

การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของเตาวัสดุพรุน

A STUDY ON DYNAMIC BEHAVIOR OF POROUS MEDIA BURNER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของเตาวัสดุพรุน

A STUDY ON DYNAMIC BEHAVIOR OF POROUS MEDIA BURNER

โดย



นายประทีป ยางสันเทียะ

นายอุทิศ ศรีหุต

นายจักรพันธ์ ชัชวาล

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อรวิตร เจริญสุข

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 82172
วัน,เดือน,ปี..... - 9 ก.ค. 2551

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2550

1190481x
b.....
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของเตาวัสดุพรุน

A STUDY ON DYNAMIC BEHAVIOR OF POROUS MEDIA BURNER

ผู้จัดทำ

1. นายประทีป ยางสันเทียะ
2. นายอุทิศ ศรีพุทธ
3. นายจักรพันธ์ ชัชวาล



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.บารุวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของเตาวัสดุพูน

นายประทีป ขางสันเทียะ รหัสประจำตัว 48015380

นายอุทิศ ศรีพุทธ รหัสประจำตัว 48015453

นายจักรพันธ์ ชัชวาล รหัสประจำตัว 48015722

รศ.ดร.จาร์วัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของเตาวัสดุพูนโดยใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ โดยทำการศึกษาถึงขนาดของวัสดุพูนที่สามารถประพฤติตัวเป็นตัวป้องกันไฟได้ดีและศึกษาขนาดของวัสดุพูนที่สามารถรักษาเปลวไฟให้สามารถเผาไหม้ภายในวัสดุพูนได้ โดยที่จะทำการทดลองเมื่อวัสดุพูนทั้งหมด 6 ขนาด ได้แก่ ขนาด 6 ม.ม. , 10 ม.ม. , 16 ม.ม. , 20 ม.ม. , 25 ม.ม. และ 30 ม.ม. จากการทดลองพบว่า วัสดุพูนที่ขนาด 6 ม.ม. และ 10 ม.ม. สามารถป้องกันเปลวไฟย้อนกลับได้ดี เนื่องจากการทดลองพบว่าที่เมื่อวัสดุพูนขนาดดังกล่าว มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่น้อยมากในทุกเงื่อนไขการทดลอง เกิดจากเมื่อวัสดุพูนมีขนาดเล็กจึงทำให้ช่องว่างระหว่างวัสดุพูนน้อยตามไปด้วย ดังนั้นการเผาไหม้ในเมื่อวัสดุพูนจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ต่อมาได้นำเมื่อวัสดุพูนขนาด 6 ม.ม. มาใช้เป็นชั้นป้องกันเปลวไฟย้อนกลับและทำการศึกษา การกระจายอุณหภูมิที่เกิดจากการเผาไหม้ในบริเวณเหนือชั้นดังกล่าว โดยวางเมื่อวัสดุพูนขนาด 20, 25 และ 30 ม.ม. ทำการทดลองในช่วง 120 นาทีแรกของการจุดเตา ที่เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน 80, 100, 110 และจากการทดลองพบว่าขนาดของเมื่อวัสดุพูนที่สามารถรักษาเปลวไฟให้สามารถติดอยู่ในเมื่อวัสดุพูนได้ คือ ที่เมื่อวัสดุพูนขนาดตั้งแต่ 20 ม.ม. ขึ้นไป จากการทดลองสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อวัสดุพูนขนาด 20 ม.ม. , 25 ม.ม. และ 30 ม.ม. มีแนวโน้มของอุณหภูมิสูงสุดตลอดช่วงเวลาที่ทำการศึกษา ณ ตำแหน่ง T_1 และ T_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A study on dynamic behavior of porous media burner

Prateep Yangsantea 48015380

Uthit Sriput 48015453

Jakaphan Chatchawan 48015722

Assoc. Prof.Dr.Jaruwat Chareonsuk Advisor

Abstract

This study investigated the dynamic behavior of porous burner using LPG gas as fuel tests were carried out in order to find the suitable size of the media for used in the oven which can be protect flashback and to find the suitable sine that is able to preserve a heat balance inside the porous region.

In case study the alumina sphere of various sizes, ranging from 6, 10, 16, 20 and 30 mm were used. From the test it was found that size of porous materials at 6 and 10 mm. could protect flashback as it prevent the combustion from taking place in a small hole of porous media. The alumina sphere at 6 mm. in size were then used as a combustor bed in order to prevent flashback temperature distribution were then investigated in combustion above the furnaceted with 20,25 and 30 mm spheres at various access air of 80,100 and 110 percents the results show that , for the size grater than 20 mm., combustion is quite stable inside the porous bone, because of temperature increase with time during the period of study between T_1 and T_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน ได้แก่ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ เอาใจใส่ ให้คำปรึกษาและเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาลดเวลาในการทำวิจัย จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ ที่ให้ความกรุณาในการให้ยืมใช้อุปกรณ์บันทึกค่าอุณหภูมิ (Data Logger)

ขอขอบคุณที่มานพ มาสมทบ และที่อาวุธ ลภรัตนากุล สำหรับคำปรึกษาข้อคิดเห็นและคำแนะนำต่างๆ รวมถึงเพื่อนๆ ทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ คือ บิดา - มารดา อันเป็นที่เคารพรักอย่างสูงยิ่งเป็นผู้ที่ให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมา ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสูงค่าประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

นายจักรพันธ์ ชัชวาล

นายอุทิศ ศรีพุทธ

นายประทีป ยางสันเทียะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินงาน	2
บทที่ 2 เทคโนโลยีการเผาไหม้	3
2.1 บทนำ	3
2.2 งานวิจัยที่ผ่านมา	3
2.3 ทฤษฎีการเผาไหม้	6
2.3.1 ความหมายของการเผาไหม้	6
2.3.2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้	6
2.3.3 สภาวะที่จำเป็นในการเริ่มเกิดปฏิกิริยา	12
2.3.4 พลังงานความร้อนของการเผาไหม้	14
2.3.5 ค่าอัตราส่วนสมมูล	16
2.3.6 การถ่ายเทความร้อน	17
2.3.7 การผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง	18
2.3.8 อุณหภูมิของการจุดติดไฟ	18
2.3.9 การสูญเสีย	19
2.4 คุณสมบัติของแก๊ส LPG	21
2.4.1 คุณสมบัติทางเคมี	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.2 คุณสมบัติกายภาพ	21
2.5 คุณสมบัติของวัสดุพูน	24
2.5.1 การเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน	25
2.5.2 การเปลี่ยนรูปความร้อนระหว่างการพาความร้อนและแผ่รังสีความร้อน ในวัสดุพูน	25
2.5.3 การนำวัสดุพูนมาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ	26
บทที่ 3 แก๊สเชื้อเพลิงและการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง	28
3.1 เชื้อเพลิงแก๊ส	28
3.1.1 ชนิดของแก๊สเชื้อเพลิง	28
3.2 แก๊สเชื้อเพลิง	29
3.2.1 ชนิดของแก๊สเชื้อเพลิง	29
3.2.2 คุณลักษณะของแก๊สเชื้อเพลิง	30
3.3 ก๊าซ LPG	31
3.3.1 กระบวนการผลิตก๊าซ LPG	32
3.3.2 คุณสมบัติของก๊าซ LPG	32
3.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมกับอุณหภูมิและความดันไอน้ำ	33
3.3.4 คุณสมบัติการสันดาป	35
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	37
4.1 อุปกรณ์ในการทดลอง	37
4.2 ขั้นตอนการทดลอง	41
4.3 การทดลอง	42
บทที่ 5 ผลการทดลอง	44
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	70
6.1 สรุปผลการทดลอง	70
6.1.1 ขนาดของวัสดุพูนมีอิทธิพลต่ออัตราการเผาไหม้	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

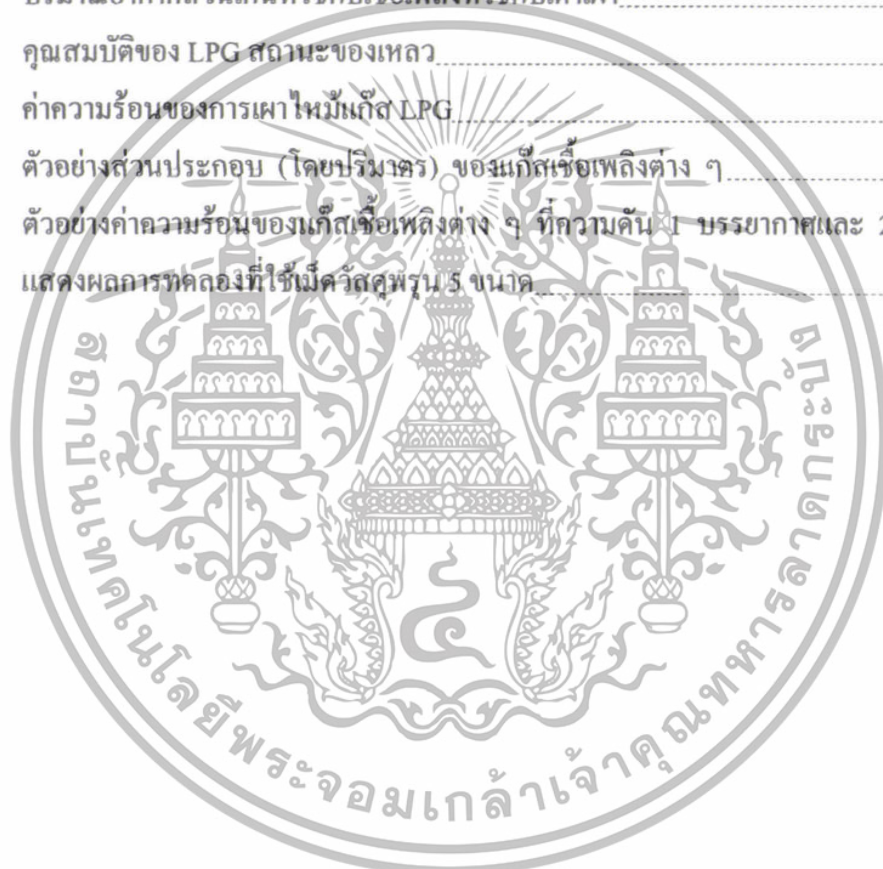
	หน้า
6.1.2 อัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศมีผลต่อการเผาไหม้.....	70
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
หนังสืออ้างอิง	72
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก. การคำนวณอัตราส่วนการเผาไหม้ อากาศกับเชื้อเพลิง LPG.....	75
ภาคผนวก ข. ตารางผลการทดลอง.....	90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ขีดจำกัดการเกิดเปลวไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ	13
2.2	ค่าความร้อนและอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียเบติก	16
2.3	อุณหภูมิตัดไฟของเชื้อเพลิงในอากาศ	19
2.4	ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้กับเชื้อเพลิงที่ใช้กับเตาเผา	20
2.5	คุณสมบัติของ LPG สถานะของเหลว	21
2.6	ค่าความร้อนของการเผาไหม้แก๊ส LPG	23
3.1	ตัวอย่างส่วนประกอบ (โดยปริมาตร) ของแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ	31
3.2	ตัวอย่างค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่ความดัน 1 บรรยากาศและ 25°C	31
4.1	แสดงผลการทดลองที่ใช้มีควัตคูมว 5 ขนาด	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาพื้นฐานของไฮโดรเจน คาร์บอน และออกซิเจน.....	10
2.2	องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้.....	12
2.3	แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านทรงกระบอก.....	17
2.4	เปรียบเทียบอุณหภูมิการเผาไหม้ชนิดที่มีและไม่มีการหมุนเวียนความร้อน.....	25
4.1	ห้องเผาไหม้.....	37
4.2	ท่อผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ.....	38
4.3	เม็ควัสดุพอรัน.....	38
4.4	เทอร์โมคัปเบิล.....	39
4.5	เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Digital Indicator).....	39
4.6	เครื่องมือวัดอัตราการไหลของ LPG และอากาศ (Flow meter).....	40
4.7	แหล่งจ่ายอากาศ.....	41
4.8	ถังบรรจุก๊าซ LPG.....	41
4.9	แสดงลักษณะของเม็ควัสดุพอรัน.....	43
5.1	เม็ควัสดุพอรันขนาด 6 มม. ที่อากาศเกินพอที่ 20%, อัตราการไหล 63 ลิตรต่อนาที.....	44
5.2	เม็ควัสดุพอรันขนาด 6 มม. , ที่อากาศเกินพอที่ 40%, อัตราการไหล 73.6 ลิตรต่อนาที.....	44
5.3	เม็ควัสดุพอรันขนาด 6 มม. , ที่อากาศเกินพอที่ 60%, อัตราการไหล 84 ลิตรต่อนาที.....	45
5.4	เม็ควัสดุพอรันขนาด 6 มม. , อากาศเกินพอที่ 80% , อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที.....	45
5.5	เม็ควัสดุพอรันขนาด 6 มม. , อากาศเกินพอที่ 100% , อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที.....	45
5.6	เม็ควัสดุพอรันขนาด 10 มม. , อากาศเกินพอที่ 20 % , อัตราการไหล 63 ลิตรต่อนาที.....	46
5.7	เม็ควัสดุพอรันขนาด 10 มม. , อากาศเกินพอที่ 40 % , อัตราการไหล 73.6 ลิตรต่อนาที.....	47
5.8	เม็ควัสดุพอรันขนาด 10 มม. , อากาศเกินพอที่ 60 % , อัตราการไหล 84 ลิตรต่อนาที.....	47
5.9	เม็ควัสดุพอรันขนาด 10 มม. , อากาศเกินพอที่ 80 % , อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที.....	47
5.10	เม็ควัสดุพอรันขนาด 10 มม. , อากาศเกินพอที่ 100 % , อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที.....	48
5.11	เม็ควัสดุพอรันขนาด ที่ 16 มม. ที่อากาศเกินพอ 20%.....	49
5.12	เม็ควัสดุพอรันขนาด 16 มม. ที่อากาศเกินพอ 40%.....	49
5.13	เม็ควัสดุพอรันขนาด 16 มม. ที่อากาศเกินพอ 60%.....	50
5.14	เม็ควัสดุพอรันขนาด 16 มม. ที่อากาศเกินพอ 80%.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15 เม็ดวัสดุพรุณขนาด 16 มม. อากาศเกินพอที่ 100%.....	51
5.16 แสดงการใช้เม็ดวัสดุพรุณขนาดเล็กทำหน้าที่เป็นตัวป้องกัน ไฟย้อนกลับ	52
5.17 เม็ดวัสดุพรุณขนาด 20 มม. , อากาศเกินพอที่ 80 % , อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที.....	53
5.18 เม็ดวัสดุพรุณขนาด 20 มม. , อากาศเกินพอที่ 100 % , อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที...54	54
5.19 เม็ดวัสดุพรุณขนาด 20 มม. , อากาศเกินพอที่ 110 % , อัตราการไหล 111.5 ลิตรต่อนาที ..55	55
5.20 เม็ดวัสดุพรุณขนาด 25 มม. , อากาศเกินพอที่ 80 % , อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที.....	56
5.21 เม็ดวัสดุพรุณขนาด 25 มม. , อากาศเกินพอที่ 100 % , อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที...57	57
5.22 เม็ดวัสดุพรุณขนาด 25 มม. , อากาศเกินพอที่ 110 % , อัตราการไหล 111.5 ลิตรต่อนาที...58	58
5.23 เม็ดวัสดุพรุณขนาด 30 มม. , อากาศเกินพอที่ 80 % , อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที.....	59
5.24 เม็ดวัสดุพรุณขนาด 30 มม. , อากาศเกินพอที่ 100 % , อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที...60	60
5.25 เม็ดวัสดุพรุณขนาด 30 มม. , อากาศเกินพอที่ 110 % , อัตราการไหล 111.5 ลิตรต่อนาที...61	61
5.26 ที่อากาศเกินพอที่ 80% , ที่บริเวณอุณหภูมิ T_1	62
5.27 ที่อากาศเกินพอที่ 80% , ที่บริเวณอุณหภูมิ T_2	62
5.28 ที่อากาศเกินพอที่ 80% , ที่บริเวณอุณหภูมิ T_3	63
5.29 ที่อากาศเกินพอที่ 100% , ที่บริเวณอุณหภูมิ T_1	64
5.30 ที่อากาศเกินพอที่ 100% , ที่บริเวณอุณหภูมิ T_2	65
5.31 ที่อากาศเกินพอที่ 100% , ที่บริเวณอุณหภูมิ T_3	66
5.32 ที่อากาศเกินพอที่ 110% , ที่บริเวณอุณหภูมิ T_1	67
5.33 ที่อากาศเกินพอที่ 110% , ที่บริเวณอุณหภูมิ T_2	67
5.34 ที่อากาศเกินพอที่ 110% , ที่บริเวณอุณหภูมิ T_3	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ชื่อ/ความหมาย
A/F	ค่าสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง
A/F _{stoic}	ค่าสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ Stoichiometric
MW _{air}	น้ำหนักมวลโมเลกุลของอากาศ
MW _{fuel}	น้ำหนักมวลโมเลกุลของเชื้อเพลิง
m _a	อัตราการไหลของอากาศ
m _f	อัตราการไหลของเชื้อเพลิง
ϕ	ค่าอัตราส่วนสมมูล $\left(\frac{A/F_{stoic}}{A/F} \right)$
HHV	ค่าความร้อนสูง (Higher heating value)
LHV	ค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value)
h _{fg,25 °C}	ค่าเอนทัลปีในการกลายเป็นไอของน้ำที่ 25 °C
C _p	ค่าความร้อนจำเพาะ, kCal/kg
MW	น้ำหนักมวลโมเลกุล
h	เอนทัลปี
C _{p,H₂O}	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ, (kJ/kg)
m _{H₂O}	มวลของน้ำ, (kg)
r _o	รัศมีวงนอก
r _i	รัศมีวงใน
q	ปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวล
Q _{มีจุดค้ำบน}	อัตราการถ่ายโอนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมต่าง ๆ ภายในประเทศเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้พลังงานที่ใช้กันอยู่เริ่มลดน้อยลง จึงทำให้หลาย ๆ หน่วยงานทั้งทางภาครัฐและภาคเอกชนได้พยายามแก้ไขปัญหาวิกฤตพลังงานนี้ด้วยการรณรงค์การใช้พลังงานทดแทนมากขึ้น เช่นการพยายามใช้แหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศ ได้แก่ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานลม พลังงานคลื่น และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น นอกจากนี้รูปแบบของพลังงานทดแทนที่กล่าวมานี้แล้วนั้น ยังมีเทคโนโลยีอีกด้านหนึ่งซึ่งเป็นพลังงานทดแทนอีกทางเลือกหนึ่งที่มีแนวโน้มที่จะมีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ในอีกไม่กี่ปีข้างหน้า นั่นคือ เทคโนโลยีด้านเซลล์เชื้อเพลิง โดยข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยมสนใจเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่สำหรับอนาคต ก็คือเซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมน้อย ลดการเกิดก๊าซที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาระบบของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้สามารถผลิตพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นด้วยการติดตั้ง reformer เข้าไปในระบบเพื่อช่วยในการอุ่นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนก่อนเข้าทำปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยแหล่งพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับ reformer ได้มาจากถ่านหินหรือเตาเผาไหม้เพิ่มเข้าไปในระบบ ซึ่งรูปแบบของการติดตั้งทั้ง reformer และเตาเผาไหม้เข้าไปในระบบของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น ทำได้โดยการติดตั้ง reformer ไว้ภายในเตาเผาไหม้หรือติดตั้งไว้ภายนอกเตาเผาไหม้ก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม ขึ้นอยู่กับสมรรถนะของเตาเผาไหม้ที่ทำได้ โดยเตาเผาไหม้ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปส่วนใหญ่เป็นเตาเผาไหม้ประเภท free flame ซึ่งข้อเสียของเตาเผาไหม้จำพวกนี้คือ ผลิตพลังงานความร้อนได้ไม่เสถียร (เกิดการแกว่งของอุณหภูมิสูง) การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงส่งผลต่อสมรรถนะของเตาเผาไหม้อย่างมาก อีกทั้งยังมีอัตราการเกิดมลพิษสูงอีกด้วย ซึ่งจากข้อเสียดังกล่าวเมื่อนำเตาเผาไหม้มาติดตั้งเข้ากับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงแล้ว จะทำให้เกิด thermal stress กับ reformer ส่งผลอุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ โดยจากการศึกษาพบว่าทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาดังกล่าวได้คือการนำหัวเผาวัสดุพรุน (Porous media burner) มาติดตั้งเข้ากับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงแทนเตาเผาไหม้เดิมที่ใช้กันอยู่ (Conventional combustor) ด้วยเหตุผลที่ว่าหัวเผาวัสดุพรุนนั้น มีการเผาไหม้ที่เสถียรคือการปรับเปลี่ยนสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงไม่ค่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลกระทบต่อการเผาไหม้ อัตราการเกิดมลพิษต่ำและลดอัตราการแพร่ของอากาศเข้าสู่เชื้อเพลิง ซึ่งช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงเกิดขึ้นช้าลงได้ นอกจากนี้ด้วยคุณลักษณะเด่นของวัสดุพูน คือ ถ่ายเทความร้อนทั้งการนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเข้าไว้ด้วยกัน ช่วยทำให้การเผาไหม้เกิดได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น โดยหัวเผาวัสดุพูนที่มีโซอยู่ในขณะนี้มีอยู่ด้วยกันสองรูปแบบคือ หัวเผาวัสดุพูนแบบ single stage และแบบ Multi-stage ดังนั้นโครงการนี้ จะเน้นด้านการพัฒนาหัวเผาวัสดุพูนแบบ single stage โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะและพฤติกรรมของหัวเผานี้ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่อง โดยจะนำผลการทดลองที่ได้มาปรับปรุงและพัฒนาหัวเผาวัสดุพูนเพื่อนำไปใช้กับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการออกแบบและสร้างเตาวัสดุพูน
2. เพื่อทำการศึกษาถึงขนาดของวัสดุพูนที่สามารถประพาศตัวเป็นตัวป้องกัน ไฟได้ดี
3. เพื่อศึกษาถึงขนาดของวัสดุพูนที่สามารถรักษาเปลวไฟให้สามารถเผาไหม้ภายในวัสดุพูนได้

1.3 ขอบเขตการทำงาน

1. ออกแบบและสร้างเตาวัสดุพูนแบบ Single state โดยให้มีไฟออร์สมิเลียนขนาด 6,10,16,20, 25 และ 30 มม. เป็นวัสดุพูนในระบบการทดสอบ
2. ศึกษาอิทธิพลของขนาดของเม็ดวัสดุพูนที่มีผลต่ออัตราการเผาไหม้ภายในเตาวัสดุพูน
3. ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K วัดอุณหภูมิตามความสูงในระดับต่างๆของห้องเผาไหม้

1.4 วิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลของเตาเผาวัสดุพูน
2. กำหนดและออกแบบและสร้างเตาเผาวัสดุพูน
3. ทำการทดลอง
4. ปรับปรุงแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น
5. ทำการทดลองซ้ำและเก็บข้อมูล
6. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เทคโนโลยีการเผาไหม้

2.1 บทนำ

ในการออกแบบสร้างเตาเผาวัสดุพูนมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาปัจจัยที่สร้างผลกระทบต่อการออกแบบส่วนประกอบของเตาเผา เช่น ห้องเผาไหม้ อุปกรณ์การจ่ายเชื้อเพลิง และการเลือกใช้เชื้อเพลิง อีกทั้งยังต้องมีการศึกษาเตาเผาที่มีการใช้งานอยู่ เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติละเอียดปัจจัยในส่วนต่างๆที่สร้างผลกระทบต่อเตาเผาที่มีการใช้งานในแต่ละลักษณะก่อนที่จะทำการออกแบบ

2.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

1. Development of Liquid Fuel Porous Combustion - Heat Exchanger Without Spray Atomizer โดย รศ.ดร. ดำรงค์ จักรใจ ซึ่งทำการวิจัยการศึกษาค้นคว้าทดลองเพื่อพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งอยู่รวมบนหน่วยเดียวกันทั้งเตาเผาไหม้และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งได้รับการออกแบบโดยอาศัยคุณสมบัติเด่นของวัสดุพูน เช่น มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อนสูง จึงเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ในงานวิจัยนี้วัสดุพูนที่ใช้ทำมาจากลาวดาข่ายสแตนเลสทนอุณหภูมิสูงมาทำการประยุกต์ใช้
2. High Performance Liquid Fuel Porous Burner โดย Anirut Mantujek ซึ่งทำการพัฒนาหัวเผาน้ำมันเชื้อเพลิงแบบใหม่เพื่อช่วยส่งเสริมการเผาไหม้โดยไม่มีการสเปรย์เป็นฝอยละอองและศึกษาถึงโครงสร้างทางความร้อนและอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อสมรรถภาพของหัวเผา จากการศึกษาพบว่าวัสดุพูนสามารถที่จะช่วยให้เชื้อเพลิงระเหยได้จึงสามารถสร้างหัวเผาโดยไม่ใช้หัวฉีดได้
3. Development of Porous Burner Technology for Ultra – Lean Combustion System โดย Dr.Farid C.Christo ซึ่งเป็นงานวิจัยโดยใช้มีเทนเป็นเชื้อเพลิงและใช้วัสดุพูนที่ประกอบด้วย อลูมินาเซรามิกและทำการศึกษาขบวนการทำงานของหัวเผาที่มีค่าอัตราส่วนสมมูลต่ำสุดเท่ากับ 0.1 จากการศึกษาพบว่าเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอเกิดขึ้นที่ภายในชั้นของวัสดุพูน การออกแบบหัวเผาโดยไม่ให้เกิดการผสมผสานกันของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีเทนกับอากาศก่อนการเผาไหม้ภายในชั้นวัสดุพรุน และทำการศึกษาผลของ No_x และ CO ที่เกิดขึ้น

4. Application of Porous media for energy saving in gas cooker โดย Natawut Rungsimantuchart ในงานวิจัยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะนำเทคโนโลยีวัสดุพรุนมาประยุกต์ใช้ในการส่งเสริมประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ในร้านขายอาหาร เนื่องจากวัสดุพรุนมีลักษณะเด่นคือสามารถเป็นได้ทั้งตัวรับความร้อนและตัวแผ่รังสีความร้อน จึงสามารถนำไปใช้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่งานวิจัยในครั้งนี้จะทำการศึกษาโดยการทดลอง โดยใช้หัวเผาเตาแก๊สชนิดฟู่ (KB - 5) ที่ขายอยู่ตามท้องตลาดทั้งไปนำมาประกอบเข้ากับโครงสร้างของเตาที่สร้างขึ้นเพื่อประสิทธิภาพของการเผาไหม้ที่ดียิ่งขึ้น โดยที่โครงสร้างที่ออกแบบนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญคือวัสดุพรุนสองชุด โดยที่ชุดแรกจะทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสีความร้อนและชุดที่สองจะทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อน ซึ่งเมื่อนำเอาวัสดุพรุนทั้งสองชนิดมาวางชิดโดยมีแผ่นโลหะคั่นระหว่างกลางก็จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากแก๊สไอเสียสู่แก๊สไอดี จากการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาที่ออกแบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้สูงขึ้นถึง 15.84%
5. Liquid Fuel Porous Burner with Cyclic Flow Reversal Combustion โดย Kampanat Teannoï เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเหลวภายใต้ชั้นวัสดุพรุนเมื่อสลับทิศทางการไหลของอากาศเผาไหม้อย่างเป็นจังหวะ โดยมีการศึกษาถึงอิทธิพลของตั้งแปรต่างๆที่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของการเผาไหม้รวมถึงสมรรถนะของระบบการเผาไหม้แบบสลับทิศทางการไหลของอากาศเผาไหม้อย่างเป็นจังหวะและมีการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบทั้งในแง่โครงสร้างความร้อนและมลภาวะ
6. Enhancement of Heat Transfer by the Surface Combustion – Heater (SCH) with Cyclic Flow Reversal Combustion (CFRT) of mixture in the Porous Media โดย Samreng Jugiai , Anantachai Sawananon , Korakit Tongasuk , Chittee Rungchroen and Suwat Wachirawittayakul ได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวภายใต้ชั้นวัสดุพรุนเมื่อสลับทิศทางการไหลของอากาศ เช่น อุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูล
7. A Study of Direct Energy Conversion by a Porous Thermo – electric Device with a Cyclic Flow Reversal Combustion โดย อภิวัฒน์ พงษ์ดำเนิน , สำเร็จ จักรใจ ได้ทำงานวิจัยการศึกษาการนำเทคนิคการเผาไหม้แบบสลับทิศทางการไหลของไอคืออย่างเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จังหวัดภายในวัสดุพูนไปประยุกต์ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้คือ LPG เทคนิคดังกล่าวมีข้อดีคือการหมุนเวียนความร้อนจากการเผาไหม้ภายในระบบทำให้มีช่วงการจุดติดไฟกว้างขึ้น สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงคุณภาพต่ำได้โดยพบว่าในระบบการทดลองนี้เปลวไฟสามารถติดได้ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลต่ำถึง 0.029 นอกจากนี้ยังปลดปล่อยปริมาณมลภาวะต่ำ ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาดังถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น อัตราส่วนสมมูล, ความเร็วเชื้อเพลิงและความดันทานภายนอกต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตา, มลภาวะที่ปลดปล่อย, กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

8. A Development and Performance Study of a Coconut oil Burner โดย สนทยา มีเตียง ได้ทำการสร้างหัวเผา น้ำมันมะพร้าว โดยใช้อุปกรณ์จ่ายน้ำมันแรงดันสูงของเครื่องยนต์ดีเซลมาประยุกต์ใช้และทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง, อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง, รูปร่างของเปลวไฟจากการเผาไหม้, การกระจายอุณหภูมิและการเกิดเขม่า จากการศึกษาพบว่ารูปร่างของเปลวไฟไม่เสถียรจะมีความยาวสูงสุดประมาณ 45 เซนติเมตร ที่อัตราการไหลเชิงมวล 1.092 กรัมต่อวินาที ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 11.52 ไม่นับเขม่าและควันในการเผาไหม้ในขณะที่รูปร่างของเปลวไฟไม่เสถียรจะเกิดที่อัตราการไหลเชิงมวลเชื้อเพลิงต่ำกว่า 0.289 กรัมต่อวินาที
9. Burning Lean and Green with Porous Burner Technology โดย Dr.Farid C.Christo ได้ทำการสร้างหัวเผาแบบวัสดุพูน โดยใช้มีเทนเป็นเชื้อเพลิงในการทดลองและใช้วัสดุพูนเป็นเซรามิกและทำการหว่านประสิทธิภาพของหัวเผาและมลภาวะที่เกิดขึ้น จากการทดลองพบว่า หัวเผาสามารถทำงานได้ที่อัตราส่วนสมมูล 0.15 ที่อัตราการไหลของอากาศ 500 ลิตรต่อวินาทีและให้อุณหภูมิสูงสุดที่ 1162 องศาเซลเซียส
10. Vegetable oil Burner for Cooking Purpose โดย ฉันทิ เกษตรสุวรรณ และคณะ ได้ทำการสร้างหัวเผาน้ำมันพืชซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตได้เองในประเทศรวมทั้งน้ำมันพืชที่ผ่านการประกอบอาหารแล้วมาทำให้เกิดประโยชน์โดยการทดแทนแก๊สหุงต้ม โดยทำการพัฒนาลักษณะของหัวเผาน้ำมันโดยเผาไหม้ร่วมกับแก๊สหุงต้ม เพื่อใช้ความร้อนจากแก๊สหุงต้มทำให้เกิดการระเหยและการจุดติดไฟของน้ำมัน โดยจะทำเสนอการออกแบบการส่งน้ำมันเข้าห้องเผาไหม้ แก้ปัญหาของเขม่าควันเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์โดยปรับปรุงลักษณะการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเพื่อให้ความร้อนถ่ายเทไปยังภาชนะหุงต้มได้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทฤษฎีการเผาไหม้ [7]

การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการออกแบบเตาเผาวัสดุพูน ส่วนหนึ่งผลกระทบที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมรรถนะ ประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผาและมลภาวะที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งจำแนกได้ดังนี้

2.3.1 ความหมายของการเผาไหม้

การเผาไหม้ หมายถึง ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารที่ทำให้การเผาไหม้ โดยที่นี้คือสารเผาไหม้ที่เป็นตัวหลักคือ คาร์บอน และ ไฮโดรเจน

การเผาไหม้สมบูรณ์ หมายถึง การเผาไหม้ซึ่งเกิดขึ้นแล้วสามารถทำให้ปริมาณค่าความร้อนเท่ากับค่าความร้อนของการเผาไหม้ ผลที่เกิดจากการเผาไหม้จะอยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และไฮโดรเจน

2.3.2 ปฏิกิริยาของการเผาไหม้

ปฏิกิริยาของการเผาไหม้หมายถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในอุณหภูมิสูง (ตั้งแต่ 1000 องศาเซลเซียสขึ้นไปโดยประมาณ) เกิดขึ้นเร็วมาก (ในช่วง 1 ไมโครวินาที - 10 ไมโครวินาที) เป็นปฏิกิริยาที่เอกพันธ์หรือเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ในวิชาเคมีระหว่างโมเลกุลของเชื้อเพลิงหรือโมเลกุลของเชื้อเพลิงหรือโมเลกุลที่เกิดจากการแตกตัวของเชื้อเพลิงออกซิเจนซึ่งโดยทั่วไปใช้อากาศ ปฏิกิริยาในวิชาเคมีที่มีความซับซ้อนมากทั้งในส่วนของจำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและส่วนที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตพื้นที่ของภาชนะหรืออุปกรณ์ที่บรรจุอยู่

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นลูกโซ่ (Chain reaction) ไม่ใช่ปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลโดยตรง แต่จะเริ่มต้นด้วยการหลุดตัวของโมเลกุลเป็นอนุมูลอิสระที่ว่องไว (Active free radical) จำนวนมากเป็นขั้นตอนการเริ่มต้นปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain initiation) อนุมูลอิสระที่ว่องไวจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น ได้อนุมูลอิสระใหม่และอนุมูลขั้นกลาง (Intermediate radicals) อื่นๆซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (Chain propagation) ทั้งที่เกิดพร้อมๆกัน (Simultaneous) และที่เกิดขึ้นเป็นอันดับก่อนหลังกัน (Consecutive) หลายรูปแบบ (Branching, Dissociation, Abstraction) ทำให้เกิดผลผลิตและอนุมูลอื่นๆ อีกมาก สุดท้ายคือปฏิกิริยาที่ให้ผลผลิตสุดท้ายและอนุมูลที่ไม่ว่องไว ตามด้วยการสิ้นสุดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain termination) ดังนั้นแม้แต่เชื้อเพลิงที่ง่ายที่สุดเช่น ไฮโดรเจนก็มีจำนวนปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องมากถึง 12 ปฏิกิริยา ดังมีผู้เสนอไว้เบื้องต้นแล้วต่อมามีผู้เสนอเพิ่มเติมจนถึง 25 ปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของไฮโดรเจน

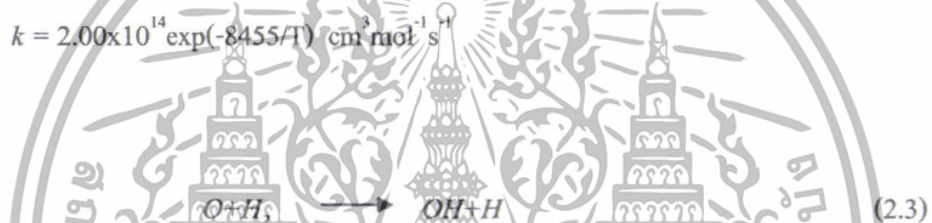
เปลวไฟของไฮโดรเจนกับอากาศหรือออกซิเจนไม่สามารถที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าแต่มี

การปล่อยพลังงานในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเกิดจากอนุมูลอิสระ OH ได้อุณหภูมิเปลวไฟจะเค็ยเบตติงสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดประมาณ 3100 องศาเซลวิน โดยใช้สัดส่วนมวลสารสัมพันธ์ พบว่าได้ความเร็วของเปลวๆ ไฟ สูงสุดเช่นเดียวกัน และในผลิตภัณฑ์จะเกิดขึ้นประมาณ 57% ส่วนที่เหลือประมาณหนึ่งในสี่อยู่ในรูปอนุมูลอิสระ ปฏิกิริยาการเริ่มต้นด้วยการแตกตัวของไฮโดรเจนโดยชนกับผนังกลายเป็นอนุมูลอิสระไฮโดรเจน ซึ่งจะ去做ปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดอนุมูลอื่นและปฏิกิริยาลูกโซ่อื่นๆ ปฏิกิริยาที่สำคัญคือ



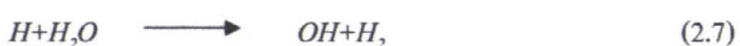
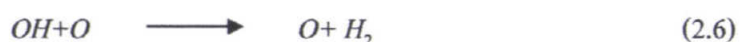
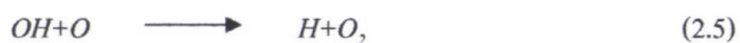
และ



$$k = 5.94 \times 10^{14} \exp(-3880/T) \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

ดังนั้นถ้าทั้งสามสมการเกิดขึ้นตามลำดับ จากอนุมูลอิสระไฮโดรเจนหนึ่งอนุมูลอิสระ จะได้อนุมูลอิสระไฮโดรเจนถึงสามอนุมูลที่อุณหภูมิต่ำ แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ของปฏิกิริยาจะเข้าใกล้กันมากขึ้น อัตราเร็วจึงไม่ต่างกันมากนัก

ในเปลวไฟสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดสภาวะกึ่งสมดุลขึ้นในขณะที่ปฏิกิริยาที่ดำเนินไปได้ประมาณสามในสี่ แต่ออนุมูลอิสระและอะตอมต่างๆ ยังมีเอนทัลปีอยู่ พลังงานนี้ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาการรวมตัวอันดับสาม (third-order recombination) ซึ่งใช้เวลาการเกิดมากกว่าอันดับสอง ในช่วงหลังเปลวไฟ แก๊สที่มีเชื้อเพลิงเข้มข้นจะเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวโดยอนุมูล H เป็นหลัก คือ



ส่วนแก๊สที่มีเชื้อเพลิงเจือจางจะเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวโดยอนุมูล H_2O เป็นหลักคือ



ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอนมอนอกไซด์

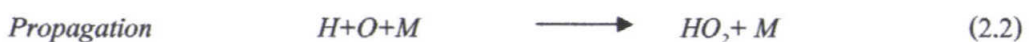
แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีปฏิกิริยาที่มีไฮโดรเจนเฉื่อยปนอยู่เสมอเช่นในแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีแก๊สมีเทนปนอยู่ด้วยเล็กน้อย ดังนั้นในการออกซิไดซ์แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จึงมีอนุมูลอิสระ OH และ H_2O เข้ามามีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาลุกไหม้ดังนี้



เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องด้วยปฏิกิริยา



หรือ



และในที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังเกิดปฏิกิริยาเพิ่มเติมเนื่องจากแก๊สมีเทนที่เจือปน คือ



ปฏิกิริยาเหล่านี้ถึงแม้จะเริ่มต้นจากอนุมูลจำนวนน้อยแต่มีผลสำคัญ เนื่องจากอนุมูลหมุนเวียนกลับมาเกิดปฏิกิริยาได้อีกดังสมการที่ 2.12 และ 2.13

สมการที่ 2.12 และ 2.13 และ 2.15 มีความสำคัญที่สุดในการออกซิไดซ์แก๊ส CO ไปเป็น CO₂ และเป็นปฏิกิริยาสำคัญในการออกซิไดซ์เชื้อเพลิงที่คาร์บอนและไฮโดรคาร์บอน โดยเฉพาะ

สมการที่ 2.3 มีความสำคัญที่สุด นั้นหมายความว่าไม่สามารถเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นได้โดยตรงโดยไม่ผ่านขั้นตอนการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ก่อน ดังนั้นถ้ามีสถานะที่ให้อนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากับ CO ได้น้อยลง ก็จะมีผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง และเกิดการปลดปล่อยแก๊ส CO ออกสู่บรรยากาศ เนื่องจากสมการที่ 2.13 เกิดขึ้นได้ช้า เมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่อนุมูลอิสระ OH จะดึงไฮโดรเจนออกจากไฮโดรคาร์บอน

สำหรับโมเลกุลอย่างง่ายของเชื้อเพลิง (ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่) เช่น มีเทน ปฏิกิริยาเริ่มต้นจากการแตกตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis) ก่อน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูลความรอนดังสมการ



จากปฏิกิริยาได้อนุมูลอิสระเช่น เมทิล และไฮโดรเจน ดังมีเวลาเพียงพอสำหรับช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยา เพื่อที่จะผลิตอนุมูลอิสระจำนวนหรือความเข้มข้นมากพอที่จะไปทำให้เริ่มเกิดกระบวนการเผาไหม้อย่างแท้จริงได้ ช่วงเวลานี้เรียกว่า ช่วงเวลาเหนี่ยวนำ (Induction delay) จากนั้น อนุมูลอิสระ โดยเฉพาะ ไฮโดรเจนซึ่งว่องไวมากกว่าจะไปทำปฏิกิริยาต่างๆ รวมทั้ง Abstraction branching และ Association branching ดังสมการ



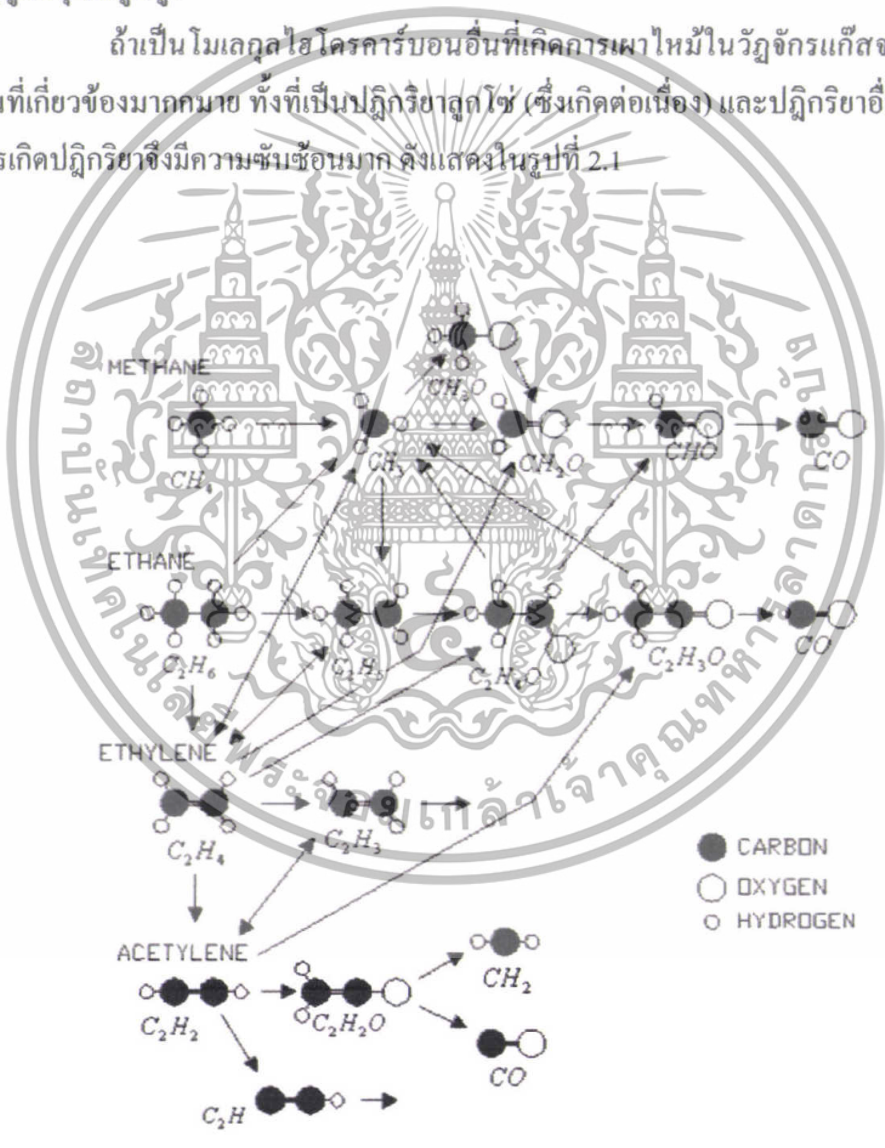
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่ควบคุมอัตราเร็ว โดยรวมของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์



โอกาสที่อนุมูลอิสระตั้งแต่สองอนุมูลขึ้นไปจะมาชนกัน น้อยกว่า โอกาสที่อนุมูลจะไปทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลอื่นๆ ปฏิกิริยานี้จึงช้ากว่า แต่เป็นปฏิกิริยาหลักสำหรับการรวมตัวของอนุมูลที่อุณหภูมิสูง

ถ้าเป็น โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนอื่นที่เกิดการเผาไหม้ในวัฏจักรแก๊สจะมีปฏิกิริยาพื้นฐานที่เกี่ยวข้องมากมาย ทั้งที่เป็นปฏิกิริยาออกซิไดซ์ (ซึ่งเกิดต่อเนื่อง) และปฏิกิริยาอื่นๆ เส้นทางของการเกิดปฏิกิริยาจึงมีความซับซ้อนมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เส้นทาง การเกิดปฏิกิริยาพื้นฐานของไฮโดรเจน คาร์บอน และออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกและจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการเผาไหม้ แม้แต่ของโมเลกุลเล็กๆ จะมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นไปกว่านั้น ที่อุณหภูมิต้องพิจารณาสถานะที่ผนังอุปกรณ์ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อจลนพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนเข้ามามีส่วนร่วมสำคัญ การทำความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์การเผาไหม้จึงจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อทำนายระหว่างความเข้มข้นและเวลาที่เกิดการเผาไหม้

ดังนั้นถ้าพิจารณาในภาพรวมแล้วไม่ว่าเชื้อเพลิงนั้นจะมีโครงสร้างโมเลกุลและสถานะใด เมื่อเกิดการเผาไหม้จนสมบูรณ์แล้ว สามารถเขียนปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ดังนี้ ถ้ามีการเผาไหม้สมบูรณ์จะเกิดปฏิกิริยา



ถ้ามีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะเกิดปฏิกิริยา



ได้ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไอน้ำ

ถ้าเชื้อเพลิงมีกำมะถันอยู่ จะเกิดปฏิกิริยา



ได้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ถ้าเชื้อเพลิงมีไนโตรเจนจะเกิดไนโตรเจนออกไซด์และถ้าใช้อากาศไนโตรเจนจากอากาศส่วนหนึ่งจะกลายเป็นไนโตรเจนออกไซด์ด้วย แต่เนื่องจากปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ไนโตรเจนใช้พลังงานสูงมากจึงเกิดปฏิกิริยาได้น้อย ปริมาณแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ในฟลูแก๊สนี้น้อยอยู่ในระดับต่ำกว่าพันส่วนในล้านส่วน ในการพิจารณาทั่วไปจึงไม่นำมาพิจารณาเว้นแต่ต้องคำนวณผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อม

2.3.3 สภาพที่จำเป็นในการเริ่มเกิดปฏิกิริยา

2.3.3.1 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีตัวทำปฏิกิริยาและที่สภาวะเหมาะสม ปฏิกิริยาการเผาไหม้คือปฏิกิริยาการออกซิไดซ์เชื้อเพลิงให้เกิดเนออกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจนสมบูรณ์ การเผาไหม้โดยทั่วไปตัวทำปฏิกิริยาคือเชื้อเพลิง (ซึ่งเป็นคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่) และอากาศซึ่งจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาได้ต่อเมื่อมีนสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งคือ แหล่งความร้อนเพื่อจุดไฟ (Ignition source) ซึ่งแสดงองค์ประกอบได้สามประการคือ



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

การเริ่มต้นปฏิกิริยาการเผาไหม้ซึ่งเป็นปฏิกิริยาถูกโซ่เริ่มต้นด้วยการแตกตัวของโมเลกุลของเชื้อเพลิงเป็นอนุมูลอิสระก่อน แหล่งจุดไฟจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากเพราะจะให้พลังงานส่วนแรกแก่ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนทำให้เชื้อเพลิงเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระจำนวนมากพอที่จะไปทำให้เกิดปฏิกิริยาถูกโซ่ของการเผาไหม้เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แล้วแหล่งจุดไฟจะไม่จำเป็นอีกต่อไปเพราะพลังงานการเผาไหม้ส่วนต้นมากพอที่จะไปทำให้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลืออยู่เกิดการแตกตัวและการเผาไหม้ต่อเนื่องกันไปได้อจนสมบูรณ์

2.3.3.2 ขีดจำกัดการเกิดเปลวไฟ (Flammability limits)

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นเนื้อเดียวกันสามารถเกิดได้ในช่วงความดันและอุณหภูมิกว้างถ้าส่วนผสมระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศเกิดปฏิกิริยาภายใต้ความดันสูงจะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเร็วเหนือเสียง (Supersonic Reaction) เรียกว่าการระเบิดและถ้าส่วนผสมระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศเกิดปฏิกิริยาที่ความดันอากาศหรือภายใต้ความดันต่ำจะเป็นปฏิกิริยาที่เร่ต่ำกว่าเสียง (Subsonic Reaction) เรียกว่าการเผาไหม้ด้วยความร้อนแต่คำนิยามใช้มากกว่าคือการเกิดเปลวไฟ (Flame)

เพราะมีความดันปกติแนวหรือขอบเขตของการเผาไหม้ปรากฏเป็นแสงสว่างมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้มาใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.3 เปลวไฟ (Flame)

เป็นบริเวณการเผาไหม้ (Combustion Zone) ที่เคลื่อนที่เข้าหาส่วนผสมระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศ การที่จะเกิดเปลวไฟขึ้นได้นั้นต้องเริ่มจากส่วนผสมที่เหมาะสม ถ้าเริ่มจากเชื้อเพลิงอย่างเดียวการเผาไหม้จะเกิดขึ้นไม่ได้ ถ้าเริ่มจากอากาศหรือสารออกซิไดซ์อย่างเดียวการเผาไหม้ก็เกิดขึ้นไม่ได้เช่นกัน ดังนั้นจากอากาศหรือสารออกซิไดซ์อย่างเดียวการเผาไหม้ระหว่างส่วนผสมที่เชื้อเพลิงเจือจางที่สุด (Lean Mixture) ที่จะเกิดเปลวไฟขึ้นได้เรียกขีดจำกัดขั้นต่ำของการเกิดเปลวไฟ (Lower limit of flammability) และส่วนผสมที่เข้มข้นที่สุด (Rich Mixture) ที่ยังคงเกิดเปลวไฟได้เรียกว่าขีดจำกัดขั้นสูงของการเกิดเปลวไฟ (Limit of flammability) เชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีขีดจำกัดเปลวไฟต่างกันทั้งช่วงกว้างและค่าขีดจำกัดทั้งขั้นสูงและขั้นต่ำดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขีดจำกัดการเกิดเปลวไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ

เชื้อเพลิง	ส่วนผสมที่เชื้อเพลิงเจือจางที่สุด (%)	ส่วนผสมเชื้อเพลิงที่เข้มข้นที่สุด (%)
Acetone	3.10	11.50
Acetylene	2.50	80.00
Ammonia	16.1	26.60
Benzene	1.41	7.10
Butane	1.86	8.41
Butyl	1.45	11.25
Butylene	1.98	9.65
Carbon monoxide	12.5	74.2
Ethane	3.22	12.45
Ethyl	4.25	18.95
Ethylene	3.05	28.6
Heptane	1.00	6.70
Hexane	1.27	6.90
Hydrogen	4.00	74.2
Methane	5.00	14.00
Methyl	7.1	36.5
Octane	0.95	-
Pentane	1.42	7.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ชีตจำกัดการเกิดเปลวไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ (ต่อ)

เชื้อเพลิง	ส่วนผสมที่เชื้อเพลิงเจือจางที่สุด (%)	ส่วนผสมเชื้อเพลิงที่เข้มข้น ที่สุด (%)
Propane	2.37	9.50
Propyl	2.15	13.5
Propylene	2.40	10.30
Propylene oxide	2.10	21.50

2.3.4 พลังงานความร้อนของการเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จากความรู้เบื้องต้นทางด้านความร้อนของปฏิกิริยาสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนของปฏิกิริยาใด ๆ เช่น คำนวณจากความร้อนของปฏิกิริยาที่สภาวะมาตรฐาน (Standard heat of reaction, ΔH_r°) คือ ความดัน 1 บรรยากาศและอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสหรือคำนวณจากความร้อนของการเกิด(ของค่าใด ๆ) ที่สภาวะมาตรฐาน(Standard heat of formation, ΔH_f°) ความร้อนของปฏิกิริยาที่สภาวะมาตรฐานและความร้อนของการเกิดที่สภาวะดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากหนังสือการเผาไหม้ ปฏิกิริยาการเผาไหม้แสดงเป็นความร้อนของการเผาไหม้ที่สภาวะมาตรฐาน(Standard heat of combustion, ΔH_c°) สามารถคำนวณได้ลักษณะเดียวกัน เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจึงมีค่าเป็นลบเสมอ ถ้ามีค่าบวก แสดงว่าสารนั้นไม่สามารถเผาไหม้ได้

2.3.4.1 ค่าความร้อน

ในการคำนวณพลังงานจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ค่าเป็นลบ ซึ่งไม่สะดวกแก่การใช้งานจึงนิยมใช้ทอม ค่าความร้อน (Heating value หรือ Calorific value) ซึ่งมีค่าเท่ากับความร้อนของการเผาไหม้ที่สภาวะมาตรฐานแต่มีค่าเป็นบวก สำหรับเชื้อเพลิงธรรมชาติไม่ว่าจะเป็น ถ่านหิน , น้ำมันและผลิตภัณฑ์หรือชีวมวลเป็นสารประกอบไม่บริสุทธิ์จึงไม่สามารถคำนวณจากความร้อนของปฏิกิริยาจึงจำเป็นต้องทำการทดลองในเครื่องมือเฉพาะที่เรียกว่า บอมบ์ แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งและของเหลว

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง หมายถึง พลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกจากเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ในกระบวนการไหลคงที่และผลิตภัณฑ์กลับสู่สภาวะของสารปฏิกิริยา ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับสถานะของน้ำในผลิตภัณฑ์ แต่ถ้ากรณีน้ำในผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาวะของเหลวเรียกว่าค่าความร้อนสูง (HHV) ถ้ากรณีน้ำในผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาวะไอเรียกว่า ค่าความร้อนต่ำ (LHV) และแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$HHV = LHV + (Nh_{fg,25})_{H_2O} \quad \frac{kJ}{kg} \quad (2.25)$$

เมื่อ N คือ Mass Fraction ของน้ำในผลิตภัณฑ์

$h_{fg,25}$ คือ ค่าเอนทาลปีของการกลายเป็นไอของน้ำที่ $25^\circ C$ $\frac{kJ}{kg}$

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากการทดสอบโดยอุปกรณ์ Bomb calorimeter

2.3.4.2 อุณหภูมิเปลวไฟอะเดียเบติก (adiabatic flame temp)

ในปฏิบัติการการเผาไหม้จำเป็นต้องทราบถึงอุณหภูมิในเตาเผาไหม้และอุณหภูมิของ แก๊สผลิตภัณฑ์หรือฟลูเอ็ล (Fuel gas) ที่ได้จากการเผาไหม้เพื่อใช้ในการออกแบบเกี่ยวกับอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อนหรือคำนวณเกี่ยวกับปริมาณความร้อนที่ถูกถ่ายโอนให้กับวัสดุภายในเตาเผาหรือให้แก่ไอน้ำในระบบดังกล่าวผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่เป็นแก๊สจะออกจากระบบด้วยกันทั้งหมดเป็นกระแสเดียว อุณหภูมิของฟลูเอ็ลทั้งหมดจะสูงซึ่งเรียกว่า อุณหภูมิเปลวไฟ (Flame Temperature) ถ้าเป็นปฏิกิริยาเผาไหม้ด้วยออกซิเจน อากาศในปริมาณที่ต้องการตามทฤษฎีเกิดอย่างสมบูรณ์และไม่มีการสูญเสียออกจากระบบ อุณหภูมิจะสูงสุดอะเดียเบติก (Maximum adiabatic flame temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงสุดของเปลวไฟที่เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งๆ จะทำได้ที่อุณหภูมิสูง โมเลกุลของผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้ ได้แก่ แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ในโตรเจน และออกซิเจนเกินพอที่มีอยู่ชั่วขณะ จะเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลและอะตอมที่ว่องไว ซึ่งปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นปฏิกิริยาคูความร้อนจึงมีผลให้ปริมาณความร้อนในระบบน้อยลงอุณหภูมิของเปลวไฟจึงลดลงเราสามารถใช้อุณหภูมิการแตกตัวคำนวณอุณหภูมิของเปลวไฟที่คำนึงถึงการแตกตัวของโมเลกุลที่อุณหภูมิสูงได้และเรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิอะเดียเบติกที่แก้ค่าแล้ว (Corrected adiabatic flame temperature)

ตารางที่ 2.2 ค่าความร้อนและอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียเบติก

Fuel	HHV(kJ/kg)	LHV(kJ/kg)	T_{ad} (°K)
Methane	55526	50016	2226
Acetylene	49923	48225	2539
Ethene	50131	47161	2369
Ethane	51901	47489	2289
Propane	48936	45784	2334
1 - Butene	48471	45319	2322
n - Butane	49546	45742	2270
1 - Pentene	48152	45000	2314
n - Pentene	49032	45355	2272
Benzene	42277	40579	2342
1 - Hexene	47955	44803	2308
n - Hexene	48696	45105	2273
1 - Heptene	47817	44665	2305
n - Heptene	48456	44926	2274
1 - Octane	47712	44560	2302
n - Octane	48275	44791	2275
1 - Nonene	47631	44478	2300
n - Nonene	48134	44626	2276
1 - Decene	47565	44413	2298
n - Decene	48020	44602	2277

2.3.5 ค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalent Ratio ϕ)

ค่าอัตราส่วนสมมูล (ϕ) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้งานจริงมีค่ามากหรือน้อยกว่าสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎี ถ้าค่า ϕ มีค่ามากกว่า 1.0 แสดงว่าเป็นส่วนผสมหนา (rich mixture) คือสัดส่วนของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ที่น้อยกว่าเชื้อเพลิง แต่ถ้าค่า ϕ มีค่าน้อยกว่า 1.0 แสดงว่าส่วนผสมบาง (lean mixture) คือสัดส่วนของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มีค่ามากกว่าเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi = (A/F)_{stoic} / (A/F)_{actual} \quad (2.26)$$

เมื่อ

$(A/F)_{stoic}$ คือ อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงทางทฤษฎี

$(A/F)_{actual}$ คือ อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงจริง

โดยที่

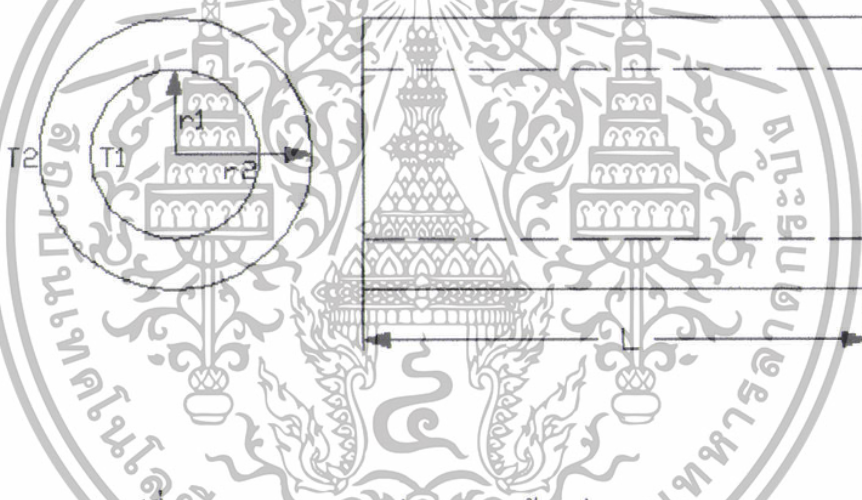
$$(A/F) = m_a / m_{fuel}$$

เมื่อ

m_a คือ อัตราการจ่ายของอากาศ (kg/s)

m_{fuel} คือ อัตราการจ่ายน้ำมัน (kg/s)

2.3.6 การถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 2.3 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านทรงกระบอก

การถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อด้านอุณหภูมิการเผาไหม้ เนื่องจากถ้าการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวผนังได้มาก จะทำให้สมมติฐานในรูปการถ่ายเทความร้อนของทรงกระบอก ดังรูปที่ 2.3 สมการการถ่ายเทความร้อน

$$Q_{cond} = \frac{2\pi(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2.27)$$

เมื่อ

- T_1 คือ อุณหภูมิด้านในของทรงกระบอก, ($^{\circ}K$)
 T_2 คือ อุณหภูมิด้านนอกของทรงกระบอก, ($^{\circ}K$)
 T_3 คือ รัศมีด้านในของทรงกระบอก, (m)
 T_4 คือ รัศมีด้านนอกของทรงกระบอก, (m)

2.3.7 การผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง

การผสมอากาศกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้นั้นมีส่วนสำคัญในการเผาไหม้เนื่องจากการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ดีจะช่วยลดการเกิดเขม่าและควันจากการเผาไหม้ได้ ซึ่งทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์และยังเพิ่มประสิทธิภาพด้านอุณหภูมิ ความเสถียรของเปลวไฟขณะทำการเผาไหม้

2.3.8 อุณหภูมิของการจุดติดไฟ (Ignition Temperature)

อุณหภูมิของการจุดติดไฟ หมายถึง อุณหภูมิซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้มากกว่าความร้อนที่สูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้น กระบวนการเผาไหม้จึงกลายเป็นกระบวนการดำเนินได้เอง (Self-sustaining)

อุณหภูมิจุดติดไฟและสารที่เผาไหม้ได้จะแปรตามชนิดของสารนั้น จากตารางที่ 2.3 จะแสดงอุณหภูมิต่ำสุดและช่วงอุณหภูมิในอากาศสำหรับเชื้อเพลิงและองค์ประกอบของสารเผาไหม้ได้ของเชื้อเพลิงซึ่งมีองค์ประกอบหลายอย่างที่มีผลต่ออุณหภูมิจุดติดไฟ เช่น ความดัน, ความเร็ว, ระบบที่ล้อมรอบ (Enclose Configuration), วัสดุที่เป็นตัวเร่ง (Catalytic Materials), การผสมกันของอากาศและเชื้อเพลิง

อุณหภูมิจุดติดไฟ (Ignition Temperature) จะลดลงซึ่งขึ้นอยู่กับการเพิ่มขึ้นของความดันและเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นในอากาศเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงในอากาศ

สารที่เผาไหม้ได้	สูตรเคมี	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)
Sulfur	S	470
Charcoal	C	650
Fix Carbon (Semibituminous coal)	C	765
Fix Carbon (anthracite)	C	840 - 1115
Acetylene	C_2H_2	580 - 825
Ethane	C_2H_6	880 - 1165
Ethylene	C_2H_4	900 - 1020
Hydrogen	H_2	1065 - 1095
Methane	CH_4	1170 - 1380
Carbon Monoxide	CO	490 - 560
Kerosene		490 - 560
Gasolene		500 - 800

2.3.9 การสูญเสีย (Losses)

ความร้อนของเชื้อเพลิงไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นความร้อนทั้งหมด มีบางส่วนที่ถูกดูดซับโดยเตาเผาออกจากรูปแบบของเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้ทำให้เกิดคาร์บอนคงเหลืออยู่ในรูปของเถ้าหรือคาร์บอนถูกเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดคาร์บอนออกไซด์แทนที่จะเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งปกติแล้วออกซิเจนในเชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้ทั้งหมด ความร้อนที่สูญเสียจึงเป็นการสูญเสียที่ปล่อยเพราะความร้อนในเชื้อเพลิงจะกำหนดที่ความดันบรรยากาศ ผลลัพธ์ทั้งหมดจากการเผาไหม้ถูกทำให้เย็นจนเท่ากัน ถ้าหากความร้อนทั้งหมดถูกนำไปใช้ประโยชน์ซึ่งความร้อนที่สูญเสียจะประกอบด้วย

- Sensible heat ของไอเสียแห้ง
- Sensible heat ในความชื้นของอากาศ
- Sensible heat น้ำในเชื้อเพลิง
- Latent heat ของความชื้นในเชื้อเพลิง

ในทางปฏิบัติการเผาไหม้ต้องการอากาศมากกว่าในทางทฤษฎี ซึ่งอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้จะทำให้เกิดการสูญเสียในกระบวนการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้กับเชื้อเพลิงที่ใช้กับเตาเผา

เชื้อเพลิง	ชนิดหัวเผา	ปริมาณอากาศเกินพอ(%โดยน้ำหนัก)
Pulverize coal	Completely water-cooled furnace for slag-tap or dry-ash-removal Partially water-cooled furnace for dry-ashremoval Cyclone Furnance-pressure or suction Spreader-Stoker	15-20
Crushed coal	Water-cooled vibrating-grate stoker	15-40
Coal	Chain-grate and traveling-grate stokers Under stoker	10-15 30-60
Fuel oil	Oil burner , register type Multifuel burner and flat-flame Cone and flat-flame typeburner , stream-atomized	15-50 20-50 5-10
Acid sludge	Register-type burner Multifuel burner	10-20 10-15
Natural , coke-oven and refinery gas	Interube nozzle-type burner Dutch oven(10-23% through) and Hoff-type All furnace	5-10 7-12
Blast-furnance gas	Recovery furnace for kraft and soda-pulping	15-18
Wood		20-25
Begass		25-35
Black liquore		5-7

นอกจากนี้ยังมี Inherent heat losses ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้และยังมีความร้อนที่สูญเสียหลายอย่างที่สามารถควบคุมเพียงบางส่วนซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก

- การกระจายของผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของบรรยากาศ
- ความชื้นในองค์ประกอบของเชื้อเพลิงรวมกับผลรวมของไฮโดรเจนกับออกซิเจนในเชื้อเพลิง

เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการสูญเสียความร้อนเพื่อที่จะสามารถออกแบบที่ดีและการควบคุมการทำงานที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถลดการสูญเสียสามารถที่จะทำได้โดย

- การควบคุมปริมาณอากาศส่วนเกิน
- การปล่อยของแข็งที่ไม่สามารถเผาได้ป้อนมาในเตาหรือการของเสียจากการเผาไหม้
- การปล่อยให้แก๊สที่ไม่ถูกเผาไหม้ปล่อยไปกับแก๊สเสีย
- การใช้ฉนวนหุ้มอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อลดการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 คุณสมบัติของแก๊ส LPG

2.4.1 คุณสมบัติทางเคมี

คุณสมบัติเคมีของแก๊ส LPG หมายความว่ารวมถึงแก๊ส ไฮโดรเจนที่มีส่วนผสมของคาร์บอนในระดับ C3 และ C4 ซึ่งในระดับนี้ไฮโดรคาร์บอนจะเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของเหลวได้ ภายใต้ความดันที่ไม่สูงมากนัก ที่อุณหภูมิไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ประกอบด้วย

โพรเพน Propane C_3H_8

โพรพิลีน Propylene C_3H_6

บิวเทน Butane C_4H_{10}

บิวทิลีน Butylene C_4H_8

และมีสารประกอบที่ไม่ใช่ ไฮโดรคาร์บอน รวมอยู่บ้างเล็กน้อยเนื่องจากความหลากหลายของส่วนประกอบทำให้มีการตั้งมาตรฐานของแก๊ส LPG ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงให้แน่ชัดและเป็นข้อมูลในการออกแบบให้ถูกต้องและปลอดภัย

อย่างไรก็ตาม C3 และ C4 ที่ปรากฏอยู่ในส่วนผสมของแก๊ส LPG อาจแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือพวก Saturated และ Unsaturated ซึ่งสองกลุ่มนี้ต่างกันตรงลักษณะการจับตัวกันของคาร์บอนอะตอม

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

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

2.4.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

2.4.2.1 สถานะของเหลว

เนื่องจาก LPG นั้นมีจุดเดือดต่ำมาก คือโพรเพน -42.045 องศาเซลเซียส นอร์มัลบิวเทน -0.5 องศาเซลเซียส ไอโซบิวเทน -11.72 องศาเซลเซียส ดังนั้น LPG จะมีจะเดือดและสถานะเป็นแก๊สที่บรรยากาศ เว้นเสียแต่ถูกอัดด้วยความดันอยู่ในถัง ค่าความดันที่ทำให้เป็นของเหลวคือความดันของ LPG เอง

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของ LPG สถานะของเหลว

	โพรเพน	นอร์มัลบิวเทน	ไอโซบิวเทน
น้ำหนักโมเลกุล	44.097	58.124	58.124
จุดเดือด (องศาเซลเซียส 1 บรรยากาศ)	-42.045	-0.05	-11.72
อุณหภูมิวิกฤต (องศาเซลเซียส)	96.67	152.03	134.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 สถานะแก๊ส

ช่วงการลุกไหม้ แก๊สที่สันดาปได้จะมีช่วงส่วนผสมกับอากาศเพียงช่วงเดียวที่จุดไฟแล้วลุกไหม้ได้ เพราะอากาศผสมอยู่ในปริมาณที่พอเหมาะช่วงการลุกไหม้จะแสดงเป็นค่าร้อยละของปริมาณแก๊สต่ออากาศ ความเข้มข้นสูงสุดของการเผาไหม้เรียกว่า ค่าขอบบน ส่วนทางด้านต่ำเรียกว่า ค่าขอบล่าง LPG (ของผสมระหว่างโพรเพนกับบิวเทน) จะลุกไหม้ในช่วง 2-9% โดยโพรเพนมีช่วงการลุกไหม้ 2.4-9.5% ในอากาศและบิวเทน มีช่วงการลุกไหม้ 1.8-8.4% ในอากาศถ้าส่วนผสมมากหรือน้อยนี้จะไม่ติดไฟ

อุณหภูมิของการจุดติดไฟ

เมื่อค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิให้กับเชื้อเพลิงค่าหนึ่งแล้ว แม้จะไม่มีประกายไฟหรือสาเหตุของการติดไฟ เชื้อเพลิงก็จะลุกไหม้เองตามธรรมชาติ อุณหภูมิค่าสุดที่เริ่มเกิดการลุกไหม้ตามธรรมชาติเรียกว่าอุณหภูมิการจุดติดไฟ ของโพรเพนคือ 460-580 องศาเซลเซียส ของบิวเทน คือ 540-50 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของเปลวไฟ

อุณหภูมิของเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ของแก๊สหุงต้มมีสูงมากที่จะหลอมละลายโลหะต่างๆ ได้เช่น เหล็กหล่อ ทองเหลือง อะลูมิเนียม และแก๊สเป็นต้น โดยโพรเพนมีอุณหภูมิเปลวไฟในอากาศ 1930 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนปริมาณของเหลวต่อแก๊ส

แก๊สหุงต้มเมื่ออยู่ในสถานะแก๊ส ปริมาตรจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากโดย โพรเพน 1 หน่วยปริมาตรเมื่อกลายเป็นแก๊สแล้วจะมีปริมาตรเป็น 27 หน่วยที่ 15.5 องศาเซลเซียส ส่วน บิวเทน 1 หน่วยปริมาตร เมื่อกลายเป็นแก๊สแล้วจะมีปริมาตรเป็น 233 หน่วยที่ 15.5 องศาเซลเซียส

ค่าความร้อนทางการเผาไหม้

ค่าความร้อนของการเผาไหม้ หมายถึง ปริมาตรความร้อนที่เกิดจากการนำเอาแก๊ส LPG 1 หน่วยน้ำหนักหรือ 1 หน่วยปริมาตร มาทำการเผาไหม้ที่ความดันและอุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) ดังตารางที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ค่าความร้อนของการเผาไหม้แก๊ส LPG

ที่อุณหภูมิ 25	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	10898	10837	10810
บีทียู/ปอนด์	19780	19506	19458
กิโลแคลอรี/ลบ.เมตร	22250	29400	29200
บีทียู/ลบ.ฟุต	2500	3304	3281

ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (Air Requirement)

แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สที่มีผสมอยู่ในอากาศ 21% โดยปริมาตรและเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้จะต้องมีปริมาณที่แน่นอน ในกรณีที่แก๊ส LPG เผาไหม้อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด ก็จะกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ การเปลี่ยนแปลงสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



ดังนั้นจะเป็นสมการเหล่านี้ ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะเป็น 5 เท่า ในกรณีของโพรเพนและจะเป็น 6.5 เท่าในกรณีของบิวเทน เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในอากาศมีปริมาณ 21% ฉะนั้นในการเผาไหม้โพรเพนอย่างสมบูรณ์ 1 ลบ.เมตร จะต้องใช้อากาศ 24 ลบ.เมตร ส่วนบิวเทน 1 ลบ.เมตร จะต้องใช้อากาศ 31 ลบ.เมตร ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับน้ำมันเบนซินแล้ว LPG ต้องการอากาศมากกว่าเล็กน้อย

สี่ กลิ่น ความเป็นพิษและการละลาย

LPG บริสุทธิ์จะไม่มีสีและกลิ่น ดังนั้นบริษัทผู้ผลิตจะต้องเติมสารประกอบที่มีกลิ่นเหม็นลงไปด้วยเพื่อให้ผู้ใช้ได้รู้เมื่อมีเกิดการรั่วเกิดขึ้น สารประกอบที่ใส่ลงไปจะมีสาร เมอร์แคปแทน(Mercaptane) แก๊ส LPG เป็นแก๊สที่ไม่มีพิษแต่ในกรณีเกิดการสันดาปอย่างไม่สมบูรณ์จะเกิดแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้เช่นกัน เนื่องจาก LPG ไม่มีสารพิษร้ายแรงเช่น Tetraethy Lead

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีในน้ำมันเบนซิน ฉะนั้นแก๊สเสี่ยของ LPG จึงสะอาดเมื่อเปรียบเทียบกับกาเผาไหม้ของน้ำมันเบนซิน

นอกจากนั้นแก๊ส LPG มีคุณสมบัติเป็นตัวทำลายเช่นเดียวกับพวกน้ำมันระเหยจึงไม่สามารถทำให้เป็นอุปกรณ์ต่างๆที่ทำมาจากยางธรรมชาติเสี่ยคุณสมบัติได้เช่น ปะเก็นหรือ ซีลต่างๆ ดังนั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้กับถังที่บรรจุแก๊สธรรมชาติ ควรใช้วัสดุอื่นที่ไม่ได้ทำมาจากยางธรรมชาติ เช่น ยางสังเคราะห์ เป็นต้น

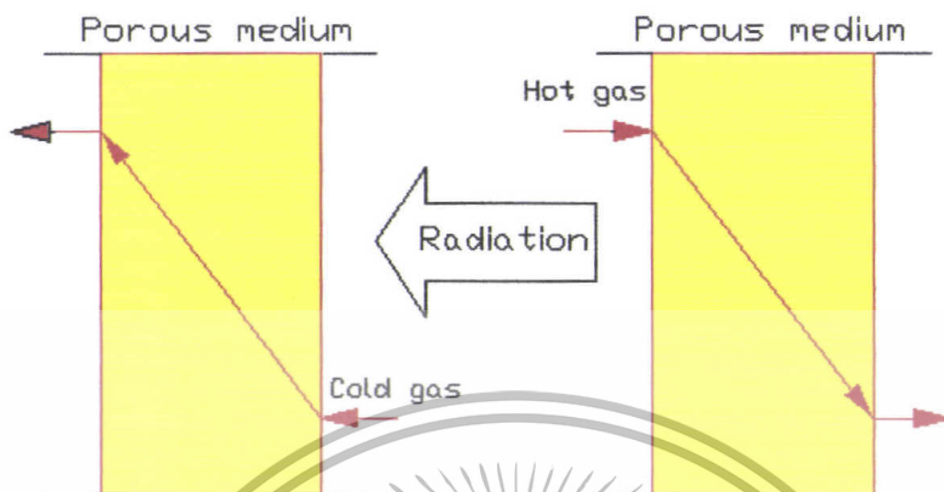
2.5 คุณสมบัติของวัสดุพอรุน[6]

วัสดุที่นำมาทำการเลือกใช้ คือ เซรามิกที่มีส่วนผสมของอลูมิน่าเป็นส่วนแลส่วนประกอบโดยนำมาทำการจัดเรียงซ้อนกันในห้องเผาไหม้ วัสดุพอรุนมีคุณสมบัติคือเป็นวัสดุที่มีพื้นผิวต่อปริมาตรสูงทนต่ออุณหภูมิสูงได้ และมีบทบาทที่สำคัญต่อการเผาไหม้คือเป็นตัวทำให้เกิดการหมุนเวียนของพลังงานภายในระบบโดยวัสดุพอรุนทำหน้าที่ดูดซับเอนทรานปีบางส่วนของแก๊สร้อนไว้และแผ่รังสีความร้อนออกมาที่กระแสนของกาเผาไหม้ (Upstream) และเนื่องจากวัสดุพอรุนมีเนื้อที่ในการสัมผัสกับของไหลสูงหรืออัตราส่วนระหว่างผิวต่อปริมาตรสูงดังนั้นกรถ่ายเทความร้อนจึงมีประสิทธิภาพสูงซึ่งปัจจุบันวัสดุพอรุนถูกผลิตในรูปแบบต่างๆกันเนื่องจากมีผู้สนใจใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้เป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังมีแนวโน้มในการนำวัสดุไปใช้กับอุปกรณ์ให้ความร้อนอื่นๆ

