

สมรรถนะเชิงความร้อนของเตาเผาไหม้แบบวัสดุพรุนที่มีการจ่ายอากาศ
เป็นชั้น

THERMAL PERFORMANCE OF AN AIR STAGING POROUS
MEDIA COMBUSTOR

อาวุธ ลภีรัตน์ากุล
ARWUT LAPIRATTANAKUN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-CN-M-030-377

สมรรถนะเชิงความร้อนของเตาเผาไหม้แบบวัสดุพรุนที่มีการจ่ายอากาศ
เป็นขั้น

**THERMAL PERFORMANCE OF AN AIR STAGING POROUS
MEDIA COMBUSTOR**

อรุช ลภีรัตนากุล

ARWUT LAPIRATTANAKUN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**82682**
วัน,เดือน,ปี...**21.0.ค. 2551**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2551

KMITL-2008-EN-M-030-377

**THERMAL PERFORMANCE OF AN AIR STAGING POROUS
MEDIA COMBUSTOR**

ARWUT LAPIRATTANAKUN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2008

KMITL-2008-EN-M-030-377

COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมรรถนะเชิงความร้อนของเตาเผาไหม้แบบวัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น
นักศึกษา	นายอาวุธ ลภีรัตนากุล
รหัสประจำตัว	48060355
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของก๊าซ LPG ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้แบบวัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น ในแง่ของสมรรถนะความร้อนอันได้แก่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_c) การกระจายอุณหภูมิและปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้น โดยเตาเผาไหม้วัสดุพูนนี้มีการเผาไหม้แบบผสมก่อน มีความสูงประมาณ 325 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm โดยแบ่งอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็นสามส่วน อากาศส่วนที่หนึ่งจะถูกจ่ายเพื่อผสมกับเชื้อเพลิงก่อนป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ อากาศส่วนที่สองและอากาศส่วนสามจะถูกป้อนเข้าเตาเผาไหม้ที่ระดับความสูง 0 mm. และ 100 mm จากตะแกรงตามลำดับ โดยในการทดลองจะทำการคงที่พลังงานที่ได้รับจากหัวเผาวัสดุพูน (kW) เท่ากับ 3 kW และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินในช่วง 110-180% ขนาดของวัสดุสร้างความพูนและสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) ระหว่าง 0-0.96 ซึ่งในการทดสอบได้ทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วนคือการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศ อิทธิพลของอากาศส่วนเกิน อิทธิพลของขนาดของเม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพูน และอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่เม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพูน โดยจากผลการศึกษาพบว่า เมื่อมีการจ่ายอากาศแบบชั้น อุณหภูมิในช่วงแรกของการเผาไหม้จะลดต่ำลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการแบ่งอากาศให้มีการผสมที่ระยะห่างออกจากแผ่นกระจายก๊าซมากขึ้นอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวจะยิ่งลดต่ำลงและส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ การจ่ายที่บริเวณช่องจ่ายอากาศชั้นที่ 1 (Secondary air) เป็นหลักจะทำให้ การเผาไหม้เกิดขึ้นในบริเวณที่กว้างที่สุดในช่วงที่มีการศึกษา และในทุกกรณีที่ศึกษานี้ มีการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ต่ำ (ไม่เกิน 45 ppm) และการเผาไหม้ยังไม่สมบูรณ์นัก เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินกลับพบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคาดว่าเนื่องจากเม็ดวัสดุสร้างความพูนมีส่วนช่วยให้เกิดความปั่นป่วนย่อยๆ ในช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ ทำให้อัตราการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงดีขึ้น โดยเฉพาะกรณีที่มีปริมาณอากาศส่วนเกินมีค่าสูง โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการนำเตาเผาไหม้วัสดุพูนนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงคือ เงื่อนไขปริมาณอากาศส่วนเกิน 110% ที่ λ เท่ากับ 0 เผาไหม้โดยใช้วัสดุสร้างความ

พรุนขนาด 2 cm และทำการจ่ายอากาศที่ชั้นที่ 1 และ 2 ของเตาเผาไหม้ ซึ่งมีอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าประมาณ 1100 °C ปริมาณ CO NO_x และ C_xH_y มีค่าเท่ากับ 11 43 และ 5,717 ppm ที่ O₂ 6% ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้เท่ากับ 79%

คำสำคัญ : เตาเผาไหม้วัสดุพรุน การจ่ายอากาศเป็นชั้น วัสดุพรุน

Thesis Title	Thermal Performance of an Air Staging Porous Media Combustor
Student	Mr.Arwt Lapirattanakun
Student ID.	48060355
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Dr.Jaruwat Charoensuk, Assoc. Prof.

Abstract

A porous combustor burning partially premixed LPG with staged air was investigated in aspects of the combustion efficiency, temperature distribution and emissions. It has 325 mm in height with 100 mm of inside diameter. The air was introduced into the burner in three different locations. The small amount of air accounted for 4 % of stoichiometric requirement was premixed with the fuel at the primary port. The remaining air was delivered to the combustor at 0 mm and 100 mm from the distributor plate. Thermal throughput was kept at 3 kW where the effects of excess air were studied ranging from 110% to 180%. Effects of porous domain and change in size of alumina sphere were also studied. The finding of this work is similar to the literature as the air staged combustion has, in general, a lower furnace temperature than the unstaged ones. The combustion takes place in a relatively larger region and NO_x emission is low whereas the combustion efficiency is not high. By increasing the excess air, although leading to increasing in thermal loading, the increase in furnace temperature was found. This was due to the presence of small turbulent eddies that mix the reactant and hot product at higher rate with increasing bulk gas velocity. The appropriate operating condition for the application of fuel cell systems was suggested at 110 % excess air with lamda value of zero (the ratio of tertiary air to total air). The recommended size for alumina sphere is 2 cm. with introduction of primary and secondary stage air. The temperature measured from such condition was found well above 1100 °C and the values of CO, NO_x and C_xH_y were 11, 43 and 5717 ppm respectively (at 6%O₂) the combustion efficiency of such case is 79 %.

Keyword: Porous burner, staged combustion, porous media

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องสมรรถนะความร้อนของเตาเผาไหม้แบบวัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศเป็นขั้นสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์สนับสนุนจากหน่วยงาน และบุคคลต่าง ๆ เป็นอย่างดี

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ได้จัดสรรทุนอุดหนุนและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้งานวิจัยเรื่องนี้ยังได้รับคำแนะนำอย่างดียิ่งจากคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างสูงที่ทำให้งานวิจัยเรื่องนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์

ผู้ที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนและทำวิจัยของผู้วิจัยมาโดยตลอด ได้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่น้อง ของผู้วิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร โดยเฉพาะอย่างยิ่งนักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณในทุกประการที่ให้แก่งานวิจัยเรื่องนี้ไว้ ณ โอกาสนี้

อาวธ ลภีรัตนากุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ.....	VI
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
3.1 การถ่ายเทความร้อน.....	9
3.1.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ.....	10
3.1.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา.....	14
3.1.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี.....	17
3.1.4 การนำความร้อนในพิกัดทรงกลม.....	20
3.2 แก๊สเชื้อเพลิง.....	21
3.2.1 ชนิดของแก๊สเชื้อเพลิง.....	21
3.2.2 คุณสมบัติของแก๊ส LPG.....	22
3.2.3 อุณหภูมิของการจุดติดไฟ.....	23
3.2.4 อุณหภูมิของเปลวไฟ.....	23
3.2.5 อัตราส่วนปริมาตรของเหลวต่อแก๊ส.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.6 ค่าความร้อนของการเผาไหม้.....	23
3.2.7 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้.....	24
3.2.8 สี กลิ่น ความเป็นพิษและการละลาย.....	24
3.3 คุณสมบัติของวัสดุพอรุน.....	24
3.3.1 หลักการถ่ายเทความร้อนของวัสดุพอรุน.....	25
3.3.2 การเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน.....	25
3.3.3 หลักการทำงานการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน.....	26
3.3.4 การหมุนเวียนความร้อนโดยการเปลี่ยนรูปความร้อนระหว่างการพาความร้อน และแผ่รังสีความร้อนในวัสดุพอรุน.....	27
3.3.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่า Preheat Air Temperature (T_{ad}).....	28
3.4 การเผาไหม้.....	29
3.4.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้.....	29
3.4.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้.....	31
3.4.3 ปริมาณอากาศทางทฤษฎี อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงและอากาศส่วนเกิน...32	
3.4.4 การหาปริมาณอากาศเพื่อเผาไหม้ทางทฤษฎี.....	32
3.4.5 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 วัสดุพอรุน.....	37
4.1 การคำนวณเพื่อประเมินความร้อนสูญเสียที่เปลือกเตาเผาไหม้วัสดุพอรุน.....	37
4.2 การกำหนดเงื่อนไขการทดสอบเตาเผาไหม้วัสดุพอรุน.....	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การคำนวณหาอุณหภูมิอะเดียแบติก.....	40
4.4 การคำนวณหาค่าความพรุนของวัสดุพรุน.....	42
บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	43
5.1 ระบบการทดลองและอุปกรณ์.....	43
5.1.1 เตาเผาไหม้วัสดุพรุนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น.....	44
5.1.2 ระบบการวัดอุณหภูมิ.....	45
5.1.3 การวัดมลพิษ.....	45
5.2 พารามิเตอร์ในการทดลอง.....	45
5.3 วิธีการทดลอง.....	46
5.3.1 การเก็บข้อมูล.....	46
5.4 เงื่อนไขการทดลอง.....	47
5.4.1 การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศ.....	48
5.4.2 การศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนเกิน.....	49
5.4.3 การศึกษาอิทธิพลของขนาดของเม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพรุน.....	49
5.4.4 การศึกษาอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่เม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพรุน.....	50
บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	51
6.1 การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศ.....	51
6.1.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง.....	51
6.1.2 ปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้.....	53
6.1.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้.....	56
6.2 การศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนเกิน.....	57
6.2.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง.....	57
6.2.2 ปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้.....	60
6.2.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้.....	62
6.3 การศึกษาอิทธิพลของขนาดของเม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพรุน.....	64
6.3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง.....	64
6.3.2 ปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้.....	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้.....	69
6.4 การศึกษาอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่เม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพรุน.....	70
6.4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง.....	70
6.4.2 ปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้.....	73
6.4.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้.....	77
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	78
7.1 สรุปผลการทดลอง.....	78
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	79
บรรณานุกรม.....	81
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก การทดลองในเงื่อนไขต่างๆ.....	83
ภาคผนวก ข อุปกรณ์การทดลอง.....	98
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณ.....	103
ภาคผนวก ง แบบขึ้นส่วนต่าง.....	106
ภาคผนวก จ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	116
ประวัติผู้เขียน.....	124

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของ LPG สถานะของเหลว.....	22
3.2 ค่าความร้อนของการเผาไหม้แก๊ส LPG.....	23
4.1 แสดงค่าเอนทัลปีของธาตุที่สภาวะอ้างอิงมาตรฐานและที่ 298 K.....	41
5.1 พารามิเตอร์สำหรับทดลองสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศ เป็นชั้น.....	46
5.2 เงื่อนไขอากาศที่ใช้ในการทดลอง.....	47

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงเครื่องหมายของค่า dT/dx สำหรับการนำความร้อนและแสดงทิศทางการไหลของความร้อน.....	11
3.2 แสดงการนำความร้อนผ่านผนังราบที่มีค่าการนำความร้อน k คงที่.....	11
3.3 แสดงการนำความร้อนแบบมิติเดียวที่ไหลผ่านผนังหลายชั้น และการเปรียบเทียบกับวงจรไฟฟ้า.....	13
3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิเหนือแผ่นวัตถุร้อนของการพาความร้อนแบบบังคับ.....	15
3.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิของของไหลบนแผ่นวัตถุเย็นร้อนของการพาความร้อนแบบอิสระ.....	16
3.6 แสดงวงจรความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเมื่อผิวทั้งสองด้านมีการถ่ายเทความร้อน โดยการพา.....	17
3.7 แสดงการนำความร้อนตัวกลางพิกัดทรงกลม (r, θ, ϕ)	20
3.8 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผาไหม้ชนิดที่มีและไม่มี การหมุนเวียนความร้อน.....	26
3.9 แสดงหลักการทำงานของวัสดุพอรุน.....	27
5.1 แสดงชุดอุปกรณ์เตาเผาไหม้วัสดุพอรุนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น.....	43
5.2 แสดงขนาดเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้นและลักษณะการจ่ายอากาศ.....	44
5.3 แสดงเครื่องมือวัดไอเสียของ Testo รุ่น 350 XL.....	45
5.4 แผนผังการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศ.....	48
5.5 แสดงตำแหน่งการจ่ายอากาศ.....	48
5.6 แผนผังการศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนเกิน.....	49
5.7 แผนผังการศึกษาอิทธิพลของขนาดของเม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพอรุน.....	49
5.8 แสดงขนาดของเม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพอรุน.....	49
5.9 แผนผังการศึกษาอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่เม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพอรุน.....	50
6.1 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง.....	52
6.2 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนออกไซด์.....	53
6.3 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.4 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอน.....	54
6.5 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้.....	56
6.6 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความ สูง.....	57
6.7 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์..	60
6.8 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์.....	60
6.9 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอน.....	61
6.10 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้.....	63
6.11 แสดงอิทธิพลของขนาดของวัสดุสร้างความพรุนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง.....	64
6.12 แสดงพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้วัสดุพรุน โดยใช้วัสดุสร้างความพรุนขนาดเล็ก.....	66
6.13 แสดงอิทธิพลของขนาดของวัสดุสร้างความพรุนที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอน มอนอกไซด์.....	66
6.14 แสดงอิทธิพลของขนาดของวัสดุสร้างความพรุนที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์.....	67
6.15 แสดงอิทธิพลของขนาดของวัสดุสร้างความพรุนที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอน.....	67
6.16 แสดงอิทธิพลของขนาดของวัสดุสร้างความพรุนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้.....	69
6.17 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง.....	70
6.18 แสดงลักษณะของเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้ที่ไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุน.....	72
6.19 แสดงเขม่าที่เกิดขึ้นขณะทำการเผาไหม้.....	72
6.20 แสดงลักษณะของเขม่าที่จับตัวกันเป็นก้อน เมื่อทำการเผาไหม้โดยไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุน.....	73
6.21 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุนที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์.....	73

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.22 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุนที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์.....	74
6.23 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุนที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอน.....	74
6.24 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้.....	77

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

(A / F)	อัตราส่วนของปริมาณอากาศต่อปริมาณของเชื้อเพลิง, $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
$(A / F)_{\text{Stoic}}$	อัตราส่วนของปริมาณอากาศต่อปริมาณของเชื้อเพลิงตามทฤษฎี, $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
$C_{p \text{ ambient}}$	ค่าความจุความร้อนของอากาศ, $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
$C_{p \text{ flue gas}}$	ค่าความจุความร้อนของก๊าซไอเสีย, $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผา, m
D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้, 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, $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$
HHV	ค่าความร้อนขั้นสูง, kJ/kg
LHV	ค่าความร้อนขั้นต่ำ, kJ/kg
m_{air}	มวลของอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาการเผาไหม้, kg
\dot{m}_{air}	อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย kg/s
m_{fuel}	มวลของเชื้อเพลิงที่เข้าทำปฏิกิริยาการเผาไหม้, kg
\dot{m}_{fuel}	อัตราป้อนของเชื้อเพลิง, kg/s
m_{H_2}	มวลของไฮโดรเจนต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง, $\text{kg}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
m_w	มวลของไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง, $\text{kg}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
M.W.	มวลโมเลกุล, g/mole
N_i	โมลของก๊าซผสม, mole
P	ความดัน, Pa
P_i	ความดันย่อย, Pa
q	ภาระความร้อนที่เตาเผาผลิตได้, $\text{kJ}/\text{hr}/\text{m}^3$
Q	ค่าความร้อนของแกลบ, kJ/kg
q_1	ความร้อนที่ถ่ายเทสู่น้ำที่นำไปใช้ประโยชน์, kJ/s
q_2	ความร้อนสุทธิในก๊าซไอเสียที่ออกจากเตาเผา, kJ/s

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

q_3	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในเชื้อเตา, kJ/s
q_4	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์, kJ/s
q_5	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา, kJ/s
q_{air}	พลังงานจากอากาศ, kJ/s
q_{fuel}	พลังงานที่อยู่ภายในเชื้อเพลิง, kJ/s
Q_S	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิ, 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
$\% stoic\ air$	เปอร์เซ็นต์อากาศพอดีทางทฤษฎี
$\% excess\ air$	เปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกิน
λ	สัดส่วนปริมาณอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมเชิงปริมาตร
η_{com}	ประสิทธิภาพการเผาไหม้, %
Φ	อัตราส่วนสมมูล
ρ_a	ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m ³
χ_i	สัดส่วนโมลของก๊าซผสม

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

พลังงานถือเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับมนุษย์ อีกทั้งยังเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนาประเทศ ซึ่งประเทศไทยมีแหล่งพลังงานหลายประเภทด้วยกันแต่มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆ ในที่นี้พลังงานที่มีบทบาทสำคัญมากต่อการพัฒนาประเทศ คือพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมันดิบ ซึ่งส่วนมากจะใช้เพื่อการผลิตไฟฟ้า การคมนาคมขนส่ง ตลอดจนเป็นวัตถุดิบในการผลิตของอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภท ซึ่งทุกครั้งที่เกิดวิกฤตการณ์ของโลก อาทิ สงครามในตะวันออกกลางหรือแม้แต่ความผันผวนของราคาน้ำมันในตลาดโลกอย่างในปัจจุบัน ประเทศไทยก็ได้รับผลกระทบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสังคม ทั้งนี้เพราะประเทศไทยยังต้องพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ ในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ปัญหาดังกล่าวแล้ว ประเทศไทยยังคงประสบปัญหาการใช้พลังงานในการพัฒนาเศรษฐกิจค่อนข้างสูง กล่าวคือในรอบ 15 ปีที่ผ่านมา ประเทศไทยใช้พลังงานคิดเป็น 1.4 เท่าของอัตราการเติบโตทางเศรษฐกิจ หรือกล่าวอีกในหนึ่งถ้าเศรษฐกิจของประเทศเติบโตร้อยละ 5 ต่อปี การใช้จ่ายด้านพลังงานจะเติบโตถึงร้อยละ 7 ซึ่งค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับประเทศที่พัฒนาแล้วเช่น สหรัฐอเมริกา (ร้อยละ 0.8) ญี่ปุ่น (ร้อยละ 0.95) [1] ซึ่งหมายความว่าประเทศไทยใช้พลังงานในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจสิ้นเปลือง ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูง ศักยภาพในการแข่งขันลดน้อยลง อีกทั้งยังสูญเสียเงินตราในการนำเข้าพลังงานอีกจำนวนมาก

จากปัญหาการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพประกอบกับราคาน้ำมันสูง ที่ถูกควบคุมโดยประเทศผู้ผลิตและส่งออกน้ำมัน จึงเป็นบทเรียนสำคัญที่ประเทศไทยต้องตระหนักถึงการพึ่งพาตนเองให้มากขึ้น ทางออกที่ดีที่สุดคือการใช้พลังงานอย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพ รวมทั้งการพยายามหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทน เช่น การพยายามใช้แหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศ เช่น ความร้อนใต้พิภพ พลังงานลม พลังงานคลื่นและพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น

ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาระบบของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้สามารถผลิตพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ด้วยการติดตั้ง reformer เข้าไปในระบบเพื่อช่วยในการอุ่นก๊าซออกซิเจนและสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนก่อนเข้าทำปฏิกิริยา โดยแหล่งพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับ reformer ได้มาจากการติดตั้งเตาเผาไหม้เพิ่มเข้าไปในระบบ ซึ่งรูปแบบของการติดตั้งทั้ง reformer และเตาเผาไหม้ เข้าไปในระบบของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น ทำได้โดยการติดตั้ง reformer ไว้ภายในเตาเผาไหม้หรือติดตั้งไว้ภายนอกเตาเผาไหม้ก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม ขึ้นอยู่กับสมรรถนะของเตาเผาไหม้ที่ทำได้ [2,3] โดยเตาเผาไหม้ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปส่วนใหญ่เป็นเตาเผาไหม้ประเภท free flame ซึ่งข้อเสีย

ของเตาเผาใหม่จำพวกนี้คือ ผลิตภัณฑ์งานความร้อนได้ไม่เสถียร) เกิดการแกว่งของอุณหภูมิสูง (การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงส่งผลต่อสมรรถนะของเตาเผาใหม่มาก) อีกทั้งยังมีอัตราการเกิดมลพิษสูงอีกด้วย ซึ่งจากข้อเสียดังกล่าวเมื่อนำเตาเผาใหม่มาดัดตั้งเข้ากับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงแล้ว จะทำให้เกิด thermal stress กับ reformer ส่งผลอุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ [4] โดยจากการศึกษาพบว่าทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาดังกล่าวได้คือการนำเตาเผาใหม่วัสดุพรุน (Porous media combustor) มาดัดตั้งเข้ากับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงแทนเตาเผาไหม้เดิมที่ใช้กันอยู่ (Conventional combustor) ด้วยเหตุผลที่ว่าเตาเผาใหม่วัสดุพรุนนั้น มีการเผาไหม้ที่เสถียรคือการปรับเปลี่ยนสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อการเผาไหม้ อัตราการเกิดมลพิษต่ำ และลดอัตราการแพร่ของอากาศเข้าสู่เชื้อเพลิง ซึ่งช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงเกิดขึ้นช้าลงได้ นอกจากนี้ด้วยคุณลักษณะเด่นของวัสดุสร้างความพรุนจะส่งผลให้เกิด Super adiabatic flame ซึ่งเป็นการผสมผสานกันระหว่างกลไกการถ่ายเทความร้อนทั้งการนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเข้าไว้ด้วยกัน โดยจะเป็นการช่วยในการอุ่นอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงช่วยทำให้การเผาไหม้เกิดได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น [5,6,7,8] โดยหัวเผาวัสดุพรุนที่มีใช้อยู่ในขณะนี้มียู่ออกด้วยกันสองรูปแบบ คือ หัวเผาวัสดุพรุนแบบจ่ายอากาศชั้นเดียว (single stage) และแบบจ่ายอากาศหลายชั้น (multi-stage) ซึ่งจากการค้นคว้าพบว่าเตาเผาไหม้แบบจ่ายอากาศชั้นเดียวนั้นไม่สามารถควบคุมปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นตามระดับความสูงของเตา ส่งผลให้ถ้าติดตั้งชุดแลกเปลี่ยนความร้อนไว้ภายในเตาเผา จะทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้เนื่องจากปริมาณความร้อนสูงเกินไป ซึ่งแตกต่างจากเตาเผาไหม้วัสดุพรุนแบบจ่ายอากาศหลายชั้นที่สามารถควบคุม บริเวณที่เกิดการเผาไหม้ (Combustion zone) ที่เกิดขึ้นตามระดับความสูงของเตาได้ โดยควบคุมจากปริมาณอากาศที่ป้อนให้กับเชื้อเพลิงในแต่ละระดับความสูงของเตาเผาไหม้ [4] จึงทำให้ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในเตาเผาไหม้

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จะเน้นด้านการพัฒนาเตาเผาใหม่วัสดุพรุน ที่ใช้สำหรับระบบของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่เสถียร มลพิษต่ำ ซึ่งถือว่าการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงของตนเองโดยไม่ต้องพึ่งพาต่างชาติ ทำให้ศักยภาพในการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการลดการสูญเสียเงินตราในการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศอีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. สร้างเตาเผาใหม่วัสดุพรุนในระดับห้องปฏิบัติการที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น
2. ทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของเตาเผาใหม่วัสดุพรุน เช่น ขนาดของเม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพรุน อากาศส่วนเกิน สัดส่วนอากาศเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) และตำแหน่งการจ่ายอากาศ โดยสมรรถนะของเตาเผาไหม้

วัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น คือประสิทธิภาพการเผาไหม้ ช่วงบริเวณที่เกิดการเผาไหม้และปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้น

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. การเผาไหม้ที่มีการจ่ายอากาศแบบชั้นน่าจะช่วยให้การกระจายอุณหภูมิในเตามีความสม่ำเสมอและเกิดขึ้นในบริเวณที่กว้างมากขึ้น
2. การแบ่งอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ น่าจะช่วยให้อุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้มีระดับลดลงส่งผลให้ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์มีระดับลดลง แต่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพของการเผาไหม้
3. ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่เผาไหม้ในช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ เมื่อมีปฏิสัมพันธ์ในเชิงความร้อนกับเม็ดวัสดุ น่าจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงอยู่ในระดับที่ดี

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 บันทึกและวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

1. การกระจายอุณหภูมิตามระดับความสูงของเตาเผาไหม้วัสดุพูน
2. การปล่อยมลพิษ
3. ประสิทธิภาพการเผาไหม้

1.4.2 ศึกษาผลกระทบในข้อที่ 1.4.1 เมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

1. สัดส่วนของอากาศในแต่ละชั้น
2. อากาศส่วนเกิน (%Excess air)
3. ขนาดของวัสดุสร้างความพูน รวมถึงกรณีที่ไม่ใส่วัสดุสร้างความพูน

1.4.3 สมมติฐานของการทดลอง

1. ใช้เม็ดอลูมินา (Alumina Ceramic) ขนาด 0.5-2 cm เป็นวัสดุสร้างความพูน
2. ใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีสัดส่วน Propane : Butane เท่ากับ 40:60 โดยมีค่าความร้อนและความหนาแน่นเท่ากับ 45.8 MJ/kg และ 2.001 kg/m³ ตามลำดับ
3. พลังงานความร้อนที่เตาสามารถผลิตได้คือ 3 kw
4. ปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ 4 L/min
5. สัดส่วนอากาศเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 0, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.96
6. ปริมาณอากาศส่วนเกินมีค่าเท่ากับ 110, 150 และ 180%

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 ($C_3H_8 + C_4H_{10}$)
4. วัสดุสร้างความพรุณไม่ทำปฏิกิริยาในการเผาไหม้
5. การเรียงตัวกันของวัสดุสร้างความพรุณถือว่าเรียงตัวกันแบบ random

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ทำการศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับเตาเผาวัสดุพรุณชนิดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ทำการศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง
3. ออกแบบสร้างเตาเผาไหม้วัสดุพรุณที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น
4. เตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง
5. ทำการทดลองและเก็บบันทึกผลการทดลอง
6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนา และการปรับปรุง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม
2. ทราบถึงพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้วัสดุพรุณที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น โดยใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง
3. เป็นต้นแบบของเตาเผาไหม้วัสดุพรุณที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็น แหล่งพลังงานให้กับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าวัสดุพรุน (Porous media) นั้น มีจุดเด่นอยู่หลายประการ คือ วัสดุพรุนจะมีส่วนช่วยให้เกิดความปั่นป่วนย่อยๆ ในช่องว่างระหว่างวัสดุพรุน ทำให้อัตราการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นไปได้ด้วยดี อีกทั้งทั้งทำหน้าที่ เป็นตัวสะสมความร้อนช่วยให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สูงเกินไปในขณะที่ช่วยป้องกันความร้อนกลับมายังส่วนผสมเชื้อเพลิงและอากาศที่ยังไม่เผาไหม้ไปพร้อมๆ กัน ดังนั้นวัสดุพรุนที่เป็นส่วนประกอบในหัวเผาหรือเตาเผาไหม้นั้น จะช่วยในการส่งเสริมการเผาไหม้ให้ดีขึ้น ช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการนำวัสดุพรุนไปประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งสามารถสรุปพอสังเขปได้ดังนี้

อรธณพ อาบเพ็ง (2547) [9] ซึ่งเป็นการศึกษาเชิงทดลองของหัวเผาแบบพรุนเผาไหม้น้ำมันพืช โดยใช้ น้ำมันพืชที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งได้นำข้อดีของหัวเผาวัสดุพรุนนี้ไปใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว โดยไม่จำเป็นต้องทำให้เชื้อเพลิงเหลวแตกตัวเป็นฝอยละอองก่อนการเผาไหม้ ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในหัวเผาเมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงค่าอัตราส่วนสมมูล ความยาวของเปลวไฟเมื่อเปลี่ยนอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงและผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวรัศมี ซึ่งจากการศึกษาพบว่าที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.566 g/s อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.4 ทำให้อุณหภูมิภายในหัวเผาเกิดขึ้นสูงสุดที่ 1180 °C และความยาวเปลวไฟสูงสุดที่ 20 cm การกระจายตัวอุณหภูมิในแนวรัศมีมีค่าสูงสุดที่กึ่งกลางหัวเผาและจะลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่ผนังของหัวเผา

กัมปนาท เทียนน้อย (2544) [10] ซึ่งเป็นการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวในวัสดุพรุนแบบสลับทิศทางการไหลของอากาศอย่างเป็นจังหวะมาทดแทนการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวแบบสเปรย์ปกติ โดยการเผาไหม้แบบนี้มีข้อดีคือมีการหมุนเวียนความร้อนเกิดขึ้นภายในระบบเพื่อช่วยส่งเสริมการระเหย ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงกว่าและมลภาวะที่เกิดขึ้นยังมีค่าต่ำ ซึ่งในการทดลองจะทำการจ่ายเชื้อเพลิง โดยการหยดด้วยแรงโน้มถ่วงโลกเข้าไปในวัสดุพรุนพร้อมอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอผสมคลุกเคล้ากับอากาศแล้วเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ภายในวัสดุพรุน ซึ่งจากการทดลองพบว่า เทคนิคดังกล่าวได้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่ากรณีการเผาไหม้แบบทิศทางเดียวและมีมลพิษที่ต่ำ

Christo F. C. and Dally B. (2002) [11] ซึ่งเป็นงานวิจัยโดยใช้มีเทนเป็นเชื้อเพลิงและใช้เซรามิกอลูมิน่าเป็นวัสดุสร้างความพรุน ซึ่งหัวเผาที่ทำการออกแบบเป็นแบบผสมกันก่อนการเผาไหม้ (Premixed) โดยทำการศึกษายานการทำงานของหัวเผาที่มีค่าอัตราส่วนสมมูลต่ำเท่ากับ 0.1 จากการศึกษาพบว่า มีเทนสามารถเผาไหม้ได้ภายในหัวเผาวัสดุพรุนด้วยการเผาไหม้แบบส่วนผสมบาง

โดยจะเกิดการกระจายตัวของอนุกรมอย่างสม่ำเสมอภายในชั้นของวัสดุพอร์น ปริมาณในโตรเจน ออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณต่ำ

Hoffmann J.G และคณะ (1997) [12] ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส (propane) กับอากาศในวัสดุพอร์นชนิดสลับทางการไหลของส่วนผสม โดยใช้วัสดุพอร์น 3 ชนิดคือ Cordierite ขนาด 6 ppi (Pores-per-inch) และ 30 ppi และ Cerafoam ขนาด 13 ppi ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า ช่วงเวลาการสลับทิศทางการไหลเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้น reaction zone ขยับลึกเข้าไปภายในวัสดุพอร์น นอกจากนี้พบว่า วัสดุพอร์นขนาด 30 ppi จะให้ Equivalence ratio ต่ำเท่ากับ 0.026 ซึ่งต่ำกว่า 2 เท่าเมื่อเทียบกับวัสดุพอร์นขนาด 6 ppi เนื่องจากมีค่าความหนาเชิงแสงมากกว่า ปริมาณมลภาวะที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของความเร็วในการไหลของไอดีและชนิดของวัสดุพอร์น

Jia F. Liu and Wen H. Hsieh. (2004) [13] ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของหัวเผาวัสดุพอร์นที่ใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง โดยปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนผสมและทำการบันทึกค่าการกระจายตัวของอนุกรม และปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ (NO_x และ CO) ซึ่งจากการทดลองพบว่า การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างเสถียรภายใต้เงื่อนไขการเผาไหม้แบบเบาบาง ด้วยค่าอัตราส่วนผสมที่ต่ำกว่า หัวเผาปกติทั่วไป นอกจากนี้ยังพบว่า การเผาไหม้ของหัวเผาวัสดุพอร์นแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะเฉพาะคือ อุณหภูมิเปลวไฟต่ำ (Low flame temperature) ช่วงการเผาไหม้ที่กว้าง (Extended reaction zone) และมลพิษต่ำ (Low emission)

Tian-Yu Xiong และคณะ (1995) [14] ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพอร์นที่ใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงและมีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อไว้ภายใน โดยใช้ น้ำ เป็นของไหล ซึ่งในการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขต่างๆ เช่น อัตราการไหลเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศส่วนเกินและอัตราการไหลของน้ำ เป็นต้น และทำการบันทึกค่า อัตราการถ่ายเทความร้อนอนุกรมและปริมาณก๊าซไอเสีย ซึ่งจากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของการเผาไหม้มีค่าสูง (High combustion intensity) มากกว่า 2.5 MWm^{-2} อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงมากกว่า 310 kW m^{-2} และปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ โดยทั้ง NO_x และ CO มีค่าต่ำกว่า 15 ppm

Trimis. D และคณะ (2002) [15] ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเผาไหม้ระหว่างเตาเผาไหม้วัสดุพอร์นกับเตาเผาไหม้ทั่วไป ซึ่งพบว่า การเผาไหม้ภายในเตาเผาไหม้วัสดุพอร์น จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ Peclet-number มีค่ามากกว่า 65 และในการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติภายในเตาเผาไหม้วัสดุพอร์น อัตราส่วนอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1.1-1.8 นอกจากนี้ยังพบว่า การเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้วัสดุพอร์น ส่งผลให้ความเข้มข้นของการเผาไหม้มีค่าสูง (High combustion intensity) และมลพิษต่ำกว่าเตาเผาไหม้ทั่วไป

Janet L. Ellzey and Rakesh Goel (1995) [16] ได้ทำการศึกษาปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นภายในหัวเผาวัสดุพอร์นแบบแบ่งอากาศสองชั้น (Two stage porous media burner) และได้ทำการ

เปรียบเทียบกับกรณีเผาไหม้ด้วยหัวเผาวัสดุพรุนแบบจ่ายอากาศชั้นเดียว (Single stage porous media burner) จากการศึกษาพบว่าหัวเผาวัสดุพรุนแบบจ่ายอากาศสองชั้นมีปริมาณ NO และ CO ที่เกิดขึ้นน้อยกว่าหัวเผาวัสดุพรุนแบบจ่ายอากาศชั้นเดียว โดยปริมาณ NO และ CO จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนสมมูล ซึ่งถ้าอัตราส่วนสมมูลมีค่าอยู่ในช่วง 0.75-0.95 ปริมาณ NO และ CO จะมีค่าอยู่ในช่วง 17-30 ppm and 10-75 ppm ตามลำดับ

Ronald D.B และคณะ (1992) [17] ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพรุนแบบผสมก่อนที่มีการจ่ายของผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นชั้น โดยได้ทำการศึกษาเตาเผาไหม้วัสดุพรุนแบบ 2 ชั้น ซึ่งส่วนผสมแบบหนา (ปริมาณ O_2 ประมาณ 60-75%) จะถูกจ่ายที่บริเวณที่เกิดการเผาไหม้ส่วนแรก (First combustion zone) และส่วนผสมแบบบาง (ปริมาณ O_2 ประมาณ 100-125%) จะถูกจ่ายที่บริเวณที่เกิดการเผาไหม้ส่วนสอง (Second combustion zone) ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การจ่ายอากาศเป็นชั้นสามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ ส่งผลให้อัตราการเกิด Thermal NO_x มีปริมาณลดลง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นระหว่างเตาเผาไหม้แบบนี้กับเตาเผาไหม้แบบทั่วไป (Conventional combustor) พบว่าเตาเผาไหม้แบบนี้สามารถลดปริมาณ NO_x ลงได้ประมาณ 50-80%

Pickenäcker, O และคณะ (2000) [18] ได้ทำการออกแบบหัวเผาวัสดุพรุนที่มีการจ่ายอากาศหรือเชื้อเพลิงหรือของผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง เป็นชั้นเพื่อใช้สำหรับหม้อน้ำหรือเตาเผาไหม้ โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณเชื้อเพลิงหรืออากาศในแต่ละชั้น จากการศึกษาพบว่า การจ่ายเป็นชั้นทำให้ปริมาณ NO_x ลดลง 30% อีกทั้งยังพบว่า การจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้นจะส่งผลให้สามารถหลีกเลี่ยงอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ จึงทำให้ไม่เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ และยังส่งผลให้อัตราการเกิด Thermal NO_x ลดลงอีกด้วย

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า เตาเผาไหม้หรือหัวเผาที่นำวัสดุพรุนมาประยุกต์ใช้นั้น การเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างเสถียรภายใต้เงื่อนไขการเผาไหม้แบบบาง ด้วยค่าอัตราส่วนสมมูลที่ต่ำกว่าหัวเผาปกติทั่วไป อีกทั้งยังพบว่า การเผาไหม้ของหัวเผาวัสดุพรุนแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะเฉพาะคือ อุณหภูมิเปลวไฟต่ำ (Low flame temperature) ช่วงการเผาไหม้ที่กว้าง (Extended reaction zone) และมลพิษต่ำ (Low emission) นอกจากนี้ถ้าทำการเผาไหม้ โดยใช้เตาเผาไหม้วัสดุพรุนที่มีการจ่ายของผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นชั้นแล้ว จะสามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ ส่งผลให้อัตราการเกิด Thermal NO_x มีปริมาณลดลง ซึ่งจะมีปริมาณ NO_x ลงได้ประมาณ 50-80% เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นกับเตาเผาไหม้แบบทั่วไป (Conventional combustor) ดังนั้นถ้านำข้อดีของเตาเผาไหม้วัสดุพรุนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้นดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ติดตั้งเข้ากับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงแทนเตาเผาไหม้เดิมที่ใช้กันอยู่ (Conventional combustor) เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนในการอุ่นอากาศและไฮโดรเจนก่อนเข้าทำปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิง คาดว่าจะช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบและลดความเสี่ยงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ติด

ตั้งอยู่ภายในเตาเผาไหม้ได้ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ คือ การศึกษาสมรรถนะความร้อนของเตาเผาไหม้แบบวัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น โดยคาดว่าเตาเผาไหม้ที่มีการจ่ายอากาศแบบชั้นน่าจะช่วยให้การกระจายอุณหภูมิในเตามีความสม่ำเสมอและเกิดขึ้นในบริเวณที่กว้างมากขึ้น และอุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้มีระดับลดลงส่งผลให้และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์มีระดับลดลง

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การถ่ายเทความร้อน [19,20]

เมื่อจุดสองจุดมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันก็จะมีพลังงานถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ พลังงานกำลังเคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้เรียกว่า ความร้อน ถึงแม้ว่าวิชาเทอร์โมไดนามิกส์จะเป็นวิชาที่ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทของพลังงานก็ตาม แต่ก็เป็นการศึกษาเฉพาะในกรณีที่ระบบความร้อนนั้นอยู่ในสถานะที่สมดุลแล้วเท่านั้นดังนั้นกฎเกณฑ์ต่างๆ ในวิชาเทอร์โมไดนามิกส์จึงใช้ได้เพียงแก่ทำนายจำนวนพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบความร้อนที่อยู่ในสถานะสมดุล จากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งเท่านั้น ไม่สามารถที่จะบอกให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงนั้นเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงไร ศาสตร์จากวิชาการถ่ายเทความร้อนนี้จะช่วยต่อเติมกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยการวิเคราะห์ที่สามารถนำมาใช้หาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้

รายละเอียดที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อนนั้นพิจารณาได้จากแท่งเหล็กที่กำลังร้อนร้อนขึ้นเมื่อนำไปแช่ทิ้งไว้ในน้ำร้อน จากกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ จะทำให้สามารถหาอุณหภูมิของแท่งเหล็กและของน้ำร้อนได้เมื่อแท่งเหล็กและน้ำร้อนอยู่ในสถานะสมดุลแล้ว แต่ก็ไม่สามารถบอกให้ทราบถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิในช่วงเวลาที่กำหนดให้มันและไม่สามารถบอกให้ทราบว่า จะต้องใช้เวลานานเท่าไรแท่งเหล็กและน้ำร้อนจึงจะมีอุณหภูมิตามต้องการ ส่วนการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนนั้นจะสามารถทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนไปยังแท่งเหล็กได้ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาอุณหภูมิของแท่งเหล็ก และของน้ำร้อนในฟังก์ชันของเวลาได้อีกด้วย

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่ดีนั้นจะต้องทราบถึงกลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบต่าง ๆ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ

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

ในการออกแบบระบบความร้อนและการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนความร้อน นั้นจะ ต้องเข้าไปในกลไกของการถ่ายเทความร้อนแต่ละแบบ และต้องทราบถึงความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนแบบนั้น ๆ สำหรับในบทนี้จะพิจารณาถึงกฎเกณฑ์สำคัญ ๆ ของการถ่ายเทความร้อนและการใช้งานที่พื้น ๆ ส่วนรายละเอียดของการถ่ายเทความร้อนแต่ละแบบนี้จะกล่าวถึงในภายหลัง

3.1.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (Conduction Heat Transfer)

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

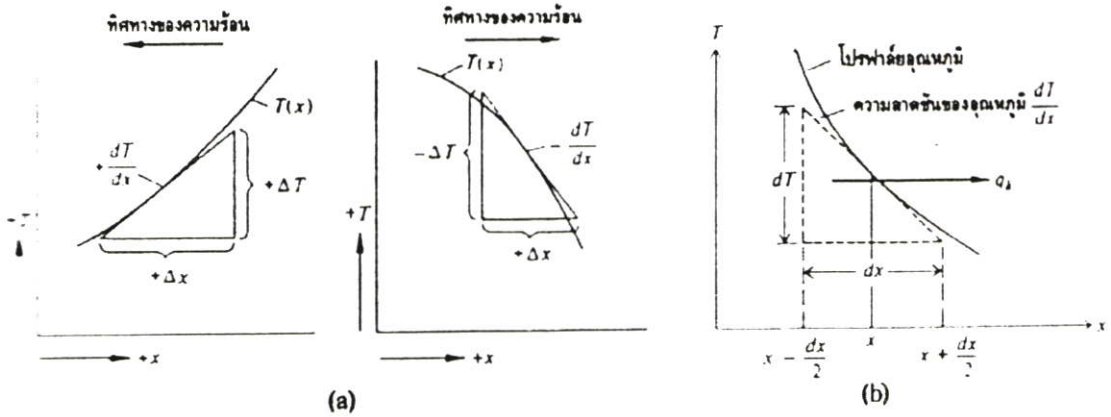
$$q_k \propto A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

เมื่อ q_k = อัตราการถ่ายเทความร้อน โดยนำ หรือการนำความร้อน
 A = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน
 T = อุณหภูมิ
 x = ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน

สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) k ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน ฉะนั้นอัตราการนำความร้อนจึงมีค่าเป็น

