

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

กลไกการก่อตัวของไนโตรเจนออกไซด์ในเตาเผาไหม้ของวัสดุพอรุนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น

NO FORMATION MECHANISM OF FUEL - AIR MIXTURE  
STAGE POROUS MEDIA COMBUSTOR



T117094



ฉพ.  
๑๖๖๘๗  
๑๕๕๑

เลขที่ 117094  
เลขทะเบียน 117094  
วันเดือนปี 23 ส.ย. 2554

b. 1233A08X  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-030-144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**NO FORMATION MECHANISM OF FUEL - AIR MIXTURE  
STAGE POROUS MEDIA COMBUSTOR**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2010**

**KMITL-2010-EN-M-030-144**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2010**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กลไกการก่อตัวของไนโตรเจนออกไซด์ในเตาเผาไหม้ของวัสดุแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น
นักศึกษา	นายสรรเพชญ พุกษะรัตนานนท์
รหัสประจำตัว	48060356
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากลไกการก่อตัวของไนโตรเจนออกไซด์ รวมถึงศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้แบบวัสดุพอร์ซันที่มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น (Fuel – Air Mixture Staged Combustor) ในแง่ของสมรรถนะความร้อนอันได้แก่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $\eta_c$ ), การกระจายอุณหภูมิและปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้น โดยเตาเผาไหม้วัสดุพอร์ซันนี้มีความสูงประมาณ 425 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ซึ่งมีการแบ่งการฉีดของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นสองส่วน เชื้อเพลิงผสมอากาศส่วนแรกจะถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้บริเวณด้านล่างของเตา และส่วนที่สองจะถูกป้อนเข้าเตาเผาไหม้ที่ระดับความสูง 100 มิลลิเมตร จากตะแกรงจ่ายเชื้อเพลิง (Mixture Distribution Plate) โดยในการทดลองจะทำการคงที่พลังงานที่ได้รับจากหัวเผาวัสดุพอร์ซัน (KW) เท่ากับ 3 KW ซึ่งในการทดสอบได้ทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน คือ ทำการศึกษอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรกภายในเตาเผาไหม้วัสดุพอร์ซันในช่วง 1.3 ถึง 1.7 และคงที่ค่าปริมาณอากาศส่วนเกินโดยรวมไว้ที่ 110 % , 150 % ตามลำดับ และทำการศึกษาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรกเท่ากับ 1.5 ที่ค่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % , 150 % และ 180 % จากการศึกษาพบว่าได้เกิดปรากฏการณ์ที่สำคัญ คือ พบการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal Cracking) และปฏิกิริยาที่เรียกว่า “Steam Methane Reforming (SMR)” ของไฮโดรคาร์บอนขึ้นในทุกเงื่อนไขการทดลอง นอกจากนี้ยังได้พบว่าการปรับเปลี่ยนค่าอากาศส่วนเกิน ก่อให้เกิดกลไกที่ส่งเสริมการเผาไหม้โดยเป็นการเพิ่มอัตราการคลุกเคล้าของส่วนผสมและยังเกิดกลไกที่ส่งผลด้านลบต่อการเผาไหม้ โดยกลไกด้านลบนี้เป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Local Flame Extinction” โดยจากการทำการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการนำเตาเผาไหม้วัสดุพอร์ซันนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงเกิดขึ้นในกรณีของอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.5, ค่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % ซึ่งมีการกระจายอุณหภูมิในเตาต่างกันไม่เกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

100 องศาเซลเซียส อยู่ในช่วงตั้งแต่ 150 ถึง 250 มิลลิเมตรจากแผ่นกระจายเชื้อเพลิง, มีค่าการปลดปล่อยของ CO และ NO อยู่ที่ 29.28 และ 23.7 ppm ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้มากกว่า 99 %

คำสำคัญ : เตาเผาไหม้วัสดุพูนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น, การเผาไหม้แบบจ่ายเป็นชั้น, วัสดุพูน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	NO Formation Mechanism of Fuel – Air Mixture Staged Porous Media Combustor
<b>Student</b>	Mr.Sanphet Pruksaritanon
<b>Student ID.</b>	48060356
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Machanical Engineering
<b>Year</b>	2010
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr.Jaruwat Charoensuk

### Abstract

This research concerns with the investigation on NO formation mechanism including combustion efficiency, temperature distribution, emissions of fuel – air mixture staged porous media combustor for LPG combustion. The fuel – air mixture staged porous media combustor has 425 mm in height with 100 mm of inside diameter. The fuel – air mixture is introduced into the combustor in two different locations. The primary fuel-air mixture is delivered to the bottom of combustor and the secondary fuel-air mixture is introduced at 100 mm from the mixture distributor plate. Thermal throughput is kept at 3 KW where this study has been divided into 3 sections. The first and second sections are to examine the behavior of porous media combustor when the first-stage equivalent ratio has been changed within the rich limit-from 1.3 to 1.7 and overall excess air is maintained at 110% and 150% respectively. The last section is to examine the effect of the first-stage equivalent ratio of 1.5 when excess air is maintained at 110 %, 150% and 180 %. It was found that thermal cracking and steam methane reforming (SMR) of hydrocarbon were important processes taking place in a porous domain. Furthermore, different excess air has both positive and negative effect on combustion. The positive effect can be related with turbulence enhancement mixing where as the negative effect is referred to local flame extinction. The appropriate operating condition for the application of fuel cell systems has been suggested at 1.5 equivalent ratio on the first-staged and 150 % of excess air. This indicates that difference of temperature distribution was less than 100 °C in range of 150 to 250 mm from mixture distributor plate. CO concentration and NO Concentration of combustor were 29.28 and 23.7 ppm respectively. The combustion efficiency of combustor was higher than 99 %.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 Keyword: Porous burner, staged combustion, porous media

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องกลไกการก่อตัวของโนโตรเจนออกไซด์ในเตาเผาไหม้แบบวัสดุพูนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้นสำเร็จลุล่วงไปได้โดยความอนุเคราะห์สนับสนุนจากหน่วยงาน และบุคคลต่าง ๆ เป็นอย่างดี

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ได้จัดสรรทุนอุดหนุนและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รองศาสตราจารย์ ดร.จรรุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้งานวิจัยเรื่องนี้ยังได้รับคำแนะนำอย่างดียิ่งจากคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างสูงที่ทำให้งานวิจัยเรื่องนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์

ผู้ที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนและทำวิจัยของผู้วิจัยมาโดยตลอด ได้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่น้อง ของผู้วิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้ความช่วยเหลือซ้ำพเจ้าในทุกๆ ด้านที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณในทุกประการที่ให้แก่งานวิจัยเรื่องนี้ไว้ ณ โอกาสนี้

สรรเพชญ พุกษะรัตนนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูปภาพ.....	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
3.1 การถ่ายเทความร้อน.....	8
3.1.1 การถ่ายเทความร้อน โดยการนำ.....	9
3.1.2 การถ่ายเทความร้อน โดยการพา.....	13
3.1.3 การถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสี.....	16
3.2 ก๊าซเชื้อเพลิง.....	20
3.2.1 ชนิดของก๊าซเชื้อเพลิง.....	20
3.2.2 คุณสมบัติของก๊าซ LPG.....	21
3.2.3 อุณหภูมิของการจุดติดไฟ.....	22
3.2.4 อุณหภูมิของเปลวไฟ.....	22
3.2.5 อัตราส่วนปริมาตรของเหลวต่อแก๊ส.....	22
3.2.6 ค่าความร้อนของการเผาไหม้.....	22
3.2.7 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้.....	23
3.2.8 สี กลิ่น ความเป็นพิษและการละลาย.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 คุณสมบัติของวัสดุพูน.....	24
3.3.1 ประโยชน์ของวัสดุพูนในวิศวกรรมการเผาไหม้.....	24
3.3.2 การเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน.....	25
3.3.3 หลักการทำงานการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน.....	25
3.3.4 การหมุนเวียนความร้อนโดยการเปลี่ยนรูปความร้อนระหว่างการพา ความร้อนและแผ่รังสีความร้อนในวัสดุพูน.....	26
3.3.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่า Preheat Air Temperature ( $T_{pd}$ ).....	27
3.4 การเผาไหม้.....	28
3.4.1 ปฏิกริยาการเผาไหม้.....	29
3.4.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้.....	30
3.4.3 ปริมาณอากาศทางทฤษฎี อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง.....	31
3.4.4 การหาปริมาณอากาศเพื่อเผาไหม้ทางทฤษฎี.....	32
3.4.5 การหาอัตราส่วนสมมูล.....	32
3.4.6 การหาปริมาณอากาศส่วนเกิน.....	33
3.5 เทคนิคการเผาไหม้อย่างเป็นขั้นตอน.....	33
3.6 การปล่อยมลพิษ.....	34
3.6.1 ออกไซด์ของไนโตรเจน.....	34
3.6.2 มลพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์.....	34
3.7 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง.....	35
3.7.1 ค่าความร้อนขั้นสูง.....	35
3.7.2 ค่าความร้อนขั้นต่ำ.....	35
3.8 ดัชนีบ่งชี้สมรรถนะของเตาเผาไหม้.....	36
บทที่ 4 การประเมินความร้อนสูญเสียที่เปลือกและการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบเตาเผาไหม้ วัสดุพูน.....	37
4.1 การคำนวณเพื่อประเมินความร้อนสูญเสียที่เปลือกเตาเผาไหม้วัสดุพูน.....	37
4.2 การกำหนดเงื่อนไขการทดสอบเตาเผาไหม้วัสดุพูน.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การคำนวณหาอุณหภูมิอะเดียแบติก.....	42
บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	44
5.1 ระบบการทดลองและอุปกรณ์.....	44
5.1.1 เตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับ อากาศเป็นชั้น.....	45
5.1.2 ระบบการวัดอุณหภูมิ.....	46
5.1.3 การวัดมลพิษ.....	46
5.2 พารามิเตอร์ในการทดลอง.....	47
5.3 วิธีการทดลอง.....	48
5.3.1 การเก็บข้อมูล.....	48
5.4 เงื่อนไขการทดลอง.....	48
5.4.1 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วน แรก.....	50
5.4.2 การศึกษาอิทธิพลอากาศส่วนเกิน.....	50
บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	51
6.1 การศึกษาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ส่วนแรกภายในเตาเผาไหม้วัสดุพูน กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110%....	52
6.2 การศึกษาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ส่วนแรกภายในเตาเผาไหม้วัสดุพูน กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110%....	62
6.3 การศึกษาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ส่วนแรกเท่ากับ 1.5 ที่ค่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110%, 150% และ 180 % .....	66
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	71
7.1 สรุปผลการทดลอง.....	71
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
บรรณานุกรม.....	74
ภาคผนวก ก : อุปกรณ์การทดลอง.....	76
ภาคผนวก ข : ตัวอย่างการคำนวณ.....	81
ภาคผนวก ค : แบบขึ้นชิ้นส่วนต่าง.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ง : บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	98



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของ LPG สถานะของเหลว.....	21
ตารางที่ 3.2 ค่าความร้อนของการเผาไหม้แก๊ส LPG.....	23
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์สำหรับทดลองสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่าย ของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น.....	47
ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก.....	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	แผนผังแสดงการฉีดเชื้อเพลิง 3 ชั้นของเตาเผาไหม้วัสดุพอรุน .....	6
รูปที่ 3.1	แสดงเครื่องหมายของค่า $dT/dx$ สำหรับการนำความร้อนและแสดงทิศทาง การไหลของความร้อน.....	10
รูปที่ 3.2	แสดงการนำความร้อนผ่านผนังราบที่มีค่าการนำความร้อน $k$ คงที่ .....	10
รูปที่ 3.3	แสดงการนำความร้อนแบบมิติเดียวที่ไหลผ่านผนังหลายชั้น และการเปรียบเทียบ กับวงจรไฟฟ้า.....	12
รูปที่ 3.4	แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิเหนือแผ่นวัตถุร้อนของการพา ความร้อนแบบบังคับ.....	14
รูปที่ 3.5	แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิของของไหลบนแผ่นวัตถุเอียงร้อน ของการพาความร้อนแบบอิสระ.....	15
รูปที่ 3.6	แสดงวงจรความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเมื่อผิวทั้งสองด้าน มีการถ่ายเทความร้อน โดยการพา.....	16
รูปที่ 3.7	แสดงการนำความร้อนตัวกลางพิกัดทรงกลม $(r, \theta, \phi)$ .....	19
รูปที่ 3.8	แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผาไหม้ชนิดที่มีและไม่มีลมหมุนเวียนความร้อน.....	25
รูปที่ 3.9	แสดงหลักการทำงานของวัสดุพอรุน.....	27
รูปที่ 5.1	แสดงชุดอุปกรณ์เตาเผาไหม้วัสดุพอรุนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น.....	44
รูปที่ 5.2	แสดงขนาดเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้นและลักษณะการจ่ายอากาศ....	46
รูปที่ 5.3	แสดงเครื่องมือวัดไอเสียของ Testo รุ่น 350 XL.....	47
รูปที่ 5.4	แผนผังการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก.....	50
รูปที่ 5.5	แผนผังการศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนเกิน.....	50
รูปที่ 6.1	แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูงกรณี ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %.....	52
รูปที่ 6.2	แสดงสถานะของส่วนผสมที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้วัสดุพอรุน.....	54
รูปที่ 6.3	แสดงปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %....	56
รูปที่ 6.4	แสดงปริมาณ NO ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %....	57
รูปที่ 6.5	แสดงประสิทธิภาพการเผาไหม้ภายในเตาเผาวัสดุพอรุน กรณีปริมาณอากาศส่วนเกิน เท่ากับ 110 %.....	60
รูปที่ 6.6	แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูงกรณี ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 %.....	62

เอกสารนี้ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % เพื่อให้การศึกษานี้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 6.7 แสดงปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 %...	63
รูปที่ 6.8 แสดงปริมาณ NO ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 %...	64
รูปที่ 6.9 แสดงประสิทธิภาพการเผาไหม้ กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %.....	65
รูปที่ 6.10 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูงกรณีอัตราส่วนสมมูล เท่ากับ 1.5 .....	66
รูปที่ 6.11 แสดงปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้กรณีอัตราส่วนสมมูล เท่ากับ 1.5.....	68
รูปที่ 6.12 แสดงปริมาณ NO ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้กรณีอัตราส่วนสมมูล เท่ากับ 1.5 .....	69
รูปที่ 6.13 แสดงประสิทธิภาพการเผาไหม้ ภายในเตาเผาวัสดุพูน กรณีอัตราส่วนสมมูล..... เท่ากับ1.5.....	70
รูปที่ 7.1 แผนผังแสดงการฉีดเชื้อเพลิง 3 ชั้นของเตาเผาไหม้วัสดุพูน .....	73



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$(A/F)$	อัตราส่วนของปริมาณอากาศต่อปริมาณของเชื้อเพลิง, $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
$(A/F)_{\text{Stoic}}$	อัตราส่วนของปริมาณอากาศต่อปริมาณของเชื้อเพลิงตามทฤษฎี, $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
$C_p$	ค่าความจุความร้อนของอากาศ, $\text{kJ/kg.K}$
$C_p$	ค่าความจุความร้อนของก๊าซไอเสีย, $\text{kJ/kg.K}$
$D$	เส้นผ่าศูนย์กลางของเตาเผา, m
$D_o$	เส้นผ่าศูนย์กลางของห้องเผาไหม้, m
$(F/A)_{\text{Stoic}}$	อัตราส่วนของปริมาณเชื้อเพลิงต่อปริมาณของอากาศตามทฤษฎี, $\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{kg}_{\text{air}}$
$(F/A)$	อัตราส่วนของปริมาณเชื้อเพลิงต่อปริมาณของอากาศ, $\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{kg}_{\text{air}}$
$h_{fg}$	เอนทาลปีจำเพาะของการกลายเป็นไอหรือความร้อนแฝง, $\text{kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$
$HHV$	ค่าความร้อนขั้นสูง, $\text{kJ/kg}$
$LHV$	ค่าความร้อนขั้นต่ำ, $\text{kJ/kg}$
$m_{\text{air}}$	มวลของอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาการเผาไหม้, kg
$\dot{m}_{\text{air}}$	อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย $\text{kg/s}$
$m_{\text{fuel}}$	มวลของเชื้อเพลิงที่เข้าทำปฏิกิริยาการเผาไหม้, kg
$\dot{m}_{\text{fuel}}$	อัตราป้อนของเชื้อเพลิง, $\text{kg/s}$
$m_{\text{H}_2}$	มวลของไฮโดรเจนต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง, $\text{kg}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
$m_w$	มวลของไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง, $\text{kg}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
M.W.	มวลโมเลกุล, $\text{g}/\text{mole}$
$N_i$	โมลของก๊าซผสม, mole
$P$	ความดัน, Pa
$P_i$	ความดันย่อย, Pa
$q$	ภาระความร้อนที่เตาเผาผลิตได้, $\text{kJ/hr}/\text{m}^3$
$Q$	ค่าความร้อนของแกลบ, $\text{kJ/kg}$
$q_1$	ความร้อนที่ถ่ายเทสู่น้ำที่นำไปใช้ประโยชน์, $\text{kJ/s}$
$q_2$	ความร้อนสุทธิในก๊าซไอเสียที่ออกจากเตาเผา, $\text{kJ/s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$q_3$	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในจีเส้า, kJ/s
$q_4$	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์, kJ/s
$q_5$	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา, kJ/s
$q_{air}$	พลังงานจากอากาศ, kJ/s
$q_{fuel}$	พลังงานที่อยู่ภายในเชื้อเพลิง, kJ/s
$Q_S$	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิด, l/min
$Q_T$	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทั้งหมด, l/min
$r$	ระยะของตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี, m
$R$	รัศมีของเตาเผา, m
$r/R$	ระยะที่ทำการวัดจากกึ่งกลางเตาต่อรัศมีของเตาเผา
$T_{flue\ gas}$	อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย, K
$T_{ambien}$	อุณหภูมิอากาศภายนอก, K
$U$	ความเร็วตามแนวรัศมี, m/s
$V$	ความเร็วตามแนวเชิงมุม, m/s
$W$	ทิศทางความเร็วตามแนวแกน, m/s
$x$	ความสูง ณ ตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิตามแนวแกน, m
$x/D$	ความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเตาเผา
$\% \text{ stoic air}$	เปอร์เซ็นต์อากาศพอดีทางทฤษฎี
$\% \text{ excess air}$	เปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกิน
$\eta_{com}$	ประสิทธิภาพการเผาไหม้, %
$\Phi$	อัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ
$\rho_a$	ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m <sup>3</sup>
$\chi_i$	สัดส่วนโมลของก๊าซผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

มนุษย์นำพลังงานมาใช้ในการดำรงชีวิตตั้งแต่สมัยโบราณ เริ่มจากการใช้ไฟฟ้ที่เกิดจากการเสียดสีของไม้หรือหินเพื่อให้เกิดความอบอุ่น แสงสว่างและการหุงค้้อาหาร มนุษย์เริ่มรู้จักทำกังหันวิดน้ำ ทำกังหันลมเพื่อยกของหนักและบดเมล็ดค้้ัญฟูซึ่งจากที่ได้กล่าวเบื้องต้น ต้องยอมรับว่าพลังงานนั้นได้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตและได้เป็นปัจจัยพื้นฐานสำคัญในการดำรงชีวิต ในการส่งเสริมสวัสดิภาพ และความผาสุกของประชาชนแต่ละประเทศทั่วโลก รวมไปถึงพลังงานยังมีส่วนเกี่ยวข้องโดยตรงกับความมั่นคงของประเทศทั้งทางการเมือง การทหาร การเศรษฐกิจและสังคม ปัจจุบันมีการใช้พลังงานมากขึ้น ในการพัฒนาเศรษฐกิจทุกสาขา เช่น อุตสาหกรรม การคมนาคมขนส่ง การไฟฟ้า เป็นต้น

สำหรับประเทศไทยมีแหล่งพลังงานอยู่หลายประเภทเพื่อใช้ในการพัฒนาประเทศ แต่มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับประเทศอื่น ๆ ซึ่งจากปริมาณที่น้อยทำให้การใช้พลังงานของประเทศไทยนั้นต้องพึ่งพาพลังงานจากต่างชาติ โดยสามารถแยกประเภทของพลังงานได้เป็นใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าร้อยละ 44.1 น้ำมัน ร้อยละ 31.8 และถ่านหินร้อยละ 20.6 เป็นต้น ซึ่งการใช้พลังงานหลักของประเทศไทยนั้น ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า และจากภาวะความวิตกกังวลในปริมาณของน้ำมันดิบ ทำให้เกิดความผันผวนของราคาน้ำมันในตลาดโลกอย่างปัจจุบัน ซึ่งจากเหตุดังกล่าวส่งผลต่อประเทศไทยโดยตรง ทั้งทางด้านสังคมและเศรษฐกิจ

จากความวิตกกังวลจากปัญหาที่ได้กล่าวข้างต้น ทำให้นานาประเทศซึ่งรวมถึงประเทศไทยได้ตระหนักถึงการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และการหันไปพึ่งพิงพลังงานทางเลือกพลังงานหมุนเวียนมากขึ้น เช่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานขยะและพลังงานชีวมวล เป็นต้น รวมถึงในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นมา

จากงานวิจัยอาวุธ [1,2] ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของก๊าซ LPG ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้แบบวัสดุพอรุนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น ในแง่ของสมรรถนะความร้อนอันได้แก่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $\eta_c$ ) การกระจายอุณหภูมิและปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้น โดยงานวิจัยดังกล่าวได้พบประเด็นปัญหาขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิที่ลดต่ำลงเมื่อความสูงของเตาสูงขึ้น, การเกิด  $NO_x$  ในปริมาณที่มากในบางกรณี การกระจายตัวของอุณหภูมิไม่คงที่ตลอดทั้งเตาเผาไหม้ ผลกระทบต่อไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ เมื่อฉีดอากาศระหว่างชั้นเข้าไปในเตาเผาใหม่, หรืออุณหภูมิที่สูงไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานเมื่อติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยเมื่อสังเกตจากประเด็นปัญหาส่วนใหญ่ของเตาเผาใหม่ลักษณะนี้ พบว่าเมื่อฉีดอากาศระหว่างชั้นเข้าไปในเตาเผาใหม่ จะทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นลดลง เนื่องจากอากาศที่เพิ่มเข้าไประหว่างชั้นของเตาเผาใหม่นั้นส่งผลให้ความเร็วของผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่อากาศมากกว่าความเร็วของเปลวไฟ (Flame Speed) ส่งผลให้เกิดการดับของเปลวไฟ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการปรับปรุงเตาเผาใหม่เดิม ให้มีการจ่ายของผสมวัสดุพูนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้นขึ้น อีกทั้งเมื่อสืบค้นงานวิจัยพบประเด็นว่าเตาเผาใหม่ลักษณะนี้มีอิทธิพลต่อการเกิด NO ในปริมาณต่ำ [3,4] จึงทำให้ผู้วิจัยสนใจกลไกการก่อตัวของ NO ในเตาเผาใหม่วัสดุพูนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้น จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขึ้น

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. สร้างเตาเผาใหม่วัสดุพูนในระดับห้องปฏิบัติการที่มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้น
2. ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก ( $\phi$ ) ที่ส่งผลต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของเตาเผาใหม่วัสดุพูน โดยสมรรถนะของเตาเผาใหม่วัสดุพูนที่มีการจ่ายเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้น คือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ช่วงบริเวณที่เกิดการเผาไหม้และปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นบริเวณทางออกของเตาเผาใหม่วัสดุพูน
3. ทำการศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนค่าอากาศส่วนเกิน ที่ส่งผลต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของเตาเผาใหม่วัสดุพูน โดยสมรรถนะของเตาเผาใหม่วัสดุพูนที่มีการจ่ายเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้น คือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ช่วงบริเวณที่เกิดการเผาไหม้และปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นบริเวณทางออกของเตาเผาใหม่วัสดุพูน

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. การเผาไหม้ที่มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศแบบขั้นน่าจะช่วยให้การกระจายอุณหภูมิในเตามีความสม่ำเสมอและเกิดขึ้นในบริเวณที่กว้างมาก
2. การแบ่งเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ น่าจะช่วยให้อุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้มีระดับลดลง ส่งผลให้ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์มีระดับลดลง แต่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพของการเผาไหม้
3. ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่เผาไหม้ในช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ เมื่อมีปฏิสัมพันธ์ในเชิงความร้อนกับเม็ดวัสดุ น่าจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงอยู่ในระดับที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

### 1.4.1 บันทึกลงและวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

1. การกระจายอุณหภูมิตามระดับความสูงของเตาเผาไหม้วัสดุพูน
2. การปล่อยมลพิษ
3. ประสิทธิภาพการเผาไหม้

### 1.4.2 ศึกษาผลกระทบในข้อที่ 1.4.1 เมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

1. สัดส่วนของเชื้อเพลิงกับอากาศในแต่ละชั้น

### 1.4.3 ขอบเขตของการทดลอง

1. ใช้เม็ดอลูมินา (Alumina Ceramic) ขนาด 0.5-2 cm เป็นวัสดุสร้างความพูน
2. พลังงานความร้อนที่เตาสามารถผลิตได้คือ 3 kw
3. ปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ 6 L/min
4. ใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีสัดส่วน Propane : Butane เท่ากับ 40:60 โดยมีค่าความร้อนและความหนาแน่นเท่ากับ 45.8 MJ/kg และ 2.001 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ

### 1.4.4 การทำให้เป็นปัญหาอย่างง่าย

1. ค่า Thermal conductivity และ Specific heat ของ LPG ใช้จากคุณสมบัติของ โพรเพน
2. ค่า Flame speed ของ LPG ใช้คุณสมบัติของ โพรเพนที่เงื่อนไขแบบบาง
3. ในการหาค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ ให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการเผาไหม้ เป็น LPG (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>+C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)
4. วัสดุสร้างความพูนไม่ทำปฏิกิริยาในการเผาไหม้
5. การเรียงตัวกันของวัสดุสร้างความพูนถือว่าเรียงตัวกันแบบ random

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ทำการศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับเตาเผาวัสดุพูนชนิดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ทำการศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง
3. ออกแบบสร้างเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายของเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น
4. เตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง
5. ทำการทดลองและเก็บบันทึกผลการทดลอง
6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนา และการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้น โดยใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง
2. เพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผาไหม้วัสดุพูนให้มีการกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอ
3. เป็นต้นแบบของเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทรรศน์

จากการเติบโตทางเศรษฐกิจ ตลอดจนความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ที่มีเป้าหมายเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ ได้ทำให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมากมายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอีกในอนาคต โดยพลังงานที่เราใช้อยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ทั้งน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ เพื่อแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานอย่างอื่น เช่น พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น โดยผลจากความต้องการใช้พลังงานดังที่กล่าวมานี้ ได้ส่งผลทำให้เกิดมลภาวะเพิ่มสูงขึ้น [4] จนส่งผลให้อุณหภูมิของโลกเพิ่มสูงขึ้น เกิดภาวะเรือนกระจก จนปัจจุบันเกิดเป็นภาวะโลกร้อน ที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม และธรรมชาติ โดยทางเลือกหนึ่งที่ได้พิสูจน์แล้วว่าเป็นทางเลือกที่ใช้ในการจัดการกับปัญหาดังกล่าวได้ คือ การเผาไหม้วัสดุพรุน (Porous Media Combustor / Porous Medium Combustor : PMC) [5] โดยในเบื้องต้นก่อนที่จะกล่าวถึงรูปแบบการเผาไหม้ในลักษณะนี้ เราอาจต้องกล่าวถึงวัสดุพรุนในเบื้องต้นก่อน

วัสดุพรุน เป็น วัสดุที่มีพื้นผิวต่อปริมาตรสูงทนต่ออุณหภูมิได้สูง และมีบทบาทที่สำคัญต่อการเผาไหม้ คือเป็นตัวทำให้เกิดการหมุนเวียนพลังงานภายในระบบ [6] โดยวัสดุพรุนจะมีส่วนสำคัญในการส่งเสริมการเผาไหม้ โดยมีผลการยืนยันจากงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศว่าวัสดุพรุนเป็นส่วนที่กระจายความร้อน [7] และจากการที่วัสดุพรุนมีคุณสมบัตินี้ทำให้ได้มีการประยุกต์ใช้วัสดุพรุนมาใช้ในการเผาไหม้รูปแบบต่าง ๆ ตั้งแต่การนำวัสดุพรุนมาเป็นส่วนหนึ่งของเตาที่ใช้ในการประกอบอาหาร เพื่ออุ่นอาหารให้ร้อน จนถึงระดับการนำวัสดุพรุนมาใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ เป็นต้น

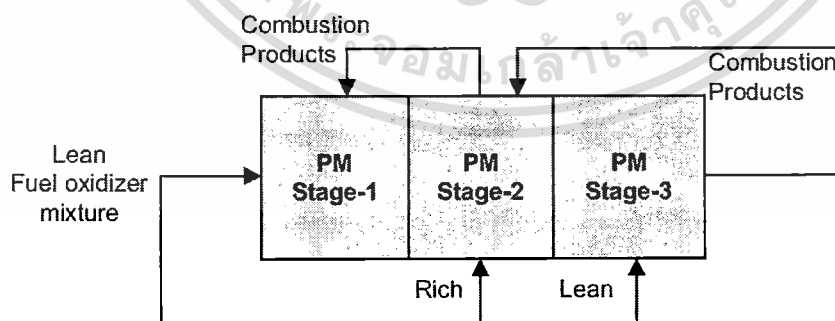
ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่พัฒนาเทคโนโลยีการเผาไหม้ด้วยวัสดุพรุน โดยการพัฒนาดังกล่าวมีทั้งการพัฒนาทางทฤษฎี และการทำการทดลองการเผาไหม้วัสดุพรุน [4] โดยในส่วนของ การทดลองการเผาไหม้นั้น จากการสืบค้นของผู้วิจัย พบว่าการประยุกต์ใช้วัสดุพรุน จะเป็นการใช้ในเตาเผาไหม้ โดยประเภทของเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเป็นเชื้อเพลิงประเภทก๊าซธรรมชาติ และบางส่วนเป็นก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) แต่จากการสืบค้นก็พบว่ายังมีงานวิจัยอีกบางส่วนที่ได้มีการประยุกต์เป็นเชื้อเพลิงประเภทอื่น อาทิ เช่น เชื้อเพลิงเหลว [7] หรือแม้กระทั่งการนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาเป็นเชื้อเพลิง [8]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของการนำวัสดุพรุนมาประยุกต์ใช้กับเตาเผาไหม้นั้น พบว่าประสิทธิภาพของเตาเผาไหม้วัสดุพรุน มีประสิทธิภาพดีกว่าเตาเผาไหม้แบบ Free Flame [6,8] เนื่องจากมีอัตราการเผาไหม้ที่สูง และสามารถทำงานได้ในช่วงอัตราการเผาไหม้ที่กว้างกว่าแบบ Free Flame Combustion [9, 10] โดยรูปแบบของการวิจัยเตาเผาไหม้วัสดุพรุน สามารถแบ่งประเภท

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาได้เป็น 2 ประเภท คือเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเตาเผาไหม้เพียงอย่างเดียว และการศึกษาเตาเผาไหม้ที่มีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไว้ภายใน [10, 11] โดยการศึกษาทั้งสองประเภทส่วนใหญ่มักเน้นศึกษาอิทธิพลของขนาดของวัสดุพูน [12], อิทธิพลของอากาศส่วนเกิน [6], อิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูล [9, 13] และลักษณะการแบ่งการฉีดเชื้อเพลิงผสมอากาศ [4, 5, 14, 15, 16]

จากประเด็นการศึกษาที่ได้กล่าวมาข้างต้น เราจะพบว่าการแบ่งการฉีดเชื้อเพลิงผสมอากาศเป็นหนึ่งในจำนวนการศึกษาที่นักวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสนใจ เนื่องจากผลการศึกษาพบว่าการแบ่งการฉีดเชื้อเพลิงผสมอากาศ หรืออาจเรียกว่าการเผาไหม้เป็นขั้นในเตาเผาไหม้วัสดุพูนนั้น (Multi- Staged Combustion) เป็นการประยุกต์ใช้ที่ทำให้เกิดมลภาวะต่ำกว่าการเผาไหม้แบบฉีดเชื้อเพลิงชั้นเดียว (Single Staged Combustion) [16] โดยผลคือ มีค่า CO และ  $\text{NO}_x$  ต่ำ จนทำให้บางครั้งเรียกเตาเผาชนิดนี้ว่าเป็นแบบ Low  $\text{NO}_x$  หรือ Ultra Low  $\text{NO}_x$  [14] โดยเตาเผาไหม้ลักษณะนี้นั้น จากงานวิจัยในอดีตพบว่า จะมีการศึกษาโดยแบ่งการฉีดเชื้อเพลิงเป็นแบบ Lean – Rich Combustion [15] และแบบ Rich – Lean Combustion [4, 5, 14, 16] โดยจากผลการสรุปในงานวิจัยล่าสุดที่ชื่อว่า “Combustion in porous media and its applications - A Comprehensive survey” [5] นั้นได้กล่าวว่าการเผาไหม้แบบฉีดเชื้อเพลิงเป็นขั้นที่นิยมนั้น จะมีสองแบบ คือ แบบการแบ่งเป็น 2 ขั้น โดยการจ่ายเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมหนานั้นต้องเกิดขึ้นก่อนการเผาไหม้ของส่วนผสมบาง (Rich – Lean Combustion) และถ้าจะให้สมบูรณ์คือการฉีดเชื้อเพลิงเป็น 3 ขั้น โดยขั้นแรกเป็นของผสมแบบ Lean Fuel Oxidizer, ขั้นที่สองเป็นแบบ Rich Combustion และขั้นที่สามเป็นแบบ Lean Combustion โดยในขั้นที่ 1 และ 3 ยังเอาของเหลือที่เป็นความร้อนจากกระบวนการผลิต / ความร้อนส่วนที่เหลือที่ได้จากการเผาไหม้ทางออกสุดท้ายกลับเข้ามาช่วยในการเผาไหม้เพิ่มเติม ดังแสดงในรูป 2.1 แผนผังแสดงการฉีดเชื้อเพลิง 3 ขั้นของเตาเผาไหม้วัสดุพูน



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงการฉีดเชื้อเพลิง 3 ขั้นของเตาเผาไหม้วัสดุพูน

จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวข้างต้นเราจึงอาจสรุปได้ว่า การเผาไหม้ของเตาเผาไหม้วัสดุพูนหรือหัวเผาวัสดุพูนที่มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้น นั้นจะมีประสิทธิภาพ รวมถึงการปล่อยก๊าซไอเสียที่ต่ำกว่าเตาเผาไหม้หรือหัวเผาวัสดุพูนแบบปรกติ โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้นแล้วคุณสมบัติของเตาเผา / หัวเผาใหม่วัสดุ  
 พรุน ยังคงแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะเฉพาะคือ ช่วงการเผาไหม้ที่กว้าง (Extended reaction zone)  
 และมลพิษต่ำ (Low emission) นอกจากนี้ถ้าทำการเผาไหม้ โดยใช้เตาเผาใหม่วัสดุพรุนที่มีการจ่าย  
 ของผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นขั้นแล้ว จะสามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นได้  
 ส่งผลให้อัตราการเกิด Thermal  $\text{NO}_x$  มีปริมาณลดลง ซึ่งจะมีปริมาณ  $\text{NO}_x$  ลงได้ประมาณ 50-80%  
 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ  $\text{NO}_x$  ที่เกิดขึ้นกับเตาเผาไหม้แบบทั่วๆ ไป (Conventional combustor) ดังนั้น  
 จากประเด็นปัญหาเดิมของเตาเผาใหม่วัสดุพรุนที่ผ่านมาของกลุ่มวิจัย [6] ซึ่งพบว่าประเด็นปัญหา  
 ของอุณหภูมิที่ลดต่ำลงเมื่อฉีดอากาศระหว่างชั้นไปในเตาเผาไหม้ อุณหภูมิที่ลดต่ำลงเมื่อความสูง  
 ของเตาสูงขึ้น การเกิด  $\text{NO}_x$  ในปริมาณที่มาก การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่คงที่ตลอดทั้งเตาเผา  
 ใหม่ หรืออุณหภูมิที่สูงไม่เพียงพอต่อการนำมาไปใช้งานเมื่อติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน  
 ภายในเตา จากปัญหาที่ได้กล่าวข้างต้นจึงทำให้เกิดการพัฒนางานวิจัยขั้นนี้ขึ้น โดยได้พัฒนาเตาเผา  
 ใหม่วัสดุพรุนให้มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับ  
 ระบบของเซลล์เชื้อเพลิงและนำไปติดตั้งเป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้กับห้องปฏิบัติการในการ  
 สังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนและอุ่นก๊าซออกซิเจนก่อนเข้าทำปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิง โดย  
 วัตถุประสงค์ของการวิจัยขั้นนี้ คือ การพัฒนาเตาเผาใหม่ให้มีประสิทธิภาพสูง และมีมลพิษน้อย  
 เพื่อให้เตาเผาใหม่วัสดุพรุนเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำไปใช้ในระบบของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

## บทที่ 3

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 3.1. การถ่ายเทความร้อน

เมื่อจุดสองจุดมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันก็จะมีพลังงานถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ พลังงานกำลังเคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้เรียกว่า ความร้อน ถึงแม้ว่าวิชาเทอร์โมไดนามิกส์จะเป็นวิชาที่ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทของพลังงานก็ตาม แต่ก็เป็นการศึกษาเฉพาะในกรณีที่ระบบความร้อนนั้นอยู่ในสถานะที่สมดุลแล้วเท่านั้น ดังนั้นกฎเกณฑ์ต่างๆ ในวิชาเทอร์โมไดนามิกส์จึงใช้ได้เพียงแต่ทำนายจำนวนพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบความร้อนที่อยู่ในสถานะสมดุล จากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งเท่านั้น ไม่สามารถที่จะบอกให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงไร ศาสตร์จากวิชาการถ่ายเทความร้อนนี้จะนำไปตามกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยการวิเคราะห์ที่สามารถนำมาใช้หาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้

รายละเอียดที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อนนั้นพิจารณาได้จากแหล่งที่กักความร้อนขึ้นเมื่อนำไปแช่ทิ้งไว้ในน้ำร้อน จากกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ จะทำให้สามารถหาอุณหภูมิของแหล่งที่กักและของน้ำร้อนได้เมื่อแหล่งที่กักและน้ำร้อนอยู่ในสถานะสมดุลแล้ว แต่ก็ไม่สามารถบอกให้ทราบถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิในช่วงเวลาที่กำหนดให้และไม่สามารถบอกให้ทราบว่าจะต้องใช้เวลานานเท่าไรแหล่งที่กักและน้ำร้อนจึงจะมีอุณหภูมิตามต้องการ ส่วนการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนนั้นจะสามารถทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนไปยังแหล่งที่กักได้ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งที่กัก และของน้ำร้อนในฟังก์ชันของเวลาได้อีกด้วย

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่ดีนั้นจะต้องทราบถึงกลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบต่าง ๆ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ

- การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ หรือการนำความร้อน (conduction)
- การถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือการพาความร้อน (convection)
- การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี หรือการแผ่รังสีความร้อน (radiation)

ในการออกแบบระบบความร้อนและการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนความร้อน นั้นจะต้องเข้าใจในกลไกของการถ่ายเทความร้อนแต่ละแบบ และต้องทราบถึงความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนแบบนั้น ๆ สำหรับในบทนี้จะพิจารณาถึงกฎเกณฑ์ที่สำคัญ ๆ ของการถ่ายเทความร้อนและการใช้งานที่พบบ่อย ๆ ส่วนรายละเอียดของการถ่ายเทความร้อนแต่ละแบบนี้จะกล่าวถึงในภายหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (Conduction Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำหรือการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางทึบแสงเมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิเกิดขึ้นในวัตถุก้อนนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำซึ่งใช้  $q_k$  เป็นสัญลักษณ์นี้จะเป็นสัดส่วนกับ  $dT/dx$  ซึ่งเป็นค่าความลาดชันของอุณหภูมิ คูณกับพื้นที่  $A$  ที่ความร้อนไหลผ่าน (รูปที่ 3.1a) ถ้าหากจะเขียนเป็นสมการแล้วจะได้รูปสมการเป็น

$$q_k \propto A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

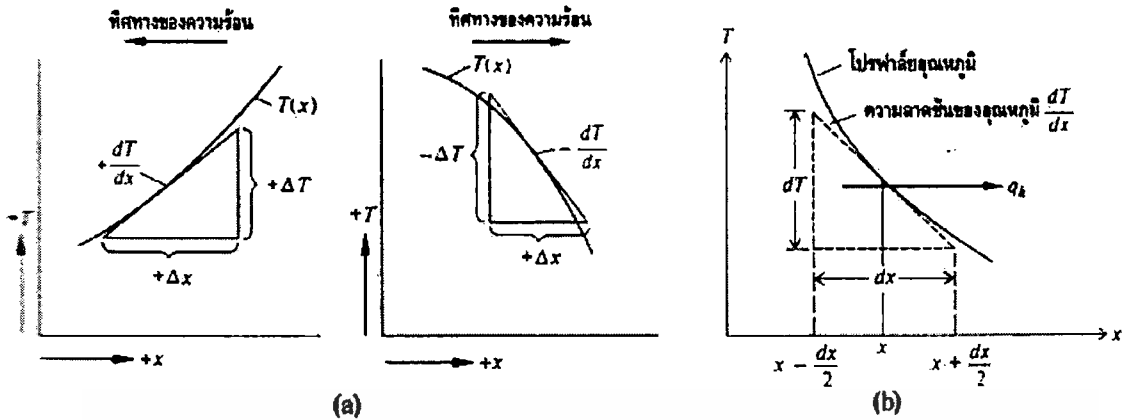
เมื่อ  $q_k$  = อัตราการถ่ายเทความร้อน โคนนำ หรือการนำความร้อน, W  
 $A$  = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน,  $m^2$   
 $T$  = อุณหภูมิ, K  
 $x$  = ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน, m

สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity,  $k$ ) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน ฉะนั้นอัตราการนำความร้อนจึงมีค่าเป็น

$$q_k = -kA \times \frac{dT}{dx} \quad (3.2)$$

สมการ(3.2)นี้มีชื่อเรียกว่า กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction) เครื่องหมายลบที่อยู่ทางด้านขวามือของสมการเป็นผลที่เนื่องมาจากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดไว้ว่า ความร้อนจะต้องไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมิที่อยู่ในรูปที่ 3.1b นั้นมีเครื่องหมายเป็นลบ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิลดน้อยลงเมื่อระยะทาง  $x$  เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นถ้าหากต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเป็นบวกเมื่อไหลไปในทางทิศทางที่เป็นบวกแล้ว ก็จะต้องเติมเครื่องหมายลบ ไว้ทางด้านขวามือของสมการ (3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 (a) แสดงเครื่องหมายของค่า  $dT/dx$  สำหรับการนำความร้อน  
(b) แสดงทิศทางการไหลของความร้อน

### 3.1.1.1 การนำความร้อนในผนังราบ (Plane wall)

ให้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนที่ไหลผ่านผนังราบเมื่อผิวมีอุณหภูมิคงที่และมีขนาดสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวดังรูปที่ 3.2 เนื่องจากผิวทั้งสองอุณหภูมิที่แตกต่างกันดังนั้นจึงมีความร้อนไหลจากผิวที่มีอุณหภูมิสูงไปยังผิวที่มีอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 3.2 แสดงการนำความร้อนผ่านผนังราบที่มีค่าการนำความร้อน  $k$  คงที่

ถ้าหากค่าการนำความร้อน  $k$  ของผนังมีค่าคงที่แล้ว เมื่อแทนค่า  $k$  นี้ลงไปในสมการ (3.2) แล้วอินทิเกรต ก็จะได้อัตราการนำความร้อนเป็น

$$q_k = -\frac{kA}{L}(T_1 - T_2) = \frac{kA}{L}(T_1 - T_2) \quad (3.3)$$

เมื่อ  $q_k$  = อัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนัง, Watt

$k$  = ค่าการนำความร้อนของผนัง, W/m.K

$A$  = พื้นที่ของผนังที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน,  $m^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $L$  = ความหนาของผนัง, m  
 $T_1$  = อุณหภูมิทางด้านซ้าย ที่  $(x=0)$ , K  
 $T_2$  = อุณหภูมิทางด้านซ้าย ที่  $(x=L)$ , K

วัตถุเป็นจำนวนมากที่มีค่าการนำความร้อน  $k$  ไม่คงที่ แต่จะแปรค่าไปตามอุณหภูมิและมีหลายกรณีที่สามารถประเมินได้ว่า ค่าการนำความร้อน  $k$  นี้แปรค่าเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิ นั่นคือ

$$k = k_0(1 + \beta T) \quad (3.4)$$

- เมื่อ  $k$  = ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิ  $T$  ใด ๆ, W/m.K  
 $k_0$  = ค่าการนำความร้อนของอุณหภูมิที่อ้างอิงถึง, W/m.K  
 $\beta$  = ค่าคงที่จากการทดลอง  
 $T$  = อุณหภูมิใด ๆ, K

สำหรับกรณีดังกล่าวเมื่อแทนค่าเมื่อแทนค่า  $k = k_0(1 + \beta T)$  นี้ลงในสมการ (3.2) แล้วอินทิเกรต ก็จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนเป็น

$$q_k = \frac{k_0 A}{L} \left[ (T_1 - T_2) + \frac{\beta}{2} (T_1^2 - T_2^2) \right] \quad (3.5)$$

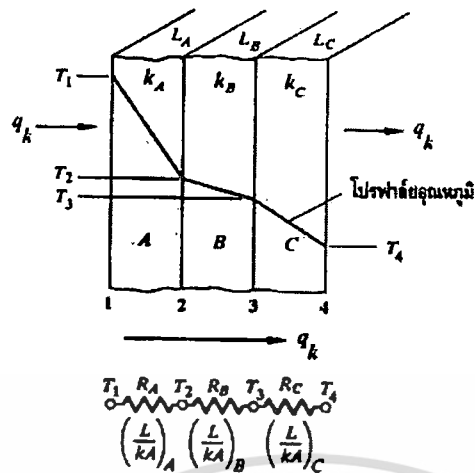
หรือ 
$$q_k = \frac{k_m A}{L} (T_1 - T_2) \quad (3.6)$$

- เมื่อ  $k_m$  = ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย  $\frac{T_1 + T_2}{2}$

### 3.1.1.2 การนำความร้อนในผนังราบที่เรียงซ้อนกันแบบอนุกรม (Plane walls in series)

ถ้าหากความร้อนไหลผ่านผนังที่เรียงซ้อนกันหลายชั้น โดยการนำ เช่น ผนังของอาคารบ้านเรือนแล้วการวิเคราะห์เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนก็จะยากยิ่งขึ้น ในกรณีที่สภาวะต่าง ๆ คงที่หรือไม่แปรตามเวลาแล้วนั้น อัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนังแต่ละชั้นจะมีขนาดเท่า ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงการนำความร้อนแบบมิติเดียวที่ไหลผ่านผนังหลายชั้น และการเปรียบเทียบกับวงจรไฟฟ้า

ความลาดชันของอุณหภูมิในผนังแต่ละชั้นมีค่าแตกต่างกัน ในกรณีนี้อัตราการความร้อนที่ไหลผ่านผนังแต่ละชั้นของรูปที่ 3.3 จะมีค่าเป็น

$$q_k = \left( \frac{kA}{L} \right)_A (T_1 - T_2) = \left( \frac{kA}{L} \right)_B (T_2 - T_3) = \left( \frac{kA}{L} \right)_C (T_3 - T_4) \quad (3.7)$$

เมื่อ  $T_2$  และ  $T_3$  ออกจากสมการ (3.7) แล้วก็จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อน

$$q_k = \frac{(T_1 - T_4)}{\left( \frac{L}{kA} \right)_A + \left( \frac{L}{kA} \right)_B + \left( \frac{L}{kA} \right)_C} \quad (3.8)$$

สำหรับในกรณีที่ผนังเรียงซ้อนกันถึง  $n$  ชั้น และแต่ละชั้นสัมผัสกันเต็มพื้นที่แล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ไหลผ่านผนังจำนวน  $n$  ชั้นก็จะมีค่าเป็น

$$q_k = \frac{(T_i - T_{i+1})}{\left( \frac{L}{kA} \right)_i} = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{L}{kA} \right)_i} \quad (3.9)$$

เมื่อ  $T_i$  = อุณหภูมิของผิวของผนังชั้นแรก, K

เอกสารนี้  $T_{n+1}$  = อุณหภูมิผิวของผนังที่  $n$ , K

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน(Convection heat transfer)

เมื่อของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ก็จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างของไหลกับวัตถุ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อน โดยการพาหรือการพาความร้อน กระบวนการพาความร้อนดังกล่าวนี้เป็นปรากฏการณ์พื้นๆ แต่กลไกของการถ่ายเทความร้อนนั้นซับซ้อนมาก สมการหลักๆที่สามารถใช้ในการคำนวณหาอัตราการพาความร้อนจากส่วนย่อยๆของระบบ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของระบบที่ให้ความร้อนและใช้ระบายความร้อน การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือการพาความร้อนนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ การพาความร้อนแบบอิสระ (free convection) และการพาความร้อนแบบบังคับ (force convection)

แรงที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนไหวของการพาความร้อนแบบอิสระนั้น เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในก้อนของไหล ที่เนื่องมาจากการที่ของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจนทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น ตัวอย่างของการพาความร้อนแบบอิสระนี้ได้แก่ การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังหรือหลังคาบ้านที่เกิดขึ้นในวันที่ไม่มีลมพัด การพาความร้อนภายในกาต้มน้ำที่มีขดลวดให้ความร้อน หรือการถ่ายเทความร้อนจากผิวของตัวเก็บความร้อนที่ได้มาจากดวงอาทิตย์ในช่วงที่ไม่มีลมพัด

การพาความร้อนแบบบังคับ จะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า เนื่องจากการไหลของการพาความร้อนแบบบังคับก็จะมีอัตราการพาความร้อนที่สูงกว่า แต่ไม่ว่าจะเป็นการพาความร้อนแบบไหนก็ตาม ต่างก็มีสมการสำหรับหาอัตราการพาความร้อนที่อยู่ในรูปของ กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ซึ่งมีรูปแบบสมการเป็น

$$q_c = \bar{h}_c A (T_s - T_{f,\infty}) \quad (3.10)$$

เมื่อ  $\bar{h}_c$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (average convective heat transfer coefficient) ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุ หรือ หนึ่งหน่วยการนำจากการพาความร้อน (unit thermal convective conductance),  $W/m^2.K$

$A$  = พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล,  $m^2$

$T_s$  = อุณหภูมิของผิววัตถุ, K

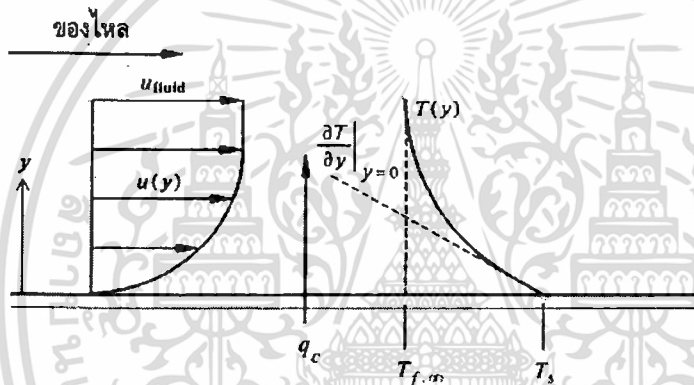
$T_{f,\infty}$  = อุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิว, K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า  $\bar{h}_c$  นี้หาได้ทั้งโดยวิธีวิเคราะห์และโดยวิธีทดลอง หน่วยของ  $\bar{h}_c$  ในระบบเอสไอ นั้นเป็นวัตต์ ต่อ ตารางเมตร ต่อ องศาเซลวิน

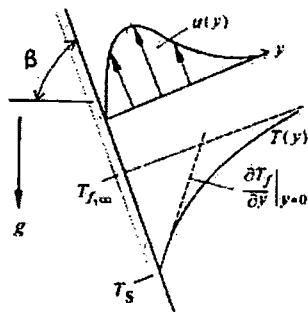
รูปที่ 3.4 เป็นรูปของแผ่นวัตถุร้อนที่ถูกทำให้เย็นลงในอากาศที่ถูกบังคับให้ไหลผ่านไปบนแผ่นวัตถุ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและของอุณหภูมิอีกด้วย จุดที่น่าสนใจจุดแรกก็คือความเร็ว  $u(y)$  จะลดน้อยลงในทิศทางที่วิ่งเข้าสู่ผิวของแผ่นวัตถุด้วยผลกระทบของแรงจากความเสียดทาน ที่เนื่องมาจากความหนืดของของไหลและเนื่องจากของไหลชั้นที่อยู่ติดกับผิววัตถุ นั้นมีความเร็วเป็นศูนย์ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ระหว่างผิววัตถุกับผิวของไหลนั้น ก็จะต้องเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ แต่เพียงอย่างเดียว นั่นก็คือ :

$$\frac{q_c}{A} = q_c'' = -K_f \left. \frac{\partial T}{\partial Y} \right|_{y=0} = \bar{h}_c (T_s - T_{f,\infty}) \quad (3.11)$$



รูปที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิเหนือแผ่นวัตถุร้อนของการพาความร้อนแบบ บังคับ

จากประเด็นดังกล่าวนี้เองจึงทำให้สามารถหาค่า  $(dT/dy)|_{y=0}$  ที่ผิวของวัตถุได้ ทั้งนี้ก็โดยการให้อัตราการนำความร้อนระหว่างผิววัตถุกับชั้นของไหลที่เกาะติดอยู่กับผิววัตถุ มีค่าเท่ากับ อัตราการพาความร้อนจากก้อนของไหลที่เกาะติดอยู่กับผิววัตถุ ไปยังก้อนของไหลหลักที่อยู่ห่างออกไป ของไหลที่มีความเร็วสูงจะมีผลทำให้ค่าความลาดชันของอุณหภูมิที่ผิววัตถุมีค่าสูงและทำให้ อัตราการนำความร้อนมีค่าสูงตามไปด้วย ค่าการนำความร้อนของก้อนของไหลก็เช่นเดียวกันจะมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนด้วย เช่น ค่าการนำความร้อน  $k_f$  ของน้ำจะมีค่ามากกว่า ค่า  $k_f$  ของอากาศ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $\bar{h}_c$  ของน้ำก็จะมีค่าสูงกว่า  $\bar{h}_c$  ของอากาศ



**รูปที่ 3.5** แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิของของไหลบนแผ่นวัตถุเชิงร้อนของการพาความร้อนแบบอิสระ

การพาความร้อนแบบอิสระก็มีสภาพเช่นเดียวกับการพาความร้อนแบบบังคับ ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างการพาความร้อนแบบบังคับ กับแบบอิสระก็คือความเร็วของของไหลของการพาความร้อนแบบบังคับนั้นเกิดจากแรงภายนอก ส่วนความเร็วของของไหลของการพาความร้อนแบบอิสระนั้น ในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างที่วัดจากผิวของวัตถุ ทั้งนี้เพราะผลกระทบจากความหนืดที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความแตกต่างของความหนาแน่นก็ยิ่งลดน้อยลงอย่างไรก็ตาม โดยปกติแล้วแรงลอยตัวจะลดน้อยลงในขณะที่ความหนาแน่นของของไหลค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเข้าสู่ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่รอบ ๆ เป็นผลให้ของไหลมีความเร็วสูงสุดและลดลงจนเป็นศูนย์เมื่อห่างออกไปจากผิวที่ร้อนนั้น สำหรับสนามอุณหภูมิของการพาความร้อนแบบบังคับ และแบบอิสระนั้นจะมีรูปร่างคล้ายคลึงกันและ ทั้งคู่ต่างก็มีกลไกของการถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุ เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการพา

จากรายละเอียดที่ผ่านมานั้นแสดงว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ความหนืด และความเร็วของของไหล รวมทั้งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางด้านความร้อนต่าง ๆ เช่น ค่าการนำความร้อน  $k$  และความร้อนจำเพาะ  $C_p$  ในการพาความร้อนแบบบังคับนั้นความเร็วของของไหลในระบบนั้นจะถูกกำหนดด้วยปั๊มหรือพัดลม แต่สำหรับความเร็วของของไหลที่ใช้พาความร้อนแบบอิสระนั้น จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผิววัตถุกับของไหล, สัมประสิทธิ์การขยายตัวของของไหลและสนามของแรง เช่น แรงดึงดูดของโลกเมื่อระบบนั้นอยู่บนพื้นโลก เป็นต้น

การถ่ายเทความร้อนโดยการพานี้ ก็สามารถนำมาเปรียบเทียบกับกรไหลของกระแสไฟฟ้าได้เช่นเดียวกัน จากสมการ (3.10) นั้น ค่าความต้านทานความร้อนของการถ่ายเทความร้อนโดยการพาจะมีค่าเป็น :

$$R_c = \frac{1}{h_c A} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานความร้อนที่ผิวสัมผัสนี้ สามารถไปรวมเข้ากับความต้านทานค่าอื่น ๆ ที่อยู่ในระบบได้โดยง่าย เช่น การถ่ายความร้อนจากบรรยากาศภายในผนังที่มีอุณหภูมิ  $T_i$  ผ่านผนังออกไปยังบรรยากาศภายนอกที่มีอุณหภูมิ  $T_o$  ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งในกรณีนี้จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็น

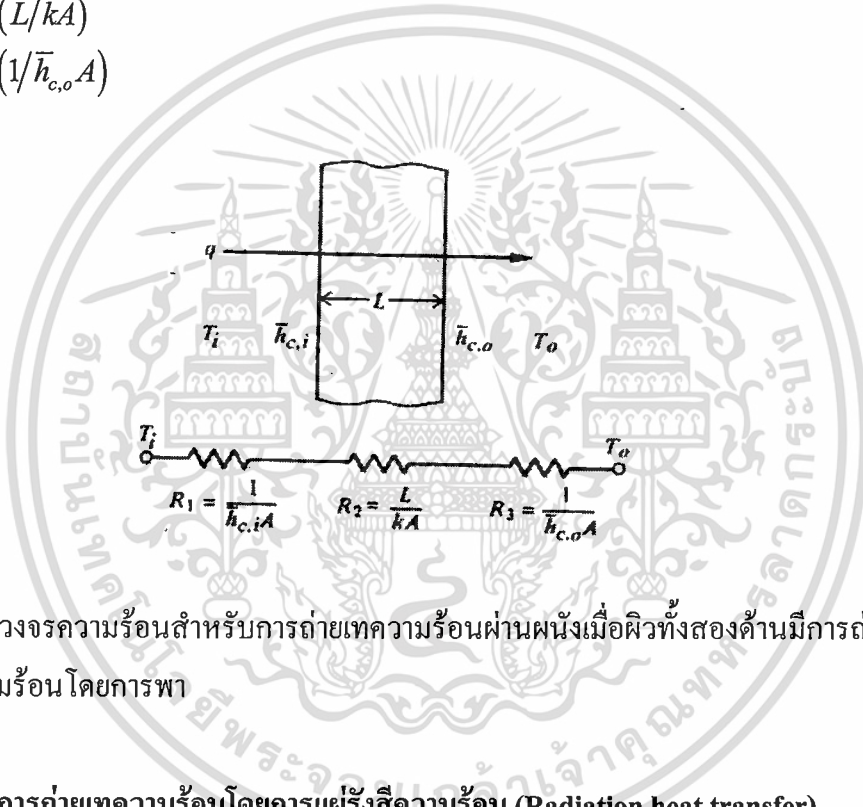
$$q = \frac{T_i - T_o}{\sum_{i=1}^3 R_i} = \frac{T_i - T_o}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3.13)$$

เมื่อ

$$R_1 = (1/\bar{h}_{c,i}A)$$

$$R_2 = (L/kA)$$

$$R_3 = (1/\bar{h}_{c,o}A)$$



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเมื่อผิวทั้งสองด้านมีการถ่ายเทความร้อนโดยการพา

### 3.1.3. การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)

ความร้อนจากการนำและการพา จะเคลื่อนที่ผ่านได้เฉพาะในกรณีที่ที่มีวัสดุมาเป็นตัวกลาง (Medium) เท่านั้น สำหรับความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้โดยไม่ต้องมีตัวกลางเลย เช่น ในบริเวณที่เป็นสุญญากาศเป็นต้น พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นจะเคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง ซึ่งมีความเร็วเท่ากับ  $3 \times 10^{10}$  cm/s พลังงานที่เคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีอยู่มากมายหลายชนิด เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีอินฟราเรด แต่สำหรับในที่นี้จะพิจารณาแต่เพียงพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนพลังงานที่ส่งออกจากผิววัตถุในรูปรังสีความร้อน (radiant heat) นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์และลักษณะของผิว วัตถุที่สามารถแผ่รังสีได้สูงสุด หรือที่เรียกว่า วัตถุดำ (black body) นั้นจะมีอัตราการแผ่รังสีความร้อน เป็น :

$$q_r = \sigma AT^4 \tag{3.14}$$

เมื่อ :  $q_r$  = อัตราความร้อนจากการแผ่รังสี, Watt  
 $A$  = พื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน,  $m^2$   
 $T$  = อุณหภูมิผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน, K  
 $\sigma$  = ค่าคงที่สเติฟาน – โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4$

จะเห็นได้จากสมการ (3.14)ว่า อัตราความร้อนจากการแผ่รังสีของวัตถุดำนี้แปรโดยตรงกับกำลังสี่ของอุณหภูมิสัมบูรณ์ และทั้ง ๆ ที่อัตราการแผ่รังสีความร้อนไม่ขึ้นอยู่กับสภาพของสิ่งแวดล้อมก็กลับปรากฏว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิของการแผ่รังสี ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุ 2 ชิ้น หรือมากกว่า 2 ชิ้น ที่กำลังแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งกันและกัน ถ้าวัตถุดำแผ่รังสีความร้อนไปยังวัตถุที่อยู่รอบ ๆ (Enclosure) และวัตถุที่อยู่รอบ ๆ ก็เป็นวัตถุดำ (สามารถดูดซึมพลังงานจากการแผ่รังสีที่มาตกกระทบได้หมด) ด้วยแล้วอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีของวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ  $T_1$  ไปยังวัตถุดำที่อยู่รอบ ๆ ซึ่งอุณหภูมิเป็น  $T_2$  ก็จะมีค่าเป็น:

$$q_r = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \tag{3.15}$$

เมื่อ :  $T_1$  = อุณหภูมิผิวของวัตถุดำ, K  
 $T_2$  = อุณหภูมิผิวของวัตถุที่อยู่รอบๆ (เป็นวัตถุดำด้วย)

วัตถุจริงจะไม่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้มากเท่ากับตัวแผ่รังสี ในจินตนาการที่เรียกว่าวัตถุดำแต่จะแผ่ได้น้อยกว่า แต่ถ้าหากที่อุณหภูมิเท่า ๆ กันนั้นวัตถุจริงสามารถแผ่รังสีความร้อนในอัตราส่วนที่คงที่กับวัตถุดำได้ทุกความยาวคลื่นแล้ว วัตถุจริงนั้นก็จะมีชื่อเรียกว่า วัตถุเทา ซึ่งจะแผ่รังสีความร้อนในอัตรา :

$$q_r = \sigma \epsilon AT^4 \tag{3.16}$$

ส่วนอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีของวัตถุเทาที่อุณหภูมิเป็น  $T_1$  ไปยังวัตถุดำที่อยู่รอบ ๆ และมีอุณหภูมิเป็น  $T_2$  จะมีค่าเป็น:

$$q_r = \sigma \varepsilon_1 A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.17)$$

เมื่อ :  $e$  = ค่าการแผ่รังสี (remittance) ของวัตถุเทา มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความร้อนจากการแผ่รังสีของวัตถุเทากับวัตถุดำเมื่อมีอุณหภูมิเท่า ๆ กัน

สำหรับในกรณีที่วัตถุทั้งสองต่างก็ไม่ใช่วัตถุที่สามารถแผ่รังสีความร้อน ได้สูงสุดดังที่มีชื่อว่าวัตถุดำ และถ้าวัตถุทั้งสองจำวาก็มีความสัมพันธ์ทางด้านรูปร่างซึ่งกันและกันแล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีระหว่างวัตถุทั้งสองก็จะมีค่าเป็น

$$q_r = \sigma A_1 \mathfrak{S}_{1-2} (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.18)$$

เมื่อ :  $\mathfrak{S}_{1-2}$  = โมดูลัสที่ใช้ตัดแปลงสมการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำเพื่อใช้หาอัตรา การถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุจริงที่คิดค่าการแผ่รังสีและความสัมพันธ์ทางด้านรูปร่างรวมเข้าไปด้วย

ปัญหาในงานทางด้านวิศวกรรมเป็นจำนวนมาก ที่มีการถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการถ่ายเทความร้อนแบบอื่น ๆ การแก้ปัญหาดังกล่าวจะสามารถทำได้ง่ายขึ้นถ้านำค่าความต้านทานความร้อนของการแผ่รังสี  $R_r$  มาใช้ คำนิยามของความต้านทานความร้อนจากการแผ่รังสีนี้ก็คล้ายกับความต้านทานจากการนำและการพา ถ้าให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีมีรูปร่าง ๆ เป็น

$$q_r = \frac{T_1 - T_2'}{R_r} \quad (3.19)$$

เมื่อนำสมการ (3.19) นี้มาเปรียบเทียบกับสมการ (3.18)แล้วก็จะได้ค่าความต้านทานความร้อนจากการแผ่รังสีเป็น

$$q_r = \frac{T_1 - T_2'}{\sigma A_1 \mathfrak{S}_{1-2} (T_1^4 - T_2^4)} \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

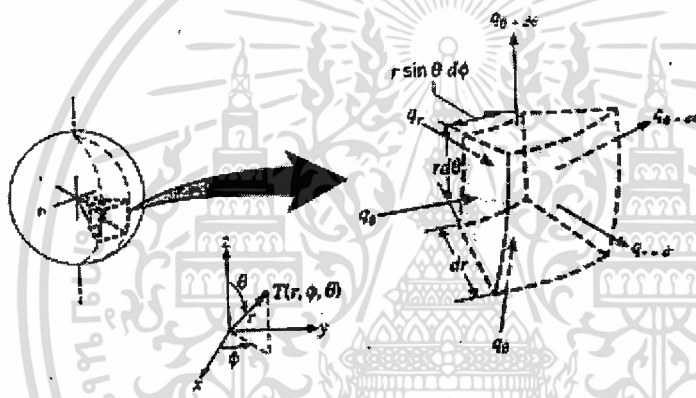
และสามารถให้คำนิยามของค่าหนึ่งการนำจากการแผ่รังสีความร้อน  $h_r$  ว่า :

$$h_r = \frac{1}{R_r A_1} = \frac{\sigma \mathcal{F}_{1-2} (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2'} \quad (3.21)$$

เมื่อ :  $T_2'$  = อุณหภูมิที่เลือกตามสมการของการพาความร้อน

### 3.1.4. การนำความร้อนในพิกัดทรงกลม

สำหรับการนำความร้อนในพิกัดทรงกลม ( $r, \phi, \theta$ ) จากรูปที่ 3.7 พิจารณามวลปริมาตรควบคุมขนาด  $dr, r \sin \theta, rd\theta$  จะได้สมการนำความร้อนดังนี้



รูปที่ 3.7 แสดงการนำความร้อนตัวกลางพิกัดทรงกลม ( $r, \phi, \theta$ )

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (kr^2 \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} (k \frac{\partial T}{\partial \phi}) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (k \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta}) + q_0 = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.22)$$

การนำความร้อนในพิกัดทรงกลมยังแบ่งเป็นกรณีย่อยดังต่อไปนี้

กรณีเป็นการนำความร้อนใน 1 มิติ พิกัด  $r$  เท่านั้น  $T = T(r, t)$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (kr^2 \frac{\partial T}{\partial r}) + q_0 = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.23)$$

การนำความร้อนใน 1 มิติ พิกัด  $r$  ในสภาวะคงตัว และมีแหล่งผลิตพลังงาน

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (kr^2 \frac{dT}{dr}) + q_0 = 0 \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณี  $k$  เป็นค่าคงที่ จะได้

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dT}{dr} \right) + \frac{q_0}{k} = 0 \quad (3.25)$$

### 3.2 ก๊าซเชื้อเพลิง

ก๊าซเชื้อเพลิงหลักคือ ก๊าซธรรมชาติและ ก๊าซปิโตรเลียมเหลว นอกจากนี้ยังมีก๊าซเชื้อเพลิงยังสามารถผลิตได้จาก ถ่านหิน ไม้ ก๊าซธรรมชาติ และ ปิโตรเลียมอีกด้วย

#### 3.2.1 ชนิดของก๊าซเชื้อเพลิง

ก๊าซเชื้อเพลิงที่สำคัญและนิยมใช้กันมากในปัจจุบันมีดังนี้

ก๊าซธรรมชาติมักถูกพบบ่อยๆ ในบริเวณใกล้ๆ หรือเหนือแหล่งน้ำมันในบริเวณหินพรุนและถูกอัดด้วยความดันสูงอยู่ใต้ดิน ก๊าซธรรมชาติคือส่วนผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ เช่น มีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทน และเพนเทน เป็นต้น โดยจะมีเทนเป็นหลักไฮโดรคาร์บอนส่วนที่เหลือมีเป็นส่วนน้อย ในบางครั้งก็มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนปนอยู่ด้วย การนำก๊าซธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ทำได้โดยการอัดและหล่อเย็นจนกระทั่งสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวหนักๆ กลายเป็นของเหลวจากนั้นจึงแยกก๊าซธรรมชาติแห้งความดันสูงส่งไปตามท่อเพื่อใช้งานต่อไป ในบางแหล่งก๊าซธรรมชาติจะถูกทำให้เย็นที่อุณหภูมิ  $-164 \text{ }^{\circ}\text{C}$  จนกลายเป็นของเหลว (liquefied natural gas, LNG) แล้วขนส่งลงทางเรือต่อไป

ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas, LPG) ผลิตจากก๊าซธรรมชาติในโรงแยกก๊าซมีส่วนประกอบหลักคือ อีเทน โพรเพน และบิวเทน นอกจากนั้น LPG ยังรวมถึงก๊าซเหลวที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบในโรงกลั่นน้ำมัน เช่น เอทิลีน โพรพิลีน และ บิวทิลีน เป็นต้น การขนส่งก๊าซ L.P.G ทำได้โดยการบรรจุใส่ถังภายใต้ความดันและ LPG จะกลายเป็นไอภายใต้บรรยากาศปกติ