2.5.1 การเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน (Heat Recirculating Combustion)

รูปที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบระดับอุณหภูมิการเผาไหม้ระหว่างระบบมีและไม่มีกาหมุนเวียนความร้อน การหมุนเวียนความร้อนสามารถทำได้หลายวิธีในที่นี้จะใช้วัสดุพอรุน ซึ่งจะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป เพื่อให้ปริมาณเชื้อเพลิงเท่ากันพบว่าระบบที่ไม่มีกาหมุนเวียนความร้อน เมื่อไอดีไหลเข้าทางด้านซ้ายมือและมีการเผาไหม้เกิดขึ้นอุณหภูมิการเผาไหม้จะสูงอยู่ในระดับหนึ่งแก๊สไอเสี่ยที่เกิดขึ้นในระบบก็จะไหลออกทางด้านขวา โดยความร้อนจากแก๊สไอเสี่ยไม่ได้ถูกกักเก็บไว้ใช้ประโยชน์และเมื่อนำมาทำการเปรียบเทียบกับเส้นบน ซึ่งแสดงระบบที่มีการหมุนเวียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบอุณหภูมิการเผาไหม้ชนิดที่มีและไม่มี การหมุนเวียนความร้อน

ความร้อนจากแก๊สไอเสียมาทำการอุ่น ไอเสียเพื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นก่อนการเผาไหม้จะส่งผลให้ อุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าสูงกว่าระบบแรก ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นกว่าระบบที่ ไม่มี การหมุนเวียนความร้อน เมื่อทำการเปรียบเทียบในกรณีอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้เท่ากัน พบว่าปริมาณเชื้อเพลิงซึ่งใช้ใน ระบบที่มี การหมุนเวียนความร้อนจะต่ำกว่าระบบที่ไม่มี การ หมุนเวียนความร้อน จึงประหยัดพลังงานได้มากกว่า นอกจากนี้ระบบการเผาไหม้ที่ไม่มี การ หมุนเวียนความร้อนยังทำให้ได้ค่าความเร็วในการเผาไหม้ (Burning velocity) และความเข้มข้น ในการเผาไหม้ที่สูง (High Combustion Intensity) ทำให้สามารถออกแบบให้เตาเผาไหม้ที่มีขนาด เล็กกะทัดรัด ทั้งยังช่วยขยายขอบเขตการเผาไหม้ (Flammability Limits) ให้กว้างขึ้นเหมาะแก่ การนำไปเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีความร้อนน้อย ๆ ที่ไม่สามารถทำการเผาไหม้ในระบบปกติได้

2.5.2 การเปลี่ยนรูปความร้อนระหว่างการพาความร้อนและแผ่รังสีความร้อนในวัสดุพรุน

วัสดุพรุนเป็นวัสดุที่มีพื้นผิวต่อปริมาตรที่สูงและทนต่อสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ๆ ได้ คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุพรุนคือ สามารถที่จะเปลี่ยนพลังงานกลับไปกลับมา ระหว่างเอนทัลปี ของแก๊สและการแผ่รังสีความร้อนได้ เนื่องจากวัสดุพรุนมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมาก (Surface Area to Volume Ratio) ดังนั้นในการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จึงถือได้ว่าวัสดุพรุนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีหลักการการทำงานดังนี้คือ เมื่ออากาศร้อนไหลผ่านวัสดุพรุนดังแสดงในรูปที่ 3.2 วัสดุพรุน จะทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนเอนทัลปีของอากาศร้อนเอาไว้ส่วนหนึ่ง แล้วเปลี่ยนพลังงานส่วนที่ ดูดกลืนมานี้ไปเป็นการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งเรียกลักษณะเช่นนี้ว่าเป็นตัวแผ่รังสี (Emitter) แผ่รังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มายังวัสดุพอรุนอีกด้านหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสี (Absorber) ดังนั้นอากาศร้อนที่ไหลผ่านตัวแผ่รังสีจะมีอุณหภูมิลดลง และเมื่อมีอากาศเย็นไหลผ่านตัวรับรังสีอากาศเย็นก็จะดูดเอาความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้ทำให้อากาศมีค่าเอาทาลปีและอุณหภูมิสูงขึ้น จากหลักการดังกล่าวถ้านำตัวแผ่รังสีและตัวรับรังสีมาอยู่ชิดกัน แล้วให้อิเสยซึ่งมีอุณหภูมิสูงที่เกิดจากการเผาไหม้ไหลผ่านวัสดุพอรุนตัวที่ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสี แล้วเอาอากาศเย็นที่จะใช้ในการเผาไหม้ไหลผ่านวัสดุพอรุนที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสี ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนจากอิเสยมาสู่อากาศเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยอาศัยวัสดุพอรุนเป็นตัวกลาง (ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ) คาดว่าระบบดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากผลของการ อุ่นอากาศ (Preheat) ที่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งนี้ยังทำให้ได้ค่าความเร็วในการเผาไหม้ (Burning Velocity) และให้ความเข้มการเผาไหม้สูง (High Combustion Intensity) ทำให้สามารถออกแบบให้เตาเผาไหม้มีขนาดกะทัดรัด นอกจากนี้ยังช่วยขยายขอบเขตการเผาไหม้ได้ (Flammability Limits) กว้างขึ้น

2.5.3 การนำวัสดุพอรุนมาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ

เนื่องจากวัสดุพอรุนมีคุณสมบัติและคุณลักษณะที่เด่นชัดที่มีข้อดีหลายประการเช่นขนาดที่เล็กกะทัดรัด มลภาวะจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงและนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ได้ในช่วงความร้อนที่กว้างดังนั้นจึงมีการนำวัสดุพอรุนไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ มากมาย เช่น ในโรงไฟฟ้าต้นกำลัง เครื่องยนต์สันดาปภายใน งานอุตสาหกรรมรวมทั้งเครื่องใช้ในครัวเรือนอีกด้วย

2.5.3.1 การนำวัสดุพอรุนไปประยุกต์ใช้ในภายในครัวเรือน

นิยมนำไปใช้กับระบบทำความร้อนของอากาศและน้ำ (Air and Warm Water Heating system) โดยหัวเผาสำหรับที่ความร้อนแก่ระบบคั้งการในช่วงกว้างซึ่งอาจจำเป็นที่ต้องใช้หัวเผาจำนวนที่มากขึ้นหรือไม่ก็ต้องใช้ขนาดหัวเผาที่ใหญ่ขึ้นเป็นการส่งผลให้เกิดมลภาวะมากยิ่งขึ้นด้วยการนำวัสดุพอรุนมาใช้ในกรณีนั้นนอกจากจะเป็นการลดขนาดของหัวเผาลงและยังเป็นการลดการเกิดมลภาวะที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดีและยังเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนที่สูงขึ้นนอกจากนั้นยังสามารถที่จะประยุกต์ใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้อีกด้วย

2.5.3.2 การนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมชนิด Convectional Pre-Mixed Industrial Burner

เมื่อหัวเผาโดยวัสดุพอรุนถูกนำไปใช้ทำการติดตั้งร่วมกับหัวเผาในอุตสาหกรรมชนิด Convectional Pre-mixed Industrial Burner จะทำให้มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงขึ้นมากโดยหัวเผานชนิด Convectional Pre-mixed Industrial Burner เพียงอย่างเดียวนั้นสามารถเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับช่วงความร้อน (Thermal power range) ได้น้อยแต่เมื่อติดตั้งวัสดุพอรุนเข้าไปจะช่วยระดับช่วงความร้อนได้กว้างขึ้น

2.5.3.3 การนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์

เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์หากกำลังลดลงต่ำกว่า 50% ของกำลังสูงสุดการเผาไหม้จะเป็นไปอย่างไม่เสถียร ดังนั้นเพื่อให้กำลังงานสูงขึ้นและรักษาเสถียรภาพการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้จึงมีการประยุกต์ใช้วัสดุพอรุนทำการประยุกต์ใช้ภายในห้องเผาไหม้ของวัสดุพอรุน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

แก๊สเชื้อเพลิงและการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง

3.1 เชื้อเพลิงก๊าซ[1]

เชื้อเพลิงก๊าซ (Gaseous Fuel) หมายถึง ก๊าซทุกชนิดที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเกิดการเผาไหม้ทำให้ได้พลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ก๊าซที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

3.1.1 ประเภทของก๊าซ

ก๊าซที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมีหลายชนิดและมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไป บางชนิดมีส่วนประกอบคล้ายกัน แต่มีชื่อแตกต่างกัน

1. ก๊าซชีวมวล (Bio Mass) เป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยใช้ถ่านหินเป็นสัตุคุดิบ
2. ก๊าซชีวภาพ (Bio-Gas) คือ ก๊าซที่เกิดจากการหมัก และการย่อยสลายของสารอินทรีย์ (Organic Substance) เช่น มูลสัตว์ประเภทต่าง ๆ ตลอดจนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น วัชพืชและเศษอาหาร
3. ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่ง โดยที่ธาตุคาร์บอนกับธาตุไฮโดรเจนจับตัวกันเป็นโมเลกุลเช่นเดียวกับน้ำมันแต่มีสถานะในรูปของแก๊ส แบ่งออกเป็นชนิดใหญ่ ๆ ได้ 2 ชนิด คือ ก๊าซธรรมชาติแห้ง (Dry Natural Gas) และก๊าซธรรมชาติชื้นหรือเปียก (Wet Natural Gas)
4. ก๊าซน้ำมัน (oil Gas) เป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิต โดยใช้ น้ำมันหรือ ก๊าซจากการเผา โดยมีอากาศและไอน้ำเป็นตัวสำคัญในการผลิต โดยใช้ น้ำมันหรือ ก๊าซจากการเผา โดยมีอากาศและไอน้ำเป็นตัวสำคัญในการผลิต
5. ก๊าซที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ หรือที่เรียกย่อ ๆ ว่า ก๊าซ LPG (Liquefied Petroleum Gas) หรือ ก๊าซหุงต้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 แก๊สเชื้อเพลิง

แก๊สเชื้อเพลิงหลักคือ แก๊สธรรมชาติและแก๊สปิโตรเลียมเหลว นอกจากนี้แก๊สเชื้อเพลิงยังสามารถผลิตได้จาก ถ่านหิน ไม้ แก๊สธรรมชาติ และปิโตรเลียมอีกด้วย

3.2.1 ชนิดของแก๊สเชื้อเพลิง

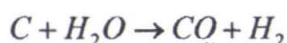
แก๊สเชื้อเพลิงที่สำคัญและนิยมใช้กันมากในปัจจุบันมีดังนี้

แก๊สธรรมชาติมักถูกค้นพบบ่อย ๆ ในบริเวณใกล้ ๆ หรือเหนือแหล่งน้ำมันในบริเวณหินพูนและถูกอัดด้วยความดันสูงอยู่ใต้ดิน แก๊สธรรมชาติคือส่วนผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ เช่น มีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทน และเพนเทน เป็นต้น โดยจะมีเทนเป็นหลักไฮโดรคาร์บอนส่วนที่เหลือมีเป็นส่วนน้อย ในบางครั้งก็มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนปนอยู่ด้วย การนำแก๊สธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ทำได้โดยการอัดและหล่อเย็นจนกระทั่งสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวหนัก ๆ กลายเป็นของเหลวจากนั้นจึงแยกแก๊สธรรมชาติแห้งความดันสูงส่งไปตามท่อเพื่อใช้งานต่อไป ในบางแหล่งแก๊สธรรมชาติจะถูกทำให้เย็นที่อุณหภูมิ -164°C จนเป็นของเหลว (liquefied natural gas, L.N.G) แล้วขนส่งทางเรือต่อไป

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

โพรดิวเซอร์แก๊ส (producer gas) คือแก๊สที่ผลิตโดยปล่อยอากาศในปริมาณที่น้อยกว่าค่าทางทฤษฎี (substoichiometric air) ผ่านชั้นร้อนของ ถ่านหิน พिट ไม้ หรือของเหลือทางการเกษตร ส่วนประกอบหลักของโพรดิวเซอร์แก๊สคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน (มากถึง 55 เปอร์เซ็นต์) และคาร์บอนออกไซด์ในปริมาณเล็กน้อย การนำไปใช้งานอาจนำไปใช้ทันทีที่ผลิตได้ ขณะยังร้อนอยู่หรือนำไปพอกให้สะอาดเพื่อกำจัดน้ำมันดินและเขม่าออกเสียก่อน อย่างไรก็ตามโพรดิวเซอร์แก๊สมีค่าความร้อนต่ำเนื่องจากมีแก๊สไนโตรเจนปนอยู่มาก ดังนั้นถ้าต้องการให้ค่าความร้อนสูงขึ้นจึงต้องใช้แก๊สออกซิเจนในปริมาณน้อยกว่าค่าทางทฤษฎี (substoichiometric oxygen) แทนอากาศในการผลิต

วอเตอร์แก๊สคือแก๊สที่ผลิตขึ้นโดยปล่อยอากาศผ่านชั้นของ ถ่านหิน ถ่านโค้ก หรือไม้เพื่อยกระดับอุณหภูมิการเผาไหม้ให้สูงขึ้นก่อนพ่นไอน้ำลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับถ่านร้อนดังสมการเคมีคายความร้อนข้างล่างนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้คือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงกว่าโพรพิลีนแก๊ส เพราะใช้ไอน้ำแทนอากาศทำให้ส่วนประกอบของแก๊สไฮโดรเจนที่ค่าต่ำกว่า

เชื้อเพลิงอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน และอะซิทีลีน (C_2H_2) เป็นต้น ถูกผลิตขึ้นมา โดยเฉพาะเพื่อใช้ในงานที่อุณหภูมิมีค่าสูง ๆ ไฮโดรเจนผลิตจากแก๊สธรรมชาติโดยวิธีรีฟอร์มมิง (reforming) หรือผลิตจากไฮโดรคาร์บอนเหลวโดยวิธีออกซิเดชันบางส่วนหรือผลิตจากถ่านหิน โดยวิธีแกซิฟิเคชัน (gasification) ในขณะที่แก๊สอะซิทีลีนผลิตจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับ แคลเซียมคาร์ไบด์

3.2.2 คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง

คุณสมบัติที่สำคัญของแก๊สเชื้อเพลิงคือส่วนประกอบโดยปริมาตร ความหมาย แน่น และค่าความร้อน เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของส่วนประกอบโดยปริมาตรของ แก๊สเชื้อเพลิงบางชนิด

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงคือปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยต่อหนึ่งหน่วยมวล ของเชื้อเพลิงเมื่อเชื้อเพลิงนั้นอยู่ในสภาวะเริ่มต้นที่ 25°C ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับออกซิเจนได้ สารผลิตภัณฑ์ที่ยังมีตัวสงมาที่ 25°C ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีสองค่าคือ ค่าความร้อนทางสูง (higher heating value, *HHV*) หรือ gross calorific value (gross C.V.) ซึ่งเกิดขึ้นกรณีที่ไอน้ำใน สารผลิตภัณฑ์ถูกรเผาไหม้กลับตัวเป็นน้ำ และค่าความร้อนทางต่ำ (lower heating, *LHV*) หรือ net calorific (net C.V.) เกิดในกรณีที่ไอน้ำไม่กลับตัว ค่าความร้อนทางต่ำสามารถหาได้จากค่า ความร้อนทางสูงโดยการหักค่าความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำในสารผลิตภัณฑ์ออกจากค่า ความร้อนทางสูง ดังนั้นได้ความสัมพันธ์ระหว่าง *HHV* (หรือ gross C.V.) และ *LHV* (หรือ net C.V.) คือ

$$LHV \text{ (หรือ net C.V.)} = HHV \text{ (หรือ gross C.V.)} - \left(\frac{m_{H_2O}}{m_{fuel}} \right) h_{fg}$$

เมื่อ h_{fg} คือค่าความร้อนแฝงในการระเหยของน้ำที่ 25°C มีค่าเท่ากับ $2,440 \text{ kJ/kg}$ m_{H_2O} คือมวลของน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้โดยรวมถึงน้ำที่มาจากความชื้นในเชื้อเพลิงและ ที่เกิดจากปฏิกิริยากับไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง m_{fuel} คือมวลของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ ค่าความร้อน ของแก๊สเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากการทดลองโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าแคลอริมิเตอร์ หรือ คำนวณหาโดยวิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์เมื่อทราบส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงนั้น ตาราง 2.2 แสดงตัวอย่างค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงบางชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างส่วนประกอบ (โดยปริมาตร) ของแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ

ส่วนประกอบ	แก๊สธรรมชาติ	LPG	โพรพิลเซอร์แก๊สจากถ่านหิน	โพรพิลเซอร์จากไม้
CO	-	-	20-30 %	18-25 %
H ₂	-	-	8-20 %	13-28 %
CH ₄	80-95 %	-	0.5-3 %	1-5 %
C ₂ H ₆	<6	-	น้อยมาก	น้อยมาก
> C ₂ H ₆	<4	100 %	น้อยมาก	น้อยมาก
CO ₂	<5	-	3-9 %	5-10 %
N ₂	<5	-	50-56 %	45-54 %
H ₂ O	-	-	-	5-15 %

* รวมทั้งไฮโดรคาร์บอนที่หนักกว่า C₂H₆

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่ความดัน 1 บรรยากาศและ 25°C

แก๊สเชื้อเพลิง	HHV		EHV	
	(MJ/m ³)	(MJ/kg)	(MJ/m ³)	(MJ/kg)
ไฮโดรเจน	11.80	141.77	10.06	119.85
คาร์บอนมอนอกไซด์	11.77	10.10	11.77	10.10
มีเทน	37.05	55.47	33.38	49.99
อีเทน	64.93	51.87	59.38	47.46
โพรเพน	92.38	50.34	85.04	46.33
บิวเทน	119.80	49.52	110.59	47.71
เอทิลีน	58.71	50.28	55.02	47.10
อะซีทีลีน	54.05	49.89	55.22	48.17
แก๊สธรรมชาติ(ตัวอย่าง)	38.37	54.13	34.83	49.13
โพรพิลเซอร์แก๊ส(ตัวอย่าง)	6.33	5.81	5.77	5.30

3.3 ก๊าซ LPG

ปัจจุบันนี้เชื้อเพลิงก๊าซได้เข้ามามีบทบาททดแทนเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวมากขึ้นอัน

เนื่องมาจากได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องควบคุมก๊าซ จึงทำให้ผู้ใช้มีความ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะดวกและปลอดภัยมากขึ้น โดยเฉพาะก๊าซที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งจะประกอบไปด้วย ก๊าซโพรเพนและก๊าซบิวเทน ก๊าซหุงต้มที่ใช้กันในปัจจุบันนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบหรือที่เรียกว่าก๊าซปิโตรเลียมเหลว อันเป็นส่วนประกอบของ ก๊าซโพรเพนและก๊าซบิวเทน ในอัตราส่วน 30 : 70 ก๊าซทั้งสองชนิดดังกล่าวนี้ สามารถนำมาแยกเป็นก๊าซหุงต้มได้ โดยนำก๊าซธรรมชาติมาผ่านกระบวนการแยกก๊าซในโรงแยกก๊าซ

คำว่า LPG เป็นศัพท์ทางการที่ใช้ในการเรียกก๊าซปิโตรเลียมเหลว แต่ที่เรารู้จักกันทั่วไปคือ ก๊าซหุงต้ม ก๊าซชนิดนี้จะมีสถานะเป็นไอ (Vapour) แต่ถ้าอยู่ภายใต้ความดันสูงก๊าซจะมีลักษณะเป็นของเหลว

3.3.1 กระบวนการผลิตก๊าซ LPG

ก๊าซ LPG มี 2 ชนิด คือ ชนิดก๊าซบ่อน้ำมัน ที่ได้จากการแยกและกลั่นก๊าซธรรมชาติ กับชนิดก๊าซโรงกลั่นน้ำมัน ที่ได้จากการแยกก๊าซ ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากการกลั่นน้ำมันดิบ เนื่องจากก๊าซ LPG มีสภาพ เป็นก๊าซที่อุณหภูมิสูงและความดันปกติ จึงต้องทำให้เป็นของเหลว อยู่เสมอ โดยการลดความดันหรือแช่แข็งและต้องขนส่งด้วยเรือที่ทำงาน เพื่อใช้บรรทุก๊าซ LPG

3.3.2 คุณสมบัติของก๊าซ LPG

1. สี ก๊าซ LPG จะไม่มีสี เมื่อก๊าซเกิดการรั่วจากถังเราจึงไม่สามารถที่จะมองเห็นก๊าซที่รั่วออกมาได้ นอกจากก๊าซจะรั่วออกมาแล้ว เราจึงจะเห็นเป็นละอองขาว ซึ่งละอองขาวนี้ก็คือไอน้ำ ที่มีอยู่ในอากาศทำให้การกลั่นตัวเป็นละอองเมื่อได้รับความเย็นจัด จากการระเหยตัวของก๊าซ

2. ความเป็นพิษ ก๊าซชนิดนี้จะไม่เป็นพิษ เมื่อนำไปเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะไม่ทำให้เกิด ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์หรือก๊าซพิษ เนื่องจากก๊าซนี้มีน้ำหนักมากกว่าอากาศ ดังนั้นเมื่อเกิดการรั่วภายในห้องแคบแล้ว มันจะเข้าไปแทนที่อากาศ ทำให้ออกซิเจนในบริเวณนั้นมีไม่เพียงพอ ผู้ที่สูดดมก๊าซเข้าไปอาจจะมีอาการวิงเวียนคลื่นเหียนและเมื่อยล้าได้

3. กลิ่น เป็นก๊าซที่ไม่มีกลิ่น เนื่องจากก๊าซที่ผลิตได้นี้ไม่มีกลิ่น จึงมีความจำเป็นต้องใส่ สารที่มีกลิ่นฉุนลงไปเพื่อเป็นการเตือนเมื่อก๊าซรั่ว สารที่เติมในส่วนมากจะใช้ เอทิลเมอร์แคปแทน (C H SH)

4. น้ำหนัก เป็นก๊าซที่เบากว่าน้ำและหนักกว่าอากาศ เมื่อก๊าซอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว ก๊าซจะมีน้ำหนักครึ่งหนึ่งของน้ำ ดังนั้น ก๊าซเหลวจะลอยอยู่บนน้ำ หากก๊าซรั่วลงใน น้ำ ท่อน้ำ ปริอเม้น้ำมันอาจลอยไปติดไฟ ณ จุดที่ห่างออกไป แล้วถูกลมมายังจุดที่ก๊าซรั่วได้อย่างรวดเร็ว เมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นไอ ไอก๊าซจะหนักเกือบประมาณ 2 เท่าของอากาศ ดังนั้นเมื่อก๊าซรั่ว ก๊าซจะเคลื่อนตัวไหลไปรวมตัวในที่ต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จุดเดือด จุดเดือดของก๊าซจะต่ำ มีจุดเดือดประมาณ 0 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิเฉลี่ยของบ้านเราประมาณ 20 องศาเซลเซียส ดังนั้น เมื่อก๊าซถูกปล่อยออกมาจากภาชนะบรรจุก็จะเดือด โดยเปลี่ยนสถานะจากของเหลว ที่ถูกกักดันอยู่กลายเป็นไอทันที การที่ก๊าซเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ จำเป็นต้องดึงความร้อนจากบริเวณใกล้เคียง ซึ่งจะทำให้บริเวณนั้นหรือบริเวณปลายท่อที่ปล่อยไอก๊าซออกจะมีน้ำแข็งเกาะจนทำให้ท่อเกิดการตัน

6. ความดันไอ ก๊าซ LPG มีความดันไอต่ำ จึงทำให้ก๊าซรั่วได้ง่าย ดังนั้น อุปกรณ์ใช้กับก๊าซจึงต้องออกแบบให้แข็งแรง ทนต่อความดันสูง ดังนั้น การใช้ภาชนะ เช่น ถังบรรจุก๊าซที่ไม่ได้มาตรฐานตามที่กำหนดอาจเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงขึ้นได้

7. อัตราการขยายตัว ก๊าซ LPG มีอัตราการขยายตัวสูง ดังนั้น การเติมก๊าซใส่ลงในภาชนะจึงไม่ควรเติมให้เต็ม ต้องมีช่องว่างสำหรับการขยายตัวของก๊าซ เมื่อได้รับความร้อน อัตราการขยายตัวจากก๊าซที่สถานะของเหลวกลายเป็นก๊าซที่สถานะไอ คือ ก๊าซเหลว 1 หน่วยปริมาณจะเปลี่ยนเป็นไอก๊าซได้ประมาณ 250 หน่วยปริมาณ ดังนั้น เมื่อก๊าซเหลวรั่วจะมีอันตรายมากกว่าไอก๊าซรั่ว

8. ส่วนผสมของก๊าซกับอากาศที่ทำให้ติดไฟได้ อัตราส่วนของก๊าซในอากาศที่ทำให้ติดไฟ คือ ประมาณ 1.5 - 9 ส่วนใน ส่วนผสม 100 ส่วน จะเห็นได้ว่าหากมีอากาศน้อยหรือมากกว่าสัดส่วนดังกล่าวก๊าซจะไม่ติดไฟ

9. ค่าออกเทนัมเบอร์ (Octane Number) ก๊าซ LPG มีค่าออกเทนัมเบอร์ สูงเมื่อวัดโดยวิธีงานวิจัยจะได้ค่าออกเทนัมเบอร์ของโพรเพนเท่ากับ 111.4 ไอโซบิวเทนเท่ากับ 102.4 และนอร์มัลบิวเทนเท่ากับ 94.0 ซึ่งสูงกว่าของน้ำมันเบนซินโดยทั่วไปประมาณ 10 - 20 ฉะนั้น ก๊าซ LPG จึงเหมาะกับการใช้เป็นเชื้อเพลิงของรถยนต์มาก

10. คุณสมบัติทางปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากก๊าซ LPG มีคุณสมบัติละลายสารจำพวกบางธรรมชาติได้ดี ฉะนั้นจึงควรใช้สารที่มีความทนต่อก๊าซ LPG อย่างดี ถ้าเก็บก๊าซ LPG ซึ่งมีโพรพิลีนและบิวทิลีนผสมอยู่ไว้ในถัง อาจเกิดสารพวกยางหรือน้ำมันดิบ (TAR) ขึ้นได้

3.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมกับอุณหภูมิและความดันไอ

ก๊าซ LPG ที่บรรจุอยู่ในถัง จะมีโมเลกุลของโพรเพนและบิวเทนเคลื่อนตัวอยู่ และจะต้องมีการเคลื่อนตัวไปชนกับผนังของถังด้วย ความแรงของการชนคิดเป็นกิโลกรัม / ตารางเซนติเมตรเรียกกันว่าความดันไอของก๊าซ ซึ่งสามารถถือได้ว่า เป็นความดันของก๊าซ LPG ในถังนั่นเอง และที่อุณหภูมิเดียวกันถ้าปริมาณของก๊าซโพรเพนเพิ่มขึ้น จะทำให้ความดันไอเพิ่มขึ้น เช่น ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ก๊าซผสมที่มีอัตราส่วนระหว่างโพรเพนกับบิวเทนเป็น 30 : 70 จะมีความดันไอประมาณ 3.8 กิโลกรัม / ตารางเซนติเมตร ถ้าเปลี่ยนอัตราส่วนเป็น 40 : 60 จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความดันไอประมาณ 4.3 กิโลกรัม / ตารางเซนติเมตร และถ้าอุณหภูมิของก๊าซเพิ่มขึ้น ก็จะมีผลให้ก๊าซผสมนั้นมีความดันไอสูงขึ้นด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราส่วนปริมาตรของก๊าซโพรเพนและบิวเทน (นอร์มัลบิวเทน) แสดงได้ดังตาราง ซึ่งเป็นอัตราส่วนปริมาตร เมื่อให้ปริมาตรของก๊าซ LPG เหลว ที่ 15 องศาเซลเซียส เป็น 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ชื่อ อุณหภูมิ (°C)	-20	0	10	15	20	30	40	50	60
โพรเพน	91.4	96.2	98.7	100	101.9	104.9	109.1	113.8	119.3
นอร์มัลบิวเทน	94.3	97.4	99.0	100	101.1	103.0	105.2	107.5	109.8

จากตารางสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราส่วนปริมาตร ได้ดังนี้

1. เมื่ออุณหภูมิสูง ความดันก็สูงด้วย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะเกิดขึ้น โมเลกุลจะชนกับผนังของภาชนะแรงขึ้น ผลก็คือ ความดันจะสูงขึ้น หนึ่ง ในทางกลับกัน ถ้าอุณหภูมิต่ำลง การเคลื่อนที่ก็จะช้าลงเรื่อย ๆ และเมื่อทำให้อุณหภูมิต่ำมากขึ้น การเคลื่อนที่ก็จะช้าลง

2. ถ้ามีส่วนประกอบของโพรเพนมากความดันจะสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของโพรเพนเคลื่อนที่ได้ดีกว่าโมเลกุลของบิวเทน ดังนั้นในกรณีที่อุณหภูมิเท่ากัน ก๊าซ LPG ที่มีส่วนประกอบของโพรเพนกว่าจะมีความดันสูงกว่า

3. ปริมาตรของของเหลวไม่มีความสัมพันธ์กับความดัน ไม่ว่าจะมิก๊าซ LPG อยู่เต็มถังหรือมีเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยก็ตาม ถ้าอุณหภูมิและองค์ประกอบไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว ความดันก็ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นสิ่งที่ทำให้ความดันภายในถังเปลี่ยนไป จะมีแต่อุณหภูมิและอัตราส่วนของก๊าซผสมนั้น เนื่องจากโดยทั่วไปอุณหภูมิจะเป็นอุณหภูมิของบรรยากาศ ฉะนั้น สิ่งที่จะเปลี่ยนแปลงได้โดยฝีมือคนก็คือ อัตราส่วนผสมเท่านั้น

การขยายตัวของก๊าซ เนื่องจากก๊าซ LPG มีอัตราขยายตัวในสภาวะที่เป็นของเหลวสูงเมื่อเทียบกับน้ำ ดังนั้นการบรรจุใส่ภาชนะจำเป็นต้องทิ้งที่ว่างไว้ในระดับที่คงที่เพื่อการขยายตัว

ความถ่วงจำเพาะ ก๊าซ LPG มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2 ชนิด คือ ในสถานะที่เป็นของเหลวและสถานะที่เป็นก๊าซ ความถ่วงจำเพาะในสถานะของเหลว จะเปรียบเทียบกับน้ำที่ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งให้มีความถ่วงจำเพาะ 1.0 ส่วนความถ่วงจำเพาะในสถานะก๊าซ จะเปรียบเทียบกับอากาศที่ 0 องศาเซลเซียสและความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งให้มีความถ่วงจำเพาะเป็น 1.0

ความถ่วงจำเพาะในสภาวะที่เป็นของเหลว จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ถ้าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามอุณหภูมิมีก้าวสูงขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะก็จะยิ่งลดลง ที่อุณหภูมิปกติ (15 องศาเซลเซียส) โพรเพนเหลวมีความถ่วงจำเพาะเป็น 0.508 ส่วนบิวเทนเหลวมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถ่วงจำเพาะเป็น 0.584 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความถ่วงจำเพาะในสภาวะที่เป็นของเหลวตามอุณหภูมิ

ความถ่วงจำเพาะในสภาวะที่เป็นก๊าซหรือไอ ความถ่วงจำเพาะในสภาวะที่เป็นก๊าซของโพรเพนเป็น 1.55 และของบิวเทนเป็น 2.07 ซึ่งหนักเกือบเป็น 2 เท่าของอากาศ ก๊าซที่รั่วออกมาจะสะสมอยู่ที่ต่ำจะนั้นจำเป็นต้องระวังให้มาก ตัวอย่างเช่น ที่ความดันบรรยากาศ จะเกิดก๊าซโพรเพนประมาณ 0.5 ลูกบาศก์เมตร จากโพรเพนเหลว 1 กิโลกรัม และก๊าซบิวเทนประมาณ 0.4 ลูกบาศก์เมตรจากบิวเทนเหลว 1 กิโลกรัม นั่นคือ ในกรณีของเหลว 1 ลิตรเกิดรั่วขึ้น ก็จะกลายเป็นก๊าซได้ ประมาณ 0.25 ลูกบาศก์เมตร ฉะนั้นต้องระวังเกี่ยวกับการรั่วไหลของของเหลวให้มาก

3.3.4 คุณสมบัติการสันดาป

1. ค่าความร้อน เป็นตัวเลขสำคัญที่บอกให้รู้ถึงคุณค่า และสัณฐานของเชื้อเพลิง ค่าความร้อนของก๊าซ LPG มีประมาณ 12000 kcal / kg เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเบนซินแล้ว จะมากกว่าอยู่ประมาณ 600-800 kcal / kg เพื่อให้เกิดพลังงานจำนวนเท่ากัน ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (ต่อหน่วย นน.) ของก๊าซ LPG จะน้อยกว่าของน้ำมันเบนซิน จึงพูดได้ว่าประหยัดกว่า

2. ปริมาณอากาศที่ใช้ในการสันดาป ถ้าสันดาป ก๊าซ LPG อย่างสมบูรณ์ ทั้งหมด จะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ การเปลี่ยนแปลงนี้เขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



ดังเห็นได้จากสมการเหล่านี้ ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อควรสันดาปอย่างสมบูรณ์ จะเป็น 5 เท่า ในกรณีของโพรเพน และ 6.5 เท่าในกรณีของบิวเทน เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในอากาศมีประมาณ 21 % ฉะนั้นในการสันดาปโพรเพนอย่างสมบูรณ์ จะต้องใช้อากาศ 24 m³ ต่อโพรเพน 1 m³ และอากาศ 31 m³ ต่อบิวเทน 1 m³ ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเบนซินแล้วก๊าซ LPG ต้องการประมาณอากาศมากกว่าเล็กน้อย

3. ช่วงการลุกไหม้ ก๊าซที่สันดาปได้จะมีช่วงส่วนผสมกับอากาศเพียงช่วงเดียวที่จุดไฟลุกไหม้ได้ เพราะมีอากาศผสมอยู่ในปริมาณพอเหมาะ ช่วงการลุกไหม้ จะแสดงค่าเป็นอัตราส่วนร้อยละ (%) ของปริมาตรก๊าซต่ออากาศ

4. จุดวาบไฟ (Flash Point), จุดติดไฟ (Ignition Point) ช่วงการลุกไหม้จะมีค่าคงที่สำหรับเชื้อเพลิงและชนิดเช่น ในกรณีของน้ำมันเบนซิน อุณหภูมิที่สูงพอที่ทำให้เกิดไอจากน้ำมันเบนซินไปผสมกับอากาศกลายเป็นก๊าซผสมในช่วงการลุกไหม้ เรียกว่า จุดวาบไฟ แต่ถ้าไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุให้เกิดการติดไฟ เชื้อเพลิงที่จุดวาบไฟก็จะไม่เกิดการลุกไหม้หรือติดไฟขึ้น อาจกล่าวได้ว่า ก๊าซ LPG ที่อุณหภูมิปกติอยู่เหนือจุดวาบไฟเสมอ

อนึ่งเมื่อค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิให้กับเชื้อเพลิงจนเลขอุณหภูมิค่าหนึ่งแล้ว แม้จะไม่มีสาเหตุของการติดไฟ เชื้อเพลิงก็จะเริ่มลุกไหม้ตามธรรมชาติ อุณหภูมิค่าสุดที่เริ่มเกิดการลุกไหม้ตามธรรมชาตินี้เรียกว่า จุดติดไฟ เนื่องจากจุดติดไฟของโพรเพนคือ $490 - 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และของบิวเทนคือ $470 - 540 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ก๊าซ LPG จึง ติดไฟได้ยากเมื่อเทียบกับน้ำมันเบนซินซึ่งมีจุดติดไฟ $360 - 380 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อคิดรวมเรื่องนี้กับช่วงการลุกไหม้แล้วจึงพูดได้ว่าก๊าซ LPG มีความปลอดภัยค่อนข้างสูง

5. ส่วนประกอบของก๊าซ LPG ถ้าทราบอุณหภูมิและความดัน ก็สามารถบอกส่วนประกอบของก๊าซ LPG ได้อย่างคร่าว ๆ อนึ่งเพื่อให้ส่วนประกอบของก๊าซ LPG เป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน มาตรฐานอุตสาหกรรมของญี่ปุ่น ได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพของกาซ LPG ไว้ดังแสดงในตาราง

ประเภท	ลักษณะส่วนประกอบ	การใช้งานส่วนใหญ่
เบอร์ 1	โพรเพนเป็นองค์ประกอบหลัก	เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม
เบอร์ 2	โพรเพนและโพรพิลีนเป็นองค์ประกอบหลัก	เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม
เบอร์ 3	ปริมาณของ โพรเพนและ โพรพิลีนมีมากกว่าของบิวเทนและบิวทิลีน	เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน , เชื้อเพลิงในสำนักงาน
เบอร์ 4	ปริมาณของ โพรเพนและ โพรพิลีนมีมากกว่าของบิวเทนและบิวทิลีนมาก	เป็นเชื้อเพลิงใช้กับรถยนต์
เบอร์ 5	บิวเทนและบิวทิลีนเป็นองค์ประกอบหลัก	เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม , เชื้อเพลิงใช้กับรถยนต์
เบอร์ 6	บิวเทนเป็นองค์ประกอบหลัก	เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม , เชื้อเพลิงใช้กับรถยนต์ใช้เป็น สารช่วยสเปรย์

หากส่วนประกอบของก๊าซ LPG มีเพียงตัวเดียว ความดันไอของก๊าซ LPG ในภาชนะจะไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะมีปริมาณของของเหลวในถังมากน้อยเท่าไรก็ตาม แต่โดยทั่วไปเนื่องจากก๊าซ LPG เป็นสารผสม การระเหยจะเริ่มจากสารที่ระเหยได้ง่าย ดังนั้นความดันไอของก๊าซ LPG ที่เหลือจะค่อยๆ ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