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

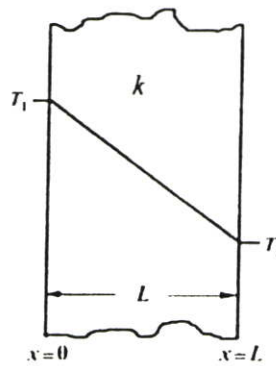
สมการ(3.2)นี้มีชื่อเรียกว่า กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction) เครื่องหมายลบที่อยู่ทางด้านขวามือของสมการเป็นผลที่เนื่องมาจากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดไว้ว่า ความร้อนจะต้องไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมิที่อยู่ในรูปที่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



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

3.1.1.1 การนำความร้อนในผนังราบ (Plane wall)

ให้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนที่ไหลผ่านผนังราบเมื่อผิวมีอุณหภูมิคงที่และมีขนาดสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวดังรูปที่ 3.2 เนื่องจากผิวทั้งสองมอุณหภูมิที่แตกต่างกันดังนั้นจึงมีความร้อนไหลจากผิวที่มีอุณหภูมิสูงไปยังผิวที่มีอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 3.2 แสดงการนำความร้อนผ่านผนังราบที่มีค่าการนำความร้อน k คงที่

ถ้าหากค่าการนำความร้อน k ของผนังมีค่าคงที่แล้ว เมื่อแทนค่า k นี้ลงในสมการ (3.2) แล้วอินทิเกรต ก็จะได้อัตราการนำความร้อนเป็น

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

- เมื่อ q_k = อัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนัง, Watt
 k = ค่าการนำความร้อนของผนัง, W/m.K
 A = พื้นที่ของผนังที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน, m^2
 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
 k_0 = ค่าการนำความร้อนของอุณหภูมิที่อ้างอิงถึง
 β = ค่าคงที่จากการทดลอง
 T = อุณหภูมิใด ๆ

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

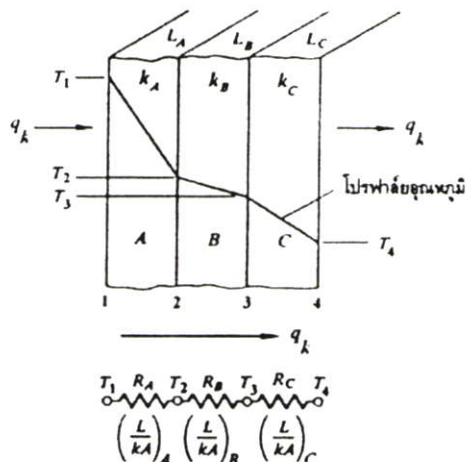
$$q_k = \frac{k_0 A}{L} \left[(T_1 - T_2) + \frac{\beta}{2} (T_1^2 - T_2^2) \right] \quad (3.5)$$

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)

ถ้าหากความร้อนไหลผ่านผนังที่เรียงซ้อนกันหลายชั้นโดยการนำ เช่น ผนังของอาคารบ้านเรือนแล้วการวิเคราะห์เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนก็จะยากยิ่งขึ้น ในกรณีที่สภาวะต่าง ๆ คงที่หรือไม่แปรตามเวลาแล้วนั้น อัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนังแต่ละชั้นจะมีขนาดเท่า ๆ กัน



รูปที่ 3.3 แสดงการนำความร้อนแบบมิติเดียวที่ไหลผ่านผนังหลายชั้น และการเปรียบเทียบกับวงจรไฟฟ้า

ความลาดชันของอุณหภูมิในผนังแต่ละชั้นมีค่าแตกต่างกัน ในกรณีนี้อัตราการนำความร้อนที่ไหลผ่านผนังแต่ละชั้นของรูปที่ 3.3 จะมีค่าเป็น

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

เมื่อ T_2 และ T_3 ออกจากสมการ (3.7) แล้วก็จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อน

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

สำหรับในกรณีที่ผนังเรียงซ้อนกันถึง n ชั้น และแต่ละชั้นสัมผัสกันเต็มพื้นที่แล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ไหลผ่านผนังจำนวน n ชั้นก็จะมีค่าเป็น

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

- เมื่อ T_i = อุณหภูมิของผิวของผนังชั้นแรก
- T_{n+1} = อุณหภูมิผิวของชั้นที่ n

3.1.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน(Convection heat transfer)

เมื่อของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ก็จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างของไหลกับวัตถุ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือการพาความร้อน กระบวนการพาความร้อนดังกล่าวนี้เป็นปรากฏการณ์พื้น ๆ 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), $W/m^2 \cdot K$

A = พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล, m^2

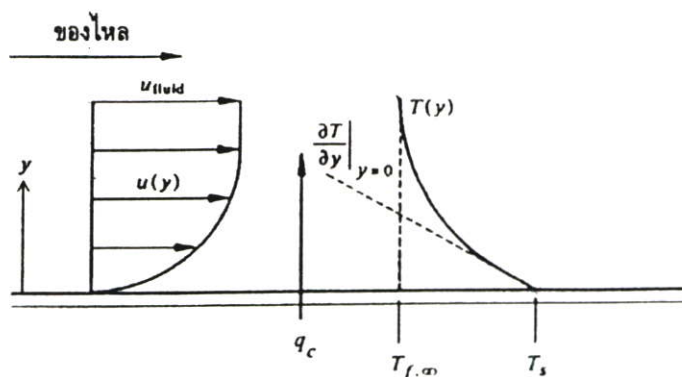
T_s = อุณหภูมิของผิววัตถุ, K

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

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

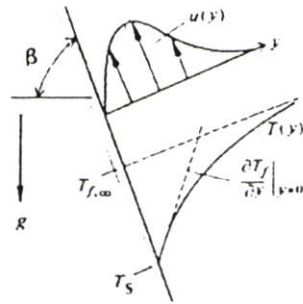
รูป 3.4 เป็นรูปของแผ่นวัตถุร้อนที่ถูกทำให้เย็นลงในอากาศที่ถูกบังคับให้ไหลผ่านไปบนแผ่นวัตถุ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและของอุณหภูมิอีกด้วย จุดที่น่าสนใจที่สุดก็คือความเร็ว $u(y)$ จะลดน้อยลงในทิศทางที่วิ่งเข้าสู่ผิวของแผ่นวัตถุด้วยผลกระทบของแรงจากความเสียดทาน ที่เนื่องมาจากความหนืดของของไหลและเนื่องจากของไหลชั้นที่อยู่ติดกับผิววัตถุนั้นมีความเร็วเป็นศูนย์ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ระหว่างผิววัตถุกับผิวของไหลนั้น ก็จะต้องเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ แต่เพียงอย่างเดียว นั่นก็คือ :

$$\frac{q_c}{A} = \dot{q}_c = -K_f \left. \frac{\partial T}{\partial Y} \right|_{y=0} = \bar{h}_c (T_s - T_{f,\infty}) \quad (3.11)$$



รูปที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิเหนือแผ่นวัตถุร้อนของการพาความร้อนแบบบังคับ

จากประเด็นดังกล่าวนี้เองจึงทำให้สามารถหาค่า $(dT/dy)|_{y=0}$ ที่ผิวของวัตถุได้ ทั้งนี้ก็โดยการให้อัตราการนำความร้อนระหว่างผิววัตถุกับชั้นของไหลที่เกาะติดอยู่กับผิววัตถุ มีค่าเท่ากับอัตราการพาความร้อนจากก้อนของไหลที่เกาะติดอยู่กับผิววัตถุ ไปยังก้อนของไหลหลักที่อยู่ห่างออกไป ของไหลที่มีความเร็วสูงจะมีผลทำให้ค่าความลาดชันของอุณหภูมิที่ผิววัตถุมีค่าสูงและทำให้อัตราการนำความร้อนมีค่าสูงตามไปด้วย ค่าการนำความร้อนของก้อนของไหลก็เช่นเดียวกันจะมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนด้วย เช่น ค่าการนำความร้อน k_f ของน้ำจะมีค่ามากกว่าค่า k_f ของอากาศ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อน \bar{h}_c ของน้ำก็จะมีค่าสูงกว่า \bar{h}_c ของอากาศ



รูปที่ 3.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิของของไหลบนแผ่นวัตถุเอียงร้อนของการพาความร้อนแบบอิสระ

การพาความร้อนแบบอิสระก็มีสภาพเช่นเดียวกับการพาความร้อนแบบบังคับ ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างการพาความร้อนแบบบังคับ กับแบบอิสระก็คือความเร็วของของไหลของการพาความร้อนแบบบังคับนั้นเกิดจากแรงภายนอก ส่วนความเร็วของของไหลของการพาความร้อนแบบอิสระนั้น ในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างที่วัดจากผิวของวัตถุ ทั้งนี้เพราะผลกระทบจากความหนืดที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความแตกต่างของความหนาแน่นก็ยังลดน้อยลง อย่างไรก็ตามโดยปกติแล้วแรงลอยตัวจะลดน้อยลงในขณะที่ความหนาแน่นของของไหลค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่รอบ ๆ เป็นผลให้ของไหลมีความเร็วสูงสุดและลดลงจนเป็นศูนย์เมื่อห่างออกไปจากผิวที่ร้อนนั้น สำหรับสนามอุณหภูมิของการพาความร้อนแบบบังคับและแบบอิสระนั้นจะมีรูปร่างคล้ายคลึงกันและทั้งคู่ต่างก็มีกลไกของการถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุ เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการพา

จากรายละเอียดที่ผ่านมาแสดงว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ความหนืด และความเร็วของของไหล รวมทั้งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางด้านความร้อนต่าง ๆ เช่น ค่าการนำความร้อน k และความร้อนจำเพาะ c_p ในการพาความร้อนแบบบังคับนั้นความเร็วของของไหลในระบบนั้นจะถูกกำหนดด้วยปั๊มหรือพัดลม แต่สำหรับความเร็วของของไหลที่ใช้พาความร้อนแบบอิสระนั้น จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผิววัตถุกับของไหล, สัมประสิทธิ์การขยายตัวของของไหลและสนามของแรง เช่น แรงดึงดูดของโลกเมื่อระบบนั้นอยู่บนพื้นโลก เป็นต้น

การถ่ายเทความร้อนโดยการพา นี้ ก็สามารถนำมาเปรียบเทียบกับกรไหลของกระแสไฟฟ้าได้เช่นเดียวกัน จากสมการ(2.10) นั้น ค่าความต้านทานความร้อนของการถ่ายเทความร้อนโดยการพาจะมีค่าเป็น :

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

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

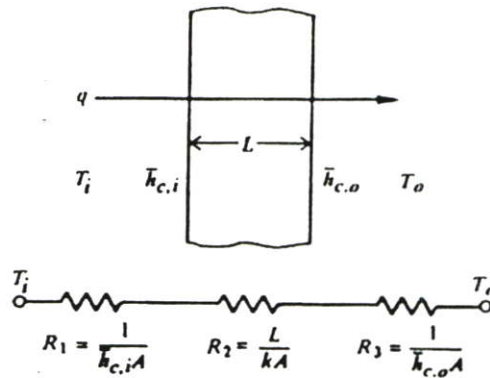
$$q = \frac{T_i - T_o}{\sum_{i=1}^3 R_i} = \frac{T_i - T_o}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3.13)$$

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 จะเคลื่อนที่ผ่านได้เฉพาะในกรณีที่มีวัตถุมาเป็นตัวกลาง (medium) เท่านั้น สำหรับความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้โดยไม่ต้องมีตัวกลางเลย เช่น ในบริเวณที่เป็นสุญญากาศเป็นต้น พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นจะเคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง ซึ่งมีความเร็วเท่ากับ 3×10^{10} cm/s พลังงานที่เคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีอยู่มากมายหลายชนิด เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีอินฟราเรด แต่สำหรับในที่นี้จะพิจารณาแต่เพียงพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีเท่านั้น

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

$$q_r = \sigma AT^4 \quad (3.14)$$

เมื่อ : q_r = อัตราความร้อนจากการแผ่รังสี, Watt
 A = พื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน, m^2
 T = อุณหภูมิผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน, K
 σ = ค่าคงที่สเตฟาน – 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 ที่อัตราการแผ่รังความร้อนไม่ขึ้นอยู่กับสภาพของสิ่งแวดล้อมก็กลับปรากฏว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิของการแผ่รังสี ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุ 2 ชิ้น หรือมากกว่า 2 ชิ้น ที่กำลังแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งกันและกัน ถ้าวัตถุดำแผ่รังสีความร้อนไปยังวัตถุที่อยู่รอบ ๆ (Enclosure) และวัตถุที่อยู่รอบ ๆ ก็เป็นวัตถุดำ (สามารถดูดซึมพลังงานจากการแผ่รังสีที่มาตกกระทบได้หมด) ด้วยแล้วอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีของวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ T_1 ไปยังวัตถุที่อยู่รอบ ๆ ซึ่งอุณหภูมิเป็น T_2 ก็จะมีค่าเป็น:

$$q_r = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.15)$$

เมื่อ : T_1 = อุณหภูมิผิวของวัตถุดำ, K .
 T_2 = อุณหภูมิผิวของวัตถุที่อยู่รอบ ๆ (เป็นวัตถุดำด้วย)

วัตถุจริงจะไม่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้มากเท่ากับตัวแผ่รังสี ในจินตนาการที่เรียกว่า วัตถุดำแต่ละแผ่ได้น้อยกว่า แต่ถ้าหากที่อุณหภูมิเท่า ๆ กันนั้นวัตถุจริงสามารถแผ่รังสีความร้อนในอัตราส่วนที่คงที่กับวัตถุดำได้ทุกความยาวคลื่นแล้ว วัตถุจริงนั้นก็จะมีชื่อเรียกว่า วัตถุเทา ซึ่งจะแผ่รังสีความร้อนในอัตรา :

$$q_r = \sigma \epsilon AT^4 \quad (3.16)$$

ส่วนอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีของวัตถุเทาที่อุณหภูมิเป็น T_1 ไปยังวัตถุที่อยู่รอบ ๆ และมีอุณหภูมิเป็น T_2 จะมีค่าเป็น:

$$q_r = \sigma \epsilon_1 A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.17)$$

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

สำหรับในกรณีที่วัตถุทั้งสองต่างก็ไม่ใช่วัตถุที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้สูงสุดดังที่มีชื่อว่าวัตถุดำ และถ้าวัตถุทั้งสองจ้าวก็มีความสัมพันธ์ทางด้านรูปร่างซึ่งกันและกันแล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีระหว่างวัตถุทั้งสองก็จะมีค่าเป็น

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

เมื่อ : $\mathfrak{F}_{1-2} =$ โมดูลัสที่ใช้ดัดแปลงสมการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำเพื่อใช้หาอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุจริงที่คิดค่าการแผ่รังสีและความสัมพันธ์ทางด้านรูปร่างรวมเข้าไปด้วย

ปัญหาในงานทางด้านวิศวกรรมเป็นจำนวนมาก ที่มีการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นพร้อม 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

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

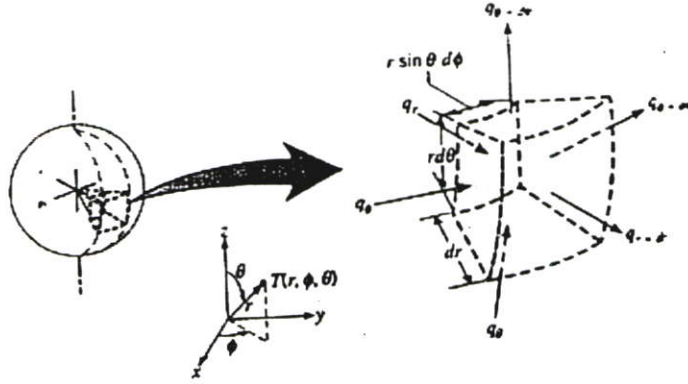
และสามารถให้ค่านิยามของค่าหนึ่งการนำจากการแผ่รังสีความร้อน h_r ว่า :

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

เมื่อ : $T_2' =$ อุณหภูมิที่เลือกตามสมการของการพาความร้อน

3.1.4 การนำความร้อนในพิกัดทรงกลม

สำหรับการนำความร้อนในพิกัดทรงกลม (r, ϕ, θ) จากรูปที่ 3.7 พิจารณาบนปริมาตรควบคุมขนาด $dr, r \sin \theta, rd\theta$ จะได้สมการนำความร้อนดังนี้



รูปที่ 3.7 แสดงการนำความร้อนตัวกลางพิกัดทรงกลม (r, θ, ϕ)

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

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

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

ในกรณี k เป็นค่าคงที่ จะได้

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

3.2 แก๊สเชื้อเพลิง [21]

แก๊สเชื้อเพลิงหลักคือ แก๊สธรรมชาติและแก๊สปิโตรเลียมเหลว นอกจากนี้ยังมีแก๊สเชื้อเพลิงยังสามารถผลิตได้จาก ถ่านหิน ไม้ แก๊สธรรมชาติ และปิโตรเลียมอีกด้วย

3.2.1 ชนิดของแก๊สเชื้อเพลิง

แก๊สเชื้อเพลิงที่สำคัญและนิยมใช้กันมากในปัจจุบันมีดังนี้

แก๊สธรรมชาติมักถูกพบบ่อยๆ ในบริเวณใกล้ๆ หรือเหนือแหล่งน้ำมันในบริเวณหินพรุนและถูกอัดด้วยความดันสูงอยู่ใต้ดิน แก๊สธรรมชาติคือส่วนผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ เช่น มีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทน และเพนเทน เป็นต้น โดยจะมีเทนเป็นหลัก ไฮโดรคาร์บอนส่วนที่เหลือมีเป็นส่วนน้อย ในบางครั้งก็มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนปนอยู่ด้วย การนำแก๊สธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ทำได้โดยการอัดและหล่อเย็นจนกระทั่งสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวหนักๆ กลายเป็นของเหลวจากนั้นจึงแยกแก๊สธรรมชาติแห่งความดันสูงส่งไปตามท่อเพื่อใช้งานต่อไป ในบางแหล่งแก๊สธรรมชาติจะถูกทำให้เย็นที่อุณหภูมิ -164°C จนกลายเป็นของเหลว (liquefied natural gas, L.N.G) แล้วขนส่งลงทางเรือต่อไป

แก๊สปิโตรเลียมเหลว(liquefied petroleum gas, L.P.G) ผลิตจากแก๊สธรรมชาติในโรงแยกแก๊สมีส่วนประกอบหลักคือ อีเทน โพรเพน และบิวเทน นอกจากนั้น L.P.G ยังรวมถึงแก๊สเหลวที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบในโรงกลั่นน้ำมัน เช่น เอทิลีน โพรพิลีน และ บิวทิลีน เป็นต้น การขนส่งแก๊ส L.P.G ทำได้โดยการบรรจุใส่ถังภายใต้ความดันและL.P.G จะกลายเป็นไอภายใต้บรรยากาศปกติ

โพรคิวเซอร์แก๊ส (producer) คือแก๊สที่ผลิตโดยปล่อยอากาศในปริมาณที่น้อยกว่าค่าทางทฤษฎี (austiochiometric gas) ผ่านชั้นร้อนของ ถ่านหิน พืด ไม้ หรือของเหลือทางด้านเกษตร ส่วนประกอบหลักของโพรคิวเซอร์แก๊สคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน (มากถึง 55 %) และคาบอนไดออกไซด์ในปริมาณน้อย การนำไปใช้งานอาจนำไปใช้ได้ทันทีที่ผลิตได้ ขณะที่ยังร้อนอยู่หรือนำไปฟอกให้สะอาดเพื่อกำจัดน้ำมันดิบและเขม่าออกเสียก่อน อย่างไรก็ตามโพรคิวเซอร์แก๊สมีค่าความร้อนต่ำเนื่องจากมีแก๊สไนโตรเจนปนอยู่มากดังนั้นถ้าต้องการให้ค่าความร้อนสูงขึ้นต้องใช้แก๊สออกซิเจนในปริมาณน้อยกว่าค่าทางทฤษฎีแทนอากาศในการผลิต

3.2.2 คุณสมบัติของแก๊ส LPG

คุณสมบัติทางเคมี

คุณสมบัติทางเคมีของแก๊ส LPG หมายความรวมถึงแก๊สไฮโดรเจนที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนในระดับ C3 และ C4 ซึ่งในระบบนี้ไฮโดรคาร์บอนจะสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวได้ ภายใต้ความดันที่ไม่สูงมากนัก ที่อุณหภูมิปกติไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้ประกอบด้วย

โพรเพน	Propane	C_3H_8
โพรพีลีน	Propylene	C_3H_6
บิวเทน	Butane	C_4H_{10}
บิวทีลีน	Butylene	C_4H_8

และมีสารประกอบที่ไม่ใช่ ไฮโดรคาร์บอนรวมอยู่บ้างเล็กน้อยเนื่องจากความหลากหลายของ ส่วนประกอบทำให้มีการตั้งมาตรฐานของแก๊ส LPG ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงให้แน่ชัดและเป็นข้อมูลในการออกแบบระบบให้ถูกต้องและปลอดภัย

อย่างไรก็ตาม C3 และ C4 ที่ปรากฏอยู่ในส่วนผสมของแก๊ส LPG อาจแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือพวก Saturated และ Unsaturated ซึ่งทั้งสองกลุ่มนี้ต่างกันตรงลักษณะการจับตัวของ คาร์บอนอะตอม

กลุ่ม Saturated hydrocarbon ได้แก่ Propane , N-Butane , iso-Butylene

กลุ่ม Unsaturated hydrocarbon ได้แก่ Propylene , N-Butylene, iso-Butylene

3.2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

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

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของ LPG สถานะของเหลว

	โพรเพน	นอร์มัลบิวเทน	ไอโซบิวเทน
น้ำหนักโมเลกุล	44.079	58.124	58.124
จุดเดือด (องศาเซลเซียส 1 บรรยากาศ)	42.045-	0.50-	11.72-
อุณหภูมิวิกฤต(องศาเซลเซียส)	96.67	152.03	134.99

เมื่อพิจารณาในสถานะก๊าซ ช่วงการลุกไหม้ แก๊สที่สันดาปได้จะมีช่วงส่วนผสมกับอากาศ เพียงช่วงเดียวที่จุดไฟแล้วลุกไหม้ได้ เพราะอากาศผสมอยู่ในปริมาณที่พอเหมาะช่วงการลุกไหม้ จะแสดงค่าเป็นร้อยละของปริมาตร แก๊สต่ออากาศ ค่าความเข้มข้นสูงสุดของการลุกไหม้เรียกว่าค่า ขอบบนส่วนทางด้านต่ำเรียกว่า ค่าขอบล่าง LPG ของผสมระหว่างโพรเพนกับบิวเทน โดยโพรเพน มีช่วงการลุกไหม้ 9.5-24% ในอากาศและบิวเทน มีช่วงการลุกไหม้ 8.4-1.8% ในอากาศถ้าส่วนผสม มากหรือน้อยกว่านี้จะไม่ติดไฟ

3.2.3 อุณหภูมิของการจุดติดไฟ

เมื่อค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิให้กับเชื้อเพลิงจนเลขอุณหภูมิค่าหนึ่ง แล้วแม้จะไม่มีประกายไฟหรือสาเหตุของการติดไฟ เชื้อเพลิงก็จะถูกไหม้เองตามธรรมชาติอุณหภูมิต่ำสุดที่เกิดการลุกไหม้ตามธรรมชาตินี้เรียกว่าอุณหภูมิการจุดติดไฟ ของโพรเพนคือ 580-460 องศาเซลเซียส ของบิวเทนคือ 50-540 องศาเซลเซียส

3.2.4 อุณหภูมิของเปลวไฟ

อุณหภูมิของเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ของแก๊สหุงต้มมีสูงมากพบที่หลอมละลายโลหะต่างๆ ได้เช่น เหล็กหล่อ ทองเหลือง อะลูมิเนียม และแก้วเป็นต้น โดยโพรเพนมีอุณหภูมิเปลวไฟในอากาศ 193 องศาเซลเซียส บิวเทน 1900 องศาเซลเซียส

3.2.5 อัตราส่วนปริมาตรของเหลวต่อแก๊ส

แก๊สหุงต้มเหลวเมื่ออยู่ในสถานะแก๊ส ปริมาตรจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากโดยโพรเพน 1 หน่วยปริมาตรเมื่อกลายเป็นแก๊สแล้วจะมีปริมาตรเป็น 2 หน่วยที่ 15.5 องศาเซลเซียส ส่วนบิวเทน 1 หน่วยปริมาตร เมื่อกลายเป็นแก๊สแล้วจะมีปริมาตรเป็น 233 หน่วยที่ 15.5 องศาเซลเซียส

3.2.6 ค่าความร้อนของการเผาไหม้

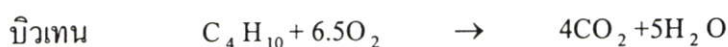
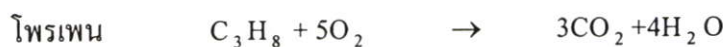
ค่าความร้อนของการเผาไหม้หมายถึง ปริมาณความร้อนที่เกิดจากการนำเอาแก๊ส LPG หนึ่งหน่วยน้ำหนัก หรือ 1 หน่วยปริมาตร มาทำการเผาไหม้ที่ความดันและอุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 3.2 ค่าความร้อนของการเผาไหม้แก๊ส LPG

ที่อุณหภูมิ 25 °C	โพรเพน	นอร์มัลบิวเทน	ไอโซบิวเทน
Gross :			
กิโลแคลอรี / กิโลกรัม	11943	11742	11714
บีทียู/ปอนด์	21497	21135	21085
กิโลแคลอรี/ลบ.เมตร	23700	30600	30500
บีทียู/ลบ.ฟุต	2663	3438	3427
Net :			
กิโลแคลอรี / กิโลกรัม	10989	10837	10810
บีทียู/ปอนด์	19780	19506	19458
กิโลแคลอรี/ลบ.เมตร	22250	29400	29200
บีทียู/ลบ.ฟุต	2500	3304	3281

3.2.7 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (Air Requirement)

แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สที่มีผสมอยู่ในอากาศ 21% โดยปริมาตรและเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้ ดังนั้นปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าไปในห้องเผาไหม้ จะต้องมีปริมาณที่แน่นอนในกรณีที่เกิด LPG เผาไหม้อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด ก็จะกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ การเปลี่ยนแปลงสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



ดังจะเป็นสมการเหล่านี้ ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะเป็น 5 เท่า ในกรณีของโพรเพนจะเป็น 6.5 เท่าในกรณีของบิวเทน เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในอากาศจะมีปริมาณ 21 % ฉะนั้นในการเผาไหม้โพรเพนอย่างสมบูรณ์ 1ลบ.เมตร จะต้องใช้อากาศ 24 ลบ.เมตร ส่วนบิวเทน 1 ลบ.เมตร จะต้องใช้อากาศ 31 ลบ.เมตร ดังนั้นเมื่อมีการเปรียบเทียบน้ำมันเบนซินแล้ว LPG ต้องการอากาศมากกว่าเล็กน้อย

3.2.8 สี กลิ่น ความเป็นพิษและการละลาย

LPG บริสุทธิ์จะไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ดังนั้นบริษัทผู้ผลิตจึงต้องเติมสารประกอบที่มีกลิ่นเหม็นลงไปด้วยเพื่อให้ผู้ใช้รู้เมื่อเกิดการรั่วเกิดขึ้น สารประกอบที่ใส่ลงไปจะเป็น เมอร์แคปแทน (Mercaptan)แก๊ส LPG เป็นแก๊สที่ไม่มีพิษแต่ในกรณีเกิดการสันดาปอย่างไม่สมบูรณ์จะเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้เช่นกัน เนื่องจาก LPG ไม่มีสารพิษร้ายแรง (Mercaptan) เช่น Tetraethyl Lead ซึ่งจะมีอยู่ในน้ำมันเบนซิน ฉะนั้นแก๊สเสี่ยของ LPG จึงสะอาดเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ของน้ำมันเบนซิน

นอกจากนั้นแก๊ส LPG มีคุณสมบัติตัวทำละลายเช่นเดียวกับพวกน้ำมันระเหยจึงสามารถทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำมาจากยางธรรมชาติเสียดคุณสมบัติได้ เช่น ปะเก็น หรือ ซีลต่างๆ ดังนั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้กับถังที่บรรจุแก๊สธรรมชาติ ควรใช้วัสดุอื่นที่ไม่ทำมาจากยางธรรมชาติ เช่น ยางสังเคราะห์ เป็นต้น

3.3 คุณสมบัติของวัสดุพูน

วัสดุพูนที่นำมาทำการเลือกใช้ คือ เซรามิกที่มีส่วนผสมของอลูมิน่า เป็นส่วนประกอบ โดยนำมาทำการเรียงซ้อนกันในห้องเผาไหม้ วัสดุพูนมีคุณสมบัติคือ เป็นวัสดุที่มีพื้นผิวต่อปริมาตรสูงทนต่ออุณหภูมิได้สูง และมีบทบาทที่สำคัญต่อการเผาไหม้ คือเป็นตัวทำให้เกิดการหมุนเวียนพลังงานภายในระบบ โดยวัสดุพูนจะทำหน้าที่ดูดซับเอนทาลปีบางส่วนของแก๊สร้อนไว้และแผ่รังสีความร้อนออกมาที่กระแสนของการเผาไหม้ (Upstream) และเนื่องจากวัสดุพูนมีพื้นที่ในการสัมผัสกับของไหลสูงหรืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงมีประสิทธิภาพสูงซึ่ง ปัจจุบันวัสดุพูนถูกผลิตในรูปแบบต่างๆ กันเนื่องมาจากมีผู้ใช้

เพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้เป็นจำนวนมากอีกทั้งยังมีแนวโน้มในการนำวัสดุพูนไปใช้กับอุปกรณ์ให้ความร้อนอื่นๆ

3.3.1 หลักการถ่ายเทความร้อนของวัสดุพูน

วัสดุพูนเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ทนอุณหภูมิได้สูงและมีบทบาทที่สำคัญในการเผาไหม้คือเป็นตัวทำให้เกิดการหมุนเวียนพลังงาน (Energy Recirculation) ในระบบโดยวัสดุพูนจะทำหน้าที่ดูดซับเอนทาลปีบางส่วนจากแก๊สร้อน (Hot Product) ไว้แล้วแผ่รังสีความร้อนออกมาทางด้าน Upstream และเนื่องจากวัสดุพูนมีพื้นที่ในการสัมผัสกับของไหลสูงหรือมีอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูง (Surface Area to Volume Ratio) สูง ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งปัจจุบันวัสดุพูนได้ถูกผลิตขึ้นมาในรูปแบบต่างๆกัน เนื่องจากมีผู้สนใจมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพของหัวเผา (Burner) เป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังมีแนวโน้มที่นำวัสดุไปใช้กับอุปกรณ์ความร้อนอื่นเช่นเครื่องยนต์ความร้อน (Heat Engine) อุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภาพสูง แสดงหลักการทำงานวัสดุพูนมีดังนี้คือ เมื่อแก๊สร้อนจากการเผาไหม้ไหลผ่านวัสดุพูน วัสดุพูนจะทำหน้าที่ดูดซับ เอนทาลปีส่วนหนึ่งจากแก๊สร้อนเอาไว้และแผ่รังสีความร้อนส่วนใหญ่ไปยังวัสดุพูนบริเวณ Upstream ดังนั้นเมื่ออากาศและเชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิต่ำไหลผ่านก็จะได้รับความร้อนที่วัสดุพูนดูดซับไว้ทำให้อากาศและเชื้อเพลิงมีค่าเอนทาลปีสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากหลังการดังกล่าวทำให้ระบบการเผาไหม้ภายใต้การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพูนมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงและประหยัดเชื้อเพลิงที่ป้อนให้กับระบบการเผาไหม้

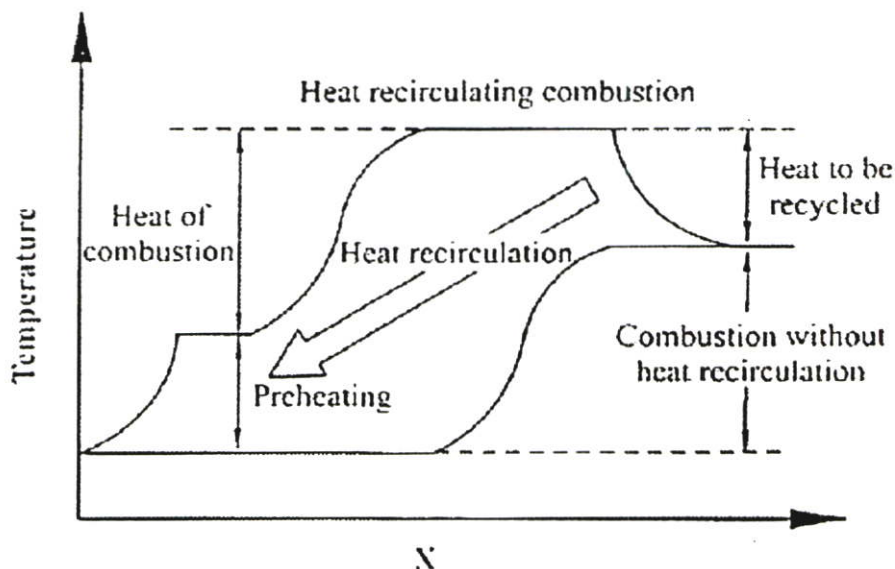
เตาเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวที่มีการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนโดยใช้หลักการหมุนเวียนพลังงานในระบบด้วยการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพูนนั้น เมื่อแก๊สร้อนจากการเผาไหม้ผ่านวัสดุพูน วัสดุพูนจะทำหน้าที่ดูดซับเอนทาลปี ส่วนหนึ่งจากแก๊สร้อนไว้แล้วแผ่รังสีความร้อนส่วนใหญ่ไปยังวัสดุพูนด้านกระแสนของการเผาไหม้ (Upstream) ดังนั้นเมื่ออากาศและเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่ำ ไหลผ่านก็จะได้รับความร้อนที่วัสดุพูนรับเอาไว้ทำให้อากาศและเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากหลักการดังกล่าวทำให้ระบบการเผาไหม้ภายใต้การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพูนมีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงและเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงที่นำมาใช้งาน

3.3.2 การเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน (Heat Recirculating Combustion)

ระบบการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน (Heat Recirculating Combustion) เป็นระบบการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูง ประหยัดพลังงาน ปล่อย CO ต่ำ ทำให้ปัจจุบันมีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากระบบดังกล่าวเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานแล้วมีประโยชน์อย่างมากเพราะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ เพิ่มความเข้มการเผาไหม้ และประหยัดพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในงานวิจัยกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดย

วัสดุพอรุนแบบสลับทิศทางการไหลอย่างป็นจังหวะก็ได้อาศัยหลักการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อนดังที่จะได้กล่าวต่อไป

3.3.3 หลักการทำงานการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน

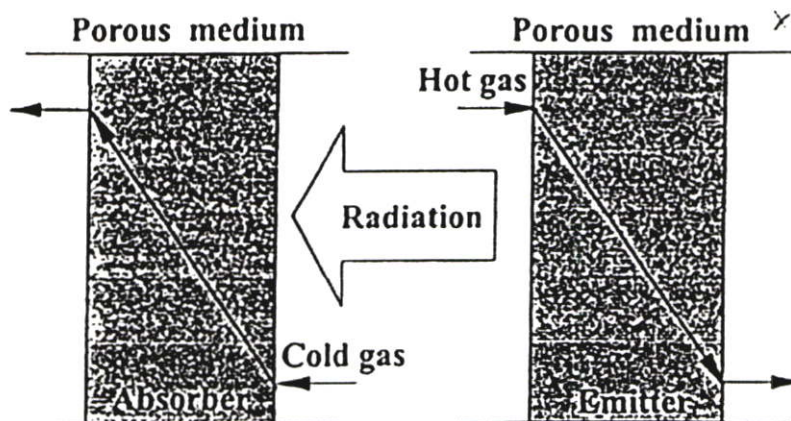


รูปที่ 3.8 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผาไหม้ชนิดที่มีและไม่มี การหมุนเวียนความร้อน

รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบหลักการทำงานระหว่างระบบที่มีและไม่มี การหมุนเวียนความร้อน ขณะที่ยังไม่มี การความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง เมื่อใช้ปริมาณเชื้อเพลิงเท่ากันพบว่าระบบที่ไม่มี การหมุนเวียนความร้อน เมื่อไอดีไหลเข้าทางด้านซ้ายมือและมีการเผาไหม้เกิดขึ้น อุณหภูมิการเผาไหม้ จะสูงอยู่ในระดับหนึ่ง แก๊สไอเสียที่เกิดขึ้นในระบบก็จะไหลออกทางด้านขวา โดยความร้อนจาก แก๊สไอเสียไม่ได้ถูกกักเก็บไว้ใช้ประโยชน์ และเมื่อนำมาทำการเปรียบเทียบกับเส้นบน ซึ่งแสดง ระบบที่มีการหมุนเวียนความร้อนจากแก๊สไอเสียมาทำการอุ่นไอดี ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น แต่อุณหภูมิสุดท้ายที่ทางออกยังคงเท่าเดิมเหมือนกับกรณีที่ไม่มี การหมุนเวียนความร้อนเพราะต้อง หมุนเวียนความร้อนเพราะต้องหมุนเวียนความร้อนจากแก๊สไอเสีย มาทำการอุ่นไอดีอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้ระบบที่มีการหมุนเวียนความร้อนจะให้อุณหภูมิการเผาไหม้ และอัตราการเผาไหม้ที่สูง กว่าระบบที่ไม่มี การหมุนเวียนความร้อน เมื่อทำการเปรียบเทียบในกรณีอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ เท่ากัน พบว่าปริมาณเชื้อเพลิงซึ่งใช้ใน ระบบที่มีการหมุนเวียนความร้อนจะน้อยกว่าระบบที่ไม่มี การหมุนเวียนความร้อนจึงประหยัดพลังงานได้มาก นอกจากนี้ ระบบการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียน ความร้อนยังทำให้ได้ค่าความเร็วในการเผาไหม้ (Burning Velocity) และความเข้มในการเผาไหม้ สูง (High Combustion Intensity) [14]ทำให้สามารถออกแบบให้เตาเผาไหม้ที่มีขนาดเล็กกะทัดรัด ทั้งยังช่วยขยายขอบเขตการเผาไหม้ (Flammability Limits) ให้กว้างขึ้นเหมาะแก่การนำไปเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่มีความร้อนน้อย ๆ ที่ไม่สามารถทำการเผาไหม้ในระบบปกติได้

3.3.4 การหมุนเวียนความร้อนโดยการเปลี่ยนรูปความร้อนระหว่างการพาความร้อนและแผ่รังสีความร้อนในวัสดุพรุน

วัสดุพรุนเป็นวัสดุที่มีพื้นผิวต่อปริมาตรสูง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อนสูง และทนต่อสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงๆ ได้ คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุพรุนคือ สามารถที่จะเปลี่ยนพลังงานกลับไปกลับมาระหว่างเอนทัลปีของแก๊สและการแผ่รังสีความร้อนได้ เนื่องจากวัสดุพรุนมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมาก (Surface Area to Volume Ratio) ดังนั้นในการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นไปได้ว่ามีประสิทธิภาพ จึงถือได้ว่าวัสดุพรุนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีหลักการทำงานดังนี้คือ เมื่อแก๊สร้อนไหลผ่านวัสดุพรุนอันขวดั่งแสดงในรูปที่ 3.9 วัสดุพรุนดังกล่าวจึงทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนเอนทัลปีของแก๊สร้อนเอาไว้ส่วนหนึ่งแล้วเมื่อเปลี่ยนพลังงานส่วนที่ดูดกลืนมานี้ไปเป็นการแผ่รังสีความร้อนซึ่งเรียกลักษณะเช่นนี้ว่าเป็นตัวแผ่รังสี (Emitter) แผ่รังสีสวนทางกับการไหลของแก๊สร้อนมายังวัสดุพรุนอีกด้านหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสี (Absorber) ดังนั้นอากาศร้อนที่ไหลผ่านตัวแผ่รังสีจะมีอุณหภูมิลดลง เมะเมื่อมีอากาศเย็นไหลผ่านตัวรับรังสีอากาศเย็นที่ดูดความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้ทำให้อากาศมีค่าเอนทัลปีและอุณหภูมิสูงขึ้น จากหลักการดังกล่าวถ้านำตัวแผ่รังสีและตัวรับรังสีมาอยู่ติดกัน แล้วไอเสียซึ่งมีอุณหภูมิสูงที่เกิดการเผาไหม้ไหลผ่านวัสดุพรุนตัวที่ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสีแล้วอากาศเย็นที่ใช้ในการเผาไหม้ไหลผ่านวัสดุพรุนที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสี ซึ่งส่งผลให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนจากไอเสียมาสู่อากาศเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยวัสดุพรุนเป็นตัวกลาง (ดูรูปที่ 3.8 ประกอบ) คาดว่าระบบดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากผลของการ อุ่นอากาศ (Preheat) ที่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งนี้ยังทำให้ได้ค่าความเร็วในการเผาไหม้ (Burning Velocity) และให้ความเข้มของการเผาไหม้สูง (High Combustion Intensity) ทำให้ออกแบบให้เตาเผาไหม้มีขนาดกะทัดรัด นอกจากนี้ยังช่วยขยายขอบเขตการเผาไหม้ได้ (Flammability Limits) กว้างขึ้น



รูปที่ 3.9 แสดงหลักการการทำงานของวัสดุพรุน

3.3.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่า Preheat Air Temperature (T_p)

เมื่อวัสดุพูนถูกทำให้ร้อนโดยได้รับความร้อนจากแก๊สร้อน ที่เกิดจากการเผาไหม้ เมื่อสลับทิศทางการไหลของอากาศ วัสดุพูนจะถ่ายเทความร้อนสู่อากาศทำให้อุณหภูมิวัสดุพูนลดลงตามเวลา สมมติให้พิจารณาวัสดุพูนเป็นก้อน (Lump) จะสามารถหาอุณหภูมิที่ลดลงของวัสดุพูนนี้ได้จากทฤษฎีต่อไปนี้

สมการ ความร้อน(q) จากวัสดุพูนถ่ายเทให้กับอากาศโดยการพาความร้อน

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

ความร้อนที่วัสดุพูนได้รับจากอากาศ เมื่อพิจารณาเป็น one dimensional, unsteady heat transfer

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

จากสมการ 3.26 และ 3.27 ความร้อนที่อากาศให้กับวัสดุพูนเท่ากับความร้อนที่วัสดุพูนได้รับจะได้

$$-\frac{dT_s}{T_s - T_\infty} = \frac{hv}{mc_p} dt \quad (3.28)$$

Integrate สมการ 3.28 จะได้

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

จากสมการ 3.29 สามารถหาค่าความร้อนของวัสดุพูน, T_s ได้ ซึ่งต้องทราบค่าตัวแปรอื่นๆ ดังได้แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก จ และเมื่อนำค่า T_s แทนลงในสมการ 3.27 ก็จะได้ค่าความร้อน, q ที่วัสดุพูนได้รับเช่นกัน จากนั้นก็สามารถหาค่าความร้อนรวมทั้งหมดที่วัสดุพูนได้รับโดยการพา, Q_{conv} จากไอเสียร้อนในระยะเวลาในแต่ละช่วง Half Period, t_{hp} ได้จากสมการ