โพรคิวเซอร์ก๊าซ (producer) คือก๊าซที่ผลิตโดยปล่อยอากาศในปริมาณที่น้อยกว่าค่าทางทฤษฎี (Stoichiometric gas) ผ่านชั้นร้อนของ ถ่านหิน พิต ไม้ หรือของเหลือทางด้านเกษตร ส่วนประกอบหลักของโพรคิวเซอร์ก๊าซคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน (มากถึง 55 %) และคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณน้อย การนำไปใช้งานอาจนำไปใช้ได้ทันทีที่ผลิตได้ขณะยังร้อนอยู่หรือนำไปฟอกให้สะอาดเพื่อกำจัดน้ำมันดิบและเขม่าออกเสียก่อน อย่างไรก็ตามโพรคิวเซอร์ก๊าซมีค่าความร้อนต่ำเนื่องจากมีก๊าซไนโตรเจนปนอยู่มากดังนั้นถ้าต้องการให้ค่าความร้อนสูงขึ้นต้องใช้ก๊าซออกซิเจนในปริมาณน้อยกว่าค่าทางทฤษฎีแทนอากาศในการผลิต

### 3.2.2 คุณสมบัติของก๊าซ LPG

#### คุณสมบัติทางเคมี

คุณสมบัติทางเคมีของก๊าซ LPG หมายความรวมถึงก๊าซไฮโดรเจนที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนในระดับ C3 และ C4 ซึ่งในระบบนี้ไฮโดรคาร์บอนจะสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวได้ ภายใต้ความดันที่ไม่สูงมากนัก ที่อุณหภูมิปกติไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้ประกอบด้วย

โพรเพน	Propane	$C_3H_8$
โพรพิลีน	Propylene	$C_3H_6$
บิวเทน	Butane	$C_4H_{10}$
บิวทิลีน	Butylene	$C_4H_8$

และมีสารประกอบที่ไม่ใช่ ไฮโดรคาร์บอนรวมอยู่บ้างเล็กน้อยเนื่องจากความหลากหลายของส่วนประกอบทำให้มีการตั้งมาตรฐานของก๊าซ LPG ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงให้แน่ชัดและเป็นข้อมูลในการออกแบบระบบให้ถูกต้องและปลอดภัย

อย่างไรก็ตาม C3 และ C4 ที่ปรากฏอยู่ในส่วนผสมของก๊าซ LPG อาจแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือพวก Saturated และ Unsaturated ซึ่งทั้งสองกลุ่มนี้ต่างกันตรงลักษณะการจับตัวของคาร์บอนอะตอม

กลุ่ม Saturated hydrocarbon ได้แก่ Propane, N-Butane, isobutylene

กลุ่ม Unsaturated hydrocarbon ได้แก่ Propylene, N-Butylenes, isobutylene

#### 3.2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

เมื่อพิจารณาในสถานะเหลว เนื่องจาก LPG นั้นมีจุดเดือดต่ำมาก คือโพรเพน 42 องศาเซลเซียส นอร์มัลบิวเทน 0.5 องศาเซลเซียส ไอโซบิวเทน 72.11 องศาเซลเซียส ดังนั้น LPG จะมีจุดเดือดและมีสถานะเป็นก๊าซที่บรรยากาศวันเสียถูกอัดด้วยความดันอยู่ในถัง ค่าความดันที่ทำให้เป็นของเหลวคือความดันของ LPG เอง

#### ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของ LPG สถานะของเหลว

	โพรเพน	นอร์มัลบิวเทน	ไอโซบิวเทน
น้ำหนักโมเลกุล	079.44	58.124	58.124
จุดเดือด (องศาเซลเซียส 1 บรรยากาศ)	- 42.45	- 0.50	- 11.7
อุณหภูมิวิกฤติ (องศาเซลเซียส)	96.67	152.03	134.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาในสถานะก๊าซ ช่วงการลุกไหม้ ก๊าซที่สันดาปได้จะมีช่วงส่วนผสมกับอากาศเพียงช่วงเดียวที่จุดไฟแล้วลุกไหม้ได้ เพราะอากาศผสมอยู่ในปริมาณที่พอเหมาะช่วงการลุกไหม้จะแสดงค่าเป็นร้อยละของปริมาตรก๊าซต่ออากาศ ค่าความเข้มข้นสูงสุดของการลุกไหม้เรียกว่าค่าขอบบนส่วนทางด้านต่ำเรียกว่า ค่าขอบล่าง LPG ของผสมระหว่างโพรเพนกับบิวเทน โดยโพรเพนมีช่วงการลุกไหม้ 2.4 – 9.5 % ในอากาศและบิวเทน มีช่วงการลุกไหม้ 1.8 – 8.4 % ในอากาศถ้าส่วนผสมมากหรือน้อยกว่านี้จะไม่ติดไฟ

### 3.2.3 อุณหภูมิของการจุดติดไฟ

เมื่อค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิให้กับเชื้อเพลิงจนเลยอุณหภูมิค่าหนึ่ง แล้วแม้จะไม่มีประกายไฟหรือสาเหตุของการติดไฟ เชื้อเพลิงก็จะลุกไหม้เองตามธรรมชาติอุณหภูมิต่ำสุดที่เกิดการลุกไหม้ตามธรรมชาตินี้เรียกว่าอุณหภูมิการจุดวาบไฟ ของโพรเพนคือ 460 - 580 องศาเซลเซียสของบิวเทนคือ 50 ถึง 540 องศาเซลเซียส

### 3.2.4 อุณหภูมิของเปลวไฟ

อุณหภูมิของเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ของก๊าซหุงต้มมีสูงมากพบที่หลอมละลายโลหะต่างๆได้เช่น เหล็กหล่อ ทองเหลือง อะลูมิเนียม และแก้วเป็นต้น โดยโพรเพนมีอุณหภูมิเปลวไฟในอากาศ 1930 องศาเซลเซียส บิวเทน 1900 องศาเซลเซียส

### 3.2.5 อัตราส่วนปริมาตรของเหลวต่อก๊าซ

ก๊าซหุงต้มเหลวเมื่ออยู่ในสถานะก๊าซ ปริมาตรจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากโดยโพรเพน 1 หน่วยปริมาตรเมื่อกลายเป็นก๊าซแล้วจะมีปริมาตรเป็น 2 หน่วยที่ 15.5 องศาเซลเซียส ส่วนบิวเทน 1 หน่วยปริมาตร เมื่อกลายเป็นก๊าซแล้วจะมีปริมาตรเป็น 233 หน่วยที่ 15.5 องศาเซลเซียส

### 3.2.6 ค่าความร้อนของการเผาไหม้

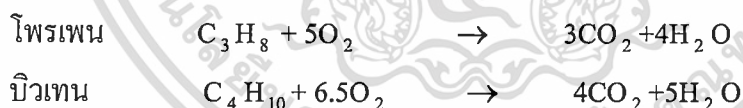
ค่าความร้อนของการเผาไหม้หมายถึง ปริมาณความร้อนที่เกิดจากการนำเอาก๊าซ LPG หนึ่งหน่วยน้ำหนัก หรือ 1 หน่วยปริมาตร มาทำการเผาไหม้ที่ความดันและอุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส)

### ตารางที่ 3.2 ค่าความร้อนของการเผาไหม้ก๊าซ LPG

ที่อุณหภูมิ 25 °C	โพรเพน	นอร์มัลบิวเทน	ไอโซบิวเทน
<b>Gross :</b>			
กิโลแคลอรี / กิโลกรัม	11,943	11,742	11,714
บีทียู/ปอนด์	21,497	21,135	21,085
กิโลแคลอรี/ลบ.เมตร	23,700	30,600	30,500
บีทียู/ลบ.ฟุต	2,663	3,438	3,427
<b>Net :</b>			
กิโลแคลอรี / กิโลกรัม	10,989	10,837	10,810
บีทียู/ปอนด์	19,780	19,506	19,458
กิโลแคลอรี/ลบ.เมตร	22,250	29,400	29,200
บีทียู/ลบ.ฟุต	2,500	3,304	3,281

#### 3.2.7 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (Air Requirement)

ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซที่มีผลสมอยู่ในอากาศ 21% โดยปริมาตรและเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้ ดังนั้นปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าไปในห้องเผาไหม้ จะต้องมีความที่แน่นอน ในกรณีที่ก๊าซ LPG เผาไหม้อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด ก็จะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ การเปลี่ยนแปลงสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



จากสมการเหล่านี้ ปริมาตรออกซิเจนที่จำเป็นต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะเป็น 5 เท่า ในกรณีของโพรเพนจะเป็น 6.5 เท่า ในกรณีของบิวเทน เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในอากาศจะมีปริมาณ 21 % ฉะนั้นในการเผาไหม้โพรเพนอย่างสมบูรณ์ 1 ลบ.เมตร จะต้องใช้อากาศ 24 ลบ.เมตร ส่วนบิวเทน 1 ลบ.เมตร จะต้องใช้อากาศ 31 ลบ.เมตร ดังนั้นเมื่อมีการเปรียบเทียบกับน้ำมันเบนซินแล้ว LPG ต้องการอากาศมากกว่าเล็กน้อย

#### 3.2.8 สี กลิ่น ความเป็นพิษและการละลาย

LPG บริสุทธิ์จะไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ดังนั้นบริษัทผู้ผลิตจึงต้องเติมสารประกอบที่มีกลิ่นเหม็นลงไปด้วยเพื่อให้ผู้ใช้รู้เมื่อเกิดการรั่วเกิดขึ้น สารประกอบที่ใส่ลงไปจะเป็น เมอร์แคปเทน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Mercaptan) ก๊าซ LPG เป็นก๊าซที่ไม่มีพิษแต่ในกรณีเกิดการสันดาปอย่างไม่สมบูรณ์จะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้เช่นกัน เนื่องจาก LPG ไม่มีสารพิษร้ายแรง (Mercaptan) เช่น Tetraethyl Lead ซึ่งจะมีอยู่ในน้ำมันเบนซิน ฉะนั้นก๊าซเสี่ยของ LPG จึงสะอาดเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ของน้ำมันเบนซิน

นอกจากนั้นก๊าซ LPG มีคุณสมบัติตัวทำละลายเช่นเดียวกับพวกน้ำมันระเหยจึงสามารถทำให้อุปกรณ์ต่างๆที่ทำมาจากยางธรรมชาติเสี่ยคุณสมบัติได้เช่น ปะเก็น หรือ ซีลต่างๆ ดังนั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้กับถังที่บรรจุก๊าซธรรมชาติ ควรใช้วัสดุอื่นที่ไม่ทำมาจากยางธรรมชาติ เช่น ยางสังเคราะห์ เป็นต้น

### 3.3 คุณสมบัติของวัสดุพอรุน

วัสดุพอรุนที่นำมาทำการเลือกใช้ คือ เซรามิกที่มีส่วนผสมของอลูมิน่า เป็นส่วนประกอบโดยนำมาทำการเรียงซ้อนกันในห้องเผาไหม้ วัสดุพอรุนมีคุณสมบัติคือ เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงทนต่ออุณหภูมิได้สูง และมีบทบาทที่สำคัญต่อการเผาไหม้ คือเป็นตัวทำให้เกิดการหมุนเวียนพลังงานภายในระบบ โดยวัสดุพอรุนจะทำหน้าที่ดูดซับเอนทาลปีบางส่วนของก๊าซร้อนไว้และแผ่รังสีความร้อนออกมาที่กระแสนของการเผาไหม้ (Upstream) และเนื่องจากวัสดุพอรุนมีพื้นที่ในการสัมผัสกับของไหลสูงหรืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงมีประสิทธิภาพสูงซึ่ง ปัจจุบันวัสดุพอรุนถูกผลิตในรูปแบบต่างๆ กัน เนื่องมาจากมีผู้ใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้เป็นจำนวนมากอีกทั้งยังมีแนวโน้มในการนำวัสดุพอรุนไปใช้กับอุปกรณ์ให้ความร้อนอื่นๆ

#### 3.3.1 ประโยชน์ของวัสดุพอรุนในวิศวกรรมการเผาไหม้

วัสดุพอรุนเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ทนอุณหภูมิได้สูงและมีบทบาทที่สำคัญในการเผาไหม้คือเป็นตัวทำให้เกิดการหมุนเวียนพลังงาน (Energy Recirculation) ในระบบโดยวัสดุพอรุนจะทำหน้าที่ดูดซับเอนทาลปีบางส่วนของก๊าซร้อน (Hot Product) ไว้แล้วแผ่รังสีความร้อนออกมาทางด้าน Upstream และเนื่องจากวัสดุพอรุนมีพื้นที่ในการสัมผัสกับของไหลสูงหรือมีอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูง (Surface Area to Volume Ratio) สูง ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งปัจจุบันวัสดุพอรุนได้ถูกผลิตขึ้นมาในรูปแบบต่างๆ กัน เนื่องมาจากมีผู้สนใจมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพของหัวเผา (Burner) เป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังมีแนวโน้มที่นำวัสดุ ไปใช้กับอุปกรณ์ความร้อนอื่นเช่นเครื่องยนต์ความร้อน(Heat Engine) อุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภาพสูง แสดงหลักการทำงานวัสดุพอรุน มีดังนี้คือ เมื่อก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ไหลผ่านวัสดุพอรุน วัสดุพอรุนจะทำหน้าที่ดูดซับ เอนทาลปีส่วนหนึ่งจากก๊าซร้อนเอาไว้และแผ่รังสีความร้อนส่วนใหญ่ไปยังวัสดุพอรุนบริเวณ Upstream ดังนั้นงานการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

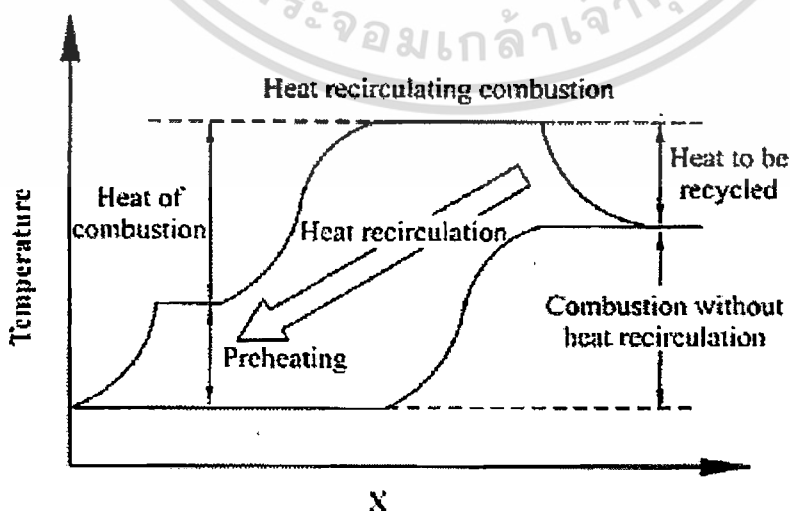
เมื่ออากาศและเชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิต่ำไหลผ่านก็จะได้รับความร้อนที่วัสดุพูนดูดซับไว้ทำให้อากาศและเชื้อเพลิงมีค่าเอนทาลปีสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากหลังการดังกล่าวทำให้ระบบการเผาไหม้ภายใต้การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพูนมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงและประหยัดเชื้อเพลิงที่ป้อนให้กับระบบการเผาไหม้

เตาเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวที่มีการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนโดยใช้หลักการหมุนเวียนพลังงานในระบบด้วยการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพูนนั้น เมื่อก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ผ่านวัสดุพูน วัสดุพูนจะทำหน้าที่ดูดซับเอนทาลปี ส่วนหนึ่งจากก๊าซร้อนไว้แล้วแผ่รังสีความร้อนส่วนใหญ่ไปยังวัสดุพูนด้านกระแสนของการเผาไหม้ (Upstream) ดังนั้นเมื่ออากาศและเชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิต่ำ ไหลผ่านก็จะได้รับความร้อนที่วัสดุพูนรับเอาไว้ทำให้อากาศและเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากหลักการดังกล่าวทำให้ระบบการเผาไหม้ภายใต้การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพูนมีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงและเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงที่นำมาใช้งาน

### 3.3.2 การเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน (Heat Recirculating Combustion)

ระบบการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน (Heat Recirculating Combustion) เป็นระบบการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูง ประหยัดพลังงาน ปลอดภัย CO ต่ำ ทำให้ปัจจุบันมีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากระบบดังกล่าวเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานแล้วมีประโยชน์อย่างมากเพราะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ เพิ่มความเข้มการเผาไหม้ และประหยัดพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในงานวิจัยกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยวัสดุพูนแบบสลับทิศทางการไหลอย่างเป็นจังหวะก็ได้อาศัยหลักการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อนดังที่จะได้กล่าวต่อไป

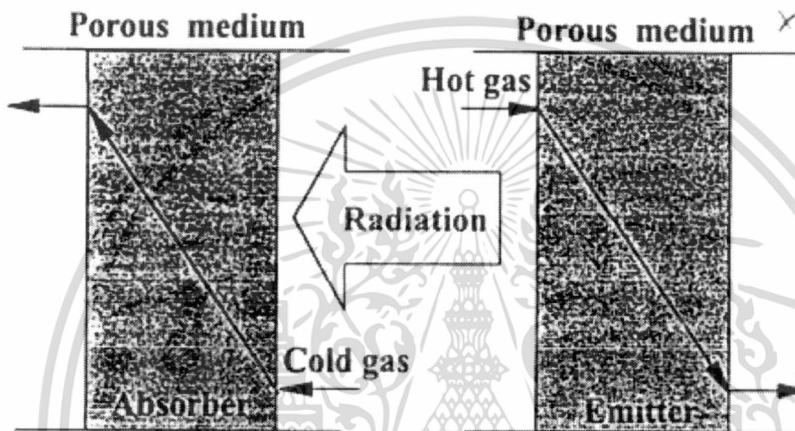
### 3.3.3 หลักการทำงานการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน



เอกสารรูปที่ 3.8 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผาไหม้ชนิดที่มีและไม่มี การหมุนเวียนความร้อนด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



พรุนตัวที่ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสีแล้วอากาศเย็นที่ใช้ในการเผาไหม้ไหลผ่านวัสดุพรุนที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสี ซึ่งส่งผลให้เกิดการหมั่นเวียนความร้อนจากไอเสียมาสู่อากาศเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยวัสดุพรุนเป็นตัวกลาง (ดูรูปที่ 3.8 ประกอบ) คาดว่าระบบดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากผลของการ อุ่นอากาศ (Preheat) ที่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งนี้ยังทำให้ได้ค่าความเร็วในการเผาไหม้ (Burning Velocity) และให้ความเข้มของการเผาไหม้สูง (High Combustion Intensity) ทำให้ออกแบบให้เตาเผาไหม้มีขนาดกะทัดรัด นอกจากนี้ยังช่วยขยายขอบเขตการเผาไหม้ได้ (Flammability Limits) กว้างขึ้น



รูปที่ 3.9 แสดงหลักการทำงานของวัสดุพรุน

### 3.3.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่า Preheat Air Temperature ( $T_{ad}$ )

เมื่อวัสดุพรุนถูกทำให้ร้อนโดยได้รับความร้อนจากก๊าซร้อน ที่เกิดจากการเผาไหม้ เมื่อสลับทิศทางการไหลของอากาศ วัสดุพรุนจะถ่ายเทความร้อนสู่อากาศทำให้อุณหภูมิวัสดุพรุนลดลงตามเวลา สมมุติให้พิจารณาวัสดุรวมเป็นก้อน (Lump) จะสามารถหาอุณหภูมิที่ลดลงของวัสดุพรุนนี้ได้จากทฤษฎีต่อไปนี้

สมการ ความร้อน( $q$ ) จากวัสดุพรุนถ่ายเทให้กับอากาศโดยการพาความร้อน

$$Q = h_v(T_s - T_\infty) \quad (3.26)$$

ความร้อนที่วัสดุพรุนได้รับจากอากาศ เมื่อพิจารณาเป็น one dimensional, unsteady heat transfer

$$-qdt = mc_p dT_s \quad (3.27)$$

จากสมการ 3.26 และ 3.27 ความร้อนที่อากาศให้กับวัสดุพรุนเท่ากับความร้อนที่วัสดุพรุนได้รับ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\frac{dt_s}{T_s - T_\infty} = \frac{h_v}{mc_p} dT \quad (3.28)$$

Integrate สมการ 3.28 จะได้

$$\ln(T_s - T_\infty) - \ln(T_{s0} - T_\infty) = -\frac{h_v}{mc_p} dT \quad (3.29)$$

จากสมการ 3.29 สามารถหาค่าความร้อนของวัสดุพอรุน,  $T_s$  ได้ ซึ่งต้องทราบค่าตัวแปรอื่นๆ ดังได้แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก จ และเมื่อนำค่า  $T_s$  แทนลงในสมการ 3.27 ก็จะได้ค่าความร้อน,  $q$  ที่วัสดุพอรุนได้รับเช่นกัน จากนั้นก็สามารถหาค่าความร้อนรวมทั้งหมดที่วัสดุพอรุนได้รับโดยการหา  $Q_{conv}$  จากไอเสียร้อนในระยะเวลาในแต่ละช่วง Half Period,  $t_{hp}$  ได้จากสมการ

$$Q_{conv} = \int_{t=0}^{t=t_{hp}} q dt \quad (3.30)$$

ความร้อนจากวัสดุพอรุน ( $Q_{conv}$ ) ส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปกับการทำให้เชื้อเพลิงเหลวระเหยกลายเป็นไออย่างสมบูรณ์ที่  $250^\circ\text{C}$  โดยความร้อนส่วนนี้มีค่าเท่ากับ

$$Q_{evap} = \dot{m}c_p \Delta T + \dot{m}LHV \quad (3.31)$$

ดังนั้นจะเหลือความร้อนที่วัสดุพอรุนใช้อุ่นอากาศ เท่ากับ

$$Q = Q_{conv} - Q_{evap} \quad (3.32)$$

ความร้อนจากสมการ 3.32 จะนำไปอุ่นให้อากาศร้อนขึ้น ดังนั้นจะสามารถคำนวณ Preheated Air Temperature ได้จากสมการ

$$T_{pre} = T_\infty + \frac{Q}{m_{air} C_p} \quad (3.33)$$

### 3.4 การเผาไหม้ (Combustion)

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงระหว่างเชื้อเพลิงหรือสารที่สามารถเผาไหม้ได้กับออกซิเจนอย่างรวดเร็วและจะคายความร้อนออกมาระหว่างการทำปฏิกิริยา โดยสารที่สามารถเผาไหม้ได้ในเชื้อเพลิงคือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และกำมะถัน (S) การเผาไหม้สามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

1. การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuel combustion)
2. การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel combustion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

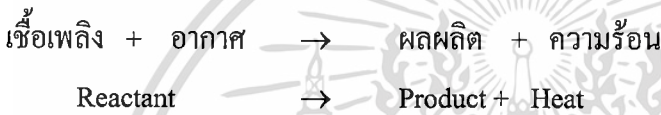
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซ (Gaseous fuel combustion)

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะเน้นไปทางการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวเป็นหลักดังนั้นจึงจะนำเสนอเฉพาะการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวเท่านั้น ทั้งนี้หลักการของการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นของธาตุต่างๆในการเผาไหม้ทั้งสามแบบไม่แตกต่างกัน

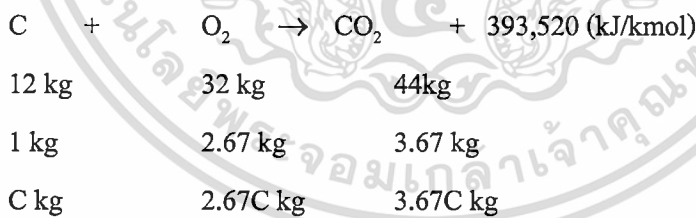
3.4.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion reaction)

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Oxidation) ระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ในเชื้อเพลิง (C H N O S) กับออกซิเจนในอากาศได้ผลผลิต (product) จากการเผาไหม้ในรูปของก๊าซเผาไหม้และความร้อนออกมาดังแสดงในสมการ

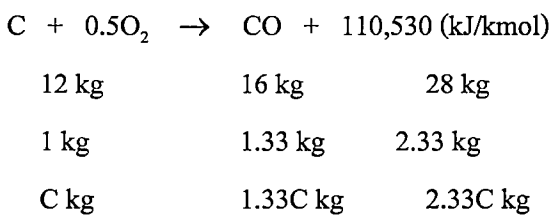


ในกระบวนการเผาไหม้ สารที่เข้าทำปฏิกิริยาเผาไหม้เรียกว่า Reactant หรือ ตัวทำปฏิกิริยา ได้แก่ เชื้อเพลิงและอากาศ สารหรือองค์ประกอบหลังการเผาไหม้ เรียก Product หรือ ผลผลิต ได้แก่ ก๊าซเผาไหม้ โดยในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ของธาตุต่างๆ จะเป็นไปดังสมการต่อไปนี้

คาร์บอนเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



คาร์บอนเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ได้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์



ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ O<sub>2</sub> น้แล้วหรือ 2CO<sub>2</sub> + 282,990 (kJ/kmol) ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**3.4.2.2** ระยะเวลาในการเผาไหม้ (Burning Time) เนื่องจากการทำปฏิกิริยาจำเป็นต้องอาศัยเวลาเพื่อจะทำให้ได้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตาเผาใหม่นั้นจำเป็นต้องให้เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ในระยะเวลาที่นานเพียงพอเพื่อให้ธาตุที่เผาไหม้ได้ในเชื้อเพลิงมีโอกาสที่จะถูกทำปฏิกิริยาเผาไหม้จนหมดภายในเตา ซึ่งหากระยะเวลาในการเผาไหม้ไม่เพียงพอจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงต่ำและนับว่าเป็นการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงด้วย

**3.4.2.3** อุณหภูมิของการเผาไหม้ (Combustion Temperature) เป็นที่ทราบดีว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่ง ความเร็วของการเกิดปฏิกิริยานั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาเป็นสำคัญด้วย โดยหากอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าสูงความเร็วของการเผาไหม้ก็จะมีค่ามาก แต่ทั้งนี้ในการเผาไหม้ทางปฏิบัติจำเป็นต้องทำการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ภายใต้ขอบเขตที่วัสดุ ที่ก่อสร้างเตาเผาไหม้สามารถทนได้ ซึ่งมีค่าประมาณ  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

**3.4.2.1** ความปั่นป่วนระหว่างการเผาไหม้ (Turbulence) เนื่องจากการเผาไหม้นั้นเป็นการทำปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงและออกซิเจนหรืออากาศ ซึ่งหากระหว่างการเผาไหม้มีความปั่นป่วนเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการคลุกเคล้ากันอย่างดีของเชื้อเพลิงและออกซิเจน ทำให้โอกาสที่ออกซิเจนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงและเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มีมากขึ้น

### 3.4.3 ปริมาณอากาศทางทฤษฎี อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

จากปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงข้างต้นพบว่าสิ่งสำคัญที่จะก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้เป็นอันดับแรกคือ ปริมาณอากาศที่เพียงพอ และมีปัจจัยที่ส่งผลให้การเผาไหม้ดีขึ้นซึ่งเรียกสั้น ๆ ว่าปัจจัย 3T (Time Temperature และ Turbulence) ดังนั้นในการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ จำเป็นต้องทราบปริมาณอากาศที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทางทฤษฎี (Theoretical air) ซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะใช้ปริมาณอากาศต่อปริมาณเชื้อเพลิง (Air to Fuel Ratio; A/F) ในการเผาไหม้ทางทฤษฎีแตกต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณอากาศที่ถูกใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงจริงอาจมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี เพราะในทางปฏิบัติหากจ่ายปริมาณอากาศเท่ากับทฤษฎีพบว่ามีโอกาสน้อยมากที่ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้อย่างสมบูรณ์หรืออาจต้องใช้ระยะเวลานานมาก เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริงจึงกำหนดให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง สำหรับผลกระทบของปริมาณอากาศหรืออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่มีต่อการเผาไหม้มีดังนี้

**3.4.3.1** ถ้าปริมาณอากาศน้อยกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี หรือ A/F น้อยกว่า A/F ทางทฤษฎี การเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์ได้รับความร้อนน้อย และก่อให้เกิดมลพิษ (มี CO เกิดขึ้น)

**3.4.3.2** ถ้าให้ปริมาณอากาศมากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีหรือ A/F มากกว่า A/F ทางทฤษฎี จะทำให้โอกาสที่จะเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์มีความเป็นไปได้มากขึ้นในการคำนวณค่า ไม่ว่าจะเป็นค่าใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้หากทำการจ่ายปริมาณอากาศมากเกินไปจะส่งผลให้ความร้อนส่วนหนึ่งที่ได้จากการเผาไหม้สูญเสียไปกับการทำให้  $O_2$  และ  $N_2$  ที่เหลือจากการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้น

### 3.4.4 การหาปริมาณอากาศเพื่อเผาไหม้ทางทฤษฎี (Determination of theoretical air)

ในการหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ สามารถทำได้ใน 2 ลักษณะคือ

- การทำสมดุลเคมีของสมการการเผาไหม้
- การคำนวณปริมาณออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยาสำหรับเชื้อเพลิงแข็งและเหลว

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีหลังเพราะจะทำให้เข้าใจพื้นฐานของสมการการเผาไหม้ได้ดีและนิยมใช้กับกรณีที่เป็นเชื้อเพลิงแข็งซึ่งตรงกับการศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยในการหาปริมาณอากาศในการเผาไหม้จำเป็นต้องทราบข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงโดยละเอียดหรือแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ซึ่งจะได้ว่า

$$C + H + O + N + S + M + A = 1.0$$

จากนั้นทำการหาปริมาณ  $O_2$  ที่เข้าทำปฏิกิริยากับธาตุ C, H และ S จากสมการการเผาไหม้พื้นฐานซึ่งจะได้ว่า ปริมาณ  $O_2$  ที่เข้าทำปฏิกิริยาเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ =  $2.67C + 8H + S$  แต่หากในเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงมีปริมาณออกซิเจนอยู่แล้วเท่ากับ O ดังนั้น ปริมาณ  $O_2$  ที่ต้องการจากอากาศต่อ 1 kg เชื้อเพลิง  $2.67C + 8H + S - O$  เพราะว่าอากาศประกอบด้วยออกซิเจนโดยน้ำหนัก = 23.2% ดังนั้น ปริมาณอากาศทางทฤษฎีต่อ 1 kg เชื้อเพลิง หรืออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ;  $A/F_{th}$

$$A/F_{th} = \frac{2.67}{0.232}C + \frac{8}{0.232}\left(H - \frac{O}{8}\right) + \frac{1}{0.232}S$$

### 3.4.5 การหาอัตราส่วนสมมูล (Determination of equivalence ratio)

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง จึงกำหนดให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F) โดยค่าอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง สามารถหาได้จาก

$$(A/F)_{stoic} = (m_{air} / m_{fuel})_{stoic} = 4.76 \times a \times \left( \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}} \right) \quad (3.34)$$

และอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio,  $\phi$ ) จะหมายถึง

$$\phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)_{actual}} = \frac{(F/A)_{actual}}{(F/A)_{stoic}} \quad (3.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fuel – rich mixtures,	$\phi > 1$	มีเชื้อเพลิงมาก อากาศน้อย
Stoichiometric mixtures,	$\phi = 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
Fuel – lean mixtures,	$\phi < 1$	มีเชื้อเพลิงน้อย อากาศมาก
โดยที่ $(A/F)_{\text{stoic}}$	=	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี, kg / kg
$(A/F)_{\text{actual}}$	=	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้จริง, kg / kg
A	=	Molar Oxygen – Fuel Ratio, kmol / kmol
$MW_{\text{air}}$	=	Molecular weight of Air, kg / kmol
$MW_{\text{fuel}}$	=	Molecular weight of Fuel, kg / kmol

### 3.4.6 การหาปริมาณอากาศส่วนเกิน (Determination of excess air)

สำหรับการหาปริมาณอากาศส่วนเกินนั้นสามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกันคือ

- การวัดปริมาณอากาศที่เข้าไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้จริง ( $A/F_{\text{ac}}$ )
- การวัดปริมาณออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ที่ทางออกของเตาเผาไหม้แล้วมา

คำนวณย้อนกลับ ไปเป็นปริมาณอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้ซึ่งจะพิจารณาว่าอากาศส่วนนี้เป็นอากาศที่จ่ายเข้าไปเกินความต้องการ โดยทั่วๆไปปริมาณอากาศส่วนเกินนิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ในสองลักษณะคือ เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (% Excess air) และเปอร์เซ็นต์ของอากาศทางทฤษฎี (% Theoretical air) ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน} = \left( \frac{A/F_{\text{ac}} - A/F_{\text{th}}}{A/F_{\text{th}}} \right) \times 100\% \quad (3.36)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎี} = \left( \frac{A/F_{\text{ac}}}{A/F_{\text{th}}} \right) \times 100\% \quad (3.37)$$

### 3.5 เทคนิคการเผาไหม้แบบเป็นขั้นตอน (Staged-combustion technique)

เทคนิคการเผาไหม้แบบแบ่งเป็นขั้นตอนเป็นเทคนิคการเผาไหม้ที่ควบคุมการเกิดมลพิษ โดยการควบคุมการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนในลักษณะที่ป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ในสภาวะสตอยคิโอเมตรี การผสมอาจเป็นไปในลักษณะที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ภายใต้ค่าอัตราส่วนสมมูลที่แตกต่างกันหลายค่าจากไอติบงไปหาไอติหนาหรือกลับกันก็ได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องไม่ให้เกิดการเผาไหม้สภาวะสโตยคิโอเมตรี อย่างเด็ดขาด เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ดังกล่าว จึงต้องแบ่งกาอากาศออกเป็นหลายๆส่วน(หรือต้องการทำให้เชื้อเพลิงขาดอากาศ) แล้วป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้เพื่อเผาไหม้กับเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆกัน จึงเกิดการเผาไหม้แบบแบ่งเป็นหลายขั้นตอนขึ้นในห้องเผาไหม้และเพื่อควบคุมการเกิด thermal  $\text{NO}_x$  เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น อาจมีการดึงความร้อนออกจากก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ในขั้นตอนปฐมภูมิ (Primary combustion) เพื่อลดอุณหภูมิลงก่อนที่จะเผาไหม้ในขั้นตอนทุติยภูมิ (Secondary combustion) การเผาไหม้แบบสองขั้นนี้จะช่วยให้พื้นที่เผาของเปลวไฟ (Flame zone) ถูกขยายออกไป และลดอุณหภูมิสูงสุด (peak temperature) ของการเผาไหม้ ทำให้ลดปริมาณ  $\text{NO}_x$  ได้ นอกจากนี้การเผาไหม้เป็นขั้นตอนหรือการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิยังทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากขึ้นเนื่องจากในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิยังคงเหลือก๊าซหรืออนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดในห้องเผาไหม้ขั้นแรก

### 3.6 การปล่อยมลพิษ (Emission)

#### 3.6.1 ออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ )

การก่อตัวของ  $\text{NO}_x$  ในกระบวนการการเผาไหม้มีกลไกของการก่อตัวอยู่ดังต่อไปนี้

- **Thermal  $\text{NO}_x$**  มีอิทธิพลมาจากอุณหภูมิการเผาไหม้ หรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนั้นถ้าต้องการลด Thermal  $\text{NO}_x$  จึงต้องลดอุณหภูมิการเผาไหม้
- **Prompt  $\text{NO}_x$**  เกิดจากอนุมูลอิสระ พวกไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการเผาไหม้ใน ส่วนแรกของการเผาไหม้ (Early stages) ของการเผาไหม้กับโมเลกุลของไนโตรเจน
- **Fuel  $\text{NO}$**  เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของอากาศกับไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเป็นกลไกของการเกิด  $\text{NO}$  ซึ่งขึ้นกับสภาวะการทำงานเช่นสภาวะการเผาไหม้แบบส่วนผสมเชื้อเพลิงหนาหรือแบบส่วนผสมเชื้อเพลิงบาง ถ้าเป็นการเผาไหม้แบบส่วนผสมเชื้อเพลิงบาง จะทำให้มีโอกาสเกิด Fuel  $\text{NO}$  ได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงต้องควบคุมอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงต่อออกซิเจนให้ดี