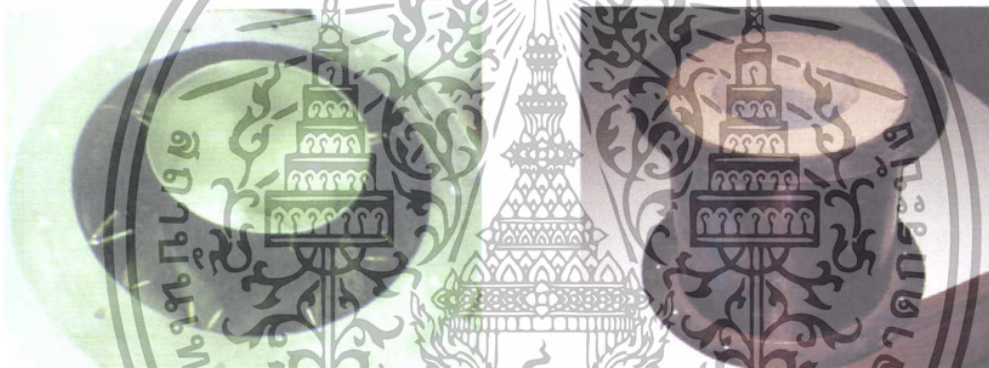
บทที่ 4

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตาเผาวัสดุพูนแบ่งเป็นส่วนต่างๆดังนี้

1. ห้องเผาไหม้ ประกอบด้วยโครงสร้างทำจากสแตนเลสเป็นลักษณะทรงกระบอกแบ่งออกเป็นสองชั้นประกบกัน (คังรูป 4.1) โดยมความสูงของเตาเมื่อประกบกันแล้วคือ 500 มิลลิเมตร ความหนาของสแตนเลสที่ใช้คือ 3 มิลลิเมตร เตามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา 340 มิลลิเมตร



ก. ลักษณะเตาเผาก่อนใส่ฉนวน

ข. ลักษณะเตาเผาที่ผ่านการอบฉนวนแล้ว

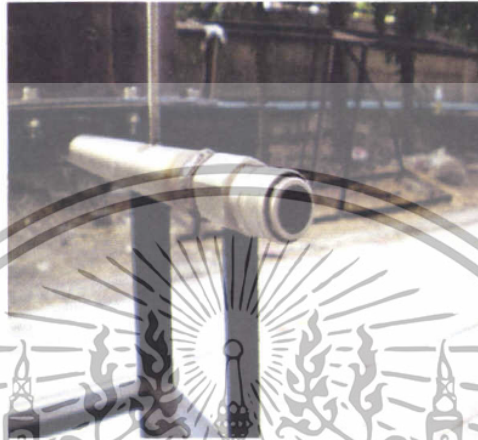


ค. ลักษณะเตาเผาวัสดุพูนที่ใช้ทดลอง

รูปที่ 4.1 ห้องเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ท่อผสมเชื้อเพลิง ท่อที่ใช้สำหรับผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ โดยจะมีการป้อนลมเข้าทางด้านล่างจากรูปและ LPG จะถูกป้อนทางท่อด้านบนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า



รูปที่ 4.2 ท่อผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ

3. เม็ดวัสดุพรุน (Porous media) การทดลองนี้จะใช้ขนาดเม็ดวัสดุพรุน 3 ขนาด คือ มีลักษณะดังรูป



รูปที่ 4.3 เม็ดวัสดุพรุน

4. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิภายในเตา โดยเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็นแบบ Type K วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0-1200 องศาเซลเซียส โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอก 4.8 มิลลิเมตร มีลักษณะดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 เทอร์โมคัปเปิ้ล

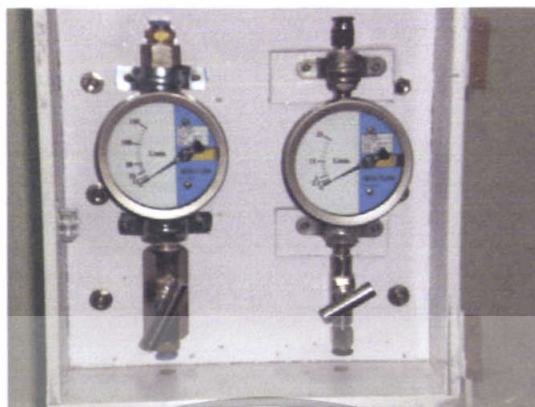
5. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Digital Indicator) เป็นอุปกรณ์แสดงผลการวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 4.5 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Digital Indicator)

6. เครื่องมือวัดอัตราการไหลของ LPG และอากาศ (Flow meter) จะแบ่งออกเป็น 2 ตัวคือตัวด้านซ้ายมือจากรูปที่ ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศจะมีช่วงการวัด 0-150 L/min ตัวด้านขวามือจากรูป ใช้วัดอัตราการไหลของ LPG มีช่วงการวัด 0-15 L/min Pressure Regulator ของ LPG มีลักษณะดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

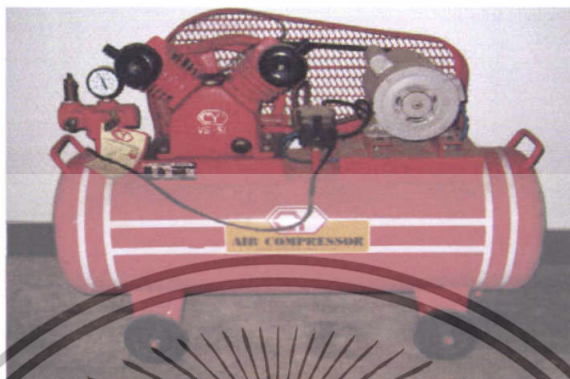


ก. Pressure Regulator

รูปที่ 4.6 เครื่องมือวัดอัตราการไหลของ LPG และอากาศ (Flow meter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. คอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในการจ่ายอากาศ มีลักษณะดังรูป



รูปที่ 4.7 แหล่งจ่ายอากาศ

8. ถังบรรจุก๊าซ LPG ขนาด 15 กิโลกรัม มีลักษณะดังรูป



รูปที่ 4.8 ถังบรรจุก๊าซ LPG

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ประกอบชุดอุปกรณ์และทำการติดตั้งสายยางจากถัง LPG ต่อเข้าบริเวณทางเข้าของ Flow meter และจาก Flow meter ทางออกต่อเข้าตัวป้องกันเปลวไฟย้อนกลับและเข้าช่องทางป้อน LPG เข้าสู่เตา จากถังจ่ายลมจะต่อเข้า Pressure Regulator ที่ทางเข้าและออกจาก Pressure Regulator เข้า Flow meter ที่ทางเข้าคือ ทางด้าน Valve และออกจาก Flow meter เข้าสู่ช่องป้อนลมเข้าสู่เตา
2. การวัดอุณหภูมิจะมีการติดตั้ง Thermocouple ตามระดับความสูงคือ 20 mm ,100 mm, 200 mm และต่อ Thermocouple เข้า Data Logger เพื่ออ่านค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ขั้นตอนการจุดเตาเผาวัสดุพูน
 - 3.1 เปิดวาล์วบริเวณถังจ่ายแก๊ส LPG
 - 3.2 จุดไฟโดยใช้ผ้าหรือกระดาษในเชื้อเพลิงและวางลงบนวัสดุพูนภายในเตา
 - 3.3 ทำการเปิดวาล์วบริเวณ Flow meter ของ LPG ประมาณ 3-5 L/min
 - 3.4 ทำการเปิดวาล์วบริเวณ Flow meter ของ Air ประมาณ 50-60 L/min
 - 3.5 เริ่มปรับอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงโดยปรับจากวาล์วบริเวณ Flow meter LPG โดยปรับใช้มีค่าการป้อนเท่ากับ 2.03 L/min และปรับอัตราการป้อนลมจาก Flow meter Air โดยปรับตามอัตราที่ต้องการทดสอบ
 - 3.6 เริ่มจดค่าจาก Data Logger โดยทำการจดทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง

4.3 การทดลอง

1. จะมีการทดลองโดยมีเม็ดวัสดุพูน 5 ขนาด คือ 6 mm, 10 mm, 16 mm, 20 mm, 25 mm และ 30 mm โดยจะเป็นการทดลองโดยจ่ายอากาศทิศทางเดียวหรือแบบ Single โดยแบ่งเป็นการจ่ายที่ Excess Air 20%, 40%, 60%, 80%, 100% และ 110% โดยจะแบ่งอัตราการป้อนเป็น 36.09 L/min, 73.6 L/min, 84 L/min, 94.6 L/min และ 105 L/min ใน 1 ขนาดของเม็ดวัสดุพูนจะทดลองทุก Excess Air และจะทำการอุณหภูมิเป็น 3 ระดับ คือ 20mm 100mm และ 200mm ดูได้จากตารางดังต่อไปนี้

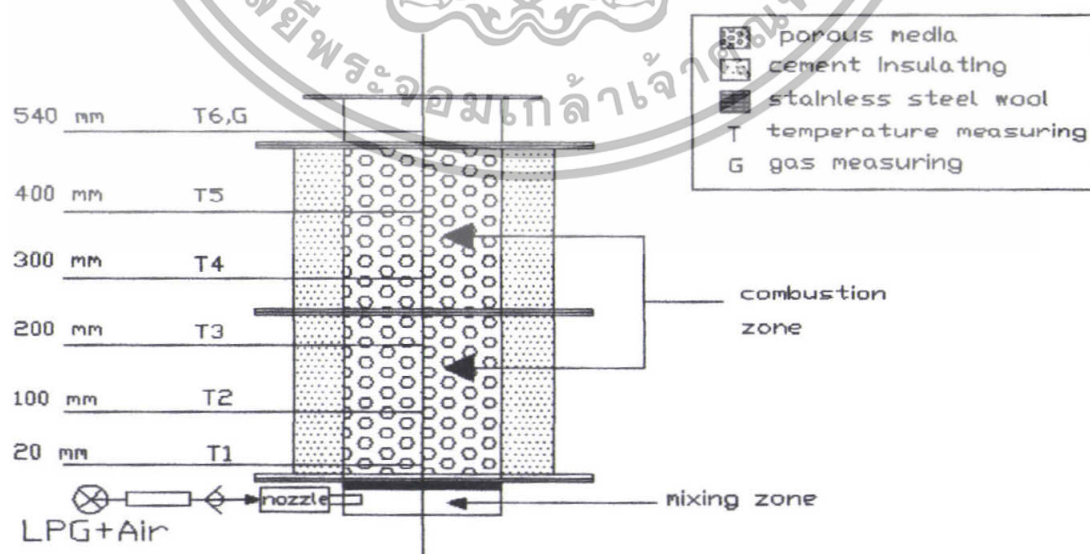
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองที่มีเม็ดวัสดุพูน 5 ขนาด

Run No	Energy Input	ขนาดของเม็ดวัสดุพูน	อัตราการป้อนอากาศ	Flow meter ของ Air
1	3 kw	6 mm	20%	63
			40%	73.6
			60%	84.1
			80%	94.6
			100%	105.1
2	3 kw	10mm	20%	63
			40%	73.6
			60%	84.1
			80%	94.6
			100%	105.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองที่ใช้เม็ดวัสดุพรุน 5 ขนาด (ต่อ)

Run No	Energy Input	ขนาดของเม็ดวัสดุพรุน	อัตราการป้อนอากาศ	Flow meter ของ Air
3	3 kw	16mm	20%	63
			40%	73.6
			60%	84.1
			80%	94.6
			100%	105.1
4	3 kw	20mm	80%	94.6
			100%	105.1
			110%	111.5
5	3 kw	25mm	80%	94.6
			100%	105.1
			110%	111.5
6	3 kw	30mm	80%	94.6
			100%	105.1
			110%	111.5

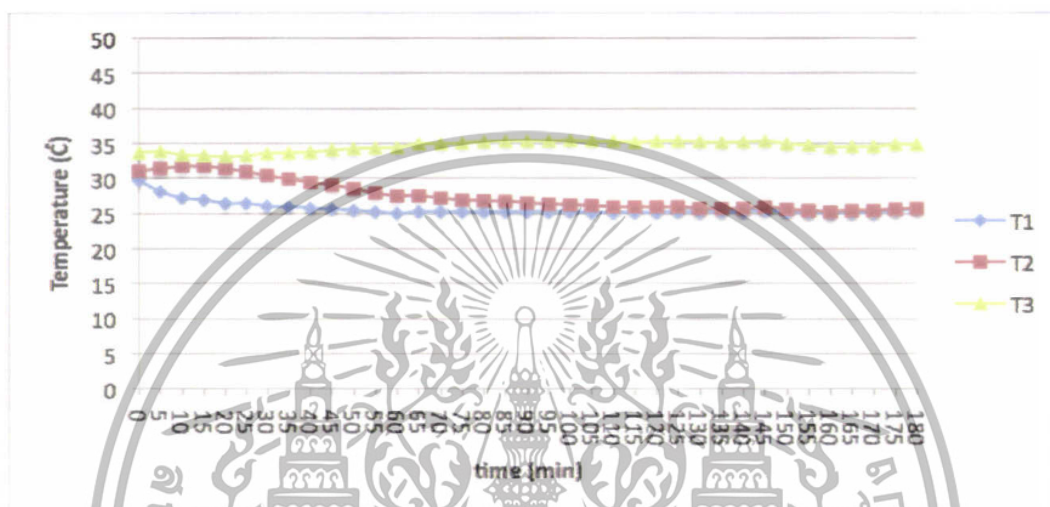


รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของเตาวัสดุพรุน

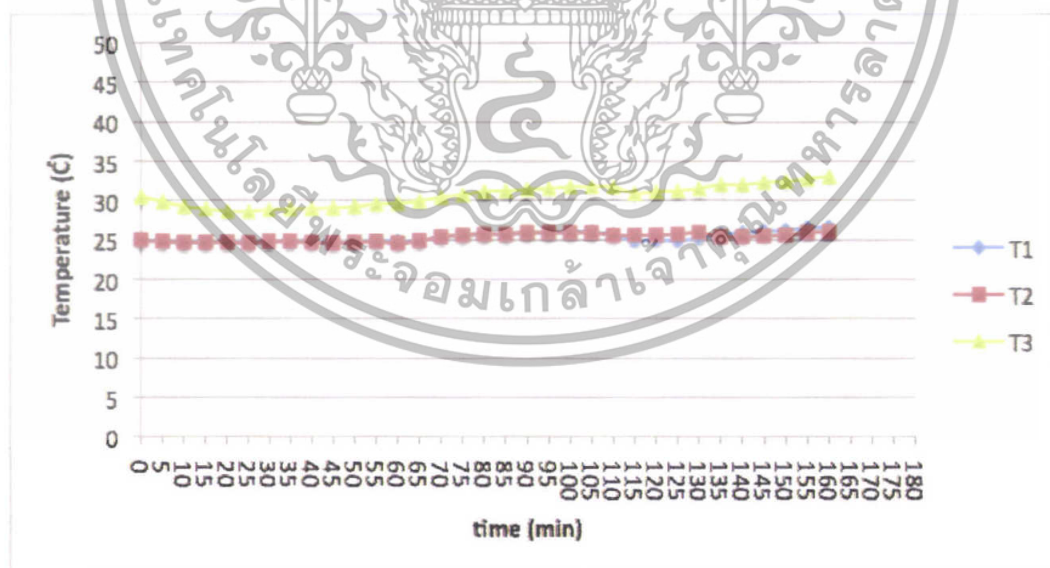
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

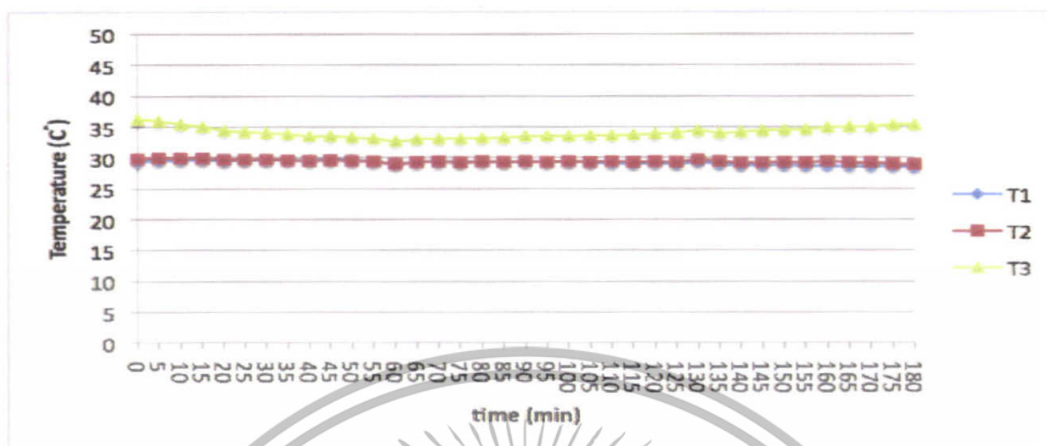


รูปที่ 5.1 เม็ดวัสดุพูนขนาด 6 มม. , ที่อากาศเกินพอที่ 20% , อัตราการไหล 63 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 5.2 เม็ดวัสดุพูนขนาด 6 มม. , ที่อากาศเกินพอที่ 40% , อัตราการไหล 73.6 ลิตรต่อนาที

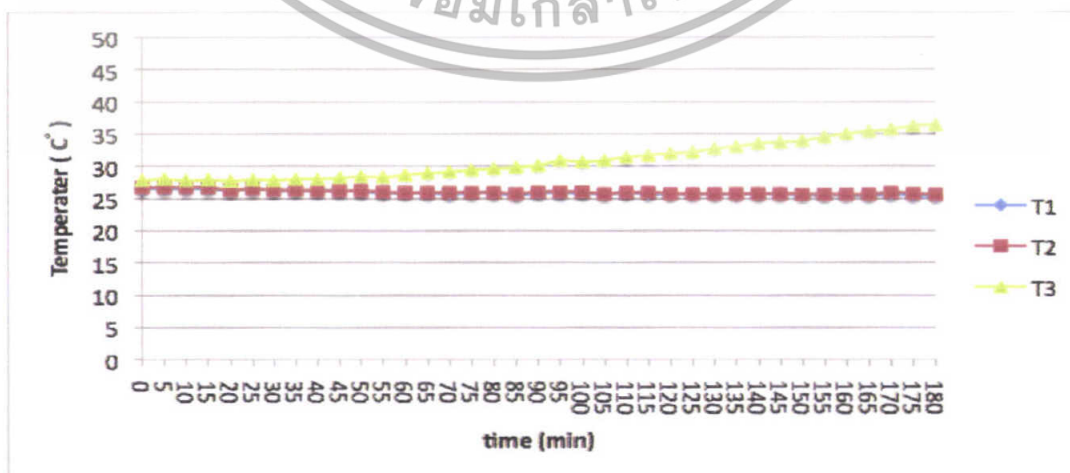
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 เม็ดวัสดุพรุนขนาด 6 มม. , อากาศเกินพอที่ 60% , อัตราการไหล 84 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 5.4 เม็ดวัสดุพรุนขนาด 6 มม. , อากาศเกินพอที่ 80% , อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 5.5 เม็ดวัสดุพรุนขนาด 6 มม. , อากาศเกินพอที่ 100% , อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที

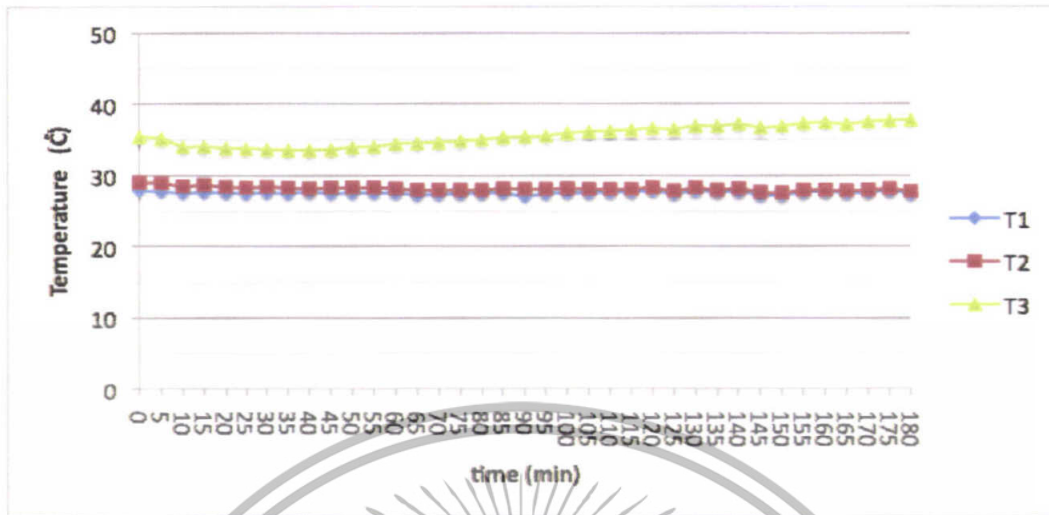
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองสังเกตพฤติกรรมของเม็ดวัสดุพุนขนาด 6 มม. ตามอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน 20% 40% 60% 80% และ 100% ตามลำดับ จากกราฟ (รูปที่ 5.1, รูปที่ 5.2, รูปที่ 5.3, รูปที่ 5.4, รูปที่ 5.5) พบว่า ความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะเท่ากันเกือบทั้งหมดตลอดกระบวนการทดลองในทุกๆอัตราอากาศส่วนเกิน คืออุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณ T_3 อันเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟที่อยู่เหนือเม็ดวัสดุพุนแต่ก็ยังไม่สามารถเอาชนะการพัดพาของมวลอากาศและเชื้อเพลิงจากด้านล่างเตาได้ จึงไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ที่บริเวณภายในเตาได้ จึงทำให้บริเวณ T_2 และ T_3 ของทุกๆการทดลอง ทำให้เห็นได้ว่าเกือบจะไม่มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเลย

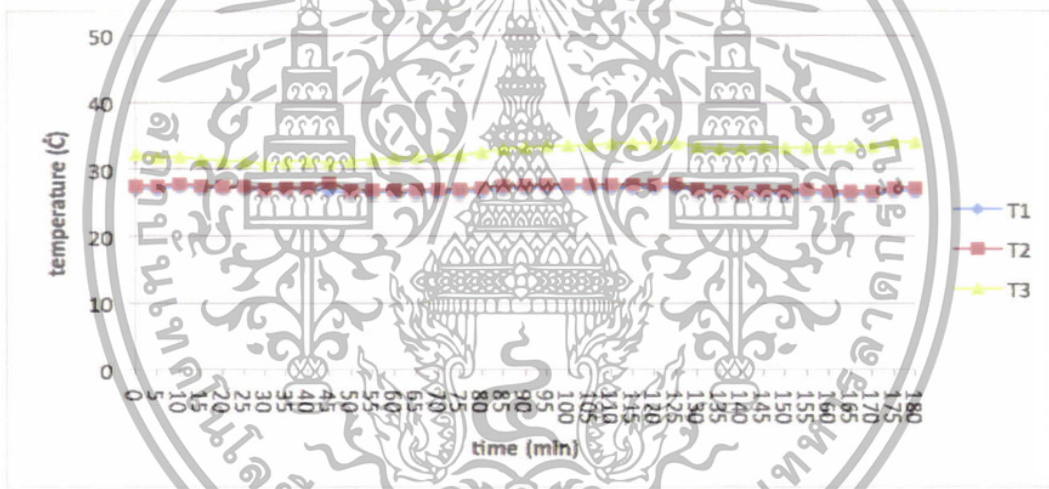


รูปที่ 5.6 เม็ดวัสดุพุนขนาด 10 มม. , อากาศเกินพอที่ 20 % , อัตราการไหล 63 ลิตรต่อนาที

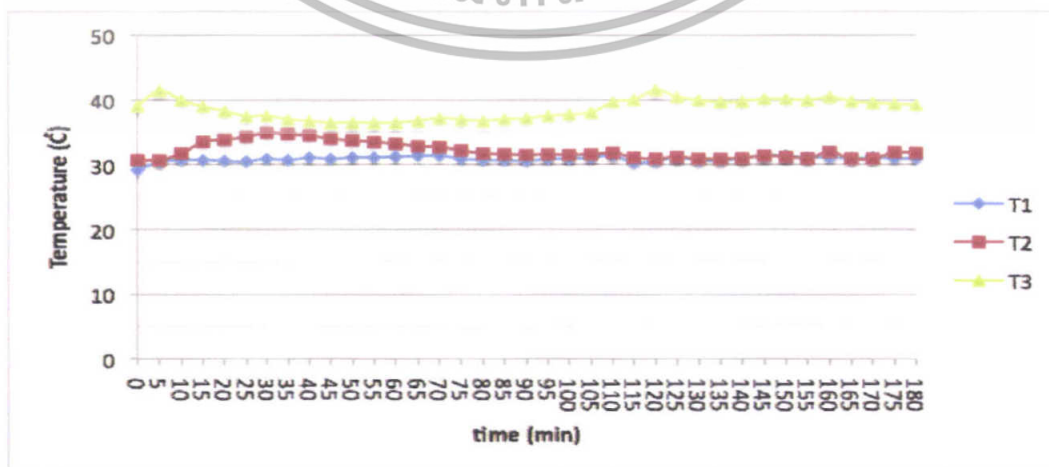
การทดลองของเม็ดวัสดุพุนขนาด 10 มม. พบว่า ที่อัตราส่วนอากาศเกินพอ 20% (รูป 5.6) บริเวณอุณหภูมิ T_3 มีความร้อนที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่สูงสุดของเตาเผาวัสดุ อันเกิดมาจากการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟที่มีการเผาไหม้อยู่เหนือเตา ส่วนบริเวณ T_1 และ T_2 ที่ไม่มีการเพิ่มของความร้อนนั้นเกิดจากการที่เชื้อเพลิงและมวลอากาศที่ส่งมาจากด้านล่างมีการพัดพาสู่ด้านบนจนทำให้การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟด้านบนไม่สามารถเอาชนะมวลของเชื้อเพลิงเย็นที่เข้ามาใหม่ได้



รูปที่ 5.7 เม็ดวัสดุพุนขนาด 10 มม. , อากาศเกินพอที่ 40 % , อัตราการไหล 73.6 ลิตรต่อนาที



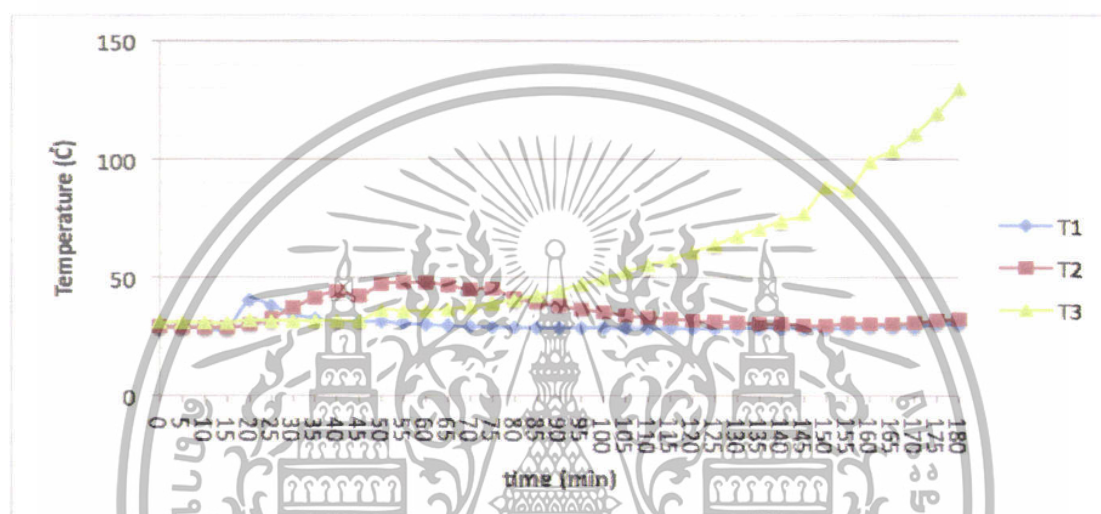
รูปที่ 5.8 เม็ดวัสดุพุนขนาด 10 มม. , อากาศเกินพอที่ 60 % , อัตราการไหล 84 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 5.9 เม็ดวัสดุพุนขนาด 10 มม. , อากาศเกินพอที่ 80 % , อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

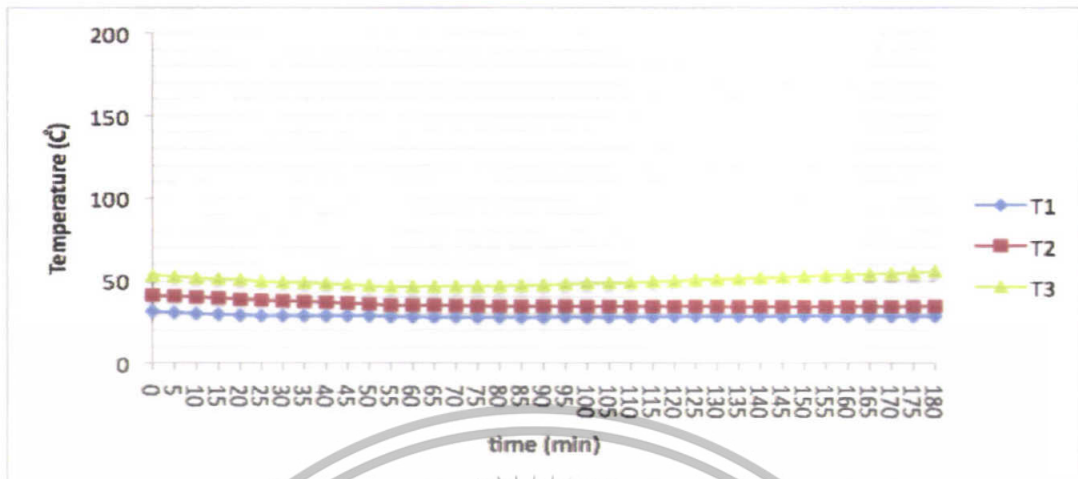
การทดลองที่อากาศเกินพอที่ 40% ถึง 80% ของวัสดุพูนขนาด 10 มม. (รูปที่ 5.7, รูปที่ 5.8, รูปที่ 5.9) พบว่าเปลวไฟยังคงเกิดการเผาไหม้อยู่เหนือเม็ดวัสดุพูน และพฤติกรรมของการเผาไหม้ยังมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในลักษณะเดิมเรื่อยๆ



รูปที่ 5.10 เม็ดวัสดุพูนขนาด 10 มม., อากาศเกินพอที่ 100%, อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที

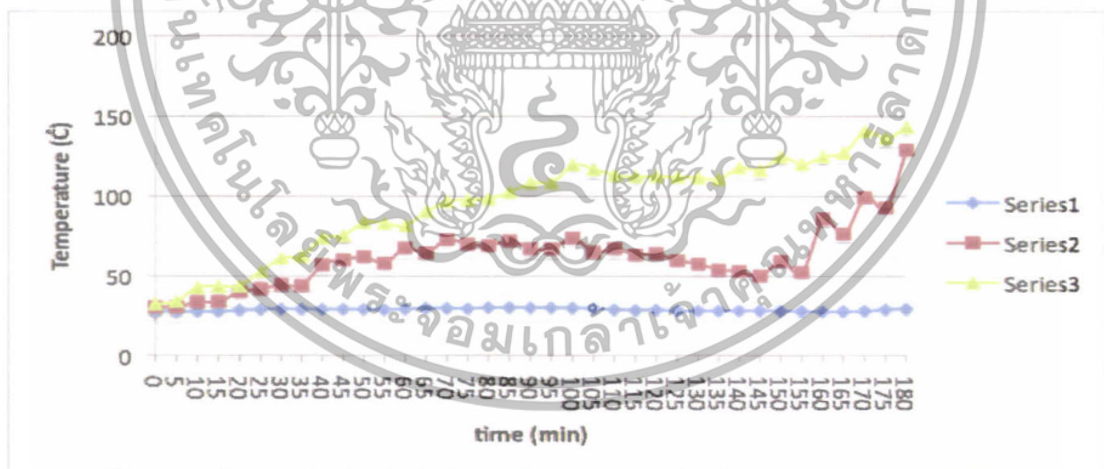
จากการทดลอง พบว่า ที่อากาศส่วนเกิน 100% (รูป 5.10) อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเป็นที่น่าสังเกตว่าในช่วงเวลา 15-25 นาทีของบริเวณ T_1 มีการกระโดดของกราฟ เหตุที่มีการเพิ่มของอุณหภูมิในช่วงเวลานี้อาจเกิดจากการพัดพาของความร้อนที่มีการตกค้างอยู่ภายในเตมาสู่บริเวณ T_1 นี้ เมื่อเวลาผ่านไป ที่ช่วงเวลาของนาที่ที่ 40 และ 45 อุณหภูมิบริเวณ T_2 มีการตกลง พร้อมทั้งมีการเพิ่มขึ้นของ T_3 ในช่วงเวลาเดียวกัน ปรากฏการณ์นี้เป็นผลมาจากการที่การเผาไหม้ที่เกิดขึ้น บริเวณของ T_1 เริ่มมีการเลื่อนของบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ไปยังชั้นต่างๆของเตเผาวัสดุและลอยขึ้นมาเกิดการเผาไหม้ที่บริเวณ T_3 ในที่สุด ในขณะที่การเผาไหม้เกิดขึ้นเหนือบริเวณเม็ดวัสดุพูนและมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง ส่วนบริเวณ T_2 กลับมีอุณหภูมิที่ลดลงอันเป็นผลมาจากการเกิดการเลื่อนของบริเวณการเผาไหม้ร่วมกับพัดพาความร้อนของมวลเชื้อเพลิงและอากาศ การลดของอุณหภูมิเริ่มตั้งแต่วินาทีที่ 75 เรื่อยมาจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 เม็ดวัสดุพรุณขนาด ที่ 16 มม. ที่อากาศเกินพอ 20%

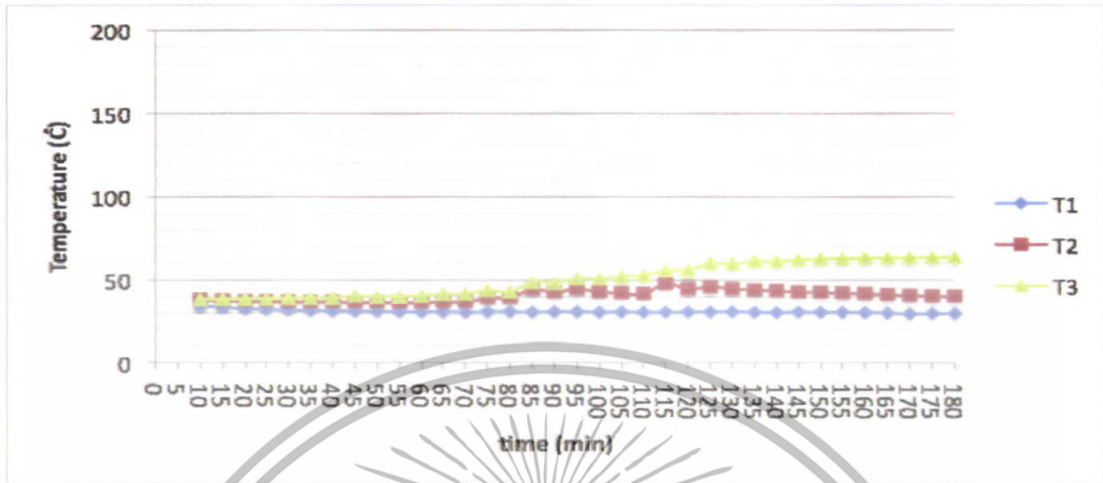
จากกราฟแสดงให้เห็นว่า อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิค่อนข้างน้อยเนื่องจากเม็ดวัสดุพรุณไม่สามารถรักษาเปลวไฟให้เกิดการเผาไหม้บริเวณกลางเตาได้จึงทำให้เปลวไฟเกิดการเผาไหม้ขึ้นที่บริเวณเหนือเม็ดวัสดุที่อยู่ด้านบนของเตาบริเวณ T_3 มีอุณหภูมิสูงที่สุด แต่ค่าอุณหภูมิที่ได้ก็ไม่ประสบความสำเร็จตามที่ต้องการ



รูปที่ 5.12 เม็ดวัสดุพรุณขนาด 16 มม. ที่อากาศเกินพอ 40%

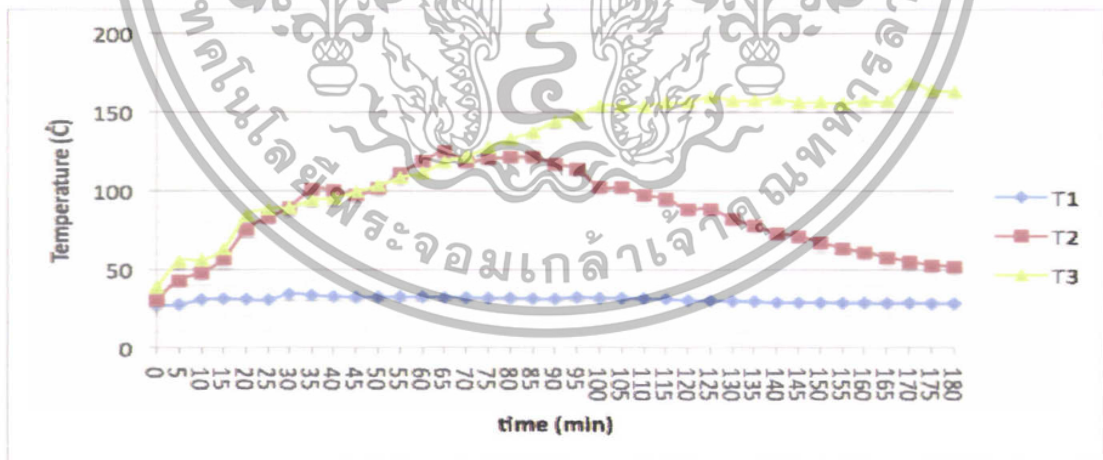
จากกราฟแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มของอุณหภูมิมุมบริเวณ T_3 มีอัตราสูงกว่า T_2 และ T_1 เป็นผลอันเนื่องมาจากการพัดพาของมวลเชื้อเพลิงขึ้นไปเผาไหม้ที่บริเวณทางด้านบนของเตาเหนือเม็ดวัสดุพรุณและยังมีความร้อนจากการเผาไหม้บางส่วน แผ่รังสีความร้อนจากด้านบนบริเวณ T_3 ลงมายังด้านล่างที่บริเวณ T_2 แต่ก็ไม่สามารถถ่ายเทความร้อนลงมายัง T_1 ได้จึงทำให้มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของ T_3 น้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 เม็ดวัสดุพูนขนาด 16 มม. ที่อากาศเกินพอ 60%

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า อัตราการการเพิ่มของ T_1 , T_2 และ T_3 มีลักษณะคล้ายกับลักษณะของกราฟที่อากาศเกินพอ 20% แต่แตกต่างกันตรงที่อากาศเกินพอ 60% มีลักษณะการเพิ่มของอุณหภูมิที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ และมีอุณหภูมิสูงกว่า แต่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจำวน และค่าที่ได้ก็ไม่ประสพผลสำเร็จความที่ต้องการ