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

ความร้อนจากวัสดุพูน (Q_{conv}) ส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปกับการทำให้เชื้อเพลิงเหลวระเหยกลายเป็นไออย่างสมบูรณ์ที่ 250°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

$$T_{pre} = T_{\infty} + \frac{Q}{\dot{m} \cdot t_{hp} \cdot c_p} \quad (3.33)$$

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)
3. การเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส (Gaseous fuel combustion)

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะเน้นไปทางการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเป็นหลักดังนั้นจึงจะนำเสนอเฉพาะการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเท่านั้น ทั้งนี้หลักการของการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นของธาตุต่าง ๆ ในการเผาไหม้ทั้งสามแบบไม่แตกต่างกัน

3.4.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion reaction)

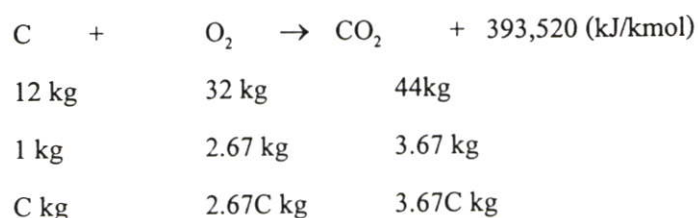
ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Oxidation) ระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ในเชื้อเพลิง (C H N O S) กับออกซิเจนในอากาศได้ผลผลิต (product) จากการเผาไหม้ในรูปของแก๊สเผาไหม้ และความร้อนออกมาดังแสดงในสมการ



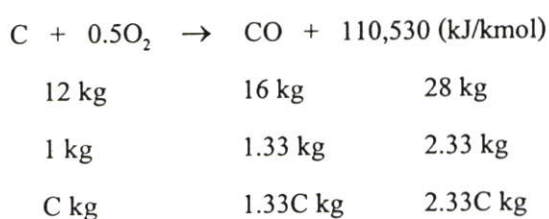
ในกระบวนการเผาไหม้ สารที่เข้าทำปฏิกิริยาเผาไหม้เรียกว่า Reactant หรือ ตัวทำปฏิกิริยา ได้แก่ เชื้อเพลิงและอากาศ สารหรือองค์ประกอบหลังการเผาไหม้ เรียก Product หรือ

ผลผลิต ได้แก่ แก๊สเผาไหม้ โดยในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ของธาตุต่าง ๆ จะเป็นไปดังสมการต่อไปนี้

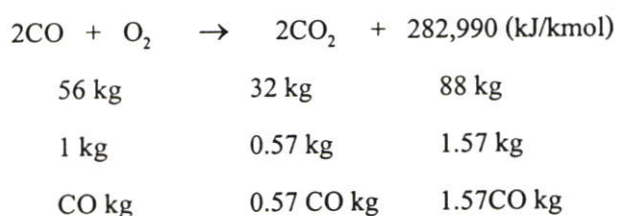
คาร์บอนเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



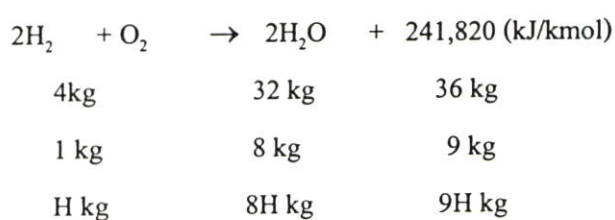
คาร์บอนเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์



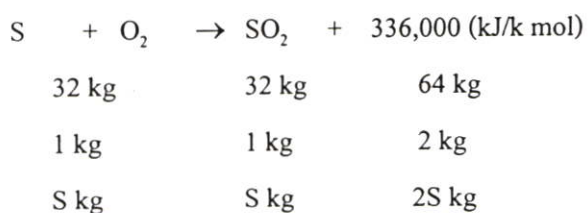
แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของไฮโดรเจนได้น้ำ



การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของกำมะถันได้แก๊สกำมะถัน



3.4.3 ปริมาณอากาศทางทฤษฎี อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงและอากาศส่วนเกิน

จากปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงข้างต้นพบว่าสิ่งสำคัญที่จะก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้เป็นอันดับแรกคือ ปริมาณอากาศที่เพียงพอ และมีปัจจัยที่ส่งผลให้การเผาไหม้ดีขึ้น ซึ่งเรียกสั้น ๆ ว่าปัจจัย 3T (Time Temperature และ Turbulence) ดังนั้นในการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ จำเป็นต้องทราบปริมาณอากาศที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทางทฤษฎี (Theoretical air) ซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะใช้ปริมาณอากาศต่อปริมาณเชื้อเพลิง (Air to Fuel Ratio; A/F) ในการเผาไหม้ทางทฤษฎีแตกต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงจริงอาจมีค่ามากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีเพราะในทางปฏิบัติหากจ่ายปริมาณอากาศเท่ากับทฤษฎีพบว่ามีโอกาสน้อยมากที่ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้อย่างสมบูรณ์หรืออาจต้องใช้ระยะเวลาานมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจ่ายอากาศในปริมาณที่มากกว่าทฤษฎีซึ่งเรียกว่าปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess air) สำหรับผลกระทบของปริมาณอากาศหรืออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่มีต่อการเผาไหม้มีดังนี้

3.4.3.1 ถ้าปริมาณอากาศน้อยกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี หรือ A/F น้อยกว่า A/F ทางทฤษฎีการเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์ได้รับความร้อนน้อย และก่อให้เกิดมลพิษ (มี CO เกิดขึ้น)

3.4.3.2 ถ้าให้ปริมาณอากาศมากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีหรือ A/F มากกว่า A/F ทางทฤษฎี จะทำให้โอกาสที่จะเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์มีความเป็นไปได้มากขึ้น ทั้งนี้หากทำการจ่ายปริมาณอากาศมากเกินไปจะส่งให้ความร้อนส่วนหนึ่งที่ได้จากการเผาไหม้สูญเสียไปกับการทำให้ O_2 และ N_2 ที่เหลือจากการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้น

3.4.4 การหาปริมาณอากาศเพื่อเผาไหม้ทางทฤษฎี (Determination of theoretical air)

ในการหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ สามารถทำได้ใน 2 ลักษณะคือ

- การทำสมดุลเคมีของสมการการเผาไหม้
- การคำนวณปริมาณออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยาสำหรับเชื้อเพลิงแข็งและเหลว

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีหลังเพราะจะทำให้เข้าใจพื้นฐานของสมการการเผาไหม้ได้ดี และนิยมใช้กับกรณีที่เป็นเชื้อเพลิงแข็งซึ่งตรงกับการศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยในการหาปริมาณอากาศในการเผาไหม้จำเป็นต้องทราบข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงโดยละเอียดหรือแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ซึ่งจะได้ว่า

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

จากนั้นทำการหาปริมาณ O_2 ที่เข้าทำปฏิกิริยากับธาตุ C, H และ S จากสมการการเผาไหม้พื้นฐานตามสมการที่ (2.37), (2.40) และ (2.41) ตามลำดับ

ซึ่งจะได้ว่า 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}

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

3.4.5 การหาปริมาณอากาศส่วนเกิน (Determination of excess air)

สำหรับการหาปริมาณอากาศส่วนเกินนั้นสามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกันคือ

- การวัดปริมาณอากาศที่เข้าไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้จริง (A/F_{ac})

- การวัดปริมาณออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ที่ทางออกของเตาเผาไหม้แล้วมา

คำนวณย้อนกลับไปเป็นปริมาณอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งจะพิจารณาว่าอากาศส่วนนี้เป็นอากาศที่จ่ายเข้าไปเกินความต้องการ โดยทั่วกรบอกรปริมาณอากาศส่วนเกินนิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ในสองลักษณะคือ เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (% Excess air) และเปอร์เซ็นต์ของอากาศทางทฤษฎี (% Theoretical air) ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน} = \left(\frac{\frac{A/F_{ac}}{A/F_{th}} - \frac{A/F_{th}}{A/F_{th}}}{\frac{A/F_{th}}{A/F_{th}}} \right) \times 100\% \quad (3.34)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎี} = \left(\frac{\frac{A/F_{ac}}{A/F_{th}}}{\frac{A/F_{th}}{A/F_{th}}} \right) \times 100\% \quad (3.35)$$

3.5 เทคนิคการเผาไหม้แบบเป็นขั้นตอน (Staged-combustion technique)

เทคนิคการเผาไหม้แบบแบ่งเป็นขั้นตอนเป็นเทคนิคการเผาไหม้ที่ควบคุมการเกิดมลพิษ โดยการควบคุมการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนในลักษณะที่ป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ในสภาวะสตอยคิโอเมตรี การผสมอาจเป็นไปในลักษณะที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ภายใต้ค่าอัตราส่วนสมมูลที่แตกต่างกันหลายค่าจากไอดิบลงไปหาไอดีหนาหรือกลับกันก็ได้ต้องไม่ให้เกิดการเผาไหม้สภาวะสตอยคิโอเมตรี อย่างเด็ดขาด เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ดังกล่าว จึงต้องแบ่งอากาศออกเป็นหลายๆส่วน(หรือต้องการทำให้เชื้อเพลิงขาดอากาศ) แล้วป้อนเข้าสู่

เผาไหม้เพื่อเผาไหม้กับเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆกัน จึงเกิดการเผาไหม้แบบแบ่งเป็นหลายขั้นตอนขึ้นในห้องเผาไหม้และเพื่อควบคุมการเกิด thermal NO_x เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น อาจมีการดึงความร้อนออกจากแก๊สร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ในขั้นตอนปฐมภูมิ (Primary combustion) เพื่อลดอุณหภูมิลงก่อนที่จะเผาไหม้ในขั้นตอนทุติยภูมิ (Secondary combustion) การเผาไหม้แบบสองขั้นนี้จะช่วยให้พื้นที่เผาของเปลวไฟ(Flame zone) ถูกขยายออกไป และลดอุณหภูมิสูงสุด (peak temperature) ของการเผาไหม้ ทำให้ลดปริมาณ NO_x ได้ นอกจากนี้การเผาไหม้เป็นขั้นตอนหรือการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิยังทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากขึ้น เนื่องจากในห้องเผาไหม้ทุติยภูมิยังคงเหลือแก๊สหรืออนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดในห้องเผาไหม้ขั้นแรก

3.6 การปล่อยมลพิษ (Emission)

3.6.1 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)

การก่อตัวของ NO_x ในกระบวนการการเผาไหม้มีกลไกของการก่อตัวอยู่ดังต่อไปนี้

- **Thermal NO_x** มีอิทธิพลมาจากอุณหภูมิการเผาไหม้ หรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนั้นถ้าต้องการลด Thermal NO_x จึงต้องลดอุณหภูมิการเผาไหม้

- **Prompt NO_x** เกิดจากอนุมูลอิสระ พวกไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการเผาไหม้ใน ส่วนแรกของการเผาไหม้ (Early stages) ของการเผาไหม้กับโมเลกุลของไนโตรเจน

- **Fuel NO** เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของอากาศกับไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเป็นกลไกของการเกิด NO ซึ่งขึ้นกับสภาวะการทำงานเช่นสภาวะการเผาไหม้แบบส่วนผสมเชื้อเพลิงหนาหรือแบบส่วนผสมเชื้อเพลิงบาง ถ้าเป็นการเผาไหม้แบบส่วนผสมเชื้อเพลิงบาง จะทำให้มีโอกาสเกิด Fuel NO ได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงต้องควบคุมอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงต่อออกซิเจนให้ดี

3.6.2 มลพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์

มลพิษจาก CO จากระบบการเผาไหม้เป็นการสูญเสียประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ หากการเผาไหม้ก่อนข้างมีอุณหภูมิสูง อาจทำให้ CO_2 เกิดการแยกสลายกลับมาเป็น CO ได้ หรือในขณะเดียวกันถ้าหากเชื้อเพลิงที่กำลังเผาไหม้มีเวลาน้อยเกินไปในห้องเผาไหม้ ไม่มีเวลามากพอที่จะ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างเต็มที่ จะทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็น CO_2 ได้เช่นกัน ดังสมการ



ดังนั้นเพื่อให้การเผาไหม้เป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. เวลาในการเผาไหม้ต้องนานเพียงพอ เพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด
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 ค่า คือ

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)

ค่าความร้อนขั้นต่ำคือค่าความร้อนของการเผาไหม้ที่กำหนดให้น้ำในผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของไอหรือน้ำเกิดเป็นผลอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์ โดยที่

$$LHV = HHV - m_w h_{fg} \quad (3.36)$$

$$LHV = HHV - 9m_{H_2} h_{fg} \quad (3.37)$$

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 ดัชนีประสิทธิภาพของเตาเผาไหม้

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

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

Q_{fuel} คือ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

$Q_{loss,HC}$ คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของไฮโดรคาร์บอน

$Q_{loss,co}$ 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

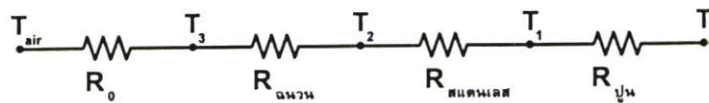
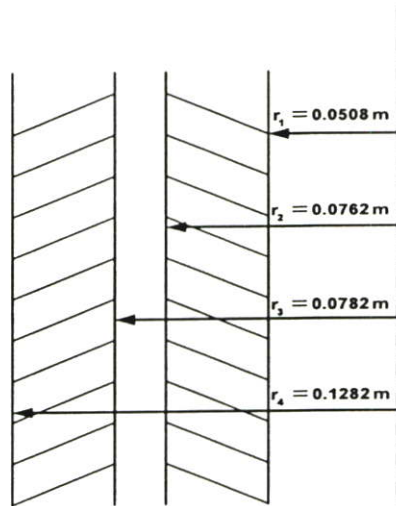
การประเมินความร้อนสูญเสียที่เปลือกและการกำหนดเงื่อนไข

การทดสอบเตาเผาไหม้วัสดุพูน

ในการทดสอบสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพูนในงานวิจัยนี้ ได้ทำการประเมินความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นบริเวณเปลือกเตาเผาไหม้วัสดุพูน เนื่องจากเป็นส่วนสำคัญในการติดตั้งเตาเผาไหม้วัสดุพูนเข้าไปในระบบของเซลล์เชื้อเพลิง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การคำนวณเพื่อประเมินความร้อนสูญเสียที่เปลือกเตาเผาไหม้วัสดุพูน

หาการถ่ายเทความร้อนแต่ละชั้นของผิว



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

$$R_{\text{ฉนวน}} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi Lk_2} = \frac{\ln(0.0782 / 3 \times 0.02541)}{2\pi \times (300 \times 10^3) \times 16.3}$$
$$= 8.43 \times 10^{-4} \frac{k}{w}$$

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

$$\begin{aligned}
 &= 0.98 \frac{k}{w} \\
 R_o &= \frac{1}{h_o A} = \frac{1}{20 \times \pi D_4 L} \\
 &= 0.207 \frac{k}{w} \\
 R_{\text{รวม}} &= R_o + R_{\text{ฉนวน}} + R_{\text{สแตนเลส}} + R_{\text{ปูน}} \\
 &= 0.207 + 0.98 + 8.43 \times 10^{-4} + 0.717 \\
 &= 0.9086 \\
 Q &= \frac{\Delta T}{R_{\text{total}}} = \frac{T_f - T_{\text{crib}}}{R_{\text{total}}} = \frac{(1100 + 273) - (30 + 273)}{1.9086} \\
 &Q = 560.62
 \end{aligned}$$

T_1 = ระหว่างปูนกับสแตนเลส

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

$$\begin{aligned}
 \text{หา } T_1 &\Rightarrow T_1 = T_f - (560 \times 0.217) \\
 &= 698^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{หา } T_2 &\Rightarrow T_2 = T_1 - QR_2 \\
 &= 697.5^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{หา } T_3 &= \Rightarrow T_3 = T_2 - QR_3 \\
 &= 137.9^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

4.2 การกำหนดเงื่อนไขการทดสอบเตาเผาไหม้วัสดุพอรุน

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ภายในเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนมีค่าอยู่ในช่วง

$$1.1 \leq \text{Excess-Air Ratio} \leq 1.8$$

$$\text{หรือ} \quad 1.1 \leq \left(\frac{A/F_{ac} - A/F_{stoi}}{A/F_{stoi}} \right) \leq 1.8$$

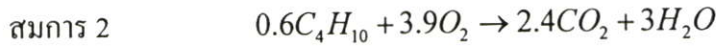
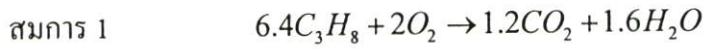
อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง Air-Fuel ratio

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

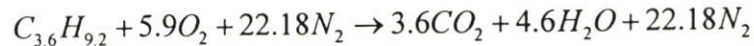
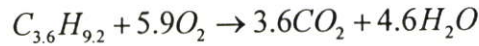
การหาปริมาณอากาศทางทฤษฎีของ LPG

LPG มี โพรเพน $C_3H_8 = 40\%$ โดยปริมาณ

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



นำสมการ 1+2



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

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

นำไปแทนในสูตร Air-Fuel ration

$$A/F_{stoi} = \frac{m_a}{m_f} = \frac{0.81}{0.052} = 15.6 \frac{\text{kg}_{air}}{\text{kg}_f}$$

จากนำไปแทนในสูตร Excess air

ที่ Excess-Air Ratio = 1.1

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

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

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

$$m_a \geq 32.76 \times m_f \times \rho$$

$$\frac{32.76 \times 2.5 \times 2}{60 \times 1000}$$

$$m_a \geq 2.7 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

ที่ Excess-Air Ratio = 1.8

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

$$\begin{aligned} \frac{(A/F_{ac} - 1)}{A/F_{stoi}} \times 100 &\leq 180 \\ A/F_{ac} &\leq (1.8 + 1) \times 15.6 \\ &\leq 43.68 \\ m_a &\leq 43.68 \times m_f \times \rho \\ \frac{43.68 \times 2.5 \times 2}{60 \times 1000} \\ m_a &\leq 3.64 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

ปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลอง

$$2.7 \times 10^{-3} \leq m_a \leq 3.64 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

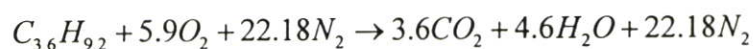
ปริมาณความร้อนที่เตาเผาใหม่สามารถผลิตได้ (kw)

$$\begin{aligned} Q &= \dot{V}_{LPG} \times LHV \times \rho_{LPG} \\ Q &= \dot{V} \text{ ที่อ่านได้จากโรตารีเมตรอากาศ} \times \sqrt{\frac{\rho_{air}}{\rho_{LPG}}} \times LHV \times \rho_{LPG} \\ &= \frac{2.5}{60 \times 1000} \sqrt{\frac{1.2}{2}} \times 45.8 \times 10^3 \times 2 \\ \therefore Q &= 3 \text{ kw} \end{aligned}$$

4.3 การคำนวณหาอุณหภูมิอะเดียแบติก (Adiabatic Flame Temperature)

กรณีอากาศทางทฤษฎี

จากสัดส่วนโดยโมลของ LPG เขียนเป็นสมการสมดุลทางเคมีได้ดังนี้



จากสูตรระบบที่มีปฏิกิริยาเคมีที่มีการไหลลงตัวในกรณีที่สารตั้งต้นเข้าห้องเผาไหม้ที่ 25 °C

$$\begin{aligned} H_{prod} &= H_{react} \\ \sum N_p(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p &= \sum N_r(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเอนทัลปีของธาตุที่สภาวะอ้างอิงมาตรฐานและที่ 298 K

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

แทนค่า

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

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

$$3.6kmol_{CO_2}(-393,520 + \bar{h}_{CO_2} - 9364) + 4.6kmol_{H_2O}(-241,820 + \bar{h}_{H_2O} - 9,904)$$

$$+ 22.18kmol_{N_2}(\bar{h}_{N_2} - 8669) = 0.4(-103,900) + 0.6(-126,200)$$

$$3.6\bar{h}_{CO_2} + 4.6\bar{h}_{H_2O} + 22.18\bar{h}_{N_2} = 2,683,310 \text{ kJ/kg}_f$$

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

$$T = 2,393K$$

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

กรณีอากาศส่วนเกิน 110%

จากสัดส่วนโดยโมลของ LPG เขียนเป็นสมการสมดุลทางเคมีได้ดังนี้



แทนค่า

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

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

$$3.6 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} (-393,520 + \bar{h}_{\text{CO}_2} - 9364) + 4.6 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} (-241,820 + \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} - 9,904) \\ + 46.58 \text{ kmol}_{\text{N}_2} (\bar{h}_{\text{N}_2} - 8,669) + 6.49 \text{ kmol}_{\text{O}_2} (\bar{h}_{\text{O}_2} - 8,682) = 0.4(-103,900) + 0.6(-126,200) \\ 3.6\bar{h}_{\text{CO}_2} + 4.6\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 46.58\bar{h}_{\text{N}_2} + 6.49\bar{h}_{\text{O}_2} = 2,951,236 \text{ kJ/kg}_f$$

สมมติอุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1000 K

$$3.6(42,769)_{\text{CO}_2} + 4.6(35,882)_{\text{H}_2\text{O}} + 22.18(30,129)_{\text{N}_2} = 1,854,147 \text{ kJ/kg}_f$$

สมมติอุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 3000 K

$$3.6(162,226)_{\text{CO}_2} + 4.6(136,264)_{\text{H}_2\text{O}} + 22.18(101,407)_{\text{N}_2} = 3,460,035 \text{ kJ/kg}_f$$

ทำการประมาณค่าภายในช่วง (Interpolation) หาค่าอุณหภูมิแก๊สได้เท่ากับ

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

ในการทำงานเดียวกันสามารถคำนวณหาอุณหภูมิอะเดียบาติกกรณีอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150% และ 180 % ได้เท่ากับ 1,046 $^\circ\text{C}$ และ 952 $^\circ\text{C}$ ตามลำดับ

4.4 การคำนวณหาค่าความพรุนของวัสดุพรุน (Porosity)

ในการคำนวณความพรุนของวัสดุพรุนมีวิธีการคำนวณดังนี้

กรณีเม็ดอะลูมิน่าขนาดใหญ่ 2 cm

1. นำเม็ดอะลูมิน่าใส่ลงในหลอดแก้วทดลองและบันทึกปริมาตรเม็ดอะลูมิน่าในหลอดแก้ว
2. ใช้หลอดฉีดยาฉีดทูลออิน แล้วฉีดทูลออินลงในหลอดแก้วจนกระทั่งปริมาณของทูลออินท่วมเม็ดอะลูมิน่า บันทึกปริมาตรทูลออินที่ใช้ในหลอดแก้ว

หลังจากนั้นหาสัดส่วนช่องว่าง (ϵ_0) จาก

$$\epsilon_0 = \left[\frac{\text{ปริมาตรทูลออินที่ใช้ผสม}}{\text{ปริมาตรหลังเติมทูลออิน}} \right]$$

$$\text{ปริมาตรทูลออินที่ใช้ผสม} = 224 \text{ cm}^3$$

$$\text{ปริมาตรทั้งหมดหลังจากเติมทูลออิน} = 500 \text{ cm}^3$$

ดังนั้น

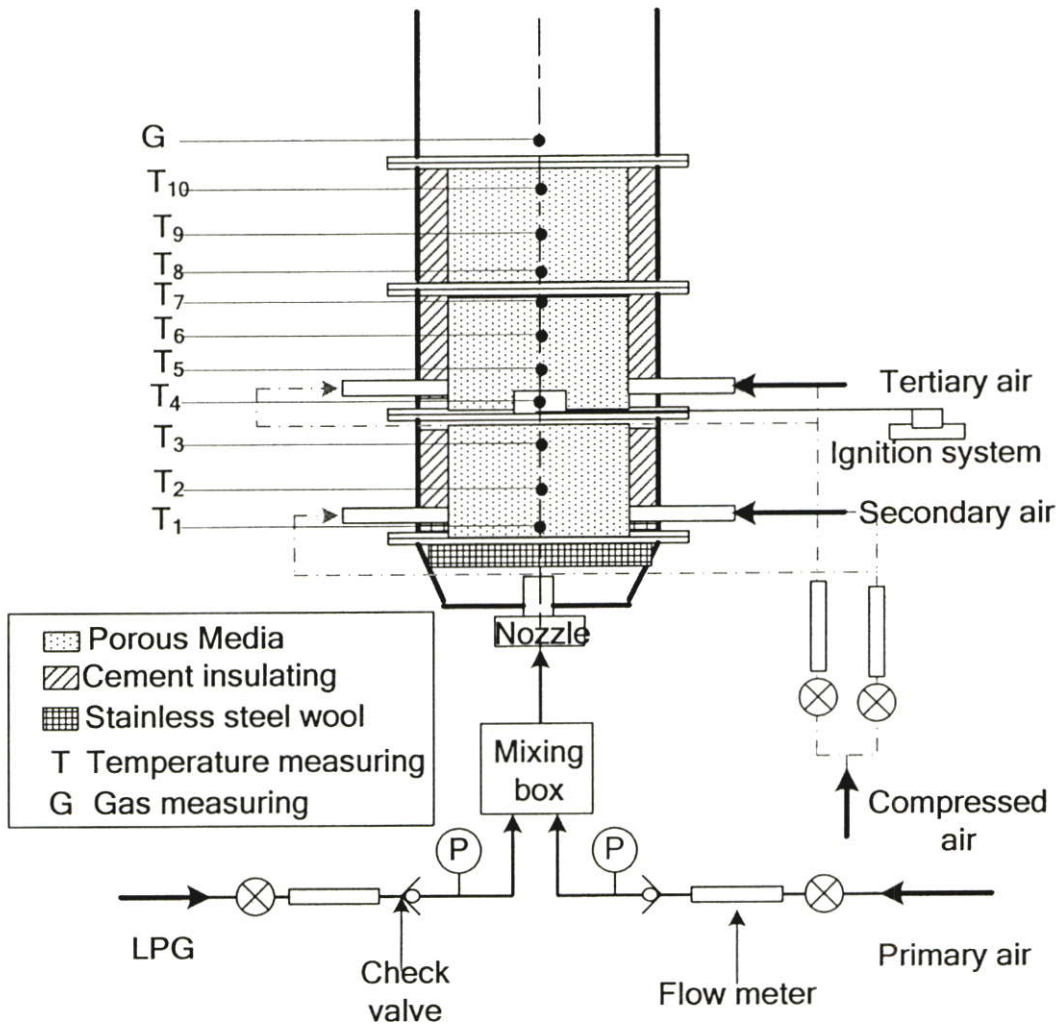
$$\text{สัดส่วนช่องว่างของเม็ดอะลูมิน่าขนาดใหญ่} (\epsilon_0) = \frac{224}{500} \times 100 = 44.9\%$$

ในการทำงานเดียวกันสามารถคำนวณหาความพรุนของเม็ดอะลูมิน่าขนาดกลางและขนาดเล็กได้เท่ากับ 27% และ 9% ตามลำดับ

บทที่ 5

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

5.1 ระบบการทดลองและอุปกรณ์



รูปที่ 5.1 แสดงชุดอุปกรณ์เตาเผาไหม้วัสดุพอร์ซเลนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น

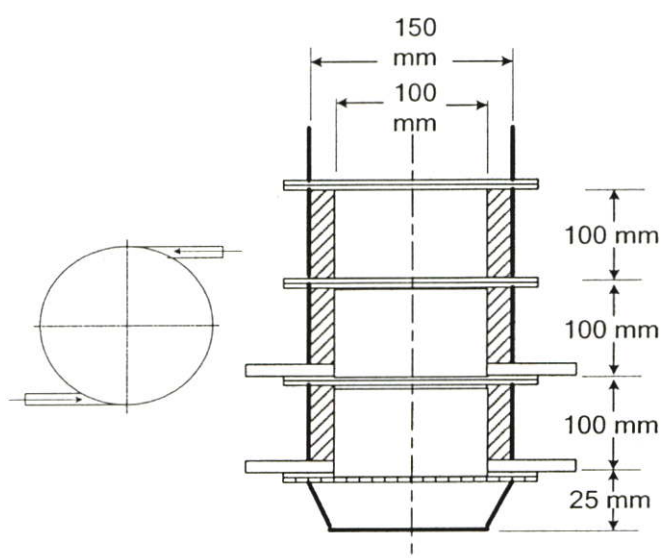
ชุดทดสอบพฤติกรรมการเผาไหม้และสมรรถนะเบื้องต้นของเตาเผาไหม้วัสดุพอร์ซเลนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้นโดยใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง โดยเตาเผาไหม้วัสดุพอร์ซเลนนี้ถูกสร้างขึ้นให้มีการเผาไหม้แบบ premixed โดยการทดสอบจะแบ่งอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็นสามส่วน โดยอากาศส่วนที่หนึ่งจะถูกจ่ายเพื่อผสมกับเชื้อเพลิงก่อนป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ อากาศส่วนที่สองจะถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ที่ระดับความสูง 0 mm. จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง และอากาศส่วนสามจะถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ที่ระดับความสูง 100 mm. จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังทำการติดตั้งระบบ

จุดระเบิดที่ที่ระดับความสูง 100 mm. จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิงและใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงในการจุดและอุ่นเตาเผาใหม่

ในการทดลองทำการปรับอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้ปั๊มลมเป็นต้นกำลังในการทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศและใช้ Flow meter (0-300 L/m) เป็นอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอัตราการไหลของอากาศและในการควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจะใช้ Flow meter (0-5 L/m) เป็นอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอัตราการไหลเช่นเดียวกัน ส่วนในการบันทึกค่าอุณหภูมิจะบันทึกอุณหภูมิทั้งหมด 10 ระดับความสูงทุกๆ 5 นาที โดยใช้ Thermocouple type K และใช้ Data logger เป็นอุปกรณ์ในการบันทึกผล นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัวทำวัดก๊าซไอเสียโดยใช้เครื่องวัดก๊าซ วัดที่บริเวณท่อทางออกที่ระดับความสูง 300 mm จากแผ่นกระจายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_c)

5.1.1 เตาเผาไหม้วัสดุพอรันที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น

ตัวเตาเผาทำจากสแตนเลสท่อทรงกระบอก มีส่วนประกอบหลักๆอยู่ 2 ส่วนคือส่วนที่มีลักษณะเป็นรูปกรวยหงายอยู่ล่างสุดของเตาทำหน้าที่ผสมกันระหว่างเชื้อเพลิง และอากาศส่วนที่หนึ่งถัดขึ้นไปเป็นส่วนของห้องเผาไหม้ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก โดยรวมเตาเผาใหม่นี้มีความสูงประมาณ 325 mm ผนังเตามีการหล่อซีเมนต์ทนไฟ และหุ้มฉนวนที่ผนังเตาด้านนอก (ระบบอะเดียบาติก) เพื่อลดการลดการสูญเสียความร้อน



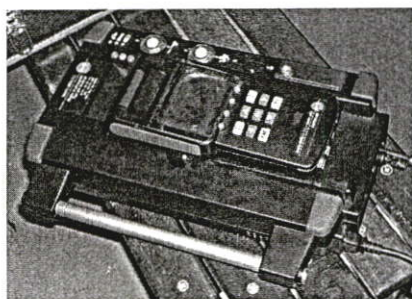
รูปที่ 5.2 แสดงขนาดเตาเผาไหม้วัสดุพอรันที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้นและลักษณะการจ่ายอากาศ

5.1.2 ระบบการวัดอุณหภูมิ

ในการทดลองทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ระดับความสูงจากแผ่นกระจายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ทั้งหมด 10 จุด คือ ที่ระดับความสูง 0, 50, 80, 100, 130, 160, 190, 200, 250, 300 mm จากแผ่นกระจายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ดังแสดงในรูป 5.1 โดยใช้ Thermocouple type K เป็นอุปกรณ์ในการวัดและใช้ Data logger เป็นอุปกรณ์ในการบันทึกผล

5.1.3 การวัดมลพิษ

การวัดมลพิษใช้เครื่องมือวัดไอเสียของ Testo รุ่น 350 XL ทำการเก็บค่าที่ระดับความสูง 300mm จากแผ่นกระจายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ โดยก๊าซไอเสียที่ทำการบันทึกประกอบไปด้วย O_2 , CO_2 , CO , NO_x , C_xH_y และก๊าซอื่นๆ ที่ต้องการ ซึ่งระยะเวลาในการเก็บบันทึกจะทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาที ระยะเวลาานาน 30 นาที โดยทุกค่าของข้อมูลถูกเก็บที่เงื่อนไขสภาวะคงตัวเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผา นอกจากนี้อุณหภูมิของก๊าซไอเสียยังถูกบันทึกไปพร้อมกับปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นด้วย



รูปที่ 5.3 แสดงเครื่องมือวัดไอเสียของ Testo รุ่น 350 XL

5.2 พารามิเตอร์ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความพรุนของวัสดุพรุน อากาศส่วนเกิน สัดส่วนอากาศเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) และตำแหน่งการจ่ายอากาศ โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

5.3 วิธีการทดลอง

1. ทำการป้อนอากาศส่วนที่หนึ่งและเชื้อเพลิง LPG เข้าสู่เตาเผาที่อัตราการไหลต่ำๆ และทำการจุดเตาและอุ่นเตาจนห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น
2. เพิ่มปริมาณอากาศและอัตราการป้อนเชื้อเพลิงขึ้นอย่างช้าๆ รักษาระดับของอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงไว้ ปรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง เช่น อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตรของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด และอัตราการป้อนเชื้อเพลิง LPG
3. ปลดปล่อยให้เตาเผาทำงานต่อไปจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาเผาเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยควรทำการตรวจสอบพารามิเตอร์ดังกล่าวตลอดการทดลอง

5.3.1 การเก็บข้อมูล

ในการทดสอบแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 4-5 ชั่วโมง โดยทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทุกๆ 5 นาทีตลอดการทดลองตามระดับความสูง จากแผ่นกระจายผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ (ดังหัวข้อที่ 5.1.2) ซึ่งเมื่อเตาเผาอยู่ในสภาวะสมดุลแล้ว ทำการบันทึกก๊าซไอเสียที่ระดับความสูง 300mm จากแผ่นกระจายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ โดยก๊าซไอเสียที่ทำการบันทึกประกอบไปด้วย O_2 , CO_2 , CO , NO_x , C_xH_y

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์สำหรับทดลองสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนที่มีการจ่ายอากาศเป็นขั้น

พารามิเตอร์	ปริมาณ/ชนิด	หน่วย
คุณสมบัติ LPG		
สัดส่วน Propane : Butane	40:60	% โดยโมล
ค่าความร้อนขั้นต่ำ (Low Heating Value)	45.8	MJ/kg
ความหนาแน่น	2.011	kg/m ³
วัสดุพอรุน		
ขนาดของเม็ดอะลูมินาเม็ดใหญ่	2	cm
ขนาดของเม็ดอะลูมินาเม็ดกลาง	1	cm
ขนาดของเม็ดอะลูมินาเม็ดเล็ก	0.5	cm
เงื่อนไขที่ทางเข้าห้องเผาไหม้		
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง	2.5	L/min
อากาศส่วนเกิน	110-180	%
อัตราการป้อนอากาศส่วนที่หนึ่ง	4	L/min
สัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ)	0-96	%
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	25	°C

5.4 เงื่อนไขการทดลอง

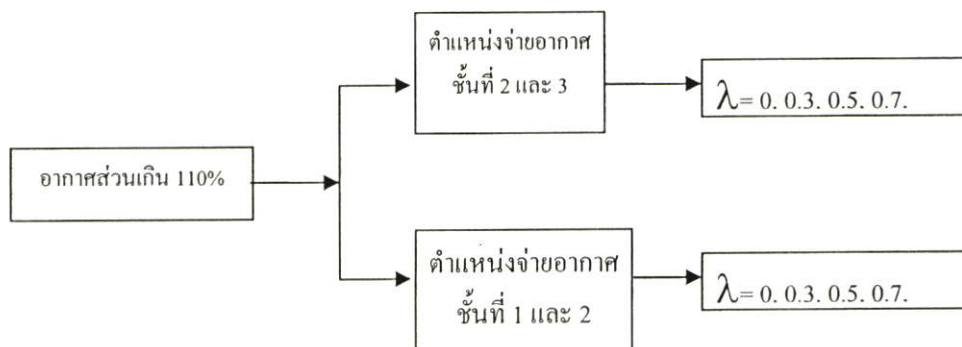
จากตารางที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าการปรับเปลี่ยนค่าสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) คือการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของอากาศส่วนที่สาม โดยที่ในการทดลองจะทำการคงที่อากาศส่วนที่หนึ่งเท่ากับ 4 L/min เนื่องจากข้อจำกัดของแรงดันที่หัวจ่ายถึงก๊าซ LPG ซึ่งสามารถจ่ายเชื้อเพลิงได้ที่แรงดันต่ำ ทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศในส่วนที่หนึ่งจะทำให้แรงดันของอากาศส่วนที่หนึ่งย้อนไปสู่ท่อจ่ายเชื้อเพลิงทำให้ไม่สามารถป้อนเชื้อเพลิงได้ตามต้องการ

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขอากาศที่ใช้ในการทดลอง

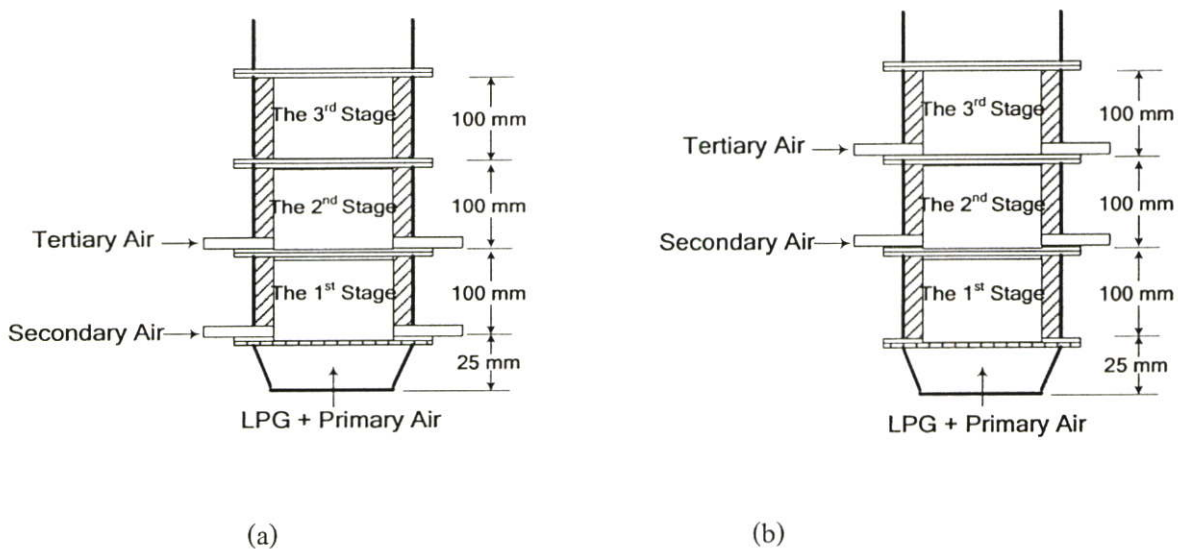
Energy input (kw)	%EA	Lamda (λ)	Volume flow rate of air (L/min)			Volume Flow rate Fraction of Air (%)		
			1 st	2 nd	3 rd	1 st	2 nd	3 rd
			Air	Air	Air	Air	Air	Air
3 kw	110	0.00	4	106	0	3.63	96.37	0
		0.30	4	73	33	3.63	66.37	30
		0.50	4	51	55	3.63	46.37	50
		0.70	4	29	77	3.63	26.37	70
		0.96	4	0.00	106	3.63	0.00	96
	150	0.00	4	126.00	0	3.08	96.92	0
		0.96	4	0.00	126	3.08	0.00	96
	180	0.00	4	142	0	2.75	97.25	0
		0.96	4	0.00	142	2.75	0.00	96

ในการทดสอบสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วนคือการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศ อิทธิพลของอากาศส่วนเกิน อิทธิพลของความพูนของวัสดุพูน อิทธิพลของการใส่และไม่ใส่เมล็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพูน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.4.1 การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศ

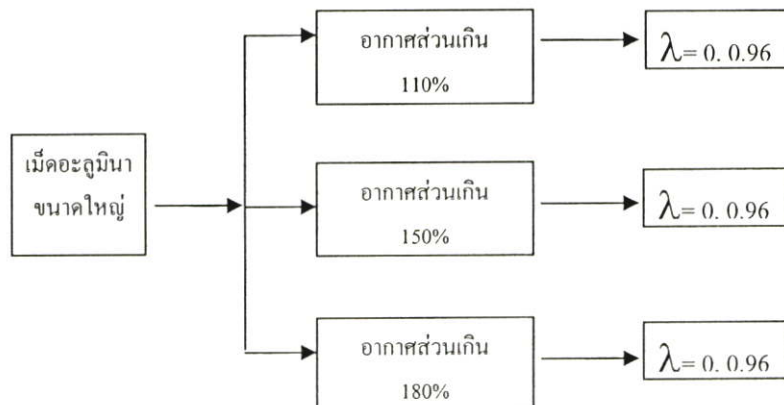


รูปที่ 5.4 แผนผังการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศ



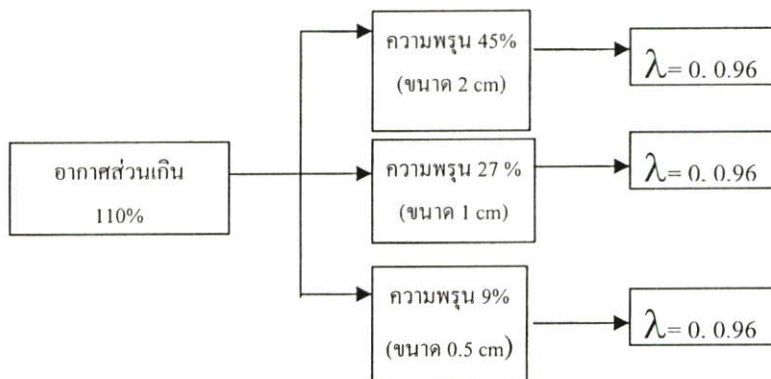
รูปที่ 5.5 แสดงตำแหน่งการจ่ายอากาศ (a) จ่ายอากาศที่บริเวณชั้นที่ 1 และ 2 (b) จ่ายอากาศที่บริเวณชั้นที่ 2 และ 3