#### 3.6.2 มลพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์

มลพิษจาก CO จากกระบวนการเผาไหม้เป็นการสูญเสียประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ หากการเผาไหม้ค่อนข้างมีอุณหภูมิสูง อาจทำให้  $\text{CO}_2$  เกิดการแยกสลายกลับมาเป็น CO ได้ หรือในขณะเดียวกันถ้าหากเชื้อเพลิงที่กำลังเผาไหม้มีเวลาน้อยเกินไปในห้องเผาไหม้ ไม่มีเวลามากพอที่จะ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างเต็มที่ จะทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็น  $\text{CO}_2$  ได้เช่นกัน ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$  เพื่อ  $\rightarrow$  ศึกษา  $\text{CO}_2$  ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเพื่อให้การเผาไหม้เป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. เวลาในการเผาไหม้ต้องนานเพียงพอ เพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จนหมด
2. อุณหภูมิการเผาไหม้ต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง
3. การผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศจะต้องอยู่ในลักษณะการไหลผสมแบบปั่นป่วน (turbulence)

### 3.7 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating Value)

ค่าความร้อนเป็นค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงเมื่อเทียบต่อ 1 หน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรของเชื้อเพลิง โดยมีหน่วยเป็น kJ/kg, kcal/kg, Btu/lb หรือ kcal/litre เป็นต้น และมีค่าจำกัดความคือปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทหรือคายออกจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เกิดอย่างสมบูรณ์ (Complete combustion) เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการเผาไหม้ (ก๊าซไอเสีย) เย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้นที่สภาวะมาตรฐานของเชื้อเพลิงและอากาศที่เผาไหม้ ซึ่งค่าว่าสภาวะมาตรฐานในที่นี้คือความดันสมบูรณ์ 1 บรรยากาศ (atm) และอุณหภูมิ 25°C โดยปกติค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะถูกกำหนดขึ้นจากการทดลองเผาเชื้อเพลิงในอุปกรณ์ที่เรียกว่าบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) ตามมาตรฐาน ASTM D 2015 ค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Heat of combustion) จะกำหนดค่าความร้อนไว้ 2 ค่าคือ

#### 3.7.1 ค่าความร้อนขั้นสูง (High heating value หรือ Gross heating value หรือ HHV)

ค่าความร้อนขั้นสูงคือค่าความร้อนของการเผาไหม้ที่กำหนดให้น้ำในผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของเหลว หรือน้ำเกิดเป็นผลอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์

#### 3.7.2 ค่าความร้อนขั้นต่ำ (Low heating value หรือ Net heating value หรือ LHV)

ค่าความร้อนขั้นต่ำคือค่าความร้อนของการเผาไหม้ที่กำหนดให้น้ำในผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของไอน้ำ หรือน้ำเกิดเป็นผลอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์ โดยที่

$$LHV = HHV - m_w h_{fg} \quad (3.38)$$

$$LHV = HHV - 9m_{H_2} h_{fg} \quad (3.39)$$

โดยที่

$m_w$  = มวลของไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง(เนื่องจากการเผาไหม้  $H_2$  ในเชื้อเพลิง แต่ไม่รวมถึงน้ำที่มาจากความชื้นในเชื้อเพลิง)

$m_{H_2}$  = มวลของไฮโดรเจนต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง รู้ได้จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

$h_{fg}$  = เอนทาลปีจำเพาะของการกลายเป็นไอหรือความร้อนแฝง ณ ความดันย่อยในผลิตภัณฑ์ มีหน่วยเป็น kJ/kg  $H_2O$

### 3.8 ดัชนีบ่งชี้สมรรถนะของเตาเผาไหม้

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\eta_c = \left[ \frac{Q_{fuel} - Q_{loss,co}}{Q_{fuel}} \right]$$

$Q_{fuel}$  คือ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

$Q_{loss,co}$  คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากการที่  $CO$  ไม่ถูกเผาไหม้เป็น  $CO_2$  โดยคำนวณจาก (ปริมาณ  $CO$  ที่เกิดขึ้นต่อ 1 kg fuel)  $\times$  (ค่าความร้อนของ  $CO$ )  $\times$  (Feed rate)

โดยที่ปริมาณ  $CO$  จะคิดที่มาตรฐาน 6% ของ  $O_2$  ซึ่งคำนวณจาก

$$[CO] = \frac{(21-6)}{(21-[O_2])}, \text{ ppm}$$

## บทที่ 4

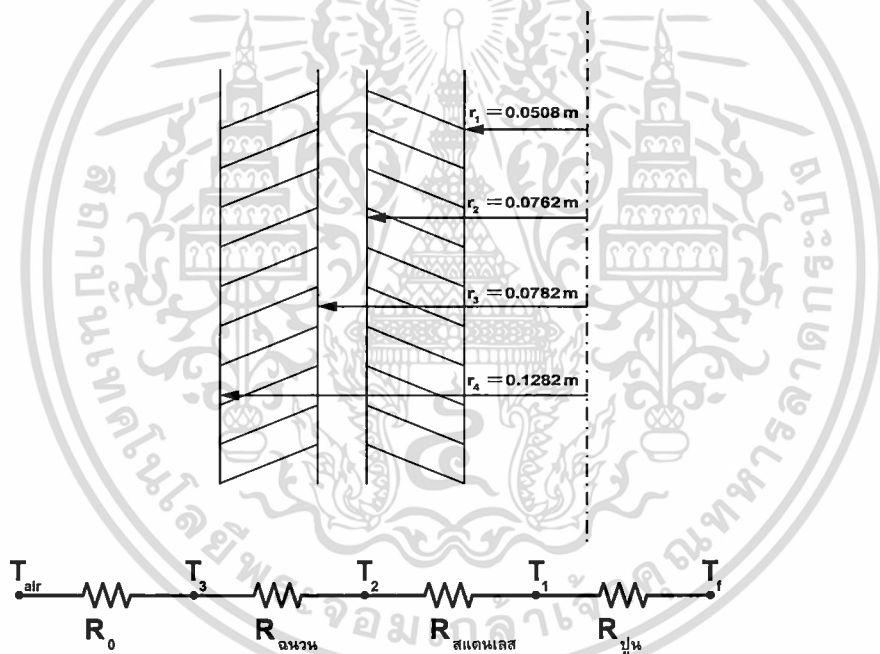
# การประเมินความร้อนสูญเสียที่เปลือกและการกำหนดเงื่อนไข

## การทดสอบเตาเผาไหม้วัสดุพูน

ในการทดสอบสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพูนในงานวิจัยนี้ ได้ทำการประเมินความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นบริเวณเปลือกเตาเผาไหม้วัสดุพูน เนื่องจากเป็นส่วนสำคัญในการติดตั้งเตาเผาไหม้วัสดุพูนเข้าไปในระบบของเซลล์เชื้อเพลิง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 4.1 การคำนวณเพื่อประเมินความร้อนสูญเสียที่เปลือกเตาเผาไหม้วัสดุพูน

หาการถ่ายเทความร้อนแต่ละชั้นของผิว



$$R_{\text{ปูน}} = \frac{\ln(r_1/r_2)}{2\pi Lk_1} = \frac{\ln(3 \times 0.02541 / 2 \times 0.02541)}{2\pi \times 300 \times 10^{-3} \times 0.3}$$
$$= 0.717 \frac{K}{W}$$

$$R_{\text{สแตนเลส}} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi Lk_2} = \frac{\ln(0.0782 / 3 \times 0.2541)}{2\pi \times (300 \times 10^3) \times 16.3}$$
$$= 8.43 \times 10^{-4} \frac{K}{W}$$

$$R_{\text{ฉนวน}} = \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi Lk} = \frac{\ln(0.1282 / 0.07821)}{2 \times \pi \times 300 \times 10^{-3} \times 0.08}$$
$$= 0.98 \frac{K}{W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_0 = \frac{1}{h_0 A} = \frac{1}{20 \times \pi D_4 L}$$

$$= 0.207 \frac{K}{W}$$

$$R_{รวม} = R_0 + R_{ฉนวน} + R_{สแตนเลส} + R_{ปูน}$$

$$= 0.207 + 0.98 + 8.43 \times 10^{-4} + 0.717$$

$$= 0.9086 \frac{K}{W}$$

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{total}} = \frac{T_f - T_{crib}}{R_{total}} = \frac{(1100 + 273) - (30 + 273)}{1.9086}$$

$$Q = 560.62$$

$T_1$  = ระหว่างปูนกับสแตนเลส

$$Q = \frac{T_f - T_1}{R_1}$$

$$\text{หา } T_1 \Rightarrow T_1 = T_f - (560 \times 0.217)$$

$$= 698 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{หา } T_2 \Rightarrow T_2 = T_1 - QR_2$$

$$= 697.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{หา } T_3 \Rightarrow T_3 = T_2 - QR_3$$

$$= 137.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

#### 4.2 การกำหนดเงื่อนไขการทดสอบเตาเผาไหม้วัสดุพอรุน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของอาวูธ [1] พบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ภายในเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนที่ผ่านมามีค่าเท่ากับ 1.1 โดยภายหลังการปรับปรุงเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนให้มีลักษณะการจ่ายเชื้อเพลิงผสมกับอากาศเป็นชั้น โดยเงื่อนไขการทดลองเป็นการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก ( $\phi_1$ ) มีค่าอยู่ในช่วง

$$1.3 \leq \phi_1 \leq 1.7$$

หรือ

$$1.3 \leq \left[ \frac{(F/A)_{actual}}{(F/A)_{stoich}} \right] \leq 1.7$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง Air-Fuel ratio

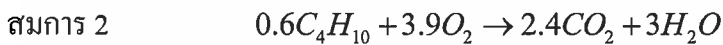
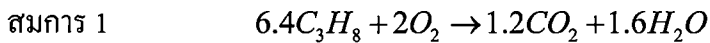
จากสูตร

$$A/F_{stoi} = \frac{m_a}{m_f}$$

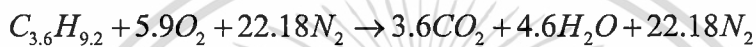
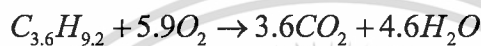
การหาปริมาณอากาศทางทฤษฎีของ LPG

LPG มี โพรเพน  $C_3H_8 = 40\%$  โดยปริมาณ

LPG มี บิวเทน  $C_4H_{10} = 60\%$  โดยปริมาณ



นำสมการ 1+2



$$\therefore C_{3.6}H_{9.2} \text{ จำนวน 1 โมล จะมีปริมาณเท่ากับ } 1 \text{ mole} \times 52.4 \frac{g}{\text{mole}} \times \frac{1kg}{1000g} = 0.052 \text{ kg}$$

$$\therefore \text{อากาศจำนวน 1 โมล จะมีปริมาณเท่ากับ } \frac{(5.9 \times 32) + (22.18 \times 28)}{1000} = 0.810 \text{ kg}$$

นำไปแทนในสูตร Air-Fuel ratio

$$A/F_{stoi} = \frac{m_a}{m_f} = \frac{0.81}{0.052} = 15.6 \frac{kg_{air}}{kg_f}$$

$$F/A_{stoich} = \frac{1}{15.6} = 0.0641 \frac{kg_f}{kg_{air}}$$

และจากเงื่อนไขการทดลองที่ได้มาจากการวิจัยก่อนหน้านี้ ว่าปริมาณอัตราส่วนเกินที่ดีที่สุดในการทดลองมีค่าเท่ากับ 1.1 ดังนั้น จึงจำเป็นต้องคำนวณค่า Excess - Air Ratio = 1.1 โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

ที่ **Excess-Air Ratio = 1.1**

$$EA\% = \frac{(A/F_{ac} - 1)}{A/F_{stoi}} \times 100$$

$$A/F_{ac} \geq (1.1+1) \times 15.6$$

$$\therefore A/F_{ac} \geq 32.76$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Volume Flow Rate ของเชื้อเพลิง LPG มีค่าเท่ากับ 2 ลิตร / นาที ( $Q_{f \text{ actual}} = 2 \text{ L/min}$ ), ค่าความหนาแน่นของอากาศ เท่ากับ  $1.2 \text{ kg/s}$  และค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิง LPG เท่ากับ  $2.0 \text{ kg/s}$  โดยจากสูตรคำนวณ

$$A / F_{ac} = \frac{m_{air}}{m_f}$$

$$A / F_{ac} = \frac{\rho_{air} Q_{air}}{\rho_f Q_f}$$

$$Q_{air} = 109.2 \text{ L/min}$$

และจากค่า Volume Flow Rate ของเชื้อเพลิง LPG มีค่าเท่ากับ 2 ลิตร / นาที ( $Q_{f \text{ actual}} = 2 \text{ L/min}$ ) ดังนั้น mass flow rate ( $m_{f \text{ actual}}$ ) สามารถหาได้โดย

$$m_f = \rho_f Q_f$$

จะได้

$$m_{f \text{ actual}} = 3.33 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$$

เงื่อนไขการทดลองที่ Equivalence Ratio = 1.3

$$\phi = \frac{(A/F)_{stoich}}{(A/F)_{actual}} = \frac{(F/A)_{actual}}{(F/A)_{stoich}}$$

$$\phi_1 = \frac{\left(\frac{m_{f1}}{m_{a1}}\right)_{actual}}{\left(\frac{m_{f1}}{m_{a1}}\right)_{stoich}}$$

$$m_{a1} = \frac{3.3 \times 10^{-5}}{1.3 \times 0.0641}$$

$$m_{a1} = 0.0004 \text{ kg/s}$$

$$Q_{a1} = 20 \text{ L/min}$$

และจากปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 1.1 จะได้  $Q_{air}$  ทั้งระบบ เท่ากับ  $109.2 \text{ L/min}$

$$Q_{a2} = Q_{air} - Q_{a1}$$

$$Q_{a2} = 109.2 - 20$$

$$Q_{a2} = 89.20 \text{ L/min}$$

$$m_{a2} = 0.001784 \text{ kg/s}$$

$$\phi_2 = 0.2915$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขการทดลองที่ Equivalence Ratio = 1.7

$$\phi = \frac{(A/F)_{stoich}}{(A/F)_{actual}} = \frac{(F/A)_{actual}}{(F/A)_{stoich}}$$

$$\phi_1 = \frac{\left(\frac{m_{f1}}{m_{a1}}\right)_{actual}}{\left(\frac{m_{f1}}{m_{a1}}\right)_{stoich}}$$

$$m_{a1} = \frac{3.3 \times 10^{-5}}{1.7 \times 0.0641}$$

$$m_{a1} = 0.000306 \text{ kg/s}$$

$$Q_{a1} = 15.29 \text{ L/min}$$

และจากปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 1.1 จะได้  $Q_{air}$  ทั้งระบบ เท่ากับ 109.2 L/min

$$Q_{a2} = Q_{air} - Q_{a1}$$

$$Q_{a2} = 109.2 - 15.29$$

$$Q_{a2} = 93.91 \text{ L/min}$$

$$m_{a2} = 0.001878 \text{ kg/s}$$

$$\phi_2 = 0.2768$$

ดังนั้นอัตราส่วนสมมูลที่ใช้ในการทดลองทั้งสองส่วน อยู่ในช่วงดังต่อไปนี้

อัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก ( $\phi_1$ ) มีค่าอยู่ในช่วง  $1.3 \leq \phi_1 \leq 1.7$

อัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนที่สอง ( $\phi_2$ ) มีค่าอยู่ในช่วง  $0.277 \leq \phi_2 \leq 0.291$

ปริมาณความร้อนที่เตาเผาไหม้สามารถผลิตได้ (kw)

$$Q = \nabla_{LPG} \times LHV \times \rho_{LPG}$$

$$Q = \nabla \text{ ที่อ่านได้จากโรตาริมเตอร์อากาศ} \times \sqrt{\frac{\rho_{air}}{\rho_{LPG}}} \times LHV \times \rho_{LPG}$$

$$= \frac{2.5}{60 \times 1000} \sqrt{\frac{1.2}{2}} \times 45.8 \times 10^3 \times 2$$

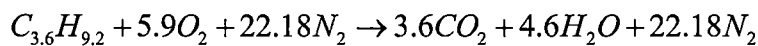
$$\therefore Q = 3 \text{ kw}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การคำนวณหาอุณหภูมิอะเดียแบติก (Adiabatic Flame Temperature)

#### กรณีอากาศทางทฤษฎี

จากสัดส่วนโดยโมลของ LPG เขียนเป็นสมการสมดุลทางเคมีได้ดังนี้



จากสูตรระบบที่มีปฏิกิริยาเคมีที่มีการไหลคงตัวในกรณีที่สารตั้งต้นเข้าห้องเผาไหม้ที่ 25 °C

$$H_{\text{prod}} = H_{\text{react}}$$

$$\sum N_p(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p = \sum N_r(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r$$

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าเอนทาลปีของธาตุที่สภาวะอ้างอิงมาตรฐานและที่ 298 K

สาร	$h_f^\circ (KJ / Kmol)$	$\bar{h}_{298K}$
C	0	0
H <sub>2</sub>	0	8,468
O <sub>2</sub>	0	8,682
N <sub>2</sub>	0	8,669
CO <sub>2</sub>	-393,520	9,364
H <sub>2</sub> O(gas)	-241,820	9,904
H <sub>2</sub> O(liquid)	-285,830	9,904

แทนค่า

$$\begin{aligned} & N_{CO_2}(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298K})_{CO_2} + N_{H_2O}(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298K})_{H_2O} + N_{N_2}(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298K})_{N_2} \\ &= N_{LPG}(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298K})_{LPG} \\ & 3.6kmol_{CO_2}(-393,520 + \bar{h}_{CO_2} - 9364) + 4.6kmol_{H_2O}(-241,820 + \bar{h}_{H_2O} - 9,904) \\ & + 22.18kmol_{N_2}(\bar{h}_{N_2} - 8669) = 0.4(-103,900) + 0.6(-126,200) \\ & 3.6\bar{h}_{CO_2} + 4.6\bar{h}_{H_2O} + 22.18\bar{h}_{N_2} = 2,683,310 \text{ kJ/kg}_f \end{aligned}$$

สมมติอุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 2000 K

$$3.6(100,804)_{CO_2} + 4.6(82,593)_{H_2O} + 22.18(64,810)_{N_2} = 2,180,308 \text{ kJ/kg}_f$$

สมมติอุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 3000 K

$$3.6(162,226)_{CO_2} + 4.6(136,264)_{H_2O} + 22.18(101,407)_{N_2} = 3,460,035 \text{ kJ/kg}_f$$

ทำการประมาณค่าภายในช่วง (Interpolation) หาค่าอุณหภูมิแก๊สได้เท่ากับ

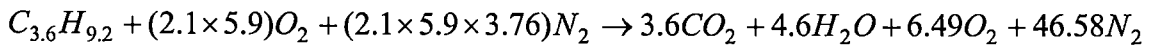
$$T = 2,393K$$

$$= 2,120^\circ C$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กรณีอากาศส่วนเกิน 110%

จากสัดส่วน โดยโมลของ LPG เขียนเป็นสมการสมดุลทางเคมีได้ดังนี้



แทนค่า

$$N_{CO_2}(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298k})_{CO_2} + N_{H_2O}(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298k})_{H_2O} + N_{N_2}(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298k})_{N_2} +$$

$$N_{O_2}(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298k})_{O_2} = N_{LPG}(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298k})_{LPG}$$

$$3.6kmol_{CO_2}(-393,520 + \bar{h}_{CO_2} - 9364) + 4.6kmol_{H_2O}(-241,820 + \bar{h}_{H_2O} - 9,904) + 46.58kmol_{N_2}(\bar{h}_{N_2} - 8,669) + 6.49kmol_{O_2}(\bar{h}_{O_2} - 8,682) = 0.4(-103,900) + 0.6(-126,200)$$

$$3.6\bar{h}_{CO_2} + 4.6\bar{h}_{H_2O} + 46.58\bar{h}_{N_2} + 6.49\bar{h}_{O_2} = 2,951,236 \text{ kJ/kg}_f$$

สมมติอุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1000 K

$$3.6(42,769)_{CO_2} + 4.6(35,882)_{H_2O} + 22.18(30,129)_{N_2} = 1,854,147 \text{ kJ/kg}_f$$

สมมติอุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 3000 K

$$3.6(162,226)_{CO_2} + 4.6(136,264)_{H_2O} + 22.18(101,407)_{N_2} = 3,460,035 \text{ kJ/kg}_f$$

ทำการประมาณค่าภายในช่วง (Interpolation) หาค่าอุณหภูมิแก๊สได้เท่ากับ

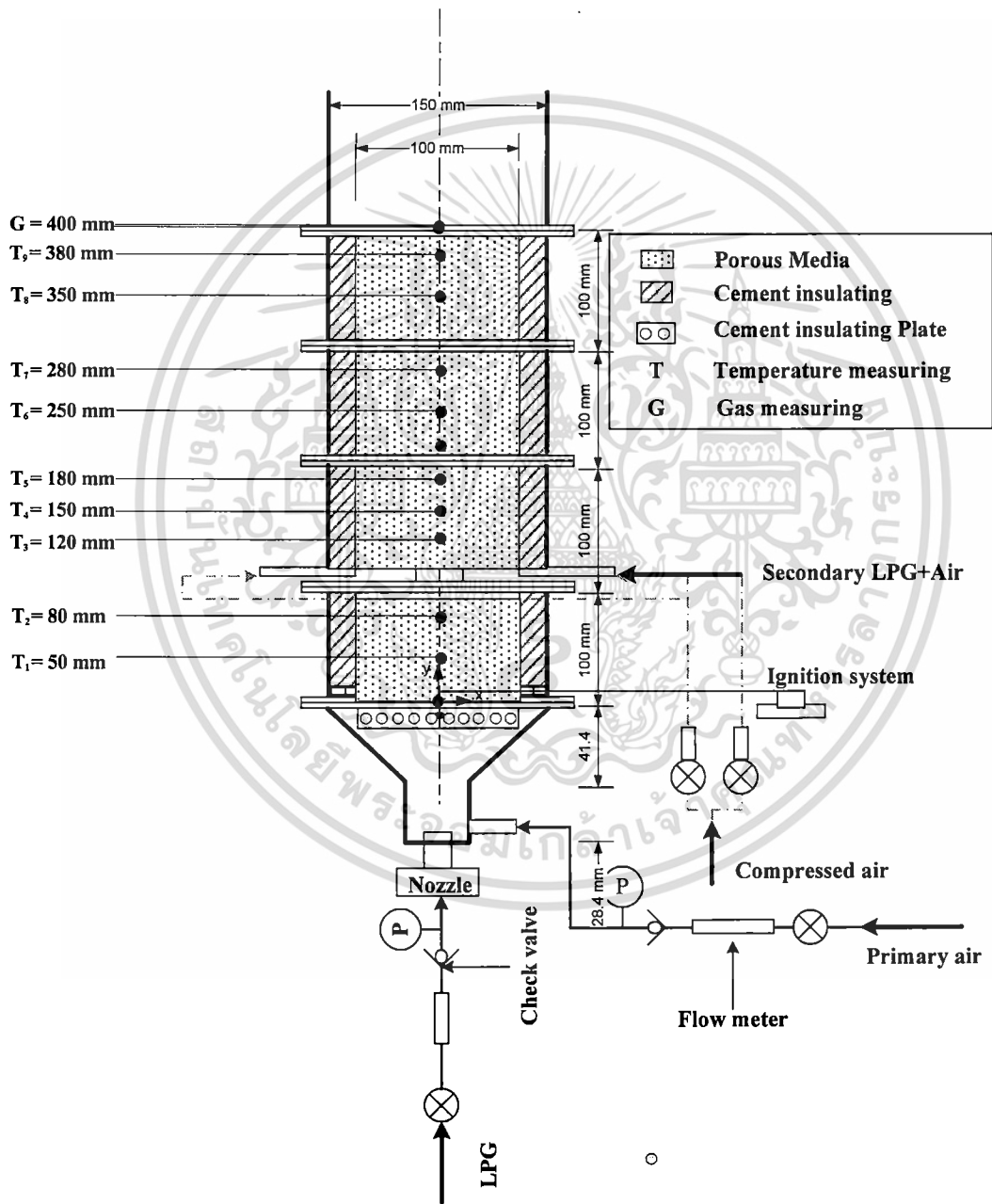
$$T = 1,484 \text{ K} = 1,211 \text{ }^\circ\text{C}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 5.1 ระบบการทดลองและอุปกรณ์



รูปที่ 5.1 แสดงชุดอุปกรณ์เตาเผาไหม้วัสดุพอร์ซเซิลที่มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น

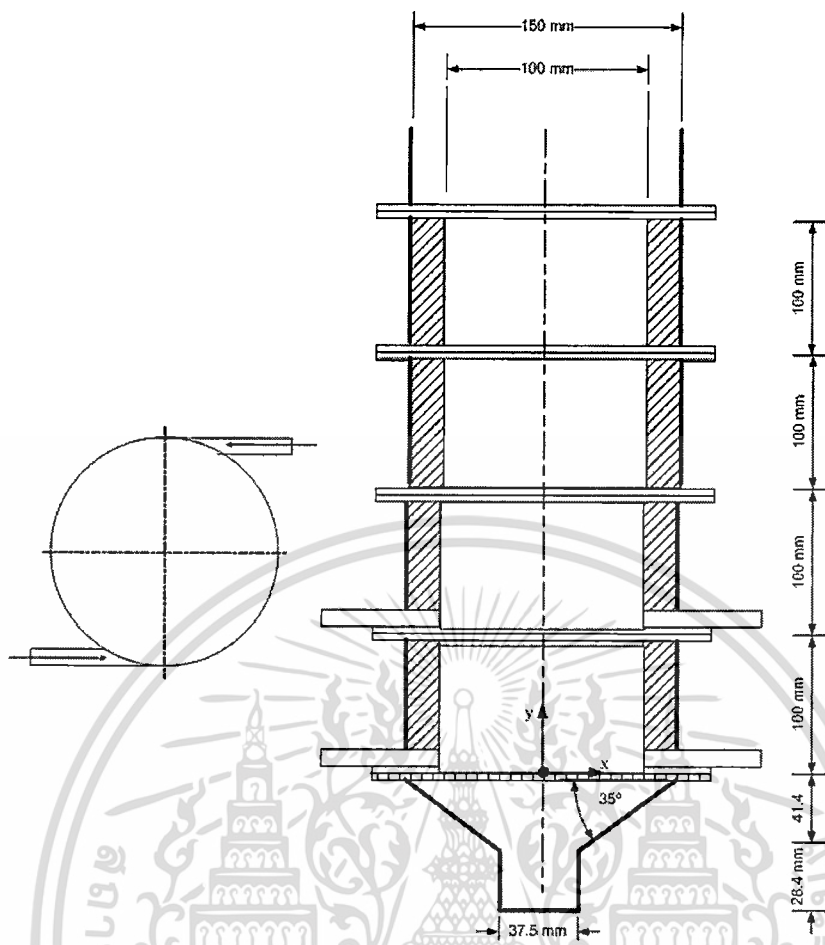
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.1 แสดงชุดทดสอบพฤติกรรมการเผาไหม้และสมรรถนะเบื้องต้นของเตาเผาไหม้วัสดุพูน โดยแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น โดยใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิง โดยเตาเผาไหม้วัสดุพูนนี้ถูกสร้างขึ้นให้มีการเผาไหม้แบบผสม (Premixed Combustor) ซึ่งมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผาประมาณ 10 เซนติเมตร ความสูง 40 เซนติเมตร โดยจะแบ่งของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งถูกกำหนดให้เป็นการผสมแบบหนา โดยจะถูกป้อนเข้าเตาเผาที่บริเวณก้นของเตา ส่วนที่สองถูกกำหนดให้เป็นการผสมแบบบาง ถูกป้อนเข้าเตาเผาที่ระดับความสูง 100 มิลลิเมตร จากตะแกรงจ่ายเชื้อเพลิง (Mixture Distribution Plate) ดังรูปที่ 5.1 โดยการติดตั้งระบบจุดระเบิดของเตาเผาที่ระดับความสูง 100 มิลลิเมตร จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิงและใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิงในการจุดและอุ่นเตาเผา

ในการทดลองทำการปรับอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 5.1 โดยใช้ปั๊มลมเป็นต้นกำลังในการทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศและใช้ Flow Meter (0-300 L/min) เป็นอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอัตราการไหลของอากาศและในการควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจะใช้ Flow Meter (0-5 L/min) เป็นอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอัตราการไหลเช่นเดียวกัน ส่วนในการบันทึกค่าอุณหภูมิจะบันทึกอุณหภูมิทั้งหมด 10 ระดับความสูงทุก ๆ 5 นาที โดยใช้ Thermocouple Type K และใช้ Data Logger เป็นอุปกรณ์ในการบันทึกผล นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัว จะวัดก๊าซไอเสียโดยใช้เครื่องวัดก๊าซ วัดที่บริเวณท่อทางออกดังรูปที่ 5.1 โดยก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ที่บันทึกในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>), ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ซึ่งจะนำไปใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $\eta_c$ )

### 5.1.1 เตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น

ตัวเตาเผาทำจากสแตนเลสท่อทรงกระบอก มีส่วนประกอบหลักๆอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีลักษณะเป็นรูปกรวยหงายอยู่ล่างสุดของเตาทำหน้าที่ผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ส่วนที่หนึ่ง ถัดขึ้นไปเป็นส่วนของห้องเผาไหม้ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก โดยรวมเตาเผาไหม้ี้มีความสูงประมาณ 435 mm ผนังเตามีการหล่อซีเมนต์ทนไฟ และหุ้มฉนวนที่ผนังเตาด้านนอก (ระบบอะเดียบติก) เพื่อลดการลดการสูญเสียความร้อน



รูปที่ 5.2 แสดงขนาดเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้นและลักษณะการจ่ายอากาศ

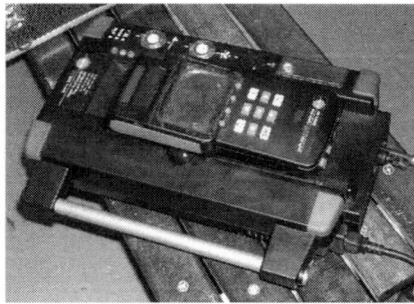
### 5.1.2 ระบบการวัดอุณหภูมิ

ในการทดลองทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ระดับความสูงจากแผ่นกระจายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ทั้งหมด 10 จุด คือ ที่ระดับความสูง 0, 50, 80, 120, 150, 180, 250, 280, 350, 380 mm จากแผ่นกระจายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ดังแสดงในรูป 5.2 โดยใช้ Thermocouple type K เป็นอุปกรณ์ในการวัดและใช้ Data logger เป็นอุปกรณ์ในการบันทึกผล

### 5.1.3 การวัดมลพิษ

การวัดมลพิษใช้เครื่องมือวัดไอเสียของ Testo รุ่น 350 XL ทำการเก็บค่าที่ระดับความสูง 435 mm จากแผ่นกระจายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ โดยก๊าซไอเสียที่ทำการบันทึกประกอบไปด้วย  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$  ซึ่งระยะเวลาในการเก็บบันทึกจะทำการเก็บข้อมูลทุก ๆ 1 นาที ระยะเวลา 30 นาที โดยทุกค่าของข้อมูลถูกเก็บที่เงื่อนไขสภาวะคงตัวเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผา นอกจากนี้อุณหภูมิของก๊าซไอเสียยังถูกบันทึกไปพร้อมกับปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงเครื่องมือวัดไอเสียของ Testo รุ่น 350 XL

## 5.2 พารามิเตอร์ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าอากาศส่วนเกิน, อัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์สำหรับทดลองสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้น

พารามิเตอร์	ปริมาณ/ชนิด	หน่วย
<b>คุณสมบัติ LPG</b>		
สัดส่วน Propane : Butane	40:60	% โดยโมล
ค่าความร้อนขั้นต่ำ (Low Heating Value)	45.8	MJ/kg
ความหนาแน่น	2.011	kg/m <sup>3</sup>
<b>เงื่อนไขที่ทางเข้าห้องเผาไหม้</b>		
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง	2	L/min
อากาศส่วนเกิน	110-180	%
อัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก	1.3 – 1.7	-
อัตราการป้อนอากาศส่วนที่หนึ่ง	6	L/min
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	25	°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 วิธีการทดลอง

1. ทำการป้อนของผสมระหว่างเชื้อเพลิง LPG กับอากาศส่วนที่หนึ่ง เข้าสู่เตาเผาที่อัตราการไหลต่ำๆ และทำการจุดเตาและอุ่นเตาจนห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น
2. เพิ่มปริมาณอากาศและอัตราการป้อนเชื้อเพลิงขึ้นอย่างช้าๆ รักษาระดับของอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงไว้ ปรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง
3. ปล่อยให้เตาเผาทำงานต่อไปจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาเผาเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยควรทำการตรวจสอบพารามิเตอร์ดังกล่าวตลอดการทดลอง

#### 5.3.1 การเก็บข้อมูล

ในการทดสอบแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 4-5 ชั่วโมง โดยทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทุก ๆ 5 นาที ตลอดการทดลองตามระดับความสูง จากแผ่นกระจายผลผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ (ดังหัวข้อที่ 5.1.2) ซึ่งเมื่อเตาเผาอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) แล้ว ทำการบันทึกก๊าซไอเสียที่ระดับความสูง 400 mm จากแผ่นกระจายของผลผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ โดยก๊าซไอเสียที่ทำการบันทึกประกอบไปด้วย  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$

### 5.4 เงื่อนไขการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาศมรรถนะเบื้องต้นของเตาเผาไหม้แบบจ่ายของผลผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้น รวมถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผา โดยทำการคงที่พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับเตาเผา เท่ากับ 3 กิโลวัตต์ (KW) โดยได้ออกแบบการทดลอง ดังนี้

**กรณีศึกษาที่ 1** จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้พบว่าลักษณะเตาเผาไหม้วัสดุพูนนี้เหมาะสมกับสัดส่วนอากาศส่วนเกินที่ 110 % จึงทำให้งานวิจัยชิ้นนี้คงที่ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % ด้วย โดยเงื่อนไขการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศขั้นแรก ( $1^{st}$  Stage) ( $\phi_1$ ) ไว้เท่ากับ 1.3, 1.5 และ 1.7 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 5.2)

**กรณีศึกษาที่ 2** จากผลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลในกรณีศึกษาที่ 1 พบว่าในส่วน of อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.7 มีค่าอุณหภูมิภายในเตาที่สูงที่สุดมีค่าสูงมาก และถ้าพิจารณาจากงานวิจัย พบว่าการเพิ่มอัตราอากาศส่วนเกินให้มากขึ้นจะส่งผลต่อแนวโน้มอุณหภูมิที่สูงมากขึ้นด้วย โดยถ้าหากปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองของอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.7 ให้มีค่าอัตราอากาศส่วนเกินเพิ่มสูงขึ้น อาจเกิดความเสียหายต่อวัสดุที่ใช้ในการสร้างเตาเผาไหม้วัสดุพูน ได้ ดังนั้นการทดลองปรับเปลี่ยนอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % จึงมีการทดลองเฉพาะอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก ( $1^{st}$  Stage) ( $\phi_1$ ) เท่ากับ 1.3 และ 1.5 เท่านั้น (ดังตารางที่ 5.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**กรณีศึกษาที่ 3** จากผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก (1<sup>st</sup> Stage) ( $\phi_1$ ) เท่ากับ 1.3 และ 1.5 ในกรณีศึกษาที่ 2 เราพบว่าในส่วนของอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.5 มีการกระจายอุณหภูมิภายในเตาที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.3 จึงทำให้ผู้วิจัย ทำการทดลองเปลี่ยนค่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %, 150 % และ 180 % ที่อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก (1<sup>st</sup> Stage) ( $\phi_1$ ) เท่ากับ 1.5 (ดังตารางที่ 5.2)

โดยทั้ง 3 กรณีศึกษา จะทำการบันทึกอุณหภูมิตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง ในส่วนของการบันทึกก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้นั้น จะเริ่มทำการบันทึกภายหลังจากจุดเตา เมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว

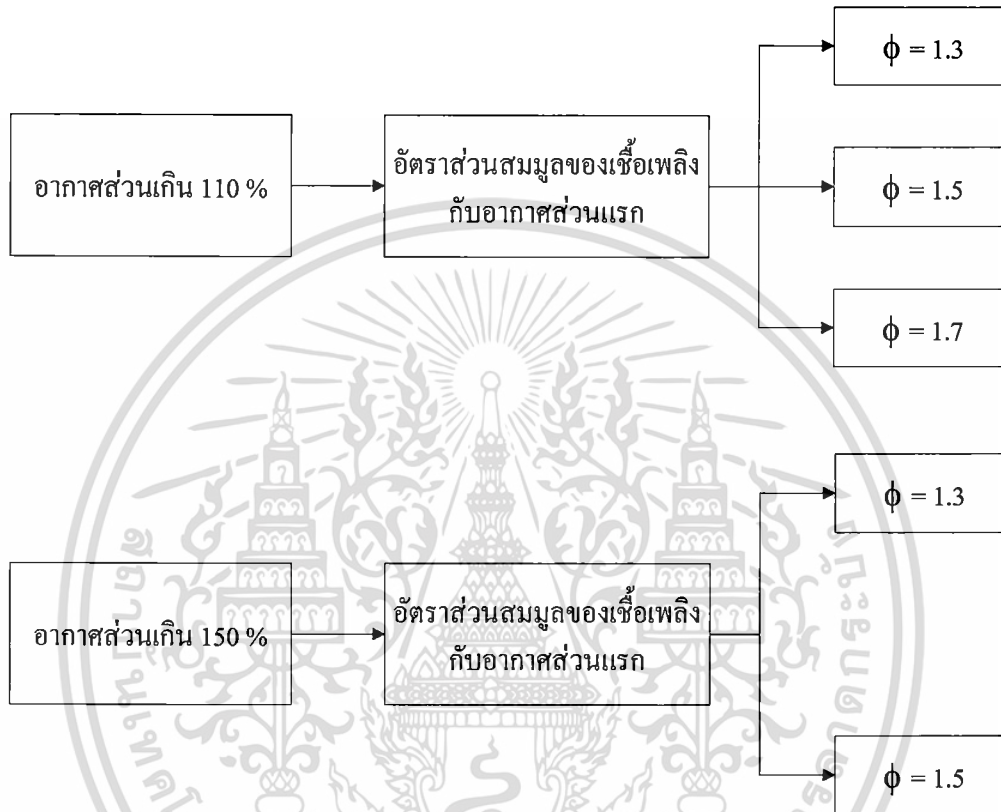
**ตารางที่ 5.2** เงื่อนไขการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก และค่าอากาศส่วนเกิน

Run No.	Energy input (kW)	Excess Air (%)	Equivalent Ratio of 1 <sup>st</sup> Stage	Equivalent Ratio of 2 <sup>nd</sup> Stage
1	3	110	1.3	0.291
2			1.5	0.283
3			1.7	0.277
4	3	150	1.3	0.236
5			1.5	0.231
6	3	110	1.5	0.283
7		150		0.231
8		180		0.203

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

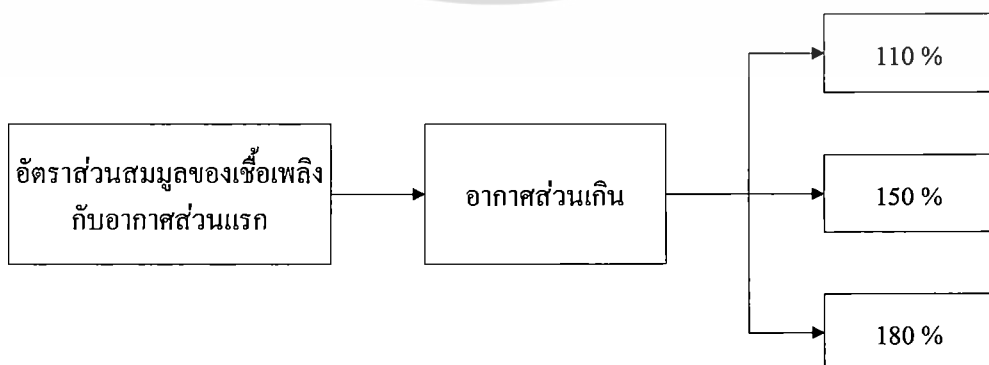
ในการศึกษากลไกการก่อตัวของไนโตรเจนออกไซด์ รวมถึงศึกษาพฤติกรรมและการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้น โดยมีแผนผังขั้นตอนทดลองรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 5.4.1 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก



รูปที่ 5.4 แผนผังการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก

#### 5.4.2 การศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนเกิน



รูปที่ 5.5 แผนผังการศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

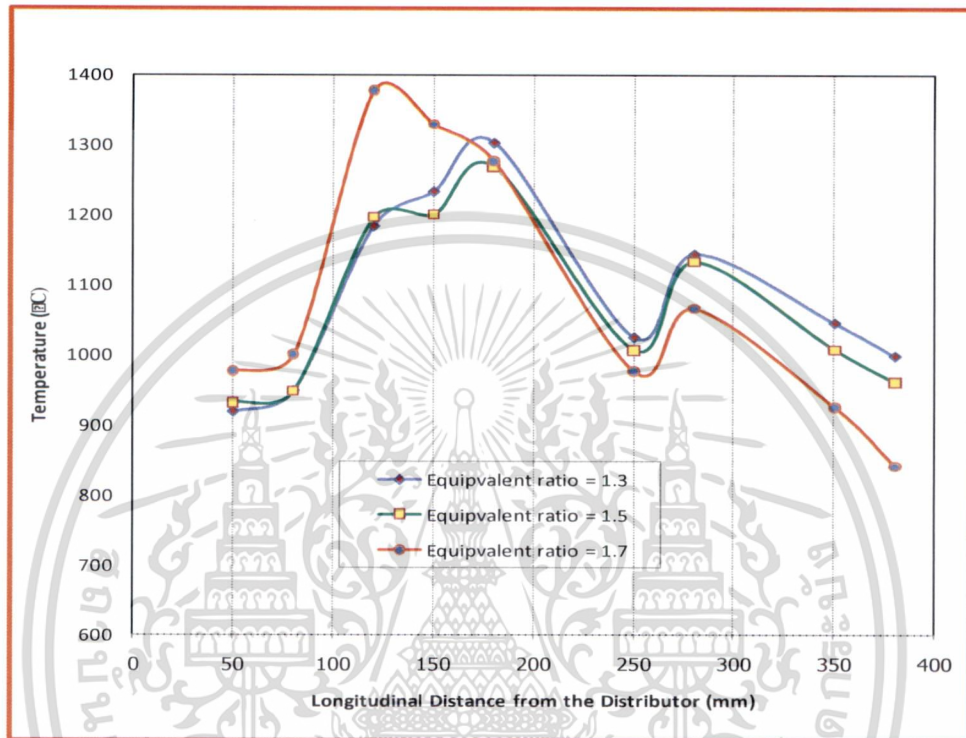
จากการวิจัยด้านการพัฒนาเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่ผ่านมาของกลุ่มนั้น ได้มีการวิจัยโดยพัฒนาในหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้เตาเผาวัสดุพูน [1], เตาเผาไหม้วัสดุพูน Part 2: อิทธิพลของอากาศส่วนเกิน [2] โดยจากประเด็นปัญหาของงานวิจัยดังกล่าว ไม่ว่าจะเป็นประเด็นของอุณหภูมิที่ลดต่ำลงเมื่อฉีดอากาศระหว่างชั้นเข้าไปในเตาเผาไหม้ อุณหภูมิที่ลดต่ำลงเมื่อความสูงของเตาสูงขึ้น การเกิด  $\text{NO}_x$  ในปริมาณที่มาก การกระจายตัวของอุณหภูมิไม่คงที่ตลอดทั้งเตาเผาไหม้ หรืออุณหภูมิที่สูงไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานเมื่อติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในเตา จากปัญหาที่กล่าวข้างต้น จึงทำให้เกิดสมมติฐานที่ใช้ปรับปรุงเตาเผาไหม้วัสดุพูนในงานวิจัยนี้ขึ้น คือ การจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศแบบขั้นน่าจะช่วยให้การกระจายอุณหภูมิในเตามีความสม่ำเสมอ และอุณหภูมิจะไม่แปรผันตามระดับความสูงของเตาเผา ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการปรับปรุงเตาเผาไหม้วัสดุพูนให้มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้น ซึ่งเป็นที่มาของการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- 1) การศึกษาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรกภายในเตาเผาไหม้วัสดุพูน กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %
- 2) การศึกษาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรกภายในเตาเผาไหม้วัสดุพูน กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 %
- 3) การศึกษาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรกเท่ากับ 1.5 ที่ค่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %, 150 % และ 180 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.1 การศึกษาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรกภายในเตาเผาไหม้วัสดุพูน กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %

### 6.1.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูงภายในเตาเผาไหม้วัสดุพูน กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %



รูปที่ 6.1 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูงกรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %

รูปที่ 6.1 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % โดยในการทดลองพบว่าการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกที่ใช้ในการเผาไหม้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยจากรูปหลังจากฉีดเชื้อเพลิงส่วนแรกเข้าไปจะพบว่าอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 900 °C ในทุกกรณีศึกษา และจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และจะเพิ่มมากขึ้นสูงสุดในช่วงระดับความสูงตั้งแต่ 120 จนถึง 180 มิลลิเมตร จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง

กรณีอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.3 และ 1.5 จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงความสูงที่ระดับ 180 มิลลิเมตร โดยระดับอุณหภูมิอยู่ที่ 1300 °C ในกรณีอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.7 จะมีอุณหภูมิที่สูงกว่า 2 กรณีที่ได้กล่าวข้างต้น โดยสูงถึง 1400 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่สำคัญที่สังเกตจากรูปที่ 6.1 คือ ที่ระดับความสูง 120 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งถัดจากตำแหน่งฉีดเชื้อเพลิงกับอากาศเพิ่มขึ้น ได้เกิดการเผาไหม้ที่รุนแรงขึ้นในครั้งแรกทั้ง 3 กรณีศึกษา บางส่วนของความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการนำความร้อน และการแผ่รังสี มีการถ่ายเทไปยังบริเวณที่บันทึกค่าอุณหภูมิ  $T_2$  และ  $T_1$  ตามลำดับ โดยจะสังเกตเห็นได้ว่ากรณีที่ ป้อนส่วนผสมในส่วนที่ 2 เท่ากับ 0.277 (สัมพันธ์กับการป้อนอากาศส่วนที่ 1 เท่ากับ 1.7) จะมีระดับอุณหภูมิของ  $T_2$  และ  $T_1$  สูงกว่า อีกสองกรณีที่เหลือ การป้อนส่วนผสมบางที่อัตราส่วนสมมูล 0.277 ในตำแหน่ง 100 มิลลิเมตรนั้น ส่งผลให้เกิดการพัดพาสูงกว่ากรณีอื่น อัตราการคลุกเคล้าปั่นป่วนระหว่างผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงและอากาศในช่องว่างระหว่างเม็ดคอลลูมิน่าจึงสูงกว่า เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อุณหภูมิที่บริเวณ  $T_3$  สูงกว่ากรณีอื่น

การเกิดการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำและการแผ่รังสีดังกล่าว ก่อให้เกิดช่วงของการอุ่นส่วนผสมของเชื้อเพลิงและอากาศพร้อมทั้งมีการเผาไหม้เกิดขึ้นบางส่วน ตั้งแต่ระยะ 0 ถึง 100 มิลลิเมตร การเผาไหม้ในช่วงนี้เป็นการไหม้ภายใต้เงื่อนไขส่วนผสมหนา (อัตราส่วนสมมูลเกิน 1.0) ใช้น้ำซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์เกิดการรวมตัวกับไฮโดรคาร์บอน เกิดเป็น อนุพลอิสระ และโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลง หรือเรียกได้ว่าเป็นการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal Cracking) สอดคล้องกับการค้นพบของนักวิจัยในอดีต โดยเมื่อองค์ประกอบของน้ำ และ Hydrocarbon เกิดขึ้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า “Steam Methane Reforming (SMR)” ขึ้น โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นในช่วงของอุณหภูมิระหว่าง 700 – 1100 องศาเซลเซียส [21] ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่อปฏิกิริยาเกิดต่อเนื่อง และดูดความร้อนในอัตราที่สูงกว่าอัตราการผลิตความร้อนจากการเผาไหม้ ผลที่เกิดขึ้นคือทำให้อุณหภูมิของเตาในตำแหน่งถัดออกไปมีอุณหภูมิลดลงดังที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงความสูงประมาณ 250 มิลลิเมตร และต่อมาได้เกิดการเผาไหม้ที่รุนแรงในครั้งที่สองของทั้ง 3 กรณีศึกษา โดยมีปัจจัยมาจากการเผาไหม้ขององค์ประกอบของเชื้อเพลิงโมเลกุลขนาดเล็กที่แตกตัวในช่วงแรก จากกระบวนการคลุกเคล้าเกิดขึ้นต่อมาที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ในอัตราที่สูงอีกครั้ง เราอาจจะอธิบายจากลักษณะที่ปรากฏว่าเปรียบเสมือนเป็นอุปกรณ์กำเนิดก๊าซสังเคราะห์ในช่วงแรกของเตา แต่ด้วยอัตราส่วนสมมูลของส่วนผสมที่ทางเข้าที่สองของเตามีค่าต่ำ นั่นคือมีอากาศผสมกับเชื้อเพลิงในส่วนนี้ที่มากเกินไป จึงเกิดการผสมคลุกเคล้าและเกิดจุดสูงสุดของอุณหภูมิช่วงแรกที่ระยะระหว่าง 100 ถึง 200 มิลลิเมตร แล้วแต่กรณี โดยเชื้อเพลิงยังเผาไหม้ไม่หมด จากนั้นกระบวนการ Thermal Cracking ดูดความร้อนต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิต่ำลงต่อมาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น มีการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่เหลืออยู่ อุณหภูมิในช่วง 280 มิลลิเมตรจึงสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่งก่อนออกจากห้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำลงเนื่องจากการสูญเสียความร้อนที่ทางออก

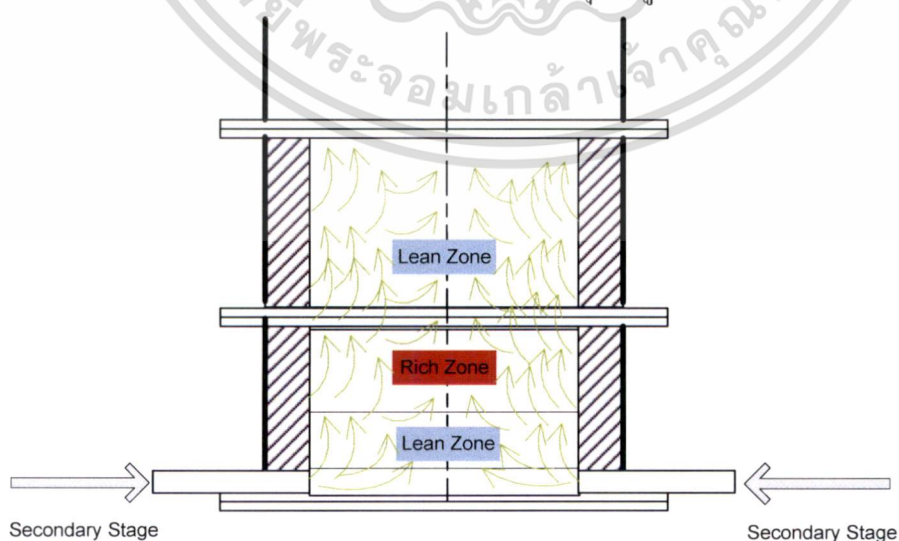
ผลกระทบของสัดส่วนการแบ่งอากาศเกิดขึ้นอย่างชัดเจนต่ออุณหภูมิที่วัดได้ เราจะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิสูงสุดนั้น แปรผันตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนสมมูลช่วงที่ 1 กล่าวได้ว่า การเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอัตราส่วนผสมในช่วงที่ 1 คือการแบ่งอากาศให้ถูกป้อนเข้าสู่ส่วนที่สองของห้องเผาไหม้ พร้อมกับเชื้อเพลิงในส่วนที่สองมากขึ้นนั่นเอง ประเด็นที่สังเกตเห็นนี้บ่งชี้ว่าการควบคุมส่วนผสมในส่วนของการอุ่นที่ระยะ 100 มิลลิเมตรแรกให้หนาขึ้น จะส่งผลต่อการเผาไหม้ที่รุนแรงภายหลัง จากที่ได้ป้อนส่วนผสมที่บางกว่าเข้าไปในช่องทางเข้าที่สอง โดยเห็นการเพิ่มสูงขึ้นของอุณหภูมิที่ ระยะประมาณ 120 ถึง 180 มิลลิเมตร อุณหภูมิจึงได้ตกลงมา ที่ระยะ 250 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาถึง เหตุผลของการเพิ่มสูงขึ้นของอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวนี้น่าจะมีสาเหตุส่วนหนึ่งจากการเกิด ออกซิเดชันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการ Thermal Cracking และ อีกสาเหตุหนึ่งเมื่อมาพิจารณาการฉีดเชื้อเพลิงที่บางกว่าเข้าไปในช่องทางเข้าที่สองจะส่งผลให้เกิด ความเร็วของการหมุนวน (Eddy Velocity) ที่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านหลังของเม็ดอนุภาคน้ำมัน มีค่ามากขึ้น จึงทำให้การอัตราส่วนผสม (Mixing Rate) กั้นระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิ ช่วงดังกล่าวสูงขึ้นด้วย

ในช่วงระยะความสูง 280 มิลลิเมตร ของกรณีศึกษาอัตราส่วนผสมที่ช่องทางเข้าแรก เท่ากับ 1.7 มีค่าต่ำกว่าอีก 2 กรณีศึกษานั้น เพราะเชื้อเพลิงได้ผ่านกระบวนการ Thermal Cracking ในสัดส่วนที่มากกว่า บางส่วนก็ได้มีการเผาไหม้ที่รุนแรงเกิดขึ้นพร้อมกันไป และบางส่วนก็ได้ หลงเหลือไปเผาไหม้ต่อที่ระยะประมาณ 275 มิลลิเมตร โดยเริ่มสังเกตได้จากระดับอุณหภูมิที่ระยะ 250 มิลลิเมตร เป็นต้นไป สำหรับกรณีศึกษาที่ อัตราส่วนผสมที่ทางเข้าเท่ากับ 1.5 และ 1.3 นั้น จะ เกิด Thermal Cracking Process ในสัดส่วนที่ลดน้อยลงตามลำดับ เชื้อเพลิงจึงเข้าสู่กระบวนการ คลุกเคล้ากับอากาศและเผาไหม้กับออกซิเจนโดยไม่ผ่านเส้นทาง Thermal Cracking ในสัดส่วนที่ มากขึ้นตามลำดับเช่นกัน การเผาไหม้ของโมเลกุลเชื้อเพลิงภายใต้ Chemical Pathway นี้ มีการดูด ความร้อนและคายความร้อนที่บริเวณเดียวกัน โดยมีการคายความร้อนสูงกว่า ดังนั้นเมื่อพิจารณาผล โดยรวมจึงเป็นการคายความร้อน ดังนั้นลักษณะที่ตกลงของอุณหภูมิจึงเกิดขึ้นน้อยกว่า ตามลำดับ



รูปที่ 6.2 แสดงสภาวะของส่วนผสมที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้วัสดุพูน

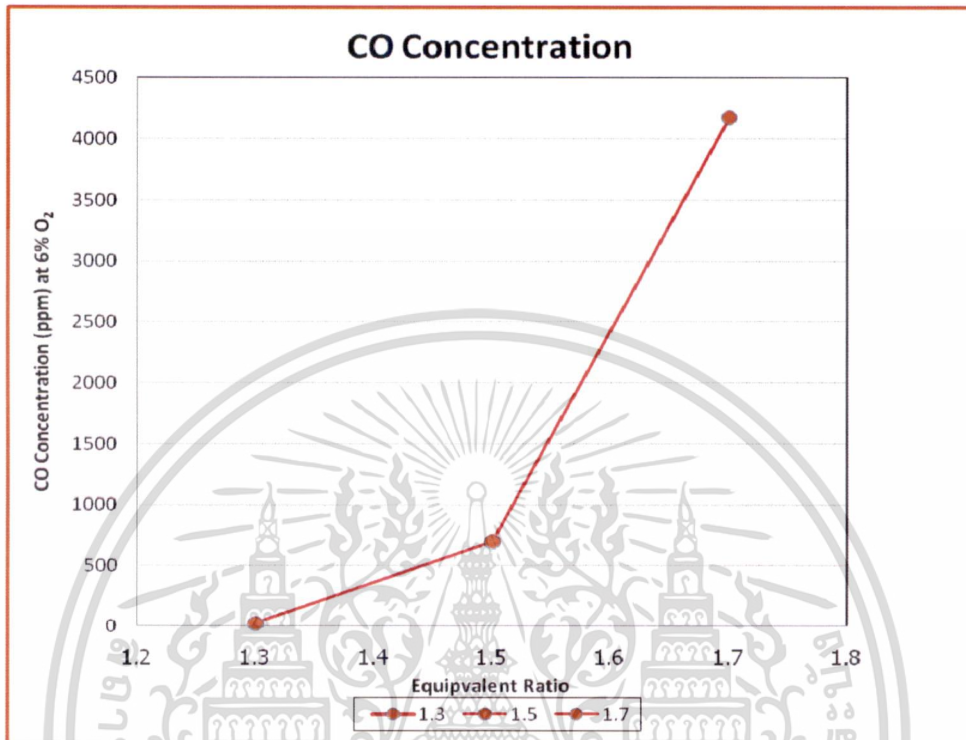
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ฟรี หรือมีลิขสิทธิ์ที่ผู้อื่นมิชอบ โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบการคำนวณและจำลองกระบวนการทางวิศวกรรมโยธาและการคำนวณโครงสร้างอาคารของกรมโยธาธิการและผังเมือง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสรุป สาเหตุที่มีการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงกว่า และเกิดการตกลงอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิ ในกรณีที่มีการป้อนเชื้อเพลิงส่วนผสมหนาขึ้นที่ช่องทางเข้าแรกนั้น ก็เนื่องมาจาก 1) มีการป้อนส่วนผสมที่บางกว่าเข้าไปในช่องทางเข้าที่สอง หรือ Secondary Air นี้ ส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่บริเวณดังกล่าวสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นการเร่งอัตราการผสมกันระหว่างไอเสียร้อนกับส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ อัตราการคายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ดังกล่าวได้ส่งผลให้อุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $T_3$  เพิ่มขึ้น 2) การที่มีกระบวนการ Thermal Cracking เกิดขึ้นในปริมาณมากกว่า เนื่องจากอุณหภูมิของการอุ่นเชื้อเพลิงที่ระยะแรกมีสูงกว่าในสภาพที่เชื้อเพลิงหนากว่าด้วย อนุพลอิสระที่เป็นผลิตภัณฑ์ของกระบวนการนี้ มีการเผาไหม้ที่รวดเร็วกว่าจึงให้อุณหภูมิที่สูงกว่า 3) ลักษณะการดูดความร้อนของกระบวนการ Thermal cracking และการคายความร้อนของกระบวนการออกซิเดชัน ที่มีมากกว่าสำหรับกรณีที่มีการป้อนเชื้อเพลิงหนาในช่องทางเข้าส่วนแรก จึงทำให้อุณหภูมิในช่วงดังกล่าวสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.2

ที่ตำแหน่งตรวจวัด  $T_8$  และ  $T_9$  จนถึงบริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ พบการลดลงอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิ อันมีอีกสาเหตุมาจากการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในบริเวณทางออกของเตาเผาไหม้วัสดุพูน ประกอบกับกรณีของอัตราส่วนสมมูล 1.7 นั้น มีการสูญเสียความร้อนผ่านผนังและจุดเชื่อมต่อของเตามากกว่า (โดยเฉพาะในช่วง 100 ถึง 150 มิลลิเมตร) อุณหภูมิที่ต่ำลงในช่วงท้ายของการเผาไหม้ส่งผลกระทบบึงลบต่อการเผาไหม้ของคาร์บอนมอนอกไซด์ และมีการปลดปล่อยสูงขึ้นอย่างมาก ดังจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

## 6.1.2 องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %

### 6.1.2.1 องค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %



รูปที่ 6.3 แสดงปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้  
กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %

รูปที่ 6.3 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรก เท่ากับ 1.3, 1.5 และ 1.7 โดยจากรูปที่ 6.3 พบว่าปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) มีค่าต่ำในกรณีของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.3 โดยมีปริมาณความเข้มข้นของ CO เท่ากับ 22 ppm ที่มาตรฐาน 6% O<sub>2</sub> และมีค่าเพิ่มมากขึ้นในกรณีอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.5 และ 1.7 ตามลำดับ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 700 – 4000 ppm ที่มาตรฐาน 6% O<sub>2</sub> โดยจากผลการทดลองดังกล่าวได้มีประเด็นที่น่าสนใจ กล่าวคือในกรณีที่อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.7 มีอุณหภูมิที่จุดตรวจวัด T8 และ T9 ต่ำลงอย่างชัดเจน ที่เงื่อนไขการทดลองนี้ถึงแม้สัดส่วนอากาศที่ผสมเข้ากับเชื้อเพลิงส่วนที่สองจะมีสูง เกิดการเร่งการคลุกเคล้าระหว่างไอเสียร้อนและ

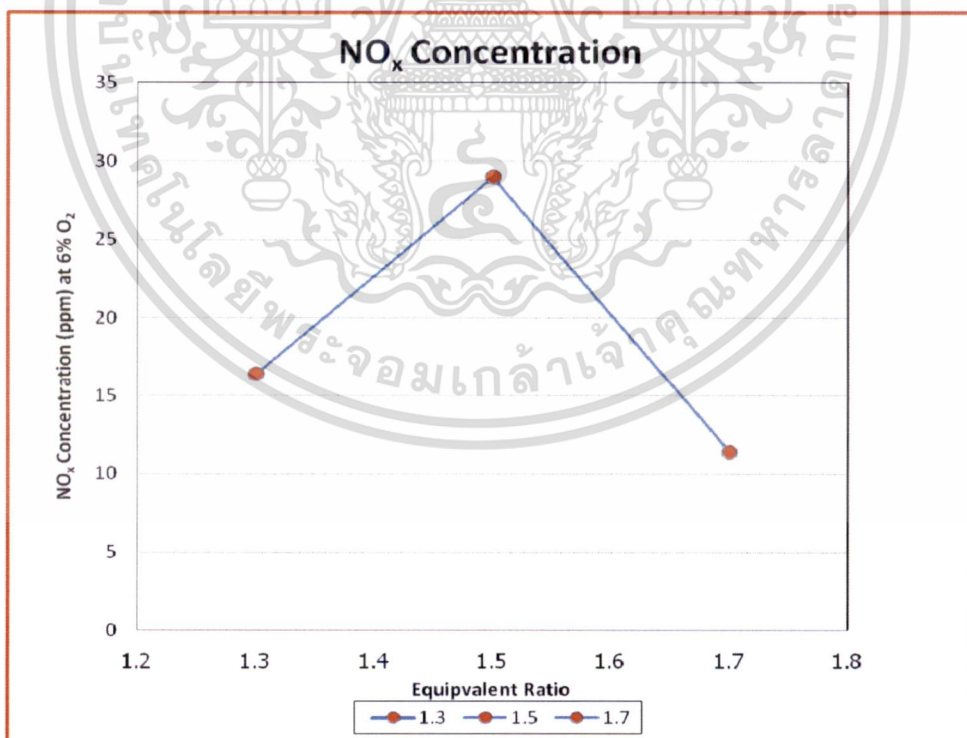
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผสมที่เกิดอุณหภูมิสูงในช่วงแรกของการเผาไหม้ แต่อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว (อันเป็นผลจาก Thermal Cracking ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น) ที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้เอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง CO กับออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่จึงลดต่ำลง ส่งผลให้มีค่าปริมาณความเข้มข้นของ CO ที่ทางออกสูงถึง 4000 ppm บ่งชี้ถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

จากปริมาณความเข้มข้นของ CO ที่ได้จากการทดลองเราสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นของ CO เพิ่มขึ้น มีสาเหตุมาจาก 2 ปัจจัย ปัจจัยแรกมาจากการที่เพิ่มอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกสูงขึ้น ทำให้ปริมาณ Unburned Hydrocarbon เพิ่มขึ้น อีกหนึ่งปัจจัยมาจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นใกล้ทางออกของเตา มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของการทดลองที่อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.5 และ 1.7 ทำให้อัตราการกำจัด CO ต่ำกว่า เป็นผลให้ค่าประสิทธิภาพในการเผาไหม้น้อยกว่า

#### 6.1.2.2 องค์ประกอบของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %



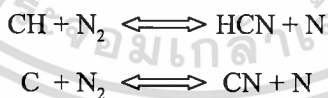
รูปที่ 6.4 แสดงปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %

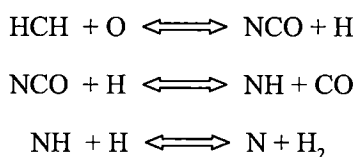
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.4 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.3, 1.5 และ 1.7 โดยจากรูปที่ 6.4 พบว่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในทุกกรณีศึกษานั้น อยู่ในช่วง 11 – 28 ppm ที่มาตรฐาน 6%  $\text{O}_2$  ซึ่งจากรูปที่ 6.1 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นไม่เกิน 1400 °C ทำให้โอกาสเกิดในการเกิด Thermal  $\text{NO}_x$  (Zeldovich Mechanism) มีน้อย เนื่องจาก  $\text{NO}_x$  ประเภทนี้ จะเกิดขึ้นในช่วงที่มีการเผาไหม้ในช่วงที่มีอุณหภูมิสูง (High Temperature Combustion) กว่า 1500 °C [17] แต่ก็ไม่อาจจะเลยได้เนื่องจากการเผาไหม้นี้เป็นแบบปั่นป่วน ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดอุณหภูมิสูงถึงระดับที่ก่อให้เกิด Thermal  $\text{NO}_x$  ได้ในช่วงเวลาสั้นๆ และด้วยเหตุที่เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นก๊าซปิโตรเลียม (LPG) ทำให้ไม่เกิด Fuel  $\text{NO}_x$  เช่นเดียวกัน ดังนั้นปริมาณ  $\text{NO}_x$  ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จึงมีปริมาณต่ำ ซึ่งปริมาณ  $\text{NO}_x$  ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่น่าจะเกิดขึ้นมาจาก Prompt  $\text{NO}_x$  โดย  $\text{NO}_x$  ลักษณะนี้จะเกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างไฮโดรคาร์บอนกับไนโตรเจนในของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ในสถานะส่วนผสมหนา โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิที่ก่อให้เกิด Thermal  $\text{NO}_x$

จากผลการทดลองมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจ คือ ค่า  $\text{NO}_x$  ที่เกิดขึ้นไม่ได้แปรผันตามระดับสูงสุดของอุณหภูมิที่วัดได้ในเตาเผาไหม้ หรือแม้กระทั่งอุณหภูมิที่ทางออกของเตา เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจนขึ้น ถึงกลไกในการก่อเกิด Prompt  $\text{NO}_x$  และการสลายตัวของ  $\text{NO}_x$  และจากการค้นหางานวิจัยพบว่าเมื่อพิจารณาลักษณะการเกิด  $\text{NO}_x$  ของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศที่มากกว่า 1.2 จะพบว่า  $\text{NO}$  ที่เกิดขึ้นจะมาจาก  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$  และ  $\text{HCN}$  [18] ซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์ Fenimore mechanism [17] โดยลักษณะการเกิด  $\text{NO}_x$  ประเภทนี้สามารถอธิบายได้จากสมการ ดังนี้

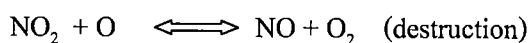
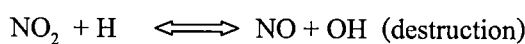
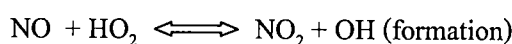


จากสมการข้างต้นเมื่อเกิดการปฏิกิริยาการเผาไหม้ขึ้น อนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของไนโตรเจนเพื่อสร้างสารประกอบประเภท Organic Compounds ที่มีสารประกอบไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (amines) และ cyano โดยต่อมาจะเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ (intermediate compounds)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาพบรรยากาศโดยทั่ว ๆ ไปการเกิด Nitric Oxide เกิดการออกซิไดซ์จากไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ) ซึ่งมีรูปแบบการเกิดและการสลาย ดังสมการต่อไปนี้



เราจะพบว่าเมื่อมีอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอนเหลืออยู่กับอนุมูลอิสระที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ก็จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการก่อตัวของ NO (formation) และหากอนุมูลอิสระไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับ NO ก็จะส่งผลให้มีการสลาย NO (destruction) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของ Intermediate Species ที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิของการเผาไหม้ต่อการก่อตัวและการสลายตัวของ NO

ด้วยเหตุที่การปลดปล่อย NO ที่วัดได้ที่ทางออกเป็นผลสุทธิของการก่อกำเนิดและการสลายตัวของ NO ตลอดช่วงของห้องเผาไหม้ เมื่อพิจารณาจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในเตาเผาไหม้วัสดุพรมในส่วนแรก ที่เป็นแบบ Rich combustion (equivalent ratio มากกว่า 1.0) บริเวณนี้จึงมีการก่อตัวของอนุมูลอิสระ HCN และองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ในปริมาณมาก อนุมูลอิสระชนิดนี้ เมื่อทำปฏิกิริยากับ NO (ที่เกิดจาก Prompt NO formation) ก็จะสลาย NO และสร้างอนุมูลอิสระอื่นๆรวมทั้ง  $\text{N}_2$  ในการเผาไหม้ที่ช่วงต่อมาซึ่งเป็นแบบ Lean Combustion (equivalent ratio น้อยกว่า 1.0) หากมีอนุมูลอิสระที่หลงเหลือจากการเผาไหม้และการทำปฏิกิริยากับ NO ในช่วงแรก อนุมูลเหล่านี้ก็จะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนไปเป็น NO และมีการสูญเสียของ NO ไปพร้อมกันจากการทำปฏิกิริยาของ NO กับอนุมูลอิสระที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ

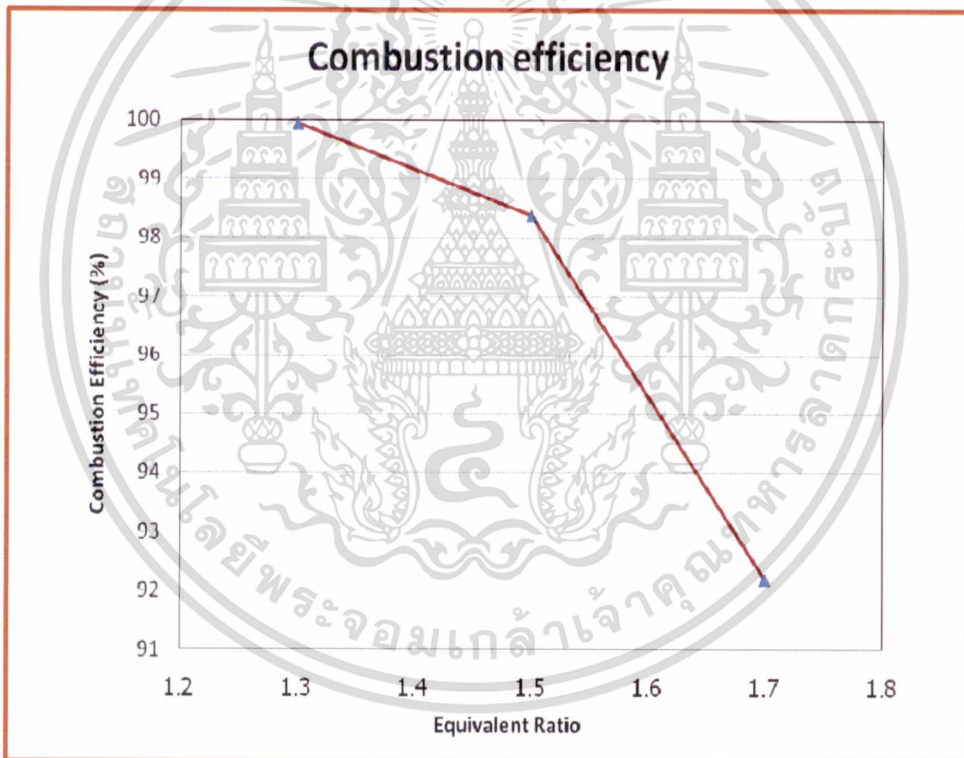
ในกรณีที่มีการป้อนส่วนผสมส่วนแรกของห้องเผาไหม้ที่ค่าอัตราส่วนผสมเท่ากับ 1.7 นั้น มีการตรวจพบปริมาณการปลดปล่อย CO ที่สูง ถึง 4000 ppm ด้วยเช่นกัน สะท้อนให้เห็นถึงปริมาณอนุมูลอิสระของไฮโดรเจนที่ยังเผาไหม้ไม่หมดในบริเวณห้องเผาไหม้ในกรณีนี้ด้วย สิ่งนี้นอกจากจะส่งเสริมให้เกิดกระบวนการก่อตัวของ NO เนื่องจากเป็นช่วงของส่วนผสมบางแล้ว ก็ยังส่งเสริมให้เกิดการสลายตัวของ NO ด้วยเช่นกัน โดยค่าของการปลดปล่อย NO โดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 11 ppm ที่มาตรฐาน 6%  $\text{O}_2$

การสลายตัวของ NO จากการทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนกรณีแบ่งอากาศป้อนเข้าห้องเผาไหม้ส่วนแรกพร้อมกับเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสม 1.5 นั้นจะไม่มากเท่ากับกรณีอัตราส่วนผสม 1.7 ทั้งนี้เพราะปริมาณของอนุมูลอิสระในช่วงที่สองของห้องเผาไหม้จะต่ำกว่าซึ่งสะท้อนให้เห็นได้จากการพิจารณาการปลดปล่อยของ CO ซึ่งมีค่าเท่ากับ 700 ppm การปลดปล่อย NO ในกรณีนี้จึงมีค่าสูงกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 28 ppm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เงื่อนไขการแบ่งอากาศเพื่อผสมกับเชื้อเพลิงในส่วนแรกเท่ากับอัตราส่วนผสม 1.3 นั้น ปริมาณอนุมูลอิสระที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนจะมีน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสองกรณีที่ได้กล่าวมา ในขณะที่เดียวกันเงื่อนไขที่ก่อให้เกิด Prompt NO ก็จะมีน้อยกว่าเช่นกัน เนื่องจาก Prompt NO จะเกิดได้มากที่สุดที่การเผาไหม้ภายใต้เงื่อนไขเชื้อเพลิงหนาแน่นมาก จึงสังเกตเห็นปริมาณ NO ที่ 16 ppm ที่ทางออกโดยสรุป ปริมาณของ NO ที่วัดได้เป็นปฏิภาคผกผันกับปริมาณ CO สำหรับกรณีอัตราส่วนผสมส่วนแรก 1.5 และ 1.7 บ่งชี้ถึงอิทธิพลของกระบวนการสลาย NO จากการทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ ในขณะที่กรณีอัตราส่วนผสมส่วนแรก 1.3 การก่อตัวของ prompt NO มีน้อย สาเหตุมาจากส่วนผสมที่หนาน้อยที่สุด ทั้งนี้กระบวนการก่อตัวและการสลายตัวในช่วงต่อมาของการเผาไหม้ก็จะมีน้อยกว่าในกรณีอื่นเช่นกัน

### 6.1.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้และอุณหภูมิ กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %



รูปที่ 6.5 แสดงประสิทธิภาพการเผาไหม้ภายในเตาเผาวัสดุพรุน  
กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %

รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้และอุณหภูมิภายในเตาเผาวัสดุพรุน กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % โดยจากผลการทดลองพบว่าในเงื่อนไขการทดลองเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรก เท่ากับ 1.3 และ 1.5 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ มากกว่า 98 % ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างค่อนข้างเอกลสารเป็นเอกลสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติหนาไปไซประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบูรณ์ โดยเกิดจากสัดส่วนที่เหมาะสมในการเผาไหม้ ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรก เท่ากับ 1.7 ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าต่ำ เท่ากับ 92 % ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เมื่อเทียบกับค่าการทดลองที่ได้กล่าวมา โดยน่าจะมีผลมาจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นใกล้ทางออกของเตา ส่งผลต่อปริมาณการปลดปล่อย CO ที่สูงขึ้น ซึ่งจากนิยามประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตา ปริมาณ CO จึงส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเตา

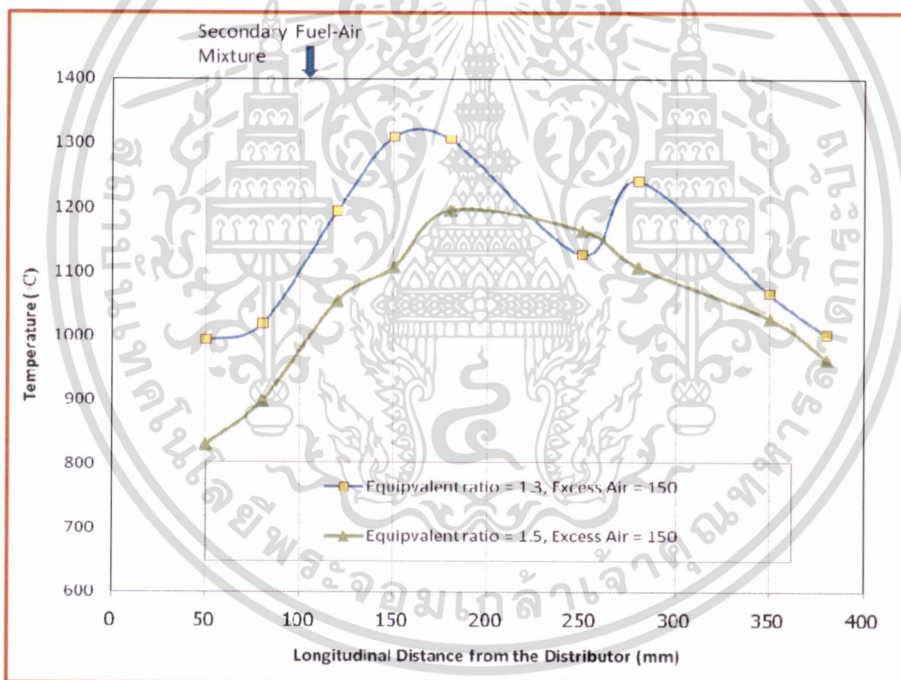


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 การศึกษาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก ภายในเตาเผาไหม้วัสดุพูน กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 %

จากผลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 6.1 เราพบว่าใน ส่วนของอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.7 มีค่าอุณหภูมิภายในเตาที่สูงที่สุดมีค่าสูงมาก และถ้า พิจารณาจากงานวิจัย พบว่าการเพิ่มอัตราอากาศส่วนเกินให้มากขึ้นจะส่งผลต่อแนวโน้ม อุณหภูมิที่สูงมากขึ้นด้วย โดยถ้าหากปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองของอัตราส่วนสมมูล เท่ากับ 1.7 ให้มีค่าอัตราอากาศส่วนเกินเพิ่มสูงขึ้น อาจเกิดความเสียหายต่อวัสดุที่ใช้ในการ สร้างเตาเผาไหม้วัสดุพูน ได้ดังนั้นการทดลองปรับเปลี่ยนอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % จึงมี การทดลองเฉพาะอัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก (1<sup>st</sup> Stage) ( $\phi_1$ ) เท่ากับ 1.3 และ 1.5 เท่านั้น

### 6.2.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 %



รูปที่ 6.6 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับ ความสูง กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 %

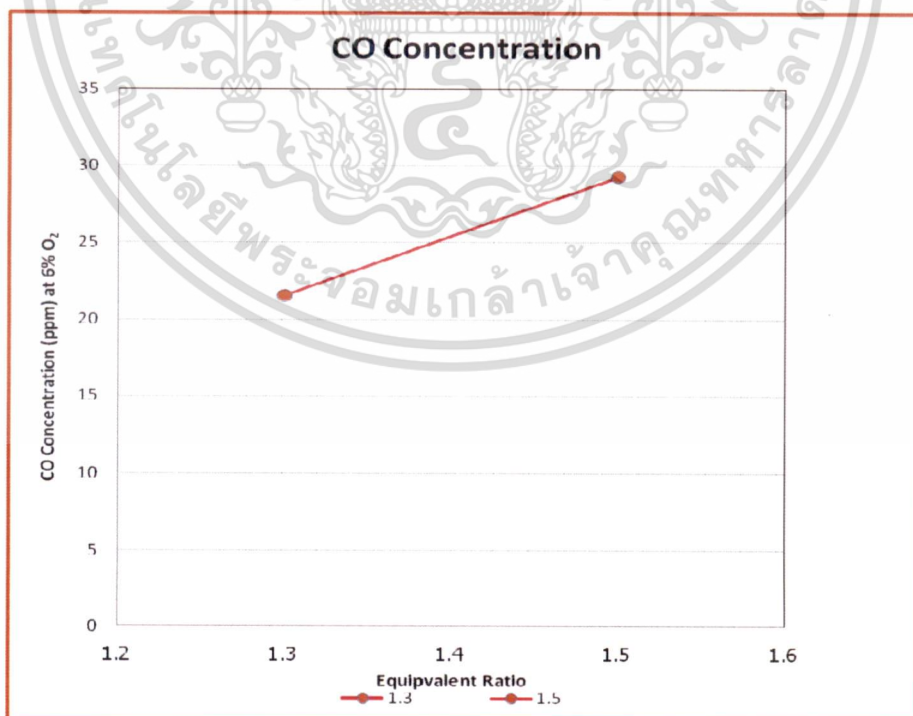
รูปที่ 6.6 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระดับความสูง กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % โดยในการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูล ของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเป็น 1.3 และ 1.5 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปพบว่าการปรับเปลี่ยน อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.5 มีการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สม่าเสมอว่ากรณีอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.3 โดยจะเห็นได้จากค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงความสูง 180 ถึง 280 จากแผ่นกระจายของผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง โดยมีอุณหภูมิการเผาไหม้สูงที่สุดมีค่าประมาณ 1200 องศาเซลเซียส

โดยเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.6 พบว่ากรณีอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.5 จะไม่เกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงเช่นเดียวกับกรณีอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.3 โดยน่าจะมีสาเหตุมาจากช่วงแรกของการเกิดการเผาไหม้ไม่เกิดปรากฏการณ์ Thermal Cracking ซึ่งเป็นสาเหตุที่นำมาสู่การเกิดออกซิเดชันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งเมื่อพิจารณาถึงพจน์การพา (Convection Term) พบว่าอัตราการผสม (Mixing Rate) ของกรณีอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.5 ที่ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 นั้น เกิดจากการผสมกันในปริมาณที่พอดี ไม่ก่อให้เกิดภาวะแยกชั้นของการเผาไหม้แบบหนา และบางในเตาเผาไหม้วัสดุพูน ส่งผลให้การกระจายอุณหภูมิในกรณีดังกล่าวสม่าเสมอมากกว่าอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเป็น 1.3 โดยรายละเอียดสาเหตุที่มีการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงกว่า และเกิดการตกลงอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิในกรณีที่มีการป้อนเชื้อเพลิงส่วนผสมหนาขึ้นที่ช่องทางเข้าแรกนั้น ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 6.1.1

## 6.2.2 องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 %

### 6.2.2.1 องค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนออกไซด์ กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 %



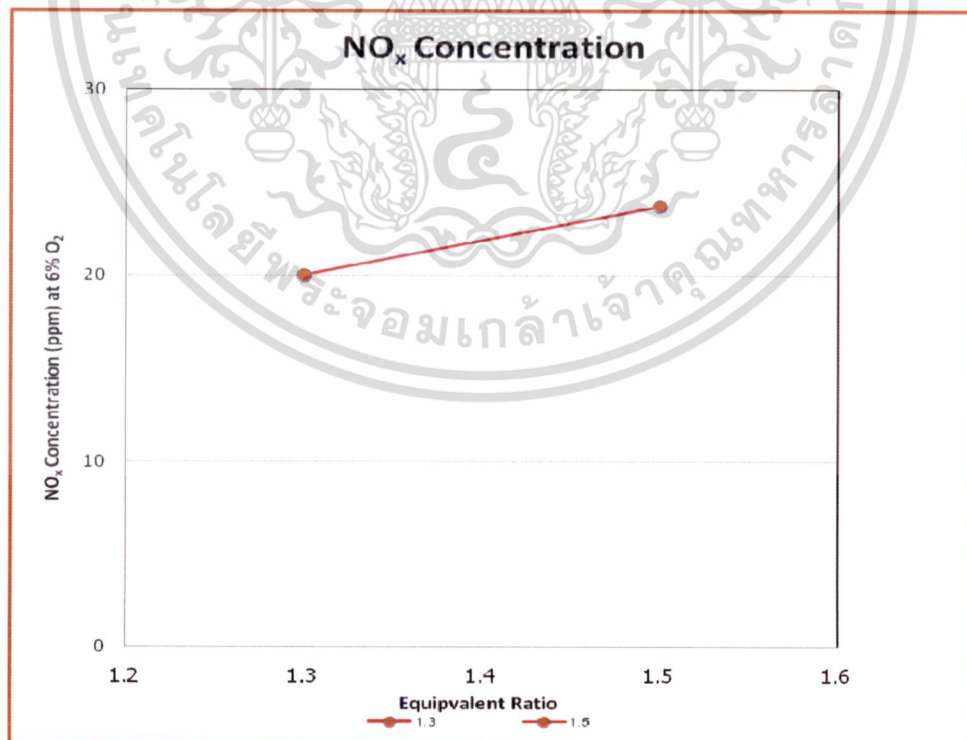
รูปที่ 6.7 แสดงปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.7 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.3 และ 1.5

จากการสังเกต พบว่าปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) มีค่าต่ำทั้งสองกรณีศึกษา โดยมีค่าปริมาณความเข้มข้นของ CO เท่ากับ 21.56 และ 29.28 ppm ที่อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.3 และ 1.5 ตามลำดับ โดยปริมาณความเข้มข้นของ CO ที่อากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % และจากรูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.7 มีประเด็นที่สอดคล้อง และเป็นประเด็นยืนยันว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นของ CO เพิ่มขึ้น มีสาเหตุมาจาก 2 ปัจจัย ปัจจัยแรกมาจากการที่เพิ่มอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกสูงขึ้น ทำให้ปริมาณ Unburned Hydrocarbon เพิ่มขึ้น อีกหนึ่งปัจจัยมาจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นใกล้ทางออกของเตา มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของการทดลองที่อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.3 ทำให้อัตราการกำจัด CO ต่ำกว่า เป็นผลให้ค่าประสิทธิภาพในการเผาไหม้น้อยกว่า

#### 6.2.2.2 องค์ประกอบของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 %



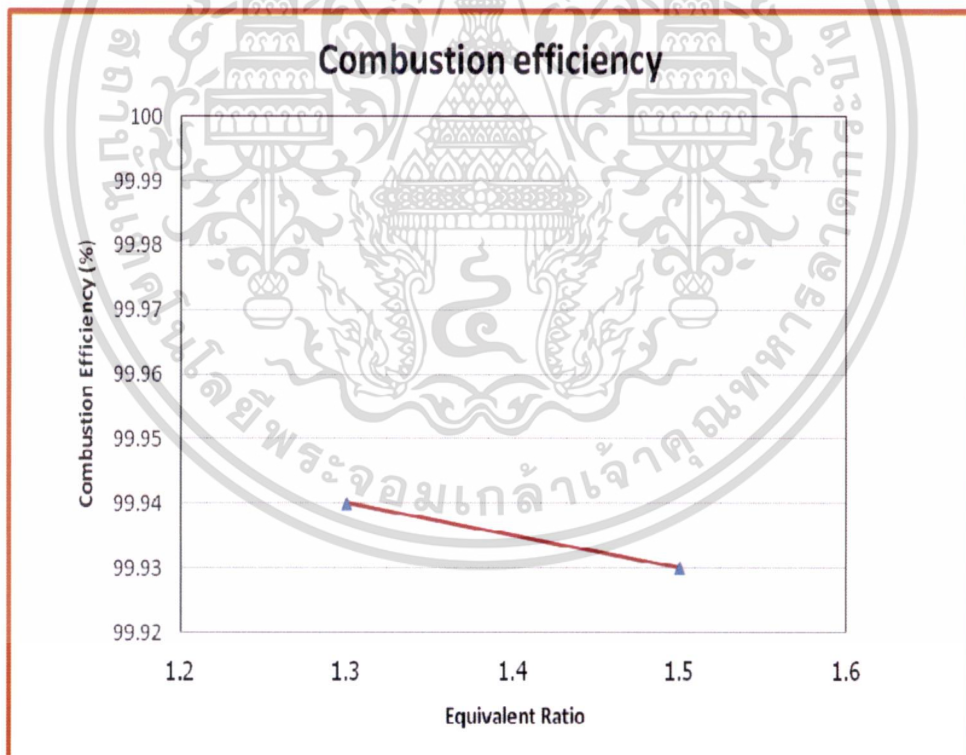
รูปที่ 6.8 แสดงปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150% นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.8 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.3 และ 1.5

จากผลการทดลองในกรณีศึกษา พบว่าปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) มีค่าต่ำทั้งสองกรณีศึกษา โดยมีปริมาณความเข้มข้นของ  $\text{NO}_x$  เท่ากับ 19.99 ppm และ 23.7 ที่มาตรฐาน 6%  $\text{O}_2$  ในกรณีอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.3 และ 1.5 ตามลำดับ และจากรูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.7 พบว่ามีประเด็นที่สอดคล้อง และเป็นประเด็นยืนยันว่าปริมาณความเข้มข้นของ  $\text{NO}_x$  จะเกิดมากขึ้นตามสัดส่วนของอัตราส่วนสมมูลที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณ  $\text{NO}_x$  ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็น Prompt  $\text{NO}_x$  ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหนานั้นเอง ตามที่ได้อธิบายหลักการไว้ในหัวข้อ 6.1.2.2

### 6.2.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้และอุณหภูมิ กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 %



รูปที่ 6.9 แสดงประสิทธิภาพการเผาไหม้เตาเผาวัสดุพูน  
กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 %

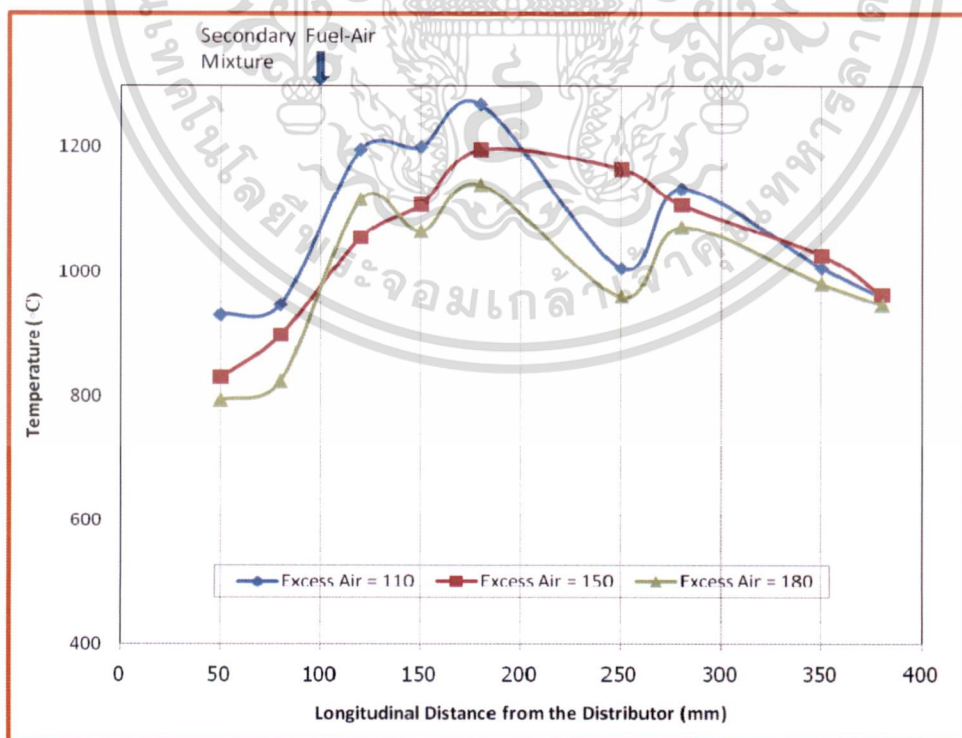
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้และอุณหภูมิภายในเตาเผาวัสดุพูน กรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % โดยจากผลการทดลองพบว่าในเงื่อนไขการทดลองเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรก เท่ากับ 1.3 และ 1.5 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ มีค่าเท่ากับ 99.94 และ 99.93 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างค่อนข้างสมบูรณ์

### 6.3 การศึกษาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรกเท่ากับ 1.5 ที่ค่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % , 150 % และ 180 %

จากผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก (1<sup>st</sup> Stage) ( $\phi_1$ ) เท่ากับ 1.3 และ 1.5 ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 6.2 เราพบว่าในส่วนของอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.5 มีการกระจายอุณหภูมิภายในเตามีความสม่ำเสมอมากกว่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.3 จึงทำให้ผู้วิจัย ทำการทดลองเปลี่ยนค่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % , 150 % และ 180 % ที่อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก (1<sup>st</sup> Stage) ( $\phi_1$ ) เท่ากับ 1.5

#### 6.3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง กรณีอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรก เท่ากับ 1.5



#### รูปที่ 6.10 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.5 นี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

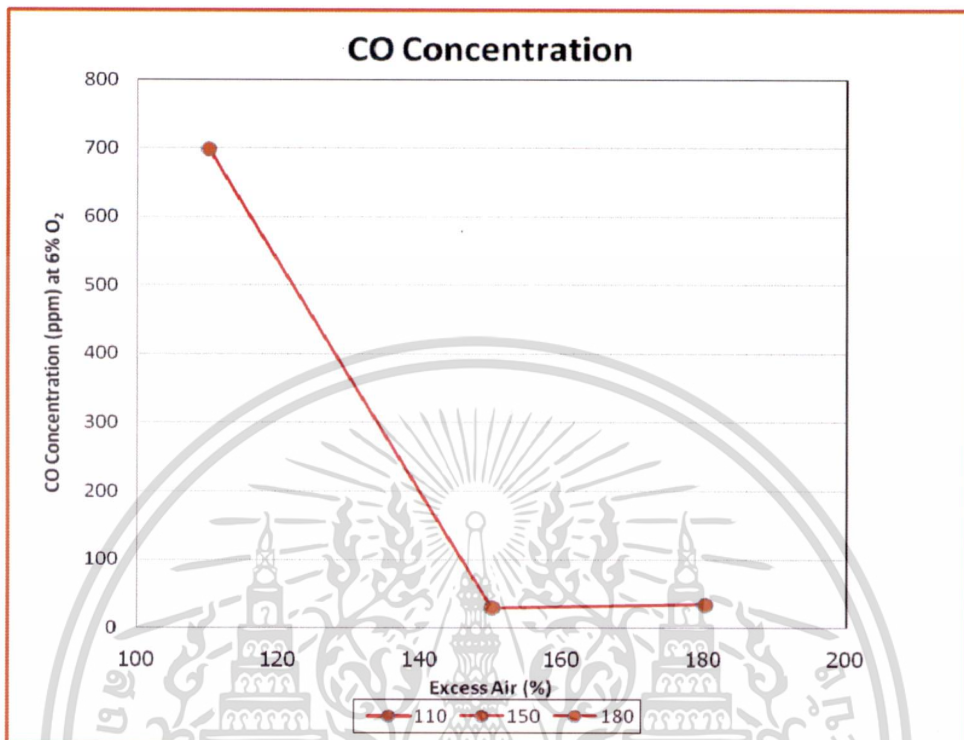
รูปที่ 6.10 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระดับความสูง กรณีอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.5 โดยในการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %, 150 % และ 180 %

พบว่ากรณีค่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % มีค่าการกระจายอุณหภูมิกายในเตาเผาใหม่ สม่่าเสมอกว่าอีก 2 กรณี รวมทั้งเมื่อพิจารณาประเด็นที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นภายหลังจากกน็อคเชื้อเพลิงชั้นที่ 2 นั้น น่าจะมีสาเหตุส่วนหนึ่งจากการเกิดออกซิเดชันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการ Thermal Cracking และอีกสาเหตุหนึ่งเมื่อมาพิจารณาการกน็อคเชื้อเพลิงที่บางกว่าเข้าไปในช่องทางเข้าที่สองจะส่งผลให้เกิดความเร็วของการหมุนวน (Eddy Velocity) ที่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านหลังของเมื่อดอกูมินา มีค่ามากขึ้น จึงทำให้การอัตราการผสม (Mixing Rate) กันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิช่วงดังกล่าวสูงขึ้นด้วย โดยรายละเอียดสาเหตุที่มีการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงกว่า และเกิดการตกลงอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิ ในกรณีที่มีการป้อนเชื้อเพลิงส่วนผสมหนาขึ้นที่ช่องทางเข้าแรกนั้น ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 6.1.1

จากผลการทดลองที่สังเกตได้ เราพบว่ากลไกเพียงกลไกเดียวนั้น ไม่สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ตลอดช่วงของเงื่อนไขการทดลองที่ทำการศึกษา โดยผู้วิจัยสันนิษฐานว่าการเพิ่มเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินภายในเตาเผาใหม่วัสดุพูนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้นนั้น ก่อให้เกิดกลไกที่ส่งเสริมการเผาไหม้ นั่นคือ การเพิ่มขึ้นของค่าอากาศส่วนเกินทำให้เกิดอัตราการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสูงขึ้น ในขณะเดียวกันยังเกิดกลไกที่ส่งผลด้านลบต่อการเผาไหม้ (เช่น การเพิ่มขึ้นของภาวะทางความร้อนภายในเตาเผาใหม่วัสดุพูน, การเพิ่มค่าอากาศส่วนเกินส่งผลให้เกิดการพัดพาที่มากขึ้นไป โดยอาจเปรียบเสมือนว่าการเพิ่มอากาศส่วนเกินส่งผลให้ความเร็วของผสมระหว่างอากาศเชื้อเพลิงมีค่ามากกว่าความเร็วของเปลวไฟ (Flame Speed) ทำให้ของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศถูกพัดพาออกจากบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ จากปัจจัยทั้งสองที่ได้กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้เมื่อเพิ่มค่าอากาศส่วนเกินให้มากขึ้น จะเกิดการดับของเปลวลงในบางจุด หรือเรียกว่า “Local Flame Extinction” ด้วยเหตุที่ปัจจัยเชิงบวกและเชิงลบที่เกิดขึ้นพร้อมกันดังที่กล่าวมานี้มีอิทธิพลในระดับที่แตกต่างกันไปในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง เราจึงไม่สามารถคาดการณ์แนวโน้มของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอากาศส่วนเกินได้ อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Local Flame Extinction” นี้ สามารถสังเกตเห็นได้จากลักษณะการกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่กรณีค่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % และ 180 %

### 6.3.2 องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย กรณีอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.5

#### 6.3.2.1 องค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ กรณีอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.5

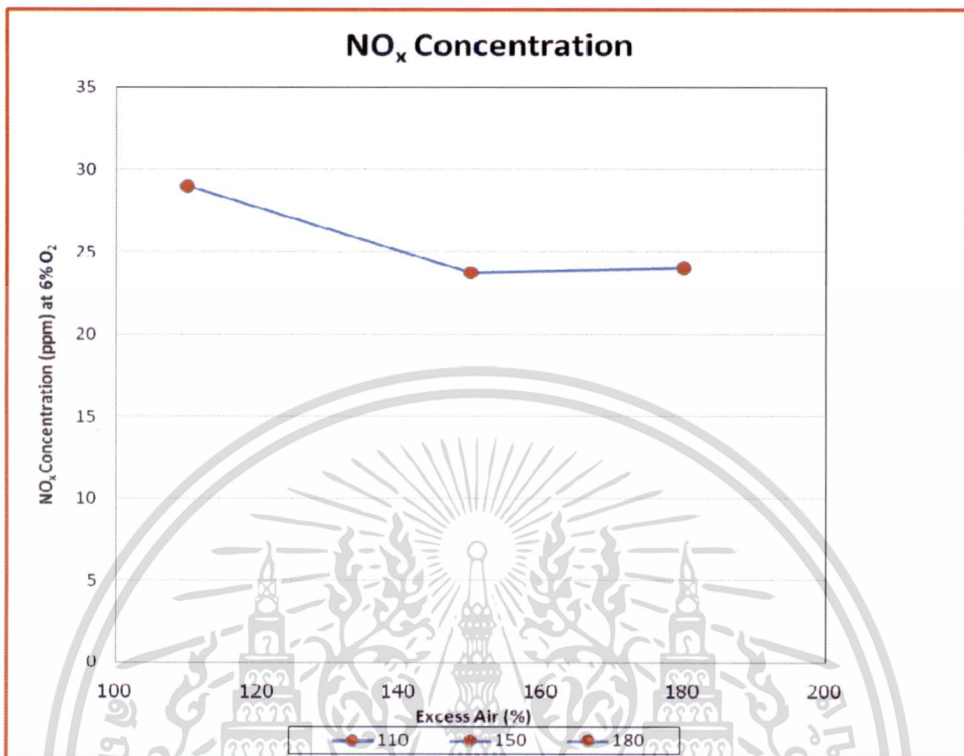


รูปที่ 6.11 แสดงปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้  
กรณีอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.5

รูปที่ 6.11 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้กรณีอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.5

พบว่าปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) ลดลงอย่างชัดเจน เมื่อปริมาณอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้น โดยมีค่าปริมาณ CO เท่ากับ 698, 29.28 และ 33.84 ppm ที่ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %, 150 % และ 180 % ตามลำดับ โดยปริมาณความเข้มข้นของ CO ที่อากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % โดยน่าจะมีเหตุผลมาจากอัตราการคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงและก๊าซไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงมีค่าต่ำกว่าอีกสองกรณีที่เหลือ ส่งผลให้การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นมีประสิทธิภาพน้อยกว่า ในขณะที่กรณีอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % และ 180 %

### 6.3.2.2 องค์ประกอบของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ กรณีอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรกเท่ากับ 1.5

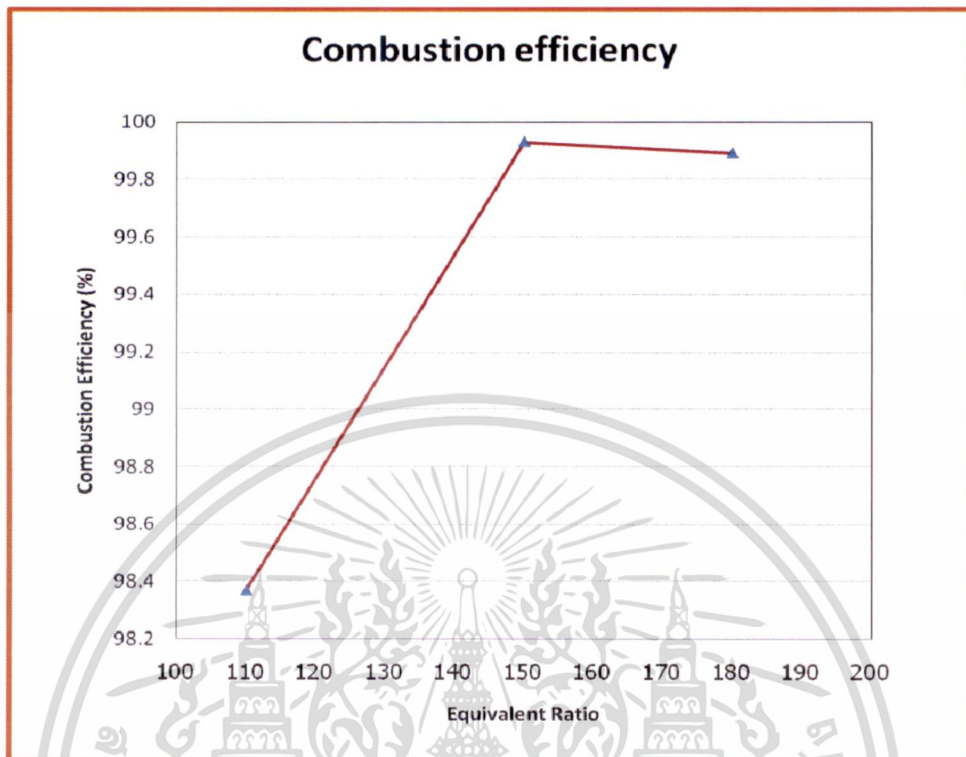


รูปที่ 6.12 แสดงปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้กรณีอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.5

รูปที่ 6.12 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้กรณีอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.5

พบว่าปริมาณ NO<sub>x</sub> มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเนื่องจากอัตราการเกิด Prompt NO<sub>x</sub> ต่ำลง เพราะการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินจะส่งผลให้ อัตราการผสมเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี คาดว่าปริมาณไฮโดรคาร์บอนลดลง เพราะทำปฏิกิริยาต่อกลายเป็น CO และกลายเป็น CO<sub>2</sub> สังเกตจากการลดลงของก๊าซ CO เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน

### 6.3.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้และอุณหภูมิ กรณีอัตราส่วนผสมเท่ากับ 1.5



รูปที่ 6.13 แสดงประสิทธิภาพการเผาไหม้ภายในเตาเผาวัสดุพูนกรณีอัตราส่วนผสมเท่ากับ 1.5

รูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้และอุณหภูมิภายในเตาเผาวัสดุพูน กรณีอัตราส่วนผสมเท่ากับ 1.5 โดยจากผลการทดลองพบว่าที่ค่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 %, 150 % และ 180 % ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 98.37, 99.93, 99.89 ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการเผาไหม้ พบว่าสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่เกิดขึ้น

## บทที่ 7

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 7.1 สรุปผลการทดลอง

- 7.1.1 การปรับเปลี่ยนอากาศส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนแรกที่ใช้ในการเผาไหม้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยพบว่ามีอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในทุกกรณีศึกษา และจะเพิ่มมากขึ้นสูงสุดในช่วงระดับความสูงตั้งแต่ 120 จนถึง 180 มิลลิเมตร จากตะแกรงเชื้อเพลิง
- 7.1.2 การเกิดเผาไหม้อย่างรุนแรงภายในเตาเผาไหม้วัสดุพูนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้น เกิดจากปรากฏการณ์ Thermal Cracking ซึ่งมีส่วนทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสาเหตุส่วนหนึ่งของการเพิ่มสูงขึ้นของอุณหภูมิมาจากการเกิดออกซิเดชันของสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการ Thermal Cracking และอีกสาเหตุหนึ่งเมื่อมาพิจารณาการฉีดเชื้อเพลิงที่บางกว่าเข้าไปในช่องทางเข้าที่สองจะส่งผลให้เกิดความเร็วของการหมุนวน (Eddy Velocity) ที่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านหลังของเม็ดอลูมินา มีค่ามากขึ้น จึงทำให้การอัตราการผสม (Mixing Rate) กันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิช่วงดังกล่าวสูงขึ้นด้วย
- 7.1.3 ปริมาณความเข้มข้นของ CO ที่ได้จากการทดลองเราสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นของ CO เพิ่มขึ้น มีสาเหตุมาจาก 2 ปัจจัย ปัจจัยแรกมาจากการที่เพิ่มอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกสูงขึ้น ทำให้ปริมาณ Unburned Hydrocarbon เพิ่มขึ้น อีกหนึ่งปัจจัยมาจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นใกล้ทางออกของเตา มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของการทดลองที่อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.5 และ 1.7 ทำให้อัตราการกำจัด CO ต่ำกว่า เป็นผลให้ค่าประสิทธิภาพในการเผาไหม้น้อยกว่า
- 7.1.4 ปริมาณความเข้มข้นของ  $\text{NO}_x$  ที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่น่าจะมาจาก Prompt  $\text{NO}_x$  โดย  $\text{NO}_x$  ลักษณะนี้จะเกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างไฮโดรคาร์บอนกับไนโตรเจนในของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ก่อให้เกิด Thermal  $\text{NO}_x$
- 7.1.5 ปริมาณความเข้มข้นของ  $\text{NO}_x$  ที่วัดได้ทางออกเป็นผลสุทธิของการก่อกำเนิดและการสลายตัวของ NO ตลอดช่วงของการเผาไหม้ โดยจะมีการก่อตัวของอนุมูลอิสระ HCN

[17] และองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ ในปริมาณมาก อนุพลอิสระชนิดนี้เมื่อทำปฏิกิริยากับ NO (ที่เกิดจาก Prompt NO Formation) ก็จะสลาย NO และสร้างอนุพลอิสระอื่น ๆ และเมื่อมีการฉีดของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเข้าในชั้นที่ 2 อนุพลอิสระที่หลงเหลือจากการเผาไหม้จะทำปฏิกิริยากับ NO ในช่วงแรก อนุพลเหล่านี้ก็จะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนไปเป็น NO และมีการสูญเสียของ NO ไปพร้อมกัน

7.1.6 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงเมื่ออัตราส่วนสมมูลในส่วนแรกของการเผาไหม้สูงขึ้น มีผลโดยตรงจากอัตราการเกิด CO เพิ่มสูงขึ้น

7.1.7 การเพิ่มค่าอากาศส่วนเกินภายในเตาเผาไหม้วัสดุพูนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้นบันได ก่อให้เกิดกลไกที่ส่งเสริมการเผาไหม้ นั่นคือ การเพิ่มขึ้นของค่าอากาศส่วนเกินทำให้เกิดอัตราการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสูงขึ้น ในขณะเดียวกัน ยังเกิดกลไกที่ส่งผลต้านต่อการเผาไหม้ (เช่น การเพิ่มขึ้นของภาระทางความร้อนภายในเตาเผาไหม้วัสดุพูน, การเพิ่มค่าอากาศส่วนเกินส่งผลให้เกิดการพัดพาที่มากเกินไป โดยอาจเปรียบเสมือนว่าการเพิ่มอากาศส่วนเกินส่งผลให้ความเร็วของผสมระหว่างอากาศเชื้อเพลิงมีค่ามากกว่าความเร็วของเปลวไฟ (Flame Speed) ทำให้ของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศถูกพัดพาออกจากบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ จากปัจจัยทั้งสองที่ได้กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้เมื่อเพิ่มค่าอากาศส่วนเกินให้มากขึ้น จะเกิดการดับของเปลวลงในบางจุด หรือเรียกว่า Local Flame Extinction ด้วยเหตุที่ปัจจัยเชิงบวกและเชิงลบที่เกิดขึ้นพร้อมกันดังที่กล่าวมานี้มีอิทธิพลในระดับที่แตกต่างกันไปในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง เราจึงไม่สามารถคาดการณ์แนวโน้มของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอากาศส่วนเกินได้ อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Local Flame Extinction นี้ สามารถสังเกตเห็นได้จากลักษณะการกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่กรณีค่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % และ 180 %

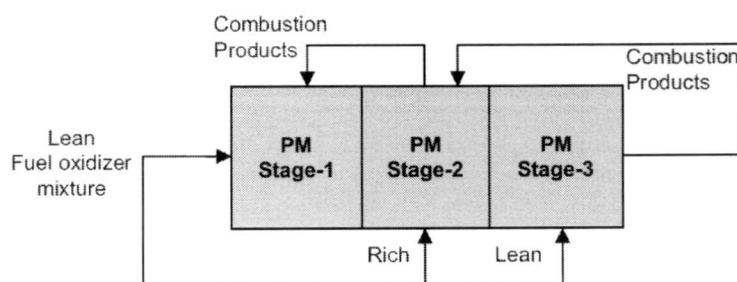
จากการศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้นพบว่า การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศขั้นแรกที่ใช้ในการเผาไหม้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แต่ในส่วนของปรับเปลี่ยนค่าอากาศส่วนเกินนั้น ไม่สามารถบ่งบอกได้อย่างชัดเจนว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 7.1.7 โดยจากการทำการทดลองพบว่าเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสม โดยมีการกระจายอุณหภูมิในเตามีความสม่ำเสมอ เกิดขึ้นในบริเวณที่กว้างและมีมลพิษต่ำ (ปริมาณ CO และ NO<sub>x</sub> มีค่าน้อย) เกิดขึ้นในกรณีของอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.5 และค่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % โดยเงื่อนไขดังกล่าวเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการนำเตาเผาไหม้วัสดุพูนนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงคือ เงื่อนไขอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วน

แรก เท่ากับ 1.3 เนื่องจากมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงที่สุด อีกทั้งปริมาณ CO และ NO<sub>x</sub> ยังมีค่าน้อยด้วย

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้ได้ทำการสรุปถึงข้อเสนอแนะที่เกี่ยวกับเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนที่มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวกับเตาเผาไหม้วัสดุพอรุน ต่อไปในอนาคตหรือเพื่อการนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปต่อยอดและออกแบบเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนแบบอื่น ที่มีสมรรถนะทางความร้อนที่ดีกว่าหรือใกล้เคียงกันนั้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 7.2.1 ควรปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิให้มีความเหมาะสมน่าเชื่อถือมากขึ้น โดยอาจปรับขนาดของ Thermocouple มีขนาดเล็กลง เพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของเตาเผาไหม้วัสดุพอรุน
- 7.2.2 เพื่อให้มีการยืนยันปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนที่มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น ควรดำเนินการจัดทำแบบจำลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ดังกล่าวเพิ่มเติม ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์ในการพัฒนาองค์ความรู้ด้านการเผาไหม้วัสดุพอรุน อีกทั้งเพื่อจะได้ทราบปรากฏการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนอีกด้วย
- 7.2.3 จากงานวิจัย “Combustion in porous media and its applications - A Comprehensive survey” [4] ถ้าจะการเผาไหม้วัสดุพอรุนมีประสิทธิภาพที่สมบูรณ์คือ ควรเพิ่มชั้นการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น เพิ่มอีก 1 ชั้น เป็นการฉีดเชื้อเพลิงเป็น 3 ชั้น พร้อมทั้งปรับเงื่อนไขการจ่ายของผสมระหว่างอากาศเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น โดยชั้นแรกเป็นของผสมแบบ Lean Fuel Oxidizer, ชั้นที่สองเป็นแบบ Rich Combustion และชั้นที่สามเป็นแบบ Lean Combustion โดยในชั้นที่ 1 และ 3 ยังเอาของเหลือที่เป็นความร้อนจากกระบวนการผลิต / ความร้อนส่วนที่เหลือที่ได้จากการเผาไหม้ทางออกสุดท้ายกลับเข้ามาช่วยในการเผาไหม้เพิ่มเติม ดังแสดงในรูป 7.1 แผนผังแสดงการฉีดเชื้อเพลิง 3 ชั้นของเตาเผาไหม้วัสดุพอรุน



รูปที่ 7.1 แผนผังแสดงการฉีดเชื้อเพลิง 3 ชั้นของเตาเผาไหม้วัสดุพอรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าเอกสารฉบับนี้มีความสำคัญหรือมีประโยชน์ต่อการดำเนินงานของตนเองหรือหน่วยงานของตน หรือต้องการนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] อาวุธ ลภีรัตน์ากุลและจาร์วัตร เจริญสุข (2551), “เตาเผาไหม้วัสดุพูน Part 2 : อิทธิพลอากาศส่วนเกิน”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22, จังหวัดชลบุรี
- [2] อาวุธ ลภีรัตน์ากุลและจาร์วัตร เจริญสุข (2550), “พฤติกรรมการณ์เผาไหม้หัวเผาวัสดุพูน”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, จังหวัดกรุงเทพฯ ฯ
- [3] Ronald D.B, William C.G and J.R. Howell. 1992, “Combustion method and apparatus for staged combustion within porous matrix elements” United States Patent. US005080577A. Jun. 14
- [4] อาวุธ ลภีรัตน์ากุลและจาร์วัตร เจริญสุข (2550), “หัวเผาวัสดุพูนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้นและหัวเผาวัสดุพูนแบบจ่ายอากาศเป็นชั้น”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, จังหวัดเชียงใหม่
- [5] M. Abdul Mujeebu and M.Z, Abdullah, M.Z. Abu Bakar. 2009, “Combustion in porous media and its applications - A Comprehensive survey”. Journal of Environmental Management 90 (2009) 2287-2312
- [6] อาวุธ ลภีรัตน์ากุล, “สมรรถนะความร้อนของเตาเผาไหม้แบบวัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2550
- [7] กัมปนาท เทียนน้อย “การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวในวัสดุพูนชนิดสลับทิศทางการไหลอากาศอย่างเป็นจังหวะ” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2544
- [8] อรรณพ อาบเพ็ง “ การศึกษาเชิงทดลองของหัวเผาแบบพูนเผาไหม้น้ำมันพืช” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547
- [9] Jia F. Liu and Wen H. Hsieh. 2004, “ Experimental investigation of combustion in porous heating burners,” Combustion and flame, Vol. 138, pp. 295-303.
- [10] Pickenäcker. O, Kesting. A and Trimis. D. 2000, “Novel low NO<sub>x</sub> burner designs for boilers and furnaces by using staged combustion in inert porous media” Institute of fluid mechanics, universität Erlangen-Nürnberg, Germany.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

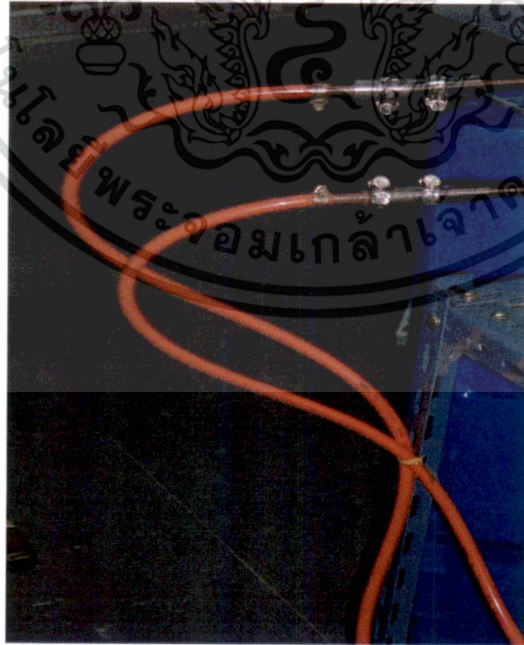
- [11] Tian-Yu Xiong, Mark J. Khinkis and Ferol F. Fish. 1995, “Experimental study of a high-efficiency, low emission porous matrix combustor-heater,” Fuel. Vol. 74. pp. 1641-1647
- [12] Hoffmann, J.G., Echigo, R., Yoshida, H. and Tada, S., 1997, “Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system,” Combustion and flame, pp.181-195.
- [13] Christo, F. C., Dally, B. B., Lanspeary, P. V. & Afsharvahid, S. 2002, Development of porous burner technology for ultra-lean combustion systems. Final Technical Report - SENRAC Grant 03/00 – South Australian State Energy Research Advisory Committee.
- [14] Khinkis et al. 1995. “Staged Combustion in a porous-matrix surface combustor to promote ultra-low  $\text{NO}_x$  Emissions” , United States Patent. US 5,476,375. Dec.19
- [15] Bell et al. 1992. “Apparatus and Method for combustion within porous matrix elements”, United States Patent. US 5,160,254. Nov.3
- [16] Janet L. Ellzey and Rakesh Goel. 1995, “EMISSIONS OF CO AND NO FROM A TWO STAGE POROUS MEDIA BURNER” Combustion Science and Technology, Volume 107, Issue 1 - 3 , pp 81 - 91
- [17] P.K.Nag , “ Heat Transfer ” Tata McGraw – Hill , pp. 692 - 712 ,2005.
- [18] S. Afsharvahid, P.J. Ashman, B.B. Dally. “Investigation of  $\text{NO}_x$  conversion characteristics in a porous medium” Combustion and Flame, Volume 152, Issue 4, pp. 604-615
- [19] รศ. มนตรี พิรุณเกษร 2542 “ การถ่ายเทความร้อน ” บริษัท วิทยพัฒน์ จำกัด , หน้า 515 – 519.
- [20] ศ.ดร. สำเร็จ จักรใจ 2547 “การเผาไหม้” สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 50-301.
- [21] เชื้อเพลิงแห่งอนาคต, “Energy Conservation Newsletter”, ปีที่ 6 ฉบับที่ 23 ตุลาคม – ธันวาคม 2550, หน้า 8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 หัวน๊อตเชื่อมเพลิงและอากาศ

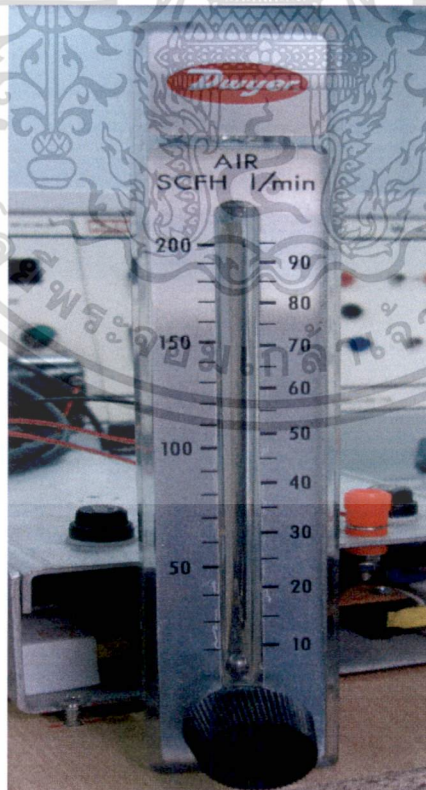


รูปที่ ก-2 ท่อจ่ายเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

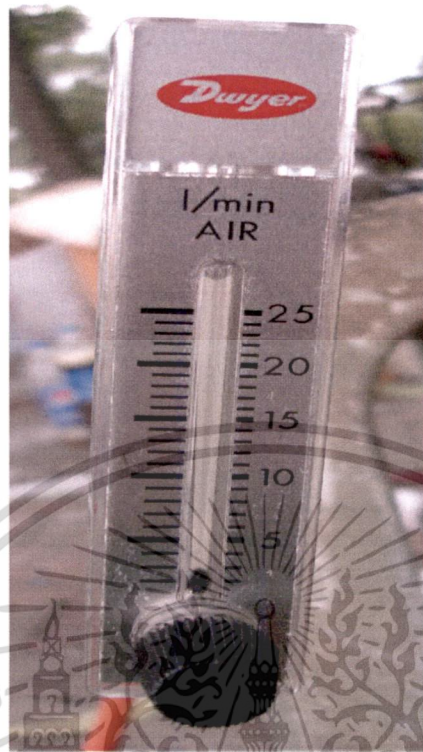


รูปที่ ก-3 แก๊ส แอลพีจี



รูปที่ ก-4 วาล์วปรับอัตราการไหลอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

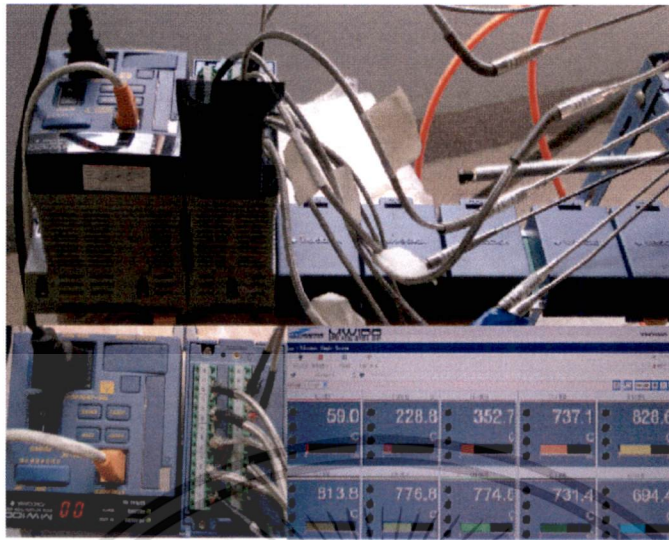


รูปที่ ก-5 วาล์วปรับอัตราการไหลของแก๊สแอลพีจี



รูปที่ ก-6 วาล์วปรับความดันแก๊สแอลพีจี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-7 เทอร์โมคัปเปิลและ DATA LOGGER



รูปที่ ก-8 เครื่องวัดก๊าซเสีย (Gas Analyzer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตัวอย่างการคำนวณ การคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้

### สมมติฐานในการคำนวณคือ

ก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการเผาไหม้เป็น LPG ( $C_3H_8 + C_4H_{10}$ ) เพียงอย่างเดียว

### การคำนวณ

$$\eta_c = \left[ \frac{(E_F - E_{CO})}{E_F} \right] \times 100\%$$

$E_F$  = ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาเผาไหม้,  $kw$

$E_{C_{xH_y}}$  = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับการเผาไหม้ไฮโดรคาร์บอนในแก๊สเสีย,  $kw$

$E_{CO}$  = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับการเผาไหม้คาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สเสีย,  $kw$

คำนวณปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาเผาไหม้ ( $E_F$ ) จาก

$$E_F = \dot{m}_f e_f$$

$e_f$  = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg) = 45.8 MJ/kg

$\dot{m}_f$  = อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/s) ซึ่งในการทดลองใช้อัตราการป้อนที่  $6.45 \times 10^{-5}$  kg/s

$$E_F = 6.45 \times 10^{-5} \times 45.8 \times 10^3 = 3 \text{ kw}$$

คำนวณปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สเสีย ( $E_{fg}$ )

ที่ Excess Air เท่ากับ 110% มีองค์ประกอบแก๊สเสียออกมาดังนี้

Gas	By Volume	Molecular weight	By Vol. × Molecular	By Mass
CO <sub>2</sub>	0.08	44	3.52	0.118243434
CO	0.0000118	28	0.00033	1.10988E-05
O <sub>2</sub>	0.0874	32	2.7968	0.093949783
N <sub>2</sub>	0.826	28	23.15239	0.777732536
		Total	29.76909	1

เนื่องจาก LPG มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่เท่ากับ  $0.824427 \frac{kg_c}{kg_f}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณสัดส่วนคาร์บอนใน 1 kg แก๊สเผาไหม้แห้ง

คำนวณค่าคาร์บอนใน  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  และ  $\text{C}_x\text{H}_y$

$$= \left[ \frac{12}{14} \right] \times 0.118243434 + \left[ \frac{12}{28} \right] \times 1.10988\text{E} - 05$$

$$+ 0.824427 \times 0.010063148 = 0.040549 \frac{\text{kg}_c}{\text{kg}_{dfg}}$$

หาปริมาณแก๊สไอเสียแห้งที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในเชื้อเพลิง 1 kg

$$= \frac{0.8244}{0.040549} = 20.3314 \text{ kg}_{dfg} / \text{kg}_f$$

คำนวณปริมาณ CO ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg (โดยค่าความร้อนของ CO มีค่าเท่ากับ 10,106 kJ/kg<sub>co</sub>)

$$\text{CO} = 20.3314 \times 1.10988\text{E} - 05 = 0.000225654 \text{ kg}_{\text{co}} / \text{kg}_f$$

$$E_{\text{co}} = 0.000225654 \frac{\text{kg}_{\text{co}}}{\text{kg}_f} \times 10,106 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{co}}} \times 6.45 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}_f}{\text{s}}$$

$$= 1.47 \times 10^{-4} \text{ kw}$$

$$\eta_c = \frac{3 - 0.000147}{3} \times 100 = 99.95\%$$

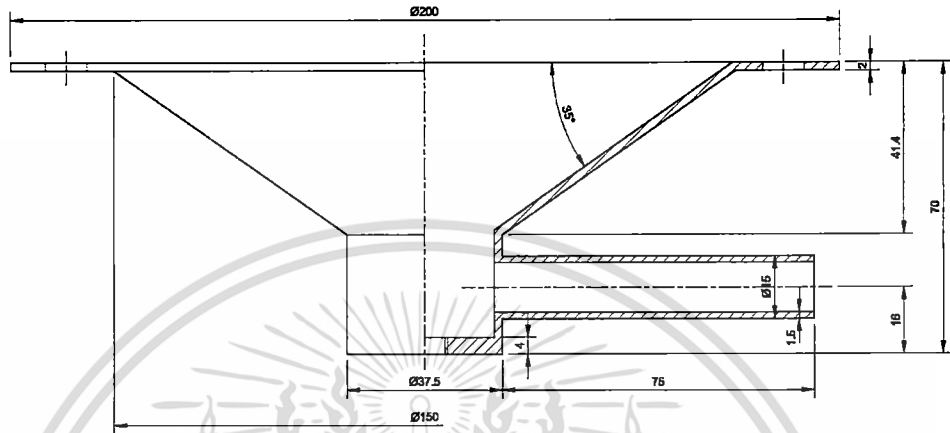
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



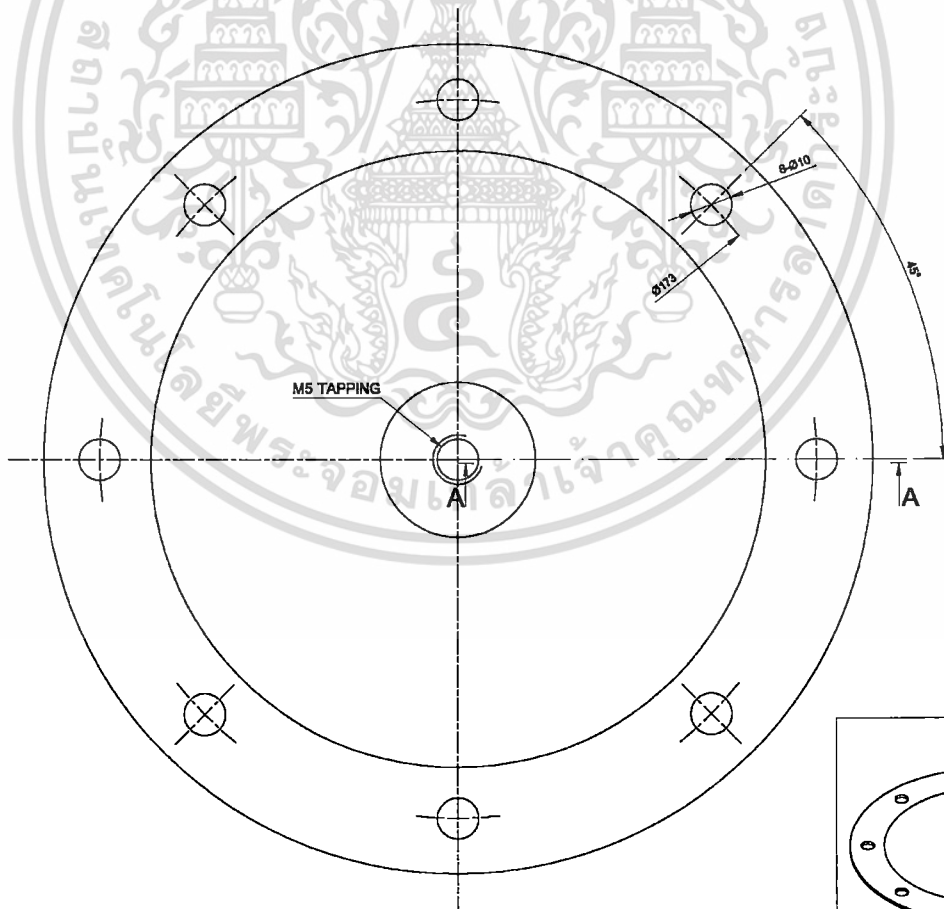
**ภาคผนวก ค**  
**แบบชิ้นส่วนต่างๆ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHANGE	QUALITY PER SET				ITEM	DESCRIPTION	MATERIAL AND SPECIFICATION	REMARKS
					H01	FURNACE COVER	Steel Thickness 2 mm.	

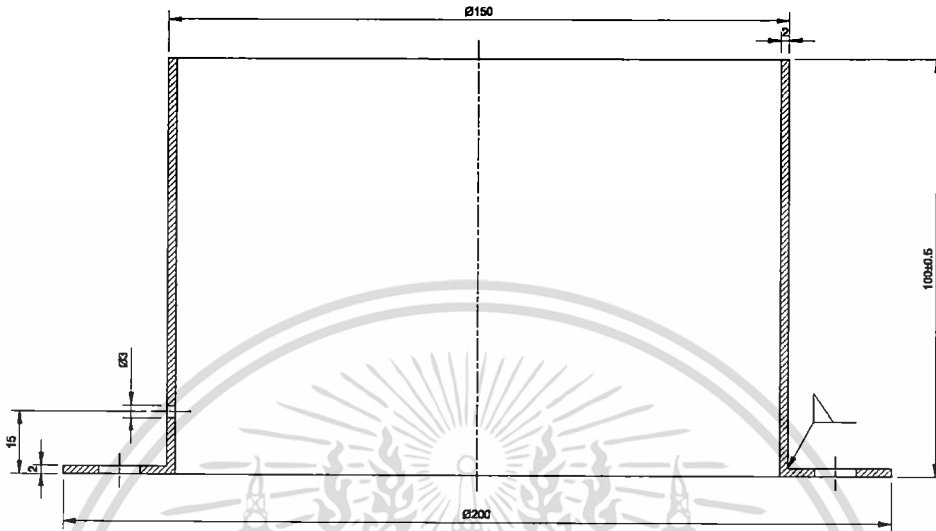


SECTION A-A

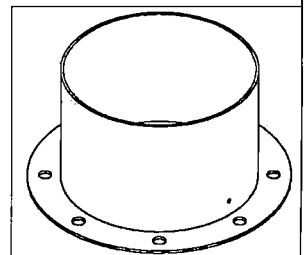
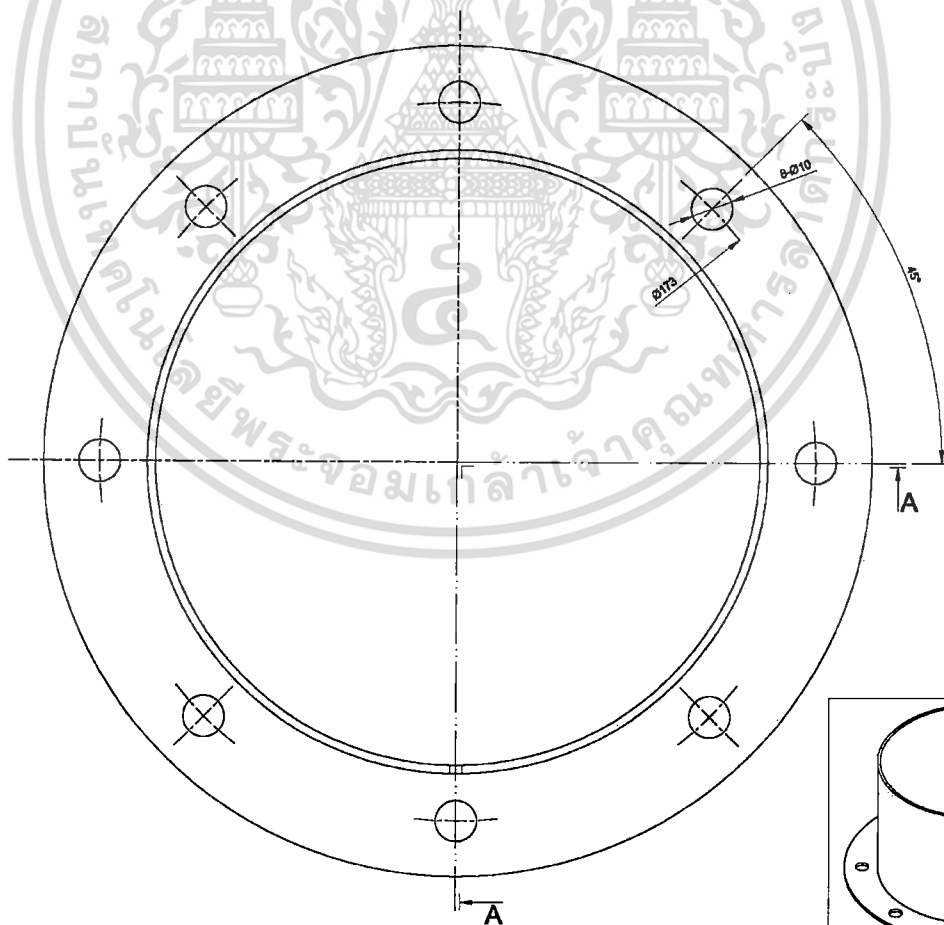



3 RD ANGLE PROJECTION		KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG		USED FOR :	
		DIMENSION IN mm.	DRAW :	Model :	
SCALE : NTS	CHECKED :	APPROVED :	APPROVED :	Part name : FURNACE COVER	
DATE : 04-Dec.-2008	DESIGNED :	APPROVED :	APPROVED :	DRAWING NO. :	REV. *

CHANGE	QUALITY PER SET				ITEM	DESCRIPTION	MATERIAL AND SPECIFICATION	REMARKS
					H01	FRIE TUBE	Steel Thickness 2 mm.	

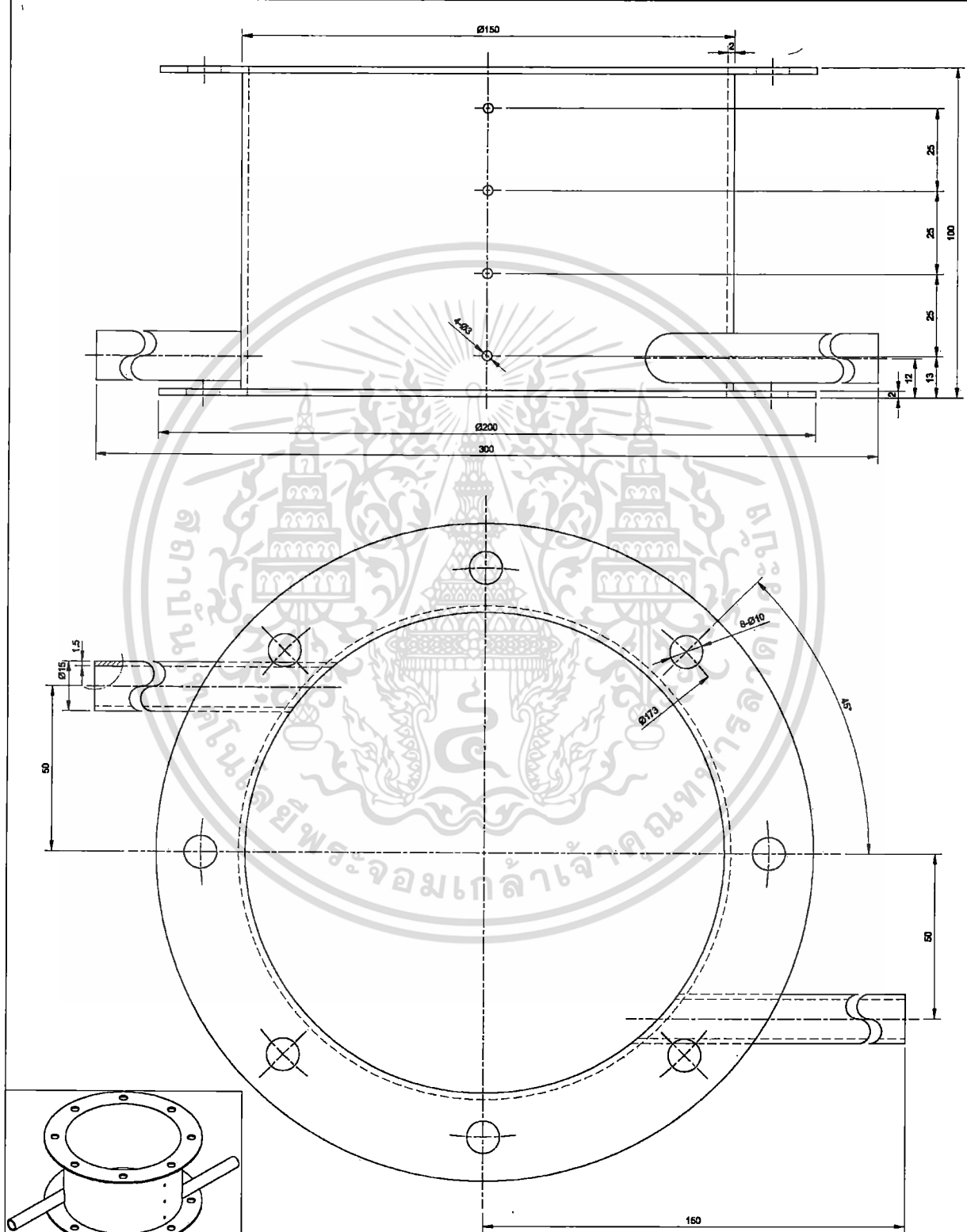



SECTION A-A



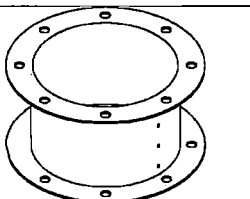
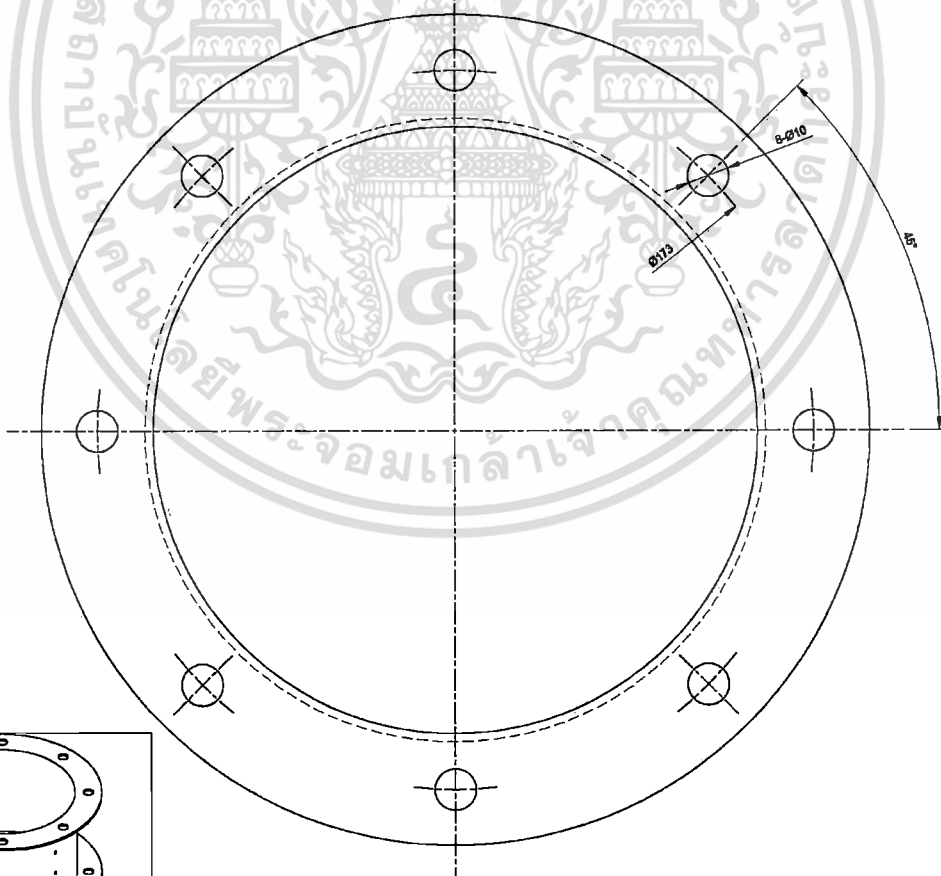
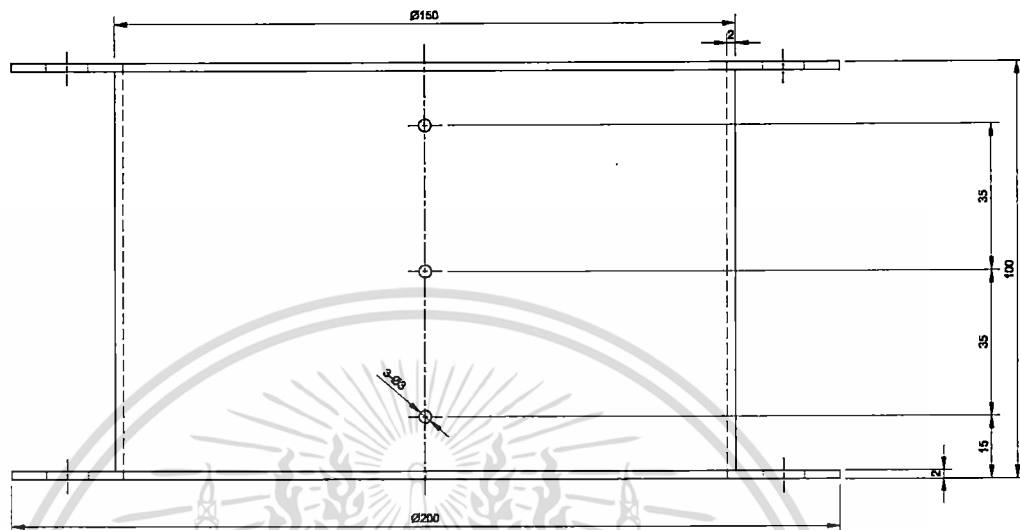
3 RD ANGLE PROJECTION	 <b>KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG</b>		USED FOR :
			Model :
DIMENISON IN mm.	DRAW :	APPROVED :	<b>Part name : ใช้เป็น FRIE TUBE ค้า</b>
SCALE : NTS	CHECKED : อิกทงห้ามมให้ต	APPROVED : และต้องอ้างอิง	DRAWING NO. :
DATE : 04-Dec.-2008	DESIGNED :	APPROVED :	REV. <b>*</b>


CHANGE	QUALITY PER SET				ITEM	DESCRIPTION	MATERIAL AND SPECIFICATION	REMARKS
					H01	CENTER FLUE	Steel Thickness 2 mm.	