รูปที่ 5.14 เม็ดวัสดุพูนขนาด 16 มม. ที่อากาศเกินพอ 80%

จากกราฟพบว่า ในช่วงเวลาที่ 0 - 65 นาที ที่บริเวณ T_2 และ T_3 จะมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเกิดการต่อสู้กันระหว่างมวลเชื้อเพลิงอากาศเย็นกับความร้อนจากการเผาไหม้ที่ด้านบนบริเวณเหนือเม็ดวัสดุพูนเป็นไปในอัตราที่สมดุลกัน จึงทำให้เกิดการเผาไหม้บริเวณกลางเตาภายในเม็ดวัสดุพูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่จากกราฟจะสังเกตได้ว่า ณ ช่วงเวลาดังแต่ที่ 80 นาทีขึ้นไป อุณหภูมิที่ T_2 จะเกิดการลดลงของอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัด เป็นเหตุเนื่องมาจากอัตราการแผ่รังสีความร้อนทางด้านบนเตาเหนือวัสดุพูนไม่สามารถเอาชนะอัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิงอากาศเย็นได้จึงทำให้เกิดการพัดพาเอามวลอากาศเย็นไปเผาไหม้ที่บริเวณด้านบนของเตาเหนือมีคว์สพูน



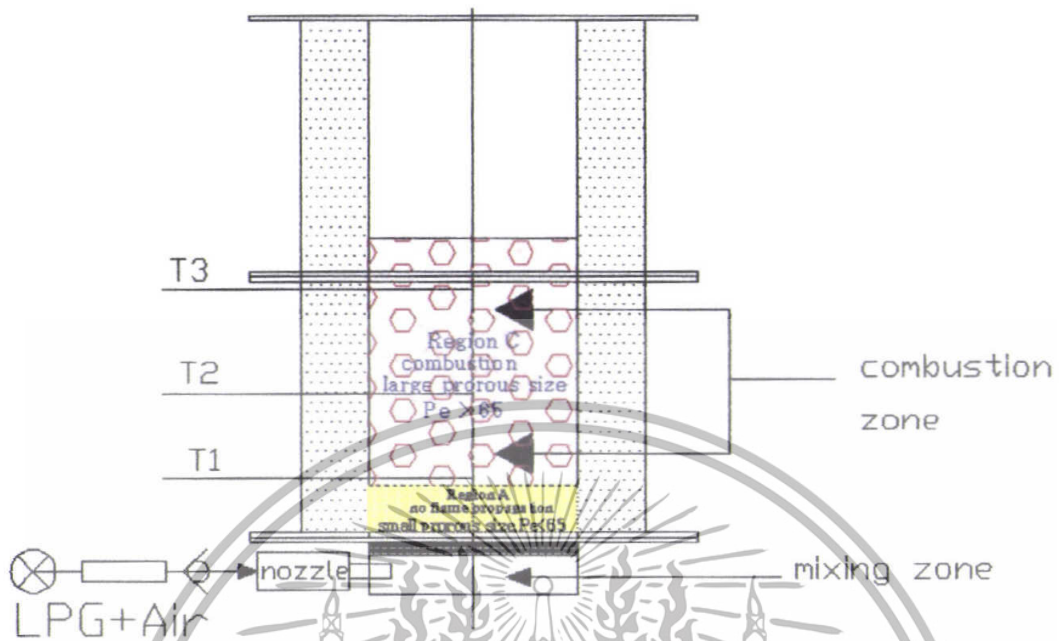
รูปที่ 5.15 มีคว์สพูนขนาด 16 มม. อากาศเกินพอที่ 100%

จากกราฟจะพบว่าเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากที่บริเวณ T_1 จึงทำให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว

ที่บริเวณ T_2 และ T_3 มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมिन้อยมากเนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่สมบูรณ์มากของ T_1 จนทำให้เกิดการเผาไหม้ลามเข้าไปในห้องผสม จึงทำให้การพัดพาความร้อนไปสู่บริเวณด้านบนของเตาเป็นไปในอัตราที่น้อยมาก

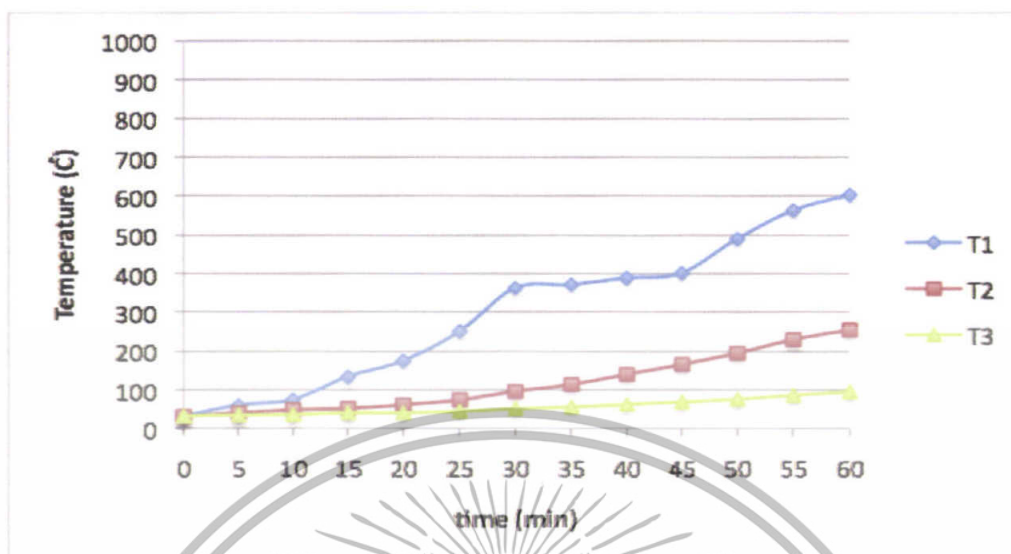
จากปรากฏการณ์ที่เปลวไฟลามเข้าไปในห้องผสม จึงต้องทำการหยุดการทดลองที่เวลา 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 แสดงการใช้เม็ดวัสดุพอรุนขนาดเล็กทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันไฟย้อนกลับ

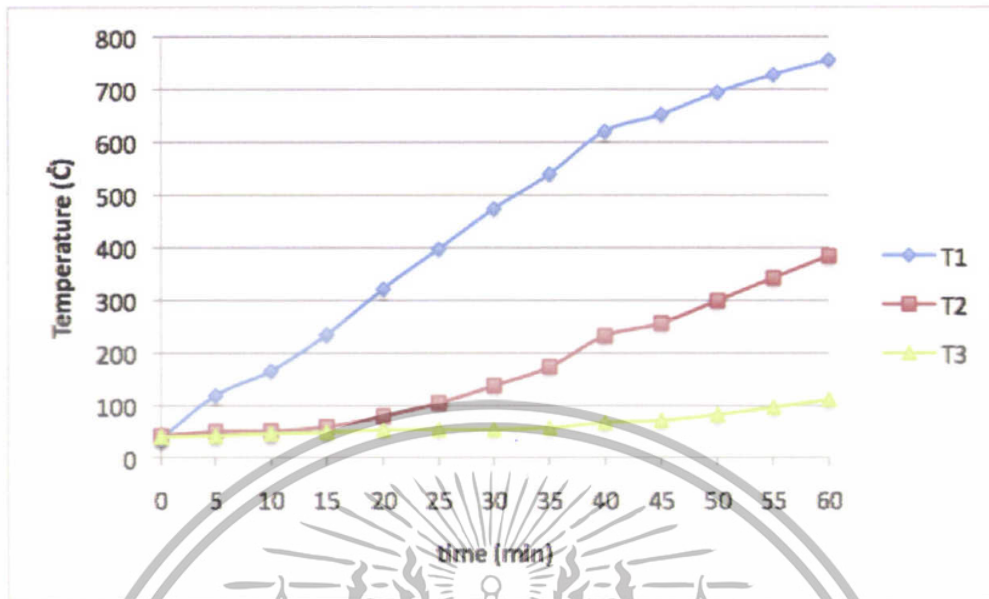
จากการทดลองในข้างต้นพบว่า เม็ดวัสดุพอรุนขนาด 6, 10 และ 16 มม. นั้นไม่สามารถรักษาเปลวไฟให้เกิดการเผาไหม้ภายในเตาได้ จึงมีผลให้เกิดการทดลองในกรณีที่สองคือ ศึกษาถึงพฤติกรรมเชิงพลวัตต่อการเผาไหม้ของเม็ดวัสดุพอรุนที่ขนาด 20, 25 และ 30 มม. โดยมีการเลือกเม็ดวัสดุพอรุนขนาด 6 มม. นำไปใส่ ณ ตำแหน่งจากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิงสูงขึ้นไป 50 มม. เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันเปลวไฟไหลย้อนกลับเข้าไปสู่ถังห้องผสม ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 5.17 เม็ดวัสดุพูนขนาด 20 มม., อากาศเปียกพอที่ 80 %, อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที

จากกราฟจะเห็นได้ว่ากราฟเส้น T_1 มีอัตราการเพิ่มในช่วงแรกคือช่วง 10 นาทีแรก อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิยังค่อนข้างช้าเนื่องจากการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงยังไม่รุนแรงพอจึงทำให้การติดของเปลวไฟได้ช้าเมื่อดูจาก 10 นาทีไปถึง 30 นาที การคลุกเคล้าเกิดได้ดีขึ้นทำให้เกิดการติดของเปลวไฟในช่อง T_1 จึงเห็นได้ว่าการเพิ่มของอุณหภูมิขึ้นเรื่อยๆ ในช่วง 30 นาทีถึง 45 นาทีกราฟที่มีอัตราการเพิ่มน้อยมากจะมีผลมาจากเปลวไฟไม่สามารถรักษาสถียรภาพไว้ได้เนื่องจากการพัดพาของมวลอากาศเย็นและเชื้อเพลิงจากด้านล่าง หลังจากนั้นกราฟที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นในอัตราสูงคล้ายกับในช่วง 10 นาที ถึง 30 นาทีแรกจึงน่าจะมาจากการเกิดการคลุกเคล้าที่ดีของเชื้อเพลิงในช่วงแรก กราฟเส้น T_2 และ T_3 จะมีการเพิ่มค่อนข้างช้า T_2 จะมีการเพิ่มสูงกว่า T_3 เนื่องจากการพัดพาความร้อนมาจาก T_1 โดยกวัดพัดพาจากเชื้อเพลิงและอากาศเย็นจากด้านล่าง

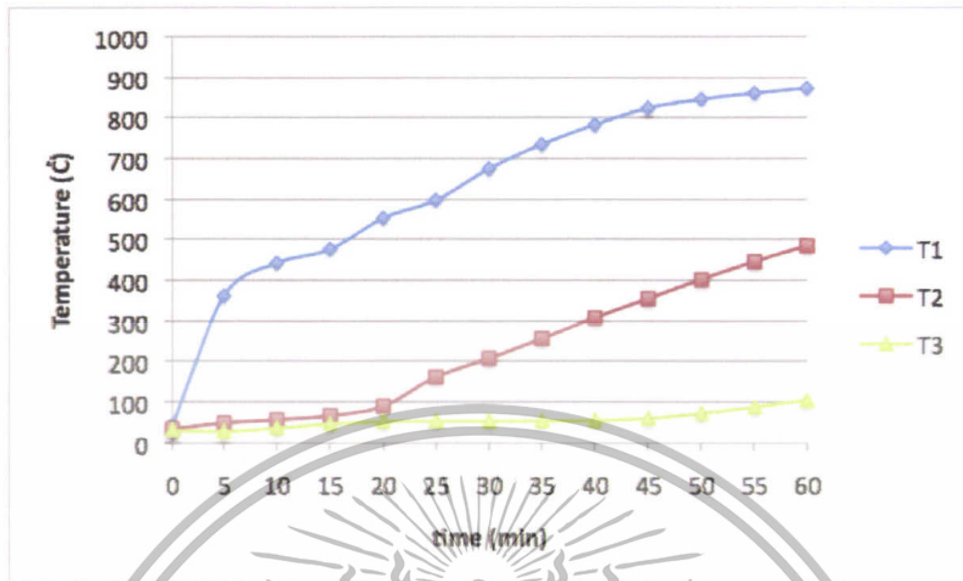
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 เม็ดวัสดุพุนขนาด 20 มม. , อัตราตกินพอยู่ที่ 100 % , อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที

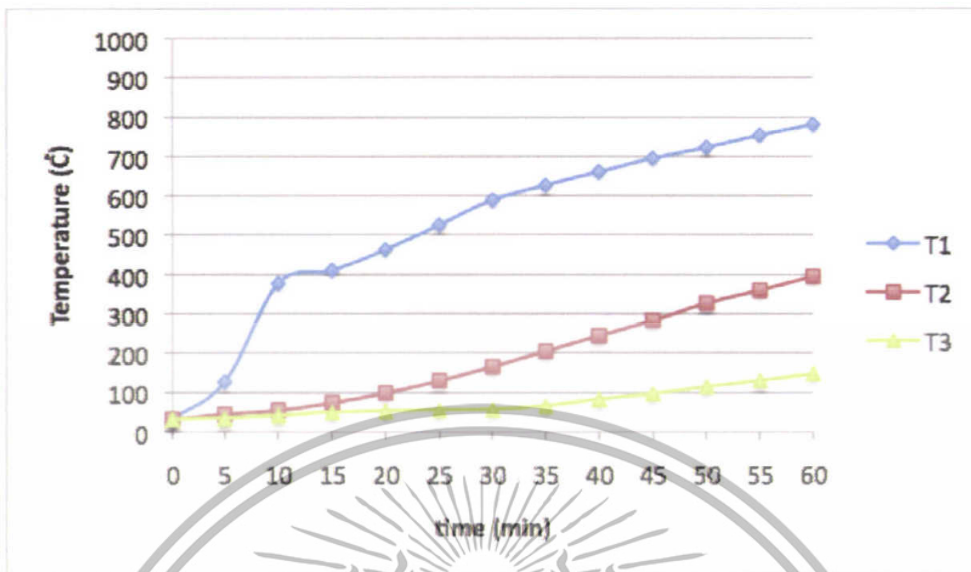
จากเส้นกราฟ T_1 มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเทียบกับกราฟของ 20 มม. 80% จะเห็นได้ว่าการคลุกเคล้าของอากาศเก็บพอยู่ที่ 100% สูงกว่า 80% จึงมีเปลวไฟติดที่ช่วงบริเวณ T_1 ได้เร็วกว่าในกราฟ 20 มม. 80% และให้อุณหภูมิที่สูงกว่าด้วย เนื่องจากมีอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงที่บางกว่าและการพัฒนาสูงกว่าจึงทำให้เกิดการกลุ่ดตัวที่ดี กราฟเส้น T_2 และ T_3 มีอุณหภูมิสูงขึ้นนั้นมาจากการพัฒนาความร้อนมาจาก T_1 โดยการพัฒนามาจากเชื้อเพลิงและอากาศเย็นจากด้านล่างขอบเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 เม็ดวัสดุพูนขนาด 20 มม., อากาศเกินพอที่ 110 %, อัตราการไหล 111.5 ลิตรต่อนาที

จากกราฟเส้น T_1 มีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นของอุณหภูมิในช่วง 5 นาทีแรก ซึ่งเป็นผลมาจากการคลุกเคล้าที่รุนแรงของเชื้อเพลิงและอากาศทำให้เกิดการเผาไหม้ที่เร็วและสมบูรณ์จึงทำให้การเพิ่มของอุณหภูมิเร็ว หลังจากช่วง 5 นาทีเป็นต้นไปจะเพิ่มค่อนข้างช้าลงน่าจะมีผลมาจากมวลอากาศร้อนบริเวณที่ T_1 ถูกการพัดพาของเชื้อเพลิงและอากาศเย็นจากด้านล่างจึงทำให้เกิดการพาความร้อนไปสู่ T_2 สังเกตได้จากการที่ T_1 มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิลดลงน้อยกว่า T_2 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมากขึ้น



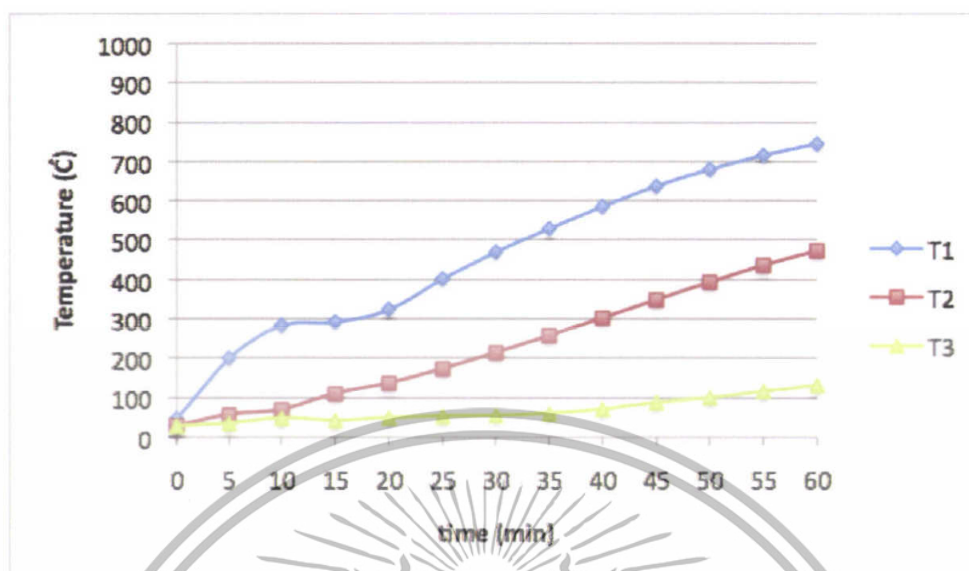
รูปที่ 5.19 เม็ดวัสดุพูนขนาด 25 มม., อากาศเกินพอที่ 80%, อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที

การทดลองของเม็ดวัสดุพูนขนาด 25 มม. ในอัตราอากาศส่วนเกิน 80% โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 93 L/min ในการทดลองนี้ อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิโดยรวมของ T_1 จะมีค่ามากขึ้น แต่จุดที่เป็นที่น่าสังเกตคือช่วงเวลาที่ระหว่างนาที่ที่ 10 และ 15 อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีค่าลดลง เนื่องจากการที่เปลวไฟไม่สามารถรักษาสถียรภาพเอาไว้ได้เนื่องจากการพัดพาของมวลอากาศและเชื้อเพลิงเป็น บริเวณ T_1 เมื่อทำการทดลองพร้อมทั้งสังเกตพฤติกรรมการเผาไหม้และการตอบสนองของเม็ดวัสดุที่บริเวณ T_1 นี้ การเพิ่มของความร้อนในช่วงเวลา 10 นาทีแรกเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงมาก และที่เวลาของนาที่ที่ 10 และ 15 ช่วงเวลานี้การเพิ่มของอุณหภูมิเป็นไปในอัตราที่น้อยมาก สันนิษฐานว่าเกิดจากการที่เปลวไฟไม่สามารถรักษาสถียรภาพเอาไว้ได้จึงทำให้เกิดการเพิ่มของอุณหภูมิที่ไม่สูงมากนักหลังจากนั้น อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิก็คับจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปลวไฟสามารถรักษาสถียรภาพเอาไว้ได้และมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิโดยเฉลี่ยค่อนข้างคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการทดลอง

บริเวณ T_2 อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมักมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการทดลองที่อัตราอากาศส่วนเกิน 100% ของเม็ดวัสดุขนาด 25 มม. เพราะอัตราการไหลของมวลอากาศที่ลดลงของการทดลองนี้ทำให้การพัดพาความร้อนจากบริเวณ T_1 มาสู่บริเวณ T_2 เกิดขึ้นน้อยลงตามไปด้วย

บริเวณ T_3 อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมิบริเวณ T_3 นี้เพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยมากและถึงแม้จะมีการเผาไหม้บริเวณเหนือเม็ดวัสดุ แต่เนื่องจากการเผาไหม้เกิดขึ้นไม่รุนแรง การแผ่รังสีความร้อนจึงเกิดขึ้นอย่างเบาบางและไม่สามารถเอาชนะการพัดพาของมวลอากาศขนาด 93 L/min ได้ เปลวไฟที่เกิดขึ้นบริเวณดังกล่าวจึงไม่ส่งผลต่อการเพิ่มของอุณหภูมิมิบริเวณ T_3 แต่อย่างใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 เม็ดวัสดุพูนขนาด 25 มม., อากาศเกินพอที่ 100%, อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที

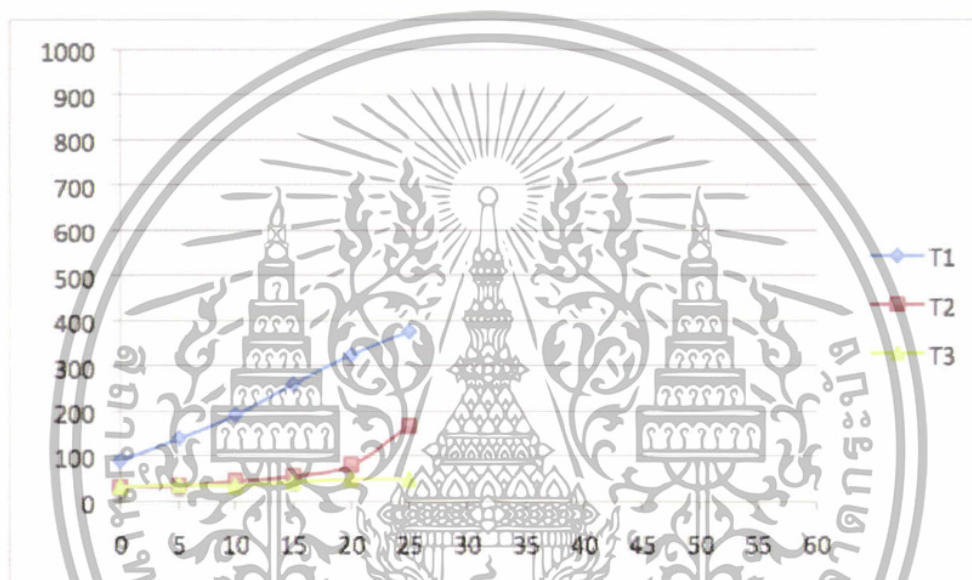
เม็ดวัสดุขนาด 25 มม. ทำการทดลองอากาศส่วนเกิน 100% โดยมีอัตราการไหลของอากาศที่ 105.16 ลิตรต่อนาที การสังเกตจากภายนอกเกิดเปลวไฟสีฟ้าที่บริเวณปากเตาแต่เป็นการเผาไหม้ที่เกิดจากการระเหยของเชื้อเพลิงภายในเตาขึ้นมาเผาไหม้บริเวณเหนือเตาเท่านั้น การเผาไหม้ไม่ได้เกิดทั่วทั้งบริเวณเพราะที่บริเวณ T_1 และ T_2 ยังคงไม่สังเกตเห็นการเผาไหม้หรือหากมีการเผาไหม้จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ไม่รุนแรงมากเพราะค่าอุณหภูมิที่ได้ไม่สูงมาก

บริเวณ T_1 ในการทดลองเมื่อเริ่มทำการทดลองที่อุณหภูมิเริ่มต้น 46 องศาเซลเซียสใน 5 นาทีแรกสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้ถึง 201 องศาเซลเซียสและขึ้นไปถึง 284 องศาเซลเซียส ที่นาทีที่ 10 ถือว่ามีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูง แต่หลังจากช่วงนาทีที่ 10 ไปจนถึงนาทีที่ 25 นั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกลับมีค่าน้อยมาก โดยสันนิษฐานว่าเกิดจากการที่มวลของอากาศและเชื้อเพลิงที่มีความเย็นได้พัดพาความร้อนที่บริเวณจุดเผาไหม้ ลอยขึ้นไป (อันจะเห็นได้จากการที่อุณหภูมิของ T_2 มีการเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาเดียวกันนี้) อุณหภูมิบริเวณ T_1 จึงมีอัตราการเพิ่มของความร้อนลดลงไปด้วย เมื่ออุณหภูมิในบริเวณ T_1 มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น การพัดพาของมวลอากาศและเชื้อเพลิงจึงไม่ส่งผลต่อการเผาไหม้ อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจึงมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ และเพิ่มขึ้นในลักษณะที่คงที่

บริเวณ T_2 เป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงรองลงมาจากบริเวณ T_1 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิตั้งแต่เริ่มกระบวนการทดลองเพิ่มขึ้นอย่างคงที่และเนื่องจากช่วงระหว่างนาทีที่ 10 ถึงเวลาที่ 20 มีการพัดพาความร้อนในอุณหภูมิต่ำกว่าปกติจากบริเวณ T_1 สู่อุณหภูมิ T_2 ทำให้ช่วงเวลาดังกล่าวมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

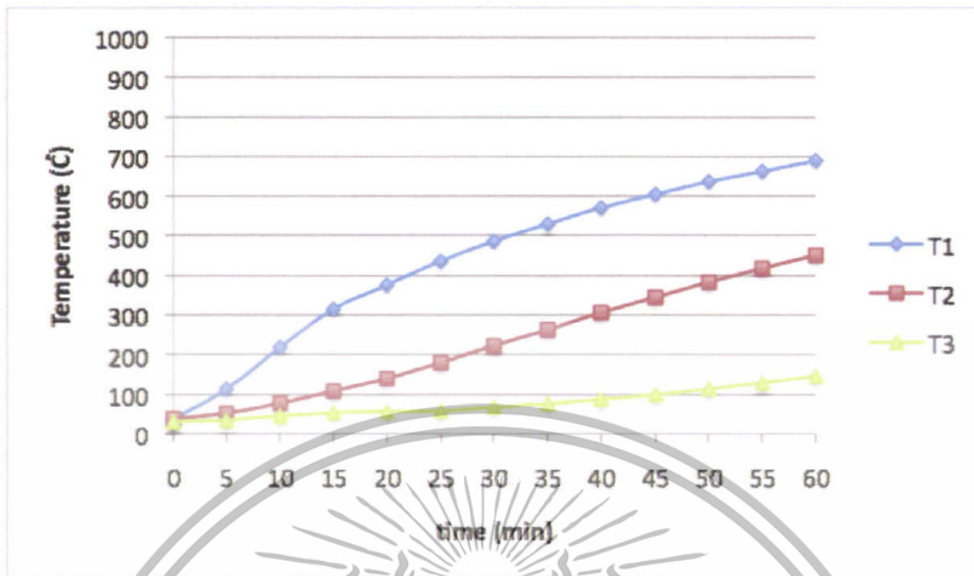
อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่บริเวณ T_2 ในอัตราที่สูง เมื่อผ่านช่วงเวลานี้ไปอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก็มีการเพิ่มขึ้นในอัตราที่คงที่ไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการและมีอุณหภูมิ 627 องศาเซลเซียส บริเวณ T_3 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นไปในอัตราที่น้อยมากเมื่อเทียบกับบริเวณ T_1 และ T_2 ถึงแม้จะเกิดการเผาไหม้บริเวณเหนือเม็ควัสดุในบางส่วนแต่เนื่องจากอัตราการไหลของมวลอากาศที่ยังมีค่ามากอยู่ การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟจึงไม่เกิดขึ้น โดยความร้อนที่ได้ในบริเวณ T_3 นี้เกิดขึ้นจากการพาความร้อนโดยมวลของอากาศและการนำความร้อนเม็ควัสดุเพียงเท่านั้น



รูปที่ 5.21 เม็ควัสดุพุนขนาด 25 มม., อากาศเกินพอที่ 110%, อัตราการไหล 111.5 ลิตรต่อนาที

วัสดุพุนขนาด 25 มม. ในอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน 110% ที่อัตราการไหลของอากาศ 111.5 ลิตรต่อนาที จากการสังเกตจากภายนอก ไม่เกิดการเผาไหม้ของเปลวไฟภายนอกเตาให้เห็นแต่อย่างใด การตอบสนองของเม็ควัสดุในบริเวณ T_1 เกิดขึ้นค่อนข้างสูงและมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจนถึงช่วงเวลา 25 นาที ก็เกิดการดับของเปลวไฟ น่าจะเป็นผลมาจากการพัดพาของมวลอากาศและเชื้อเพลิงจากด้านล่างของเตาที่สูงกว่าเอาชนะเปลวไฟที่ติดอยู่บริเวณ T_1 จึงทำให้เปลวไฟไม่สามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้จึงดับลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 เม็ดวัสดุขนาด 30 มม. , อากาศเกินพอที่ 80 % , อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที

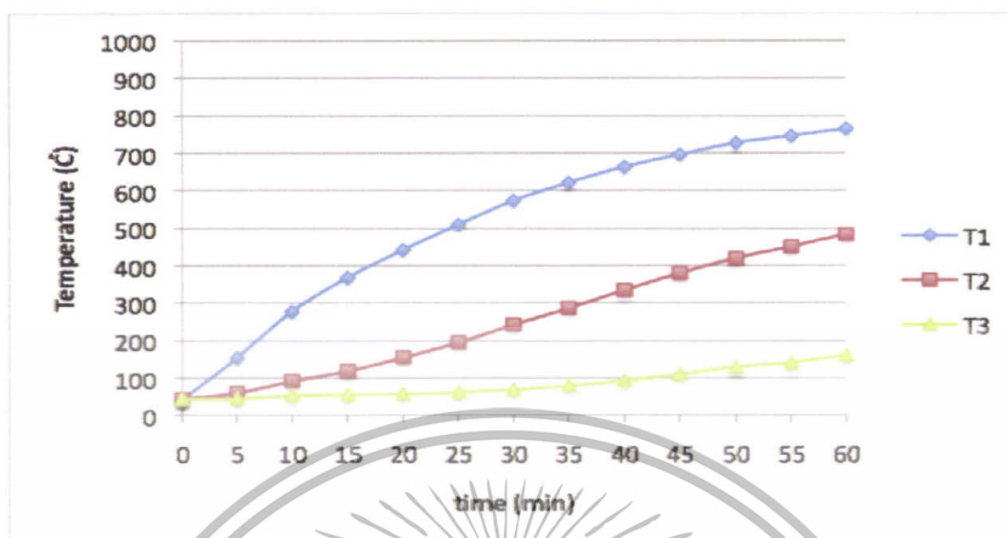
จากการทดลองของเม็ดวัสดุขนาด 30 มม. ที่อัตราอากาศส่วนเกิน 80% โดยมีอัตราการไหลของมวลอากาศ 93 ลิตรต่อนาที พฤติกรรมการเพิ่มอุณหภูมิของทั้งสามบริเวณมีลักษณะคล้ายกับการทดลองที่อัตราส่วนเกินของอากาศที่ 100% เพียงแต่มีอุณหภูมิที่แตกต่างคือ มีอุณหภูมิที่น้อยกว่าที่อัตราส่วนเกิน 100% เพียงเล็กน้อยหรืออาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มหรือลดของอัตราอากาศส่วนเกินมีผลต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ในเม็ดวัสดุขนาดเดียวกัน

ที่บริเวณ T_1 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด อัตราการเพิ่มในช่วงแรกของการทดลองคือ ใน 15 นาทีแรกการเพิ่มมีลักษณะที่ชันเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟตลอดทั้งกระบวนการพฤติกรรมแบบนี้เป็นพฤติกรรมเดียวกับบริเวณ T_2 ของเม็ดวัสดุขนาด 30 มม. ที่อัตราส่วนเกิน 100% แต่อุณหภูมิของแต่ละช่วงเวลานั้นจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย สุดท้ายอุณหภูมิจะมีการเพิ่มโดยเฉลี่ยคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ

บริเวณ T_2 เป็นบริเวณที่มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงรองลงมาจากบริเวณ T_1 ลักษณะของการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่เริ่มกระบวนการทดลองมีอัตราการเพิ่มที่ค่อนข้างคงที่ใน 5 นาทีแรกหลังเริ่มกระบวนการทดลองและคงที่ไปตลอดการทดลองไปจนถึงกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการทดลอง

บริเวณ T_3 การเพิ่มของอุณหภูมิมิ้อัตราการเพิ่มเพียงเล็กน้อยมีความสมเหตุสมผลที่อุณหภูมิในบริเวณ T_3 จะมีอุณหภูมิที่ไม่สูงมากนักอันเกิดจากการที่ความร้อนของเม็ดวัสดุบริเวณ T_3 ได้รับความร้อนของมวลอากาศที่ได้พัดพามาจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนและยังมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างเม็ดวัสดุเป็นอีกหนึ่งปัจจัยและปัจจัยที่ทำให้มีการลดของอุณหภูมินั้นเกิดจากการที่บริเวณ T_3 เป็นบริเวณที่มีการสัมผัสกับอากาศภายนอกบริเวณปากเตาตนเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



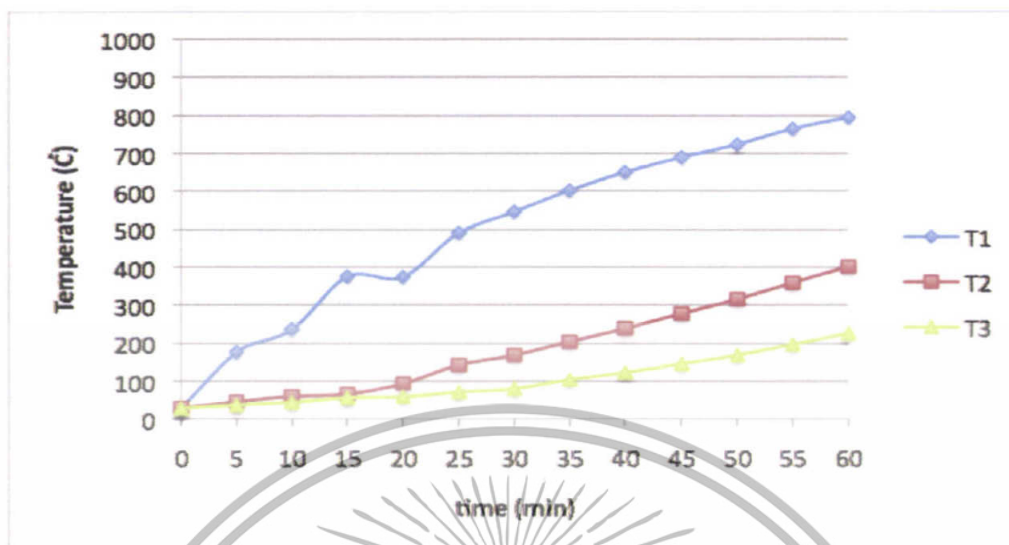
รูปที่ 5.23 เม็ดวัสดุพุนขนาด 30 มม., อากาศเกินพอที่ 100%, อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที

จากการทดลองของเม็ดวัสดุขนาด 30 มม. ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน 100% โดยมีอัตราการไหลของมวลอากาศที่ 105 ลิตรต่อนาที การเพิ่มของอุณหภูมิทั้งสามบริเวณมีอัตราการเพิ่มที่ค่อนข้างคงที่แต่มีค่าความร้อนที่สูงแตกต่างกัน

บริเวณ T_1 เมื่อเริ่มกระบวนการทดลองการเพิ่มของอุณหภูมิมีอัตราที่คงที่และเกิดขึ้นในลักษณะค่อนข้างชัน จากกราฟอุณหภูมิในบริเวณ T_1 นี้มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงอันเกิดจากการที่การเผาไหม้เกิดขึ้นภายในเตาและยังเกิดขึ้นที่บริเวณ T_1 นี้อีกด้วย ความร้อนที่วัดค่าได้มีอัตราการเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยค่อนข้างคงที่โดยอุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดกระบวนการทดลองที่เวลา 60 นาที อยู่ที่ 807 องศาเซลเซียส

บริเวณ T_2 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิถึงจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยแต่โดยเฉลี่ยก็มีค่าคงที่ โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสันนิษฐานได้ว่าเกิดขึ้นจากสองปัจจัยคือ การพัฒนาความร้อนโดยมวลของอากาศจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนและการที่มวลของเชื้อเพลิงบางส่วนที่หลงเหลือจากบริเวณ T_1 ลอยขึ้นไปและเกิดการเผาไหม้ต่อที่บริเวณ T_2 คาดว่าทั้งสองปัจจัยนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจึงทำให้อุณหภูมิโดยรวมเพิ่มขึ้นอย่างคงที่

บริเวณ T_3 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยพฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นจากการพัฒนาความร้อนจากด้านล่างมาสู่บริเวณ T_3 เพียงอย่างเดียวและพฤติกรรมนี้เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันทุก ๆ ช่วงเวลา จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการทดลอง



รูปที่ 5.24 เม็ดวัสดุพุนขนาด 30 มม., อากาศเกินพอที่ 110% , อัตราการไหล 111.5 ลิตรต่อนาที