5.4.2 การศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนเกิน

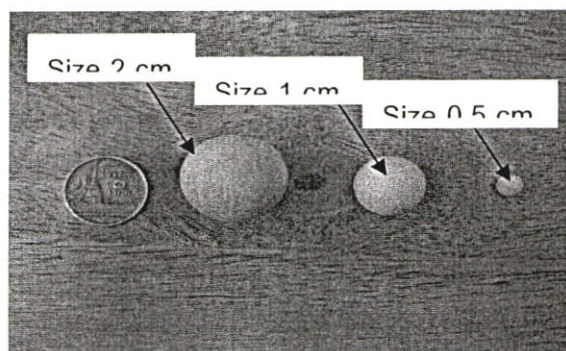


รูปที่ 5.6 แผนผังการศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนเกิน

5.4.3 การศึกษาอิทธิพลของความพรุนของวัสดุพรุน

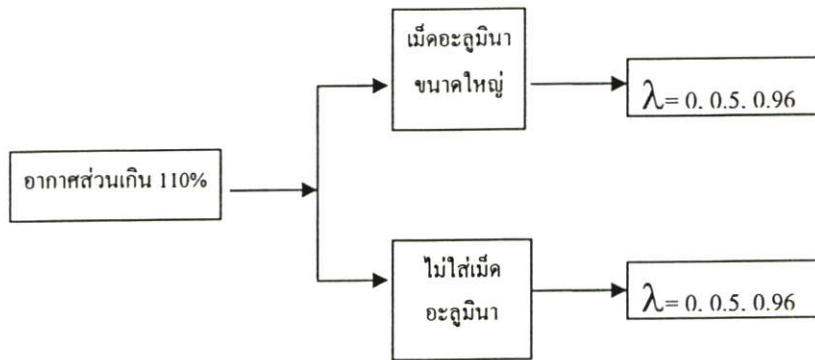


รูปที่ 5.7 แผนผังการศึกษาอิทธิพลของความพรุนของวัสดุพรุน



รูปที่ 5.8 แสดงขนาดของเม็ดวัสดุที่ใช้สร้าง ความพรุน

5.4.4 การศึกษาอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุที่ใช้สร้างความพรุน



รูปที่ 5.9 แผนผังการศึกษาอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่เม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพรุน

บทที่ 6

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

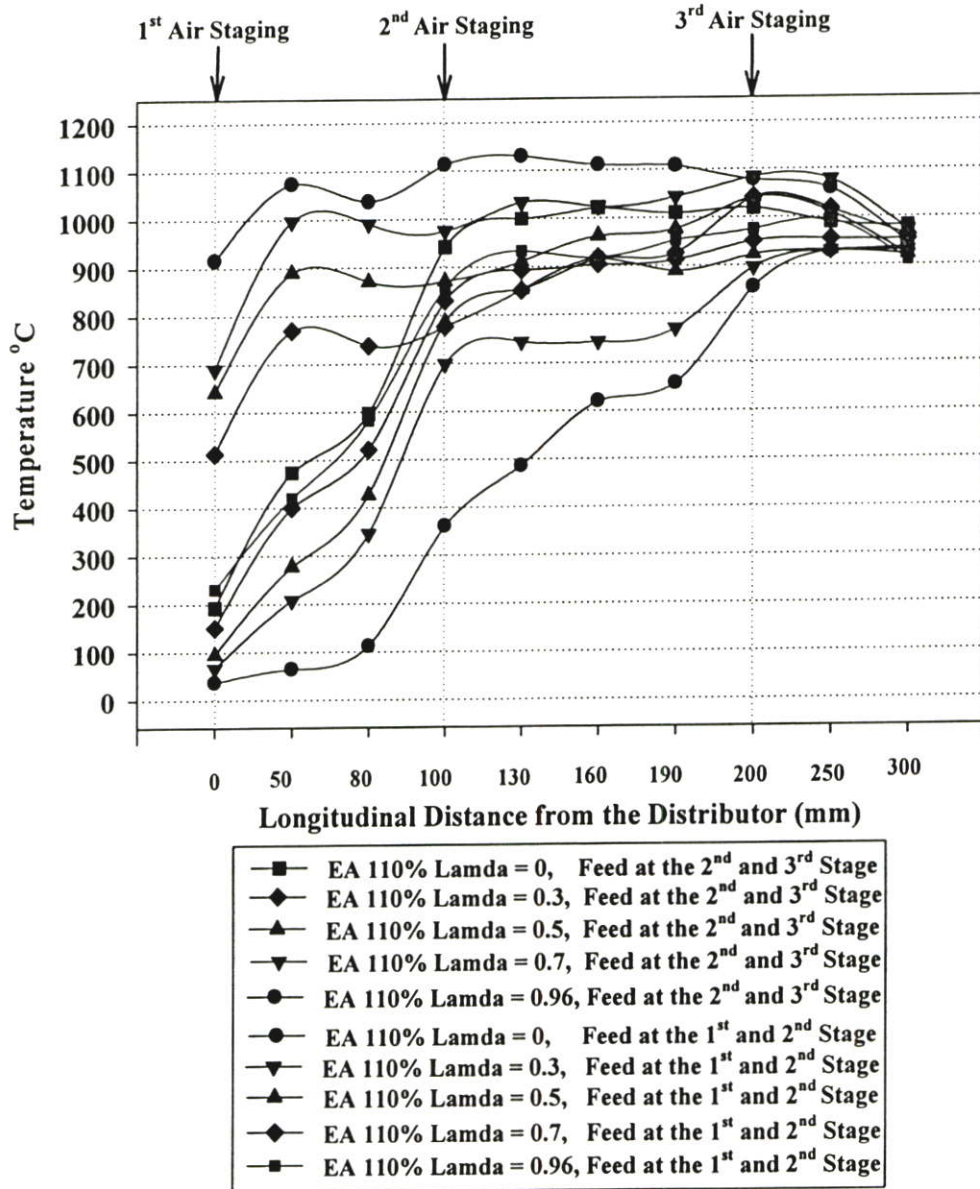
จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเตาเผาไหม้แบบจ่ายอากาศชั้นเดียว (Single-stage combustor) นั้นไม่สามารถควบคุมปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นตามระดับความสูงของเตาได้ ส่งผลให้ถ้าทำการติดตั้งชุดแลกเปลี่ยนความร้อนไว้ภายในเตาเผาไหม้ จะก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในเตาเผาไหม้ได้ ซึ่งแตกต่างจากเตาเผาไหม้ที่มีการจ่ายอากาศหลายชั้น (Multi-stage combustor) ที่สามารถควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าเตาเผาไหม้ในแต่ละระดับความสูงของเตาเผาไหม้ได้ ทำให้สามารถควบคุมบริเวณการเผาไหม้ (Combustion zone) ที่เกิดขึ้นตามระดับความสูงของเตาและควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ เพราะฉะนั้นถ้านำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนติดตั้งภายในเตาเผาไหม้ จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในเตาเผาไหม้ ดังนั้นสมมุติฐานเริ่มต้นที่ใช้ในการออกแบบเตาเผาไหม้วัสดุพูนในงานวิจัยนี้คือ การเผาไหม้ที่มีการจ่ายอากาศแบบขั้นบันไดจะช่วยให้การกระจายอุณหภูมิในเตามีความสม่ำเสมอ และเกิดขึ้นในบริเวณที่กว้างมากขึ้น ด้วยเหตุนี้เตาเผาไหม้ที่ทำการสร้าง จึงเป็นเตาเผาไหม้ที่มีการกำหนดช่องจ่ายอากาศแบบขั้นบันได ซึ่งเป็นที่มาของการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศ

6.1 การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศ

6.1.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง

รูปที่ 6.1 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 กับกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 2 และ 3 ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.96 ตามลำดับ โดยทำการคงที่อากาศส่วนเกินไว้เท่ากับ 110% จากรูปจะเห็นได้ว่าในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าสูง อยู่ในช่วง 900 -1150 °C (เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว) ซึ่งในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มากกว่ากรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 2 และ 3 อย่างเห็นได้ชัด โดยมีอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้อยู่ในช่วง 300 -1050 °C (เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว) เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเมื่อทำการจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 อากาศจะถูกจ่ายเข้าเตาเผาไหม้ตั้งแต่ที่ระดับความสูง 0 mm จากตระแกรงกระจายของผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ จึงทำให้มีระยะเวลาและบริเวณที่เกิดการเผาไหม้มีมาก ซึ่งต่างกับกรณีทำการจ่ายอากาศชั้นที่ 2 และ 3 ที่เริ่มจ่ายอากาศตั้งแต่ระดับความสูง 100 mm จากตระแกรงกระจายของผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ จึงทำให้มีระยะเวลาและบริเวณที่เกิดการเผาไหม้น้อยกว่า

กรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 เป็นสาเหตุให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ได้อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำ

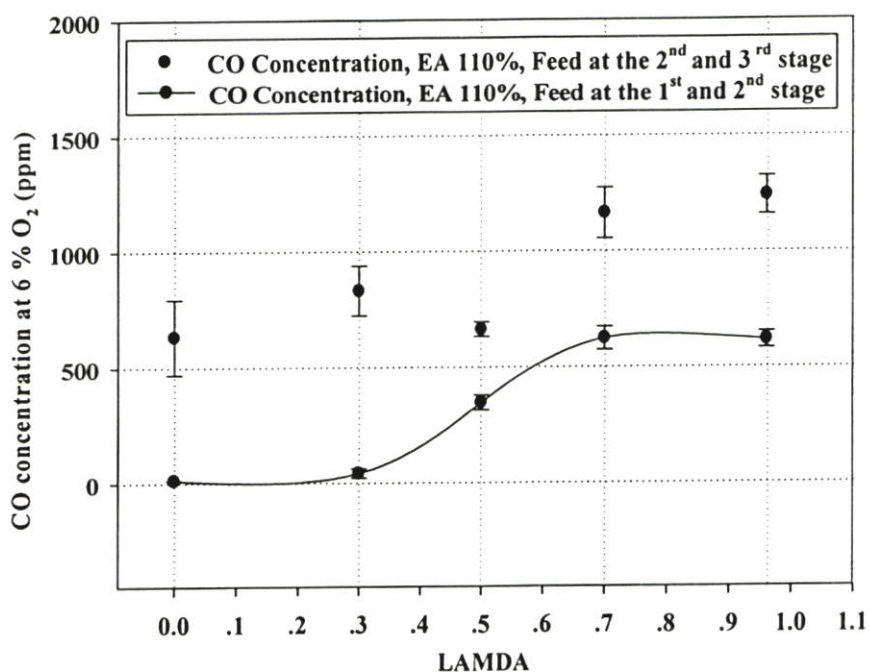


รูปที่ 6.1 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง

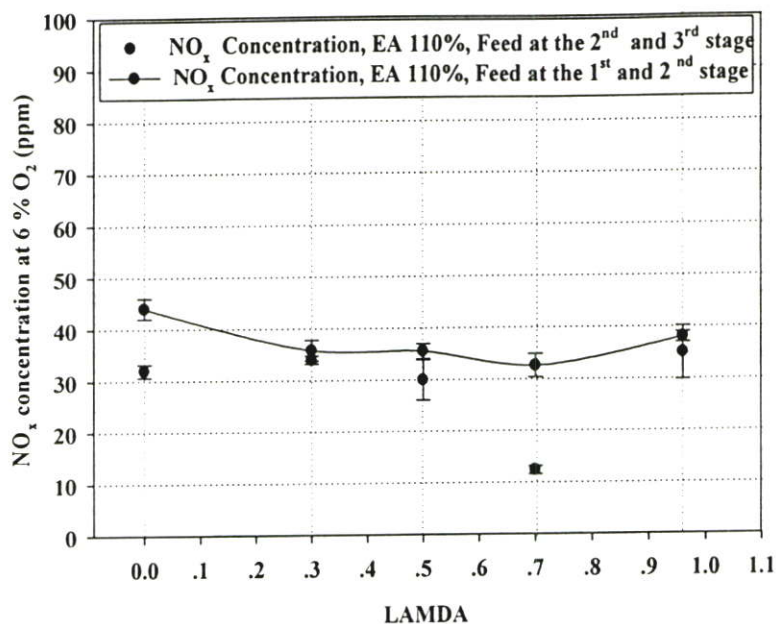
เมื่อทำการพิจารณาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) ในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 พบว่าเมื่อทำการเพิ่ม λ จะส่งผลให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ คาดว่าเนื่องมาจากการเพิ่ม λ ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณอากาศที่จ่ายในชั้นที่ 2 และลดปริมาณอากาศที่จ่ายในชั้นที่ 1 จะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นช้าลงและทำให้ระยะเวลาเฉลี่ยในการเผาไหม้ภายในเตาเผาไหม้ลดน้อยลง อีกเหตุผลหนึ่งการเพิ่ม λ คือการ

เพิ่มปริมาณอากาศเย็นเข้าเตาเผาไหม้ที่ระดับความสูง 100mm จากแผ่นระแวงกระจายอากาศ และเชื้อเพลิง ซึ่งมีผลทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่ผลิตได้ให้กับอากาศเย็นที่ฉีดเข้าเตาเผาไหม้ โดยอุณหภูมิการเผาไหม้เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว มีค่าประมาณ 1150 °C และ 900 °C ที่ λ เท่ากับ 0 และ 0.96 ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อพิจารณา กรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 2 และ 3 พบว่าเมื่อทำการเพิ่ม λ จะส่งผลให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลงตามลำดับเช่นเดียวกัน ซึ่งคาดว่า พฤติกรรมที่เกิดขึ้นเหมือนกันกับกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 โดยอุณหภูมิการเผาไหม้เมื่อเข้าสู่ สภาวะคงตัวมีค่าประมาณ 1010 °C และ 610 °C ที่ λ เท่ากับ 0 และ 0.96 ตามลำดับ

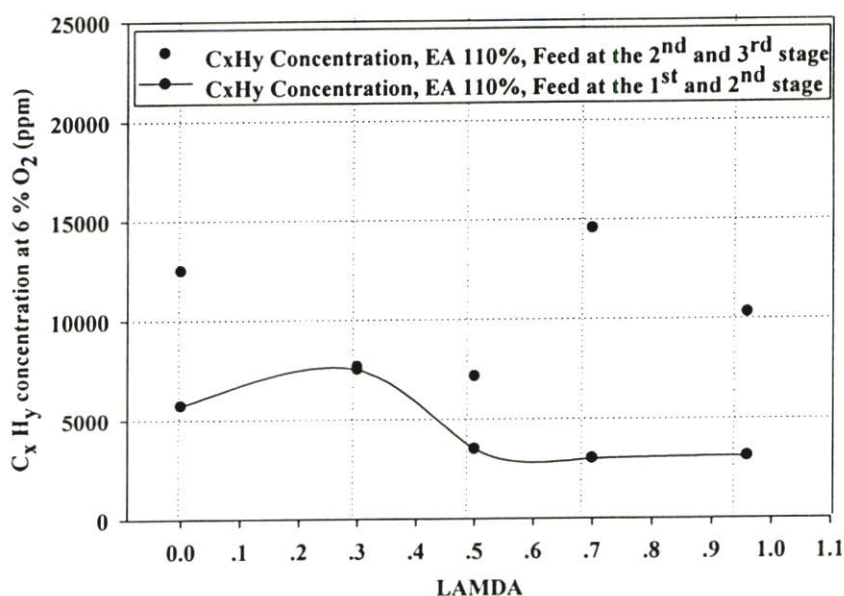
6.1.2 ปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้



รูปที่ 6.2 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 6.3 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์



รูปที่ 6.4 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอน

รูปที่ 6.2–6.4 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศที่มีผลต่อปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าตำแหน่งการจ่ายอากาศมีอิทธิพลต่อปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 6.2 พบว่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ใน

ทุกเงื่อนไขการทดลองมีปริมาณน้อยกว่ากรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 อย่างชัดเจน เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าการฉีดอากาศชั้นที่ 2 และ 3 ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้มีน้อย จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ ดังรูปที่ 6.1 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) ต่อปริมาณ CO ในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 พบว่า CO มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามการเพิ่ม λ เนื่องจากการเพิ่ม λ จะส่งผลให้ระยะเวลาเฉลี่ยในการเผาไหม้ลดน้อยลง ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดยปริมาณ CO มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 650 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% ที่ λ เท่ากับ 0.96 และมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 11 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% ที่ λ เท่ากับ 0 ส่วนกรณีฉีดอากาศชั้นที่ 2 และ 3 พบว่าเมื่อเพิ่ม λ แล้วปริมาณ CO มีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นกัน ยกเว้นในกรณี ที่ λ เท่ากับ 0.5 ที่มีค่า CO ลดลง และสังเกตเห็นการลดลงของปริมาณ ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเกิดเงื่อนไขเฉพาะในช่วงการทำงานแคบๆ ที่มีการเผาไหม้ดีขึ้น (ดูรูปที่ 6.4 ประกอบ) ดังนั้นปัจจัยทางด้านเวลาเฉลี่ยในการเผาไหม้อันเกิดจากการแบ่งอากาศ จึงไม่ใช่เพียงปัจจัยเดียว ที่อธิบายการปลดปล่อย CO โดยเฉพาะกรณี ที่ λ เท่ากับ 0.5 นี้

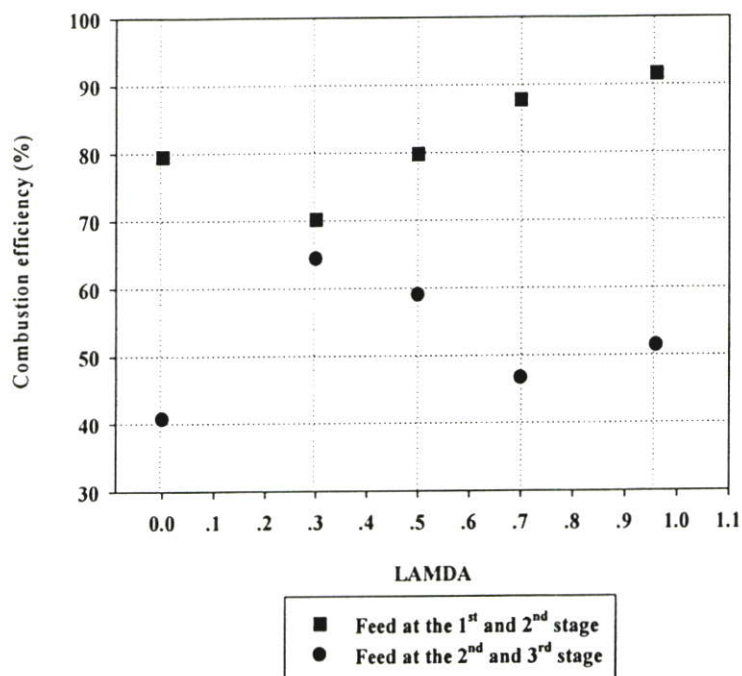
อนึ่ง เป็นที่น่าสังเกตว่าค่า CO สำหรับกรณี ที่ฉีดอากาศชั้นที่ 2 และ 3 นี้ มีการแกว่งสูงกว่ากรณีที่ฉีดอากาศชั้นที่ 1 และ 2 นั่นคือเกิดความไม่เสถียรของเปลวไฟขึ้นในช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ อย่างไรก็ดี เราสามารถบ่งชี้ได้ว่า CO มีปริมาณที่สูงกว่ากรณีที่ฉีดอากาศชั้นที่ 1 และ 2 โดยอยู่ในช่วง 660 – 1250 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6%

เมื่อพิจารณาปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ รูปที่ 6.3 พบว่าปริมาณ NO_x ในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 มีปริมาณมากกว่ากรณีจ่ายอากาศชั้น 2 และ 3 เนื่องจากอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ของในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 ในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่ามากกว่ากรณีจ่ายอากาศชั้น 2 และ 3 จึงทำให้โอกาสที่เกิด Thermal NO_x มีมากขึ้น ซึ่งปริมาณ NO_x ในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 32-43 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% และปริมาณ NO_x ในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 2 และ 3 มีค่าอยู่ในช่วง 11-35 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% ในขณะที่เมื่อพิจารณาปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 6.4 พบว่าปริมาณ C_xH_y ในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 มีปริมาณน้อยกว่ากรณีจ่ายอากาศชั้น 2 และ 3 เนื่องจากอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ของในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 ในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่ามากกว่ากรณีจ่ายอากาศชั้น 2 และ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยปริมาณ C_xH_y ในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 3600-7200 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% และปริมาณ C_xH_y ในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 2 และ 3 มีค่าอยู่ในช่วง 6100-14500 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ NO_x กับปริมาณ C_xH_y ภายใต้หลักกลไกทางเคมีของการสลาย NO_x อันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอน พบความสัมพันธ์ที่สนับสนุนทฤษฎีนี้ โดยเฉพาะในเงื่อนไขการทดสอบที่พบอนุมูลอิสระของ

ไฮโดรคาร์บอนสูง ซึ่งจะพบการปลดปล่อย NO_x ต่ำ เป็นความสัมพันธ์ที่ผกผันต่อกันตลอดช่วงที่ศึกษา

6.1.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้



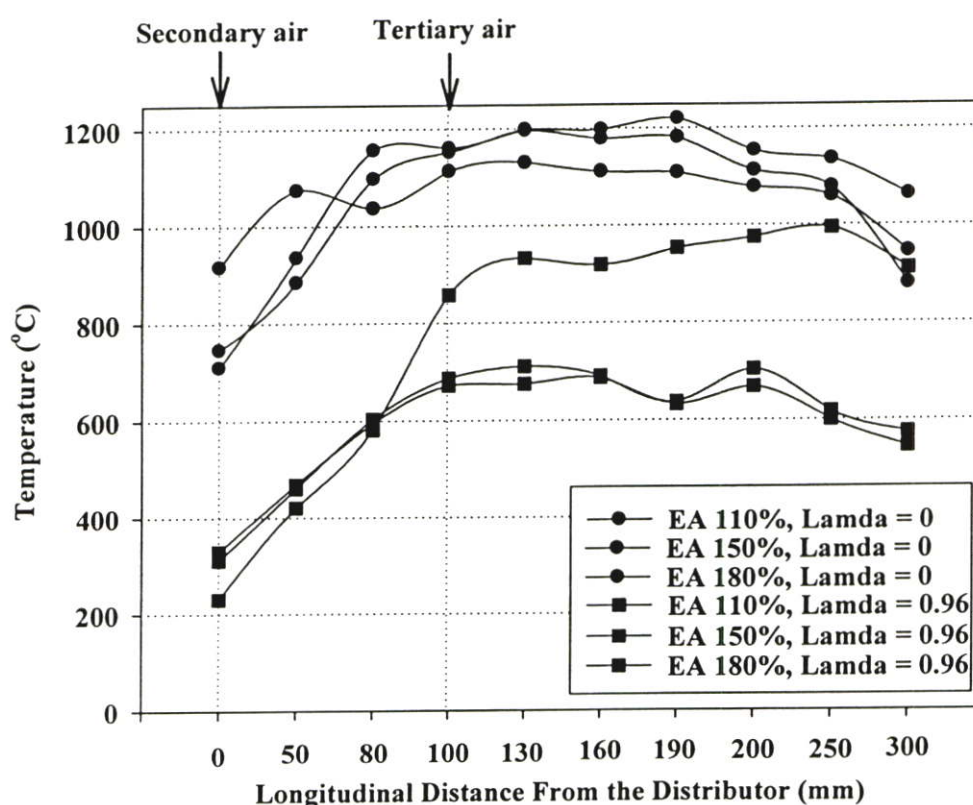
รูปที่ 6.5 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้

รูปที่ 6.5 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าในทุกเงื่อนไขการทดลองประสิทธิภาพการเผาไหม้ในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 มีค่ามากกว่ากรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 2 และ 3 โดยประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 91% ที่ λ เท่ากับ 0.96 ในขณะที่เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยน λ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้พบว่า ทั้งในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 และกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 2 และ 3 ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เกิดการแกว่ง ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้นั้นเป็นค่าที่คำนวณได้มาจากอัตราส่วนของพลังงานที่ไม่รวมพลังงานที่สูญเสียจากการเผาไหม้ CO และ C_xH_y กับพลังงานที่ป้อนให้กับเตาเผาไหม้ หรือสามารถกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณ CO และ C_xH_y ที่ได้จากการเผาไหม้ (รูปที่ 6.2 และ 6.3) ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงความสอดคล้องกันจะพบว่าที่ค่า λ ตั้งแต่ 0.3 จนถึง 0.96 ในกรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 ปริมาณ C_xH_y มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ปริมาณ CO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นั้นแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของปริมาณ C_xH_y ส่งผลมากกว่าอิทธิพลของ ปริมาณ CO จึงทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุในการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มของปริมาณ CO และ C_xH_y นั้นได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 6.1.2

จากการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศพบว่า การจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้วัสดุพูนในชั้นที่ 1 และ 2 ส่งผลให้การกระจายอุณหภูมิในเตามีความสม่ำเสมอ เกิดขึ้นในบริเวณที่กว้างและมีมลพิษต่ำ โดยสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่อปริมาณอากาศทั้งหมด (λ) ที่ทำให้สมรรถนะของเตาเผาไหม้ดีที่สุดอยู่ที่ λ เท่ากับ 0 และค่าที่ λ เท่ากับ 0.96 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณอากาศส่วนเกินที่เลือกมาใช้ในการทดสอบคือ 110 % โดยได้มาจากการศึกษางานวิจัยที่ได้ทำการศึกษามา ซึ่งพบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซภายในเตาเผาไหม้วัสดุพูนมีค่าอยู่ในช่วง 110-180 % ($1.1 \leq \text{Excess-Air Ratio} \leq 1.8$) ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาเผาไหม้และปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งจะได้ทำการศึกษาในหัวข้อต่อไป

6.2 การศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนเกิน

6.2.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง



รูปที่ 6.6 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง

รูปที่ 6.6- 6.10 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาเผาไหม้และปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น โดยในการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนอากาศส่วนเกินเป็น 110% 150% และ 180% ตามลำดับ ซึ่งในอากาศส่วนเกินแต่ละเงื่อนไขจะทำการปรับเปลี่ยน สัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0 และ 0.96 ตามลำดับ โดยทุกเงื่อนไขการทดลองทำการเผาไหม้โดยใช้วัสดุสร้างความร้อนขนาดใหญ่ (2.0cm) ซึ่งจากรูป 6.6 จะเห็นได้ว่าการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยเมื่อทำการเผาไหม้ที่ $\lambda = 0$ พบว่า กรณีอากาศส่วนเกิน 150% และ 180% มีช่วง reaction zone ขยับลึกไปทาง downstream มากกว่ากรณีอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110% ซึ่งถือว่าอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110% เป็นกรณีที่มีช่วงการเผาไหม้ที่ยาว (Long flame temperature) แต่มีอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำที่สุดมีค่าประมาณ 1100°C ในขณะที่กรณีอากาศส่วนเกิน 150% อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำในช่วงระดับความสูง 0-100 mm จากแผ่นกระจายของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง จากนั้นอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าสูงขึ้นจนมีค่าอุณหภูมิสูงที่สุดในช่วงตั้งแต่ระดับความสูง 100mm เป็นต้นไป โดยมีค่าอุณหภูมิสูงที่สุดเท่ากับ 1250°C ส่วนกรณีอากาศส่วนเกิน 180 % พบว่ามีค่าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงในช่วงระดับความสูง 0-100 mm จากแผ่นกระจายของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง จากนั้นอุณหภูมิการเผาไหม้จะมีค่าลดลง โดยมีค่าประมาณ 1180°C

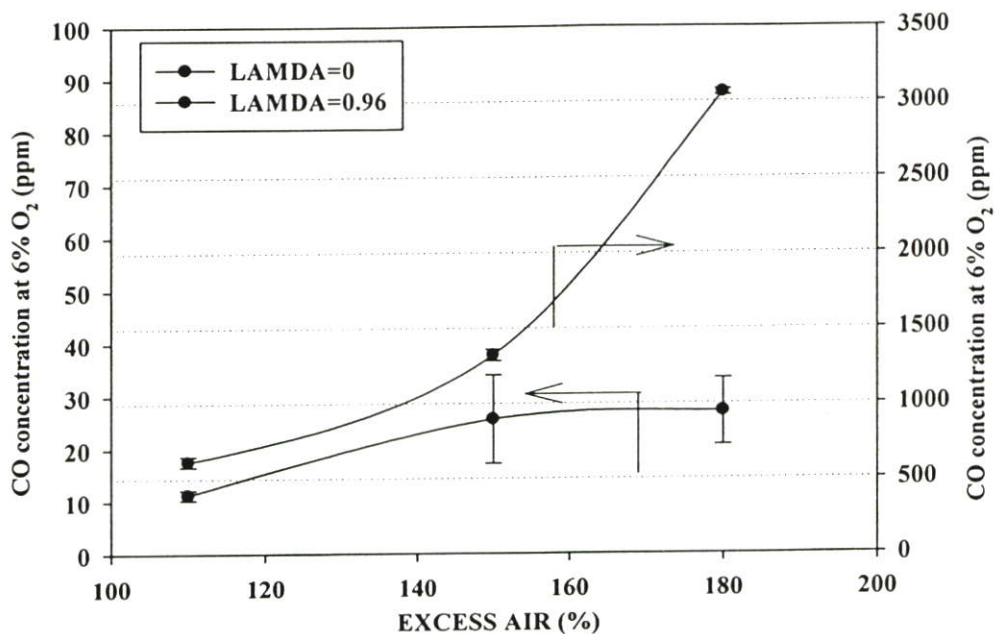
แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดความสูงของเตาเผาไหม้ อันเกิดจากการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินดังกล่าว เมื่อนำมาพิจารณาพร้อมกับทฤษฎีการไหลแบบปั่นป่วนที่ความเร็วของการหมุนวน (Eddy velocity) แปรตามความเร็วเฉลี่ยของระบบ ก็จะพบว่ามีความน่าสนใจที่จะนำทฤษฎีนี้มาใช้อธิบาย กล่าวคือเมื่อทำการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน จะส่งผลให้ความเร็วของการหมุนวน (Eddy velocity) ที่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านหลังของเมื่อดอลูมินา มีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้อัตราการผสม (Mixing rate) กันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศและก๊าซไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินยังส่งผลให้พจน์ของการพา (Convection term) มีค่าเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ปัจจัยทั้งสองนี้ส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิต่างกัน กล่าวคืออัตราการผสมจะสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ปลดปล่อยความร้อน ณ บริเวณนั้นๆ แต่การพาจะเลื่อนบริเวณของการทำปฏิกิริยาขึ้นด้านบน ให้มีระยะห่างจากฐานเตาออกไป ดังนั้นเมื่อพิจารณา รูปที่ 6.6 พบว่า ในช่วงระดับความสูง 0-100 mm จากแผ่นกระจายของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง อัตราการผสม (Mixing rate) มีอิทธิพลต่อเงื่อนไขอากาศส่วนเกิน 180% มากกว่ากรณีอากาศส่วนเกิน 150% จึงทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าสูงกว่ากรณีอากาศส่วนเกิน 150% จากนั้นในช่วงตั้งแต่ระดับความสูง 100mm เป็นต้นไป พบว่าพจน์ของการพา (Convection term) มีอิทธิพลต่อทั้งอากาศส่วนเกิน 180% และ 150% แต่เนื่องจากกรณีอากาศส่วนเกิน 180% มีปริมาณอากาศมาก ซึ่งเป็นการเพิ่มภาระให้กับปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ จึงทำให้อุณหภูมิมีค่าลดลงมากกว่ากรณี 150% ส่วนในกรณีอากาศส่วนเกิน 110% มีอัตราการไหลของอากาศน้อยกว่ากรณี

อื่น ซึ่งอัตราการผสม (Mixing rate) และพจน์ของการพา (Convection term) มีค่าต่ำกว่า จึงทำให้ อุณหภูมิในการเผาไหม้มีค่าต่ำที่สุด และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงต้น 50 mm แรก สูงสุด

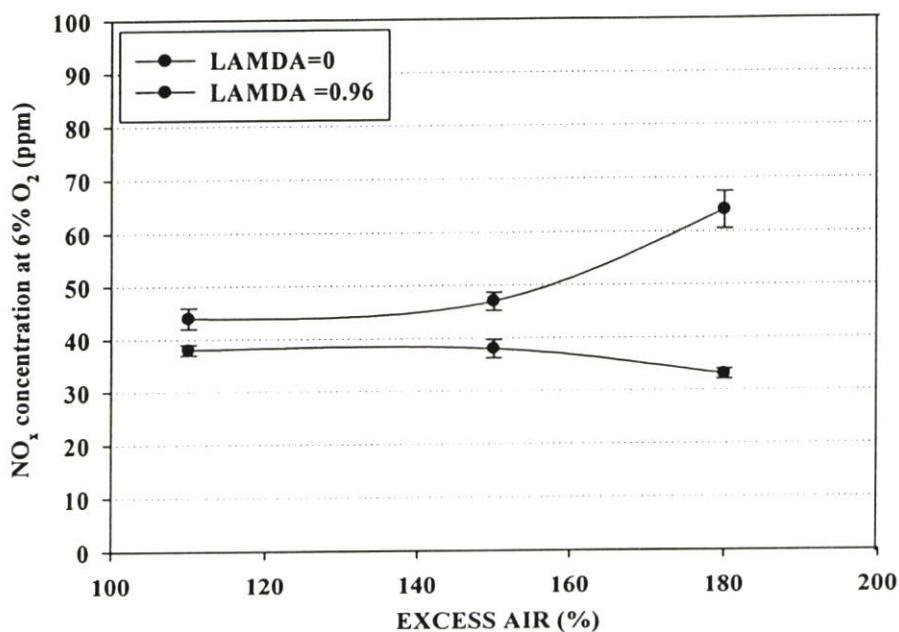
เมื่อทำการเผาไหม้ที่ $\lambda = 0.96$ พบว่า ทุกเงื่อนไขการทดลองอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าต่ำกว่าที่ $\lambda = 0$ โดยมีค่าค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ระดับความสูง 100mm เป็นต้นไป เนื่องจากเป็น บริเวณที่เริ่มมีการจ่ายอากาศส่วนที่สอง ซึ่งกรณีอากาศส่วนเกิน 110% อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 980°C รองลงมาคือกรณีอากาศส่วนเกิน 150 % อุณหภูมิมีค่าประมาณ 650°C ส่วนกรณีอากาศส่วนเกิน 180 % อุณหภูมิมีค่าประมาณ 620°C เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากช่วงของการเผาไหม้มีช่วงสั้น ทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ (Residence time) มีค่าต่ำกว่ากรณีที่ไม่มี การแบ่งจ่ายอากาศ ซึ่งหมายถึงการผสมในช่วง 100mm แรกมีค่าสูงกว่า 800°C มีความสำคัญมากในการรักษา ระดับอุณหภูมิที่สูงในช่วงที่เหลือน้อยของเตา เพราะในกรณีที่จ่ายอากาศที่ 110% $\lambda = 0.96$ นั้นถึงแม้ จะมีการจ่ายอากาศที่ตำแหน่ง 100 mm ก็ไม่ทำให้อุณหภูมิจึงเตาตกลง แต่กลับมีค่าสูงขึ้นนั้น หมายถึงการผสมกันของแก๊สร้อนที่มีเชื้อเพลิงผสมอยู่กับอากาศที่เข้ามาใหม่นั้นเกิดการเผาไหม้ได้ อย่างต่อเนื่อง แต่ในกรณีที่มีการจ่ายอากาศที่ 150% และ 180% นั้น การฉีดอากาศในช่วงที่ 2 ไม่ทำให้ อุณหภูมิสูงขึ้นมากนัก และอุณหภูมิมียังค่าลดลงที่ระยะห่างออกไป โดยในกรณีดังกล่าว อัตราการผสมส่งผลน้อยเนื่องจากแก๊สไอเสียไม่ร้อนพอที่จะทำให้อัตราการจุดติดของส่วนผสมเชื้อเพลิงและ อากาศไม่สูงพอที่จะเพิ่มอุณหภูมิได้ และเมื่อไม่ทำปฏิกิริยา อากาศก็กลายเป็นภาวะของการทำความ ร้อน ทำให้ระดับอุณหภูมิกรณีอากาศส่วนเกิน 180% มีอุณหภูมิต่ำกว่า กรณี 150% จึงทำให้เมื่อเพิ่ม ปริมาณอากาศส่วนเกินแล้วทำอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำลงตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้เฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง กับอุณหภูมิอะเดียแบติกที่ได้จากการคำนวณในแต่ละเงื่อนไขการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ได้จาก การเผาไหม้เฉลี่ยในกรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110% มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอะเดียแบติก ประมาณ 111°C โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 9.2% ในขณะที่กรณีปริมาณอากาศส่วนเกิน เท่ากับ 150% และ 180% มีค่าอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้เฉลี่ยมากกว่าอุณหภูมิอะเดียแบติกที่ได้ จากการคำนวณ โดยมีค่าเท่ากับ 203°C และ 227°C ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 19.5% และ 25 % ตามลำดับ

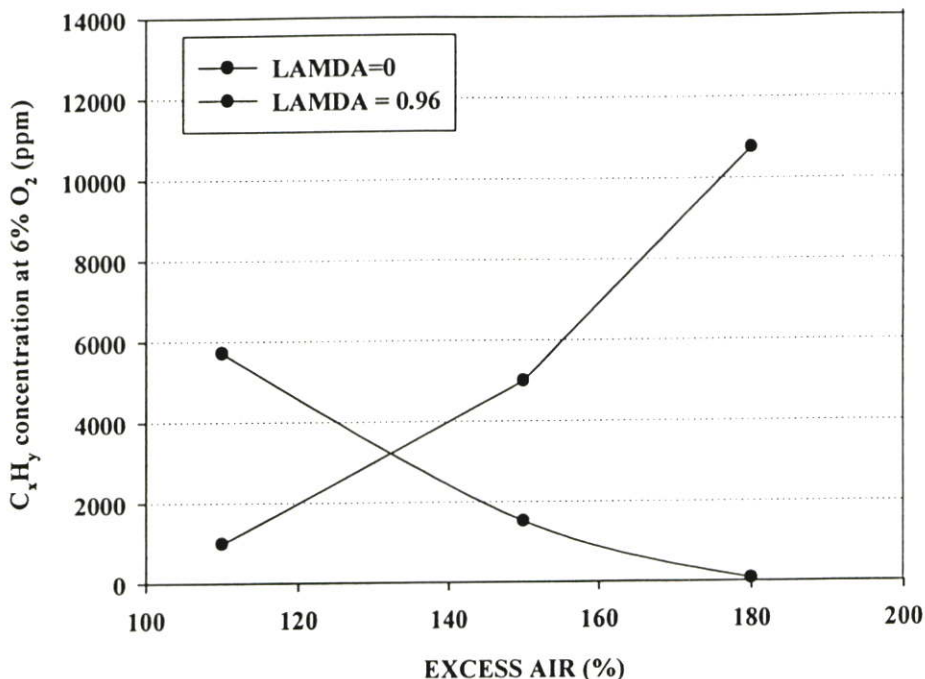
6.2.2 ปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้



รูปที่ 6.7 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 6.8 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์



รูปที่ 6.9 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอน

รูปที่ 6.7–6.9 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อปริมาณก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอากาศส่วนเกินมีอิทธิพลต่อปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 6.7 พบว่าทั้งกรณี λ เท่ากับ 0 และ 0.96 ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน โดยเมื่อพิจารณากรณี λ เท่ากับ 0 พบว่าปริมาณ CO มีค่าต่ำที่สุดที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 110% โดยมีค่าเท่ากับ 11 ppm คิดที่มาตรฐาน O₂ 6% คาดว่าเนื่องจากเงื่อนไขนี้เป็นการเผาไหม้ที่มีช่วงของการเผาไหม้กว้างที่สุด (Long flame temperature) ดังแสดงในรูปที่ 6.6 จึงทำให้มีระยะเวลาเพียงพอที่ CO จะถูกเผาไหม้กลายเป็น CO₂ เป็นสาเหตุให้ปริมาณ CO มีค่าต่ำ จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเป็น 150% และ 180% ปริมาณ CO มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้มีค่าลดลง โดยเฉพาะกรณีอากาศส่วนเกินเท่ากับ 180% มีผลของปริมาณอากาศ ซึ่งมีปริมาณมากเกินไป จึงทำให้เป็นการเพิ่มภาระให้กับปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ ทำให้อุณหภูมิมีค่าลดลง จึงเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ปริมาณ CO มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนกรณี λ เท่ากับ 0.96 พบว่าปริมาณ CO ค่าสูงมากเมื่อเทียบกับกรณี λ เท่ากับ 0 คาดว่าเนื่องมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ มีระยะเวลาในการเผาไหม้สั้นมาก ได้อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าต่ำ จึงทำให้ปริมาณ CO มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ โดยมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 3200 ppm คิดที่มาตรฐาน O₂ 6% ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 180% λ เท่ากับ 0.96

ในขณะที่ ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ รูปที่ 6.8 เมื่อพิจารณาที่กรณี λ เท่ากับ 0 พบว่า ปริมาณ NO_x มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินโดย

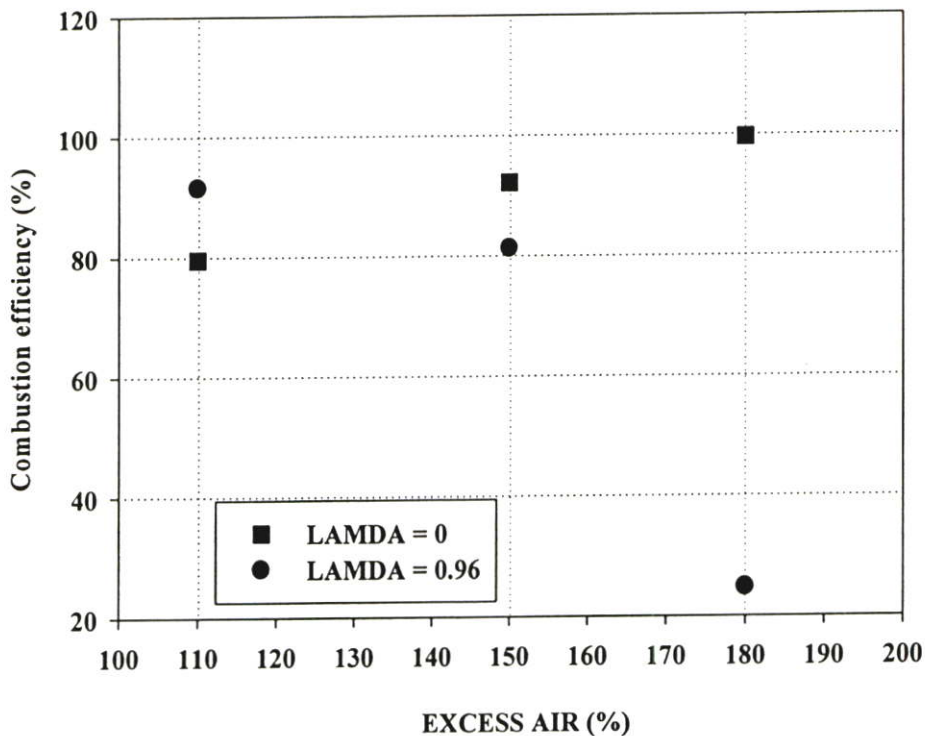
คาดว่าปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้น เกิดมาจาก NO_x สองชนิดคือ Thermal NO_x (เนื่องจากอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าสูง) และ Prompt NO_x ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน ส่งผลให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้จะมีค่าสูงขึ้นและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในอากาศมีปริมาณสูงขึ้น จึงทำให้โอกาสที่จะเกิด NO_x ทั้งสองชนิดนี้มีมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณ NO_x มีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งกรณีปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 180% มีปริมาณ NO_x มากที่สุดเท่ากับ 65 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% และมีปริมาณน้อยที่สุดเท่ากับ 43 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% ที่ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110% ตามลำดับ ส่วนกรณี λ เท่ากับ 0.96 พบว่า ปริมาณ NO_x มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินจะส่งผลให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าต่ำลงพิจารณาจากรูปที่ 6.6 ทำให้โอกาสเกิด Thermal NO_x มีน้อยลง โดยมีปริมาณน้อยสุดเท่ากับ 33 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% ที่ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 180% นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ NO_x ระหว่างกรณี λ เท่ากับ 0 และ 0.96 พบว่ากรณี λ เท่ากับ 0.96 ปริมาณ NO_x มีปริมาณน้อยกว่า เนื่องมาจากอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าต่ำ ทำให้อิทธิพลของ Thermal NO_x ลดน้อยลง