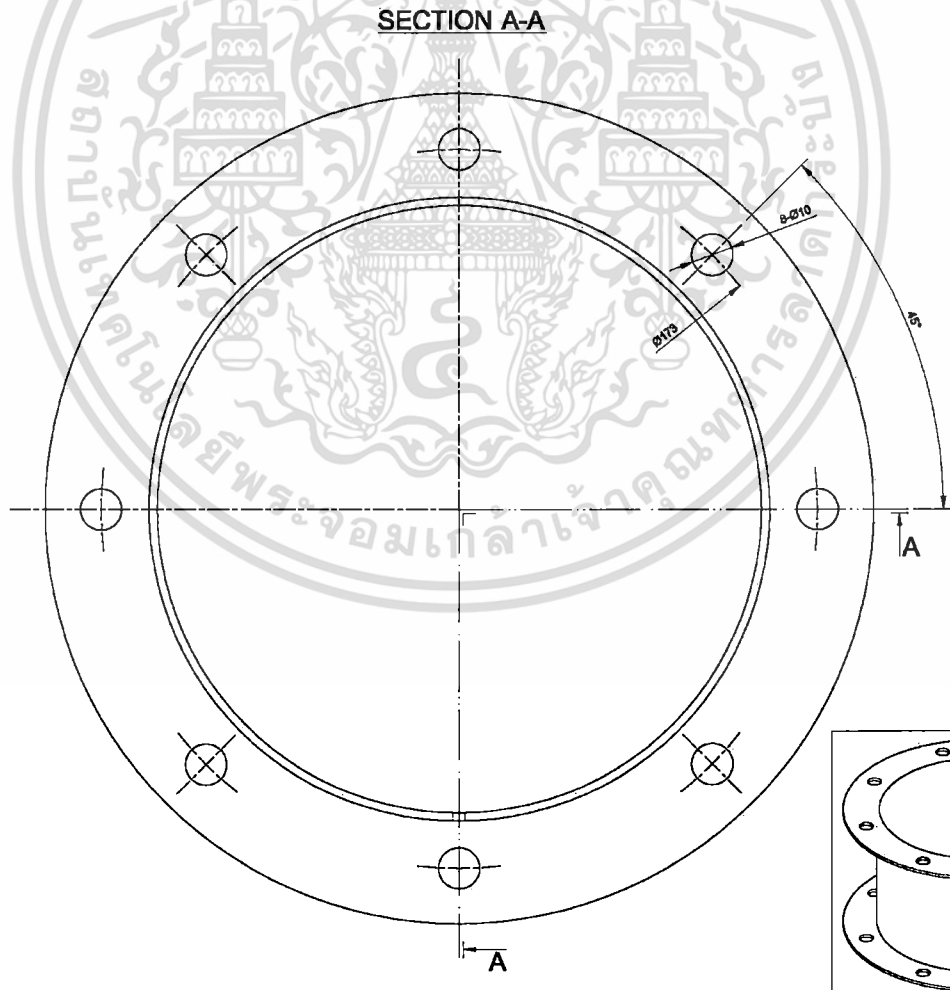
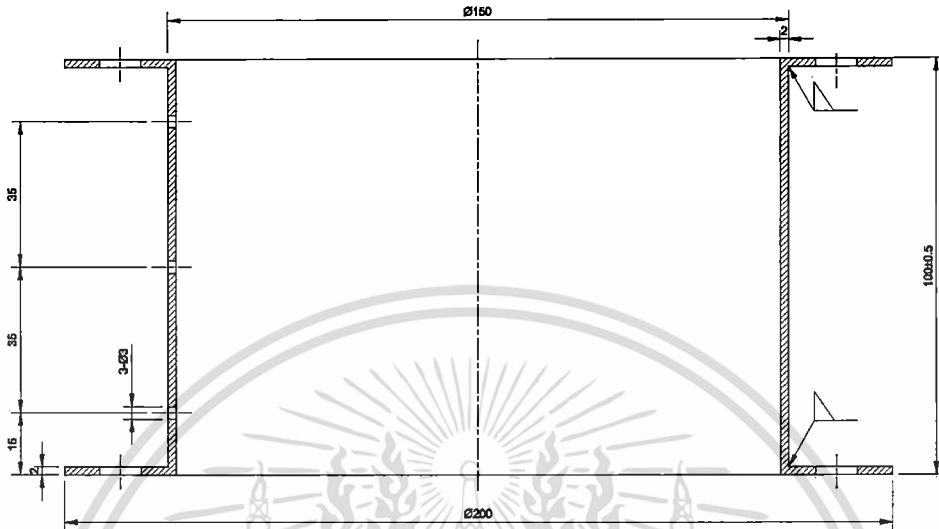
3 RD ANGLE PROJECTION		 <b>KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG</b>		USED FOR : Model :	
DIMENSION IN mm.		DRAW :	APPROVED :	<b>Part name : CENTER FLUE</b>	
SCALE : NTS	CHECKED :	DESIGNED :	APPROVED :	DRAWING NO.	
DATE : 04-Dec.-2008			APPROVED :	REV. *	


CHANGE	QUALITY PER SET				ITEM	DESCRIPTION	MATERIAL AND SPECIFICATION	REMARKS
					H01	BOTTOM FLUE	Steel Thickness 2 mm.	



3 RD ANGLE PROJECTION	 <b>KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG</b>	USED FOR :	
		Model :	
DIMENISON IN mm.	DRAW :	APPROVED :	<b>Part name : BOTTOM FLUE</b>
SCALE : NTS	CHECKED :	APPROVED :	<b>DRAWING NO.</b>
DATE : 04-Dec.-2008	DESIGNED :	APPROVED :	REV. *

CHANGE	QUALITY PER SET				ITEM	DESCRIPTION	MATERIAL AND SPECIFICATION	REMARKS
					H01	TOP FLUE	Steel Thickness 2 mm.	



3 RD ANGLE PROJECTION	 <b>KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG</b>		USED FOR :
	DIMENSION IN mm. DRAW : _____ APPROVED : _____		Model : _____
SCALE : NTS	CHECKED : _____	APPROVED : _____	Part name : ใช้บ TOP FLUE
DATE : 04-Dec.-2008	DESIGNED : _____	APPROVED : _____	DRAWING NO. _____
			REV. * _____



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ 2 กันยายน 2553

เลขที่อ้างอิง 1360

เรื่อง การตอบรับบทความ

เรียน คุณสรพรเพชญ พงษ์ระวีตานนท์ จารุวัตร เจริญสุข

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง ประสิทธิภาพการเผาไหม้และก๊าซไอเสียของเตาเผาไหม้วัสดุ  
พรุนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้น (Combustion Efficiency and Emission on  
Fuel-Air Mixture Staged Porous Media Combustor) มาให้พิจารณาเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรม  
ลาดกระบัง บัดนี้ ผู้ทรงคุณวุฒิได้ทำการพิจารณาแล้วเห็นว่า ยอมรับตีพิมพ์ได้ โดยจะตีพิมพ์ในปีที่ 27  
ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน 2553

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

(รศ.ดร.อิสระชัย งามหฐ)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประสิทธิภาพการเผาไหม้และก๊าซไอเสียของเตาเผาไหม้วัสดุพอรุน แบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น

## Combustion efficiency and Emission on Fuel – Air Mixture Staged Porous Media Combustor

สรรเพชรญ พฤกษ์รัตนานนท์ จารุวัตร เจริญสุข

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการพัฒนาเตาเผาไหม้วัสดุพอรุน โดยแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น (Fuel-Air Mixture Staged combustor) ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้และก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นของเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกในย่านเชื้อเพลิงหนา จากการทดลองพบว่า ปริมาณก๊าซ CO และ NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นของเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 21 - 4000 ppm และ 11 - 28 ppm ที่มาตรฐาน O<sub>2</sub> 6% ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลชั้นแรกเป็น 1.7 ปริมาณการปลดปล่อย CO มีมากถึง 4000 ppm ส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ ทำให้ทราบถึงขีดจำกัดของเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนที่ใช้ในการทดลองว่าควรมีอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกไม่เกิน 1.5 เพื่อที่จะรักษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ไม่ให้ต่ำกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่อัตราส่วนสมมูล 1.3 พบว่า มีค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีที่สุดโดยมีค่ามากกว่า 99%

**คำสำคัญ :** เตาเผาไหม้วัสดุพอรุนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น / เตาเผาไหม้วัสดุพอรุนแบบจ่ายอากาศเป็นชั้น / วัสดุพอรุน

### Abstract

This study concerns with the investigation on the development of fuel - air mixture staged porous media combustor for LPG combustion. The purpose of this study is to examine the efficiency and emission of porous media combustor when the first-stage equivalent ratio has been changed within the rich limit-from 1.3 to 1.7. CO and NO<sub>x</sub> emissions vary between 21 to 4000 ppm and 11 to 28 ppm based on 6 % O<sub>2</sub> respectively. When the first-stage equivalent ratio is increased from 1.5 to 1.7, CO emission increases abruptly from 700 to 4000 ppm., thus significantly affects to the combustion efficiency. This indicates that the first section equivalent ratio of the combustor under this particular level of thermal throughput should be limited up to 1.5 to maintain the combustion efficiency of the combustor being greater than 95 %. Of all cases investigated in this work the maximum combustion efficiency at 99 percent corresponds to the operating condition with first stage equivalent ratio of 1.3

**Keywords :** Fuel and Air mixture stage porous media combustor / Air Stage porous media combustor / Porous Media

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บทนำ

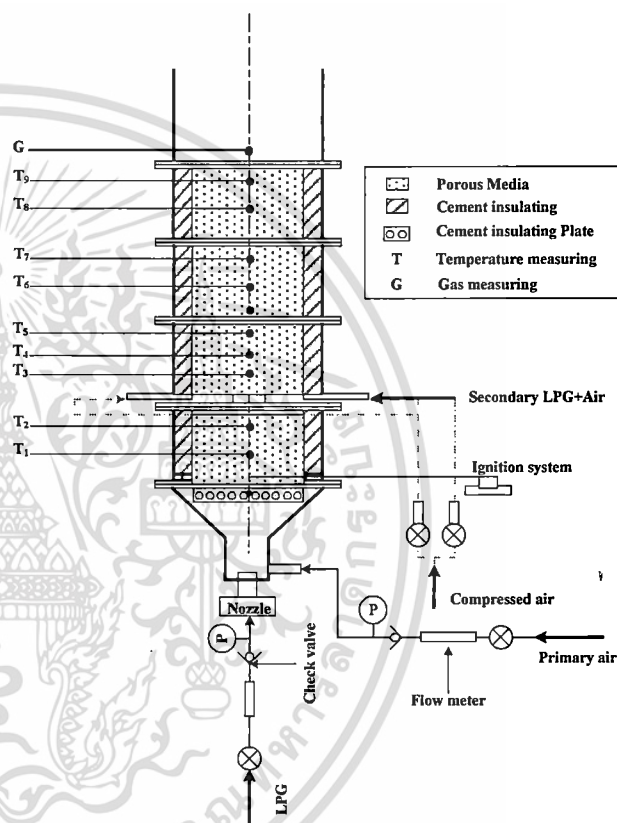
ในปัจจุบันพบว่าอัตราการใช้พลังงานได้มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดวิกฤตด้านความต้องการและราคาของพลังงาน จึงทำให้เกิดความสนใจในพลังงานทางเลือกขึ้น โดยปัจจุบันพลังงานทางเลือกที่ได้รับความสนใจคือระบบของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งโดยเน้นด้านการพัฒนาเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนที่ใช้สำหรับระบบของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเตาเผาไหม้ที่พัฒนาขึ้นนั้นต้องทำให้เกิดการเผาไหม้ที่เสถียร มลพิษต่ำ โดยจากการวิจัยด้านการพัฒนาเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนที่ผ่านมานั้นได้พบประเด็นปัญหาต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นประเด็นของอุณหภูมิที่ลดต่ำลงเมื่อฉีดอากาศระหว่างชั้นเข้าไปในเตาเผาไหม้, อุณหภูมิที่ลดต่ำลงเมื่อความสูงของเตาสูงขึ้น, การเกิด  $\text{NO}_x$  ในปริมาณที่มาก, การกระจายตัวของอุณหภูมิไม่คงที่ตลอดทั้งเตาเผาไหม้ หรืออุณหภูมิที่สูงไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานเมื่อติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในเตา จึงทำให้เกิดการพัฒนางานวิจัยขึ้นนี้ขึ้น โดยได้พัฒนาเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนให้มีการจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบของเซลล์เชื้อเพลิง ต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า  $800^\circ\text{C}$  [1] ในส่วนของการปรับปรุงและพัฒนาเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนของการศึกษานี้ได้ปรับปรุงจากเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนแบบจ่ายอากาศเป็นชั้น เป็นแบบการจ่ายเชื้อเพลิงผสมโดยการจ่ายเป็นชั้น เนื่องจากการจ่ายเชื้อเพลิงเป็นชั้นนั้น จะก่อให้เกิดมลพิษน้อย [1,2] โดยจ่ายส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นแบบ Fuel-Rich ในชั้นแรก [3,4,5] และจ่ายส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นแบบ Fuel-Lean ในชั้นที่ 2 [3,4,5] โดยวัตถุประสงค์ของการวิจัยขึ้นนี้คือ การพัฒนาเตาเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพสูง และมีมลพิษน้อย เพื่อให้เตาเผาไหม้วัสดุพอรุนเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำไปใช้ในระบบของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

## 2. องค์ประกอบเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ LPG โดยในการทดลองใช้ก๊าซหุงต้มของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย

ซึ่งองค์ประกอบของ LPG นี้ประกอบด้วย โพรเพน ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) 60 % และบิวเทน ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) 40 % โดยมีค่าความร้อน (HHV) เท่ากับ  $45.6 \text{ MJ/kg}$  (ที่มา: การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย) ซึ่งจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบของ LPG มีก๊าซไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก ไม่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนและซัลเฟอร์

## 3. วิธีการทดลอง



รูปที่ 1 แสดงชุดทดลองเตาเผาวัสดุพอรุน

รูปที่ 1 แสดงชุดทดสอบพฤติกรรมเตาเผาไหม้และสมรรถนะเบื้องต้นของเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนโดยแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้น โดยใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิง โดยเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนนี้ถูกสร้างขึ้นให้มีการเผาไหม้แบบผสม (Premixed Combustor) ซึ่งมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผาประมาณ 4 นิ้ว สูง 35 mm โดยสามารถแบ่งเตาเผาออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนที่เป็นห้องผสม (Mixing Zone) กั้นระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ส่วนที่สองเป็นส่วนของห้องเผาไหม้ ซึ่งในการทดสอบจะแบ่ง

การจ่ายเชื้อเพลิงกับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็นสองส่วน โดยจ่ายอากาศเข้าเตาเผาในส่วนที่หนึ่งที่บริเวณด้านข้างของห้องผสมอากาศส่วนแรก (First Mixing Zone) และส่วนที่สองที่ระดับความสูง 100 mm จากตะแกรงจ่ายเชื้อเพลิง (Mixture Distribution Plate) ดังรูปที่ 1 ส่วนการป้อนเชื้อเพลิงเข้าเตาเผาจะใช้หัวฉีดเป็นอุปกรณ์ในการป้อนเชื้อเพลิง และทำการติดตั้งระบบจุดระเบิดที่บริเวณระหว่างรอยต่อของเตาเผาส่วนที่สองและส่วนที่สาม

ในการทดลองทำการปรับอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้ปั๊มลมเป็นต้นกำลังในการทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศและใช้ Flow Meter เป็นอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอัตราการไหลของอากาศและในการควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจะใช้ Flow Meter เป็นอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอัตราการไหลเช่นเดียวกัน โดยเมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัว จะวัดก๊าซไอเสียโดยใช้เครื่องวัดก๊าซ วัดที่บริเวณท่อทางออกดังรูปที่ 1 โดยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ที่บันทึกในงานวิจัยนี้ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>), ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และออกซิเจน (O<sub>2</sub>)

ตารางที่ 1 ตารางแสดงเงื่อนไขการทดลอง

Run No.	Energy input (kW)	Excess Air (%)	Equivalent Ratio of 1 <sup>st</sup> Stage	Equivalent Ratio of 2 <sup>nd</sup> Stage
1	3	110	1.3	0.291
2			1.5	0.283
3			1.7	0.277

ในการหาสมรรถนะของเตาเผาจะนำค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $\eta_c$ ) มาเป็นดัชนีในการชี้วัดสมรรถนะของเตาเผา โดยสามารถคำนวณได้จากประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตา นิยามได้ด้วยสมการดังนี้

$$\eta_c = \left[ \frac{E_F - E_{fg}}{E_F} \right] \times 100 \quad (1)$$

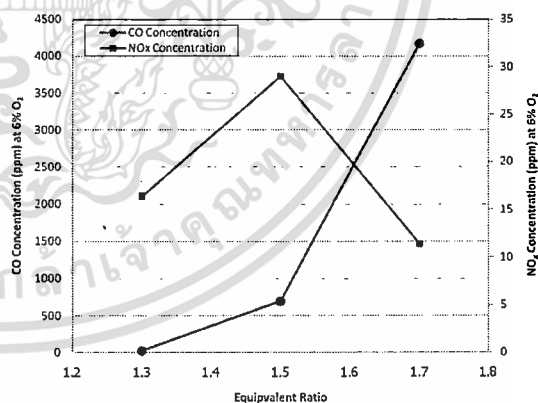
$E_F$  = ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาเผาไหม้ (MW)

$E_{fg}$  = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในก๊าซเสีย (MW)

#### 4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมรรถนะเบื้องต้นของเตาเผาไหม้แบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นขั้น รวมถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผา โดยทำการคงที่พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับเตาเผาเท่ากับ 3 กิโลวัตต์ (kW) และคงที่ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % และทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศขั้นแรก (1<sup>st</sup> Stage) ไว้เท่ากับ 1.3, 1.5 และ 1.7 ตามลำดับ และทำการบันทึกค่าก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ โดยจะเริ่มทำการบันทึกภายหลังจากจุดเตา เมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว

##### 4.1 องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย



รูปที่ 2 แสดงปริมาณ CO และ NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

รูปที่ 2 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศขั้นแรกที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) และปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศขั้นแรก เท่ากับ 1.3, 1.5 และ 1.7 โดยจากรูปที่ 2 ค่า

พบว่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) มีค่าต่ำในกรณีของอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.3 โดยมีปริมาณความเข้มข้นของ CO เท่ากับ 22 ppm ที่มาตรฐาน 6% O<sub>2</sub> และมีค่าเพิ่มมากขึ้นในกรณีอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.5 และ 1.7 ตามลำดับ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 700 – 4000 ppm ที่มาตรฐาน 6% O<sub>2</sub> โดยจากผลการทดลองดังกล่าวได้มีประเด็นที่น่าสนใจ กล่าวคือในกรณีที่อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรกเท่ากับ 1.7 มีอุณหภูมิที่จุดตรวจวัด T<sub>g</sub> และ T<sub>p</sub> ต่ำลงอย่างชัดเจนที่เงื่อนไขการทดลองนี้ถึงแม้สัดส่วนอากาศที่ผสมมากับเชื้อเพลิงส่วนที่สองจะมีสูง เกิดการเร่งการคลุกเคล้าระหว่างไอเสียร้อนและส่วนผสมที่เกิดอุณหภูมิสูงในช่วงแรกของการเผาไหม้ แต่อุณหภูมิกลับลดลงอย่างรวดเร็ว (อันเป็นผลจากการเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนหรือที่เรียกว่า Thermal Cracking) โดยอุณหภูมิที่ต่ำกว่านี้เอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง CO กับออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่จึงลดต่ำลง ส่งผลให้มีค่าปริมาณความเข้มข้นของ CO ที่ทางออกสูงถึง 4000 ppm บ่งชี้ถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

จากปริมาณความเข้มข้นของ CO ที่ได้จากการทดลองเราสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศที่ช่องทางเข้าแรกนั้นส่งผลทางอ้อมต่อการเพิ่มขึ้นของ CO โดยมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิที่ลดต่ำลงในช่วงสุดท้ายของการเผาไหม้ ส่งผลให้การเผาไหม้มีช่วงเวลาที่สั้นไม่เพียงพอต่อการกำจัด CO จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion)

ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในทุกกรณีศึกษานั้น อยู่ในช่วง 11 – 28 ppm ที่มาตรฐาน 6% O<sub>2</sub> ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของการศึกษานี้ไม่เกิน 1400 °C ทำให้โอกาสในการเกิด Thermal NO<sub>x</sub> (Zeldovich Mechanism) มีน้อย เนื่องจาก NO<sub>x</sub> ประเภทนี้ จะเกิดขึ้นในช่วงที่มีการเผาไหม้ในช่วงที่มีอุณหภูมิสูง (High Temperature Combustion) กว่า 1500 °C [6] แต่ก็ไม่อาจละเลยได้เนื่องจากการเผาไหม้

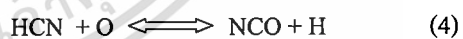
นี้เป็นแบบปั่นป่วน ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดอุณหภูมิสูงถึง

ระดับที่ก่อให้เกิด Thermal NO<sub>x</sub> ได้ในช่วงเวลาสั้นๆ และด้วยเหตุที่เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นก๊าซปิโตรเลียม (LPG) ทำให้ไม่เกิด Fuel NO<sub>x</sub> เช่นเดียวกัน ดังนั้นปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จึงมีปริมาณต่ำ ทำให้ปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ น่าจะเกิดขึ้นมาจาก Prompt NO<sub>x</sub> โดย NO<sub>x</sub> ลักษณะนี้จะเกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างไฮโดรคาร์บอนกับไนโตรเจนในของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ก่อให้เกิด Thermal NO<sub>x</sub>

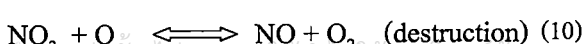
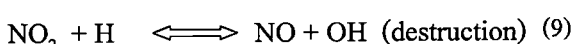
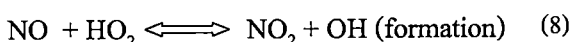
จากผลการทดลองมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจ คือ ค่า NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นไม่ได้แปรผันตามระดับสูงสุดของอุณหภูมิที่วัดได้ในเตาเผาไหม้ หรือแม้กระทั่งอุณหภูมิที่ทางออกของเตา เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจนขึ้น ถึงกลไกในการก่อเกิด Prompt NO<sub>x</sub> และการสลายตัวของ NO<sub>x</sub> จำเป็นต้องพิจารณาถึง Fenimore mechanism [6] โดยลักษณะการเกิด NO<sub>x</sub> ประเภทนี้สามารถอธิบายได้จากสมการ ดังนี้



จากสมการข้างต้นเมื่อเกิดการปฏิกิริยาการเผาไหม้ขึ้น อนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของไนโตรเจนเพื่อสร้างสารประกอบอินทรีย์ที่มีสารประกอบไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (amines) และ cyano โดยต่อมาจะเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ (intermediate compounds)



ในสภาพบรรยากาศโดยทั่ว ๆ ไปการเกิด Nitric Oxide เกิดการออกซิไดซ์จากไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>) ซึ่งมีรูปแบบการเกิดและการสลาย ดังสมการต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะพบว่าเมื่อมีอนุมลอิสระของไฮโดรคาร์บอนเหลืออยู่กับอนุมลอิสระที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ก็ จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการก่อตัวของ NO (formation) และหากอนุมลอิสระไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับ NO ก็ จะส่งผลให้มีการสลาย NO (destruction) ซึ่งสะท้อนให้เห็น ถึงผลกระทบของ Intermediate Species ที่เกิดขึ้นและ อุณหภูมิของการเผาไหม้ต่อการก่อตัวและการสลายตัวของ NO

ด้วยเหตุที่การปลดปล่อย NO ที่วัดได้ที่ทางออก เป็นผลสุทธิของการก่อกำเนิดและการสลายตัวของ NO ตลอดช่วงของห้องเผาไหม้ เมื่อพิจารณาจากปฏิกิริยาเคมีที่ เกิดในเตาเผาไหม้วัสดุพุนในส่วนแรกที่เป็นแบบ Rich Combustion (Equivalent Ratio > 1.0) บริเวณนี้จึงมีการก่อ ตัวของอนุมลอิสระ HCN และองค์ประกอบของ ไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ ในปริมาณมาก อนุมลอิสระชนิดนี้ เมื่อทำปฏิกิริยากับ NO (ที่เกิดจาก Prompt NO formation) ก็จะสลาย NO และสร้างอนุมลอิสระอื่นๆรวมทั้ง N<sub>2</sub> ในการเผาไหม้ที่ช่วงต่อมาซึ่งเป็นแบบ Lean Combustion (Equivalent Ratio < 1.0) หากมีอนุมลอิสระที่หลงเหลือ จากการเผาไหม้และการทำปฏิกิริยากับ NO ในช่วงแรก อนุมลเหล่านี้ก็จะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนไปเป็น NO และมีการสูญเสียของ NO ไปพร้อมกันจากการทำ ปฏิกิริยาของ NO กับอนุมลอิสระที่มีไฮโดรเจนเป็น องค์ประกอบ

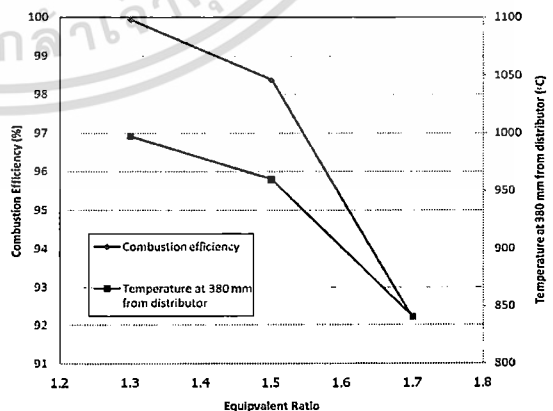
ในกรณีที่มีการป้อนส่วนผสมส่วนแรกของห้องเผา ไหม้ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.7 นั้น มีการตรวจพบ ปริมาณการปลดปล่อย CO ที่สูง ถึง 4000 ppm ด้วยเช่นกัน สะท้อนให้เห็นถึงปริมาณอนุมลอิสระของไฮโดรเจนที่ยัง เผาไหม้ไม่หมดในบริเวณห้องเผาไหม้ในกรณีนี้ด้วย สิ่งนี้ นอกจากจะส่งเสริมให้เกิดกระบวนการก่อตัวของ NO เนื่องจากเป็นช่วงของส่วนผสมบางแล้ว ก็ยังส่งเสริมให้เกิด การสลายตัวของ NO ด้วยเช่นกัน ในช่วงที่สองนี้โดยค่า ของการปลดปล่อย NO โดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 11 ppm ที่ มาตรฐาน 6% O<sub>2</sub>

การสลายตัวของ NO จากการทำปฏิกิริยากับอนุมล อิสระที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนกรณีแบ่งอากาศ

ป้อนเข้าห้องเผาไหม้ส่วนแรกพร้อมกับเชื้อเพลิงที่ อัตราส่วนสมมูล 1.5 นั้นจะไม่มากเท่ากับกรณีอัตราส่วน สมมูล 1.7 ทั้งนี้เพราะปริมาณของอนุมลอิสระในช่วงที่ 2 ของห้องเผาไหม้จะต่ำกว่าซึ่งสะท้อนให้เห็น ได้จากการ พิจารณาการปลดปล่อยของ CO ซึ่งมีค่าเท่ากับ 700 ppm การปลดปล่อย NO ในกรณีนี้จึงมีค่าสูงกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 28 ppm.

ที่เงื่อนไขการแบ่งอากาศเพื่อผสมกับเชื้อเพลิงใน ส่วนแรกเท่ากับอัตราส่วนสมมูล 1.3 นั้น ปริมาณอนุมล อิสระที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนจะมีน้อยที่สุดเมื่อ เทียบกับสองกรณีที่ได้กล่าวมา ในขณะเดียวกันเงื่อนไขที่ ก่อให้เกิด Prompt NO<sub>x</sub> ก็จะน้อยกว่าเช่นกัน เนื่องจาก Prompt NO<sub>x</sub> จะเกิดได้มากที่การเผาไหม้ภายใต้เงื่อนไข เชื้อเพลิงหนาแน่น จึงสังเกตเห็นปริมาณ NO ที่ 16 ppm ที่ ทางออก โดยสรุปปริมาณของ NO ที่วัดได้เป็นปฏิกาด ผกผันกับปริมาณ CO สำหรับกรณีอัตราส่วนสมมูลส่วน แรก 1.5 และ 1.7 บ่งชี้ถึงอิทธิพลของกระบวนการสลาย NO จากการทำปฏิกิริยากับอนุมลอิสระที่มีไฮโดรเจนเป็น องค์ประกอบ ในขณะที่กรณีอัตราส่วนสมมูลส่วนแรก 1.3 การก่อตัวของ Prompt NO<sub>x</sub> มีน้อย สาเหตุมาจากส่วนผสม ที่หนาแน่นที่สุด ทั้งนี้กระบวนการก่อตัวและการสลายตัว ในช่วงต่อมาของการเผาไหม้มีน้อยกว่าในกรณีอื่น

### 4.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผา ไหม้และอุณหภูมิภายในเตาเผาวัสดุพุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้และอุณหภูมิภายในเตาเผาวัสดุพูน โดยจากการทดลองพบว่าในเงื่อนไขการทดลองเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรก เท่ากับ 1.3 และ 1.5 ประสิทธิภาพการเผาไหม้มากกว่า 98 % ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างค่อนข้างสมบูรณ์ โดยน่าจะเกิดจากของสัดส่วนที่เหมาะสมในการเผาไหม้ ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศชั้นแรก เท่ากับ 1.7 ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าต่ำ เท่ากับ 92 % ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เมื่อเทียบกับค่าการทดลองที่ได้กล่าวมา โดยน่าจะเกิดมาจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้มีค่าต่ำ ซึ่งส่งผลต่อปริมาณของ CO ที่สูงขึ้น ซึ่งจากนิยามประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเขา ปริมาณ CO จะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเขา

## 5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการศึกษาสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพูน รวมถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผา ซึ่งจากทดลองพบว่า

1. การเพิ่มอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงกับอากาศที่ช่องทางเข้าแรกนั้นส่งผลทางอ้อมต่อการเพิ่มขึ้นของ CO โดยมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิที่ลดต่ำลงในช่วงสุดท้ายของการเผาไหม้
2. ปริมาณของ NO ที่วัดได้เป็นปกติภาคผนวกกับปริมาณ CO
3. องค์ประกอบของปริมาณ CO ในกรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.3 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 22 ppm
4. องค์ประกอบของปริมาณ NO ในกรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.7 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 11 ppm
5. ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงเมื่ออัตราส่วนสมมูลในส่วนแรกของการเผาไหม้สูงขึ้น มีผลโดยตรงจากอัตราการเกิด CO เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดมากกว่า 98 % ในกรณีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.3 และ 1.5

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้การสนับสนุนทุนที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] อาวุธ สภีร์ตนาถและจารุวัตร เจริญสุข (2551), “เตาเผาไหม้วัสดุพูน Part 2 : อิทธิพลอากาศส่วนเกิน”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดกรุงเทพฯ ฯ
- [2] อาวุธ สภีร์ตนาถและจารุวัตร เจริญสุข (2550), “พฤติกรรมการเผาไหม้หั่วเผาวัสดุพูน”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดกรุงเทพฯ ฯ
- [3] Ronald, D., William, C. and John R., “Apparatus and Method for Combustion within porous matrix elements”. United States Patent. US5, 160,254.
- [4] Ronald, D., William, C. and John R., “Combustion Method and Apparatus for Staged Combustion within Porous Matrix Elements”. United States Patent. US5,080,577.
- [5] Mark J., Hamid A. and Thomas D., “Staged Combustion in a porous-matrix surface combustor to promote ultra-low NO<sub>x</sub> emissions”. United States Patent. US5,476,375.
- [6] Stephen R.T., “An Introduction to Combustion Concepts and Applications”. McGraw-Hill, Inc. New York.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสรรเพชญ พุกษะรัตนนท์
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2547	
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ.2547 - 2548	ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกล บริษัท KYTBW จำกัด
พ.ศ.2548 - 2549	ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกล บริษัทสายการบิน 4DAir จำกัด
พ.ศ.2549 – ปัจจุบัน	ตำแหน่งวิศวกรระดับ 5 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้