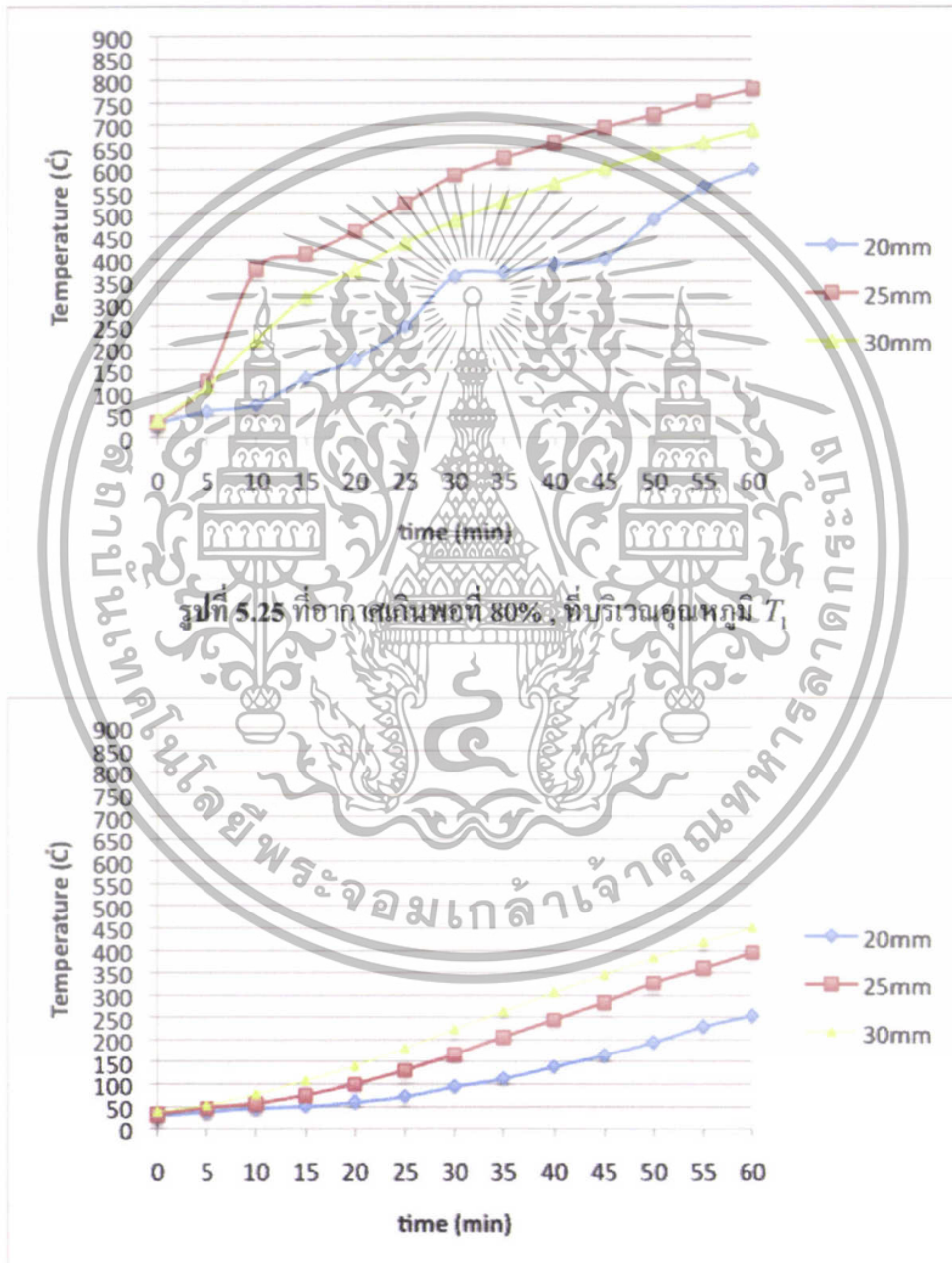
เมื่อทำการเริ่มกระบวนการทดลองในเม็ดวัสดุขนาด 30 มม. ในอัตราอากาศส่วนเกิน 110% เมื่อทำการเริ่มกระบวนการทดลองลักษณะการเผาไหม้ที่สังเกตได้จากภายนอกคือ ไม่เกิดการเผาไหม้ให้เห็นนอกบริเวณเม็ดวัสดุโดยจลกรวัดอุณหภูมิ พบว่าการเผาไหม้ภายในเตาอีกครั้งถึงแม้ว่าจะเกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง ๆ แต่ก็ก็ตาม แต่ก็ไม่ได้เกิดไฮดรอนให้เห็นบริเวณปล่องเตาจุดที่มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่สูงเป็นพิเศษคือ บริเวณ T_1 และ T_2 , T_3 ตามลำดับ

บริเวณ T_1 เมื่อเวลาผ่านไปเพียง 5 นาที สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้ถึง 176°C และยังเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงสุดอีกด้วย เมื่อเทียบกับ T_2 และ T_3 แต่การเผาไหม้เมื่อปล่อยให้เกิดขึ้นในระยะเวลาที่นานขึ้นจนถึงนาทีที่ 25 จะสังเกตเห็นการลดและเพิ่มของอุณหภูมิสลับกันไป ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากอัตราการไหลของมวลอากาศที่มากขึ้นทำให้เกิดการพัดพาความร้อน เมื่อไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของการเผาไหม้เอาไว้ได้จึงมีการลดลงของอุณหภูมิให้เห็น แต่เมื่อผ่านช่วงเวลาที่ 25 ไปแล้ว การเพิ่มของอุณหภูมิมีย่ออัตราคงที่มากขึ้น และสามารถรักษาเสถียรภาพทางความร้อนเอาไว้ได้จนถึงสิ้นสุดกระบวนการ

บริเวณ T_2 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิมีย่อเล็กน้อยอุณหภูมิที่ได้ไม่สูงมากนัก จนกระทั่งมาถึงนาทีที่ 20 อุณหภูมิกลับมีการเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหันอันเป็นผลมาจากการเกิดการพัดพาความร้อนจากบริเวณ T_1 มาที่ T_2 ในช่วงเวลาเดียวกันและเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิก็คเกิดขึ้นในอัตราที่คงที่เช่นเดียวกับพฤติกรรมของเม็ดวัสดุในบริเวณ T_1

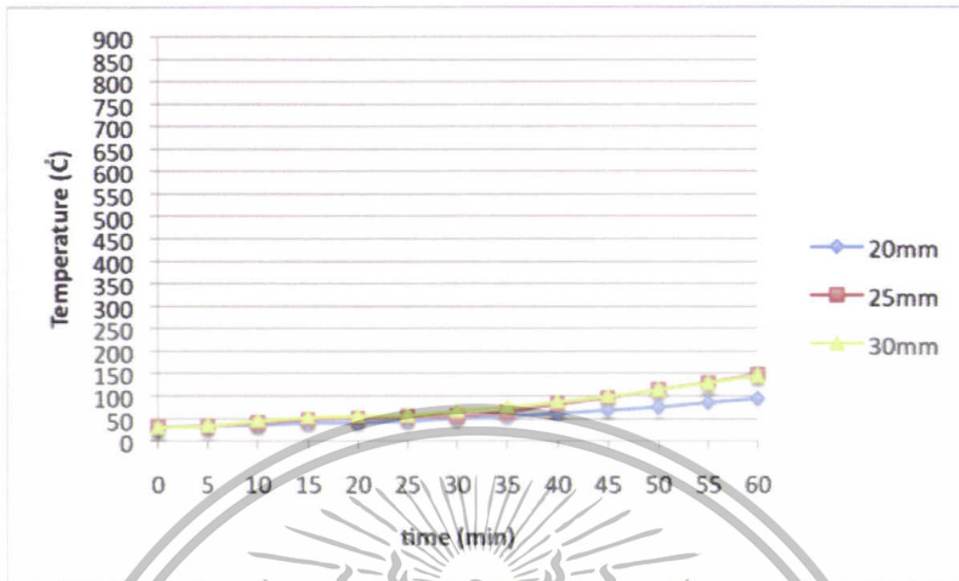
บริเวณ T_3 การเพิ่มของอุณหภูมิในบริเวณนี้เกิดขึ้นในอัตราที่ไม่สูงมากโดยเมื่อเวลาผ่านไปที่ 5 และ 10 นาทีแรก อุณหภูมิที่ได้คือ 45°C และ 59°C ตามลำดับ และในช่วงเวลาที่ 20 นาทีถึงแม้จะเกิดการพัดพาความร้อนโดยมวลของอากาศและเชื้อเพลิงจากบริเวณ T_1 แต่อัตราการ

เพิ่มของอุณหภูมิในช่วงเวลานี้กลับไม่มีพฤติกรรมการเพิ่มของอุณหภูมิเช่นเดียวกับบริเวณ T_2 แต่อย่างใดหรืออาจกล่าวได้ว่าการพัฒนาความร้อนในช่วงเวลาที่ 20 นาทีนี้ไม่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มความร้อนในบริเวณ T_3 แต่อย่างไรก็ดี สุดท้ายพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก็เกิดขึ้นอย่างคงที่หลังเวลาผ่านไป 30 นาที ถึงแม้จะเกิดขึ้นในอัตราที่น้อยก็ตาม



รูปที่ 5.26 ที่อากาศเกินพอที่ 80% , ที่บริเวณอุณหภูมิ T_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 ที่อากาศเกินห่อที่ 80% ที่บริเวณอุณหภูมิ T_3

การทดลองที่อากาศส่วนเกิน 80% จากรูป 5.25 วัสดุทั้งสามขนาดมีอัตราการเพิ่มของความร้อนที่สูงแก่วัสดุที่มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่สูงเป็นวัสดุขนาด 25 มม. แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น ลักษณะการเพิ่มของอุณหภูมิกลับมีการเพิ่มขึ้นในรูปแบบที่ไม่คงที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 10 นาทีแรกของการทดลองและมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่จนทำให้อุณหภูมิถึง 800°C เมื่อสิ้นสุดกระบวนการทดลองในเวลา 60

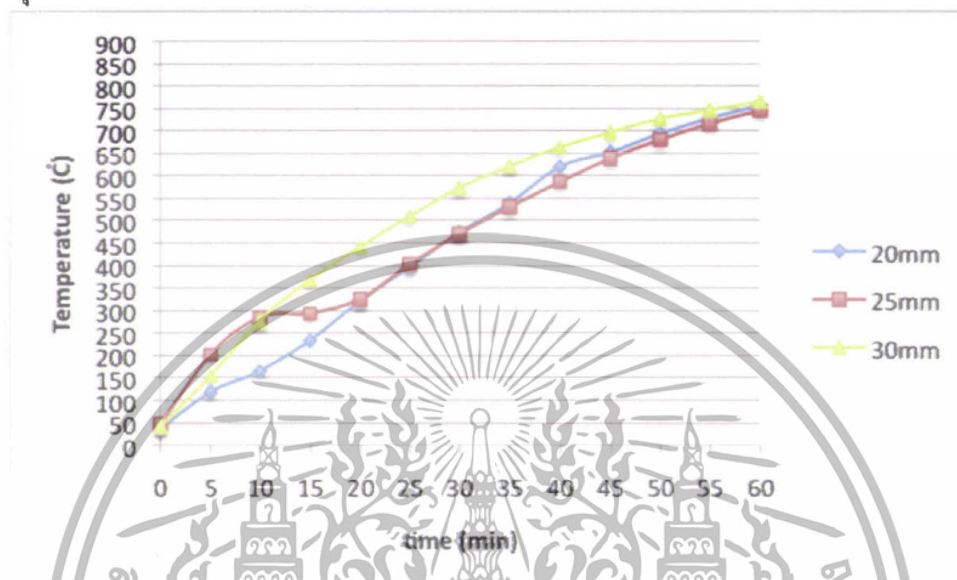
เมื่อทำการสังเกตพฤติกรรมของเม็ดวัสดุขนาด 20 มม. บริเวณ T_1 ซึ่งถือว่าเป็นเม็ดวัสดุที่ให้อัตราการเผาไหม้ที่แก่ที่สุดที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน 80% นี้ จากกราฟที่มีลักษณะขึ้นและลงไปจนเกือบตลอดทุกช่วงของการทดลอง ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าอาจจะเกิดจากเม็ดวัสดุไม่สามารถรักษาเสถียรภาพเอาไว้ได้เมื่อความร้อนที่บริเวณเผาไหม้ไม่สามารถเอาชนะเชื้อเพลิงและอากาศที่เข้ามาใหม่นี้ได้ อุณหภูมิที่วัดได้จึงมีการลดลง ซึ่งจะสังเกตได้จากกราฟ (รูปที่ 5.25)

จากรูปที่ 5.25 ที่ 80% T_1 เม็ดวัสดุขนาด 30 มม. เป็นวัสดุที่มีอัตราการเพิ่มความร้อนที่ค่อนข้างคงที่ โดยนับตั้งแต่เริ่มกระบวนการทดลองจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดลอง

จากรูป 5.26 สังเกตเห็นได้ว่าอัตราการเพิ่มของบริเวณความร้อนของวัสดุทั้งสามขนาดมีในปริมาณที่น้อย จนถึงในช่วงเวลาที่ 15 นาที หลังการทดลอง อุณหภูมิจึงเริ่มมีการเพิ่มในปริมาณที่คงที่มากขึ้น จนถึงสิ้นสุดกระบวนการในเวลา 60 ในกระบวนการทดลอง ซึ่งเหตุผลที่ได้คั้งนี้ สืบเนื่องมาจากช่วงที่เกิดการเผาไหม้ที่ T_1 มีการเผาไหม้แบบค่อนข้างสมบูรณ์และไม่เหลือเชื้อเพลิงที่จะสามารถเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ในช่วงขั้นถัดไป (T_2) ของเตาทำให้อุณหภูมิ ณ จุด T_2 มีค่าความร้อนที่ไม่สูงมากนักและอีกทั้งยังส่งผลต่อไปยังขั้นที่อยู่ถัดขึ้นไปอีก (T_3) ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

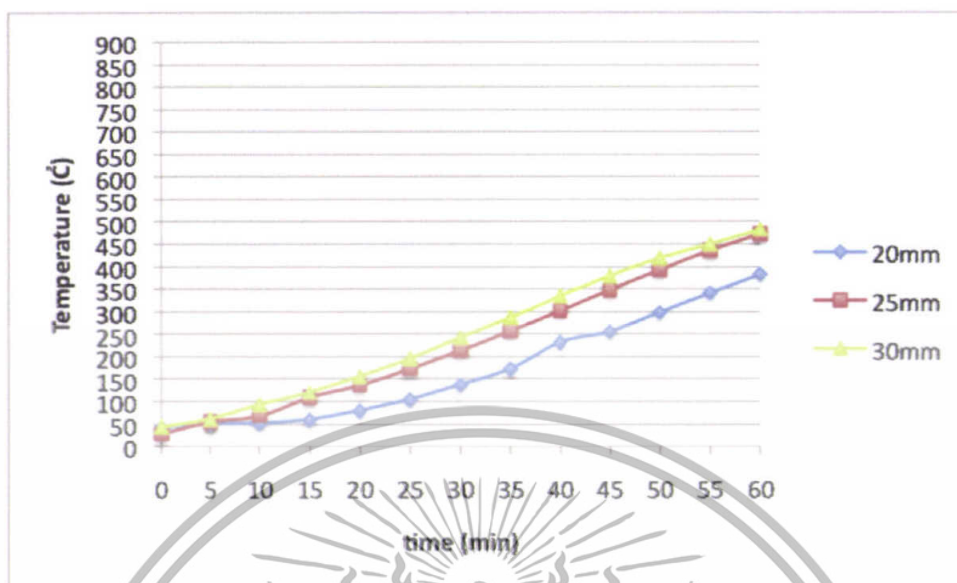
อุณหภูมิที่จุดที่สามมีอัตราการเพิ่มของความร้อนที่น้อยมาก เมื่อทำการพิจารณาถึงความร้อนที่เกิดขึ้นที่บริเวณ T_2 และ T_3 อาจกล่าวได้ว่าเป็นกลไกของการพาความร้อนและการนำความร้อนของเม็ดวัสดุ



รูปที่ 5.28 ที่อากาศเกินพอที่ 100% , ที่บริเวณอุณหภูมิ T_1

จากรูป 5.28 จะพบว่าที่เวลาช่วงเวลา 0 - 10 นาทีที่ขนาด 25 มม. และ 30 มม. จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว แต่จะสังเกตว่าที่ช่วงเวลา 10 - 23 นาทีที่เม็ดขนาด 25 มม. จะไม่มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และจากนั้นที่ช่วงเวลาดังกล่าวตั้งแต่ 23 นาทีขึ้นไปอุณหภูมิก็มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะแตกต่างกับในกรณีของเม็ดขนาด 20 มม. และ 30 มม. จะพบว่าตั้งแต่เริ่มการจุดเตาจะมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ค่อนข้างเสถียรและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ

ส่วนในกรณีของเม็ดขนาด 25 มม. ที่ช่วงเวลา 10 - 23 นาที ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีการเผาไหม้ได้อุณหภูมิเปลวไฟได้ค่าๆหนึ่งแล้วจะเกิดการแผ่รังสีความร้อนส่วนหนึ่งขึ้นไปยังชั้นวัสดุพุนค้ำบนจนทำให้การเผาไหม้ที่บริเวณ T_1 นี้ เกิดการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนนี้ จึงทำให้การพัฒนาของมวลเชื้อเพลิงอากาศเย็นที่เข้ามาใหม่นี้ไม่สามารถทำการเผาไหม้ให้เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้นได้ จึงทำให้บริเวณ T_1 ในช่วงเวลา 10 - 23 นาที ของเม็ดขนาด 25 มม. มีอุณหภูมิกิ่งที่



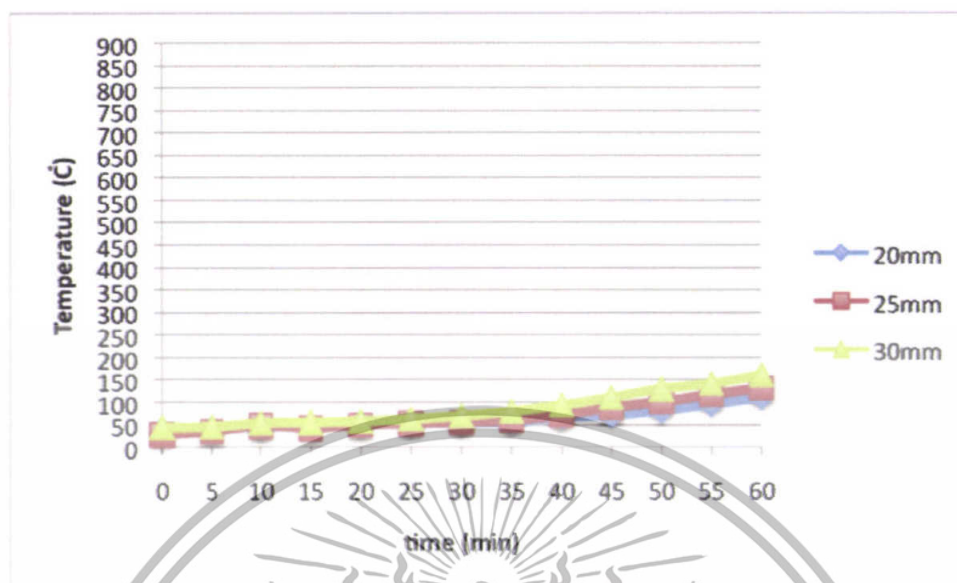
รูปที่ 5.29 ที่อากาศเกินพอที่ 100% , ที่บริเวณอุณหภูมิ T_2

จากรูป 5.29 จะพบว่าเมื่อมีขนาด 20 มม. , 25 มม. และ 30 มม. มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิไม่สูงมากนัก และที่เมื่อมีขนาด 30 มม. มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิสูงที่สุด ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นผลมาจากการแผ่รังสีความร้อนจากบริเวณ T_1 บางส่วนมาสู่ชั้นบนของวัสดุพอรณที่บริเวณ T_2

และที่เมื่อมีขนาด 25 มม. การเพิ่มของอุณหภูมิจะมีลักษณะคล้ายกับเมื่อมีขนาด 30 มม. ดังที่ได้อธิบายไปข้างต้น แต่จะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากที่บริเวณ T_1 ของเมื่อมีขนาดขนาด 30 มม. มีอุณหภูมิที่สูงกว่า และเมื่อมองขนาดของเมื่อวัสดุพอรณที่ใหญ่กว่าจึงทำให้มีช่องว่างระหว่างเมื่อวัสดุพอรณเยอะกว่ามีผลทำให้เกิดการพัดพาและถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า และการพัดพาที่ต่ำกว่าเนื่องจากขนาดของเมื่อวัสดุที่แตกต่างด้วย

ที่เมื่อมีขนาด 20 มม. (สีฟ้า) มีแนวโน้มการเพิ่มของอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นก็มีค่าน้อยกว่าเมื่อมีขนาด 25 มม. และ 30 มม. เนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนเป็นไปได้อย่างเนื่องจากปัจจัยทางด้านขนาดของเมื่อวัสดุที่มีขนาดเล็กจึงทำให้ช่องว่างระหว่างเมื่อวัสดุพอรณน้อย อุณหภูมิที่ได้จึงน้อยตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

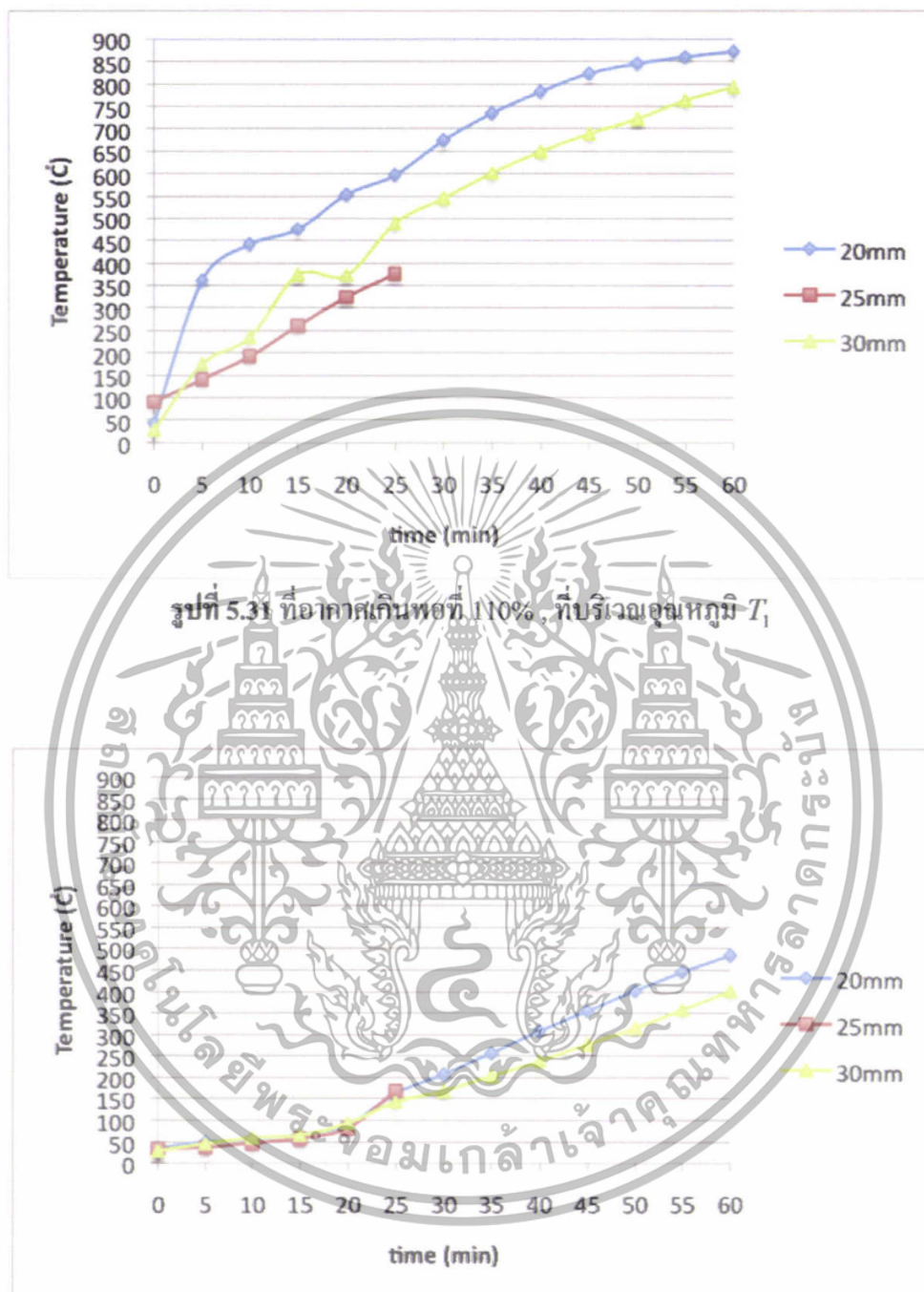


รูปที่ 5.30 ที่อากาศเกินพอที่ 100%, ที่บริเวณอุณหภูมิ T_3

จากรูปที่ 5.30 พบว่าที่เม็ดวัสดุพูนขนาด 20 มม., 25 มม. และ 30 มม. จะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันมากและมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิไม่สูงมากนัก อุณหภูมิที่สูงที่สุดคือที่เม็ดวัสดุพูนขนาด 30 มม. เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุพูนที่มากกว่า จึงมีผลทำให้มีการพัดพารังสีความร้อนจากด้านล่างขึ้นมายังบริเวณด้านบนเม็ดวัสดุพูนได้ง่ายกว่า และอุณหภูมิที่ T_3 นี้เกิดจากแผ่รังสีความร้อนจากบริเวณ T_1 และ T_2 บางส่วนแผ่รังสีมาสู่ชั้นบนของวัสดุพูนที่บริเวณ T_3

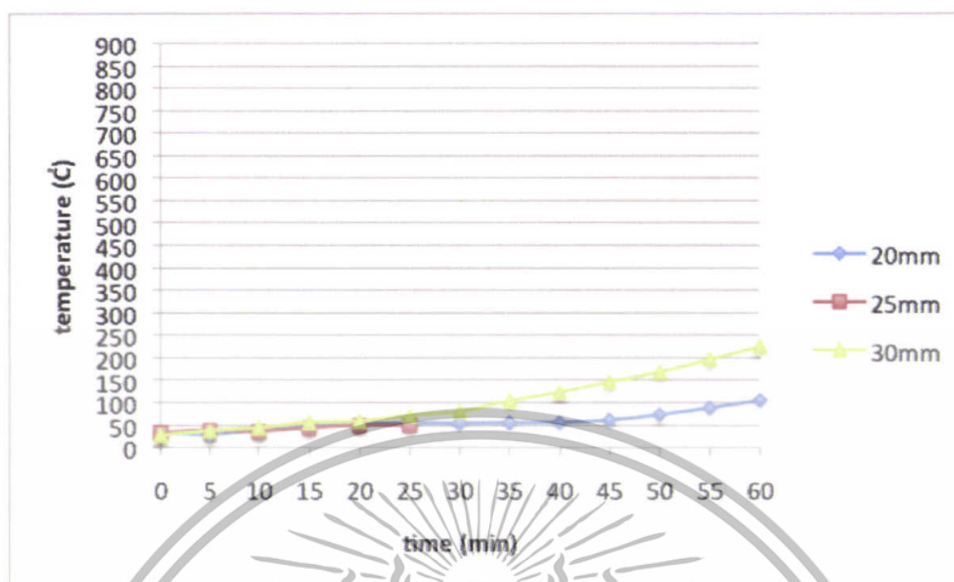
การทดลองที่อากาศส่วนเกิน 100% เปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้อากาศส่วนเกินของอุณหภูมิโดยระยะของการใช้อากาศเกินพอที่ 110% จะสูงกว่าเล็กน้อย จากที่มีการอธิบายมาด้านบน จะเห็นได้ว่าจากการเพิ่มของอุณหภูมิในขนาดเม็ดวัสดุพูนที่ใหญ่คือ 30 มม. จะมีการเพิ่มของความร้อนค่อนข้างสูงกว่าขนาด 25 มม. และ 20 มม. ตามลำดับ เป็นเพราะมาจากการปัจจัยของช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุพูนที่มากกว่า จึงทำให้การพัดพาสามารถทำได้ดีมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.32 ที่อากาศเกินพอที่ 110% , ที่บริเวณอุณหภูมิ T_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.33 ที่อากาศเกินพอดี 110% ที่บริเวณอุณหภูมิ T_3

จากรูป 5.33 ที่ T_3 ที่ช่วงเวลา 0-10 นาที จะพบว่าเมื่อวัดวัสดุพุนขนาด 20 มม. มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อวัดวัสดุพุนขนาด 25 มม. และ 30 มม. และในช่วงเวลาที่ 10-15 นาที ที่เมื่อวัดวัสดุพุนขนาด 20 มม. มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิลดต่ำลง ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีการเผาไหม้ได้อุณหภูมิเปลวไฟได้ค่าๆ หนึ่งแล้วจะเกิดการพัดพาความร้อนส่วนหนึ่งขึ้นไปยังชั้นวัสดุพุนด้านบนจนจึงทำให้การเผาไหม้ที่บริเวณ T_3 นี้เกิดการสูญเสียความร้อนจากการพัดพาความร้อนนี้ จึงทำให้การพัดพาของมวลเชื้อเพลิงจากชั้นที่เข้ามาใหม่นี้ไม่สามารถทำการเผาไหม้เพื่อให้เกิดการเพิ่มของอุณหภูมิเป็นไปไม่อัตราที่สูงขึ้นได้ จึงทำให้บริเวณ T_3 ในช่วงเวลา 10-15 นาที ของเมื่อขนาด 20 มม. มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิลดลง ซึ่งจะต่างกับเมื่อวัดวัสดุพุนขนาด 30 มม. ซึ่งมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นไปอย่างรวดเร็วแต่เป็นการเพิ่มของอุณหภูมิในระยะเวลานั้นๆ เพราะในระยะเวลาค่อมาที่ช่วงเวลา 15-20 นาที พบว่ามีการลดลงของอุณหภูมิตั้งแต่จุดเริ่มต้นของเมื่อวัดวัสดุพุนขนาด 30 มม. ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ว่าการลดลงของอุณหภูมินี้เกิดจากการพัดพาของมวลอากาศและเชื้อเพลิงจากด้านล่างทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลอากาศร้อนไปสู่บริเวณด้านบนของเตา และในช่วงเวลา 25 นาทีขึ้นไป ที่เมื่อวัดวัสดุพุนขนาด 20 มม. , 25 มม. และ 30 มม. มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเรื่อยๆ จึงแสดงให้เห็นว่ามีการเผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์ที่บริเวณ T_3 และที่เมื่อขนาด 20 มม. มีอุณหภูมิสูงสุด

จากรูปที่ 5.32 จากกราฟที่ช่วงเวลา 0-20 นาที เมื่อวัดวัสดุพุนขนาด 20 มม. , 25 มม. และ 30 มม. จะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันมากแต่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิไม่สูงมากนัก จากเส้นสีฟ้าที่ขนาด 20 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีอัตราความร้อนที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับกราฟเส้นสีเขียว ที่ขนาด 30 มม. การเพิ่มของกราฟจะมีการเพิ่มค่อนข้างชัน จะอยู่ในช่วง 25 นาที เป็นผลมาจากการแผ่ความร้อนมาจากช่วง T_1 จากกราฟที่ผ่านมา เพราะอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในช่วงของ T_2 มีลักษณะค่อนข้างไม่สูงนักและมีการเพิ่มในช่วงเวลาที่นานประมาณ 25 นาที

กราฟเส้นของขนาด 30 มม. มีอัตราการเพิ่มคล้ายกับกราฟเส้นสีฟ้าที่กล่าวมาแล้วแต่ที่กราฟเส้นสีเขียวจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า เพราะเป็นผลมาจากที่ T_1 ของกราฟสีเขียวจากรูป 5.31 มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจากราฟเส้นสีฟ้าที่ขนาด 20 มม. จากรูปที่ 5.31

กราฟเส้นสีส้มที่ 25 มม. มีลักษณะเพิ่มค่อนข้างต่ำในช่วง 20 นาทีแรก และเมื่อถึง 25 นาทีเกิดการดับของเปลวไฟจากรูป 5.33 จะเห็นได้ว่ากราฟสีเขียวที่ขนาด 30 มม. จากรูปที่ 5.32 ที่ผ่านมามีอุณหภูมิต่ำกว่ากราฟสีฟ้าที่ขนาด 20 มม. มาตลอด แต่ช่วงการวัดที่ T_3 กลับมีอุณหภูมิสูงกว่า เป็นผลมาจากขนาดของเม็ดวัสดุพอรุน เพราะที่สีฟ้าเป็นขนาด 20 มม. ช่องว่างเม็ดวัสดุมีช่องว่างน้อย จึงทำให้มวลอากาศจากด้านล่างไหลพาความร้อนขึ้นมาได้ไม่มากนัก แต่เม็ดขนาด 30 มม. มีช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุที่มาก อากาศที่พาความร้อนจากด้านล่างจึงสามารถผ่านได้ง่ายกว่า

จากกราฟทั้งหมดสามารถอธิบายได้ว่า ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งสามบริเวณ (T_1 , T_2 และ T_3) เป็นไปในช่วงแรกๆ คือการเผาไหม้จะเกิดบริเวณ T_1 เพียงบริเวณเดียวจึงทำให้บริเวณอื่นๆ (T_2 และ T_3) มีอุณหภูมิต่ำกว่าค่อนข้างมาก และในช่วงหลัง 25 นาที มาแล้วจะมีการเสถียรของเปลวไฟเนื่องจากดูได้จากกราฟที่เพิ่มขึ้นอย่างคงที่ ดังนั้นฐานว่าความร้อนที่เกิดจากเม็ดวัสดุที่ร้อนจนได้ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการเผาไหม้ที่ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

ในปริญญานิพนธ์ได้สร้างเตาเผาวัสดุพูน โดยใช้วัสดุพูนเป็นตัวกลางในการเผาไหม้โดยใช้เซรามิกที่มีอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งจะทำให้การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของเตาวัสดุพูนโดยใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ซึ่งจะทำให้การทดลองที่เม็ควัสดุพูนทั้งหมด 6 ขนาด คือ 6, 10, 16, 20, 25 และ 30 มม. โดยเพื่อจะศึกษาถึงขนาดของวัสดุพูนที่สามารถรักษาเปลวไฟให้สามารถเผาไหม้ภายในวัสดุพูนได้และทำการศึกษาถึงขนาดของวัสดุพูนที่สามารถประพฤติตัวเป็นตัวป้องกันไฟได้ดี จากการทดลองนั้นสามารถสรุปผลการทดลองได้เป็นดังนี้

6.1.1 ขนาดของวัสดุพูนมีอิทธิพลต่ออัตราการเผาไหม้

จากการทดลองพบว่าเม็ควัสดุพูนขนาด 6 มม. และ 10 มม. สามารถเป็นตัวป้องกันเปลวไฟได้ดี เนื่องจากการเพิ่มของอุณหภูมิเป็นไปในอัตราที่น้อยมากซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของเม็ควัสดุพูนมีขนาดเล็กจึงทำให้ช่องว่างระหว่างวัสดุพูนมีเนื้อที่น้อยตามไปด้วย จึงทำให้ไม่สามารถรักษาเปลวไฟให้เกิดการเผาไหม้ภายในวัสดุพูนได้

และที่เม็ควัสดุพูนขนาด 16 มม. จะเป็นขนาดที่เป็นความเกี่ยวข้องของการเผาไหม้ ซึ่งสามารถอธิบายได้คือ ในการจ่ายอัตราความร้อนของอากาศเกินพอที่ 20% - 60% จะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นไปในอัตราที่น้อย แต่อัตราการไหลของอากาศเกินพอที่ 80% จะมีการเพิ่มของอุณหภูมิสูงมากขึ้น แต่เมื่อผ่านไปในช่วงเวลาหนึ่งการเพิ่มของอุณหภูมิมิ้อตราลดต่ำลง และที่อัตราการไหลของอากาศเกินพอที่ 100% มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่างรวดเร็วและมีอุณหภูมิที่สูงมาก จึงทำให้สรุปได้ว่าที่เม็ควัสดุพูนขนาด 16 มม. ยังเป็นขนาดที่ไม่สามารถทำให้เกิดการเผาไหม้ภายในวัสดุพูนที่ดีได้

จากการทดลองนี้พบว่าขนาดของเม็ควัสดุพูนที่สามารถรักษาเปลวไฟให้สามารถติดอยู่ในเม็ควัสดุพูนได้ คือที่เม็ควัสดุพูนขนาดตั้งแต่ 20 มม. ขึ้นไป

6.1.2 อัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศมีผลต่อการเผาไหม้

จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการเพิ่มอากาศส่วนเกินมากขึ้นจะมีผลทำให้เปลวไฟที่ลอยอยู่บริเวณปากเตานั้นมีความยาวที่สั้นลง เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อมีการเพิ่มอากาศส่วนเกินมากขึ้นการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นไปในอัตราที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้นตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 วัสดุพูนควรมีคุณสมบัติในการทนความร้อนและดูดกลืนความร้อนได้ดี และวัสดุพูนที่ใช้สร้างเตาวัสดุพูนควรเป็นวัสดุทนความร้อนสูง

6.2.2 เทอร์โมคัปเปอร์ท่ใช้วัดอุณหภูมิควรมีขนาดเล็กและมีย่านการใช้งานที่เหมาะสมต่อการทดลอง

6.2.3 ปืนจ่ายเชื้อเพลิงควรมีอัตราการไหลที่สม่ำเสมอ

6.2.4 วาล์วควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงควรถูกจะสามารถปรับอัตราการไหลเชื้อเพลิงได้ละเอียด

6.2.5 ท่อจ่ายเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องผสมควรทำเป็นเกลียวเพื่อช่วยการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิง

6.2.6 มาตรฐานอัตราการไหลของอากาศควรมีความละเอียดและความแม่นยำในการวัดทั้งนี้เนื่องจากเป็นผลถึงความถูกต้องแม่นยำในการทดลองในผลการทดลอง

6.2.7 Data Logger ควรจะอ่านอุณหภูมิได้หลายๆจุดพร้อมกันในเวลาเดียวกันเพื่อความถูกต้องแม่นยำในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- [1] กัญจนา บุญเกียรติ, เชื้อเพลิงและการเผาไหม้ ปี พ.ศ. 2544
- [2] A.Burcat and B.Mebride, 1997 Ideal Thermodynamics Data for Combustion and Air Pollution Use Technion aerospace Report TAE804(June)
- [3] Hsisto and C, Fraid, Thermodynamic-Fluid and combustion Research Division Vpl.3, 1998, pp 214-247
- [4] ศตวรรษ สันติสุรัตน์และคณะ, “ การพัฒนาหัวเผา น้ำมันพืชเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ”, วิทยานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545
- [5] <http://www.fuel.com>
- [6] สำเร็จ จักรใจ และ อนิรุตต์ มินธุจักร, “ การพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบวัสดุพรุนร่วมกับห้องเผาไหม้แบบวัสดุพรุนชนิดใช้เชื้อเพลิงเหลวโดยไม่มีกระแสตัวเป็นฝอยละออง ”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16, 2546
- [7] อรรณพ ผาบัฟุ้ง, การศึกษาเชิงทดลองของหัวเผาแบบพรุนเผาไหม้ น้ำมันพืช, วิทยานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547
- [8] M.Cossalopov, Field of Application of the porous Media Burner concept 1997, pp-57
- [9] D.Trimis, Basic principle of the Porous media Technology Vol.2, 1995, pp141-161
- [10] สนธยา มีเสียง, “ การพัฒนาและการศึกษาสมรรถนะของหัวเผา น้ำมันมะพร้าว ”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
- [11] HOWELL, JR., Hall, M.J. and Ellzey, J.L., 1996, “Combustion of Hydrocabon Fuel within Porous Iner Media, “Progress in Energy Combustion Science, Vol.22, pp121-145
- [12] ชานนท์ ชื่นจิตร, “ การศึกษาเชิงทดลองอุปกรณ์และเปลี่ยนความร้อนประสิทธิภาพสูง ”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544
- [13] Frank P.Incropera and David P.DeWill, “Introduction to Heat Transfer”, Wiley, Third Edition
- [14] Stephen R.Turns, “An Introduction to combustion Concept and Application”, Mc Graw-Hill,

1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] David R.Lide , “CRC Handbook of Chemistry and Physics” CRC Press using a porous medium. Experimental Thermal and Fluid Science. Vol. 26. pp. 15-23
- [16] 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
- [17] Dimosthenis Trimis et al, Germany.”Porous Medium Combustor versus Combustion Systems with Free Flames”



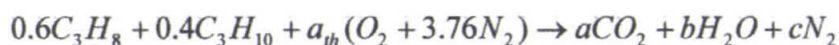
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณอัตราส่วนการเผาไหม้ อากาศกับเชื้อเพลิง LPG