ส่วนปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอน รูปที่ 6.9 เมื่อพิจารณาที่กรณี λ เท่ากับ 0 พบว่า ปริมาณ C_xH_y มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินจาก 110 % เป็น 150% ปริมาณ C_xH_y มีค่าลดลงประมาณ 4400 ppm คาดว่าเกิดจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ได้อุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเป็น 180% พบว่า ปริมาณ C_xH_y มีปริมาณลดลงจนเหลือประมาณ 64 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่หมดทำให้เกิดการผลิตก๊าซไฮโดรคาร์บอนออกมาเพียงบางส่วน ในขณะที่กรณี λ เท่ากับ 0.96 ปริมาณ C_xH_y มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินส่งผลให้ มีระยะเวลาในการเผาไหม้สั้นลง อัตราการจุดติดต่ำโดยเฉพาะในกรณี อากาศส่วนเกิน 150% และ 180% ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 6.2.1 ก่อนหน้านี้ ซึ่งเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าต่ำดังแสดงในรูปที่ 6.6 โดยปริมาณ C_xH_y มีค่าสูงสุดที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 180% มีค่าประมาณ 10,250 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% และมีค่าน้อยที่สุดที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 110% มีค่าประมาณ 1100 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6%

6.2.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

รูปที่ 6.10 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินในกรณี λ เท่ากับ 0 ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 99% ที่ อากาศส่วนเกินเท่ากับ 180% ขณะที่ในกรณี λ เท่ากับ 0.96 ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลง โดยประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 91% ที่ อากาศส่วนเกินเท่ากับ 110%

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการเผาไหม้พบว่า สอดคล้องกับปริมาณ CO และ C_xH_y ดังแสดงในรูปที่ 6.7 และ 6.9 ซึ่งในกรณี λ เท่ากับ 0 ปริมาณ C_xH_y มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ปริมาณ CO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นั้นแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของปริมาณ C_xH_y ส่งผลมากกว่าอิทธิพลของ ปริมาณ CO จึงทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณี λ เท่ากับ 0.96 ทั้งปริมาณ C_xH_y และ CO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าลดลง ซึ่งสาเหตุในการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มของปริมาณ CO และ C_xH_y นั้นได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 6.2.2



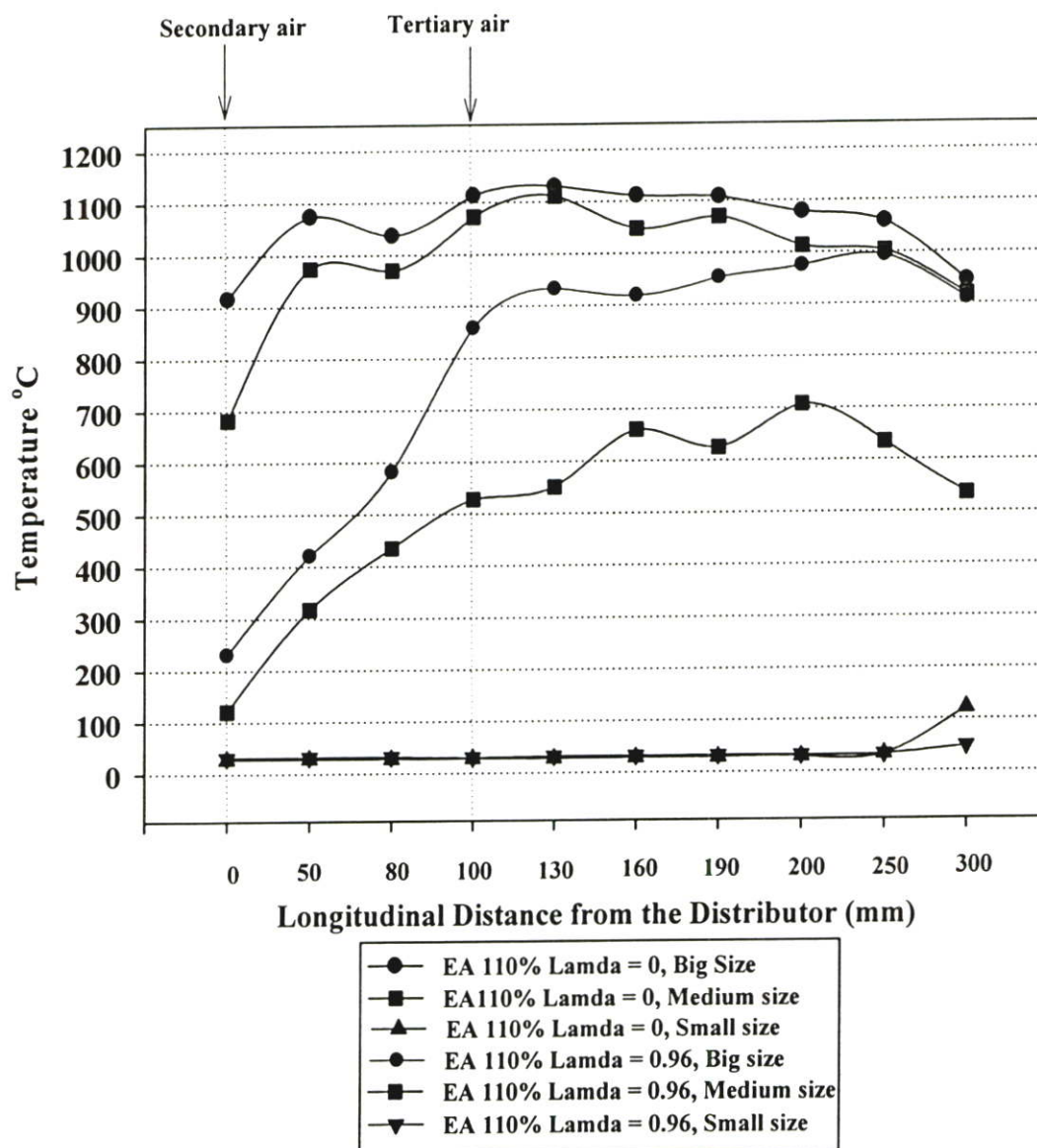
รูปที่ 6.10 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้

จากการศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาเผาไหม้และปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นพบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110% มีการกระจายอุณหภูมิภายในเตามีความสม่ำเสมอ เกิดขึ้นในบริเวณที่กว้างและมีมลพิษต่ำ โดยสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่อปริมาณอากาศทั้งหมด (λ) ที่ทำให้สมรรถนะของเตาเผาไหม้ดีที่สุดอยู่ที่ λ เท่ากับ 0 ซึ่งในที่นี้เลือกขนาดของเม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพรุนเท่ากับ 2.0 cm ภายใต้สมมุติฐานคือ ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่เผาไหม้ในช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ เมื่อมีปฏิสัมพันธ์ในเชิงความร้อนกับเม็ดวัสดุ น่าจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงอยู่ในระดับที่ดี ดังนั้นแสดงว่าขนาดของเม็ดวัสดุที่ใช้

สร้างความพรุนน่าจะส่งผลต่อสมรรถนะและปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นในเตาเผาไหม้วัสดุพรุน ซึ่งได้ทำการศึกษาในหัวข้อต่อไป

6.3 การศึกษาอิทธิพลของความพรุนของวัสดุพรุน

6.3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง

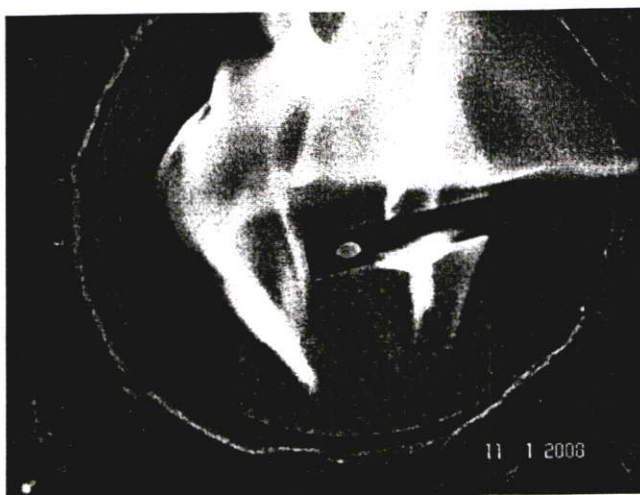


รูปที่ 6.11 แสดงอิทธิพลของความพรุนของวัสดุพรุนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง

รูปที่ 6.11-6.16 แสดงอิทธิพลของความพรุนของวัสดุพูนที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาเผาไหม้ และปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น โดยในการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนขนาดความพรุนของวัสดุพูน 3 ขนาดคือ ความพรุน 45 % (ขนาดใหญ่ (2.0 cm)) ความพรุน 27 % (ขนาดกลาง (1.0 cm)) และความพรุน 9 % (ขนาดเล็ก (0.5 cm)) ซึ่งในความพรุนแต่ละขนาดจะทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0 และ 0.96 ตามลำดับ และทำการคงที่ปริมาณอากาศส่วนเกินไว้เท่ากับ 110% ซึ่งจากรูป 6.11 จะเห็นได้ว่า ความพรุนของวัสดุพูนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูงอย่างเห็นได้ชัด โดยการเผาไหม้โดยใช้วัสดุพูนที่มีความพรุน 45 % ทั้งกรณีสัดส่วนอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0 และ 0.96 มีค่าอุณหภูมิก่อนข้างคงที่ตลอดความสูงของเตาเผาไหม้ โดยมีค่าอุณหภูมิสูงที่สุดอยู่ในช่วง 700 – 1,150 °C และบริเวณของการเผาไหม้มีช่วงที่กว้าง เกิดขึ้นทั่วทั้งเตา ในขณะที่การเผาไหม้โดยใช้วัสดุพูนที่มีความพรุน 27 % พบว่าอุณหภูมิก่อนเผาไหม้เริ่มเข้าสู่สถานะคงตัวตั้งแต่ระดับความสูง 100 mm โดยกรณี λ เท่ากับ 0 มีค่าอุณหภูมิสูงกว่ากรณี λ เท่ากับ 0.96 อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีค่ามากกว่าประมาณ 300 °C ส่วนเมื่อทำการเผาไหม้โดยใช้วัสดุพูนที่มีความพรุน 9 % พบว่าทั้งกรณี λ เท่ากับ 0 และ 0.96 การเผาไหม้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในเตาเผาไหม้แต่การเผาไหม้จะเกิดขึ้นที่บริเวณท่อทางออกของเตาเผาไหม้ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่สังเกตเห็นเปลวไฟมีลักษณะเป็นสีเหลืองลูกใหม่อยู่ที่บริเวณท่อทางออก ดังแสดงในรูปที่ 6.12 โดยอุณหภูมิที่บริเวณท่อทางออกมีค่าประมาณ 50-130 °C ส่วนอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้มีค่าประมาณ 28-30 °C

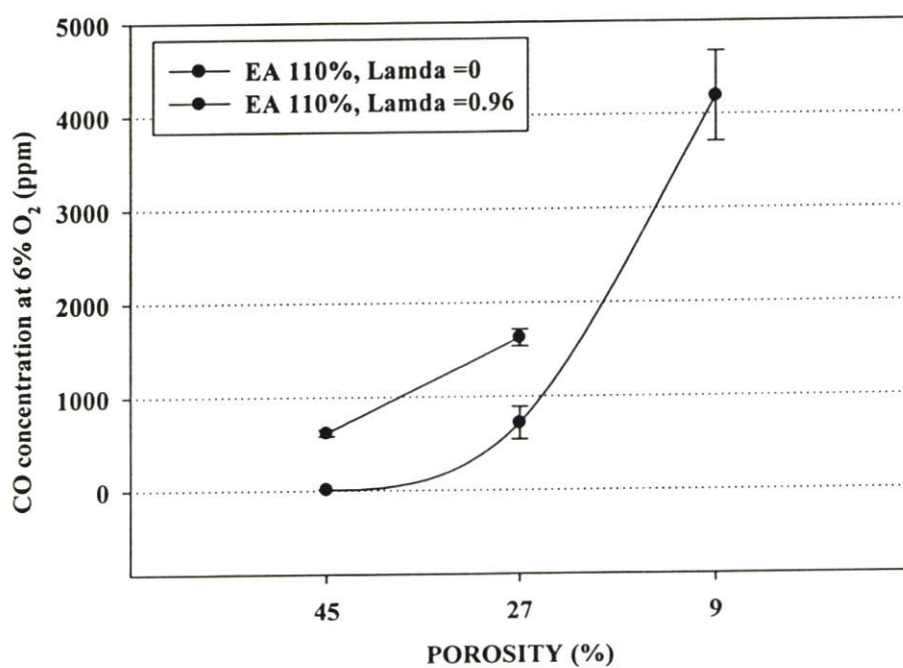
เหตุที่กรณีการเผาไหม้ด้วยวัสดุพูนที่มีความพรุน 45 % มีค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและบริเวณของการเผาไหม้สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเผาไหม้โดยใช้วัสดุพูนที่มีความพรุน น้อยกว่า เพราะเมื่อความพรุนของวัสดุพูนที่ใช้ในการเผาไหม้มีขนาดเล็กลง จะทำให้ปริมาตรช่องว่างระหว่างวัสดุสร้างความพรุนที่อยู่ในเตาเผาไหม้มีปริมาตรลดลง จึงทำให้อัตราการคลุกเคล้า (Mixing rate) ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงมีค่าลดลง เป็นสาเหตุให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้อุณหภูมิก่อนเผาไหม้มีค่าลดลงตามลำดับ นอกจากนี้ปริมาตรช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ยังมีส่วนช่วยในการ hold รักษาเปลวไฟที่เกิดขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีอีกประการหนึ่งที่มีส่วนช่วยในการส่งเสริมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์มากขึ้น

ทั้งนี้ด้วยเหตุที่ไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ขึ้นได้ภายในเตาเผาไหม้เมื่อใช้วัสดุพูนที่มีความพรุน 9 % จึงทำให้วัสดุพูนที่มีความพรุน 9 % นี้เหมาะสำหรับเป็นวัสดุที่ช่วยในการป้องกันอันตรายจากไฟย้อนกลับ (Flash back) เข้าสู่ท่อจ่ายเชื้อเพลิงขณะกำลังทำการเผาไหม้ ซึ่งสามารถทำได้โดยใส่วัสดุพูนที่มีความพรุน 9 % นี้ใส่ไว้บริเวณทำการจ่ายเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่เตาเผาไหม้

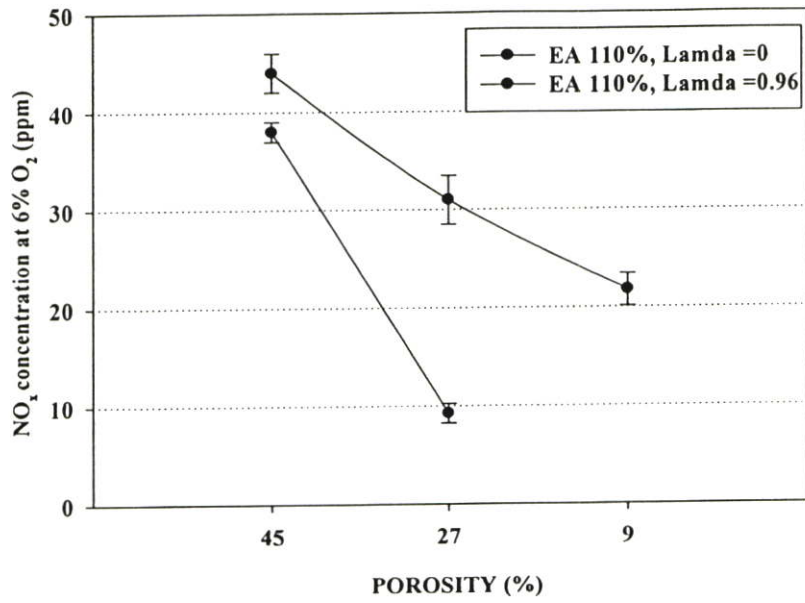


รูปที่ 6.12 แสดงพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้วัสดุพอรุนโดยใช้วัสดุพอรุนที่มีความพอรุน 7 %

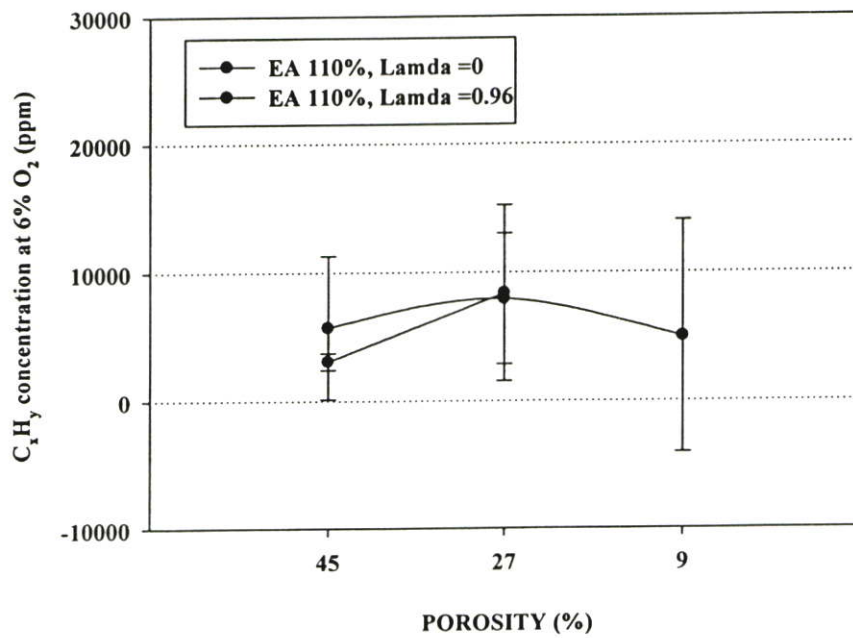
6.3.2 ปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้



รูปที่ 6.13 แสดงอิทธิพลของความพอรุนของวัสดุพอรุนที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 6.14 แสดงอิทธิพลของความพรุนของวัสดุพรุนที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์



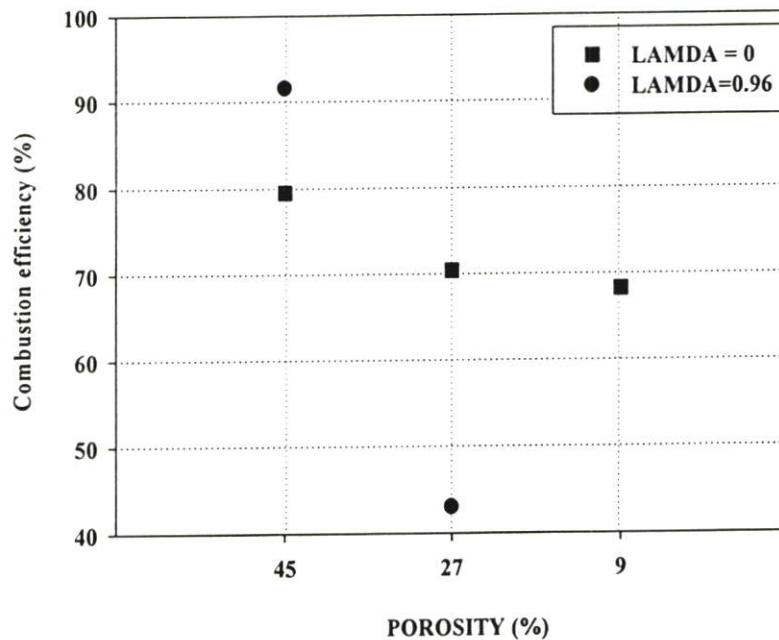
รูปที่ 6.15 แสดงอิทธิพลของความพรุนของวัสดุพรุนที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอน

รูปที่ 6.13 – 6.15 แสดงอิทธิพลของความพรุนของวัสดุพรุนที่มีผลต่อปริมาณก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความพรุนของวัสดุพรุนมีอิทธิพลต่อปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 6.13 พบว่าทั้งกรณี λ เท่ากับ 0 และ 0.96 ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามการลดความพรุนของวัสดุพรุน คาดว่าเกิดจากการที่ปริมาตรช่องว่างลดลงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดยปริมาณ CO มีค่าน้อยที่สุดเมื่อทำการเผาไหม้โดยใช้วัสดุพรุนที่มีความพรุน 45 % ในกรณี λ เท่ากับ 0 และ 0.96 มีค่าเท่ากับ 11 และ 616 ppm โดยคิดที่มาตรฐาน O_2 6% ตามลำดับ และปริมาณ CO มีค่าสูงสุดเมื่อทำการเผาไหม้โดยใช้วัสดุพรุนที่มีความพรุน 9 % ในกรณี λ เท่ากับ 0 มีค่าประมาณ 4200 ppm โดยคิดที่มาตรฐาน O_2 6% ในขณะที่ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ รูปที่ 6.14 พบว่ามีปริมาณลดลงตามการลดความพรุนของวัสดุพรุน คาดว่าเกิดมาจากเมื่อทำการลดความพรุนของวัสดุพรุน ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเป็นการเผาไหม้ที่อุณหภูมิเปลวไฟมีค่าต่ำ (Low flame temperature) พิจารณาจากรูปที่ 6.11 ทำให้โอกาสเกิด Thermal NO_x (Zeldovich mechanism) มีน้อยลง เนื่องจาก NO_x ประเภทนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ($> 1300^\circ C$) และด้วยเหตุที่ LPG เป็นเชื้อเพลิงที่ไม่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนจึงทำให้ ไม่มีโอกาสเกิด fuel NO_x เช่นเดียวกัน ดังนั้นปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จึงมีปริมาณต่ำ ซึ่งปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่คาดว่าจะเกิดขึ้นมาจาก prompt NO_x ซึ่งเป็น NO_x ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากันในระหว่างไฮโดรคาร์บอนกับไนโตรเจนในของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ โดยปริมาณ NO_x มีปริมาณสูงขึ้นเมื่อทำการเผาไหม้โดยใช้วัสดุพรุนที่มีความพรุน 45 % ในกรณี λ เท่ากับ 0 และ 0.96 มีปริมาณเท่ากับ 43 และ 38 ppm โดยคิดที่มาตรฐาน O_2 6% ตามลำดับ และปริมาณ NO_x มีปริมาณน้อยที่สุดเมื่อทำการเผาไหม้โดยใช้วัสดุพรุนที่มีความพรุน 27 % ในกรณี λ เท่ากับ 0.96 โดยมีปริมาณเท่ากับ 8 ppm ที่มาตรฐาน O_2 6% เหตุที่ ปริมาณ NO_x มีค่าต่ำเนื่องจาก เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ได้อุณหภูมิจากการเผาไหม้ประมาณ $600^\circ C$ และกลไกการเกิดปฏิกิริยาสลาย NO_x ของอนุมูลไฮโดรคาร์บอน

ส่วนปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอน รูปที่ 6.15 พบว่าปริมาณ C_xH_y มีค่าใกล้เคียงกัน โดยเมื่อทำการเปลี่ยนความพรุนของวัสดุพรุนจากความพรุน 45 % เป็น 27 % พบว่าปริมาณ C_xH_y มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์มากขึ้นและอุณหภูมิจากการเผาไหม้ที่มีค่าต่ำลง ดังรูปที่ 6.11 โดยเฉพาะกรณี λ เท่ากับ 0.96 พบว่าปริมาณ C_xH_y มีค่าสูงที่สุดประมาณ 8000 ppm โดยคิดที่มาตรฐาน O_2 6% เนื่องจากเป็นกรณีที่มีค่าอุณหภูมิจากการเผาไหม้มีค่าต่ำประมาณ $600 - 700^\circ C$ ในขณะที่เผาไหม้โดยใช้วัสดุพรุนที่มีความพรุน 9 % กรณี λ เท่ากับ 0 พบว่าปริมาณ C_xH_y มีค่าลดลงเป็น 5000 ppm โดยคิดที่มาตรฐาน O_2 6% เมื่อพิจารณาประกอบความเข้มข้นของ CO ที่สูงขึ้นอย่างมากในกรณีนี้จึงอธิบายได้ว่า C_xH_y ได้ทำปฏิกิริยาต่อไปเป็น CO ในปริมาณที่มากกว่ากรณีของการใช้วัสดุพรุนที่มีความพรุน 27 % อย่างไรก็ตาม ค่าที่วัดได้มีความกวัดแกว่งสูงอันเป็นสาเหตุมาจากความไม่เสถียรของการเผาไหม้ในเงื่อนไขการทดสอบนี้

ในที่นี้การเผาไหม้โดยใช้วัสดุพรุนที่มีความพรุน 9% ในกรณี λ เท่ากับ 0.96 ไม่สามารถบันทึกค่าก๊าซไอเสียได้ (Not available) เนื่องจากเกิดการเผาไหม้บริเวณท่อทางออกของเตาเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 6.12 ซึ่งเป็นจุดที่ทำการเก็บค่าก๊าซที่ได้จากการทดลอง จึงทำให้ปริมาณความเข้มข้นของ CO และ C_xH_y มีค่าสูงเกินกว่าขีดจำกัดของเครื่องวัดไอเสีย ส่วนปริมาณความเข้มข้นของ NO_x ไม่สามารถเก็บค่าได้

6.3.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

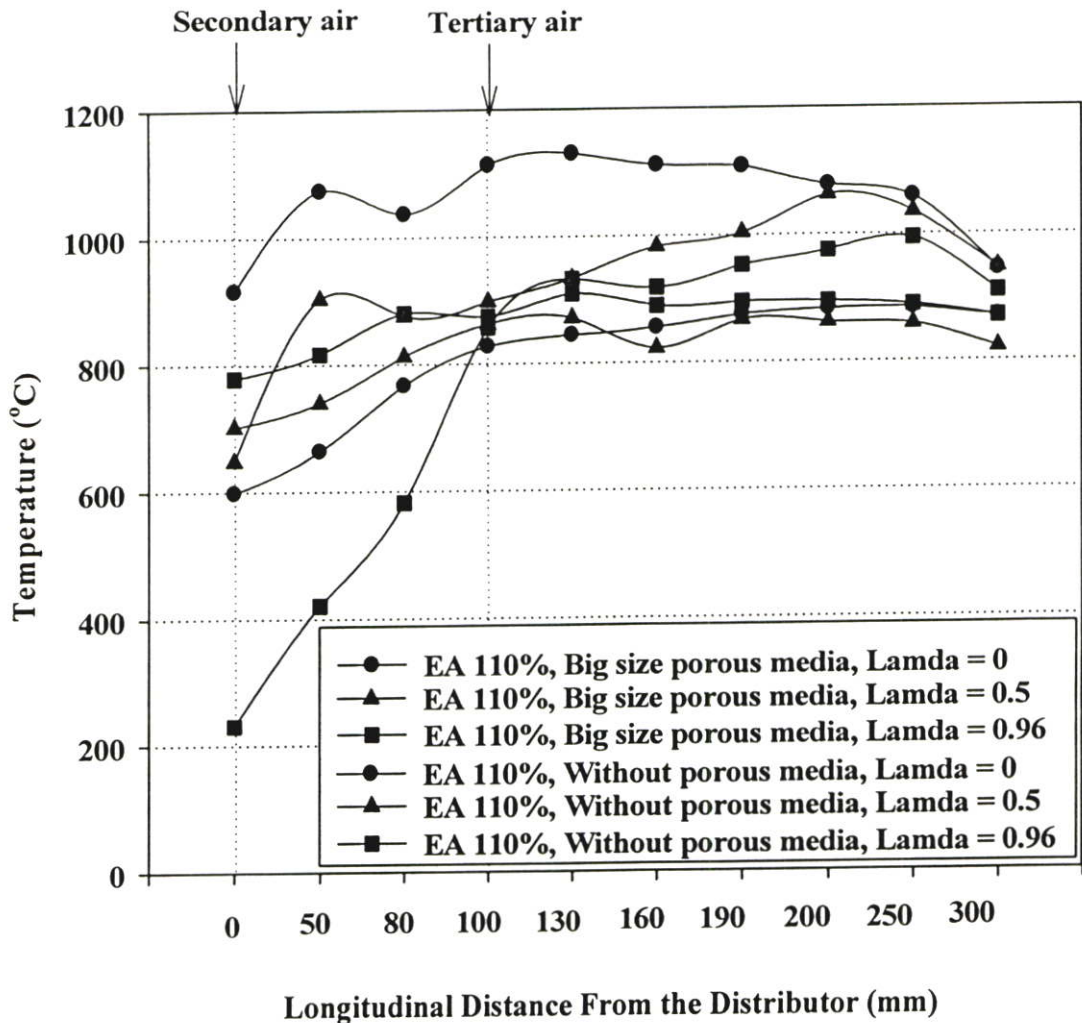


รูปที่ 6.16 แสดงอิทธิพลของความพรุนของวัสดุพรุนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้

รูปที่ 6.16 แสดงอิทธิพลของความพรุนของวัสดุพรุนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเปลี่ยนความพรุนของวัสดุพรุนในกรณี λ เท่ากับ 0 และ 0.96 ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO และ C_xH_y ที่เกิดจากการเผาไหม้ ดังแสดงในรูป 6.13 และ 6.15 โดยจะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนความพรุนของวัสดุพรุน ปริมาณ CO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณ C_xH_y มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความพรุนของวัสดุพรุนจากความพรุน 45% เป็น 27% แต่เมื่อเปลี่ยนวัสดุพรุนที่มีความพรุน 9% แล้วปริมาณ C_xH_y มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรณีวัสดุพรุนที่มีความพรุน 9% อิทธิพลของปริมาณ CO ส่งผลมากกว่าอิทธิพลของปริมาณ C_xH_y จึงทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลง ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุในการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มของปริมาณ CO และ C_xH_y นั้นได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 6.3.2

6.4 การศึกษาอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุน

6.4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง

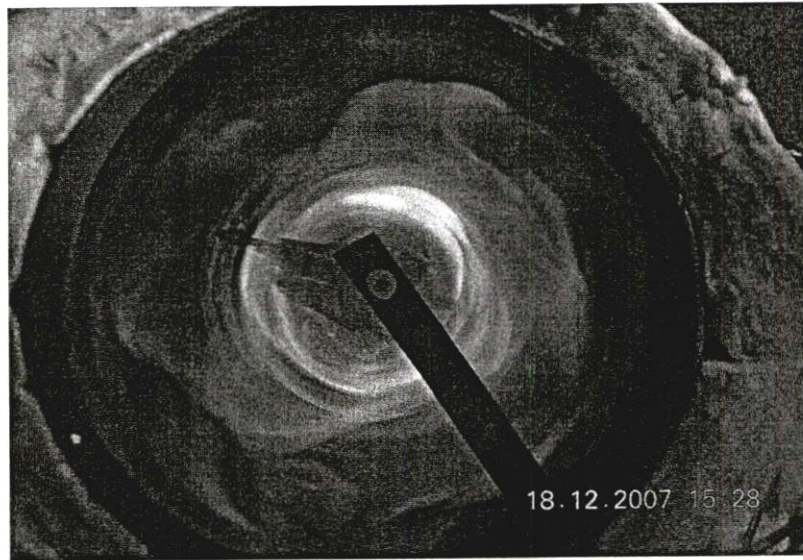


รูปที่ 6.17 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระดับความสูง

รูปที่ 6.17-6.24 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุนที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาเผาไหม้และปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น โดยในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองการเผาไหม้ระหว่างกรณีใส่วัสดุสร้างความพรุนและไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุน ซึ่งในแต่ละกรณีทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0, 0.5 และ 0.96 ตามลำดับ และทำการคงที่ปริมาณอากาศส่วนเกินไว้เท่ากับ 110% ซึ่งจากรูป 6.17 จะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณากรณีการเผาไหม้โดยใส่วัสดุสร้างความพรุนพบว่าที่ λ เท่ากับ 0 อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าสูงที่สุด ประมาณ 1130 °C และอุณหภูมิจะมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่ม λ เป็น 0.5 และ

0.96 ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 1050 และ 990 °C ตามลำดับ โดยในกรณี λ เท่ากับ 0.5 และ 0.96 อุณหภูมิเริ่มครั้งที่ตั้งระดับความสูง 100 mm จากตะแกรงกระจายของผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง เป็นต้นไป ในขณะที่เมื่อพิจารณาการเผาไหม้โดยไมใส่วัสดุสร้างความพรุนพบว่าอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ตลอดความสูงของเตาเผาไหม้ แต่ทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าอุณหภูมิก่อนข้างต่ำ ซึ่งในช่วงตั้งระดับความสูง 100mm จากตะแกรงกระจายของผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง (ช่วงที่อุณหภูมิก่อนข้างคงที่) อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ในกรณีไมใส่เม็ดวัสดุสร้างความพรุน มีค่าอุณหภูมิต่ำกว่ากรณีใส่เม็ดวัสดุสร้างความพรุนอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 800-920 °C

เหตุที่อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ในกรณีใส่เม็ดวัสดุสร้างความพรุนมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่ใส่เม็ดวัสดุสร้างความพรุน คาดว่าเนื่องจากเม็ดวัสดุสร้างความพรุนที่ใส่เข้าไปในเตาเผาไหม้นั้น จะมีส่วนช่วยให้เกิดความปั่นป่วนย่อยๆ ในช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ ทำให้อัตราการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นไปได้ด้วยดี อีกทั้งยังช่วยอุ่น (Preheating) ของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงทางด้าน upstream ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น อีกทั้งยังทำหน้าที่ เป็นตัวสะสมความร้อน หรือ Temperature Flywheel ช่วยให้ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สูงเกินไปในขณะที่ช่วยป้องกันความร้อนกลับมายังส่วนผสมเชื้อเพลิงและอากาศที่ยังไม่เผาไหม้ไปพร้อมๆ กัน ดังนั้น คาดว่าการใส่เม็ดวัสดุสร้างความพรุนในเตาเผาไหม้นั้น จะช่วยในการส่งเสริมการเผาไหม้ให้ดีขึ้น ช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ ในขณะที่การเผาไหม้โดยไมใส่เม็ดวัสดุสร้างความพรุน จะส่งผลให้อัตราการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงลดลงจึงทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าต่ำ ซึ่งพฤติกรรมของการเผาไหม้ที่เกิดแสดงดังรูปที่ 6.18 ซึ่งเปลวไฟมีลักษณะหมุนควงด้วยความเร็วรอบผนังเตาเผาไหม้ (เตาเผาไหม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเตาเผาไหม้ประเภท เตาเผาไหม้แบบหมุนวน (swirl combustor)) และขณะทำการเผาไหม้มีเขม่าเป็นจำนวนมากดังแสดงในรูป 6.19 โดยเขม่าที่เกิดขึ้นนี้จะจับตัวกันเป็นก้อนที่ตัววัดอุณหภูมิ (Thermo couple) ดังแสดงในรูปที่ 6.20 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 6.18 แสดงลักษณะของเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้ที่ไม่ได้วัสดุสร้าง
ความพรุน

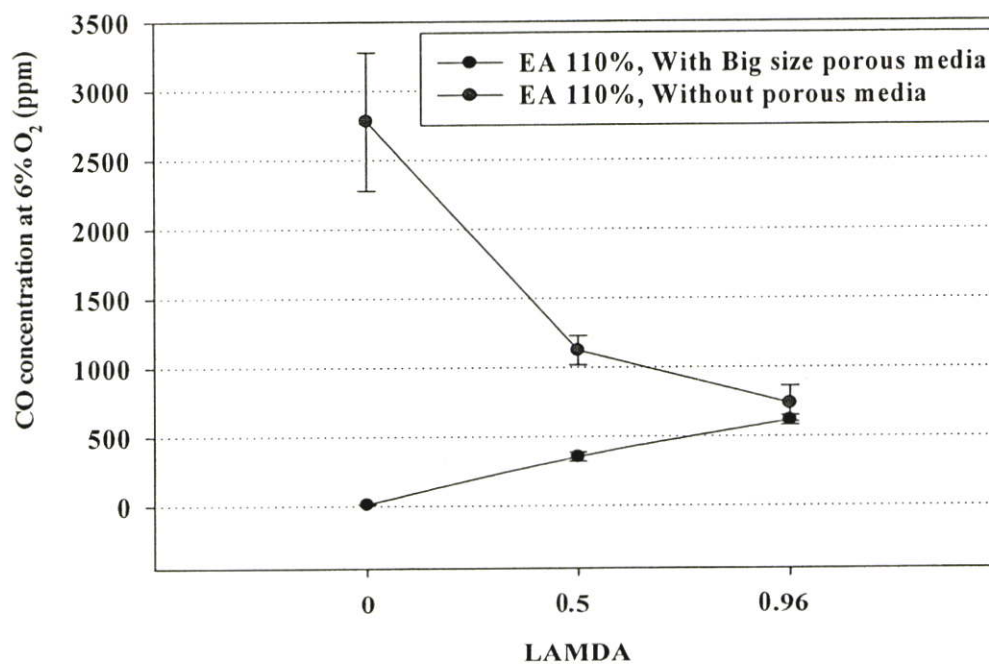


รูปที่ 6.19 แสดงเขม่าที่เกิดขึ้นขณะทำการเผาไหม้โดยไม่ได้วัสดุสร้าง
ความพรุน

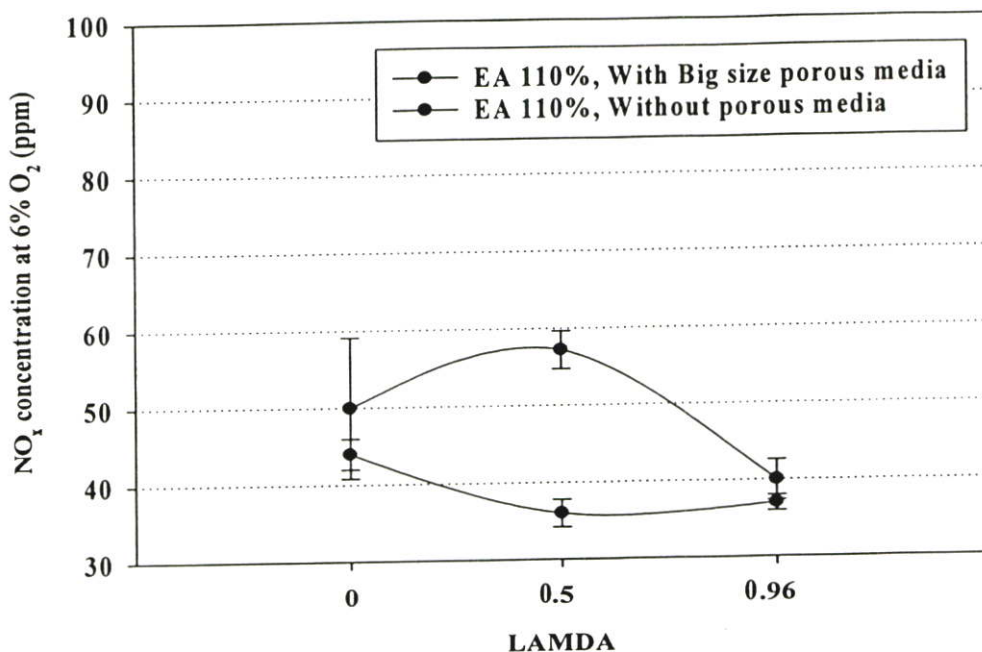


รูปที่ 6.20 แสดงลักษณะของเขม่าที่จับตัวกันเป็นก้อน เมื่อทำการเผาไหม้โดยไม้ไผ่วัสดุสร้าง
ความพรุน

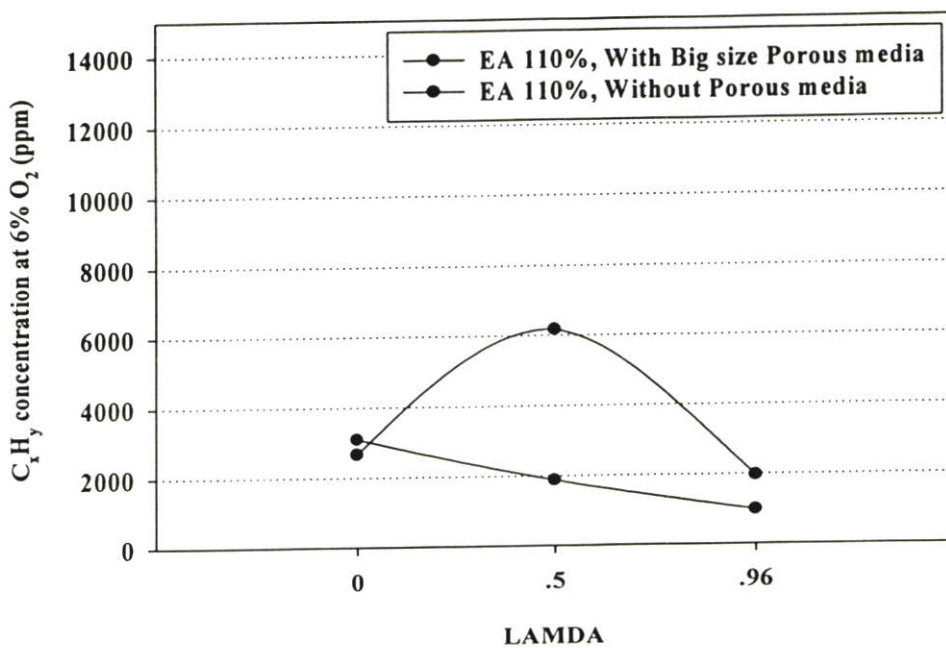
6.4.2 ปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้



รูปที่ 6.21 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม้ไผ่วัสดุสร้างความพรุนที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้น
ของคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 6.22 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างพรุนที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์



รูปที่ 6.23 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างพรุนที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอน

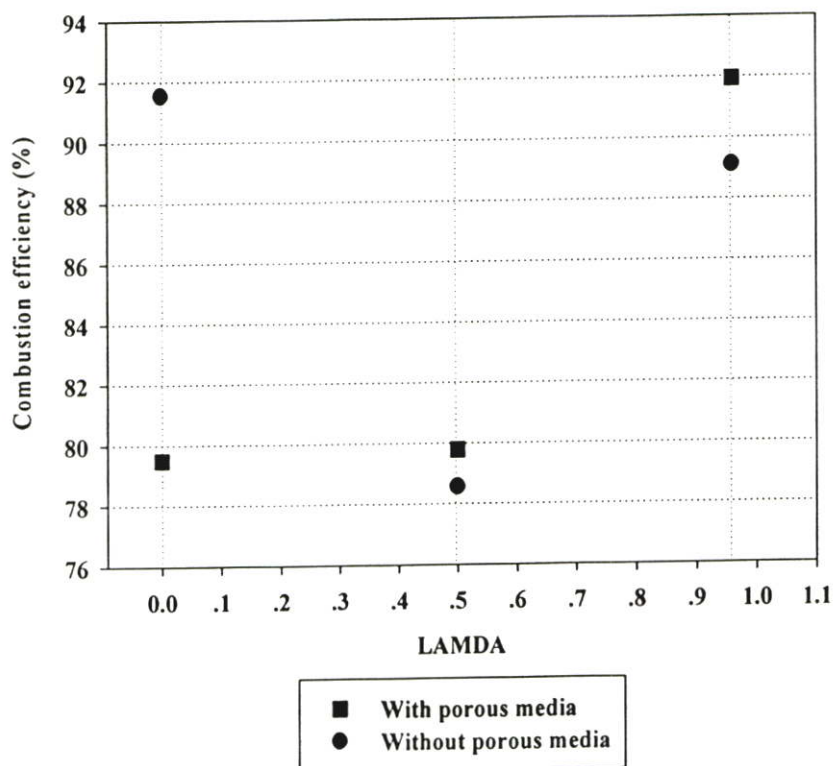
รูปที่ 6.21 – 6.23 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างความปลอดภัยที่มีผลต่อปริมาณก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างความปลอดภัยมีอิทธิพลต่อปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 6.21 พบว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นในกรณีเผาไหม้โดยใส่วัสดุสร้างความปลอดภัย มีปริมาณน้อยกว่ากรณีเผาไหม้โดยไม่ใส่วัสดุสร้างความปลอดภัยอย่างเห็นได้ชัด คาดว่าเกิดจากการที่เมื่อทำการเผาไหม้โดยใส่วัสดุสร้างความปลอดภัยนั้น จะมีระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้นาน จึงทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าสูง นอกจากนี้เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) แล้วแนวโน้มปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นของกรณีเผาไหม้โดยใส่วัสดุสร้างความปลอดภัยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลง λ เนื่องจากการเพิ่ม λ จะส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ลดน้อยลง ทำให้มีระยะเวลาไม่เพียงพอที่ CO จะถูกเผาไหม้กลายเป็น CO₂ จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ได้ อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าดังรูป 6.17 โดยปริมาณ CO มีค่าสูงที่สุดที่ λ เท่ากับ 0.96 มีค่าประมาณ 550 ppm คิคที่มาตรฐาน O₂ 6% และมีค่าต่ำที่สุดที่ λ เท่ากับ 0 มีค่าประมาณ 11 ppm คิคที่มาตรฐาน O₂ 6% ส่วนกรณีเผาไหม้โดยไม่ใส่วัสดุสร้างความปลอดภัย เมื่อทำการเพิ่ม λ แล้วพบว่าปริมาณ CO มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่ม λ คาดว่าจะส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้น เพราะเมื่อทำการเพิ่ม λ ปริมาณอากาศบางส่วนอาจจะเคลื่อนที่ลงไปบริเวณ Upstream ก่อนที่จะเคลื่อนที่กลับมาสู่บริเวณ Downstream เป็นการเกิดการหมุนวนในแนวตั้ง โดยปริมาณ CO มีค่าสูงที่สุดที่ λ เท่ากับ 0 มีค่าประมาณ 2,780 ppm คิคที่มาตรฐาน O₂ 6% และมีค่าต่ำที่สุดที่ λ เท่ากับ 0.96 มีค่าประมาณ 750 ppm คิคที่มาตรฐาน O₂ 6%

รูปที่ 6.22 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างความปลอดภัยที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ จากรูปจะเห็นได้ว่าปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นในกรณีเผาไหม้โดยใส่วัสดุสร้างความปลอดภัย มีปริมาณน้อยกว่ากรณีเผาไหม้โดยไม่ใส่วัสดุสร้างความปลอดภัย คาดว่าเกิดจากเมื่อทำการเผาไหม้โดยใส่วัสดุสร้างความปลอดภัย จะมีระยะเวลาในการเผาไหม้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับเผาไหม้โดยใส่วัสดุสร้างความปลอดภัย จึงทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สอดคล้องกับอุณหภูมิการเผาไหม้ดังรูปที่ 6.17 นอกจากนี้เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) แล้วแนวโน้มปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นของกรณีเผาไหม้โดยใส่วัสดุสร้างความปลอดภัยมีแนวโน้มลดลงตามการเปลี่ยนแปลง λ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่ม λ ส่งผลให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าลดลง ทำให้โอกาสเกิด Thermal NO_x ลดน้อยลง โดยปริมาณ NO_x มีค่าสูงที่สุดที่ λ เท่ากับ 0 มีค่าประมาณ 43 ppm คิคที่มาตรฐาน O₂ 6% และมีค่าต่ำที่สุดที่ λ เท่ากับ 0.5 มีค่าประมาณ 36 ppm คิคที่มาตรฐาน O₂ 6% ส่วนกรณีเผาไหม้โดยไม่ใส่วัสดุสร้างความปลอดภัย เมื่อทำการเพิ่ม λ จาก 0 เป็น 0.5 แล้วพบว่าปริมาณ NO_x มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 8 ppm คิคที่มาตรฐาน O₂ 6% เนื่องจากอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้โอกาสเกิด Thermal NO_x เพิ่มมากขึ้น จากนั้นเมื่อทำการเพิ่ม λ เป็น 0.96 พบว่าปริมาณ NO_x มีปริมาณลดลงจนเหลือประมาณ 40 ppm

คิดที่มาตรฐาน O_2 6% ทั้ง ๆ ที่ เงื่อนไขนี้มีอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้สูงที่สุดในกรณีเผาไหม้ โดยไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุน ซึ่งในกรณีนี้ทางผู้วิจัยยังไม่สามารถหาข้อสรุปได้

รูปที่ 6.23 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุนที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอน จากรูปจะเห็นได้ว่าปริมาณ C_xH_y ที่เกิดขึ้นในกรณีเผาไหม้โดยไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุน มีปริมาณน้อยกว่ากรณีเผาไหม้โดยไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุน คาดว่าเกิดจากเมื่อทำการเผาไหม้โดยไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุน จะมีระยะเวลาในการเผาไหม้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับเผาไหม้โดยไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุน จึงทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สอดคล้องกับอุณหภูมิการเผาไหม้ดังรูปที่ 6.17 นอกจากนี้เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของอากาศส่วนที่สามต่ออากาศทั้งหมด (λ) แล้วแนวโน้มปริมาณ C_xH_y ที่เกิดขึ้นของกรณีเผาไหม้โดยไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุนมีแนวโน้มลดลงตามการเปลี่ยนแปลง λ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่ม λ ส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ลดน้อยลง ทำให้ไม่มีระยะเวลาเพียงพอที่เชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้กลายเป็น C_xH_y ได้หมดจึงทำให้ปริมาณ C_xH_y ที่เกิดขึ้นมีปริมาณต่ำโดยปริมาณ C_xH_y มีค่าสูงที่สุดที่ λ เท่ากับ 0 มีค่าประมาณ 3,100 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% และ มีค่าต่ำที่สุดที่ λ เท่ากับ 0.96 มีค่าประมาณ 1500 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% ส่วนกรณีเผาไหม้โดยไม่ใส่วัสดุสร้างความพรุน เมื่อทำการเพิ่ม λ จาก 0 เป็น 0.5 แล้วพบว่าปริมาณ C_xH_y มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 3,000 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% เหตุที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเนื่องมาจากเมื่อทำการเผาไหม้ที่ λ เท่ากับ 0.5 เชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้กลายเป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่ที่ระดับความสูง 0 mm จากแผ่นกระจายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ จากนั้นเมื่อเกิดการเผาไหม้จนถึงที่บริเวณระดับความสูง 100mm อากาศเย็นจะถูกจ่ายเข้ามาในเตาเผาไหม้ เป็นเหตุให้การเผาไหม้เกิดการชะลอ จึงทำให้ C_xH_y ไม่สามารถเผาไหม้ต้องจนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ C_xH_y จึงมีปริมาณเพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อทำการเพิ่ม λ เป็น 0.96 พบว่าปริมาณ C_xH_y มีปริมาณลดลงจนเหลือประมาณ 2000 ppm คิดที่มาตรฐาน O_2 6% เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่ม λ ส่งผลให้เกิดการคลุกเคล้าของก๊าซไอเสีย เนื่องจากการหมุนวนในแนวตั้งดังที่ได้กล่าวมาแล้วที่มีผลให้ การเผาไหม้ดีขึ้น ทำให้ปริมาณ C_xH_y ที่เกิดขึ้นมีปริมาณต่ำลง

6.4.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้



รูปที่ 6.24 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างพรุนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้

รูปที่ 6.24 แสดงอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างพรุนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ λ เท่ากับ 0 ประสิทธิภาพการเผาไหม้กรณีไม่ใส่วัสดุสร้างพรุนมีค่าสูงกว่ากรณีใส่วัสดุสร้างพรุน โดยมีค่าเท่ากับ 91 % เนื่องจากปริมาณ C_xH_y มีค่าต่ำ ในขณะที่เมื่อเพิ่ม λ เป็น 0.5 และ 0.96 ประสิทธิภาพการเผาไหม้กรณีใส่วัสดุสร้างพรุนมีค่าสูงกว่ากรณีไม่ใส่วัสดุสร้างพรุน เนื่องจากปริมาณ C_xH_y และ CO ดังแสดงในรูป 6.21 และ 6.23 ที่เกิดขึ้นในกรณีใส่วัสดุสร้างพรุนมีค่าน้อยกว่ากรณีใส่วัสดุสร้างพรุนอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังพบว่ากรณีใส่และไม่ใส่วัสดุสร้างพรุนเมื่อเพิ่ม λ เป็น 0.5 และ 0.96 ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO และ C_xH_y โดยเมื่อเพิ่ม λ เป็น 0.5 และ 0.96 ปริมาณ C_xH_y มีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาณ CO กรณี ไม่ใส่วัสดุสร้างพรุนปริมาณ CO มีแนวโน้มลดลง แต่ กรณีใส่วัสดุสร้างพรุนปริมาณ CO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของปริมาณ C_xH_y ที่เกิดขึ้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้มากกว่าอิทธิพลของปริมาณ CO ดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ

บทที่ 7

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

7.1.1 การจ่ายอากาศในชั้นที่ 1 และ 2 ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ เนื่องจากมีระยะเวลาในการเผาไหม้มาก จึงทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าสูงกว่ากรณีจ่ายอากาศชั้นที่ 2 และ 3 อย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้ปริมาณ ก๊าซ CO และ C_xH_y มีปริมาณน้อย ซึ่งด้วยเหตุที่ว่าเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จึงทำให้ ปริมาณ NO_x มีปริมาณสูง เนื่องจากผลของ Thermal NO_x แต่ถึงกระนั้นปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นยังอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่ามาตรฐานอยู่มาก

7.1.2 การเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเป็นการเพิ่มอัตราการผสม ทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมามากขึ้น และเป็นการเพิ่มพจน์ของการพา ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาขยับไปด้าน downstream จึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณ C_xH_y มีปริมาณลดลง แต่ถ้าปริมาณอากาศส่วนเกินมากเกินไปก็จะส่งผลให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ลดลงเนื่องจากการเพิ่มภาระให้กับระบบ และยังคงส่งผลให้อัตราการเกิด Thermal NO_x และ Prompt NO_x เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ลดลง จึงทำให้ปริมาณ CO เพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีระยะเวลาในเผาไหม้เป็น CO_2

7.1.3 ความพรุนของวัสดุพรุนส่งผลต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้ วัสดุพรุน โดยเมื่อลดความพรุนของวัสดุพรุนพบว่าอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าลดลง เนื่องจากความพรุนลดลง ทำให้อัตราการผสมต่ำลง จึงทำให้เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ปริมาณ CO และ C_xH_y มีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลง ซึ่งคาดว่าเกิดจากผลของ Thermal NO_x

7.1.4 เมื่อทำการเผาไหม้กรณีใส่วัสดุสร้าง ความพรุนพบว่าอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่ามากกว่ากรณีไม่ใส่วัสดุสร้าง ความพรุนเนื่องจากวัสดุสร้าง ความพรุนช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ เช่น ทำให้อัตราการผสมเพิ่มขึ้นและยังทำให้เกิดการอุ่นของผสม บริเวณ upstream ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จึงทำให้ปริมาณ CO และ C_xH_y , NO_x ที่เกิดขึ้น มีปริมาณน้อย ซึ่งถึงแม้ว่าการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกรณีไม่ใส่วัสดุสร้าง ความพรุนมีความคงที่มากกว่า แต่ปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นมีมากและเกิดเขม่าเกาะตัวกันเป็นก้อน ดังนั้นจึงเป็นการไม่เหมาะสมในการนำเตาเผาไหม้ประเภทนี้มาติดตั้งเข้ากับระบบของเซลล์เชื้อเพลิง แต่ทั้งนี้ผลการทดลองการศึกษาอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่วัสดุสร้าง ความพรุนที่ได้จากงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดเฉพาะเงื่อนไขการทดสอบและลักษณะ โครงสร้างของเตาเผาไหม้ เฉพาะในงานวิจัยนี้เท่านั้น

จากการศึกษาอิทธิพลทั้งสี่ที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มี การจ่ายอากาศเป็นขั้นพบว่า เมื่อมีการจ่ายอากาศแบบขั้น อุณหภูมิในช่วงแรกของการเผาไหม้จะลดต่ำลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการแบ่งอากาศให้มีการผสมที่ระยะห่างออกจากแผ่นกระจายก๊าซมากขึ้น อุณหภูมิในช่วงดังกล่าวจะยิ่งลดต่ำลงและส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ การจ่ายที่บริเวณ ช่องจ่ายอากาศชั้นที่ 1 (Secondary air) เป็นหลักจะทำให้ การเผาไหม้เกิดขึ้นในบริเวณที่กว้างที่สุด ในช่วงที่มีการศึกษา และในทุกกรณีที่ศึกษานี้ มีการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ต่ำ (ไม่เกิน 45 ppm) คาดว่าเนื่องจากเมื่อวัสดุพูนสร้างความพูนมีส่วนช่วยให้เกิดความปั่นป่วนย่อยๆ ในช่องว่าง ระหว่างเมื่อวัสดุพูน ทำให้อัตราการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นไปได้ด้วยดี โดยเฉพาะ กรณีที่ปริมาณอากาศส่วนเกินมีค่าสูง อีกทั้งยังช่วยอุ่นของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงทางด้าน upstream ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและยังทำหน้าที่ เป็นตัวสะสมความร้อน ช่วยให้ความร้อนที่เกิดขึ้น จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สูงเกินไปในขณะที่ช่วยป้องกันความร้อนกลับมายังส่วนผสมเชื้อเพลิงและ อากาศที่ยังไม่เผาไหม้ไปพร้อมๆ กัน โดยเงื่อนไขที่ดีที่สุดในช่วงที่ทำการศึกษานี้สำหรับการนำ เตาเผาไหม้วัสดุพูนนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงคือ เงื่อนไขปริมาณอากาศส่วนเกิน 110% ที่ λ เท่ากับ 0 เตาเผาไหม้โดยใช้วัสดุพูนขนาด 2 cm และทำการจ่ายอากาศที่ชั้นที่ 1 และ 2 ของเตาเผาไหม้ ซึ่งมีอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าประมาณ 1100°C ปริมาณ CO NO_x และ C_xH_y มีค่าเท่ากับ 11 43 และ 5,717 ppm ที่ O₂ 6% ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่า ประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้เท่ากับ 79%

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้ได้ทำการสรุปถึงข้อเสนอแนะที่เกี่ยวกับเตาเผาไหม้วัสดุพูนที่มีการจ่ายอากาศ เป็นขั้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวกับเตาเผาไหม้วัสดุพูน ที่มีการจ่ายอากาศเป็นขั้น ต่อไปในอนาคตหรือเพื่อการนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปต่อยอดและ ออกแบบเตาเผาไหม้วัสดุพูนแบบอื่น ที่มีสมรรถนะทางความร้อนที่ดีกว่าหรือใกล้เคียงกันนั้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.2.1 ควรเพิ่มความสูงของเตาเผาไหม้ ให้มากขึ้น โดยคาดว่าจะทำให้ระยะเวลาในการเผา ไหม้เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้บริเวณของการเผาไหม้ให้มีความกว้างขึ้นและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ มีปริมาณลดลง

7.2.2 ควรแบ่งการจ่ายอากาศ โดยให้มีการจ่ายอากาศในทั้งสามชั้นคือ ชั้นที่ 1 2 และ 3 ซึ่ง คาดว่าจะส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอยิ่งขึ้น

7.2.3 ควรเพิ่มสัดส่วนปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่ง ให้เป็นอัตราส่วนผสมหนา (Fuel rich) ซึ่งหนากว่า flammability limit ของ propane (อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.44 [22]) โดยคาดว่าจะทำ ให้ปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงและประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าสูงขึ้น

7.2.4 ควรเพิ่มระยะของตำแหน่งการจ่ายอากาศส่วนที่ 2 ให้มากขึ้น โดยจ่ายที่ระดับความสูงในช่วง 50-80 mm จากตระแกรง ซึ่งคาดว่าจะทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอยิ่งขึ้น เนื่องจากระยะห่างของตำแหน่งการจ่ายอากาศของเตาเผาใหม่ในงายวิจัยนี้มีระยะห่างเกินไป จึงทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าลดลง

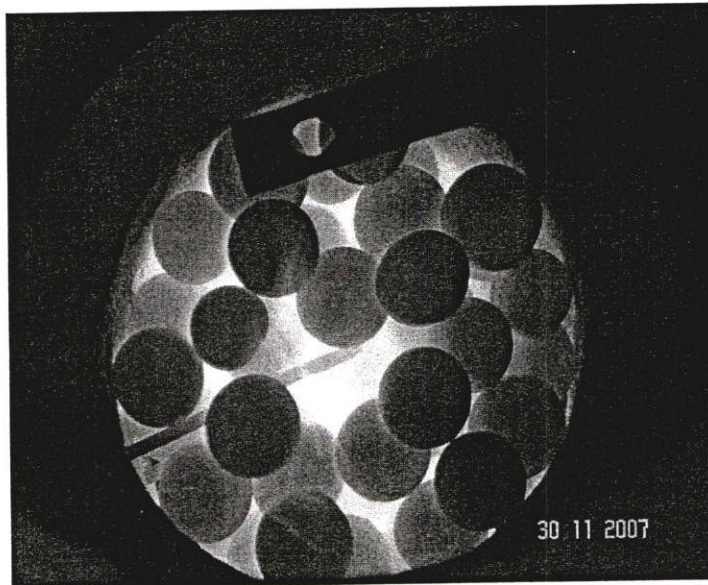
บรรณานุกรม

- [1] <http://www.eppo.go.th>
- [2] P. Michael, H. Arpad, P. Martin and P. Dennis. 2004, "Integrated module for solid oxide fuel cell systems." United States Patent. US 6,749,958 B2. Jun. 15.
- [3] M. Kelley and T. Grover. 2003, "Solid-oxide fuel cell system having an integrated air supply system," United States Patent. US 6,608,463 B1. Aug. 19.
- [4] J. Senetor, P. Towler and R. Harness. 2002, "Multi-state combustion for fuel processing for use with fuel cell," United States Patent. US 6,342,197 B1. Jan. 29.
- [5] J.R. Howell, M.J. Hall and J.L. Ellzey. 1996, "Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media," Prog. Energy Combust Sci. Vol.22 . pp.121-145.
- [6] P. Hsu, F. Evans and J.R.Howell. 1993, "Experimental and Numerical Study of Premixed Combustion with Non-homogeneous Porous Ceramic," Combust. Sci. Technol. Vol. 90, 149-172.
- [7] S.Jugjai, N.Wongpanit, T.Laocketkan, S.Nokkaew. 2002, "The combustion of liquid fuels using a porous medium. Experimental Thermal and Fluid Science," Vol.26 .15-23.
- [8] M.Kaplan and M. J. Hall. 1995, "The Combustion of Liquid Fuels within a Porous Media Radiant Burner," Experimental Thermal and Fluid Science. Vol.11 (1) .13-20.
- [9] อรรณพ อาบเพ็ง " การศึกษาเชิงทดลองของหัวเผาแบบพรุนเผาไหม้น้ำมันพืช" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547
- [10] กัมปนาท เทียนน้อย "การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวในวัสดุพรุนชนิดสลับทิศทางการไหลอากาศอย่างเป็นจังหวะ" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2544
- [11] 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.
- [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] Jia F. Liu and Wen H. Hsieh. 2004, " Experimental investigation of combustion in porous heating burners," Combustion and flame, Vol. 138, pp. 295-303.

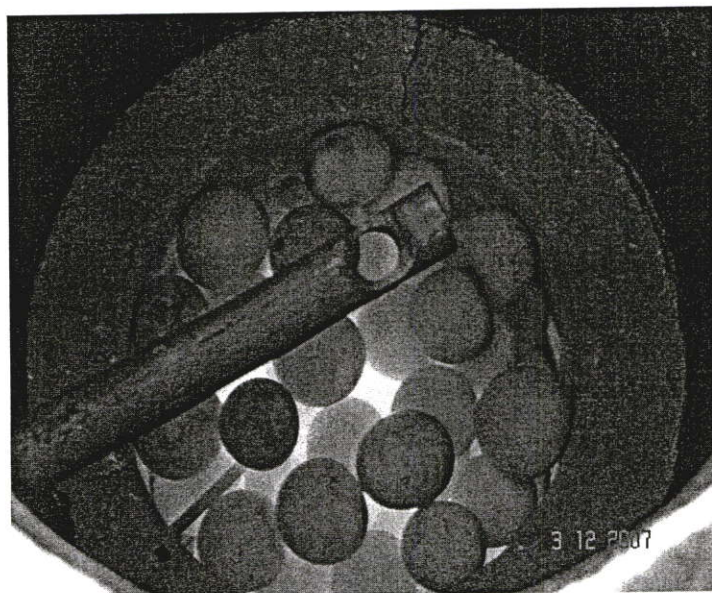
- [14] Tian-Yu Xiong, Mark J. Khinkis and Ferol F. Fish. 1995, "Experimental study of a high-efficiency, low emission porous matrix combustor-heater," *Fuel*. Vol. 74. pp. 1641-1647
- [15] Trimis. D, Durst. F, Pickenäcker. O and Pickenäcker. K. 2002, "Porous medium combustor versus combustion systems with free flames," *Lehrstuhl für Strömungsmechanik, universität Erlangen-Nürnberg, Germany.*
- [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] 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*
- [18] Pickenäcker. O, Kesting. A and Trimis. D. 2000, "Novel low NO_x burner designs for boilers and furnaces by using staged combustion in inert porous media" *Institute of fluid mechanics, universität Erlangen-Nürnberg, Germany.*
- [19] P.K.Nag , " Heat Transfer " *Tata McGraw – Hill* , pp. 692 - 712 ,2005.
- [20] รศ. มนตรี พิรุณเกษตร. 2542. "การถ่ายเทความร้อน" *บริษัท วิทยพัฒน์ จำกัด* , หน้า 515 – 519.
- [21] ศ.ดร. สำเร้ง จักรใจ 2547 "การเผาไหม้" *สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, หน้า 50- 301.
- [22] Zhongxian. C, Robert. W and Joseph A. "Lean and ultralean stretched propane-air counterflow flames" *Combustion and Flame* 145 (2006) 647–662

ภาคผนวก ก
การทดลองในเงื่อนไขต่างๆ

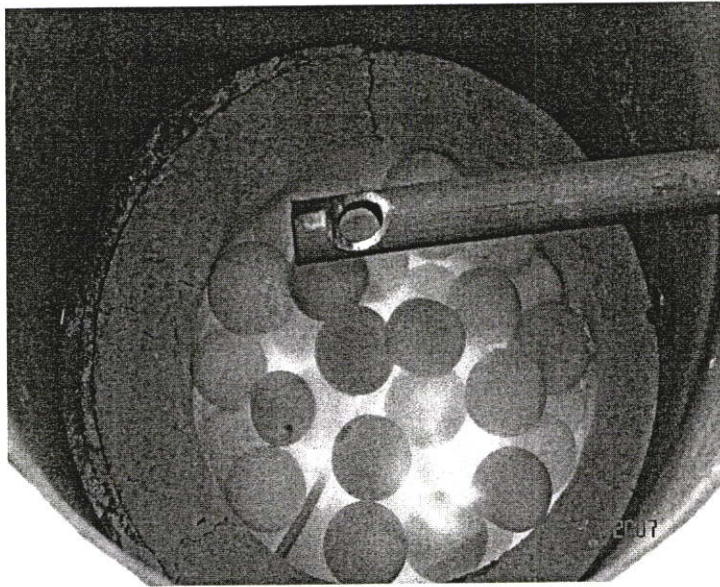
ก-1 การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศ



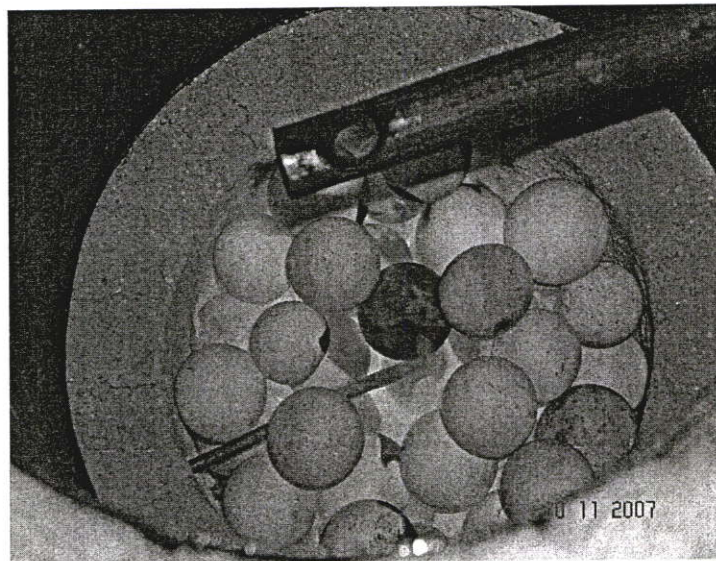
รูปที่ ก.1 จ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 ที่ $\lambda = 0$



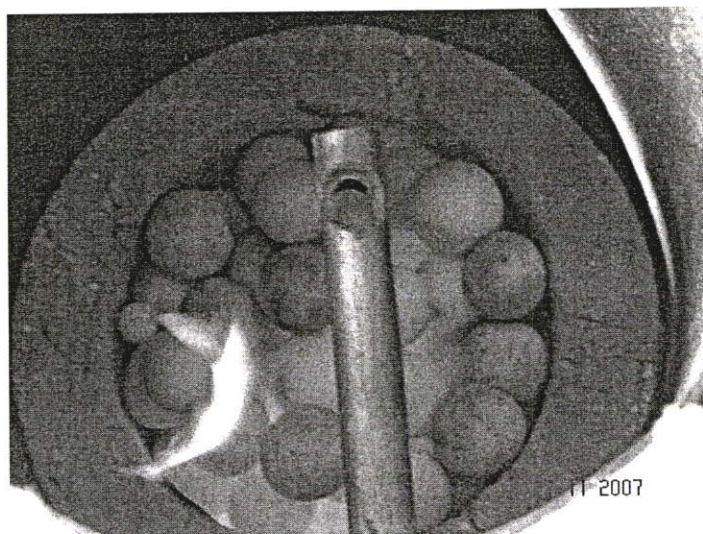
รูปที่ ก.2 จ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 ที่ $\lambda = 0.3$



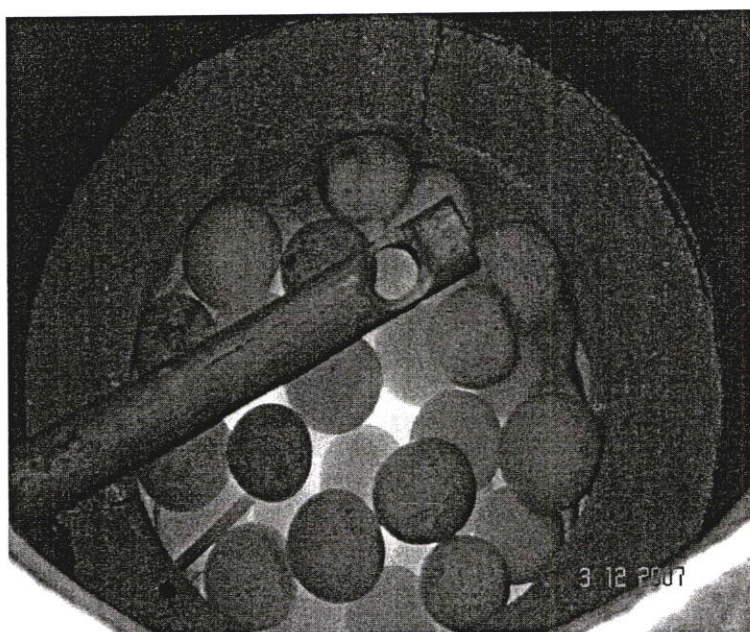
รูปที่ ก.3 ถ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 ที่ $\lambda = 0.5$



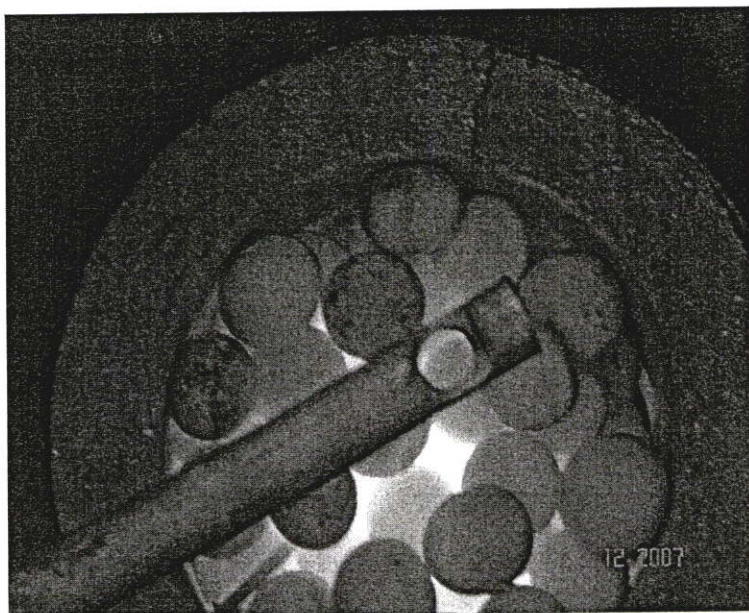
รูปที่ ก.4 ถ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 ที่ $\lambda = 0.7$



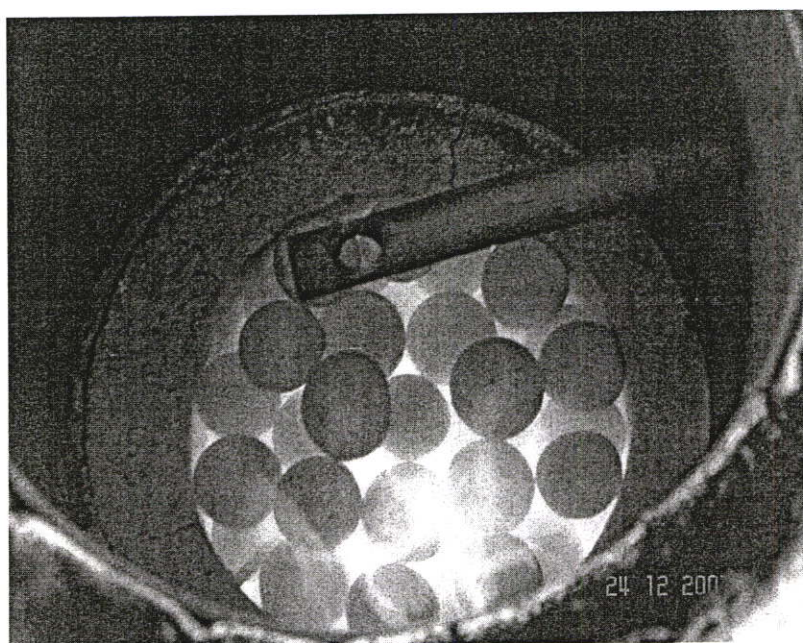
รูปที่ ๓.5 ถ่ายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 ที่ $\lambda = 0.96$



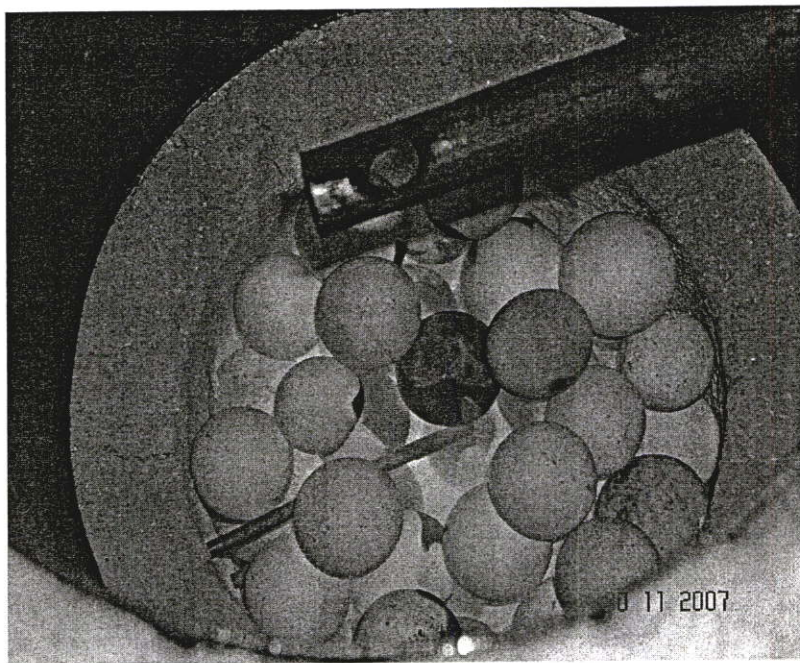
รูปที่ ๓.6 ถ่ายอากาศชั้นที่ 2 และ 3 ที่ $\lambda = 0$



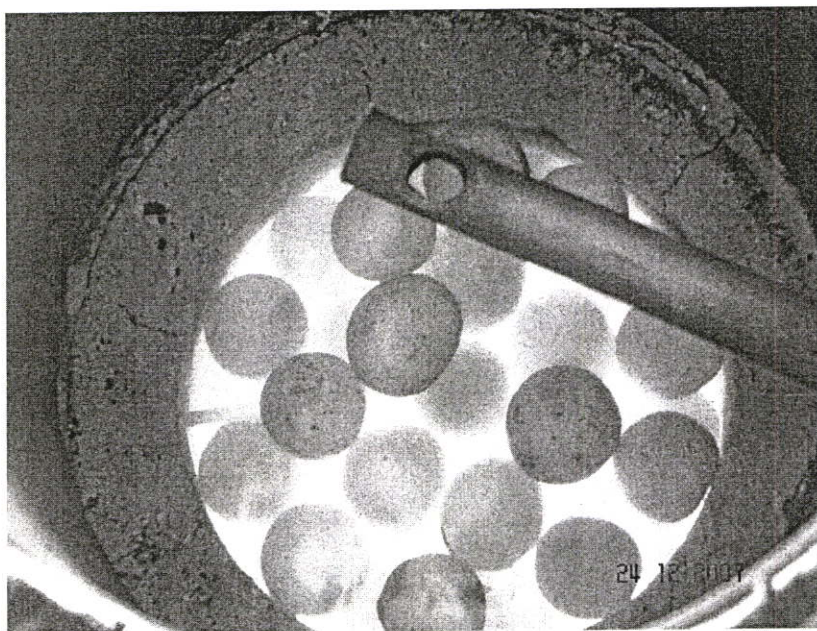
รูปที่ ก.7 ถ่ายอากาศชั้นที่ 2 และ 3 ที่ $\lambda = 0.3$



รูปที่ ก.8 ถ่ายอากาศชั้นที่ 2 และ 3 ที่ $\lambda = 0.5$

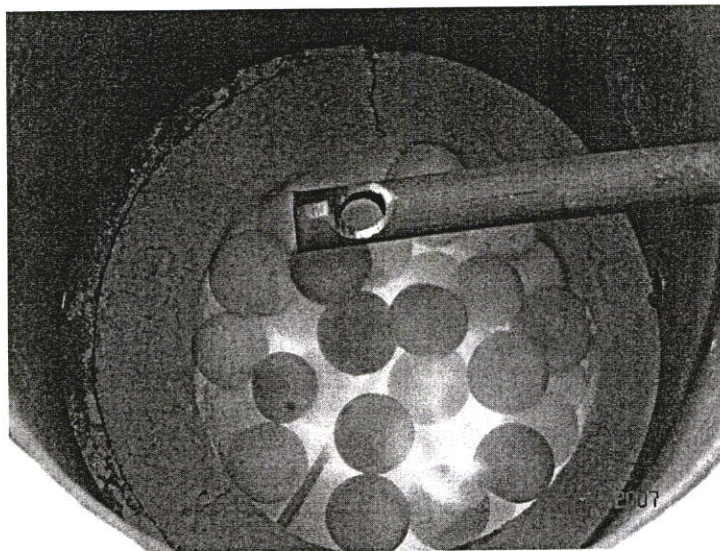


รูปที่ ก.9 ถ่ายอากาศชั้นที่ 2 และ 3 ที่ $\lambda = 0.7$

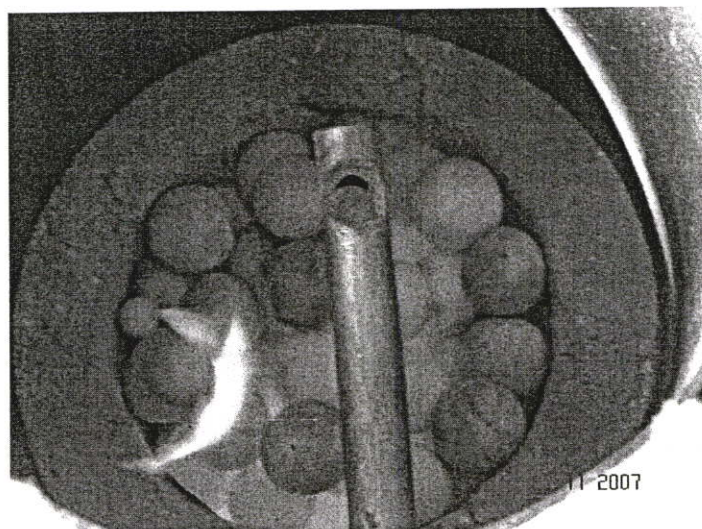


รูปที่ ก.10 ถ่ายอากาศชั้นที่ 2 และ 3 ที่ $\lambda = 0.96$

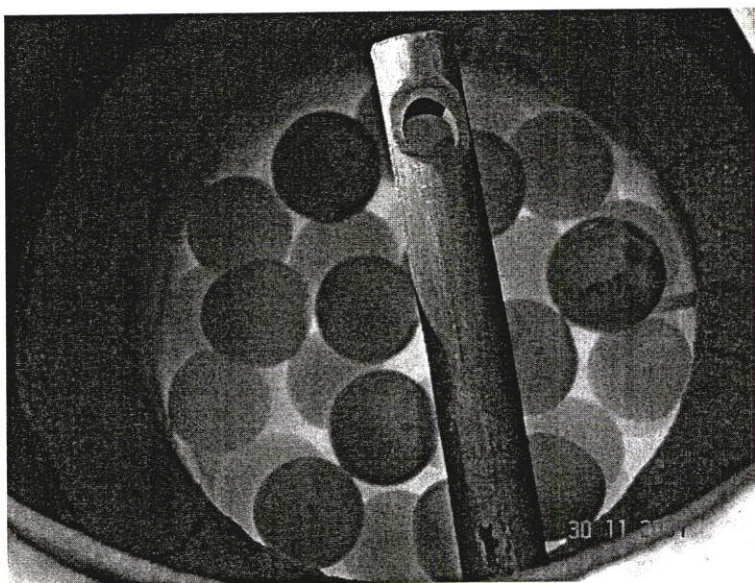
ก-2 การศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนเกิน



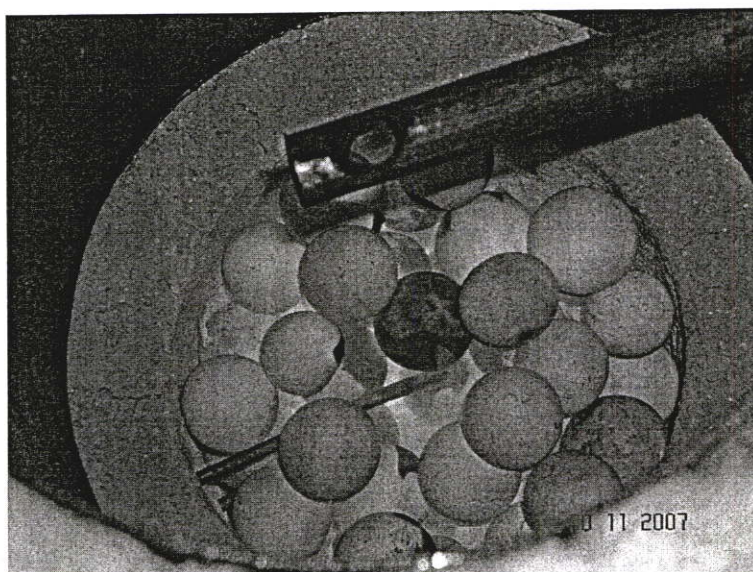
รูปที่ ก.11 ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % ที่ $\lambda = 0$



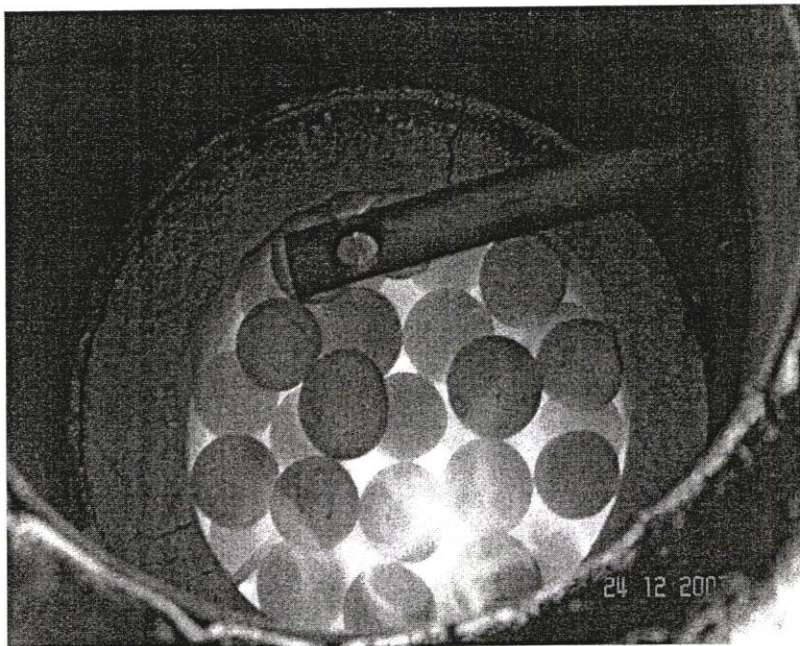
รูปที่ ก.12 ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 110 % ที่ $\lambda = 0.96$



