบคุมทางอุตสาหกรรม (เล่ม 2: การเลือกใช้และออกแบบระบบเครื่องมือวัด), ISBN 974-933-207-5
- [8] Feng Duan, Jian Liu, Chien-Song Chyang, Chun-Hsuan Hu, Jim Tso (2013). Combustion behavior and pollutant emission characteristics of RDF (refuse derived fuel) and sawdust in a vortexing fluidized bed combustor
- [9] ชินภัทร ธุระการ, ธนภัทร ภักดีวรวงศ์, จารุวัตร เจริญสุข. การศึกษายานการดำเนินงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีมุมผนังทางออก 90 องศา, หน้า 69, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 (ME-NETT).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ตารางและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์องศาการเปิด วาล์วและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

Primary Air Inlet

	พื้นที่หน้าตัด A2, line 1	0.002123717	m ²	
	อุณหภูมิโดยรอบ	35	องศาเซลเซียส	
	ความหนาแน่น	1.137818182	kg/m ³	
ID Fan Hz	% valve 1 open	DP (mbar)	mass flow rate (kg/s)	Q (kg/m ³)
10	30	0.320	0.01268	0.0111
10	40	0.842	0.02058	0.0181
10	50	1.383	0.02637	0.0232
10	60	1.866	0.03063	0.0269
10	70	2.104	0.03253	0.0286
10	80	2.144	0.03284	0.0289
10	90	2.123	0.03268	0.0287
10	100	2.124	0.03268	0.0287
30	30	0.319	0.01267	0.0111
30	40	0.849	0.02067	0.0182
30	50	1.455	0.02705	0.0238
30	60	1.997	0.03169	0.0279
30	70	2.275	0.03383	0.0297
30	80	2.321	0.03417	0.0300
30	90	2.286	0.03391	0.0298
30	100	2.285	0.03390	0.0298
50	30	0.324	0.01277	0.0112
50	40	0.868	0.02089	0.0184
50	50	1.485	0.02733	0.0240
50	60	2.034	0.03198	0.0281
50	70	2.324	0.03419	0.0300
50	80	2.372	0.03454	0.0304
50	90	2.332	0.03425	0.0301
50	100	2.328	0.03422	0.0301

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Secondary Air Inlet

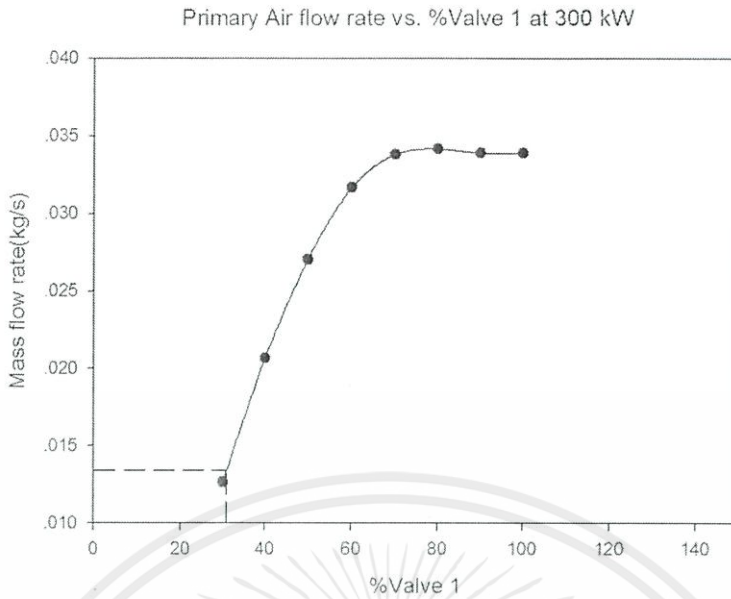
	พื้นที่หน้าตัด A2, line 2	0.003685285	m ²	
	อุณหภูมิโดยรอบ	35	องศาเซลเซียส	
	ความหนาแน่น	1.137818182	kg/m ³	
ID Fan Hz	% valve 2 open	DP (mbar)	mass flow rate (kg/s)	Q
10	30	2.076	0.05665	0.0488
10	40	5.422	0.09154	0.0788
10	50	10.813	0.12927	0.1113
10	60	17.072	0.16242	0.1399
10	70	22.320	0.18572	0.1600
10	80	25.261	0.19758	0.1702
10	90	26.168	0.20109	0.1732
10	100	26.438	0.20213	0.1741
30	30	2.143	0.05754	0.0496
30	40	5.629	0.09326	0.0803
30	50	11.333	0.13234	0.1140
30	60	17.912	0.16637	0.1433
30	70	23.218	0.18942	0.1631
30	80	26.146	0.20101	0.1731
30	90	26.923	0.20397	0.1757
30	100	26.931	0.20400	0.1757
50	30	2.285	0.05942	0.0512
50	40	6.185	0.09777	0.0842
50	50	12.382	0.13833	0.1191
50	60	19.598	0.17402	0.1499
50	70	25.557	0.19873	0.1712
50	80	28.760	0.21081	0.1816
50	90	29.571	0.21377	0.1841
50	100	29.530	0.21362	0.1840

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

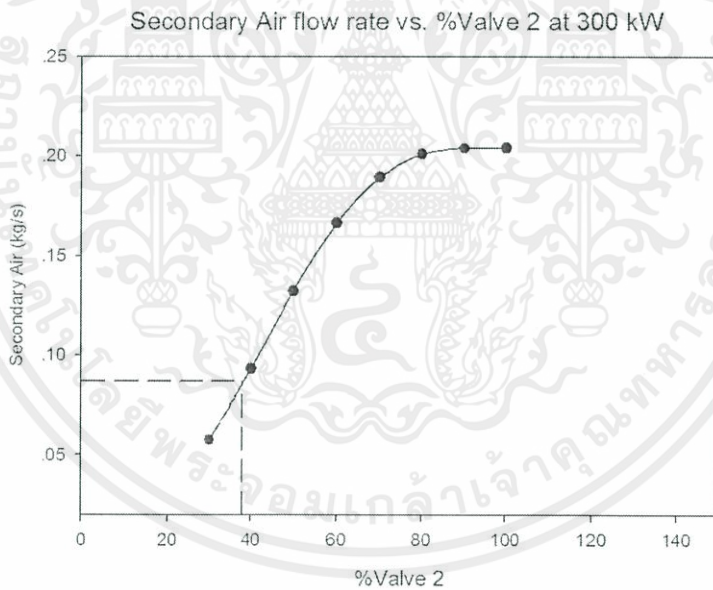
Tertiary Air Inlet

	พื้นที่หน้าตัด A2, line 3	0.002123717	m ²	
	อุณหภูมิโดยรอบ	35	องศาเซลเซียส	
	ความหนาแน่น	1.137818182	kg/m ³	
ID Fan Hz	% valve 2 open	DP (mbar)	mass flow rate (kg/s)	Q
10	30	1.822	0.03058	0.0263
10	40	2.839	0.03817	0.0329
10	50	3.999	0.04530	0.0390
10	60	4.646	0.04883	0.0421
10	70	5.562	0.05342	0.0460
10	80	5.833	0.05471	0.0471
10	90	5.837	0.05473	0.0471
10	100	5.851	0.05480	0.0472
30	30	2.187	0.03350	0.0289
30	40	3.952	0.04503	0.0388
30	50	6.090	0.05590	0.0481
30	60	7.812	0.06331	0.0545
30	70	8.986	0.06791	0.0585
30	80	9.490	0.06979	0.0601
30	90	9.456	0.06966	0.0600
30	100	9.483	0.06976	0.0601
50	30	2.943	0.03886	0.0335
50	40	6.094	0.05592	0.0482
50	50	9.931	0.07139	0.0615
50	60	13.113	0.08203	0.0707
50	70	15.339	0.08872	0.0764
50	80	16.226	0.09125	0.0786
50	90	16.221	0.09124	0.0786
50	100	16.147	0.09103	0.0784

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

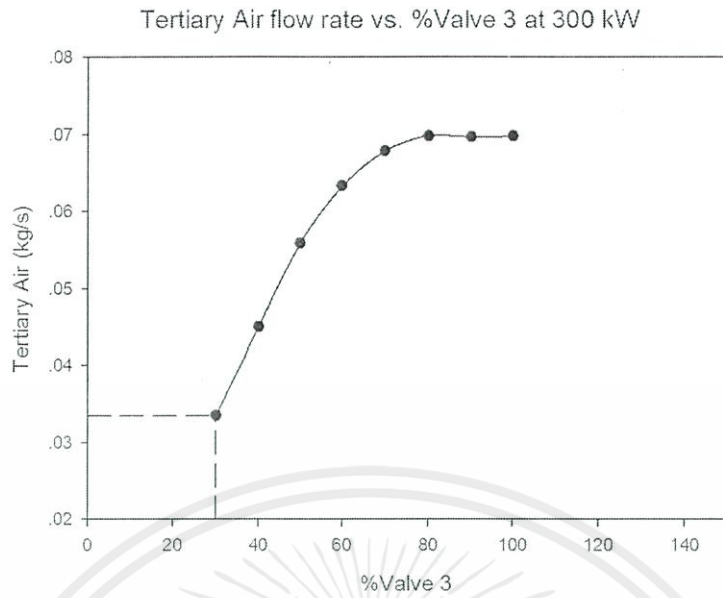


รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ขององศาการเปิดวาล์วที่ 1 และอัตราการไหลเชิงมวลที่ 300 kW

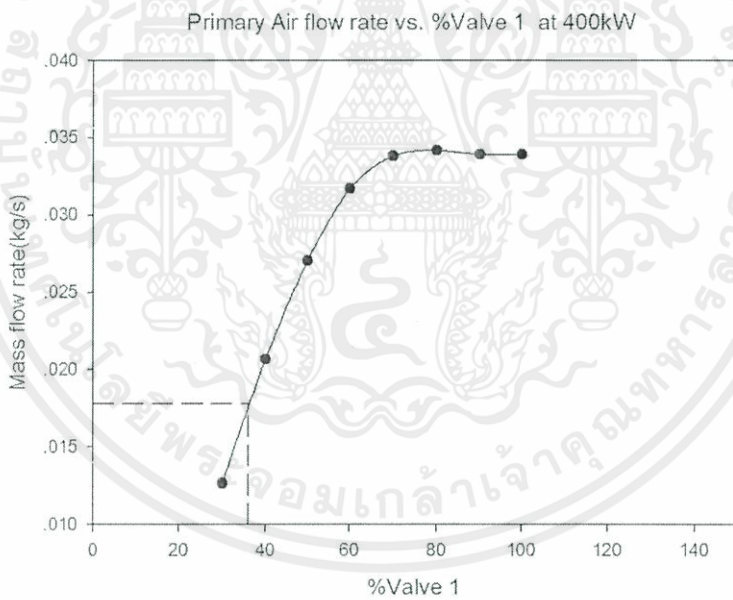


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ขององศาการเปิดวาล์วที่ 2 และอัตราการไหลเชิงมวลที่ 300 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

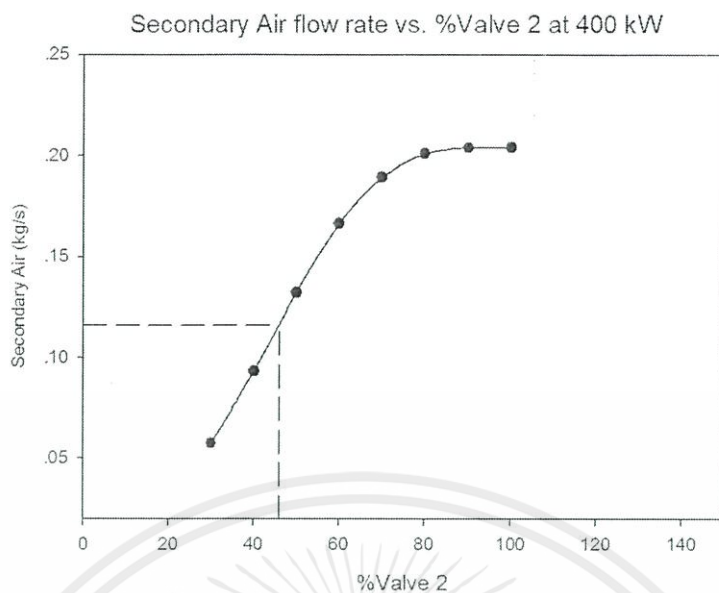


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ขององศาการเปิดวาล์วที่ 3 และอัตราการไหลเชิงมวลที่ 300 kW

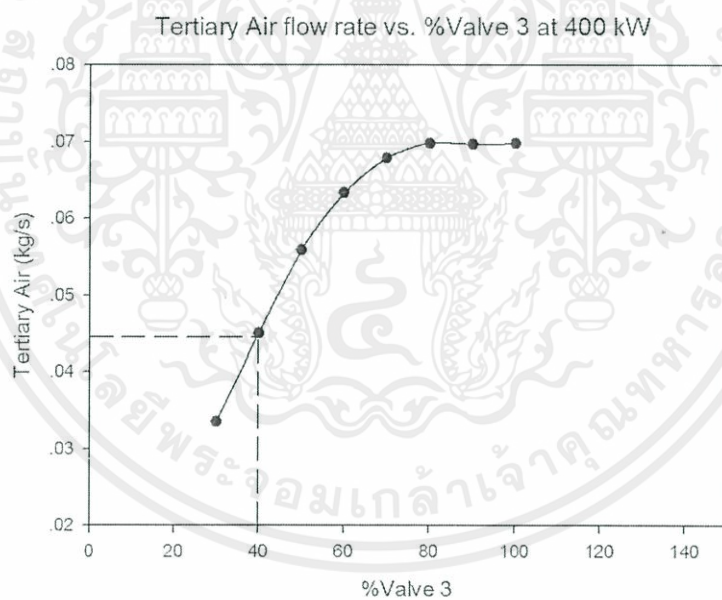


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ขององศาการเปิดวาล์วที่ 1 และอัตราการไหลเชิงมวลที่ 400 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

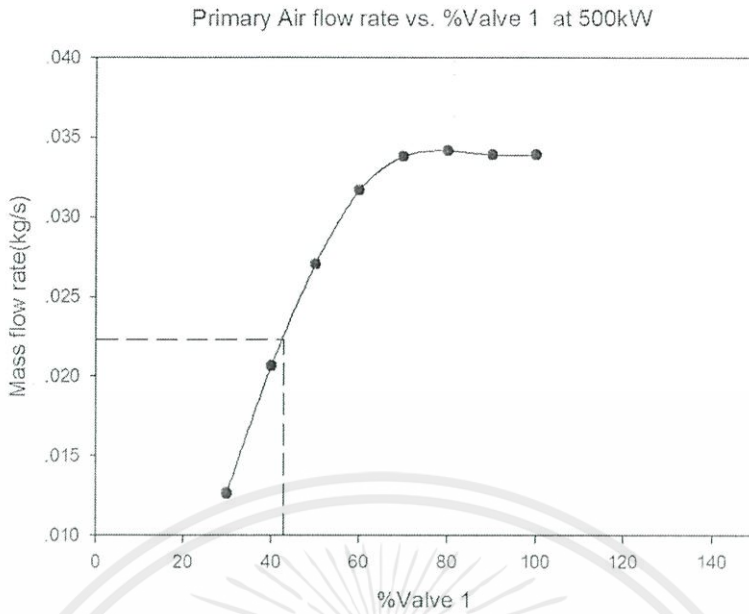


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ขององศาการเปิดวาล์วที่ 2 และอัตราการไหลเชิงมวลที่ 400 kW

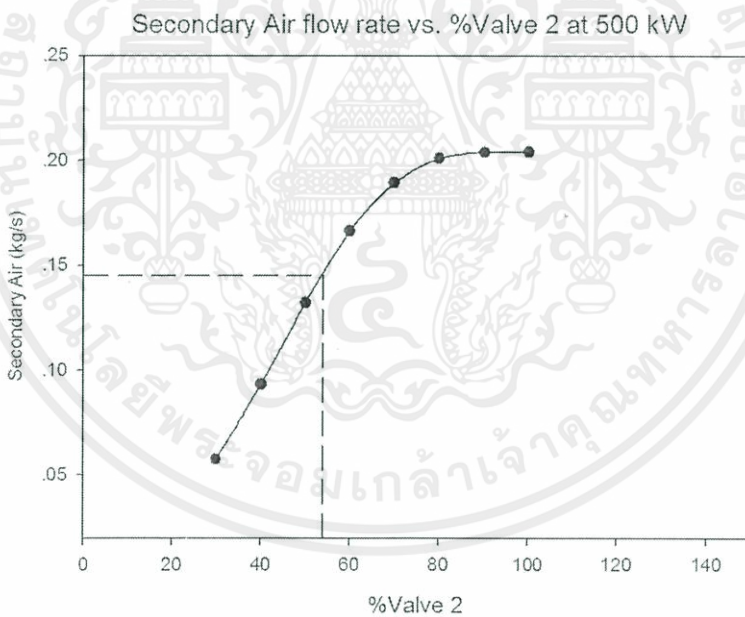


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ขององศาการเปิดวาล์วที่ 3 และอัตราการไหลเชิงมวลที่ 400 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

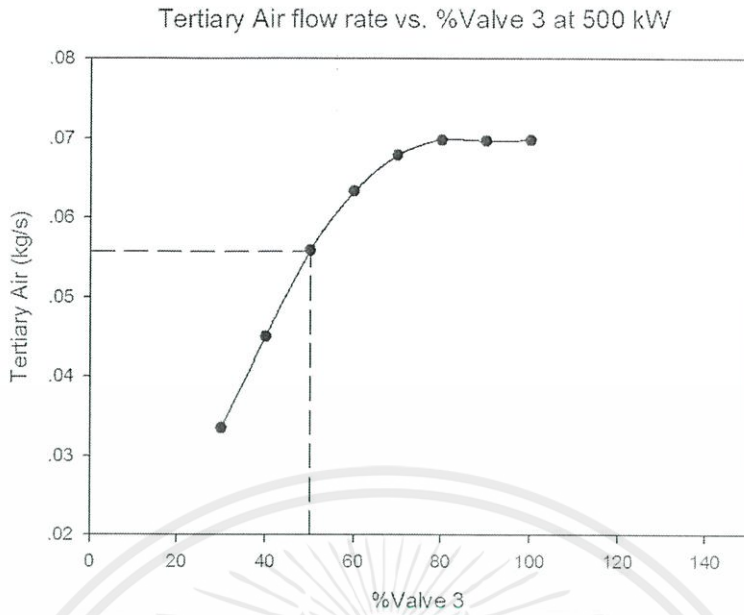


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ขององศาการเปิดวาล์วที่ 1 และอัตราการไหลเชิงมวลที่ 500 kW



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ขององศาการเปิดวาล์วที่ 2 และอัตราการไหลเชิงมวลที่ 500 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ขององศาการเปิดวาล์วที่ 3 และอัตราการไหลเชิงมวลที่ 500 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลไอเสีย

	O2 (%)	CO (ppm)	CO2 (%)	NO (ppm)	NOx (ppm)	H2 (ppm)
300 kW	11.402	2513.300	6.307	67.750	86.600	2182.000
400 kW	10.852	2207.700	6.669	50.200	46.250	2166.500
500 kW	11.905	2560.412	5.976	66.647	55.529	1842.471



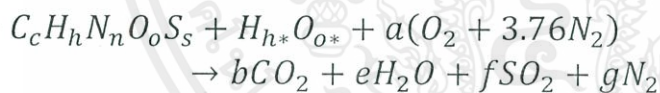
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

การคำนวณ Ultimate Analysis เพื่อหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (AF Ratio)

Ultimate Analysis of sawdust fuel		Moisture			
		7.98	%		
	%m/m(dry)	mass/per1kg fuel (as received)	kmole/pe r 1kg fuel	kmole/kmole with water content	
Carbon	51.190	0.471	0.039	0.279	c
Hydrogen	7.170	0.066	0.066	0.469	h
Nitrogen	0.190	0.002	0.000	0.001	n
Oxygen	38.310	0.353	0.022	0.157	o
Sulfur	0.000	0.000	0.000	0.000	s
Ash	3.140	0.029	-		
	Hydrogen in H ₂ O	0.009	0.009	0.063	h*
	Oxygen in H ₂ O	0.071	0.004	0.032	o*
	100	1		1	

โดยการคำนวณเป็นไปตามสมการเคมีดังนี้



องค์ประกอบของไอเสียภายหลังการดุลสมการ

balance C atom	0.2790	=b
balance H atom	0.2660	=e
balance S atom	0.0000	=f
balance O atom	0.3179	=a
balance N atom	1.1959	=g

การคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

$$AF Ratio = \%Ash * \frac{1}{1 - \frac{a * (MW_{O_2} + 3.76MW_{N_2})}{\sum(x_i * MW_i)}}$$

$$AF Ratio = 6.14$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้