สมการเคมีของกระบวนการเผาไหม้สามารถเขียนได้ดังนี้คือ



การเผาไหม้ที่อากาศเกินพอที่ 20 %



ใช้กฎอนุรักษ์มวลของธาตุแต่ละชนิดได้ดังนี้

$$C = (0.6 \times 3) + (0.4 \times 4) = x$$

$$x = 3.4$$

$$H = (0.6 \times 8) + (0.4 \times 10) = 2y$$

$$2y = 8.8$$

$$y = 4.4$$

$$O_2 = 1.2a_{th} = x + \frac{y}{2} + 0.2a_{th}$$

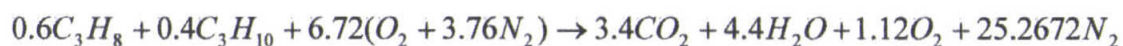
$$= 1.2a_{th} = 3.4 + 2.2 + 0.2a_{th}$$

$$(1.2 - 0.2)a_{th} = 3.4 + 2.2$$

$$a_{th} = 5.6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าลงในสมการเคมีข้างต้น



อัตราส่วนของอากาศ-เชื้อเพลิง (AF) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$AF = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{(NM)_{air}}{(NM)_c + (NM)_{H_2}}$$

$$= \frac{(6.72 + 4.76 \text{ kmol}) \left(\frac{29 \text{ kg}}{\text{kmol}} \right)}{(3.4 \text{ kmol}) \left(\frac{12 \text{ kg}}{\text{kmol}} \right) + (4.4 \text{ kmol}) \left(\frac{2 \text{ kg}}{\text{kmol}} \right)}$$

$$= 18.702 \frac{\text{kg}_{air}}{\text{kg}_{fuel}}$$

คำนวณหาค่า m^*_{LPG} จาก

$$3 \text{ kW} = m^*_{LPG} \times HHV_{LPG}$$

$$3 \text{ kW} = m^*_{LPG} \times 45.6 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$m^*_{LPG} = \frac{3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{45.6 \times 10^3 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}}$$

$$m^*_{LPG} = 6.579 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m^*_{air} = AF \times m^*_{fuel}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 18.702 \times (6.579 \times 10^{-5})$$

$$= 1.23 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$= \frac{1.23 \times 10^{-3}}{1.17} = 1.0516 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$= 1.0516 \times 10^{-3} \times 60$$

$$= 0.063 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

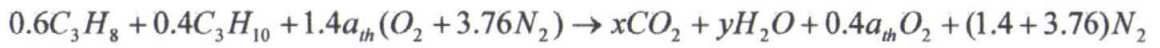
ทำให้เป็น $\frac{L}{\text{min}}$ ต้องคูณด้วย 1000

$$= 63.09 \frac{L}{\text{min}}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาไหม้ที่อากาศเกินพอที่ 40 %



ใช้กฎอนุรักษ์มวลของธาตุแต่ละชนิดได้ดังนี้

$$C = (0.6 \times 3) + (0.4 \times 4) = x$$

$$x = 3.4$$

$$H = (0.6 \times 8) + (0.4 \times 10) = 2y$$

$$2y = 8.8$$

$$y = 4.4$$

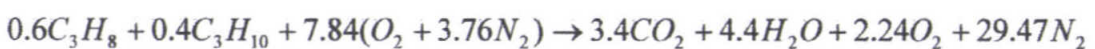
$$O_2 = 1.2a_{th} = x + \frac{y}{2} + 0.2a_{th}$$

$$= 1.2a_{th} = 3.4 + 2.2 + 0.2a_{th}$$

$$(1.2 - 0.2)a_{th} = 3.4 + 2.2$$

$$a_{th} = 5.6$$

แทนค่าลงในสมการเคมีข้างต้น



อัตราส่วนของอากาศ - เชื้อเพลิง (AF) สามารถคำนวณได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{(NM)_{air}}{(NM)_c + (NM)_{H_2}}$$

$$= \frac{(7.84 + 4.76 \text{ kmol})(29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})}{(3.4 \text{ kmol})(12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}) + (4.4 \text{ kmol})(2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})}$$

$$= 21.819 \frac{\text{kg}_{air}}{\text{kg}_{fuel}}$$

คำนวณหาค่า m^*_{LPG} จาก

$$3 \text{ kW} = m^*_{LPG} \times HHV_{LPG}$$

$$3 \text{ kW} = m^*_{LPG} \times 45.6 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$m^*_{LPG} = \frac{3 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{45.6 \times 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$m^*_{LPG} = 6.579 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m^*_{air} = AF \times m^*_{fuel}$$

$$= 21.819 \times (6.579 \times 10^{-5})$$

$$= 1.4355 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$= \frac{1.4355 \times 10^{-3}}{1.17} = 1.2269 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 1.2269 \times 10^{-3} \times 60$$

$$= 0.0736 \frac{m^3}{\text{min}}$$

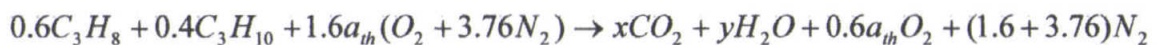
ทำให้เป็น $\frac{L}{\text{min}}$ ต้องคูณด้วย 1000

$$= 73.6 \frac{L}{\text{min}}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาไหม้ที่อากาศเกินพอที่ 60 %



ใช้กฎอนุรักษ์มวลของธาตุแต่ละชนิดได้ดังนี้

$$C = (0.6 \times 3) + (0.4 \times 4) = x$$

$$x = 3.4$$

$$H = (0.6 \times 8) + (0.4 \times 10) = 2y$$

$$2y = 8.8$$

$$y = 4.4$$

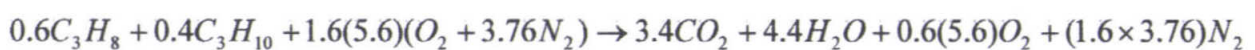
$$O_2 = 1.2a_{th} = x + \frac{y}{2} + 0.2a_{th}$$

$$= 1.2a_{th} = 3.4 + 2.2 + 0.2a_{th}$$

$$(1.2 - 0.2)a_{th} = 3.4 + 2.2$$

$$a_{th} = 5.6$$

แทนค่าลงในสมการเคมีข้างต้น



อัตราส่วนของอากาศ – เชื้อเพลิง (AF) สามารถคำนวณได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{(NM)_{air}}{(NM)_c + (NM)_{H_2}}$$

$$= \frac{(8.96 + 4.76 \text{ kmol})(29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})}{(3.4 \text{ kmol})(12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}) + (4.4 \text{ kmol})(2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})}$$

$$= 24.9362 \frac{\text{kg}_{air}}{\text{kg}_{fuel}}$$

คำนวณหาค่า m^*_{LPG} จาก

$$3 \text{ kW} = m^*_{LPG} \times HHV_{LPG}$$

$$3 \text{ kW} = m^*_{LPG} \times 45.6 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$m^*_{LPG} = \frac{3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{45.6 \times 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$m^*_{LPG} = 6.579 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m^*_{air} = AF \times m^*_{fuel}$$

$$= 24.9362 \times (6.579 \times 10^{-5})$$

$$= 1.6405 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$= \frac{1.6405 \times 10^{-3}}{1.17} = 1.2269 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$= 1.4022 \times 10^{-3} \times 60$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.08413 \frac{m^3}{\text{min}}$$

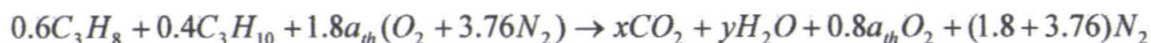
ทำให้เป็น $\frac{L}{\text{min}}$ ต้องคูณด้วย 1000

$$= 84.13 \frac{L}{\text{min}}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาไหม้ที่อากาศเกินพอที่ 80 %



ใช้กฎอนุรักษ์มวลของธาตุแต่ละชนิดได้ดังนี้

$$C = (0.6 \times 3) + (0.4 \times 4) = x$$

$$x = 3.4$$

$$H = (0.6 \times 8) + (0.4 \times 10) = 2y$$

$$2y = 8.8$$

$$y = 4.4$$

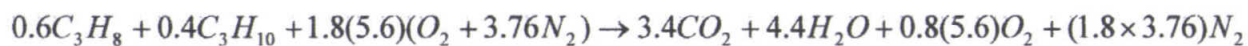
$$O_2 = 1.2a_{th} = x + \frac{y}{2} + 0.2a_{th}$$

$$= 1.2a_{th} = 3.4 + 2.2 + 0.2a_{th}$$

$$(1.2 - 0.2)a_{th} = 3.4 + 2.2$$

$$a_{th} = 5.6$$

แทนค่าลงในสมการเคมีข้างต้น



อัตราส่วนของอากาศ - เชื้อเพลิง (AF) สามารถคำนวณได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{(NM)_{air}}{(NM)_c + (NM)_{H_2}}$$

$$= \frac{(10.05 + 4.76 \text{ kmol})(29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})}{(3.4 \text{ kmol})(12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}) + (4.4 \text{ kmol})(2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})}$$

$$= 28.05329 \frac{\text{kg}_{air}}{\text{kg}_{fuel}}$$

คำนวณหาค่า m^*_{LPG} จาก

$$3 \text{ kW} = m^*_{LPG} \times HHV_{LPG}$$

$$3 \text{ kW} = m^*_{LPG} \times 45.6 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$m^*_{LPG} = \frac{3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{45.6 \times 10^3 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}}$$

$$m^*_{LPG} = 6.579 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m^*_{air} = AF \times m^*_{fuel}$$

$$= 28.05329 \times (6.579 \times 10^{-5})$$

$$= 1.84562 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$= \frac{1.84562 \times 10^{-3}}{1.17} = 1.577458 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 1.577458 \times 10^{-3} \times 60$$

$$= 0.09467 \frac{m^3}{min}$$

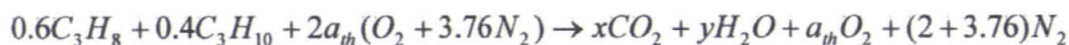
ทำให้เป็น $\frac{L}{min}$ ต้องคูณด้วย 1000

$$= 94.67 \frac{L}{min}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาไหม้ที่อากาศเกินพอที่ 100 %



ใช้กฎอนุรักษ์มวลของธาตุแต่ละชนิดได้ดังนี้

$$C = (0.6 \times 3) + (0.4 \times 4) = x$$

$$x = 3.4$$

$$H = (0.6 \times 8) + (0.4 \times 10) = 2y$$

$$2y = 8.8$$

$$y = 4.4$$

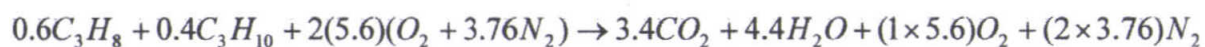
$$O_2 = 1.2a_{th} = x + \frac{y}{2} + 0.2a_{th}$$

$$= 1.2a_{th} = 3.4 + 2.2 + 0.2a_{th}$$

$$(1.2 - 0.2)a_{th} = 3.4 + 2.2$$

$$a_{th} = 5.6$$

แทนค่าลงในสมการเคมีข้างต้น



อัตราส่วนของอากาศ - เชื้อเพลิง (AF) สามารถคำนวณได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{(NM)_{air}}{(NM)_c + (NM)_{H_2}}$$

$$= \frac{(11.2 + 4.76 \text{ kmol})(29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})}{(3.4 \text{ kmol})(12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}) + (4.4 \text{ kmol})(2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})}$$

$$= 31.1703 \frac{\text{kg}_{air}}{\text{kg}_{fuel}}$$

คำนวณหาค่า m^*_{LPG} จาก

$$3 \text{ kW} = m^*_{LPG} \times HHV_{LPG}$$

$$3 \text{ kW} = m^*_{LPG} \times 45.6 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$m^*_{LPG} = \frac{3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{45.6 \times 10^3 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}}$$

$$m^*_{LPG} = 6.579 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m^*_{air} = AF \times m^*_{fuel}$$

$$= 31.1703 \times (6.579 \times 10^{-5})$$

$$= 2.05069 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$= \frac{2.05069 \times 10^{-3}}{1.17} = 1.753 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 1.753 \times 10^{-3} \times 60$$

$$= 0.10516 \frac{m^3}{\text{min}}$$

ทำให้เป็น $\frac{L}{\text{min}}$ ต้องคูณด้วย 1000

$$= 105.164 \frac{L}{\text{min}}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 เม็ดวัสดุพูนขนาด ที่ 16 มม. ที่อากาศเกินพอ 20%

time rate	T1	T2	T3
0	31.4	41	53
5	30.6	40.5	52.4
10	29.9	39.9	51.5
15	29.5	39.3	51
20	28.9	38.5	50.5
25	28.5	38	49.4
30	28.5	37.5	48.9
35	28.5	37.2	48.5
40	28.5	36.7	48
45	28.5	36.2	47.5
50	28.5	35.7	46.9
55	27.9	34.9	46.4
60	27.9	34.9	46.4
65	27.7	34.9	46.5
70	27.7	34.7	46.6
75	27.5	34.5	46.6
80	27.5	34.4	46.7
85	27.4	34.4	47
90	27.4	34.4	47.2
95	27.7	34.4	47.7
100	27.5	34.2	48.2
105	27.6	34.3	48.4
110	27.7	34.2	48.5
115	27.9	34.3	49.3
120	28.1	34.3	49.6
125	28.2	34.4	50.3
130	28.3	34.3	50.7
135	28.1	34.1	51
140	28.3	34.2	51.6
145	28.2	34.1	51.9
150	28.4	34.1	52.3
155	28.4	34.2	53
160	28.4	34.1	53.4
165	28.4	34.3	53.9
170	28.3	34.2	54.2
175	28.3	34.3	54.7
180	28.4	34.4	55.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 เม็ดวัสดุพรมขนาด 16 มม. ที่อากาศเกินพอ 40%

time rate	T1	T2	T3
0	27.8	30.41	32
5	27.5	30.4	33.5
10	27.5	33.3	42.2
15	27.5	33.5	42.9
20	28.3	39.8	43.2
25	28.7	41.5	52.3
30	29	44.2	60.7
35	28.9	43.8	62.1
40	28.9	56.8	73.3
45	28.9	60	75
50	28.9	61.9	83.2
55	28.6	57.8	82.7
60	29	67.4	81.2
65	29.7	64.4	90
70	29.6	72.7	96.2
75	29.4	69.8	97.2
80	30	68.9	98
85	30.1	71.8	102.2
90	29.9	66.8	108
95	29.9	66.8	108
100	29.7	73.5	119.2
105	29.4	64.8	116.5
110	28.7	67	112.7
115	28.3	63.1	111.8
120	28.5	63.9	112.1
125	28	59.5	111.6
130	28	57.3	111.3
135	28	53.7	110.4
140	28	52.7	117.5
145	28	49.9	116
150	27.9	58.9	124.4
155	27.6	52.2	119.7
160	27.5	85.5	124.5
165	27.6	76.2	126.9
170	27.8	99	140.3
175	28.7	92.6	135.9
180	29.1	128.8	142.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 เม็ดวัสดุพรมขนาด 16 มม. ที่อากาศเกินพอ 60%

time rate	T1	T2	T3
10	34.2	38.1	38
15	33.3	37.7	38
20	32.3	37.2	38.2
25	32	37.2	38.3
30	31.7	36.9	38.5
35	31.4	36.7	38.6
40	31.2	36.9	38.7
45	31	36.7	39.9
50	30.9	36.6	39.3
55	30.7	36.4	39.4
60	30.6	36.5	39.9
65	30.6	36.9	41
70	30.4	36.9	41.2
75	30.6	39.1	43.2
80	30.7	39.4	42.5
85	30.5	44.3	48
90	30.7	42.4	47.8
95	30.7	44.5	50.3
100	30.4	42.6	50.4
105	30.6	42	51.5
110	30.4	41.5	52.2
115	30.5	47.5	55.2
120	30.6	44.5	55.5
125	30.6	45.6	59.5
130	30.7	44.5	59.3
135	30.4	43.8	60.8
140	30.2	43.4	60.7
145	30.5	42.6	61.5
150	30.4	42.5	62.2
155	30.4	42	62.3
160	30.2	41.7	62.7
165	29.9	41	62.7
170	29.4	40.5	62.8
175	29.6	40.2	63.1
180	29.5	40.1	63.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 เม็ดวัสดุพูนขนาด 16 มม. ที่อากาศเกินพอ 80%

time rate	T1	T2	T3
0	27.6	30.1	38.3
5	27.4	42.4	54.7
10	30.7	47.3	55.5
15	31.2	56.2	62.5
20	30.9	74.9	83.9
25	30.6	82.6	88
30	34.3	88.9	88.9
35	33.5	100.7	93.7
40	32.7	100	95.1
45	32.2	97	99
50	32.4	101.4	103.1
55	32.5	110.8	108.1
60	32.5	118.6	111.4
65	32.2	124.8	118.1
70	32	118.2	121.6
75	31.7	120.4	127.4
80	31.7	121.2	132.7
85	31.4	121.3	137
90	31.2	116.8	144
95	32.2	113.7	148
100	31.7	101.9	153.8
105	31.7	101.9	153.8
110	31.4	96.9	153.5
115	31.1	94.4	155.9
120	30.2	87.9	156
125	30	88	159.4
130	29.7	81.6	157.1
135	29.6	77.5	157.2
140	28.9	72.7	158.2
145	28.8	70.7	155.9
150	28.8	66.7	156.2
155	28.6	63	155.2
160	28.6	60.4	157.1
165	28.4	57	156.7
170	28.6	54.5	168.2
175	28.2	52.1	163.7
180	28.2	51.2	162.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 เม็ดวัสดุพรมขนาด 16 มม. อากาศเกินพอที่ 100%

time rate	T1	T2	T3
0	29.9	30.4	32
5	396.8	44.5	29.7
10	585.4	51.7	39.4
15	610.2	54.8	49.8
20	-	-	-
25	-	-	-
30	-	-	-
35	-	-	-
40	-	-	-
45	-	-	-
50	-	-	-
55	-	-	-
60	-	-	-
65	-	-	-
70	-	-	-
75	-	-	-
80	-	-	-
85	-	-	-
90	-	-	-
95	-	-	-
100	-	-	-
105	-	-	-
110	-	-	-
115	-	-	-
120	-	-	-
125	-	-	-
130	-	-	-
135	-	-	-
140	-	-	-
145	-	-	-
150	-	-	-
155	-	-	-
160	-	-	-
165	-	-	-
170	-	-	-
175	-	-	-
180	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 เม็ดวัสดุพูนขนาด 10 มม. , อากาศเกินพอที่ 20 % , อัตราการไหล 63 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	30.7	28.4	28.2
5	30.7	28.3	28
10	30.6	28.3	28
15	30.5	28.2	28
20	30.6	28.6	28.3
25	30.5	28.8	28.5
30	30.5	29.1	28.9
35	30.4	29.3	29.2
40	30.4	29.6	29.5
45	30.2	29.9	30.1
50	30.2	30.1	30.7
55	30.1	30.2	31.1
60	30.2	30.4	31.8
65	30.1	30.6	32.4
70	30.2	30.7	33.1
75	30.1	30.9	33.6
80	29.9	30.9	34.2
85	30.1	31	34.9
90	30	31.2	35.5
95	29.9	31.2	35.9
100	29.7	31	36.4
105	29.7	31	37.1
110	29.7	31.1	37.7
115	29.6	31	38.2
120	29.5	30.9	38.4
125	29.5	31.1	38.9
130	29.4	31.1	39.3
135	29.5	31.1	39.6
140	29.3	30.9	39.7
145	29.4	31.1	40.1
150	29.3	30.9	40.4
155	29.2	30.9	40.7
160	29.4	31.31	41
165	29.2	30.9	41.2
170	29.1	30.9	41.2
175	29.2	30.9	41.6
180	28.9	30.4	41.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 เม็ดวัสดุพูนขนาด 10 มม. , อากาศกินพอที่ 40 % , อัตราการไหล 73.6 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	27.9	29	35.4
5	27.7	28.9	35.1
10	27.5	28.5	34
15	27.6	28.7	34
20	27.5	28.4	33.8
25	27.4	28.3	33.7
30	27.5	28.4	33.6
35	27.4	28.3	33.5
40	27.63	28.2	33.5
45	27.4	28.3	33.6
50	27.5	28.3	33.9
55	27.5	28.3	34
60	27.5	28.2	34.4
65	27.2	28	34.5
70	27.3	28	34.6
75	27.4	28	34.8
80	27.4	28	35
85	27.5	28.2	35.3
90	27	28.1	35.4
95	27.4	28.1	35.5
100	27.5	28.2	35.9
105	27.5	28.1	36.1
110	27.6	28.1	36.2
115	27.6	28.1	36.4
120	27.8	28.3	36.6
125	27.4	27.9	36.5
130	27.8	28.3	36.9
135	27.7	28	36.9
140	27.7	28.2	37.2
145	27.2	27.7	36.7
150	27.2	27.6	36.9
155	27.6	28	37.3
160	27.7	28	37.4
165	27.5	27.9	37.2
170	27.6	28	37.5
175	27.8	28.2	37.7
180	27.4	27.8	37.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 เม็ดวัสดุพูนขนาด 10 มม. , อากาศเกินพอที่ 60 % , อัตราการไหล 84 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	27.2	27.5	32.2
5	27	27.5	31.7
10	27.5	27.8	31.8
15	27.2	27.5	31.4
20	27.3	27.4	31.2
25	27.2	27.4	31.1
30	26.8	27	30.7
35	27	27.2	31
40	27	27.2	31.2
45	26.7	27.9	30.9
50	26.5	26.8	31.1
55	26.5	26.9	31.4
60	26.5	26.9	31.6
65	26.5	26.9	31.7
70	26.5	27	32
75	26.5	27	32
80	26.7	27.2	32.5
85	27	27.5	33
90	27.2	27.6	33.2
95	27.2	27.7	33.4
100	27.2	27.7	33.6
105	27.2	27.7	33.5
110	27.2	27.7	33.8
115	27.2	27.7	33.8
120	27.2	27.7	33.8
125	27.3	27.8	33.9
130	26.7	27	33.3
135	26.4	26.7	33
140	26.2	26.5	33
145	26.3	26.8	33.3
150	26.2	26.7	33.2
155	26.5	27	33.2
160	26.2	26.7	33.2
165	26.2	26.7	33.4
170	26.2	26.7	33.4
175	26.7	27.2	34
180	26.7	27.2	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9 เม็ดวัสดุพูนขนาด 10 มม. , อากาศเกินพอที่ 80 % , อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	29.2	30.7	39
5	30.4	30.7	41.4
10	30.7	31.7	39.9
15	30.7	33.5	38.9
20	30.6	33.8	38.2
25	30.5	34.3	37.4
30	30.9	34.9	37.5
35	30.7	34.7	36.9
40	31.1	34.5	36.7
45	30.9	34	36.4
50	31.1	33.7	36.4
55	31.1	33.5	36.4
60	31.2	33.2	36.4
65	31.4	32.8	36.7
70	31.4	32.7	37.1
75	30.9	32.2	36.9
80	30.7	31.7	36.7
85	30.7	31.6	37
90	30.6	31.5	37.1
95	30.9	31.6	37.5
100	30.9	31.5	37.7
105	31.1	31.6	38
110	31.4	31.8	39.6
115	30.3	31.1	40
120	30.6	30.9	41.5
125	31.1	31.2	40.4
130	30.7	30.9	39.9
135	30.7	30.9	39.6
140	31	31	39.7
145	31.4	31.4	40.1
150	31.4	31.2	40.1
155	31.1	31	39.9
160	31.1	31.9	40.4
165	31	30.9	39.7
170	31.1	30.9	39.5
175	31	31.9	39.3
180	31	31.8	39.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 10 เม็ดวัสดุพรมขนาด 10 มม. , อากาศเกินพอที่ 100 % , อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	29.2	29.4	31.1
5	28.8	29.1	30.9
10	28.8	28.9	30.7
15	28.5	28.9	30.6
20	40.4	30.2	31.8
25	38	32.7	31.5
30	34.7	37.3	31.4
35	32.58	41.4	31.4
40	31.4	44.2	31.6
45	31.5	42.2	31.5
50	31.4	47.2	36
55	30.7	47.9	35.6
60	30.1	47.8	35.9
65	29.7	46.6	36.4
70	29.3	45	37.4
75	29	45.2	38.8
80	28.9	41.3	40.4
85	28.8	39.5	42.1
90	28.7	38	44.2
95	28.7	36.5	46.9
100	28.6	35.4	49.4
105	28.5	34	52.2
110	28.5	33.1	55
115	28.5	32.7	57.3
120	28.5	31.8	60.6
125	28.4	31.4	63.6
130	28.6	31.1	67.3
135	28.5	30.6	70.4
140	28.5	30.4	73.6
145	28.4	29.9	76.7
150	28.5	29.8	88
155	28.5	30.7	86.5
160	29.2	30.4	98.7
165	29.2	30.5	103.6
170	28.9	30.9	110.6
175	30.5	32	119.4
180	30.4	32.5	129.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11 เม็ดวัสดุพรมขนาด 6 มม. ,ที่อากาศเกินพอที่ 20%, อัตราการไหล 63 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	29.7	31	33.6
5	28.1	31.4	33.8
10	27.2	31.7	33.3
15	26.9	31.7	33.2
20	26.4	31.4	33.1
25	26.4	30.9	33.2
30	26	30.4	33.5
35	25.9	29.9	33.6
40	25.7	29.4	33.7
45	25.6	29	34
50	25.4	28.5	34.2
55	25.2	27.9	34.3
60	25	27.5	34.4
65	25.2	27.5	34.9
70	25.2	27.2	34.9
75	25.2	26.9	35
80	25.2	26.8	35.2
85	25.2	26.7	35.3
90	25.2	26.5	35.3
95	25.2	26.3	35.3
100	25.2	26.2	35.4
105	25.1	26.1	35.3
110	25.1	25.9	35.3
115	25.1	25.9	35.1
120	25.1	25.9	35.3
125	25.2	25.9	35.3
130	25.2	25.7	35.2
135	25.2	25.7	35.1
140	25.2	25.7	35.2
145	25.4	25.9	35.3
150	25.2	25.6	34.9
155	25.1	25.4	34.7
160	25	25.2	34.4
165	25.1	25.4	34.5
170	25.1	25.4	34.5
175	25.4	25.6	34.8
180	25.6	25.7	34.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 12 เม็ดวัสดุพูนขนาด 6 มม. , ที่อากาศเกินพอที่ 40% , อัตราการไหล 73.6 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	25	25	30.4
5	24.8	24.8	29.8
10	24.7	24.7	29.2
15	24.7	24.7	28.9
20	24.7	24.7	28.6
25	24.6	24.6	28.6
30	24.8	24.8	28.8
35	24.8	24.8	28.9
40	24.8	24.7	28.9
45	24.6	24.6	29
50	24.7	24.7	29.2
55	24.9	24.8	29.5
60	24.8	24.6	29.6
65	24.9	24.9	29.9
70	25.4	25.4	30.4
75	25.6	25.6	30.7
80	25.7	25.7	31.1
85	25.7	25.7	31.2
90	25.9	25.9	31.4
95	25.9	25.9	31.5
100	26	25.9	31.7
105	26	25.9	31.7
110	25.7	25.58	31.7
115	24.9	25.6	30.9
120	25	25.6	31.1
125	24.9	25.7	31.2
130	25.2	25.9	31.5
135	25.7	25.4	32
140	25.9	25.4	32
145	26.1	25.5	32.3
150	26.2	25.6	32.4
155	26.5	25.9	32.7
160	26.6	26	33
165	-	-	-
170	-	-	-
175	-	-	-
180	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 13 เมื่ควัดสุพรรณขนาด 6 มม. ที่อากาศเกินพอที่ 60% , อัตราการไหล 84 ลิตร่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	29.3	29.8	36.2
5	29.5	29.9	35.9
10	29.6	29.9	35.4
15	29.7	29.9	35
20	29.5	29.7	34.4
25	29.6	29.7	34.2
30	29.6	29.7	34
35	29.6	29.6	33.8
40	29.6	29.5	33.5
45	29.7	29.6	33.5
50	29.6	29.5	33.3
55	29.4	29.4	33.1
60	29	29	32.7
65	29.3	29.3	33
70	29.4	29.4	33.1
75	29.3	29.2	33.1
80	29.4	29.4	33.2
85	29.3	29.3	33.2
90	29.4	29.4	33.5
95	29.3	29.3	33.5
100	29.3	29.4	33.5
105	29.2	29.3	33.6
110	29.1	29.4	33.6
115	29	29.3	33.7
120	29.1	29.4	33.9
125	28.9	29.3	34
130	29.3	29.7	34.4
135	28.9	29.4	34
140	28.7	29.2	34.2
145	28.7	29.2	34.4
150	28.7	29.3	34.5
155	28.6	29.2	34.6
160	28.6	29.4	34.9
165	28.5	29.2	35
170	28.5	29.2	35
175	28.5	29	35.3
180	28.3	28.9	35.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 14 เม็ดวัสดุพูนขนาด 6 มม. , อากาศเกินพอที่ 80% , อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	27.3	27.7	29.6
5	27.4	27.9	29.9
10	27.4	27.8	29.8
15	27.3	27.7	29.8
20	27.3	27.7	29.9
25	27.2	27.6	29.9
30	27.2	27.8	30.1
35	27.2	27.7	30.2
40	27.3	27.8	30.4
45	27.3	28	30.7
50	27.5	28	31.2
55	27.5	28	31.2
60	27.4	28	31.5
65	27.3	28	31.6
70	27.3	27.9	31.6
75	27.2	27.8	31.9
80	27.2	27.7	31.9
85	27.2	27.8	32.2
90	27.2	27.6	32.2
95	27	27.5	32.5
100	27.2	27.6	32.5
105	27.2	27.5	32.5
110	27.2	27.5	32.5
115	27.2	27.5	32.7
120	27.2	27.5	32.7
125	27.2	27.4	32.5
130	27.2	27.4	32.5
135	27	27.2	32.7
140	27	27.2	32.7
145	26.8	27	32.5
150	26.9	27	32.7
155	26.9	27	32.7
160	26.9	27	32.7
165	26.9	27	32.7
170	26.9	27	32.7
175	26.8	27	32.5
180	26.8	27	32.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 15 เม็ดวัสดุพรมขนาด 6 มม. , อากาศเกินพอที่ 100% , อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	26.5	26.7	27.8
5	26.5	26.7	28
10	26.5	26.7	27.8
15	26.5	26.7	27.9
20	26.3	26.3	27.7
25	26.5	26.5	27.9
30	26.3	26.3	27.8
35	26.3	26.3	28
40	26.3	26.2	28
45	26.3	26.2	28.2
50	26.1	26.2	28.4
55	25.9	26	28.3
60	25.9	25.9	28.6
65	25.9	25.9	28.9
70	25.7	25.9	29.1
75	25.9	25.9	29.4
80	25.9	25.9	29.6
85	25.6	25.7	29.8
90	25.9	26	30.1
95	25.9	26	30.9
100	25.9	26	30.7
105	25.7	25.7	30.9
110	25.9	25.9	31.4
115	25.7	25.9	31.7
120	25.7	25.7	32
125	25.7	25.7	32.2
130	25.7	25.7	32.7
135	25.7	25.7	33
140	25.7	25.7	33.5
145	25.7	25.7	33.7
150	25.6	25.6	33.9
155	25.6	25.6	34.5
160	25.6	25.6	35
165	25.5	25.6	35.4
170	25.7	25.9	35.7
175	25.5	25.7	36.2
180	25.4	25.6	36.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 16 เม็ดวัสดุพูนขนาด 20 มม. , อากาศเกินพอที่ 80 % , อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	31	30	31
5	58	39	34
10	73	47	35
15	133	51	40
20	174	60	40
25	250	73	44
30	362	95	50
35	371	113	55
40	388	139	61
45	401	165	68
50	489	194	75
55	563	229	85
60	603	254	94

ตารางที่ 17 เม็ดวัสดุพูนขนาด 20 มม. , อากาศเกินพอที่ 100 % , อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	37	41	39
5	117	49	41
10	164	50	45
15	233	58	48
20	320	78	52
25	396	103	53
30	473	136	53
35	539	172	56
40	620	231	66
45	652	255	70
50	694	298	81
55	728	341	95
60	756	383	110

ตารางที่ 18 เม็ดวัสดุพูนขนาด 20 มม. , อากาศเกินพอที่ 110 % , อัตราการไหล 111.5 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	44	35	33
5	362	49	29
10	443	57	38
15	477	67	48
20	554	90	53
25	598	162	54
30	675	208	54
35	735	257	55
40	783	308	56
45	824	355	61
50	846	402	73
55	861	446	88
60	873	485	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 19 เม็ดวัสดุพูนขนาด 25 มม. , อากาศเกินพอที่ 80 % , อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	33	32	31
5	127	45	33
10	377	55	40
15	411	74	48
20	463	99	51
25	526	130	54
30	589	166	55
35	627	205	64
40	661	244	81
45	695	283	96
50	723	327	114
55	754	360	130
60	781	395	148

ตารางที่ 20 เม็ดวัสดุพูนขนาด 25 มม. , อากาศเกินพอที่ 100 % , อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	46	28	27
5	201	55	34
10	284	68	47
15	293	109	41
20	325	136	48
25	402	173	52
30	470	214	54
35	530	257	59
40	586	302	70
45	638	348	87
50	680	393	100
55	716	436	116
60	745	473	131

ตารางที่ 21 เม็ดวัสดุพูนขนาด 25 มม. , อากาศเกินพอที่ 110 % , อัตราการไหล 111.5 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	91	32	32
5	141	36	37
10	193	46	35
15	261	57	43
20	325	81	49
25	377	168	49
30	-	-	-
35	-	-	-
40	-	-	-
45	-	-	-
50	-	-	-
55	-	-	-
60	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 22 เม็ดวัสดุพูนขนาด 30 มม. , อากาศเกินพอที่ 80 % , อัตราการไหล 93 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	38	38	30
5	113	52	35
10	219	77	45
15	315	108	53
20	376	140	56
25	436	180	58
30	486	223	67
35	530	263	76
40	571	306	87
45	605	345	99
50	637	383	114
55	663	418	129
60	690	451	146

ตารางที่ 23 เม็ดวัสดุพูนขนาด 30 มม. , อากาศเกินพอที่ 100 % , อัตราการไหล 105.16 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	41	43	43
5	153	60	45
10	276	92	53
15	367	119	55
20	441	155	57
25	509	195	62
30	573	242	69
35	621	286	79
40	663	334	93
45	696	379	110
50	727	419	129
55	746	450	141
60	765	483	160

ตารางที่ 24 เม็ดวัสดุพูนขนาด 30 มม. , อากาศเกินพอที่ 110 % , อัตราการไหล 111.5 ลิตรต่อนาที

time rate	T1	T2	T3
0	28	28	27
5	176	45	36
10	236	59	43
15	375	65	55
20	374	93	58
25	490	142	70
30	546	168	79
35	602	203	103
40	650	238	122
45	689	277	145
50	723	315	168
55	764	358	196
60	794	401	225

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 26 ที่อากาศเกินพอที่ 80% , ที่บริเวณอุณหภูมิต₁

time rate	20mm	25mm	30mm
0	31	33	38
5	58	127	113
10	73	377	219
15	133	411	315
20	174	463	376
25	250	526	436
30	362	589	486
35	371	627	530
40	388	661	571
45	401	695	605
50	489	723	637
55	563	754	663
60	603	781	690

ตารางที่ 27 ที่อากาศเกินพอที่ 80% , ที่บริเวณอุณหภูมิต₂

time rate	20mm	25mm	30mm
0	30	32	38
5	39	45	52
10	47	55	77
15	51	74	108
20	60	99	140
25	73	130	180
30	95	166	223
35	113	205	263
40	139	244	306
45	165	283	345
50	194	327	383
55	229	360	418
60	254	395	451

ตารางที่ 28 ที่อากาศเกินพอที่ 80% , ที่บริเวณอุณหภูมิต₃

time rate	20mm	25mm	30mm
0	31	31	30
5	34	33	35
10	35	40	45
15	40	48	53
20	40	51	56
25	44	54	58
30	50	55	67
35	55	64	76
40	61	81	87
45	68	96	99
50	75	114	114
55	85	130	129
60	94	148	146

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 29 ที่อากาศเกินพอที่ 100% , ที่บริเวณอุณหภูมิต₁

time rate	20mm	25mm	30mm
0	37	46	41
5	117	201	153
10	164	284	276
15	233	293	367
20	320	325	441
25	396	402	509
30	473	470	573
35	539	530	621
40	620	586	663
45	652	638	696
50	694	680	727
55	728	716	746
60	756	745	765

ตารางที่ 30 ที่อากาศเกินพอที่ 100% , ที่บริเวณอุณหภูมิต₂

time rate	20mm	25mm	30mm
0	41	28	43
5	49	55	60
10	50	68	92
15	58	109	119
20	78	136	155
25	103	173	195
30	136	214	242
35	172	257	286
40	231	302	334
45	255	348	379
50	298	393	419
55	341	436	450
60	383	473	483

ตารางที่ 31 ที่อากาศเกินพอที่ 100% , ที่บริเวณอุณหภูมิต₃

time rate	20mm	25mm	30mm
0	39	27	43
5	41	34	45
10	45	47	53
15	48	41	55
20	52	48	57
25	53	52	62
30	53	54	69
35	56	59	79
40	66	70	93
45	70	87	110
50	81	100	129
55	95	116	141
60	110	131	160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 32 ที่อากาศเกินพอที่ 110% , ที่บริเวณอุณหภูมิต₁

time rate	20mm	25mm	30mm
0	44	91	28
5	362	141	176
10	443	193	236
15	477	261	375
20	554	325	374
25	598	377	490
30	675	-	546
35	735	-	602
40	783	-	650
45	824	-	689
50	846	-	723
55	861	-	764
60	873	-	794

ตารางที่ 33 ที่อากาศเกินพอที่ 110% , ที่บริเวณอุณหภูมิต₂

time rate	20mm	25mm	30mm
0	35	32	28
5	49	36	45
10	57	46	59
15	67	57	65
20	90	81	93
25	162	168	142
30	208	-	168
35	257	-	203
40	308	-	238
45	355	-	277
50	402	-	315
55	446	-	358
60	485	-	401

ตารางที่ 34 ที่อากาศเกินพอที่ 110% , ที่บริเวณอุณหภูมิต₃

time rate	20mm	25mm	30mm
0	33	32	27
5	29	37	36
10	38	35	43
15	48	43	55
20	53	49	58
25	54	49	70
30	54	-	79
35	55	-	103
40	56	-	122
45	61	-	145
50	73	-	168
55	88	-	196
60	105	-	225

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของเตาวัสดุพรุน (Education of the dynamic behavior for porous media burner)

ประทีป ยางสันเทียะ¹, อุทิศ ศรีพุ่ม¹, จักรพันธ์ ชัชวาล¹

.....
รศ.ดร.จากรวัตร เจริญสุข²

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของเตาวัสดุพรุนโดยใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ โดยทำการศึกษาถึงขนาดของวัสดุพรุนที่สามารถประพฤติดำเนินตัวป้องกันไฟได้และศึกษาขนาดของวัสดุพรุนที่สามารถรักษาเปลวไฟให้สามารถเผาไหม้ภายในวัสดุพรุนได้ โดยที่จะทำการทดลองเมื่อดำเนินวัสดุพรุนทั้งหมด 6 ขนาด ได้แก่ ขนาด 6 มม. , 10 มม. , 16 มม. , 20 มม. , 25 มม. และ 30 มม. จากการทดลองพบว่า วัสดุพรุนที่ขนาด 6 มม. และ 10 มม. สามารถป้องกันเปลวไฟย้อนกลับได้ดี เนื่องจากการทดลองพบว่าที่เมื่อดำเนินวัสดุพรุนขนาดดังกล่าว มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างมากในทุกเงื่อนไขการทดลอง เกิดจากเมื่อดำเนินวัสดุพรุนมีขนาดเล็กจึงทำให้ช่องว่างระหว่างวัสดุพรุนน้อยตามไปด้วย ดังนั้นการเผาไหม้ในเมื่อดำเนินวัสดุพรุนจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้ และจากการทดลองพบว่าขนาดของเมื่อดำเนินวัสดุพรุนที่สามารถรักษาเปลวไฟให้สามารถติดอยู่ในเมื่อดำเนินวัสดุพรุนได้ คือ ที่เมื่อดำเนินวัสดุพรุนขนาดตั้งแต่ 20 มม. ขึ้นไป จากการทดลองสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อดำเนินวัสดุพรุนขนาด 20 มม. , 25 มม. และ 30 มม. มีแนวโน้มของอุณหภูมิคงตัวตลอดช่วงเวลาที่ทำการศึกษา ณ ตำแหน่ง T_1 และ T_2

Abstract

This study investigated the dynamic behavior of porous burner using LPG gas as fuel. Tests were carried out in order to find the suitable size of the media to be used in the oven which can protect flashback and to find the suitable size that is able to preserve a high temperature zone inside the porous region.