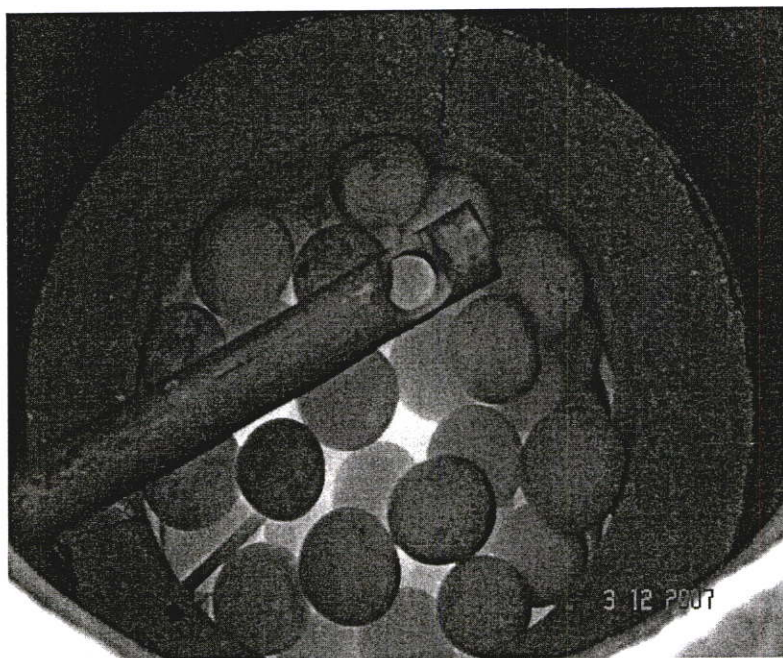
รูปที่ ก.13 ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % ที่ $\lambda = 0$



รูปที่ ก.14 ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 150 % ที่ $\lambda = 0.96$

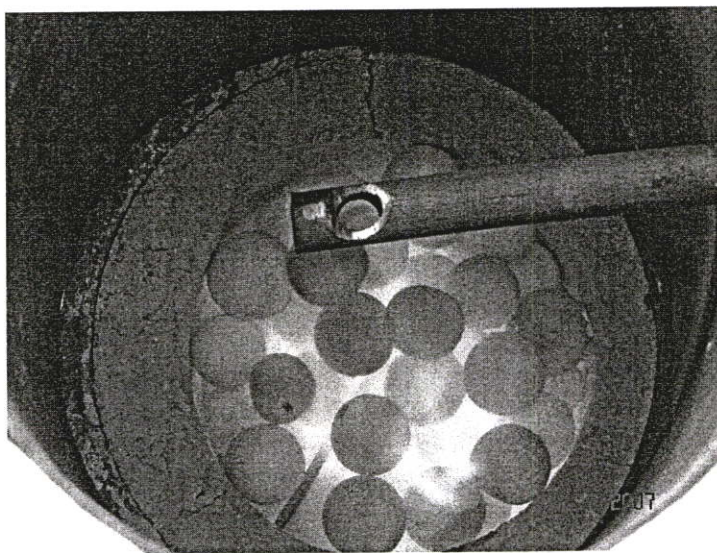


รูปที่ ก.15 ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 180 % ที่ $\lambda = 0$

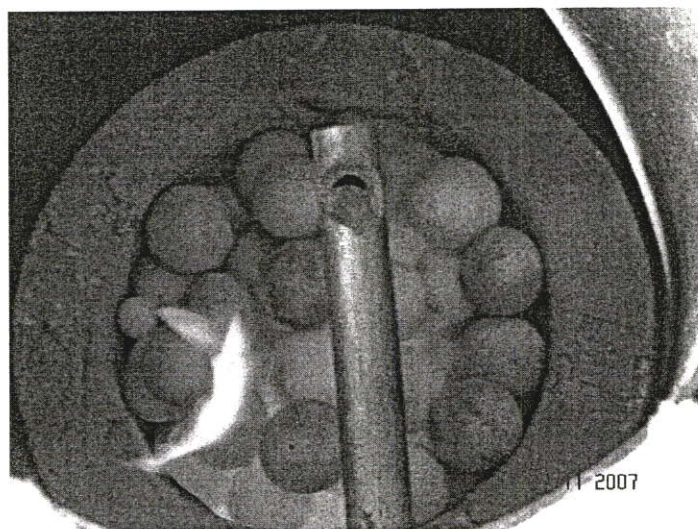


รูปที่ ก.16 ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 180 % ที่ $\lambda = 0.96$

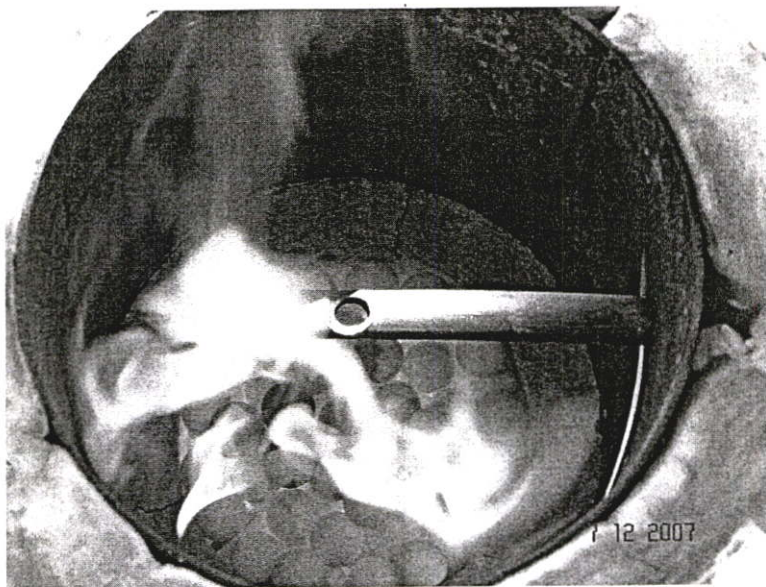
ก-3 การศึกษาอิทธิพลของขนาดของเม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพรุน



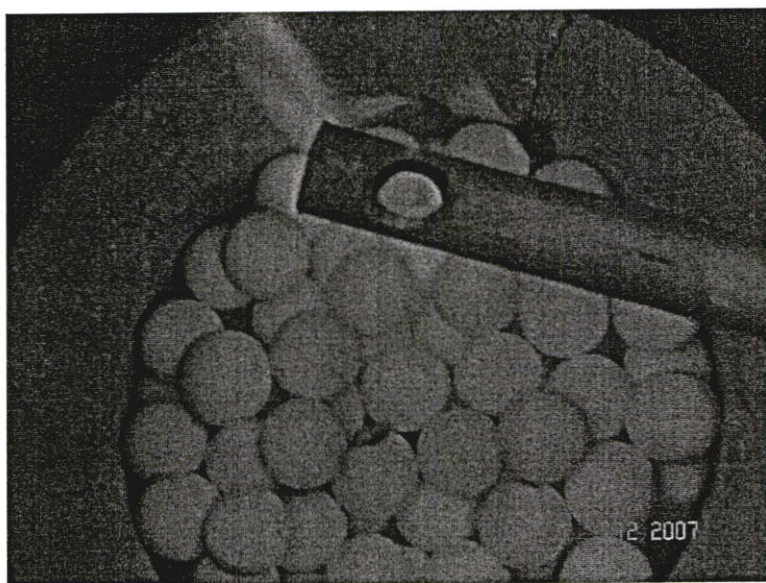
รูปที่ ก.17 $\lambda = 0$ เม็ดใหญ่



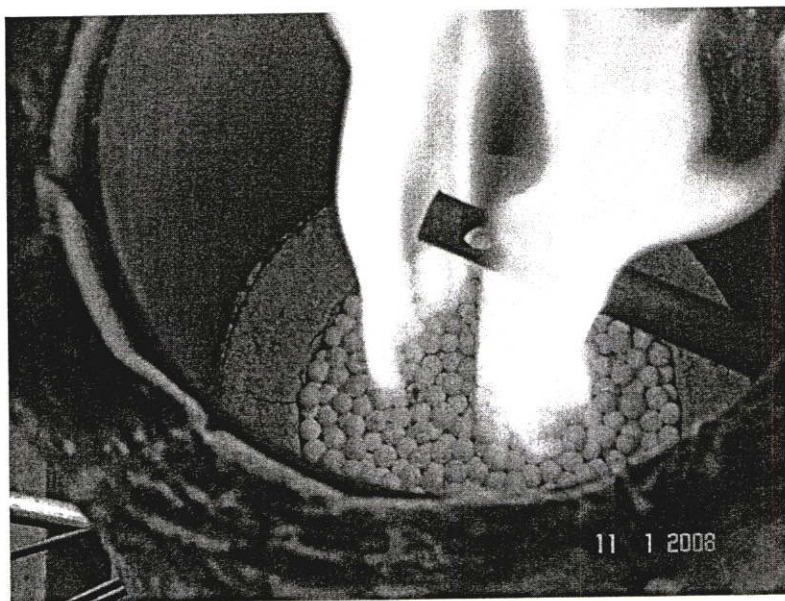
รูปที่ ก.18 $\lambda = 0.96$ เม็ดใหญ่



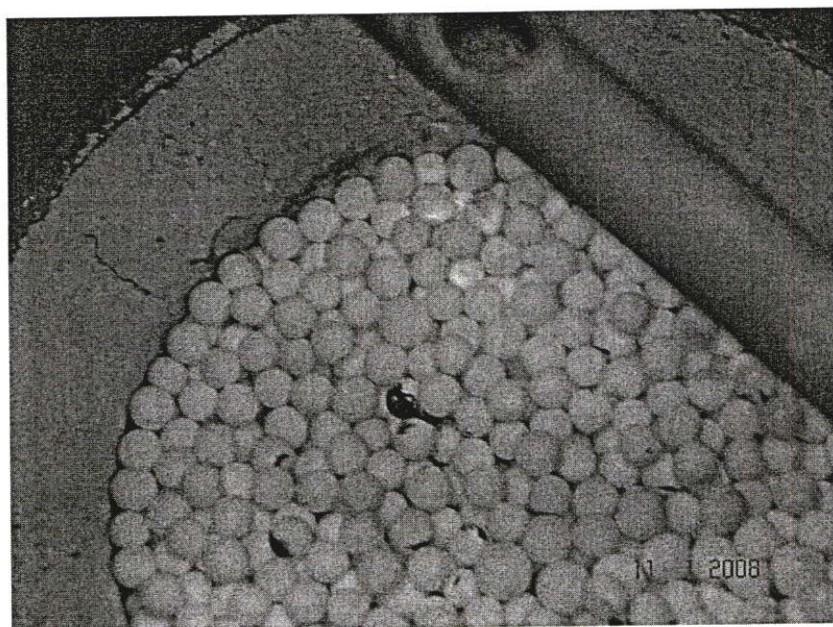
รูปที่ ก.19 $\lambda = 0$ เมื่อดกลาง



รูปที่ ก.20 $\lambda = 0.96$ เมื่อดกลาง

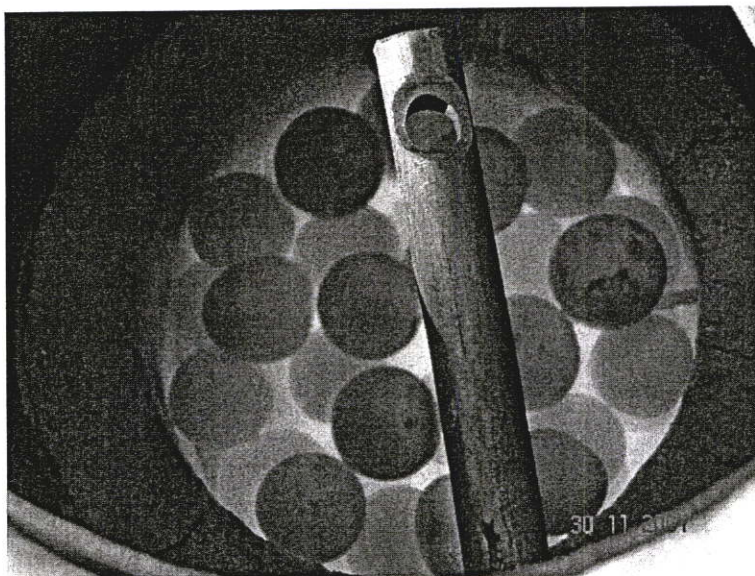


รูปที่ ก.21 $\lambda = 0$ เม็ดเล็ก

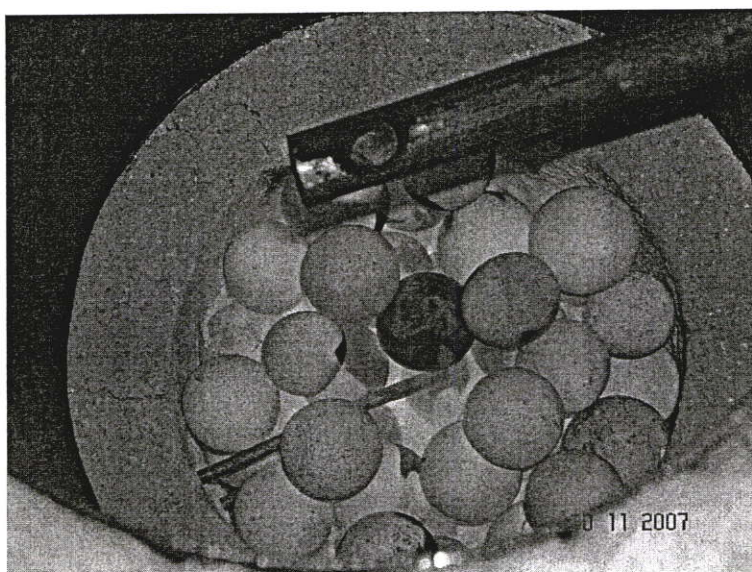


รูปที่ ก.22 $\lambda = 0.96$ เม็ดเล็ก

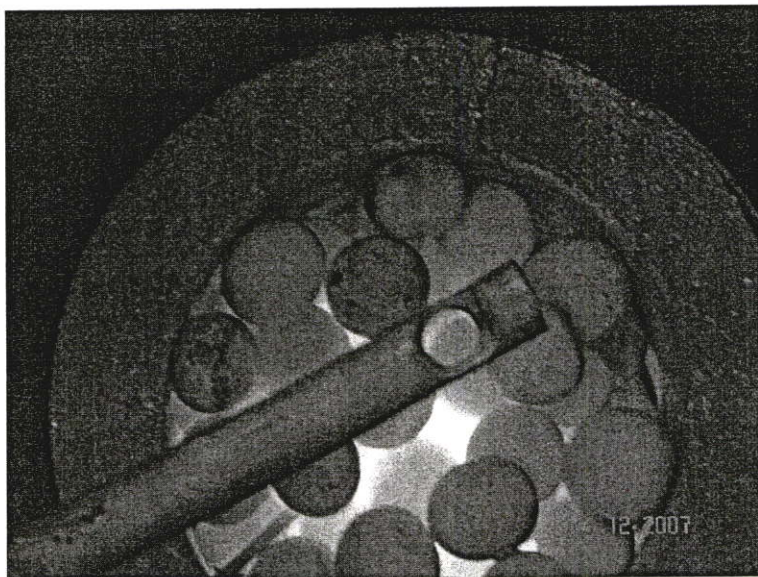
ก-4 การศึกษาอิทธิพลของการใส่และไม่ใส่เม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพรุน



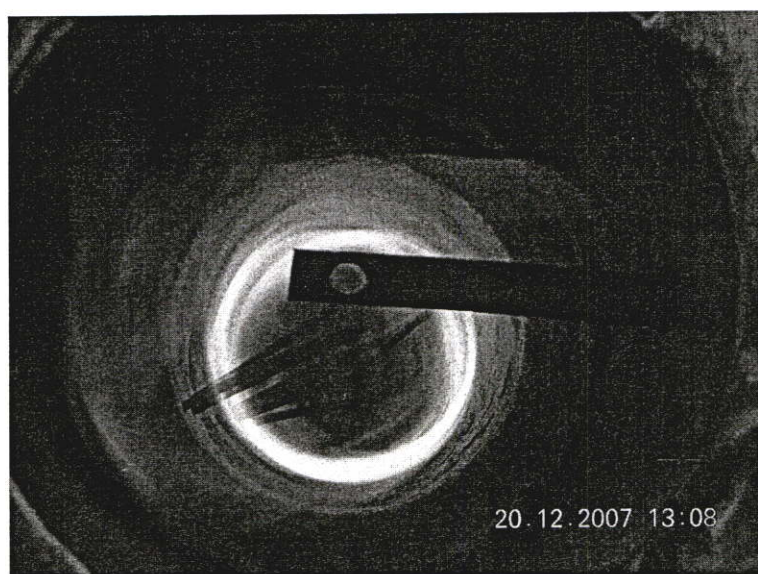
รูปที่ ก.23 ใส่เม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพรุนที่ $\lambda = 0$



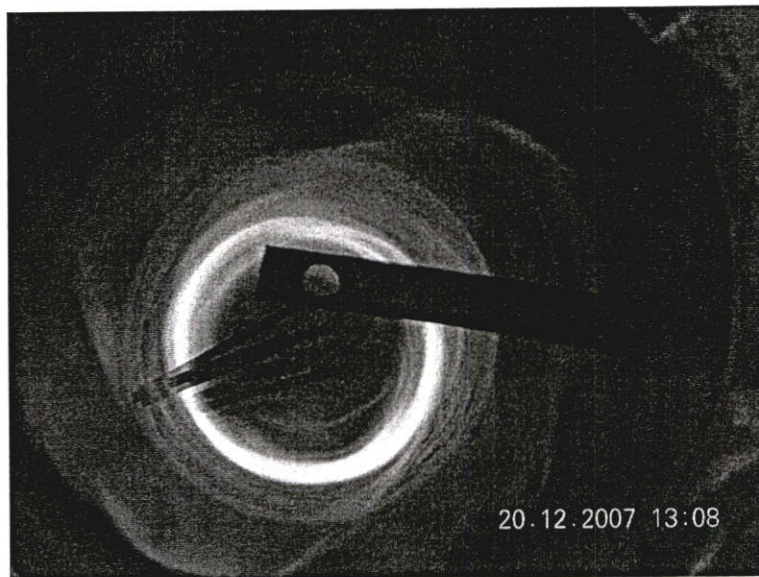
รูปที่ ก.24 ใส่เม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพรุนที่ $\lambda = 0.5$



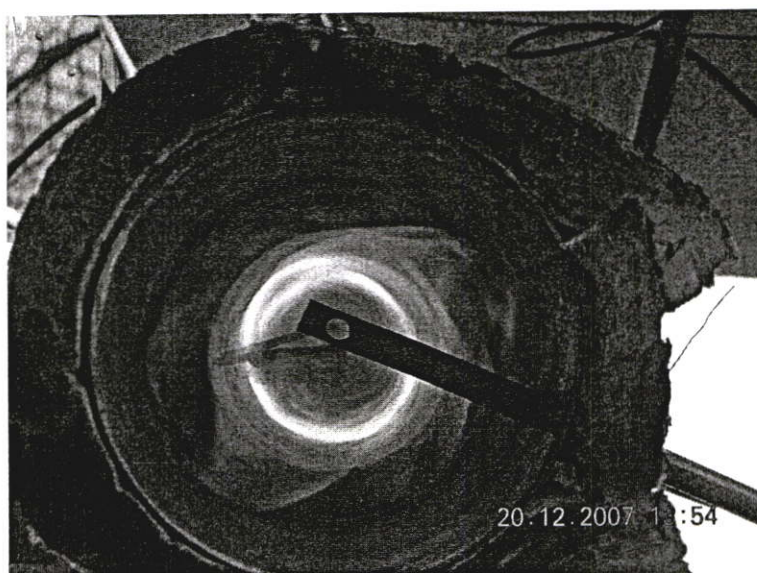
รูปที่ ก.25 ใส่เม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพูนที่ $\lambda = 0.96$



รูปที่ ก.26 ไม่ใส่เม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพูนที่ $\lambda = 0$



รูปที่ ก.27 ไมใส่เม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพรุนที่ $\lambda = 0.5$

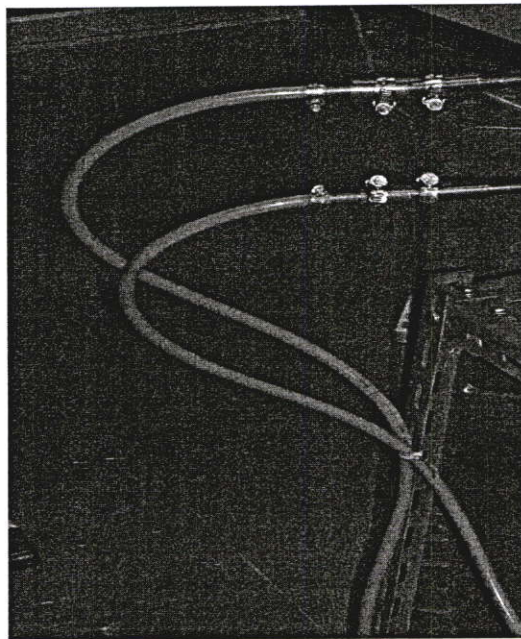


รูปที่ ก.28 ไมใส่เม็ดวัสดุที่ใช้สร้างความพรุนที่ $\lambda = 0.96$

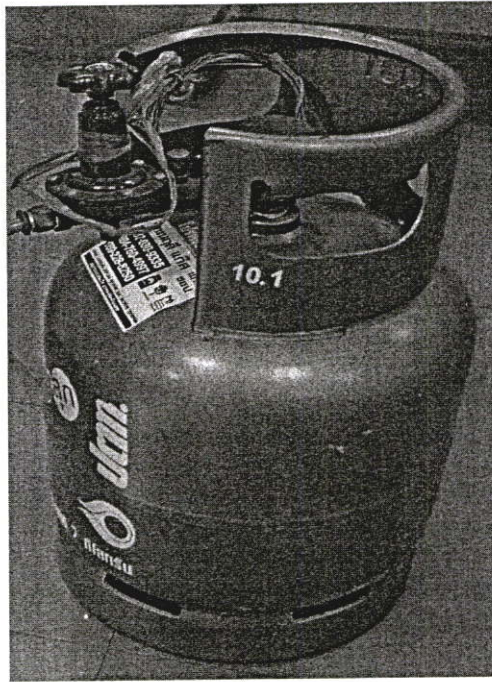
ภาคผนวก ข
อุปกรณ์การทดลอง



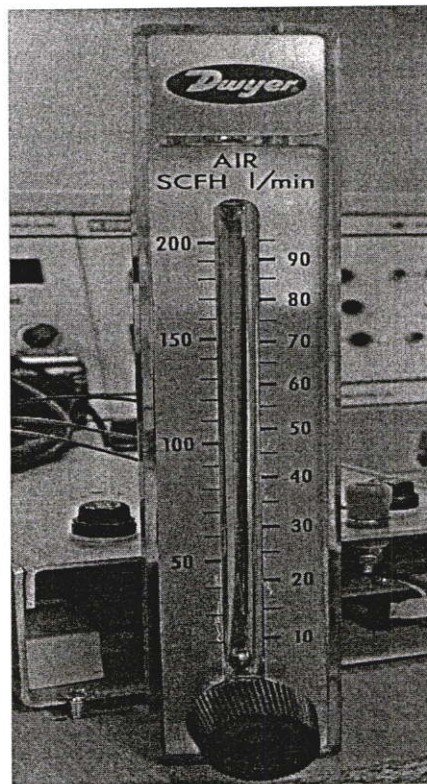
รูปที่ ข.1 หัวฉีดเชื้อเพลิงและอากาศ



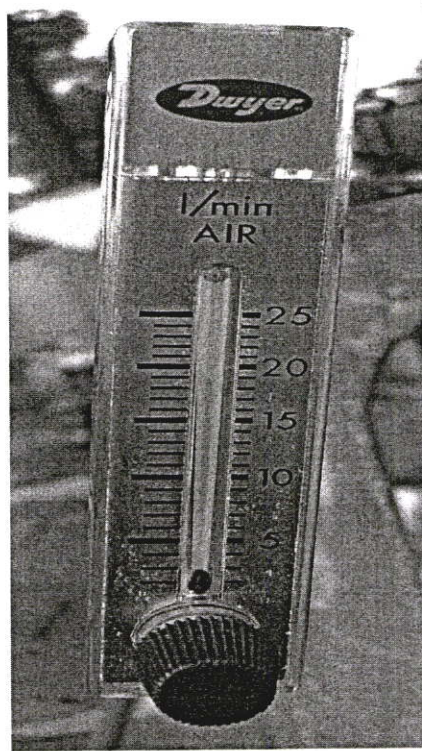
รูปที่ ข.2 ท่อจ่ายเชื้อเพลิง



รูปที่ ข.3 แก๊ส แอลพีจี



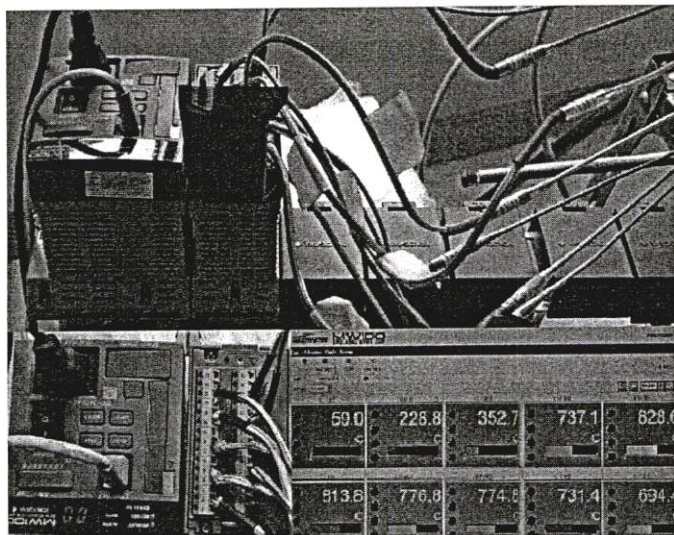
รูปที่ ข.4 วาล์วปรับอัตราการไหลอากาศ



รูปที่ ข.5 วาล์วปรับอัตราการไหลของแก๊สแอลพีจี



รูปที่ ข.6 วาล์วปรับความดันแก๊สแอลพีจี



รูปที่ ข.7 เทอร์โมคัปเปิ้ลและ DATA LOGGER



รูปที่ ข.8 เครื่องวัดก๊าซเสีย (Gas Analyzer)

ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ การคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้

สมมติฐานในการคำนวณคือ

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

การคำนวณ

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

E_F = ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาเผาไหม้, kw

E_{CxHy} = 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 6.45×10^{-5} kg/s

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

คำนวณปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สเสีย (E_{CO})

ที่ Excess Air เท่ากับ 110% มีองค์ประกอบแก๊สเสียออกมาดังนี้

Gas	By Volume	Molecular weight	By Vol. × Molecular	By Mass
CO ₂	0.08	44	3.52	0.118243434
CO	0.0000118	28	0.00033	1.10988E-05
C _x H _y	0.005717	52.4	0.299571	0.010063148
O ₂	0.0874	32	2.7968	0.093949783
N ₂	0.826	28	23.15239	0.777732536
		Total	29.76909	1

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

คำนวณสัดส่วนคาร์บอนใน 1 kg แก๊สเผาไหม้แห้ง

คำนวณค่าคาร์บอนใน CO_2 CO และ C_xH_y

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

$$+ 0.824427 \times 0.010063148 = 0.040549 \frac{kg_c}{kg_{dfg}}$$

หาปริมาณแก๊สไอเสียแห้งที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ในเชื้อเพลิง 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_{co})

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

$$E_{co} = 0.000225654 \frac{kg_{co}}{kg_f} \times 10,106 \frac{kJ}{kg_{co}} \times 6.45 \times 10^{-5} \frac{kg_f}{s}$$

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

คำนวณปริมาณ C_xH_y ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg (โดยค่าความร้อนของ C_xH_y มีค่าเท่ากับ 45.8

MJ/kg_{co})

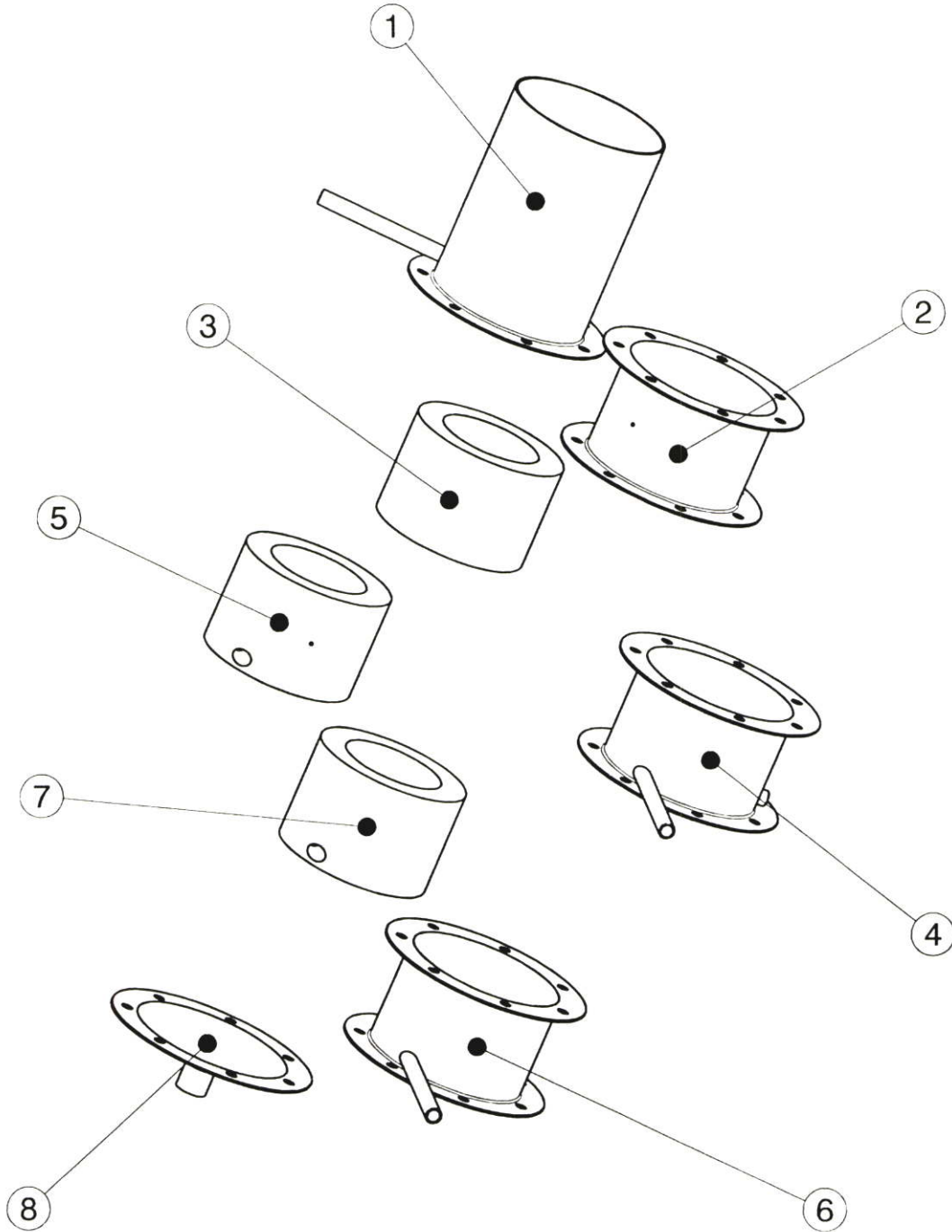
$$C_xH_y = 20.3314 \times 0.010063148 = 0.204598 \text{ kg}_{C_xH_y} / \text{kg}_f$$

$$E_{C_xH_y} = 0.204598 \frac{kg_{C_xH_y}}{kg_f} \times 45800 \frac{kJ}{kg_{C_xH_y}} \times 6.45 \times 10^{-5} \frac{kg_f}{s}$$

$$= 0.604405 \text{ kw}$$

$$\eta_c = \frac{3 - 0.000147 - 0.604405}{3} \times 100 = 79.53\%$$

ภาคผนวก ง
แบบชิ้นส่วนต่างๆ



MAHANAKORN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Part Assembly

DRAWING TITLE

DRAWN BY

DATE

16/06/2007

CHECKED BY

DATE

SIZE
A4

DRAWING NUMBER

REV

DESIGNED BY

DATE

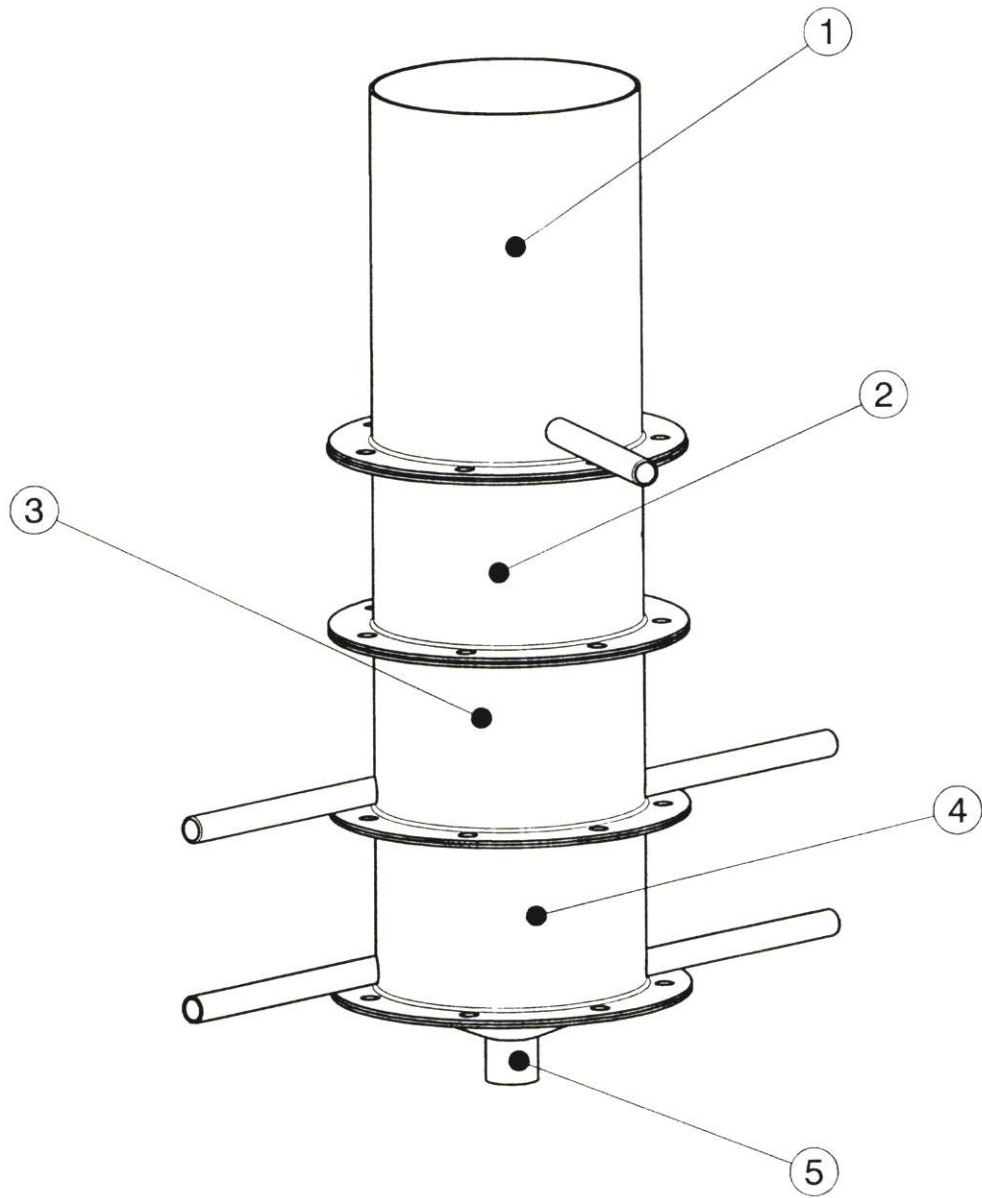
SCALE

1:5

WEIGHT(kg)

SHEET

1/1



MAHANAKORN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Assembly

DRAWING TITLE

DRAWN BY

DATE

16/06/2007

CHECKED BY

DATE

SIZE

A4

DRAWING NUMBER

REV

DESIGNED BY

DATE

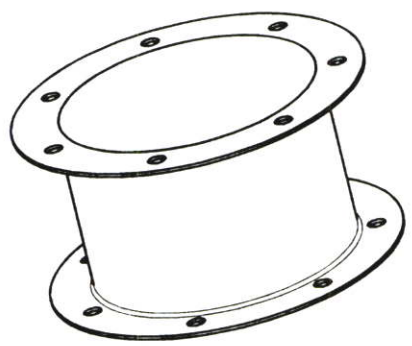
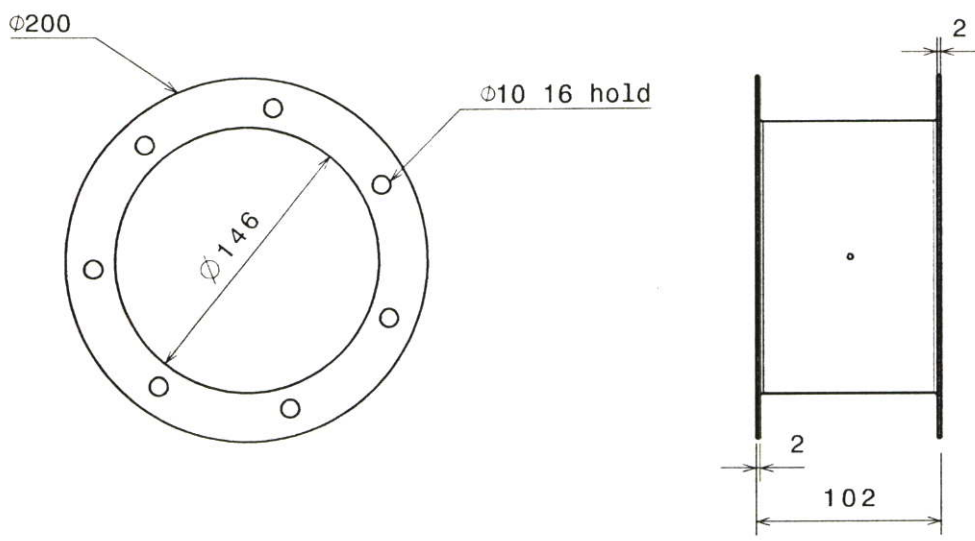
SCALE


1:4

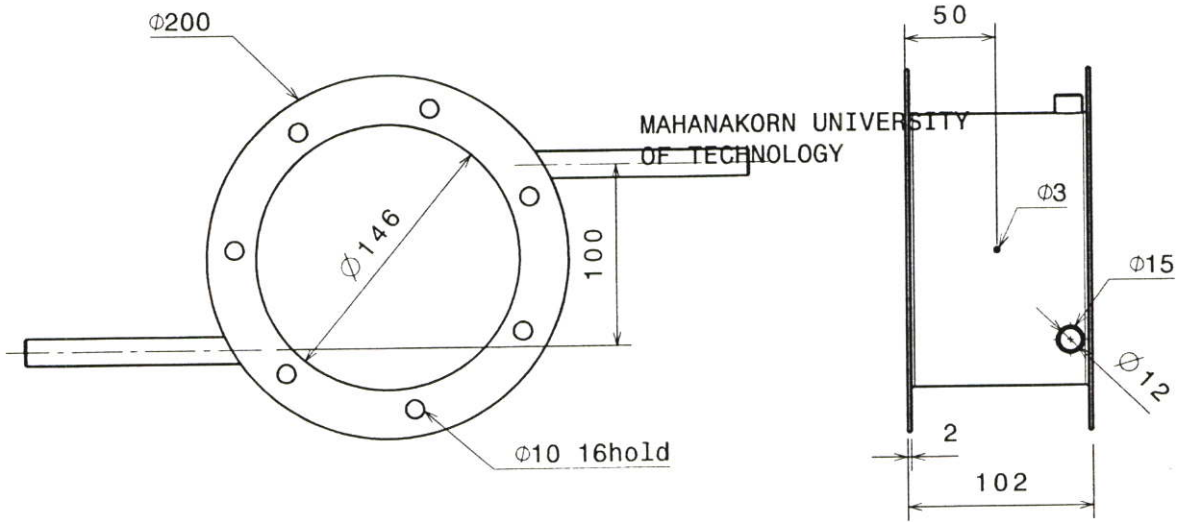
WEIGHT (kg)

SHEET

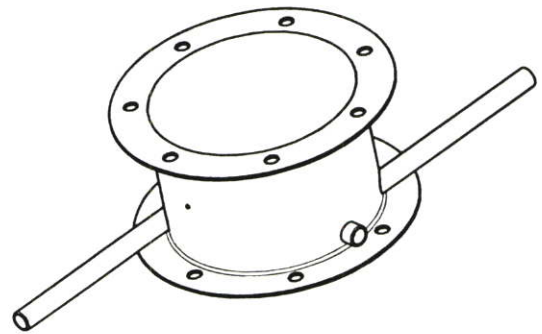
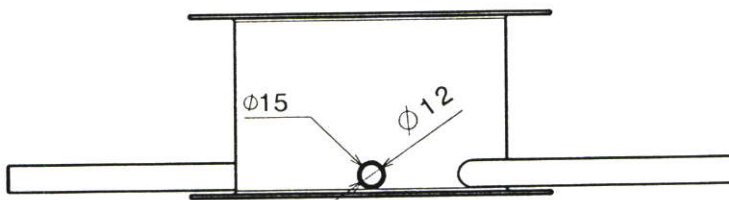
1/1



 MAHANAKORN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY		<h2>Pipe.2</h2>			
DRAWING TITLE					
DRAWN BY	DATE	SIZE		DRAWING NUMBER	
	16/06/2007	A4			
CHECKED BY	DATE	SCALE		WEIGHT (kg)	REV
		1 : 4			
DESIGNED BY	DATE	SHEET		1 / 1	