In case study, the alumina sphere of various sizes, ranging from 6, 10, 16, 20 and 30 mm. were used. From the test it was found that the size of spherical alumina of 6 and 10 mm. could protect flashback as it prevent the combustion from taking place in a small cavity of porous media. However, for the size greater than 20 mm., combustion is quite stable inside the porous zone, because of the temperature increase with time during the period of study at T_1 and T_2 .

Keywords:

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆภายในประเทศไทยเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้พลังงานที่ใช้กันอยู่เริ่มลดน้อยลง จึงทำให้หลายๆหน่วยงานทั้งทางภาครัฐและภาคเอกชนได้พยายามแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการอนุรักษ์การใช้พลังงานทดแทนมากขึ้น เช่นการพยายามใช้แหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศ ได้แก่ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานลม พลังงานคลื่นและพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น นอกจากนี้รูปแบบของพลังงานทดแทนที่กล่าวมานี้แล้วนั้น ยังมีเทคโนโลยีอีกด้านหนึ่งซึ่งเป็นพลังงานทดแทนอีกทางเลือกหนึ่งที่มีแนวโน้มที่จะมีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ในอีกไม่กี่ปีข้างหน้า นั่นคือ เทคโนโลยีด้านเซลล์เชื้อเพลิง โดยข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยมและเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่สำหรับอนาคต ก็คือ เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมน้อย ลดการเกิดก๊าซที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น คาร์บอนมอนนอกไซด์ ซัลเฟอร์ออกไซด์ และไนโตรเจนออกไซด์ ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาระบบของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้สามารถผลิตพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ด้วยการติดตั้ง reformer เข้าไปในระบบเพื่อช่วยในการอุ่นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนก่อนเข้าทำปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยแหล่งพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับ reformer ได้มาจากการติดตั้งเตาเผาไหม้เพิ่มเข้าไปในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

¹ นักศึกษาคณะวิศวกรรมเครื่องกล สจล., ห้อง 3Q รหัส 48015380, 48015453 และ 48015722 ตามลำดับ

² รองศาสตราจารย์ดอกเตอร์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร. 0 2326 4197

สัญลักษณ์			
m	มวล	r_i	รัศมีภายในเตา
C	ค่าความร้อนจำเพาะ	r_o	รัศมีภายนอกเตา
ΔT	ความแตกต่างของอุณหภูมิ	l	ความสูงของห้องเผาไหม้
q	อัตราการไหล	k	ค่าคงที่วัสดุ

ซึ่งรูปแบบของการติดตั้งทั้ง reformer และ เตาเผาไหม้ เข้าไปในระบบของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น ทำได้โดยการติดตั้ง reformer ไว้ภายในเตาเผาไหม้หรือติดตั้งไว้ภายนอกเตาเผาไหม้ก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม ขึ้นอยู่กับสมรรถนะของเตาเผาไหม้ที่ทำได้ โดยเตาเผาไหม้ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปส่วนใหญ่เป็นเตาเผาไหม้ประเภท free flame ซึ่งข้อเสียของเตาเผาไหม้จำพวกนี้คือผลิตพลังงานความร้อนได้ไม่เสถียร (เกิดการแกว่งของอุณหภูมิสูง) การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงส่งผลต่อสมรรถนะของเตาเผาไหม้อย่างมาก อีกทั้งยังมีอัตราการเกิดมลพิษสูงอีกด้วย ซึ่งจากข้อเสียดังกล่าวเมื่อนำเตาเผาไหม้มาติดตั้งเข้ากับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงแล้ว จะทำให้เกิด thermal stress กับ reformer ส่งผลอุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ โดยจากการศึกษาพบว่าทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาดังกล่าวได้คือการนำหัวเผาวัสดุพรุน (Porous media burner) มาติดตั้งเข้ากับระบบของเซลล์เชื้อเพลิงแทนเตาเผาไหม้เดิมที่ใช้กันอยู่ (Conventional combustor) ด้วยเหตุผลที่ว่าหัวเผาวัสดุพรุนนั้น มีการเผาไหม้ที่เสถียรคือการปรับเปลี่ยนสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อเตาเผาไหม้ อัตราการเกิดมลพิษต่ำและลดอัตราการแพร่ของอากาศเข้าสู่เชื้อเพลิง ซึ่งช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงเกิดขึ้นช้าลงได้นอกจากนี้ด้วยคุณลักษณะเด่นของวัสดุพรุน คือ ถ่ายเทความร้อนทั้งการนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเข้าไว้ด้วยกัน ช่วยทำให้การเผาไหม้เกิดได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น โดยหัวเผาวัสดุพรุนที่มีข้ออยู่ในขณะนี้มียูด้วยกันสองรูปแบบ คือ หัวเผาวัสดุพรุนแบบ single stage และแบบ multi-stage ดังนั้นโครงการนี้ จะเน้นด้านการพัฒนาหัวเผาวัสดุพรุนแบบ single-stage โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะและพฤติกรรมของหัวเผาชนิดนี้ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่อง โดยมีการศึกษาเตาเผาวัสดุพรุนของนาย อวรุณวิรัตน์กุล ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าการการศึกษาจากเตาเผาวัสดุพรุนแบบ single stage ซึ่งได้ผลการทดลองว่าจะไม่สามารถควบคุมปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นตามระดับความสูง

ของเตาได้และจะทำให้มีผลเสียต่อชุด reformer จากที่กล่าวมาจึงได้นำผลที่ได้มาศึกษาพัฒนาหัวเผาวัสดุพรุนแบบ single อีกทั้งจากการศึกษาข้อมูลในงานวิจัยที่ผ่านมาของ [16]ก่อให้เกิดแนวคิดในการ ทดลองหาพฤติกรรมของเม็ดวัสดุพรุนที่จะสามารถรักษาเปลวไฟให้เกิดการเผาไหม้ภายในเม็ดวัสดุ และสามารถประพฤติตัวเป็นตัวป้องกันไฟไหม้ย้อนกลับได้ เพื่อนำไปใช้ภายในระบบของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

2. วัตถุประสงค์

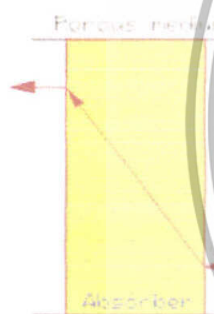
1. เพื่อทำการศึกษาลักษณะของวัสดุพรุนที่สามารถประพฤติตัวเป็นตัวป้องกันไฟไหม้ได้
2. เพื่อศึกษาลักษณะของวัสดุพรุนที่สามารถรักษาเปลวไฟให้สามารถเผาไหม้ภายในหัวเผาวัสดุพรุนได้
3. ขอบเขตการทำงาน
 1. ศึกษาอิทธิพลของขนาดของเม็ดวัสดุพรุนที่มีผลกระทบต่ออัตราการเผาไหม้ภายในหัวเผาวัสดุพรุน
 2. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณอากาศส่วนเกิน ที่มีผลกระทบต่ออัตราการเผาไหม้ภายในหัวเผาวัสดุพรุน
 3. ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K วัดอุณหภูมิตามความสูงในระดับต่างๆของห้องเผาไหม้
4. หลักการทำงานของอุปกรณ์เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ LPG โดยในการทดลองจะใช้ก๊าซหุงต้มของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย 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
5. หลักการทำงานของวัสดุพรุน

วัสดุพรุนเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงและทนต่อสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงๆได้ คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุพรุนคือ สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาระหว่างเอนทัลปีของแก๊ส เนื่องจากวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พรุนมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมาก (Surface Area to Volume Ratio) ดังนั้นในการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จึงถือได้ว่าวัสดุพรุนเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีหลักการดังนี้คือ เมื่อมีอากาศไหลผ่านวัสดุพรุนดังแสดงในรูปที่ 1 วัสดุพรุนจะทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนเอนทาลปีของอากาศร้อนเอาไว้ส่วนหนึ่ง แล้วเปลี่ยนพลังงานส่วนที่ดูดกลืนมานี้ไปเป็นการแผ่รังสีความร้อนซึ่งเรียกลักษณะเช่นนี้ว่าเป็นตัวแผ่รังสี แผ่รังสีมายังวัสดุพรุนอีกด้านหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสี ดังนั้นอากาศร้อนที่ไหลผ่านตัวแผ่รังสีจะมีอุณหภูมิลดลง และเมื่อเมื่อมีอากาศเย็นไหลผ่านตัวรับรังสีอากาศเย็นก็จะถูกความร้อนที่ดูดกลืนเอาไว้ทำให้อากาศมีค่าเอนทาลปีและอุณหภูมิสูงขึ้น จากหลักการดังกล่าวถ้านำตัวแผ่รังสีและตัวรับรังสีมาวางชิดกัน แล้วให้อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลผ่านตัวแผ่รังสีสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศเย็นที่ไหลผ่านตัวรับรังสี แล้วเอาอากาศเย็นที่ใช้ในการเผาไหม้ไหลผ่านวัสดุพรุนที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสี ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนจากไอเสียมาสู่อากาศเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยอาศัยวัสดุพรุนเป็นตัวกลาง หลักการทำงานทั่วไปจะแสดงดังรูป



รูปที่ 1. หลักการทำงานของวัสดุพรุน

6. โครงสร้างและหลักการทำงานของเตาวัสดุพรุน

ชุดทดสอบแสดงพฤติกรรมเผาไหม้ โดยใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง ภายนอกเตาเลือกใช้วัสดุ Stainless steel ทำการตัดและตัดขึ้นรูป มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 220 มม. และสูง 500 มม. เป็นส่วนของห้องเผาไหม้พร้อมทั้งถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน พร้อมทั้งทำการหล่อด้วยพลาสติกทนไฟ และที่ห้องผสม (Mixing Zone) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มม. สูงเท่ากับ 52 มม. ประกอบอยู่ที่ด้านล่างของชุดทดสอบ ซึ่งในการทดสอบจะแบ่งอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็นสามส่วน โดยจ่ายอากาศเข้าหัวเผาในส่วนที่หนึ่งที่บริเวณตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง (Fuel distributor) และส่วนที่สองที่ระดับความสูง 250 มม. จากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง ส่วนการป้อนเชื้อเพลิงเข้าหัวเผาจะใช้หัวฉีดเป็นอุปกรณ์ในการป้อนเชื้อเพลิง

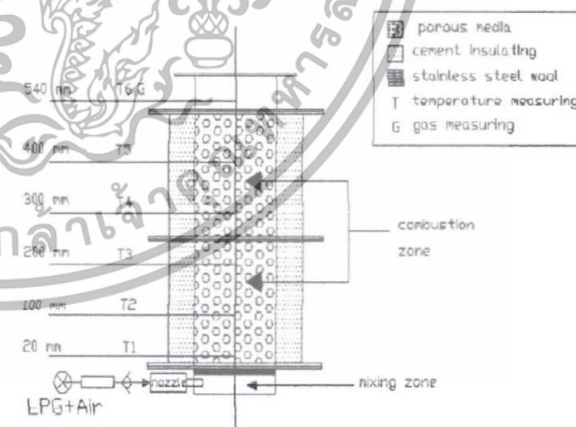
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตาวัสดุพรุนที่มีการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนได้โดยใช้หลักการหมุนเวียนพลังงานในระบบด้วยการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพรุนนั้น เชื้อเพลิงจะถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนเกิดการเผาไหม้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ความร้อนส่วนหนึ่งของเปลวไฟและไอเสียที่ถูกดูดซับ (Absorb) โดยวัสดุพรุน ขณะเดียวกันวัสดุพรุนก็ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสี (Emitter) ความร้อนไปในบริเวณ Upstream ที่อากาศและเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้ามา ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุพรุน หลักการดังกล่าวนี้เป็นการส่งเสริมการเผาไหม้ ของอากาศและเชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้การเผาไหม้แบบ Self-sustaining Combustion เกิดขึ้นได้ และมีอุณหภูมิเปลวไฟสูง เมื่อมีการติดตั้งวัสดุพรุนในเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงจะเห็นได้ว่ามีกลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างสถานะต่างๆเกิดขึ้นหลายรูปแบบ

ซึ่งการออกแบบเตาวัสดุพรุนนั้นได้ออกแบบมาให้สามารถทำอุณหภูมิได้ 900 องศาเซลเซียส การออกแบบเตาวัสดุพรุนนี้ได้คำนึงถึงหลักการถ่ายเทความร้อนตามทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อน

$$q = \frac{2\pi k l \Delta T}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}$$

เมื่อ r_o รัศมีภายนอกเตา
 r_i รัศมีภายในเตา
 โดยที่ค่า q จะเท่ากับค่า $q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$



รูปที่ 2. แสดงลักษณะชุดเตาวัสดุพรุน

7. วิธีการทดลอง

จากรูปที่ 2 แสดงชุดการทดสอบพฤติกรรมทางพลวัตของวัสดุพรุน โดยใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง โดยหัวเผาวัสดุพรุนนี้ถูกสร้างขึ้นให้มีการเผาไหม้แบบ Premixed ซึ่งมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหัวเผาประมาณ 20 ซม. สูง 50 ซม. โดยจะมีส่วนล่างเป็น

ห้องผสม (Mixing Zone) ผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ส่วนด้านบนเป็นห้องเผาไหม้มีระยะความสูง 50 ซม. ซึ่งจากการทดสอบจะทำการจ่ายอากาศเพื่อการเผาไหม้จากด้านล่าง เตาเผาวัสดุฟืน โดยมีการผสมกันของอากาศกับเชื้อเพลิงผ่านท่อผสมและเข้ามายังห้องผสม (Mixing Zone) และไหลผ่านบริเวณตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง(Fuel distributor) จนกระทั่งไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในที่สุด ซึ่งการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

7.1 การศึกษาถึงขนาดของวัสดุฟืนที่สามารถประพฤติตัวเป็นตัวป้องกันไฟได้ดี

โดยทำการทดลองที่เม็ดวัสดุฟืนขนาด 6 ม.ม. , 10 ม.ม., และ 16 ม.ม. ซึ่งในการทดลองการปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนเกินมีลักษณะดังตารางที่ 1 ดังต่อไปนี้

Run No	Energy Input	ขนาดของ เม็ดวัสดุ ฟืน	อัตราการ ป้อน อากาศ	Flow meter ของ Air ลิตร/นาที
1	3 kw	6 mm	20%	63
			40%	73.6
			60%	84.1
			80%	94.6
			100%	105.1
2	3 kw	10mm	20%	63
			40%	73.6
			60%	84.1
			80%	94.6
			100%	105.1
3	3 kw	16mm	20%	63
			40%	73.6
			60%	84.1
			80%	94.6
			100%	105.1

ตารางที่ 1. แสดงย่านการทดลองของเม็ดวัสดุฟืนขนาด 6, 10 และ 16 ม.ม.

7.2 ทำการศึกษาถึงขนาดของวัสดุฟืนที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ภายในวัสดุฟืนได้ดี

โดยการทดลองเมื่ออากาศกับเชื้อเพลิงผสมกันผ่านท่อผสมและเข้ามายังห้องผสม (Mixing Zone) และไหลผ่านบริเวณตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง(Fuel distributor) และผ่านเม็ดวัสดุฟืนที่มีขนาด 6 ม.ม. ซึ่งเป็นตัวดำเนินการเกิดเปลวไฟ ย้อนเข้าไปติดในห้องผสมโดยจะใส่ไว้สูงประมาณ 5 ซม. เมื่อวัดจากตะแกรงกระจายเชื้อเพลิง โดยจะใช้เม็ดวัสดุฟืนขนาด 20 , 25 และ 30 ม.ม. เป็นตัวกลางในการเผาไหม้

ซึ่งในการทดลองการปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนเกินมีลักษณะดังตาราง 2 ดังต่อไปนี้

Run No	Energy Input	ขนาดของ เม็ดวัสดุ ฟืน	อัตราการ ป้อน อากาศ	Flow meter ของ Air ลิตร/นาที
1	3 kw	20mm	80%	94.6
			100%	105.1
			110%	111.5
2	3 kw	25mm	80%	94.6
			100%	105.1
			110%	114.5
3	3 kw	30mm	80%	94.6
			100%	105.1
			110%	111.5

ตารางที่ 2. แสดงย่านการทดลองของเม็ดวัสดุฟืนขนาด 20 , 25 และ 30 ม.ม.

โดยใช้ปริมาณเป็นตัวต้นกำลังในการทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศและใช้ Flow meter เป็นอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอัตราการไหลของอากาศและในการควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจะได้ Flow meter เป็นอุปกรณ์ในการควบคุมอัตราการไหลเช่นเดียวกัน ส่วนในการบันทึกค่าอุณหภูมิจะบันทึกอุณหภูมิทั้งหมด 3 ระดับ ความสูงตั้งไว้ที่ 1 ทุก ๆ 5 นาที โดยใช้ Thermocouple type k และใช้ Data Logger เป็นอุปกรณ์ในการบันทึกผล

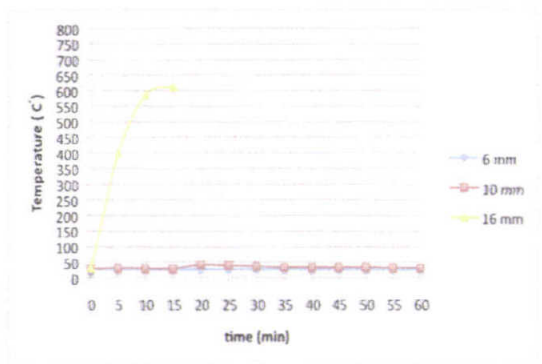
8. ผลการทดลอง

ในการบรรณาการทดลองของเม็ดวัสดุฟืนทุกขนาด ที่กรณีของอากาศส่วนเกินที่ต่างกันทำให้พบว่ขนาดของเม็ดวัสดุฟืนมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ โดยเม็ดของวัสดุฟืนที่มีขนาดเล็กจากกระบวนการทดลองพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เกิดขึ้นน้อยมากในทุกเงื่อนไขการทดลองและเม็ดวัสดุฟืนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การตอบสนองต่ออัตราการเผาไหม้ที่ทำได้ ส่งผลให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิมีค่าที่สูงวันตามไปด้วย

8.1 พฤติกรรมการประพฤติตัวเป็นตัวป้องกันไฟไหลย้อนกลับในเม็ดวัสดุฟืน

กระบวนการทดลองในโครงการวิจัยนี้เม็ดวัสดุฟืนที่นำมาทำการทดลองมีทั้งสิ้น 6 ขนาด จากเดิมที่ทำการทดลองที่ขนาด 6 ม.ม. 10 ม.ม. และ 16 ม.ม. แต่พฤติกรรมของเม็ดวัสดุฟืนทั้งสามขนาดมีอัตราการตอบสนองต่อการเผาไหม้ที่ไม่ดีนัก คือการเผาไหม้ภายในเม็ดวัสดุฟืนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในเม็ดวัสดุฟืนขนาด 6 ม.ม. และ 10 ม.ม. ซึ่งจัดเป็นเม็ดวัสดุฟืนที่มีขนาดค่อนข้างเล็ก แต่แรกกับพบพฤติกรรมต่อการตอบสนองต่อการเผาไหม้ที่ทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในเม็ดวัสดุฟืนขนาด 16 ม.ม. ที่อัตราอากาศส่วนเกินที่ 100% แต่ในระหว่างกระบวนการทดลองเกิดการย้อนกลับของเปลวไฟจากบริเวณภายในเม็ดวัสดุฟืนเข้ามาติดภายในห้องผสมของเชื้อเพลิงบริเวณด้านล่างของเตาเผาวัสดุฟืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3. อิทธิพลของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ออุณหภูมิ

จากรูปที่ 3. ที่วัสดุพุนขนาด 6 ม.ม. เมื่อเริ่มกระบวนการทดลอง การเผาไหม้จะเกิดขึ้นบริเวณเหนือเม็ดวัสดุพุนจึงทำให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่บริเวณ T_1 มีค่าน้อยมาก โดยอุณหภูมิเมื่อเริ่มการทดลองยังคงที่อยู่ จนกระทั่งถึงนาทีที่ 20 ค่าของอุณหภูมิมียังคงลดลง เป็นผลมาจากการพัดพาของมวลอากาศและเชื้อเพลิง และทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง

ที่วัสดุพุนขนาด 10 ม.ม. การเผาไหม้ยังคงเกิดขึ้นบริเวณเหนือเม็ดวัสดุพุน ทำให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิมิยังเกิดขึ้นภายในบริเวณ T_1 การพัดพาของมวลอากาศและเชื้อเพลิงยังคงส่งผลให้มีการลดของอุณหภูมิ อันจะเห็นได้จากอุณหภูมิเมื่อเริ่มกระบวนการทดลองมีค่า 29.2 องศาเซลเซียสลดลงเหลือ 28.8 องศาเซลเซียสและคงที่จนกระทั่งนาทีที่ 20 เกิดการเพิ่มขึ้นของเป็น 40.4 องศาเซลเซียส เหตุที่การเพิ่มของอุณหภูมิในช่วงเวลานี้จะเกิดจากการพัดพาความร้อนของดาวสดที่ยังคงตกค้างอยู่ภายในตามาสู่บริเวณ T_1 นี้ แต่สุดท้ายการพัดพาของมวลอากาศและเชื้อเพลิงก็ทำให้อุณหภูมิลดลงไปจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง

ที่วัสดุพุนขนาด 16 ม.ม. มีการเผาไหม้เกิดขึ้นภายในเม็ดวัสดุพุน จะไม่สามารถมองเห็นเปลวไฟจากภายนอกเนื่องจากเกิดการเผาไหม้ภายในเม็ดวัสดุ การเพิ่มของอุณหภูมิเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในบริเวณ T_1 ในช่วง 5 นาทีแรกซึ่งหลังจากเริ่มทำการทดลองอุณหภูมิมีค่าสูงถึง 396.8 องศาเซลเซียสและมีอุณหภูมิ 585.4 องศาเซลเซียสเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที แต่เนื่องจากบริเวณห้องผสมมีลักษณะร้อนจัดจนมีสีสีแดงอันเนื่องมาจากมีเปลวไฟลามเข้าไปติดในห้องผสมเชื้อเพลิง จึงเป็นสิ่งที่อันตรายและอาจทำให้ชุดทดลองเสียหาย จึงทำให้ต้องหยุดการทดลองนี้โดยที่อุณหภูมิสุดท้ายก่อนหยุดการทดลองคือ 610.2 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองในช่วงแรก สรุปได้ว่า เม็ดวัสดุ 6 ม.ม. และ 10 ม.ม. สามารถนำไปใช้ป้องกันเปลวไฟ

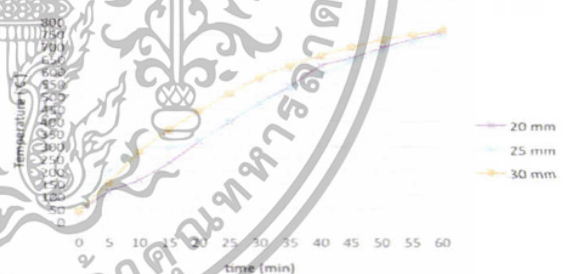
ย้อนกลับของเปลวไฟได้ โดยการทดลองต่อไปนี้ได้เลือกเม็ดขนาด 6 ม.ม.มาเป็นขั้นป้องกันการไหลย้อนกลับของเปลวไฟ

8.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้

จากการทดลองที่ผ่านมาทำให้สังเกตเห็นพฤติกรรมของวัสดุพุนมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดเม็ดวัสดุพุน เพื่อให้เกิดความกระจ่ายของพฤติกรรมดังกล่าว จึงได้มีการทดลองในเม็ดวัสดุพุนอีกสามขนาดในการทดลองต่อมาคือขนาด 20มม. 25 มม. และ 30 มม. และนำเอาสิ่งที่ได้จากการทดลองของเม็ดวัสดุพุนขนาด 6 ม.ม.และ 10 ม.ม. มาใช้คือข้อดีของเม็ดวัสดุพุนขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติไม่ก่อให้เกิดการติดไฟในตัววัสดุมาช่วยในการทดลองกับเม็ดวัสดุพุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อเป็นตัวป้องกันการย้อนกลับของเปลวไฟเข้าไปยังห้องผสม ด้วยการใช้เม็ดวัสดุพุนขนาด 6 ม.ม. ใส่ไว้บริเวณด้านทางออกของเชื้อเพลิงและอากาศคือบริเวณตะแกลงด้านล่างของเตา โดยใส่ไว้ให้สูงจากตะแกลงประมาณ 50 มม. ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถป้องกันการย้อนกลับของเปลวไฟได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถทำการทดลองเม็ดวัสดุพุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ทุกเงื่อนไขการทดลองจนกระทั่งบรรลุเป้าหมายโครงการวิจัยได้ในที่สุด

8.2.1 อิทธิพลของขนาดเม็ดวัสดุต่อการเผาไหม้

เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงอิทธิพลของขนาดเม็ดวัสดุพุนต่อพฤติกรรมการเผาไหม้และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเม็ดวัสดุพุน จึงได้เลือกเงื่อนไขการทดลองที่อัตราอากาศส่วนเกินที่ 300% ในบริเวณ T_1 ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ภายในวัสดุพุนมาแสดงให้เห็นพฤติกรรมเมื่อมีการปรับเปลี่ยนขนาดวัสดุพุน



รูปที่ 4. อิทธิพลของขนาดเม็ดวัสดุต่อการเผาไหม้

วัสดุขนาด 20 ม.ม. การเผาไหม้เกิดขึ้นภายในเม็ดวัสดุพุนเช่นเดียวกับเม็ดวัสดุพุนขนาด 16 ม.ม. แต่ไม่มีการลามเข้าไปติดในห้องผสมเชื้อเพลิงของเปลวไฟ อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิก็น้อยกว่าสูงอยู่ โดยกระบวนการนี้ได้มีการใช้เม็ดวัสดุพุนขนาด 6 ม.ม. ใส่ไว้บนตะแกลงของบริเวณปากทางของห้องผสมเชื้อเพลิงเพื่อป้องกันการลามเข้าไปติดในห้องผสมเชื้อเพลิงของเปลวไฟ

วัสดุขนาด 25 ม.ม. ยังคงใช้เม็ดวัสดุพุนขนาด 6 ม.ม.ในการป้องกันการย้อนกลับของเปลวไฟเช่นเดียวกัน โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าการเผาไหม้สามารถเกิดขึ้นภายในเม็ดวัสดุพุนได้ตั้งแต่เม็ดวัสดุพุนขนาด 20 ม.ม. เรื่อยมา เม็ดวัสดุพุนขนาด 25 ม.ม. ก็เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. รับผิดชอบการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อการทดลองดำเนินมาจนถึงช่วงนาทีที่ 10 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเกิดขึ้นลดน้อยลง ซึ่งสามารถดูได้จากกราฟแสดงผลในเส้นอุณหภูมิของวัสดุขนาด 25 มม. มีอัตราความชันที่ลดลง ปรากฏการณ์นี้อาจเกิดมาจากการพัดพาของมวลอากาศและเชื้อเพลิงทำให้เปลวไฟไม่สามารถรักษาเสถียรภาพเอาไว้ได้ชั่วขณะ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงมีค่าลดลงตามไปด้วยและเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งถึงนาทีที่ 20 ของการทดลอง อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก็มักสูงขึ้นและคงที่ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการทดลอง

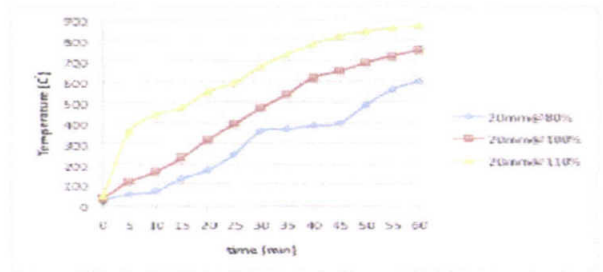
เมื่อดูวัสดุพุนขนาด 30 มม. การเผาไหม้เกิดขึ้นภายในเม็ดวัสดุพุนเช่นเดียวกัน ไร้อันบริเวณปากเตาเหนือเม็ดวัสดุไม่เกิดขึ้นให้เห็นแต่อย่างใด ในกระบวนการทดลองในช่วงเริ่มต้นสังเกตได้ว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิมีค่าที่น้อยกว่าเม็ดวัสดุพุนขนาด 25 มม. จนกระทั่งถึงนาทีที่ 10 สันนิษฐานได้ว่าเกิดจากขนาดของเม็ดวัสดุพุนมีขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลให้เกิดการขัดขวางการพัดพาของอากาศและเชื้อเพลิง ปฏิกิริยาการเผาไหม้จึงเกิดขึ้นในลักษณะไม่รุนแรงมากนักแต่เมื่อผ่านช่วงเวลานี้ไป อัตราการเพิ่มของปริมาตรความร้อนในเม็ดวัสดุพุนขนาด 30 มม. ก็มีค่าที่สูงขึ้น

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเม็ดวัสดุพุนขนาด 30 มม. การเพิ่มขึ้นโดยรวมมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นอย่างคงที่ อีกทั้งยังมีค่าความร้อนที่สูงที่สุด ในเงื่อนไขข้อตรวจอากาศส่วนเกิน 100% นี้อีกด้วย ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดกระบวนการทดลองที่ 766 องศาเซลเซียส

8.2.2 อิทธิพลของอัตราอากาศส่วนเกินต่อการเผาไหม้

จากกระบวนการทดลองในเงื่อนไขต่าง ๆ ทำให้ทราบว่าเมื่อที่ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ นั่นคืออัตราอากาศส่วนเกิน

ในที่นี้จะทำการอธิบายด้วยเงื่อนไขการทดลองของเม็ดวัสดุพุนขนาด 20 มม. ณ บริเวณ 7, ซึ่งเป็นบริเวณที่ห่างจากช่องทางออกของอากาศและเชื้อเพลิงเป็นระยะ 100 มม. รวมถึงเป็นบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ในเม็ดวัสดุพุน ทั้งหมดทุกเงื่อนไข อีกทั้งในกระบวนการทดลองมีการใช้วัสดุพุนขนาด 6 มม. วางลงบนบริเวณช่องทางออกของอากาศและเชื้อเพลิงเป็นระยะ 50 มม. เพื่อเป็นการป้องกันการป้อนกลับของเปลวไฟไปสู่บริเวณห้องเผาไหม้ โดยเงื่อนไขการทดลองที่นำมาแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอัตราอากาศส่วนเกินต่อการเผาไหม้และอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ คือ อัตราอากาศส่วนเกิน 80% , 100% และ 110% ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 4



รูปที่ 6. อิทธิพลของอัตราอากาศส่วนเกินต่อการเผาไหม้

ที่อัตราอากาศส่วนเกิน 80% การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงเป็นไปในลักษณะไม่คงที่ มีการลดลงของอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ และที่เกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเกิดในช่วงของนาทีที่ 30 ถึงนาทีที่ 45 อันเกิดขึ้นจากการที่เปลวไฟไม่สามารถรักษาเสถียรภาพเอาไว้ได้

ที่อัตราอากาศส่วนเกิน 100% โดยทางทฤษฎีอุณหภูมิที่ได้จะต้องมีค่าที่ลดลงแต่จากผลการทดลองที่ได้พบว่า อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิกลับมีค่าที่เพิ่มขึ้นและมีอัตราโดยรวมที่ค่อนข้างคงที่ สันนิษฐานได้ว่าเกิดจากการที่อัตราของมวลอากาศและเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงและอากาศที่ดียิ่งขึ้น ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย

ที่อัตราอากาศส่วนเกิน 110% ปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเงื่อนไขนี้มีลักษณะคล้ายกับเงื่อนไขที่ 100% อากาศส่วนเกิน แต่จะเกิดในลักษณะที่รุนแรงขึ้น จึงส่งผลทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีค่าที่สูงกว่าและทำให้เงื่อนไขของอัตราอากาศส่วนเกิน 110% มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงที่สุดในทุกๆ เงื่อนไข

9. สรุปผลการทดลอง

1. ขนาดของวัสดุพุนเมื่ออิทธิพลต่ออัตราการเผาไหม้

จากการทดลองพบว่าที่เม็ดวัสดุพุนขนาด 6 มม. และ 10 มม. สามารถเป็นตัวป้องกันเปลวไฟได้ดี เนื่องจากการเพิ่มของอุณหภูมิเป็นไปในอัตราที่น้อยมาก เป็นผลมาจากขนาดของเม็ดวัสดุพุนมีขนาดเล็กจึงทำให้ช่องว่างระหว่างวัสดุพุนมีเนื้อที่น้อยตามไปด้วย จึงทำให้ไม่สามารถรักษาเปลวไฟให้เกิดการเผาไหม้ภายในวัสดุพุนได้

และที่เม็ดวัสดุพุนขนาด 16 มม. จะเป็นขนาดที่เป็นคาบเกี่ยวของการเผาไหม้ ซึ่งสามารถอธิบายได้คือ ในการจ่ายอัตราการไหลของอากาศเกินพอที่ 20% – 60% จะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงเป็นไปในอัตราที่น้อย แต่อัตราการไหลของอากาศเกินพอที่ 80% จะมีการเพิ่มของอุณหภูมิจึงสูงมากขึ้น แต่เมื่อผ่านไปในช่วงเวลาหนึ่งการเพิ่มของอุณหภูมิมืออัตราการต่ำลง และที่อัตราการไหลของอากาศเกินพอที่ 100 % มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงอย่างรวดเร็วและมีอุณหภูมิที่สูงมาก จึงทำให้สรุปได้ว่าที่เม็ดวัสดุพุนขนาด 16 มม. ยังเป็นขนาดที่ไม่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดการเผาไหม้ภายในวัสดุพรุนที่ดีได้ และไม่สามารถที่จะใช้ตัวป้องกันเปลวไฟย้อนกลับได้

จากการทดลองในโครงการนี้พบว่าขนาดของเม็ดวัสดุพรุนที่สามารถรักษาเปลวไฟให้สามารถติดอยู่ในเม็ดวัสดุพรุนได้คือที่เม็ดวัสดุพรุนขนาดตั้งแต่ 20 มม. ขึ้นไป

2. อัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศมีผลต่อการเผาไหม้จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการเพิ่มอากาศส่วนเกิน มากขึ้นจะมีผลทำให้เปลวไฟที่ลอยอยู่บริเวณปากเตาหม้อนั้นมีความยาวที่สั้นลง เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อมีการเพิ่มอากาศส่วนเกินมากขึ้นการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นไปในอัตราที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้นตามไปด้วย

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] กัญจนนา บุญเกียรติ, เชื้อเพลิงและการเผาไหม้ ปี พ.ศ. 2544
- [2] A.Burcat and B.Mcbride ,1997 Ideal Thermodynamics Data for Combustion and Air Pollution Use Technion aerospace Report TAE804(June)
- [3] Hsisto and C ,Fraid , Thermodynamic-Fluid and combustion Research Division Vpl.3 ,1998 , pp214-247
- [4] ศตวรรษ สันติสุจินต์และคณะ, “การพัฒนาหัวเผาหน้ามันพีชเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม” ,ปริทัศน์พนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545
- [5] <http://www.fuel.com>
- [6] อนิรุตต์ มั่นชูจักร และ สำเริง อัครใจ , “การพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบวัสดุพรุนร่วมกับห้องเผาไหม้แบบวัสดุพรุนชนิดใช้เชื้อเพลิงเหลวโดยไม่มีการแตกตัวเป็นฝอยละออง” ,การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่16,2546
- [7] M.Cossalopov ,Field of Application of the porous Media Burner concept 1997 , pp-57
- [8] D.Trimis ,Basic principle of the Porous media Technology Vol.2 ,1995 , pp 141-161
- [9] สนทยา มีเลี้ยง , “การพัฒนาและการศึกษาสมรรถนะของหัวเผาหน้ามันพีช” ,ปริทัศน์พนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์
- [10] HOWELL ,JR. ,Hall ,M.J. and Ellzey ,J.L. ,1996 , “Combustion of Hydrocarbon Fuel within Porous Iner Media , “Progress in Energy Combustion Science ,Vol.22 ,pp121-145
- [11] ชานนท์ ชื่นจิตร , “การศึกษาเชิงทดลองอุปกรณ์และเปลี่ยนความร้อนประสิทธิภาพสูง” ,วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ,2544
- [12] Frank P.Incropera and David P.DeWill , “Introduction to Heat Transfer” ,Wiley , Third Edition
- [13] Stephen R.Turns , “An Introduction to combustion Concept and Application” ,Mc Graw-Hill ,1996
- [14] David R.Lide , “CRC Handbook of Chemistry and Physics” CRC Press using a porous medium. Experimental Thermal and Fluid Science. Vol. 26. pp. 15-23
- [15] 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
- [16] Dimosthenis Trimis et al, Germany. "Porous Medium Combustor versus Combustion Systems with Free Flames"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้