MAHANAKORN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



MAHANAKORN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Pipe.6

DRAWING TITLE

DRAWN BY

DATE

16/6/2550

CHECKED BY

DATE

SIZE

DRAWING NUMBER

REV

A4

DESIGNED BY

DATE

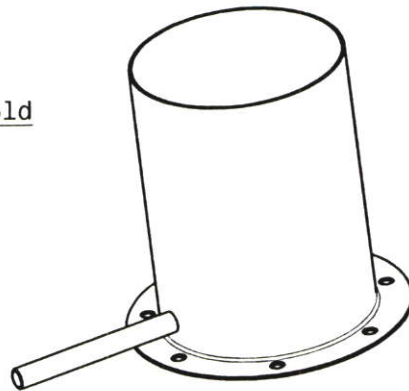
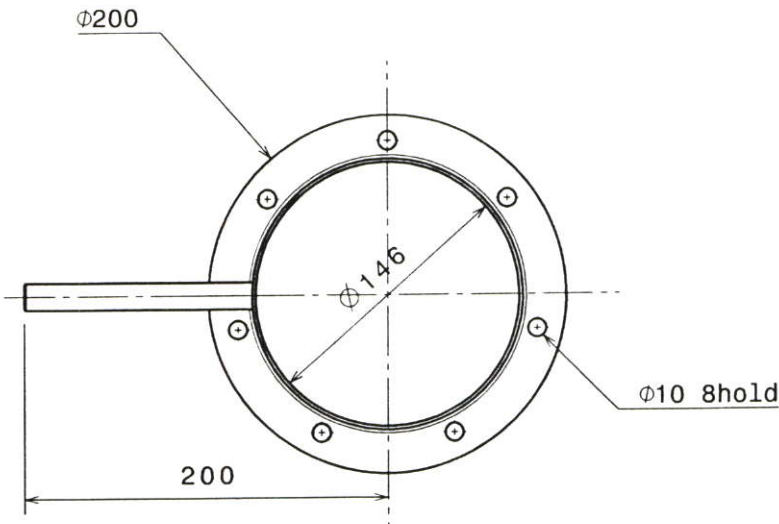
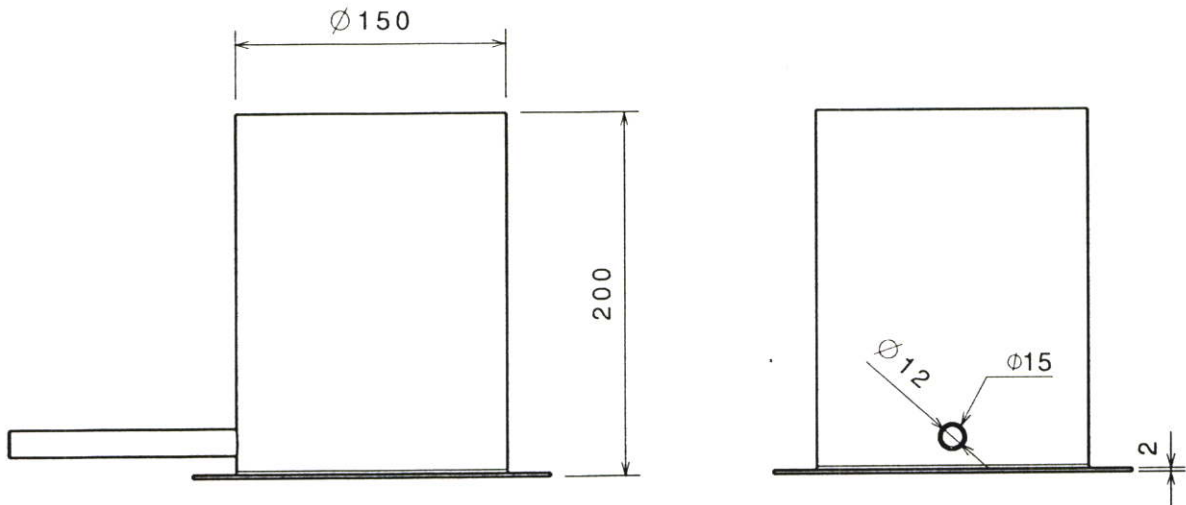
SCALE

1:4

WEIGHT (kg)

SHEET

1/1



MAHANAKORN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Pipe.1

DRAWING TITLE

DRAWN BY

DATE

16/06/2007

CHECKED BY

DATE

SIZE

DRAWING NUMBER

REV

A4

DESIGNED BY

DATE

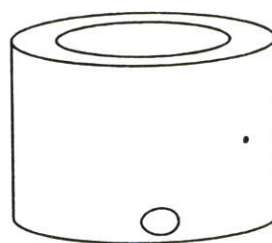
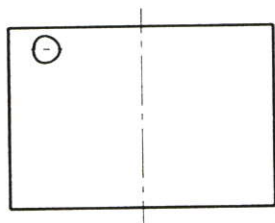
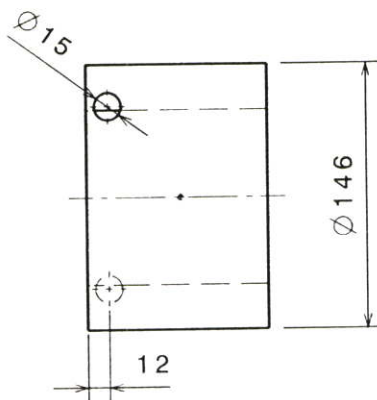
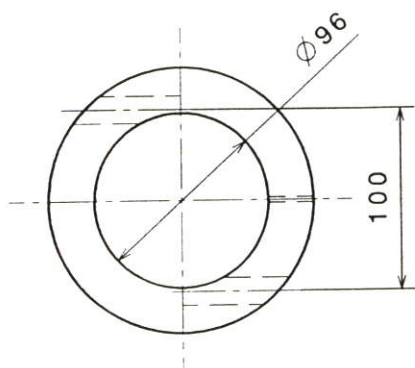
SCALE

1:4

WEIGHT (kg)

SHEET

1/1



MAHANAKORN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Pipe.7

DRAWING TITLE

DRAWN BY

DATE

16/06/2007

CHECKED BY

DATE

SIZE

DRAWING NUMBER

REV

A4

DESIGNED BY

DATE

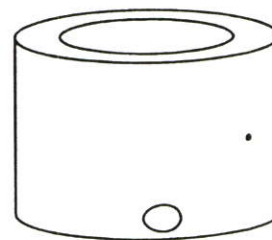
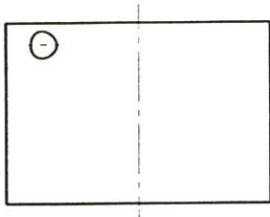
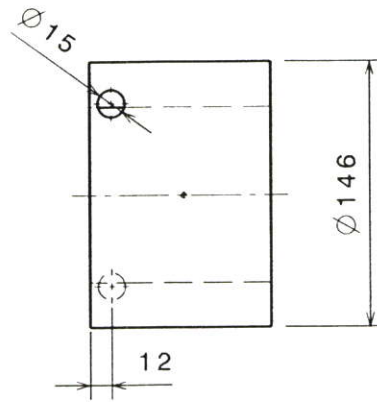
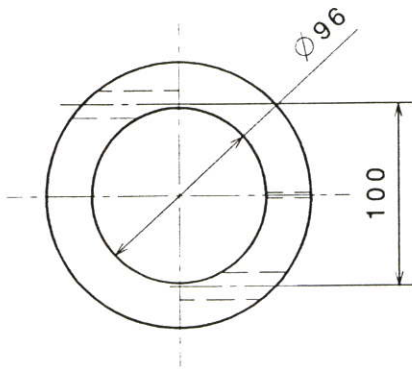
SCALE

1:4

WEIGHT (kg)

SHEET

1/1



MAHANAKORN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Pipe.6

DRAWING TITLE

DRAWN BY

DATE

16/06/2007

CHECKED BY

DATE

SIZE

DRAWING NUMBER

REV

A4

DESIGNED BY

DATE

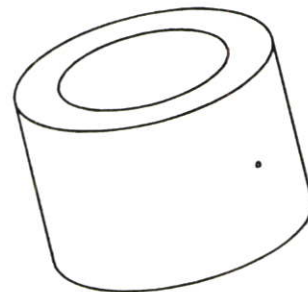
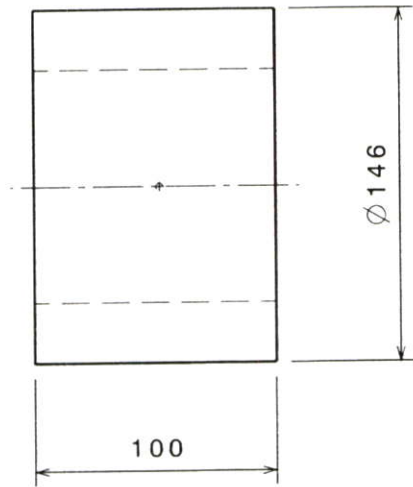
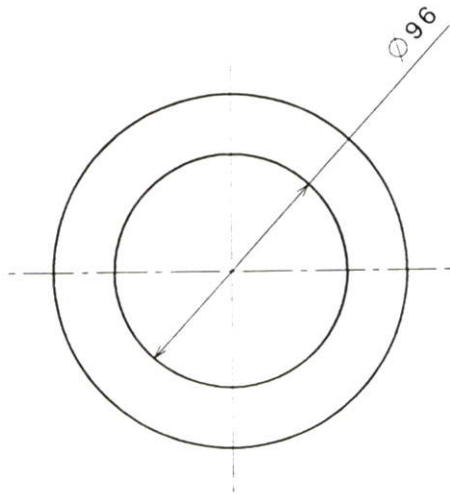
SCALE

1:4

WEIGHT (kg)

SHEET

1/1



MAHANAKORN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Pipe.3

DRAWING TITLE

DRAWN BY

DATE

16/06/2007

CHECKED BY

DATE

SIZE

A4

DRAWING NUMBER

REV

DESIGNED BY

DATE

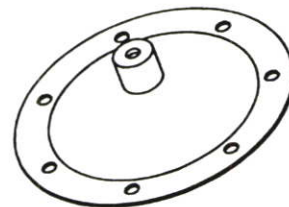
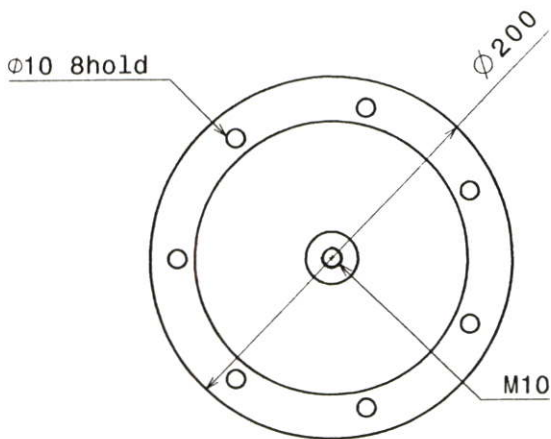
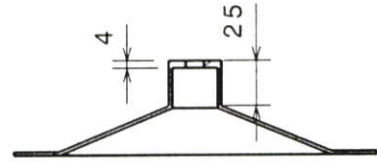
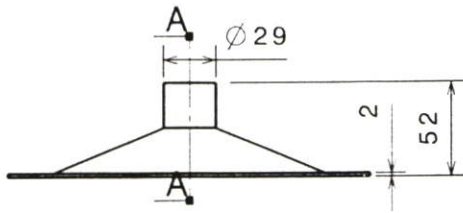
SCALE

1:3

WEIGHT (kg)

SHEET

1/1



MAHANAKORN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Pipe.8

DRAWING TITLE

DRAWN BY

DATE

16/06/2007

CHECKED BY

DATE

SIZE

A4

DRAWING NUMBER

REV

DESIGNED BY

DATE

SCALE

1:4

WEIGHT (kg)

SHEET

1/1

ภาคผนวก จ
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

พฤติกรรมการเผาไหม้ของหัวเผาวัสดุพรุน

The combustion behavior of porous media burner

อาวุธ ลภีรัตนากุล^{1*}, จารุวัตร เจริญสุข²

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขต
ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 0-2737-3000 E-mail: umkmit139@hotmail.com

Arwut Lapirattanakun^{1*}, Jaruwat Charoensuk²

^{1,2} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok
10520, Thailand

Tel: 0-2737-3000 E-mail: umkmit139@hotmail.com

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของก๊าซ LPG ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุนในแง่ของสมรรถนะเบื้องต้นอันได้แก่ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_c) และองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่ามากกว่า 99 % และอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพรุนมีค่ามากกว่า 1000°C ความเข้มข้นของ CO ของก๊าซไอเสียมีค่าต่ำ ซึ่งเห็นถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างค่อนข้างสมบูรณ์โดยคาดว่าน่าจะเกิดจากของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ถูกอุ่น (preheating) ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 720-950°C หัวเผาวัสดุพรุนมีพฤติกรรมการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิเปลวไฟค่อนข้างต่ำ (Low flame temperature) อยู่ในช่วง 1050 - 1100 °C ส่งผลให้ปริมาณ NO_x ที่ได้จากการเผาไหม้มีปริมาณต่ำอยู่ในช่วง 35 -55 ppm ที่มาตรฐาน 6% O₂ และช่วงของการเผาไหม้มีช่วงค่อนข้างยาว (Long flame temperature) โดยมีความยาวประมาณ 100 mm จึงส่งผลให้ปริมาณ CO ที่ได้จากการเผาไหม้มีปริมาณต่ำอยู่ในช่วง 30-150 ppm ที่มาตรฐาน 6% O₂ นอกจากนี้ยังพบว่าการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นค่อนข้างเสถียรไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ยอุณหภูมิมีค่ามากกว่า 1000 °C

คำสำคัญ: หัวเผาวัสดุพรุน / การเผาไหม้ / วัสดุพรุน

¹ Corresponding author

Abstract

This study investigated the combustion of LPG in a porous media in terms of preliminary performance, such as; combustion efficiency and gas emissions. The experimental results showed that the combustion efficiency of more than 99% can be achieved and the temperature within porous burner that it up to 1000°C. Low CO concentration of exhausted gas suggested a complete combustion which may occur due to preheating of air-fuel mixer, ranged from 720-950°C. Combustion within a porous media burner has a feature of relatively low flame temperature varying between 1050-1100 °C. It affects on NO_x emission varying between 35-55 ppm (at 6% O₂). Furthermore, long flame temperature of about 100mm height also affects on CO emission varying between 30-150 ppm (at 6% O₂). The combustion is quite stable with the temperature well above 1000°C.

Keyword: Porous media burner / combustion / Porous media

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆภายในประเทศเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้พลังงานที่ใช้กันอยู่เริ่มลดน้อยลง จึงทำให้หลายๆหน่วยงานทั้งทางภาครัฐและภาคเอกชนได้พยายามแก้ไขปัญหาวิกฤตพลังงานนี้ด้วยการรณรงค์การใช้พลังงานทดแทนมากขึ้น เช่นการพยายามใช้แหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศ ได้แก่ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานลม พลังงานคลื่นและพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น นอกจากรูปแบบของพลังงานทดแทนที่กล่าวมานี้แล้วนั้น ยังมีเทคโนโลยีอีกด้านหนึ่งซึ่งเป็นพลังงานทดแทนอีกทางเลือกหนึ่งที่มีแนวโน้มที่จะมีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ในอีกไม่กี่ปีข้างหน้า นั่นคือ เทคโนโลยีด้านเซลล์เชื้อเพลิง โดยข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับความสนใจเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่สำหรับอนาคต ก็คือ เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมน้อย ลดการเกิดก๊าซที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น คาร์บอนมอนนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไนโตรเจนออกไซด์ ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาระบบของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้สามารถผลิตพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ด้วยการติดตั้งชุดแลกเปลี่ยนความร้อน(reformer) เข้าไปในระบบเพื่อช่วยในการอุ่นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนก่อนเข้าทำปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยแหล่งพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนได้มาจากการติดตั้งเตาเผาไหม้เพิ่มเข้าไปในระบบ ซึ่งรูปแบบของการติดตั้งทั้งชุดแลกเปลี่ยนความร้อนและเตาเผาไหม้ เข้าไปในระบบของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น ทำได้โดยการติดตั้งชุดแลกเปลี่ยนความร้อนไว้ภายในเตาเผาไหม้หรือติดตั้งไว้ภายนอกเตาเผาไหม้ก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม ขึ้นอยู่กับสมรรถนะของเตาเผาไหม้ที่ทำได้ [1,2] โดยเตาเผาไหม้ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปส่วนใหญ่เป็นเตาเผาไหม้ประเภทเปลวไฟอิสระ (free flame) ซึ่งข้อเสียของเตาเผาไหม้จำพวกนี้คือ ผลิตพลังงานความร้อนได้ไม่เสถียร (เกิดการแกว่งของอุณหภูมิสูง) การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงส่งผลต่อสมรรถนะของเตาเผาไหม้อย่างมาก อีกทั้งยังมีอัตราการเกิดมลพิษสูงอีกด้วย ซึ่งจากข้อเสียดังกล่าวเมื่อนำเตาเผาไหม้มาติดตั้งเข้ากับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงแล้ว จะทำให้เกิด thermal stress กับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลอุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ [3] โดยจากการศึกษาพบว่าทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาดังกล่าวได้คือการนำหัวเผาวัสดุพรุน (Porous media burner) มาติดตั้งเข้ากับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงแทนเตาเผาไหม้เดิมที่ใช้กันอยู่ (Conventional combustor) ด้วยเหตุผลที่ว่าหัวเผาวัสดุพรุนนั้น มีการเผาไหม้ที่เสถียรคือการปรับเปลี่ยนสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อเตาเผาไหม้ อัตราการเกิดมลพิษต่ำและลดอัตราการแพร่ของอากาศเข้าสู่เชื้อเพลิง ซึ่งช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงเกิดขึ้นช้าลงได้ นอกจากนี้ด้วยคุณลักษณะเด่นของวัสดุพรุนจะส่งผลให้เกิดเปลวไฟแบบซูเปอร์อะเดียบติก (Super adiabatic flame) ซึ่งเป็นการผสมผสานกันระหว่างกลไกการถ่ายเทความร้อนทั้งการนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเข้าไว้ด้วยกัน ช่วยทำให้การเผาไหม้เกิดได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น [4,5,6,7] โดยหัวเผาวัสดุพรุนที่มีใช้อยู่ในขณะนี้มียูด้วยกันสองรูปแบบ คือ หัวเผาวัสดุพรุน

แบบจ่ายอากาศชั้นเดียว (single stage) และแบบจ่ายอากาศหลายชั้น (multi-stage) ซึ่งจากการค้นคว้าพบว่าหัวเผาแบบจ่ายอากาศชั้นเดียวนั้นไม่สามารถควบคุมปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นตามระดับความสูงของเตา ส่งผลให้ถ้าติดตั้งชุดแลกเปลี่ยนความร้อนไว้ภายในหัวเผา จะทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้เนื่องจากปริมาณความร้อนสูงเกินไป ซึ่งแตกต่างจากหัวเผาวัสดุพรุนแบบจ่ายอากาศหลายชั้นที่สามารถควบคุม บริเวณที่เกิดการเผาไหม้ (Combustion zone) ที่เกิดขึ้นตามระดับความสูงของเตาได้ โดยควบคุมจากปริมาณอากาศที่ป้อนให้กับเชื้อเพลิงในแต่ละระดับความสูงของเตาเผาไหม้ [3] จึงทำให้ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในเตาเผาไหม้ ดังนั้นโครงการนี้ จะเน้นด้านการพัฒนาหัวเผาวัสดุพรุนแบบจ่ายอากาศหลายชั้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะและพฤติกรรมของหัวเผาชนิดนี้ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่อง โดยจะนำผลการทดลองที่ได้มาปรับปรุงและพัฒนาหัวเผาวัสดุพรุนเพื่อนำไปใช้กับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

2. องค์ประกอบเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ LPG โดยในการทดลองจะก๊าซหุงต้มของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ซึ่งองค์ประกอบของ LPG นี้ประกอบด้วย โพรเพน (C_3H_8) 60 mol% และบิวเทน (C_4H_{10}) 40% โดยมีค่าความร้อน (HHV) เท่ากับ 45.6 MJ/kg (ที่มา: การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย) ซึ่งจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบของ LPG มีก๊าซไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก ไม่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนและซัลเฟอร์

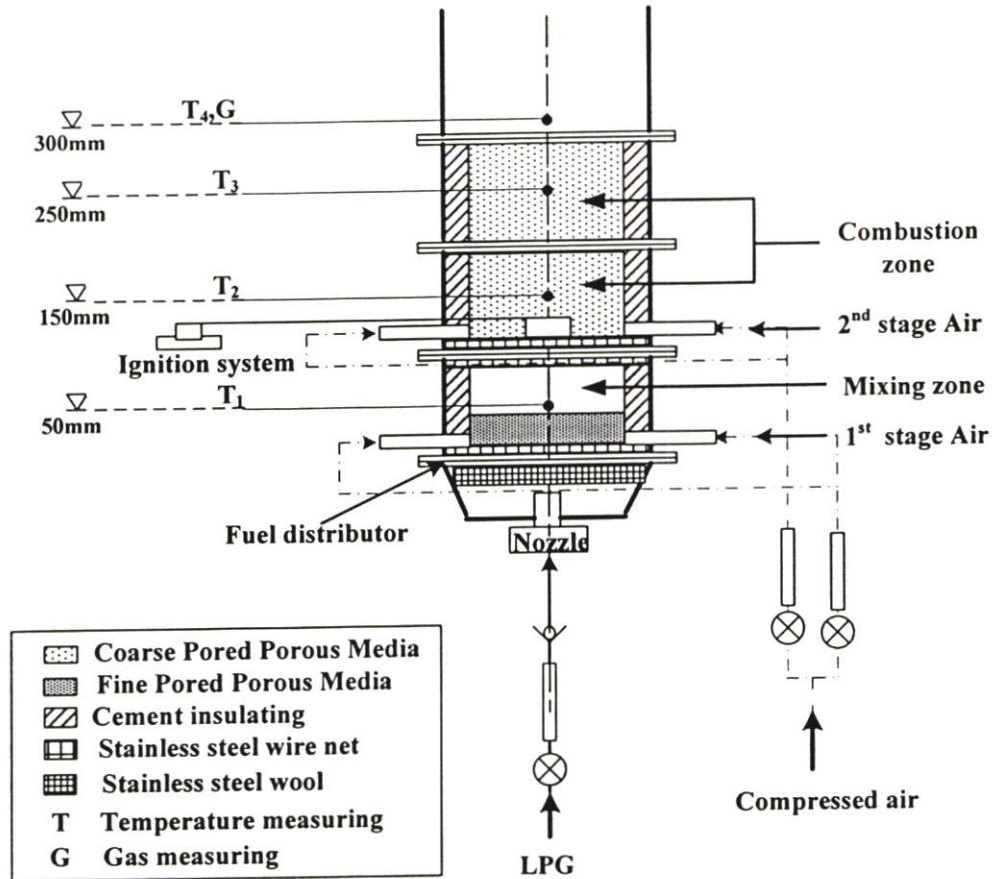
3. วิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงชุดทดสอบพฤติกรรมเผาไหม้และสมรรถนะเบื้องต้นของหัวเผาวัสดุพรุนโดยใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง โดยหัวเผาวัสดุพรุนนี้ถูกสร้างขึ้นให้มีการเผาไหม้แบบผสมที่หลัง (non-premixed) ซึ่งมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหัวเผาประมาณ 4 นิ้ว สูง 35 mm โดยสามารถแบ่งหัวเผาออกได้เป็นสามส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนที่เป็นห้องผสม (Mixing zone) กั้นระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ส่วนที่สองและส่วนที่สามจะเป็นส่วนของห้องเผาไหม้ ซึ่งในการทดสอบจะแบ่งอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็นสี่ส่วน โดยจ่ายอากาศเข้าหัวเผาในส่วนที่หนึ่งที่บริเวณตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง (Fuel distributor) และส่วนที่สองที่ระดับความสูง 100 mm จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิงดังรูปที่ 1 ส่วนการป้อนเชื้อเพลิงเข้าหัวเผาจะใช้หัวฉีดเป็นอุปกรณ์ในการป้อนเชื้อเพลิง และทำการติดตั้งระบบจุดระเบิดที่บริเวณระหว่างรอยต่อของหัวเผาส่วนที่สองและส่วนที่สาม โดยใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงในการจุดและอุ่นหัวเผา

ในการทดลองทำการปรับอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้ปั๊มลมเป็นต้นกำลังในการทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศและใช้ Flow meter เป็นอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอัตราการไหลของอากาศ และในการควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจะใช้ Flow meter เป็นอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอัตราการไหลเช่นเดียวกัน ส่วนในการ

บันทึกค่าอุณหภูมิจะบันทึกอุณหภูมิทั้งหมด 4 ระดับความสูงดังรูปที่ 1 ทุกๆ 5 นาทีโดยใช้ Thermocouple type K และใช้ Data logger เป็นอุปกรณ์ในการบันทึกผล นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัวทำวัดก๊าซไอเสียโดยใช้เครื่องวัดก๊าซ วัดที่บริเวณท่อทางออกดังรูปที่ 1

โดยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ที่บันทึกในงานวิจัยนี้ได้แก่ CO NO_x CO₂ และ O₂ ซึ่งไม่ได้ทำการบันทึกก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ เนื่องจากปัญหาทางด้านเครื่องมือวัด



รูปที่ 1 แสดงชุดทดลองหัวเผาวัสดุพรุน

ตารางที่ 1 ตารางแสดงเงื่อนไขการทดลอง

Run No.	Energy input (kw)	Flow rate of 1 st stage air (SCFH)	Flow rate of 2 nd stage air (SCFH)	Excess Air (%)
1	3	150	105	130
2		150	125	150
3		150	150	170
4		150	170	190

ในการหาสมรรถนะของหัวเผานำค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_c) มาเป็นดัชนีในการชี้วัดสมรรถนะของหัวเผา โดยสามารถคำนวณได้จาก

- ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตา नियามได้ด้วยสมการดังนี้

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

E_F = ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาเผาไหม้ (MW)

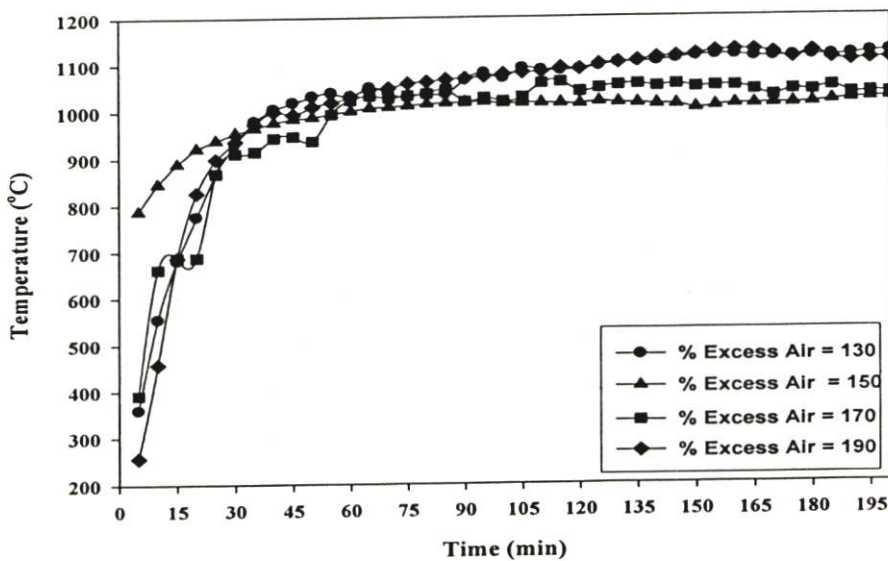
E_{fg} = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในก๊าซเสีย (MW)

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

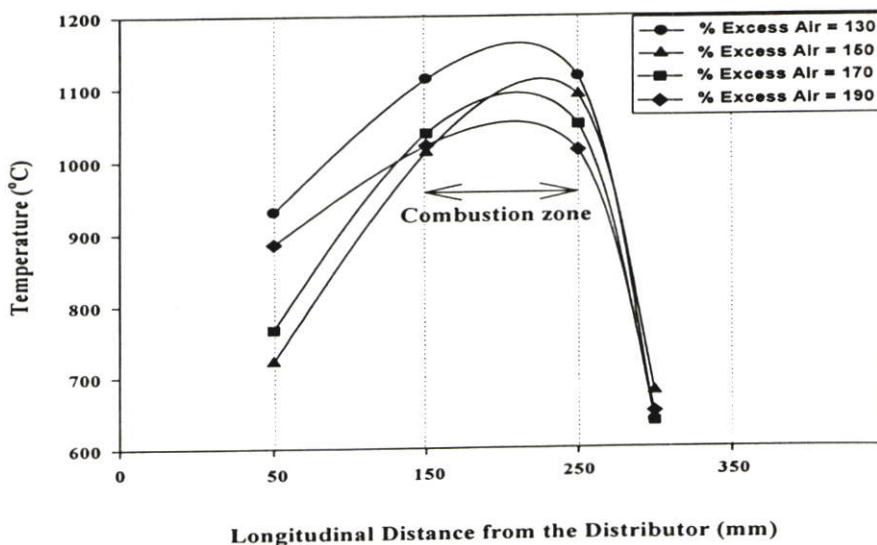
ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมรรถนะเบื้องต้นของหัวเผาวัสดุพรุน รวมถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในหัวเผา โดยทำการคงที่พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับหัวเผาไว้เท่ากับ 3 kw และคงที่ปริมาณอากาศในชั้นที่หนึ่งซึ่งจ่ายให้กับหัวเผาเท่ากับ 150 SCFH (Standard Cubic Foot per Hour) ตามลำดับ และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศชั้นที่สองเท่ากับ 105 125 150 และ 170 SCFH ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองจะใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงในการจุดเตาและ

อุณหภูมิที่ก่อกองหมุ่ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง เมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัวจึงเริ่มบันทึกก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ โดยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ที่บันทึกในงานวิจัยนี้ได้แก่ CO NO_x CO₂ และ O₂ ซึ่งไม่ได้ทำการบันทึกก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ เนื่องจากปัญหาทางด้านเครื่องมือวัด

4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพรุน



รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ที่ระดับความสูง 150mm จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง



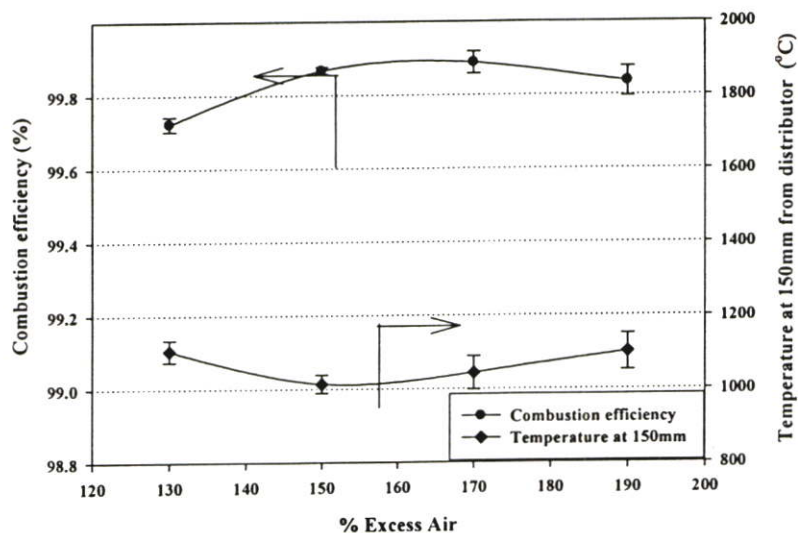
รูปที่ 3 แสดงการกระจายอุณหภูมิตามระดับความสูง

รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ที่ระดับความสูง 150mm จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง โดยในการทดลองทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินในช่วง 130-190% ซึ่งจากการผลทดลองพบว่าแนวโน้มอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ที่ระดับความสูง 150mm มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันในทุกเงื่อนไขการทดลอง โดยจากกราฟสามารถแบ่งช่วงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นสองช่วง คือ ช่วงแรกคือช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่ (ช่วงเวลา 5 ถึง 60 นาที) พบว่าอุณหภูมิก๊าซร้อนแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้และช่วงที่สองคือช่วงเข้าสู่สภาวะคงที่ (ช่วงเวลาตั้งแต่ 60 นาทีเป็นต้นไป) จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที ซึ่งในทุกเงื่อนไขการทดลองอุณหภูมิมีค่ามากกว่า 1000 °C โดยในช่วงที่สั้นนี้เป็นคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุพูนคือมีการเผาไหม้ที่ค่อนข้างเสถียร[4] เนื่องมาจากเกิดสภาวะสมดุลกันระหว่างการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนรวมกับการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน โดยที่กลไกการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจะถ่ายเทความร้อนสู่ upstream ในขณะที่กลไกการพาความร้อนจะถ่ายเทความร้อนไปสู่ downstream จึงทำให้เกิดภาวะสมดุลกัน ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซร้อนภายในหัวเผาค่อนข้างคงที่

รูปที่ 3 แสดงการกระจายอุณหภูมิตามระดับความสูง โดยในการทดลองพบว่าบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ (combustion zone) อยู่ในช่วงระดับความสูงตั้งแต่ 150mm จนถึง 250mm จากตะแกรง

กระจายเชื้อเพลิง โดยมีความยาวประมาณ 100 mm ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงของการเผาไหม้มีช่วงค่อนข้างยาว (Long flame temperature) โดยในทุกเงื่อนไขการทดลองอุณหภูมิสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 1050- 1100 °C ซึ่งอุณหภูมิเปลวไฟมีค่าค่อนข้างต่ำ (Low flame temperature) โดยคาดว่าน่าจะเกิดจากการที่ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นถ่ายเทความร้อนส่วนหนึ่งให้กับวัสดุพูน นอกจากนี้ยังพบว่าที่เงื่อนไขเดียวกันอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความสูงจนถึงที่ระดับความสูง 250mm จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง จากนั้นอุณหภูมิจะมีค่าต่ำลงเมื่อเข้าสู่บริเวณท่อทางออก โดยอุณหภูมิเริ่มต้นในทุกเงื่อนไขการทดลองที่ระดับความสูง 50 mm จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิงมีค่าสูงอยู่ในช่วง 720-950 °C โดยคาดว่าน่าจะเกิดจากของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ถูกอุ่น (preheating) ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งกลไกการอุ่นของผสมนี้เป็นคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุพูน [4] โดยเกิดขึ้นจากการที่เมื่อก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ไหลผ่านวัสดุพูน วัสดุพูนจะทำหน้าที่ดูดซับเอนทาลปีส่วนหนึ่งจากก๊าซร้อนไว้แล้วถ่ายเทความร้อนทั้งการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจากบริเวณ downstream ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ (combustion zone) ไปสู่บริเวณ upstream ซึ่งเป็นบริเวณที่ของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงกำลังพัดผ่าน ดังนั้นเมื่อของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิต่ำไหลผ่าน จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสู่ของผสม ซึ่งเป็นสาเหตุให้ของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงขึ้น

4.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้และอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพูน

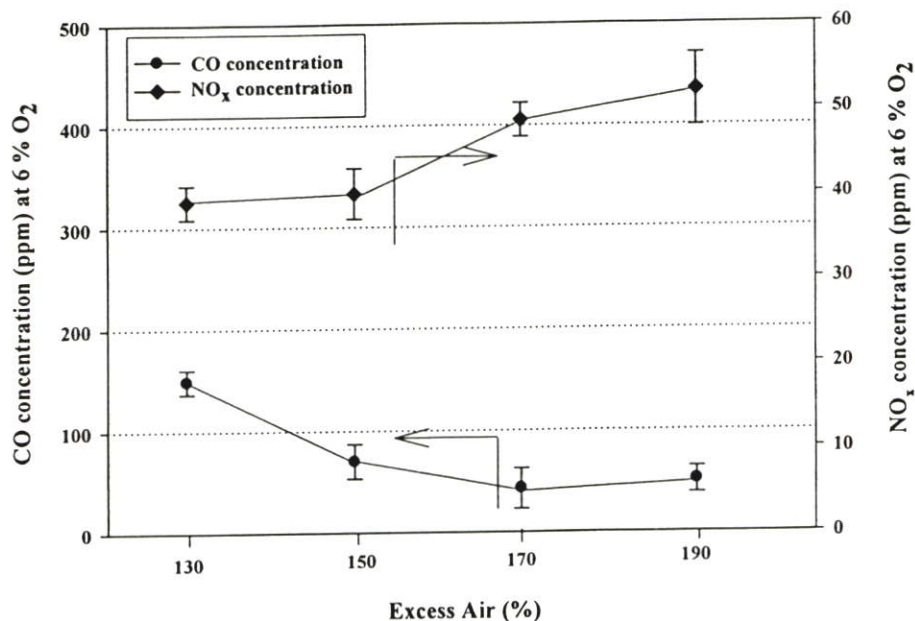


รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้และอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพูน

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้และอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพูน โดยจากผลการทดลองพบว่าในทุกเงื่อนไขการทดลองประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่ามากกว่า 99 % สอดคล้องกับอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพูนที่มีค่ามากกว่า 1000 °C

ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างค่อนข้างสมบูรณ์โดยคาดว่าน่าจะเกิดจากของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ถูกอุ่น (preheating) ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.3 องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย



รูปที่ 5 แสดงปริมาณ CO และ NO_x ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อปริมาณ CO และ NO_x ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินในช่วง 130-190 % ซึ่งหมายถึงการปรับเปลี่ยนพจน์การพาของของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ (Convection of air and fuel steam) โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าปริมาณ CO มีค่าต่ำอยู่ในช่วง 30-150 ppm ที่มาตรฐาน 6% O₂ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างค่อนข้างสมบูรณ์ โดยคาดว่าน่าจะเกิดจากของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ถูกอุ่น (preheating) ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวได้วิจารณ์ไว้ข้างต้น) โดยสามารถพิจารณาได้จากอุณหภูมิที่ระดับความสูง 50mm จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 720-950 °C นอกจากนี้อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ปริมาณ CO มีปริมาณต่ำคือ การที่ช่วงของการเผาไหม้มีช่วงค่อนข้างยาว (Long flame temperature) โดยมีความยาวประมาณ 100 mm ดังแสดงในรูปที่ 3 จึงทำให้เป็นการเพิ่มระยะเวลาการเผาไหม้ส่งผลให้ปริมาณ CO ที่ได้จากการเผาไหม้มีปริมาณต่ำ อีกทั้งยังพบว่าปริมาณ CO มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณอากาศส่วนเกิน โดยคาดว่าเกิดจากการเคลื่อนตัวของอากาศและเชื้อเพลิงที่กำลังเผาไหม้จากระดับความสูง 150mm เคลื่อนตัวไปเผาไหม้ต่อที่ระดับความสูง 250mm จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง โดยพิจารณาจากรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิในเงื่อนไขเดียวกันมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความสูงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน (พจน์ของการพามีค่าเพิ่มขึ้น) โดยคาดว่าน่าจะส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ปริมาณ CO มีค่าลดลงตามลำดับ

ส่วนปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้พบว่ามีความต่ำอยู่ในช่วง 35-55 ppm ที่มาตรฐาน 6% O₂ เนื่องจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเป็นการเผาไหม้ที่อุณหภูมิเปลวไฟมีค่าต่ำ (Low flame temperature) โดยพิจารณาจากรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิสูงสุดมีค่าไม่เกิน 1200 °C ทำให้ไม่มีโอกาสเกิด Thermal NO_x เนื่องจาก NO_x ประเภทนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง (> 1300 °C) และด้วยเหตุที่ LPG เป็นเชื้อเพลิงที่ไม่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนจึงทำให้ ไม่มีโอกาสเกิด fuel NO_x เช่นเดียวกัน ดังนั้นปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จึงมีปริมาณต่ำ ซึ่งปริมาณ NO_x ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่คาดว่าน่าจะเกิดขึ้นมาจาก prompt NO_x เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็น NO_x ที่เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยากันในระหว่างไฮโดรคาร์บอนกับไนโตรเจนในของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งโดยปกติ NO_x ประเภทนี้มีปริมาณต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ NO_x มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเป็นการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในอากาศ จึงทำให้โอกาสที่จะเกิด prompt NO_x มีเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ

4.สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการศึกษาสมรรถนะเบื้องต้นของหัวเผาวัสดุพูน รวมถึงพฤติกรรมของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในหัวเผา ซึ่งจากทดลองพบว่า

1. หัวเผาที่มีพฤติกรรมเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิเปลวไฟค่อนข้างต่ำ (Low flame temperature) อยู่ในช่วง 1050- 1100 °C ส่งผลให้ปริมาณ NO_x ที่ได้จากการเผาไหม้มีปริมาณต่ำ

2. ช่วงของการเผาไหม้มีช่วงค่อนข้างยาว (Long flame temperature) โดยมีความยาวประมาณ 100 mm จึงส่งผลให้ปริมาณ CO ที่ได้จากการเผาไหม้มีปริมาณต่ำ

3. ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่ามากกว่า 99 % สอดคล้องกับอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพอร์ซันที่มีค่ามากกว่า 1000°C ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์โดยคาดว่าจะเกิดจากของผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ถูกอุ่น (preheating) ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีอุณหภูมิประมาณ 720-950 °C

4. การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นค่อนข้างเสถียรไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ยอุณหภูมิมีค่ามากกว่า 1000 °C

5. อัตราการเกิดมลพิษของหัวเผาวัสดุพอร์ซันมีค่าต่ำ โดยปริมาณ CO และ ปริมาณ NO_x มีปริมาณต่ำอยู่ในช่วง 30-150 ppm และ 35-55 ppm ที่มาตรฐาน 6% O₂ ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (mtec) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและนักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Michael, P., Arpad, H., Martin, P. and Dennis, P., 2004. Integrated module for solid oxide fuel cell systems. United States Patent. US 6,749,958 B2.
- [2] Kelley, M. and Grover, T., 2003. Solid-oxide fuel cell system having an integrated air supply system. United States Patent. US 6,608,463 B1.
- [3] Senetor, J., Towler, P. and Harness, R., 2002. Multi-state combustion for fuel processing for use with fuel cell. United States Patent. US 6,342,197 B1.
- [4] Howell, J.R., Hall, M.J. and Ellzey, J.L., 1996. Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media. Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 22. pp. 121-145.
- [5] Hsu, P., Evans, F. and Howell, J.R., 1993. Experimental and Numerical Study of Premixed Combustion with Non-

homogeneous Porous Ceramic. Combustion Science Technology. Vol. 90. pp. 149-172.

- [6] Jugjai, S., Wongpanit, N., Laoketkan, T. and Nokkaew, S., 2002. The combustion of liquid fuels using a porous medium. Experimental Thermal and Fluid Science. Vol. 26. pp. 15-23
- [7] Kaplan, M. and Hall, M.J., 1995. The Combustion of Liquid Fuels within a Porous Media Radiant Burner. Experimental Thermal and Fluid Science. Vol. 11. pp. 13-20

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอาวุธ ลภีรัตน์กุล
ประวัติการศึกษา	2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์ทำงาน	พ.ศ.2547-ปัจจุบัน ตำแหน่งอาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร