



เตาเผาแกลบ แบบวอร์เทค

A RICE HUSK FIRED VORTEX COMBURTOR

โดย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เลขที่.....
เลขทะเบียน 45999
วัน, เดือน, ปี 27 ก.พ. 2546

b.....
i.....

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เตาเผาแกลบนแบบวอร์เทก

A RICE HUSK FIRED VORTEX COMBUSTOR

ผู้จัดทำ

นาย จิระวัฒน์ นารถพจนานนท์ รหัสประจำตัว 42015339

นาย นัทรชัย นิริติชัยโสภิญ รหัสประจำตัว 42015341

นาย เฉลิม พุ่มศิลา รหัสประจำตัว 42015343

นาย ศักดิ์ดีดา ชงชาย รหัสประจำตัว 42515788

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตาเผาแบบวอร์เทค

นาย จิระวัฒน์ นารตพจนานนท์	42015339
นาย ฉัตรชัย นิรัติศัยโสภิญญ	42015341
นาย เฉลิม พุ่มศิลา	42015343
นาย ศักดิ์ดา ธงชาย	42515788

รศ. ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการศึกษาอิทธิพลของขนาดห้องเผาใหม่ต่อการกระจายอุณหภูมิภายในขนาดห้องเผาใหม่ ส่วนล่างของเตาเผา ซึ่งทำการศึกษามีทั้งสิ้น 3 ค่า คือ 0.5D , 0.75D, และ 1.0D โดยกำหนดให้ขนาดห้องเผาใหม่ส่วนบนมีขนาดคงที่ที่ 1.0D และมีความสูงเท่ากับ 3.0D การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาจะพิจารณาจากค่า Equivalent ratio มีทั้งสิ้น 3 ค่า คือ 0.8, 1.0 และ 1.2 ให้อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min ค่าอากาศส่วนที่ 2 ที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 3 ค่า คือ 100:0 , 85:15 และ 75:25 จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดที่วัดได้เท่ากับ 860 องศาเซลเซียส ที่ค่า Equivalent ratio เท่ากับ 1.2 ที่ขนาดห้องเผาใหม่เท่ากับ 1.0D

A RICE HUSK FIRED VORTEX COMBUSTOR

Jirawat Nartpotjananon	42015339
Chutchai Niruttisaisopin	42015341
Charuhm Pumsila	42015343
Sakda Thongchay	42515788

Assoc.Prof.Dr Pongjet Promvonge Advisor

Abstract

The project involves the effect of combustion chamber sizes of a rice husk vortex combustor on temperature distribution inside the combustor. The top part of combustor having a diameter (D) of 0.3 m and a height of 3D is fixed throughout the study. The bottom part of combustor is varied to be 3 different side : 0.5D, 0.75D and 1.0 D. Measurement of temperature is made by setting the equivalence ratio of rice husk is 0.3 kg/min and kept constant for all the tests. The ratio of volumetric flow rate of primary air to secondary air is adjusted to be 100/0, 85/15 and 75/25 to examine the effect air supply. The experiment shows maximum temperature of 860 C for equivalence ratio = 1.2 and the bottom side of combustor of 1D.



กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา คือ รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ในการทำงานตลอดเวลาที่ทำโครงการนี้ และพี่ปริญาโท ที่คอยให้ความช่วยเหลือ แก้ปัญหาและให้คำปรึกษาแนะนำรวมทั้งข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการ และคุณมณฑา เทียมเมือง ที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านการงานทุกอย่าง และขอขอบคุณยามทุกคนของภาคเครื่องกลที่ช่วยดูแลอุปกรณ์ต่างๆไม่ให้สูญหาย และเพื่อนๆ ที่มาให้กำลังใจทุกคน

ในท้ายสุดนี้ ขอขอบคุณอาจารย์ภาคเครื่องกลทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และเพื่อน ๆ กลุ่มเตาเผาที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา



นาย จิระวัฒน์ นารถพจนานนท์

นาย นัทรชัย นิรัตติย์โสภัญญ์

นาย เฉลิม พุ่มศิลา

นาย ศักดิ์ดา ธงชาย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูปภาพ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	2
1.2 ขอบเขต	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา	4
2.1 การเผาไหม้แบบกองสูง (Pile)	4
2.2 งานวิจัยนายสุพจน์ นานาโชค	4
2.3 งานวิจัยเรือโทประจักษ์ จิตรพิทย์	6
2.4 งานวิจัยนายปฐม ชัยพุกขทล	7
2.5 งานวิจัยนายบุญเรือง ศรีสวัสดิ์	9
2.6 งานวิจัยนายชัยณรงค์ จิระพงษ์พัฒนา	10
2.7 งานวิจัยนายรัชชัย ท้าววิล และนายสันติ วัชรอาภาไพบุลย์	11
2.8 งานวิจัยของ Tim T.Fu & Sin Nich	13
2.9 งานวิจัยของ Sin Nich & Tim T.Fu	14
บทที่ 3 ทฤษฎี	16
3.1 เชื้อเพลิงและการเผาไหม้	16
3.1.1 การแบ่งกลุ่มเชื้อเพลิง	16
3.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของแกลบแข็ง	17
3.1.3 การศึกษาการนำเอาแกลบมาเป็นเชื้อเพลิง	18
3.2 เตาเผาที่ใช้กับเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ในปัจจุบัน	20
3.2.1 เตาเผาไซโคลน	20
3.2.2 เตาเผา Fluidized-Bed	21
3.2.3 เตาแบบตะกรับ	22
3.2.4 เตาเผาแบบเวอร์เทค	23

	หน้า
3.2.5 หลักการของเตาเผาแบบหมุน	24
3.3 ปฏิกริยาเคมีของการเผาไหม้	25
3.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้	25
3.3.2 การเผาไหม้แบบสตอยคิโอเมตริก	26
3.3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	27
3.3.4 อากาศส่วนเกิน อัตราส่วนผสม	29
3.3.5 ความร้อนของการสันดาป	30
3.3.6 อุณหภูมิเปลวไฟเชิงทฤษฎี	32
3.3.7 การไหลวน ตัวเลขการหมุนวน	32
3.3.8 แรงหนีศูนย์กลาง แรงเฉื่อย	34
3.3.9 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค	36
3.3.10 การสมดุลในวงโคจร	39
3.3.11 ซอลเตชั่น	40
3.4 การวัดอัตราการไหล(Measurement of Discharge)	40
3.4.1 ออร์ริฟิส	40
3.4.2 การวัดอัตราการไหลโดยใช้แผ่นออร์ริฟิส	44
3.4.3 ความสัมพันธ์ของ C_d กับ R_D ของแบบออร์ริฟิส	45
3.5 มานอมิเตอร์ (manometer)	46
บทที่ 4 การคำนวณและการออกแบบ	47
4.1 การคำนวณ	47
4.1.1 การคำนวณหาค่าปริมาณอากาศที่ต้องการใช้	47
4.1.2 การคำนวณอัตราส่วนผสม	50
4.1.3 การคำนวณอัตราการไหล	50
4.1.4 การคำนวณหาค่าความแตกต่างระดับน้ำใน Manometer	51
4.1.5 การคำนวณการสันดาปทางทฤษฎี	52
4.1.6 การคำนวณกำลังความร้อนของเตาเผา	53
4.2 การออกแบบเตา	55
4.2.1 ขนาดความกว้างของเตาเผา	55
4.2.2 การออกแบบตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ	56
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	58
5.1 จุดประสงค์การทดลอง	58
5.1.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalence ratio	58

ก๊อปปี้การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้

58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
5.1.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดห้องเผาไหม้ กับการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้	58
5.1.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างท่อทางออก กับการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้	58
5.1.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างEquivalence ratio กับขนาดห้องเผาไหม้และอุณหภูมิในห้องเผาไหม้	58
5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด	58
5.3 ขั้นตอนการทดลอง	69
5.3.1 วิธีการเผาไหม้แอลกอฮอล์	69
5.3.2 การทดลองหาขอบเขตการติดไฟของแอลกอฮอล์	69
5.3.3 การทดลองหาอุณหภูมิการเผาไหม้	70
5.3.4 สรุปขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	70
5.4 ผลการทดลอง	72
5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง	102
5.6 สรุปผลการทดลอง	104
5.7 ข้อเสนอแนะ	105
เอกสารอ้างอิง	106
งบประมาณ	108
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	
คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศ	109
ภาคผนวก ข	
ตาราง Friction factor และ ตาราง Relative roughness	112
ภาคผนวก ค	
คุณสมบัติของแอลกอฮอล์และการเปรียบเทียบเชื้อเพลิง	114
ภาคผนวก ง	
การวัดอัตราการไหลของอากาศ	115
ภาคผนวก จ	
แบบเตาเผาแบบวอร์เทค	118
ภาคผนวก ฉ	
ตารางบันทึกผลการทดลอง	131

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงขนาดของเตาเผา	5
ตารางที่ 2.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของกากตะกอนที่อัตราการป้อนกากตะกอนต่าง ๆ	8
ตารางที่ 2.3 Major dimension and design parameters	15
ตารางที่ 3.1 การแบ่งเชื้อเพลิงตามสถานะของ เชื้อเพลิง	16
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงรวม (แกลบ)	18
ตารางที่ 3.3 ค่าปรับการเลื่อนไหลของอนุภาค	37
ตารางที่ 4.1 สัดส่วนของข้าวเปลือก	47
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงรวม (แกลบ)	47
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลอง	50
ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ	51
ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิที่ขนาดเตาเท่ากับ 0.5D	56
ตารางที่ 4.6 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิที่ขนาดเตาเท่ากับ 0.75D	56
ตารางที่ 4.7 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิที่ขนาดเตาเท่ากับ 1.0D	57



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเผาไหม้แบบกองสุขุม	4
รูปที่ 2.2 อากาศส่วนที่ 1 มากกว่าส่วนที่ 2	5
รูปที่ 2.3 เมื่อลดอากาศส่วนที่ 1 เพิ่มอากาศส่วนที่ 2	5
รูปที่ 2.4 ภาพรวมอุปกรณ์การทดลอง	7
รูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบหลักของเตาเผาภาคตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบด	8
รูปที่ 2.6 การไหลของเกล็ดในเตาเผาไหม้	10
รูปที่ 2.7 เตาเผาก้อนกะลามะพร้าวแบบกึ่งต่อเนื่อง 3	10
รูปที่ 2.8 การไหลของแก๊สในไซโคลอน	11
รูปที่ 2.9 เตาเผามวล	12
รูปที่ 2.10 The VC Cold flow test setup	13
รูปที่ 2.11 แสดง Droplet size distribution of a cwf spay	14
รูปที่ 2.12 ระบบการทดลองแบบเตาเผาแบบ Vortex	14
รูปที่ 3.1 เตาเผาไซโคลอน	21
รูปที่ 3.2 Fluidized bed combustor	22
รูปที่ 3.3 เตาเผาเกล็ดแบบ Inclined step grate	23
รูปที่ 3.4 เตาเผาแบบ Vortex	24
รูปที่ 3.5 ระบบเตาเผาขยะแบบหมุน	24
รูปที่ 3.6 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง	27
รูปที่ 3.7 ปฏิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	28
รูปที่ 3.8 แสดงกลไกการถ่ายเทความร้อน	28
รูปที่ 3.9 ระบบปฏิริยาเคมีในสภาวะการไหลอย่างสม่ำเสมอ	31
รูปที่ 3.10 แสดงการไหลวน	33
รูปที่ 3.11 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้	35
รูปที่ 3.12 แสดงแรงจุดที่กระทำกับอนุภาค	36
รูปที่ 3.13 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้แบบไซโคลอน	37
รูปที่ 3.14 แสดงความเร็วของอนุภาค	38
รูปที่ 3.15 แสดงการเกิดชอลเตชั่นและการลอยตัว	40
รูปที่ 3.16 Standard orifice plate	41
รูปที่ 3.17 แสดงโครงสร้างเรขาคณิต และจุดวัดความดันของออริฟิส	41
รูปที่ 3.18 แสดงการไหลผ่านแผ่นออริฟิส (Orifice)	42
รูปที่ 3.19 ออริฟิสแบบต่างๆ	43
รูปที่ 3.20 จุดต่อวัดความดันแตกต่าง (ΔP)	45

	หน้า
รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ของ C_d กับ R_D ของแบบออริฟิส	45
รูปที่ 5.1 แสดงอุปกรณ์ในการทดลอง	59
รูปที่ 5.2 Power supply	59
รูปที่ 5.3 Digital thermocouple	60
รูปที่ 5.3 Digital thermocouple	60
รูปที่ 5.4 Thermocouple Type K	60
รูปที่ 5.5 Gas analyier	61
รูปที่ 5.6 Burner	61
รูปที่ 5.6 Burner	62
รูปที่ 5.8 Orifice plate	62
รูปที่ 5.9 Manometer	63
รูปที่ 5.10 Primary air And Secondary air System	63
รูปที่ 5.11 Secondary air	64
รูปที่ 5.12 Orifice Plate System	64
รูปที่ 5.13 Blower	65
รูปที่ 5.14 Screw Feeder	65
รูปที่ 5.15 Exhaust Tube	66
รูปที่ 5.16 Vortex Combustor 0.5D Part 1	66
รูปที่ 5.17 Vortex Combustor 0.75D Part 1	67
รูปที่ 5.18 Vortex Combustor 1D Part 2	67
รูปที่ 5.19 Vortex Combustor 1D Part 3 And 4	68
รูปที่ 5.20 Vortex Combustor (0.5D)	68
รูปที่ 5.21 Vortex Combustor (1D)	69
รูปที่ 5.22 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.5D., Eq. 0.8 และ Pri.100%,Sec.0%	70
รูปที่ 5.23 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.5D., Eq. 0.8 และ Pri.85%,Sec.15%	71
รูปที่ 5.24 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.5D., Eq. 0.8 และ Pri.75%,Sec.25%	72
รูปที่ 5.25 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.5D., Eq. 1.0 และ Pri.100%,Sec.0%	73
รูปที่ 5.26 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.5D., Eq. 1.0 และ Pri.85%,Sec.15%	74
รูปที่ 5.27 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.5D., Eq. 1.0 และ Pri.75%,Sec.25%	75
รูปที่ 5.28 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.5D., Eq. 1.2 และ Pri.100%,Sec.0%	76
รูปที่ 5.29 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.5D., Eq. 1.2 และ Pri.85%,Sec.15%	77
รูปที่ 5.30 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.5D., Eq. 1.2 และ Pri.75%,Sec.25%	78
รูปที่ 5.31 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.75D., Eq. 0.8 และ Pri.100%,Sec.0%	79

รูปที่ 5.32 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.75D., Eq. 0.8 และ Pri.85%,Sec.15%	80
รูปที่ 5.33 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.75D., Eq. 0.8 และ Pri.75%,Sec.25%	81
รูปที่ 5.34 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.75D., Eq. 1.0 และ Pri.100%,Sec.0%	82
รูปที่ 5.35 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.75D., Eq. 1.0 และ Pri.85%,Sec.15%	83
รูปที่ 5.36 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.75D., Eq. 1.0 และ Pri.75%,Sec.25%	84
รูปที่ 5.37 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.75D., Eq. 1.2 และ Pri.100%,Sec.0%	85
รูปที่ 5.38 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.75D., Eq. 1.2 และ Pri.85%,Sec.15%	86
รูปที่ 5.39 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 0.75D., Eq. 1.2 และ Pri.75%,Sec.25%	87
รูปที่ 5.40 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 1.0D., Eq. 0.8 และ Pri.100%,Sec.0%	88
รูปที่ 5.41 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 1.0D., Eq. 0.8 และ Pri.85%,Sec.15%	89
รูปที่ 5.42 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 1.0D., Eq. 0.8 และ Pri.75%,Sec.25%	90
รูปที่ 5.43 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 1.0D., Eq. 1.0 และ Pri.100%,Sec.0%	91
รูปที่ 5.44 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 1.0D., Eq. 1.0 และ Pri.85%,Sec.15%	92
รูปที่ 5.45 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 1.0D., Eq. 1.0 และ Pri.75%,Sec.25%	93
รูปที่ 5.46 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 1.0D., Eq. 1.2 และ Pri.100%,Sec.0%	94
รูปที่ 5.47 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 1.0D., Eq. 1.2 และ Pri.85%,Sec.15%	95
รูปที่ 5.48 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 1.0D., Eq. 1.2 และ Pri.75%,Sec.25%	96
รูปที่ 5.49 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้ที่ขนาด 0.5D	97
รูปที่ 5.50 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้ที่ขนาด 0.75D	98
รูปที่ 5.51 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้ที่ขนาด 1.0D	99

สัญลักษณ์

ϕ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)
Φ	อัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงทางทฤษฎีกับอัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่ใช้จริงในการเผาไหม้
ρ_{air}	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
ρ_{water}	ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
a_h	ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทางทฤษฎี
a	สัมประสิทธิ์ในสมการ discretization
A	พื้นที่ (area)
$(A/F)_{ratio}$	อัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้
$(A/F)_{stioc}$	อัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ทางทฤษฎี
$(A/F)_{ac}$	อัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้จริง
BR	blockage ratio (H/D)
C	Discharge coefficient สัมประสิทธิ์การไหล
C	convection flux
C_p	pressure coefficient
D	diffusion flux ความกว้างของผนังแผ่นเรียบ
D_h	duct hydraulic diameter
D_t	Diameter ของแผ่น ออร์ฟิส (mm)
D_1	Diameter ของท่อ ออร์ฟิส (mm)
\bar{D}_j^t	The turbulent diffusion term ของสมการ K
\bar{D}_ϵ	The turbulent diffusion term ของสมการ ϵ
\bar{D}_{ijk}^t	The turbulent diffusion term
E	wall roughness parameter
g	แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
ΔH	ความแตกต่างระหว่างความสูงของมานอมิเตอร์ (mm)
h,H	convection heat transfer coefficient ความสูงของครีป
k,K	turbulent kinetic energy (TKE) thermal, conductivity of fluid
l	length scale, ตำแหน่งการวางครีปเริ่มต้น
L	Characteristic length, ความยาวของช่องขนาน
$\dot{m}_{a, stioc}$	อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทางทฤษฎี (kg/min)
\dot{m}_{ac}	อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง (kg/min)
Nu	Local Nusselt number ($= hD_i/K$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P	pressure, main grid location
Pe	peclet number
Pi	pitch length
PR	pitch ratio (= Pi/H)
ΔP	ความแตกต่างระหว่างความดันในท่อออริฟิส (N/m ²)
\bar{P}	The turbulent production term ของสมการ k
\bar{P}_ε	The production term ของสมการ ε
\bar{P}_{ij}	The turbulent production term
\dot{q}''	Heat transfer rate
Re _D	Reynolds number ($\equiv \rho U_{ref} D_h / \mu$)
Re _h	Reynolds number based on obstacle height ($\equiv \rho U_{ref} H / \mu$)
S	source term ^๕
S _{ij}	strain tensor
T	Temperature
w	ความเร็วในแนวรัศมี (m/s)
u	ความเร็วในแนวแกน (m/s)



บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันนี้จะเห็นได้ว่าโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นั้น เชื้อเพลิงมีความจำเป็นอย่างสูงในการที่จะทำการผลิต ไม่ว่าจะเป็น น้ำมัน ถ่านหิน และอื่นๆ อีกมากมาย แต่ในสถานะในปัจจุบันนั้นเชื้อเพลิงที่จะนำมาผลิตพลังงานนั้นได้ลดลงไปอย่างน่าตกใจ วิกฤตการณ์ น้ำมันขาดแคลนเริ่มที่จะมีมากขึ้น บางประเทศได้นำมาตรการต่างๆ มาใช้เพื่อเป็นการลด ปริมาณเชื้อเพลิง ทั้งในด้านการปรับปรุงเครื่องจักร และลดการสูญเสียของพลังงานที่เสียไปในระบบ และการคิดที่จะนำพลังงานอื่นมาทดแทน ประเทศไทยก็เป็นอีกประเทศหนึ่งที่ประสบกับ ปัญหาเชื้อเพลิงขาดแคลน จึงได้เกิดงานวิจัยขึ้นเพื่อที่จะหาเชื้อเพลิงที่สามารถทดแทนและไม่เป็นการเพิ่มต้นทุน จากการที่ทำการวิจัยและศึกษาจึงได้พบว่า แกลบเป็นเชื้อเพลิงอย่างหนึ่งที่สามารถนำมาเปลี่ยนรูปพลังงานเป็นพลังงานความร้อนได้และหาได้ไม่ยากนัก เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่ปลูกข้าวมากและมีโรงสีข้าวเป็นจำนวนมากจึงมีแกลบเหลือมากมาย รวมทั้งต้นทุนในการจัดซื้อก็ไม่สูงนัก จึงได้ทำการนำแกลบมาเปลี่ยนเป็นรูปพลังงานในรูปของ พลังงานความร้อน โดยการนำแกลบมาเผา เพื่อที่จะเอาความร้อนมาใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นการอบข้าวเพิ่มคุณภาพของข้าว เพื่อที่จะได้มีราคาสูงขึ้น และประโยชน์อื่นๆ อีกมากมาย จึงถือได้ว่าการนำเอาพลังงานความร้อนจากแกลบจึงเป็นการลดเชื้อเพลิงได้ทางหนึ่งและเป็นการนำของที่เหลือจากการสีข้าวมาใช้ประโยชน์

ประเทศไทยมีการทำเกษตรกรรม ถ้าเรานำเอาสิ่งที่เหลือจากการทำเกษตรกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านของพลังงานทดแทน เงินที่ต้องเสียไปให้กับต่างประเทศในการซื้อเชื้อเพลิงจะลดลง การทำนาเป็นเกษตรกรรมที่มีผลิตผลเป็นข้าวเปลือก และฟางข้าว เมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการสีวัตถุที่เหลือจากกระบวนการสี คือ แกลบ ถ้าสีข้าว 100 Kg จะได้แกลบออกมา 26.12 Kg [3] ค่าความร้อนของแกลบ (Overall gross calorific value of rice husk) ประมาณ 2,900-4,560 Kcal/kg เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของข้าวเปลือกประมาณ 400-4,300 Kcal/kg [17] แต่มีข้อเสียจะดูความชื้นสูงและเมื่อได้เปรียบเทียบกับน้ำมันเตา ที่มีค่าความร้อนประมาณ 9,900 Kcal/Kg [3] ค่าความร้อนของแกลบกับข้าวเปลือกมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าความร้อนประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำมันเตาแต่มีราคาถูกกว่า

จากการที่นำแกลบมาเปลี่ยนรูปพลังงานเป็นพลังงานความร้อนนั้นจึงเป็นการลดต้นทุนได้อย่างสูง เพราะแกลบนั้นสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานไปเป็นพลังงานอื่นๆ นั้นทำได้ยากนักแต่ในการที่จะนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้ได้นั้น คงจะไม่สามารถทำได้โดยการเผาแกลบแบบ ปกติ เพราะความร้อนที่ได้ต่ำมาก ไม่สามารถที่จะนำมาใช้งานตามโรงงานอุตสาหกรรมได้ จึงได้มีการคิดค้นเตาเผาที่สามารถทำ ความร้อนได้สูงจากการเผาแกลบเพื่อที่จะนำไปใช้งาน เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่ค่อยมีเตาเผาในลักษณะนี้มากนัก จึงได้เกิดงานวิจัยขึ้นมาเพื่อที่จะทำการประดิษฐ์คิดค้นเตาเผาที่สามารถเผาแกลบและนำเอาความร้อนที่ได้ไปใช้งานต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมมากมาย หากการประดิษฐ์คิดค้นประสบผลสำเร็จก็จะเป็นงานวิจัยที่จะช่วยลดพลังงานและต้นทุนค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างดี และเหมาะกับประเทศไทยเป็นอย่างมากเพราะเรามีแกลบจำนวนมากที่ สามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงได้อย่างพอเพียง ดังนั้นเราจึงออกแบบสร้างเตาเผาแบบวอร์เทค เพื่อใช้ในการเผาแกลบในการศึกษา จะพิจารณาขนาดของห้องเผาไหม้หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าขนาดห้องเผาไหม้ขนาดไหนให้ความร้อนในการเผาไหม้ได้ดีที่สุด และยังศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalence Ratio (Φ) กับการกระจายอุณหภูมิภายในเตา

1.1 วัตถุประสงค์

- 1.1.1 ทดสอบหาขอบเขตการติดไฟของเชื้อเพลิงกับอากาศในการเผาไหม้
- 1.1.2 ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของแกลบในเตาเผาแบบวอร์เทค
- 1.1.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalence ratio (Φ) กับการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้
- 1.1.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของห้องเผาไหม้ กับการกระจายของ อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้
- 1.1.5 ศึกษาความสัมพันธ์ของ Equivalence ratio (Φ) ขนาดของห้องเผาไหม้ และท่อทางออก กับการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้

1.2 ขอบเขต

- 1.2.1 ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้
- 1.2.2 ออกแบบและสร้างเตาเผาแบบวอร์เทคที่มีขนาดของห้องเผาไหม้หลัก
 - $0.5D = 150 \text{ mm}$
 - $0.75D = 225 \text{ mm}$
 - $1.0D = 300 \text{ mm}$
- 1.2.3 ทดลองป้อนแกลบเข้าผสมกับอากาศทำการจุดเชื้อเพลิงดูลักษณะการเผาไหม้
- 1.2.4 ใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K ในการวัดอุณหภูมิภายในเตาทั้งหมด 8 จุด
- 1.2.5 ใช้อัตราส่วนสมมูล(Equivalence ratio) ที่ 0.8, 1.0 และ 1.2
- 1.2.6 ใช้อัตราการใช้ของอากาศที่ต่อ Primary Air = 100%, ที่ต่อ Secondary Air = 0%
Primary Air = 85%, ที่ต่อ Secondary Air = 15% และ Primary Air = 75%, ที่ต่อ Secondary Air = 25%
- 1.2.7 ปรับอัตราการใช้ของอากาศที่เข้าเตาเผาเพื่อดูการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ที่สุด

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 สามารถเผาแกลบให้มีการเผาไหม้ที่ได้โดยใช้เตาเผาแกลบแบบวอร์เทค
- 1.3.2 สามารถมีส่วนร่วมในการพัฒนาเตาเผาที่ใช้อยู่ในปัจจุบันให้ดียิ่งขึ้น
- 1.3.3 สามารถวิเคราะห์การเผาไหม้ภายในเตาเผาแบบวอร์เทคได้
- 1.3.4 สามารถนำวัสดุทางธรรมชาติที่เหลือใช้เข้ามาทำให้เกิดพลังงานและก่อให้เกิดประโยชน์

- 1.3.5 สามารถเผาแกลบที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงอยู่ในโรงสีข้าว มีประสิทธิภาพมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.6 สามารถประยุกต์นำความร้อนที่ได้ไปผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม
- 1.3.7 เป็นแนวทางในการพัฒนาและคิดค้นระบบเผาไหม้ได้ต่อไปในอนาคต



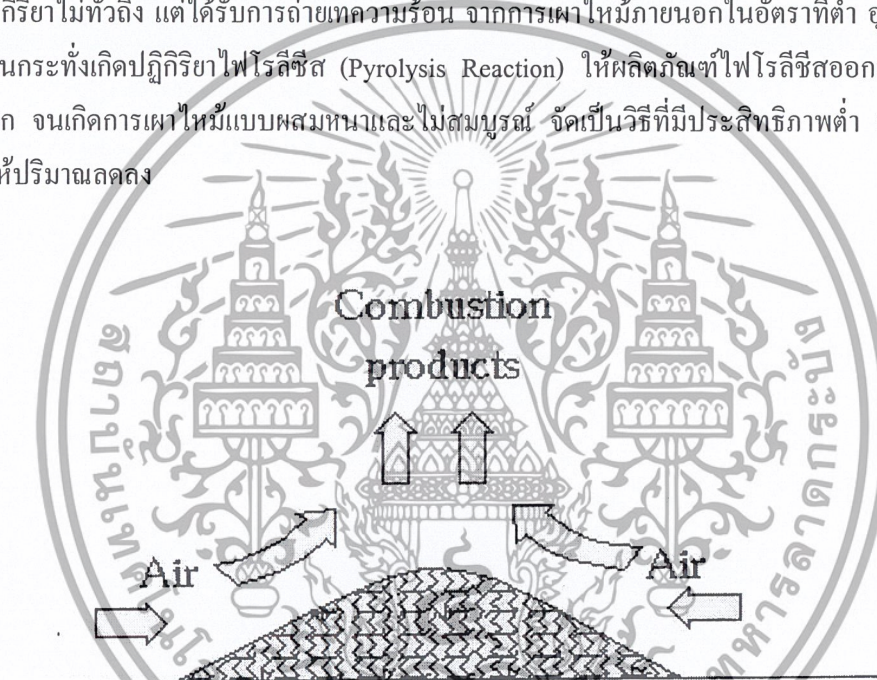
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา

ในการทำงานวิจัย จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลและทฤษฎีต่างๆ จากผลงานวิจัยในอดีต สำหรับอ้างอิง ประกอบงานวิจัยที่จะดำเนินการ จากผลงานวิจัยและงานเขียนที่เกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีดังต่อไปนี้

2.1 การเผาไหม้แบบกองสุม

ดังรูปที่ 2.1 แสดงการเผาไหม้แบบกองสุม คือ ออกซิเจนในอากาศเข้าทำปฏิกิริยา ตามธรรมชาติกับ เชื้อเพลิงภายนอก โดยไม่สามารถควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้เหมาะสมได้ ภายในกองเชื้อเพลิงออกซิเจน เข้าไปทำปฏิกิริยาไม่ทั่วถึง แต่ได้รับการถ่ายเทความร้อน จากการเผาไหม้ภายนอกในอัตราที่ต่ำ อุณหภูมิสูงขึ้น อย่างช้าๆ จนกระทั่งเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (Pyrolysis Reaction) ให้ผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสออกมารวมกับเชื้อเพลิงภายนอก จนเกิดการเผาไหม้แบบผสมหนาและไม่สมบูรณ์ จัดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพต่ำ มักใช้เผาไหม้เพื่อทำลายให้ปริมาณลดลง



รูปที่ 2.1 การเผาไหม้แบบกองสุม

2.2 งานวิจัยของ สุพจน์นำนาโชค [1]

ได้ทำการวิจัยการเผาไหม้ชี้ที่อยู่ในกองเผาไหม้แบบไซโคลนชนิดอากาศเข้าหลาย ช่องทาง จาก การวิเคราะห์พบว่า ชี้้เชื้อมีค่าความร้อนประมาณ 4000-4300 Kcal/kg ห้องเผาไหม้แบบไซโคลนที่ใช้ในการ วิจัยนี้จะมีช่องทางสำหรับป้อนอากาศกับชี้เชื้อตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงทางด้านบนของห้องเผาไหม้ ช่อง แก๊สเสียออกจะอยู่ด้านบนใน แนวแกนของห้องเผาไหม้ นอกจากนี้ยังมีการป้อนอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) ในแนวสัมผัสเส้นรอบวงที่บริเวณกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ เพื่อช่วยให้เกิดการคลุกเคล้า การกระจาย ตัว ระหว่างชี้เชื้อกับอากาศได้ดีขึ้น ส่งผลให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นด้วย ห้องเผาไหม้แบบไซโคลนนี้ อุณหภูมิได้จากการเผาไหม้ประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส

ขนาด (มม)	ห้องเผาไหม้จำลอง	ห้องเผาไหม้จริง
D	164	155
D	84	80
D1	28	28
D2	28	28
D3	17	14
L	888	810
S*	6.42	6.33
วัสดุ	พลาสติกใส	เหล็ก

ตารางที่ 2.1 แสดงขนาดของเตาเผา

ผลการทดลองลักษณะรูปแบบการไหล ตามรูปที่ 2.2 ถึง 2.3 จะพบว่า การไหลของอนุภาคซี-เลื้อย โดยการนำพาของอากาศส่วนแรกและอากาศจาก Blower จะพบว่ามีกรไหลเวียนเป็นเกลียวรอบห้องเผาไหม้ และมีระยะพิทช์ ความชันของเส้นเกลียวค่าหนึ่ง เมื่อมีการเพิ่มอากาศส่วนที่สอง และลดอากาศส่วนแรกลง เพื่อให้ปริมาณอากาศรวมเท่าเดิมพบวาระยะพิทช์ของเกลียวและความชันของเกลียวน้อยลง นั่นคือ มีจำนวนรอบของเกลียวมากขึ้น และเมื่อมีการเพิ่มอากาศส่วนที่สองขึ้นอีก โดยให้ปริมาณอากาศรวมคงที่ พบวาระยะพิทช์ของเกลียวและความชันของเกลียวลดน้อยลงอีก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มอากาศส่วนที่สองมากขึ้นจะทำให้อนุภาคซี-เลื้อยไหลเวียนอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้นส่งผลให้การเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ดีขึ้นด้วย



รูปที่ 2.2 อากาศส่วนที่ 1 มากกว่าส่วนที่ 2 รูปที่ 2.3 เมื่อลดอากาศส่วนที่ 1 เพิ่มอากาศส่วนที่ 2

การทดลองใช้อัตราการป้อนอนุภาคซี-เลื้อย ตั้งแต่ 205.4 ถึง 333.3 g/min อัตราป้อนอากาศตั้งแต่ 12185 g/min และมีการแปรค่าปริมาณอากาศส่วนที่สองเป็น 5%, 10% และ 15% และทดสอบโดยเอาค่าที่อากาศส่วนที่สอง 15% และแปรค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) เป็น 1.0, 1.2 และ 1.5

ผลการทดลองพบว่าปริมาณอากาศส่วนที่ 15% พบว่า ปริมาณอากาศส่วนที่สอง 15% ของอากาศทั้งหมด และแปรค่า ϕ พบว่า $\phi = 1.5$ จะเกิดการเผาไหม้เป็นบริเวณกว้างทั่วห้องเผาไหม้ มีเปลวไฟออกมาของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ของเอกสารนี้ กรุณาแจ้งให้ทราบ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางออกน้อย แก๊สจากการเผาไหม้ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ 885 ถึง 2120 ppm นับว่าต่ำสุด และปริมาณก๊าซออกซิเจนอยู่ในช่วง 7.1 ถึง 14.2% แสดงว่าเกิดการเผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์กว่าค่าอื่นๆ เพราะมีปริมาณอากาศเผาไหม้ค่อนข้างจะสมบูรณ์กว่าค่าอื่นๆ เพราะมีอากาศเพียงพอ

ในการทดลองลักษณะการเผาไหม้เมื่อครั้งที่ ค่า $\phi = 1.5$ และแปรค่าอากาศส่วนที่สองเป็น 5%, 10% และ 15% พบว่าอากาศส่วนที่สอง 15% บริเวณการเผาไหม้จะกว้างที่สุด คือตั้งแต่ส่วนล่างไซโคลนถึงช่องปากทางออก มีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ต่ำสุดคือ 885-2120 ppm ก๊าซออกซิเจน 7.1 ถึง 14.2% สรุปแล้วจะเห็นว่า เมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนที่สองมากขึ้น จะเกิดการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้เป็นบริเวณกว้างขึ้นด้วย เนื่องจากอากาศส่วนที่สอง ทำให้อุณหภูมิของจี้เปลือยไหลวน อยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น หมายถึงมีเวลาในการเผาไหม้มากขึ้นด้วย

2.3 งานวิจัยของเรือโทประจักษ์ จิตรพิทย [3]

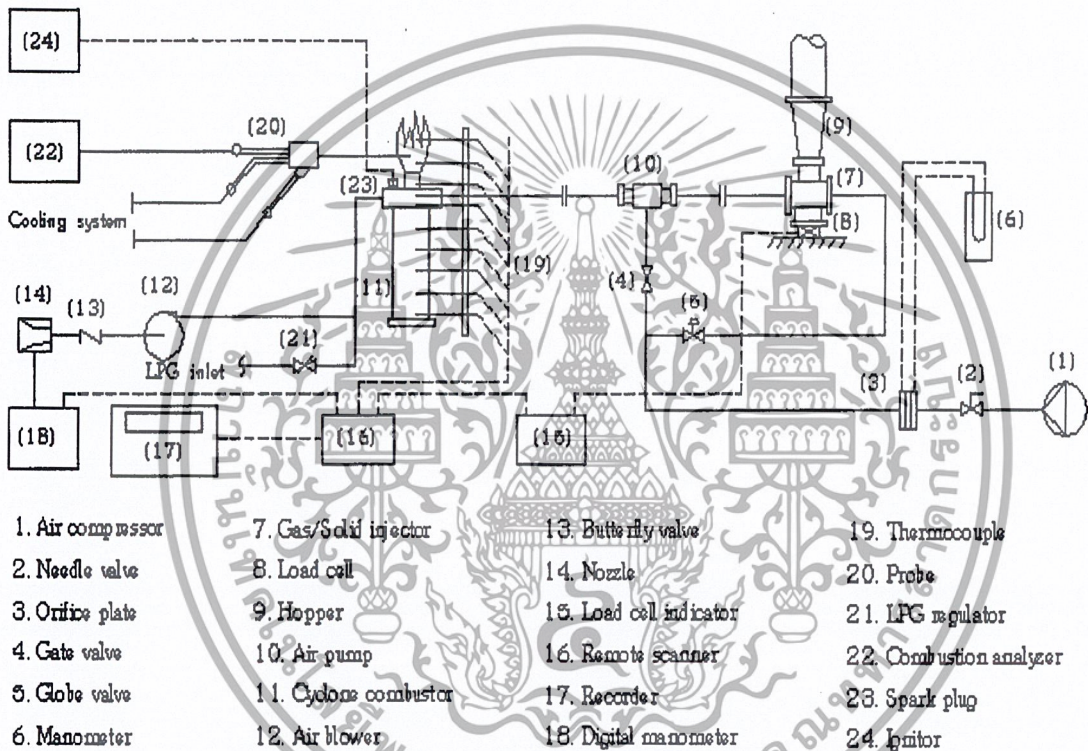
การทดลองของเรือโทประจักษ์ จิตรพิทย ได้ทำการทดลองเผาจี้เปลือยในเตาเผา แบบไซโคลน เพื่อการศึกษารูปแบบการไหลของจี้เปลือย ลักษณะการสันดาปหรือการเผาไหม้ รวมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้

โดยใช้ห้องเผาไหม้จำลอง ซึ่งผลิตจากพลาสติกใส แอลคาไรด์ (Alcaride) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D) 164 mm เส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออก (D) 84 mm ความสูง (L) 33.8 mm. ทำการศึกษารูปแบบการไหลของจี้เปลือย โดยมีอัตราการขอนอากาศและอุณหภูมิเปลือยเป็นตัวแปร อากาศจะนำพาอนุภาคเข้าในแนวสัมผัสทางส่วนบนห้องเผาไหม้ อนุภาคจะแพร่กระจายไม่สม่ำเสมอ รวมกลุ่มหมุนวนเป็นเกลียวลงสู่ส่วนล่างของห้องเผาไหม้ จำนวนกลุ่มหรือจำนวนเกลียวที่แยกออกจากกัน จะเท่ากับจำนวนช่องทางป้อนอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิ แต่ความหนาแน่นของกลุ่มอนุภาคที่เกิดจากการกระทำของอากาศทุติยภูมิ จะน้อยกว่ากลุ่มอนุภาคที่เกิดจากการกระทำของอากาศปฐมภูมิ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะอัตราการป้อนอากาศ (อัตราการป้อนอนุภาคคงที่) ระยะห่างของเกลียวจะเปลี่ยนแปลงมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในทางตรงกันข้าม ระยะห่างของเกลียวจะเปลี่ยนแปลงมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะอัตราการป้อนอนุภาค (อัตราการป้อนอากาศคงที่) โดยที่ระยะห่างของเกลียวจะมากขึ้น เมื่ออัตราการป้อนอนุภาคสูงขึ้น

ในการศึกษาถึงลักษณะการเผาไหม้และองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ ได้ทำการทดลองจากห้องเผาไหม้แบบไซโคลนติดตั้งในแนวตั้ง ผลิตจากเหล็กกล้าเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D) 155 mm เส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออก (D) 68.5 mm. ความสูง (L) 310 mm. โดยมีอัตราส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงหรืออัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio) เป็นตัวแปร การเผาไหม้จี้เปลือย ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลน้อยกว่า 1.5 จะเกิดการเผาไหม้ ตั้งแต่ช่วงกลางห้องเผาไหม้ถึงเหนือปากทางออกของห้องเผาไหม้ จะมีเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดเหลือตกค้างปริมาณสูง แก๊สจากการเผาไหม้ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์มากกว่า 3,000 ppm. ขณะที่ปริมาณออกซิเจนไม่เกิน 10% ลักษณะเปลวไฟมีความแปรปรวนสูง จัดว่าเป็นการเผาไหม้ที่มีอากาศส่วนเกินอยู่ในช่วงต่ำ และส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และที่ค่าอัตราส่วนสมมูลมากกว่า 1.5 ถึง 2.0 เกิดการเผาไหม้ในบริเวณกว้าง คือ ตั้งแต่ส่วนล่างของห้องเผาไหม้ถึงปากทางออก ไม่ปรากฏเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดเหลือตกค้างอยู่ ลักษณะเปลวไฟมีความแปรปรวนต่ำ องค์ประกอบของแก๊สประกอบด้วย แก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนมอนนอกไซด์อยู่ในช่วง 1,700 ถึง 3,000 ppm. และออกซิเจนประมาณ 8 ถึง 10% อุณหภูมิเปลวไฟอยู่ในช่วง 900 ถึง 1000 °C และที่ผนังด้านใน 700 °C จัดว่าเป็นช่วงค่าอัตราส่วนสมมูลที่เหมาะสมกับการเผาไหม้ ถึงแม้ว่าเป็นช่วงที่มีอากาศส่วนเกินค่อนข้างสูง สำหรับค่าอัตราส่วนสมมูลที่มากกว่า 2.0 จะเกิดการเผาไหม้ตั้งแต่ส่วนล่างของห้องเผาไหม้ขึ้นไป ยกเว้นบริเวณรอบๆ ผนังตลอดความยาว เนื่องจากมีอุณหภูมิที่ผนังสูงสุดเพียง 550 °C อันเกิดจากการกระทำของอากาศส่วนเกิน ในกรณีที่มีอากาศส่วนเกินมากแล้ว ความเร็วของแก๊สจะสูงตาม ขณะเดียวกันทำให้ช่วงเวลากการเผาไหม้ลดลง ในการนี้พบว่าเชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด ปล่อยปนออกมากับแก๊สเสีย แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิเปลวไฟประมาณ 1,000 ถึง 1,100 °C ลักษณะเปลวไฟมีความแปรปรวนสูง



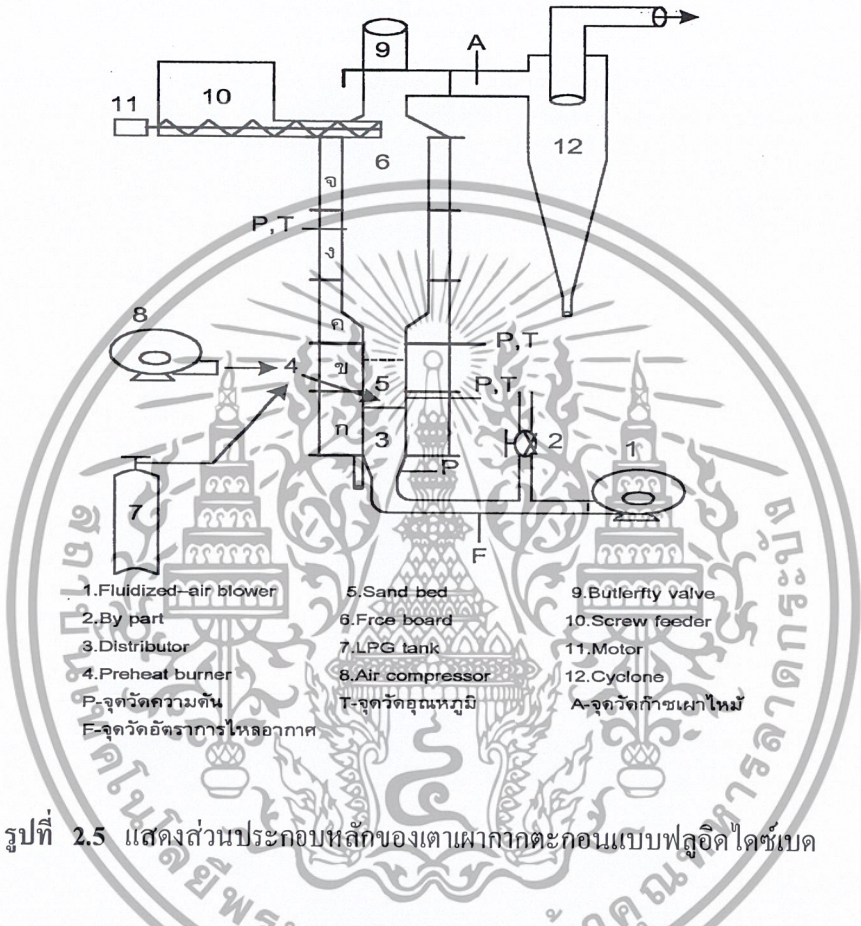
รูปที่ 2.4 ภาพรวมอุปกรณ์การทดลอง

2.4 งานวิจัยของ นายปฐม ชัยพุกยทล [20]

กระบวนการเผาไหม้ของเตาเผาภาคตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบด เป็นการเผาเพื่อกำจัด มีความร้อนจากกระบวนการบางส่วน สูญเสียออกมาพร้อมกับไอเสีย ที่ระดับอุณหภูมิสูง เพียงพอที่จะนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ จึงนำไปสู่แนวคิดในการนำความร้อนจากการเผากำจัดกลับมาใช้ประโยชน์ ด้วยการติดตั้งระบบท่อนำรับความร้อนในห้องเผา ถ่ายเทความร้อนจาก กระบวนการเผาไหม้กลับมาใช้และศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนใช้ประโยชน์ โดยการปรับปรุงเตาเผาภาคตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบด

ข้อดี

- ประสิทธิภาพการเผาไหม้จากการเผาถากตะกอนแบบเปียกมีค่าต่ำกว่าแบบแห้ง แต่มีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนใช้ประโยชน์สูงกว่า โดยคาดว่าเป็นผลจากความชื้นในองค์ประกอบของกากตะกอนที่กลายเป็นไอน้ำ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นตัวเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสู่น้ำภายในท่อรับความร้อน



รูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบหลักของเตาเผาถากตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบด

อัตราการป้อนกากตะกอน (kg/hr)	ประเภทกากตะกอน	ประสิทธิภาพการเผาไหม้
10	แบบเปียก	95.8
15	แบบเปียก	93.9
5	แบบแห้ง	99.8
7.5	แบบแห้ง	98.9

ตารางที่ 2.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของกากตะกอนที่อัตราการป้อนกากตะกอนต่างๆ

ข้อเสีย

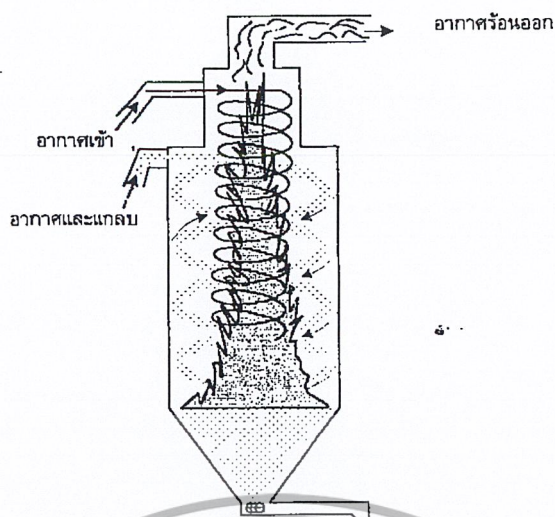
- ควรมีการปรับปรุงระบบการป้อนกากตะกอนที่มีความเหมาะสมกับสภาพ ของกากตะกอนและ ไม่ควรเป็นระบบที่ก่อให้เกิดสภาพการอัดตัวของกากตะกอนก่อนป้อนเข้าสู่ห้องเผา
- ปริมาณความร้อนที่เหลือออกจากระบบในส่วนต่างๆ ยังมีปริมาณที่สูงมาก และมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศภายนอก แม้จะผ่านระบบท่อนำรับความร้อนใน ห้องเผาจึงควรมีการนำความร้อนที่เหลือ มาใช้ประโยชน์เพิ่มเติมนอกจากการผลิตน้ำร้อน
- ระบบท่อถ้ำที่รับความร้อนในห้องเผาสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้นได้โดยการปรับปรุงโครงสร้างและองค์ประกอบของระบบ
- เถ้าลอย (Fly ash) ที่เหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของเตาเผาสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ในลักษณะของการใช้เป็นส่วนผสมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้และก่อให้เกิดประโยชน์ในรูปแบบของการใช้เป็นวัสดุเติมในกระบวนการการผลิตของผลิตภัณฑ์อื่นๆ

2.5 งานวิจัยของ นายบุญเรือง ศรีสวัสดิ์ [18]

การวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของเตาเผาแกลบ สำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed) ขนาด 10 ton/hr เตาเผาแกลบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แกลบและอากาศจะเข้าห้องเผาไหม้ในแนวเส้นสัมผัสและเกิดการหมุนวนในห้องเผาไหม้ ไฟที่เกิดจากการเผาแกลบของเตาแบบไซโคลนไฟที่ได้จากเตาจะมีลักษณะการหมุนวนของไฟสวนทางกับการหมุนของ แกลบที่หมุนเอาแกลบลงมา แต่ไฟจะหมุนในทิศทางตรงข้าม และหมุนด้านบน

ข้อดี

- การปรับปรุงการจ่ายลมในท่อ Tertiary สามารถให้การเผาไหม้ ของแกลบดีขึ้น
- อากาศส่วนเกิน (excess air) ที่ใช้ในการเผาไหม้จะมีผลต่อประสิทธิภาพของเตาเผาแกลบ เมื่ออากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้นและ ประสิทธิภาพของเตาจะเพิ่มขึ้น
- ความสูงของเบดจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของเตาเผาแกลบ
- อัตราการไหลของอากาศ ที่ช่วยในการเผาไหม้จากด้านล่างของตะแกรง มีผลต่อประสิทธิภาพของการเผาไหม้คาร์บอน ถ้าอัตราการไหลของอากาศสูงจะทำให้แกลบที่กำลังเผาไหม้ตกลงผ่านตะแกรงได้เร็วขึ้น



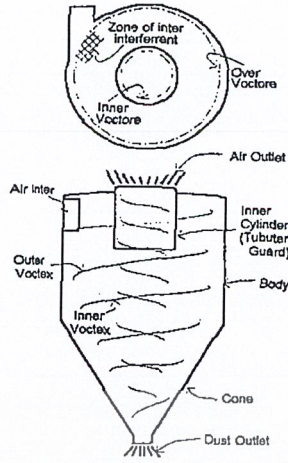
รูปที่ 2.6 การไหลของแกลบในเตาชนะเผาไหม้

2.6 งานวิจัยของ นายชัยณรงค์ จิระพงศ์พัฒนา [25]

เตาเผาขยะแบบกึ่งต่อเนื่อง 3 เป็นการพัฒนาต่อเนื่องมาจากเตาเผาถ่านกะลามะพร้าวแบบกึ่งต่อเนื่อง 1 และ 2 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะลดมลภาวะที่เกิดจากการเผาถ่านกะลามะพร้าว อนุภาคที่เกิดจากการเผาถ่านกะลามะพร้าว เพื่อที่จะขจัดอนุภาคนี้ได้เลือกใช้ระบบขจัดอนุภาคแบบ Cyclone ชนิด High Efficiency ตามมาตรฐานของ Stairmand ได้ออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน 320 mm ความสูง 1,280 mm



รูปที่ 2.7 เตาเผาถ่านกะลามะพร้าวแบบกึ่งต่อเนื่อง 3



รูปที่ 2.8 การไหลของแก๊สในไซโคลน

ข้อดี

- การออกแบบเครื่องควบคุมอนุภาคแบบลมหมุนนี้ ถึงที่ความต้องการพิจารณา คือ ปริมาณของไหลที่มีอนุภาคผสมอยู่ และขนาดอนุภาคที่ยอมให้ออกมาได้จากแหล่งควบคุม
- ที่อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของปล่องคว้นกับ hood เท่ากับ 8 จะเป็นจุดที่ดีที่สุด เพราะระบบมีอุณหภูมิที่เหมาะสม ทำให้ไม่เกิดการกลั่นตัวของ น้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบกับระบบแบบใช้ท่อปล่องคว้น และแบบต่อ Heat Exchanger จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตต่ำกว่า แต่อัตราการผลิตสูงกว่าทั้งสองแบบ

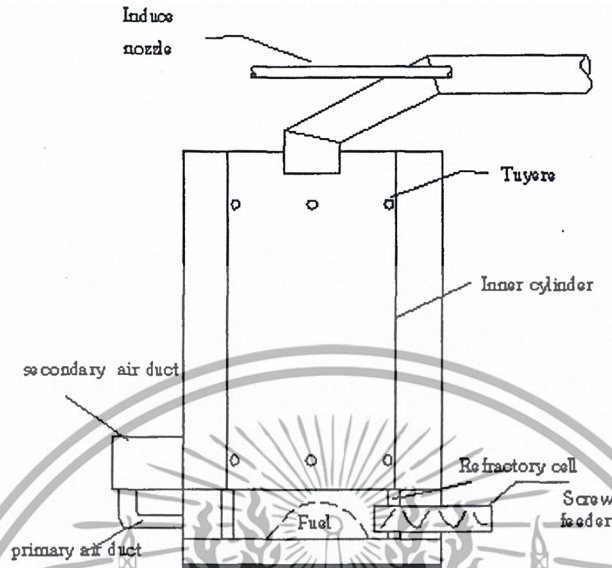
ข้อเสีย

- การดูดควันออกจากตัวเตาโดยตรงนั้น อุณหภูมิของระบบจะสูงมาก Blower ไม่สามารถทนความร้อนได้ ดังนั้นจึงควรออกแบบให้ Blower สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ดี
- ระบบไซโคลนที่ออกแบบ จะพบว่เกิดน้ำมันดินขึ้นในระบบ (ภายในไซโคลน) ในการออกแบบควรที่จะให้ควันจากการเผาไหม้ในเตา ผ่านอุปกรณ์แยกน้ำมันดินออกก่อน แล้วผ่านเข้าไปในระบบกำจัดฝุ่น ซึ่งจะทำให้ไซโคลนมีประสิทธิภาพสูงขึ้น
- เตาเผาถ่านกะลามะพร้าว ควรจะปิดให้สนิทในขณะที่ทำการเผา เพื่อป้องกันมิให้อากาศภายนอกเข้าไปทำให้อ่างกะลาที่ได้มีผลผลิตต่ำ
- ในการติดเตาครั้งแรกควรอุ่นเตาก่อนโดยใช้เชื้อไฟ เพื่อเป็นการไล่ความชื้นภายในเตาและเป็นการปรับสภาพเตาก่อนปริมาณความร้อนมากๆ เป็นการป้องกันการแตกร้าวของเตา

2.7 งานวิจัยของ นาย รัชชัช ทั่วถวิล และนายสันติ วัชรอาภาไพบูลย์ [2]

ทำการพัฒนา เตาเผาวัสดุทางการเกษตร โดยใช้อากาศหมุนวน และใช้เกลบเป็น เชื้อเพลิง สร้างพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ เพื่อศึกษาการทำงานทั้งหมดของเตาและความสัมพันธ์ระหว่าง A/F ratio
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใจเอกสารฉบับนี้เพื่อการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Air-fuel ratio) ว่ามีผลต่อการให้พลังงานจากการเผาไหม้อย่างไร เป็นรวมข้อดีของเตาไฟ (Cell Furnace) กับเตาที่มีอากาศไหลวน (Vortex Furnace) มาออกแบบรวมกันในเตาชนิดนี้



รูปที่ 2.9 เตาเผาवाल

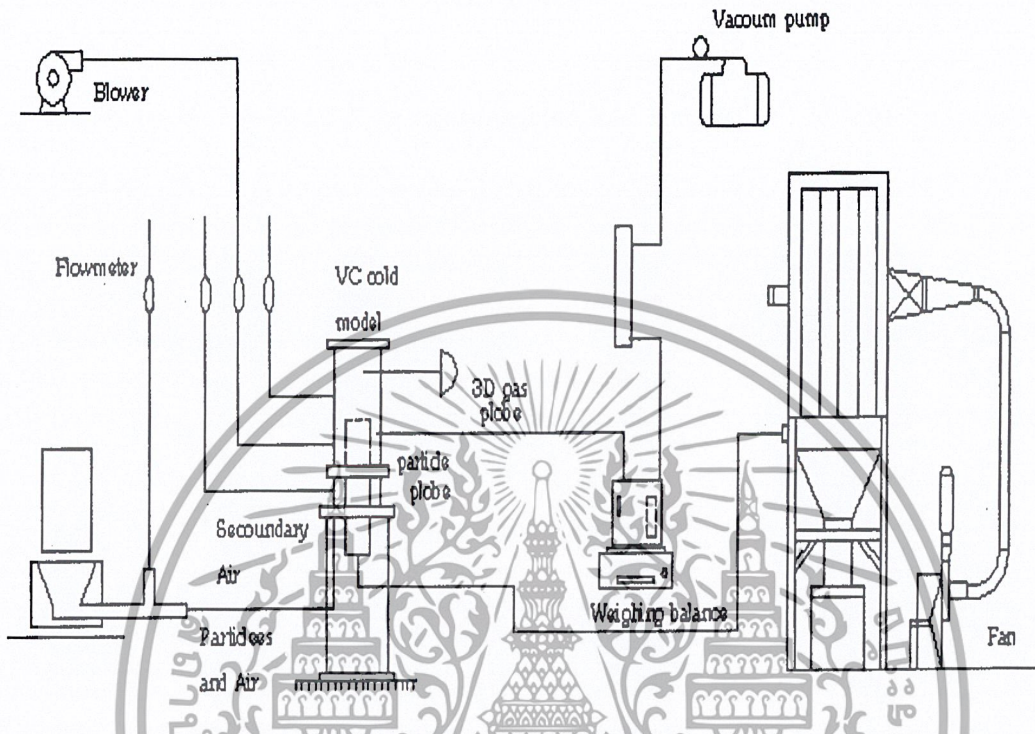
ขนาดและรูปร่างของเตาเผากลมโดยใช้อากาศหมุนวนประกอบด้วย (ดังรูปที่ 2.9)

- ส่วนนอกสุดของเตาทำกรขึ้นรูปจากเหล็กแผ่น (steelsheet) มีความสูง 1250 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 mm
- ส่วน Inner cylinder จะอยู่ภายใน outer cylinder ประกอบด้วย ส่วนที่เป็นเตาก่อนด้วยอิฐทนไฟ
- ส่วนที่เป็น upper cylinder จะต้องอยู่บน (Refractory Cell) เป็นส่วนที่มีท่ออากาศติดตั้งอยู่ทางส่วนบนและส่วนล่าง เพื่อให้อากาศถูกส่งผ่านเข้าสู่เตาในแนวเฉียง ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศขึ้น ความสูงของส่วนนี้เท่ากับ 610 mm และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 457 mm
- ตัวป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรู (Screw feeder) ทำหน้าที่ป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตา
- พัดลมเป่า และพัดลมดูด
- ปล่องไฟ

เกลบจะถูกส่งเข้าสู่เตาโดยใช้ Screw feeder ซึ่งจะทำให้เกลบถูกเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ พัดลมเป่าจะทำหน้าที่เป่าลมเข้าสู่เตา โดยลมจะแยกออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะ ส่งผ่านไปยังห้องไหม้โดยตรง ซึ่งจะช่วยให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับส่วนที่สองจะไปยัง Inner Cylinder ซึ่งอยู่ส่วนบนของ Refractory Cell โดยผ่านท่อยิงอากาศ (Tuyere) ทำให้ลมเข้าไปจะอยู่ในแนวเฉียง ความเฉียงของอากาศขึ้นอยู่กับมุมของท่อยิงอากาศ ลมส่วนนี้จะเกิดการหมุนวน และมีพัดลมดูดความร้อนออกจากห้องเผาไหม้ ทำให้ความดันในเตาดำกว่าบรรยากาศเล็กน้อย จะช่วยให้ความร้อนกระจายออกภายนอกได้

2.8 งานวิจัยของ Sin nich & Tim T. Fu [7]

ทำการทดสอบการไหลในเตาแบบจำลอง CId models ที่มีลักษณะเป็นท่อ 3 ขนาดอยู่แกนเดียวกัน ซึ่งมีขนาดดังนี้ 24 นิ้ว IDx56, 10 นิ้ว IDx26 และ 4.3 นิ้ว IDx18 ตามลำดับตามรูปที่ 2.10

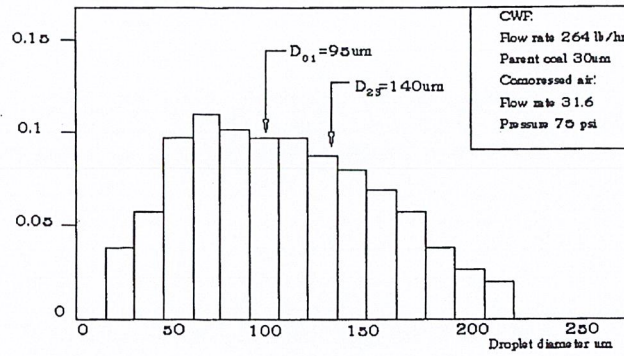


รูปที่ 2.10 The VC Cold flow test setup

ทดสอบการเผาไหม้ใน Vortex (VC) hot model โดยให้สอง subscale (0.15 MB/H และ 0.3 MB/H) และสอง full scale คือ (2 MB/H และ 3 MB/H) รายละเอียดหาได้จาก [7d2,p10] ใช้เชื้อเพลิงเป็นถ่านหินบดละเอียด

ลักษณะการไหลของอากาศเชื้อเพลิงใน VC cold model ที่ทำการทดสอบ แสดง การวัดค่าการกระจายของอนุภาค เชื้อเพลิงในท่อขนาด 24 นิ้วของ model ที่เผาไหม้มวลของเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นตามแนวรัศมีด้วย แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและตกลงด้วยแรงโน้มถ่วงที่ chamber wall ที่นั่นจะมีอากาศใหม่เข้ามาซึ่งเป็นผลดีในการผสมระหว่าง ออกซิเจนกับเชื้อเพลิง มวลที่ถ่ายเทดีทำให้ไม่เกิดการอัดตัวเมื่อไม่มีการอัดตัวจึงเป็นประโยชน์กับเชื้อเพลิงที่เริ่มเผาไหม้

สมรรถนะความร้อนและการเผาไหม้ รวม 130 ชั่วโมงของการทดสอบการเผาไหม้ถ่านหิน (cwf) ที่มีขนาด 30 micron มีความชื้น 34 % ให้ความร้อนที่ 9,930 Btu/lb การทดสอบเพื่อการควบคุมอากาศส่วนเกินและอัตราการเผาไหม้ รูปที่ 2.11 แสดงที่เล็กกลงและการกระจาย cwf spay



รูปที่ 2.11 แสดง Droplet size distribution of a cwf spray

สรุป เพราะ Strong swirl , low temperature และรูปร่างเฉพาะของเตาเผาเป็นการรวมกลุ่มความคิดในงาน boiler heating ขนาดเล็กและขนาดกลาง จากข้อดีที่มีอยู่แล้วสามารถสรุป ตามนี้

การไหลแบบปั่นป่วน เป็นผลจากลมเพื่อพัฒนาการไหลของอากาศ - เชื้อเพลิงใน การ ผสมกันตามการเคลื่อนที่

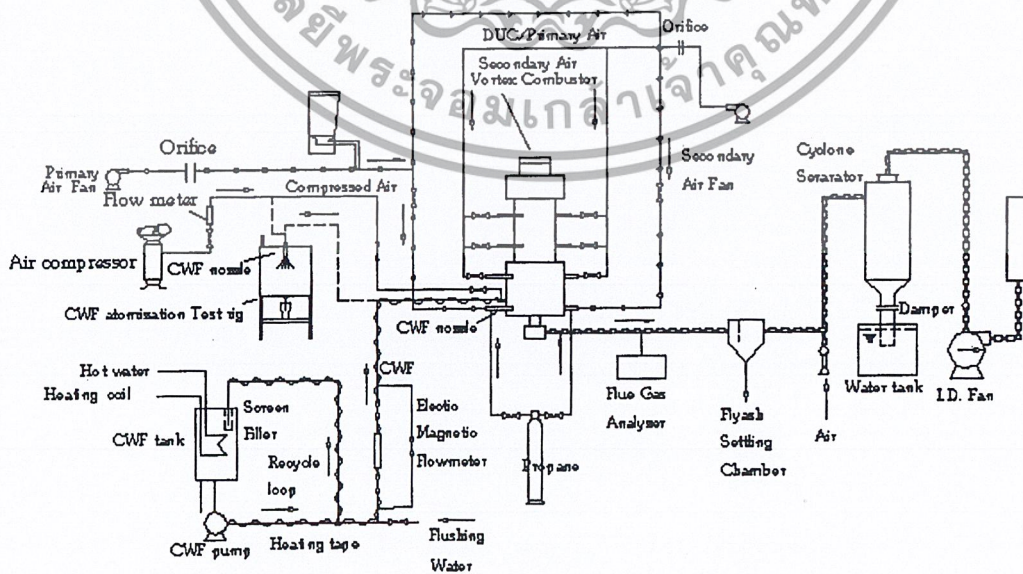
ใช้เชื้อเพลิงได้คุ้มค่า ยาวนาน ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง

ใช้กับเชื้อเพลิง (แห้ง) ได้หลายชนิด

2.9 งานวิจัยของ Tim T Fu and Sin Nich [4]

ได้ทำการทดสอบแบบ Vortex โดยใช้เชื้อเพลิง DUC (Dry Ultrafine Coal) และ CWF (Coal Water Fuel) อัตราความร้อน 0.15 MB/H

ระบบการทดสอบเตาเผาแบบ Vortex แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ระบบการทดลองแบบเตาเผาแบบ Vortex

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Parameter	Magnitude
Firing Rate, HB/H	0.15
Fuel Consumption Rate, lb/hr	17.6 (CWF) 12.7 (CUC)
Steam Generation, lb/hr	77
Exit Gas Temperature, F	1,500 - 1,700
Lower Chamber Temperature, F	1,700 - 2,200
Cooling Surface Area, in	540
Lower Combustion Chamber	
Inner Diameter, in	7.5
Inner Diameter, in	11.5
Inner Diameter, in	Refractory
Upper Combustion Chamber	
Inner Diameter, in	7.5
Inner Diameter, in	11.5
Inner Diameter, in	Carbon Steel
Center Tube	
Diameter, in	3.5
Thickness, in	0.25
Clearance to Top, in	5- 10
Material	Stainless Steel

ตารางที่ 2.3 Major dimension and design parameters

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 เชื้อเพลิงและการเผาไหม้

3.1.1 การแบ่งกลุ่มเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ คือ

- เชื้อเพลิงปฐมภูมิ (Primary fuel) คือเชื้อเพลิงที่ไม่ต้องผ่านการแปรรูปใดๆ ก่อนที่จะนำมาใช้ประโยชน์ ตัวอย่างเช่น ถ่านหิน (Coal), ไม้ (Wood), ปิโตรเลียมดิบ (Crude petroleum) และก๊าซธรรมชาติ

- เชื้อเพลิงทุติยภูมิ (Secondary fuel) คือเชื้อเพลิงที่ต้องผ่าน กระบวนการแปรรูปต่างๆ ก่อนที่จะนำมาใช้งาน ตัวอย่างเช่น ถ่านโค้ก (coke), น้ำมันสังเคราะห์จากถ่านหิน และก๊าซสังเคราะห์จากถ่านหิน

นอกจากแบ่งเชื้อเพลิงที่กล่าวมายังสามารถแบ่งได้ตาม สถานะของ เชื้อเพลิง คือของแข็ง ของเหลวและก๊าซ ดังตัวอย่างดังนี้

ลักษณะของเชื้อเพลิง	เชื้อเพลิงธรรมชาติ	เชื้อเพลิงสังเคราะห์
ของแข็ง	ไม้ (Wood) พีท (Peat) ถ่านไม้ (Char coal) ลิกไนท์ (Lignite) หินน้ำมัน (Oil shale)	ชานอ้อย, ฟาง, แกลบ โค้ก (Coke) ถ่านหิน (Coal)
ของเหลว	น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum oil)	น้ำมันสังเคราะห์จากถ่านหิน น้ำมันหิน (Shale oil) ก๊าซโซลีนสังเคราะห์ ออลส์กอสอลล์
ก๊าซ	ก๊าซธรรมชาติ (Natural gas)	ก๊าซถ่านหินต่างๆ (Coal gas) โปรดิวเซอร์ก๊าซ (Producergas)

ตารางที่ 3.1 การแบ่งเชื้อเพลิงตามสถานะของเชื้อเพลิง

โดยส่วนใหญ่เชื้อเพลิงที่ใช้มีองค์ประกอบดังนี้ คือไฮโดรเจน (Hydrogen) และ คาร์บอน (Carbon) ซึ่งการวิเคราะห์ส่วนประกอบเหล่านี้ เราจะใช้วิธีวิเคราะห์แบบหน่วยน้ำหนัก (Ultimate analysis)

ถ่านหิน ธาตุส่วนใหญ่เป็น คาร์บอน ไฮโดรเจน และมีปริมาณซัลเฟอร์เล็กน้อย นอกจากนี้ยังประกอบด้วย ไนโตรเจน ความชื้นและขี้เถ้าจากการเผาไหม้ ตัวอย่างถ่านหิน ได้แก่ Antrocite, Bituminuse และ Lignite

น้ำมันปิโตรเลียมที่เป็นส่วนผสมของไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ Paraffins (C_nH_{2n+2}), Olefins, Naphthalenes (C_nH_{2n}) และ Aromstics (C_nH_{2n-n}) พวกไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ในธรรมชาติจะอยู่ในสภาพของเหลว มีบางชนิดอยู่ในสถานะก๊าซ เช่น Methane (CH_4)

ในกระบวนการเผาไหม้ปกติแล้วค่า Equivalence Ratio [9] จะใช้เป็นค่าที่แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี เรียกว่าอัตราส่วนผสมบาง (Lean) ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี เรียกว่าอัตราส่วนผสมหนา (Rich) และ ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณอากาศทางทฤษฎี เรียกว่า Stoichiometric ค่า Equivalence Ratio สามารถหาได้จาก

$$\Phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{stioc}}{\left(\frac{A}{F}\right)_{ac}} = \frac{\left(\frac{F}{A}\right)_{ac}}{\left(\frac{F}{A}\right)_{stioc}} \tag{3.1}$$

เมื่อ m_a คืออัตราการไหลของอากาศ (kg/min)
 m_f คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/min)

โดยสัดส่วนผสมจะเรียกว่า

Rich	เมื่อ	Φ	>	1
Stoichiometric	เมื่อ	Φ	=	1
Lean	เมื่อ	Φ	<	1

3.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของแกลบแข็ง [23]

แกลบข้าวเป็นผลพลอยได้ จากอุตสาหกรรมผลิตข้าวมีน้ำหนักร้อยละ 20 ของน้ำหนักข้าวเปลือก แต่ละปีมีการประมาณว่าประเทศไทยผลิตแกลบข้าวได้ปีละประมาณ 5 ล้านตัน ถ้าพิจารณาในระดับโลกจะมีแกลบประมาณปีละกว่า 60 ล้านตัน ที่นำมาใช้ประโยชน์ได้ (Phichitvorapanich 1987) พื้นที่ผิวปรากฏ (apprent surface area) ของแกลบข้าวเป็นพื้นผิวที่ไม่พรุน (Nonporous rich husk) วัดได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและเครื่อง Image analyzer ได้เท่ากับ $3855 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ สำหรับแกลบที่ถูกอัดเป็นก้อน (Pellet) แกลบข้าวจากเมล็ดข้าว 1 เมล็ด มีน้ำหนักระหว่าง 2.9 ถึง 3.6 mg น้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 3.1 mg

ข้าวเปลือก 100 kg เมื่อผ่านการสี สามารถแยกสัดส่วนของข้าวเปลือกได้ดังต่อไปนี้ [17]

- ข้าวสาร	44.14 kg
- ข้าวอ่อน	18.04 kg
- ปลายข้าว	2.68 kg
- รำละเอียด	7.20 kg
- รำหยาบ	1.79 kg
- แกลบ	26.12 kg

คุณสมบัติทางเคมีของแกลบ [17] พิจารณาแกลบข้าวในรูปของเชื้อเพลิงจะได้คุณลักษณะทางเคมีกายภาพ ดังตารางที่ 3.2

การใช้แกลบข้าวเป็นเชื้อเพลิง แกลบข้าวให้พลังงานได้ประมาณ 13.4 MJ/kg พลังงานนี้ผลิตไอน้ำได้ 2.5 kg โรงสีข้าวที่สีข้าวได้ 1000 kg/h จะมีแกลบข้าวมากพอที่จะผลิตไอน้ำเพื่อสีข้าว และมีแกลบเหลืออีก 20% สำหรับให้พลังงานในการอบข้าวและนึ่งข้าว ประเทศไทยมีโรงสีข้าวที่ใช้พลังงานไอน้ำจากแกลบข้าวในการสีข้าวอยู่ร้อยละ 7 โดยเครื่องชนิดไอน้ำที่มีขนาดใหญ่กว่า 22 kW (30 แรงม้า) และร้อยละ 93 เป็นโรงสีข้าวขนาดเล็กกว่า 22 kW (30 แรงม้า) ที่ไม่ใช้แกลบข้าวเป็นเชื้อเพลิง

สาร	%	MW	จำนวนโมล
คาร์บอนไดออกไซด์ C	38	12	3.167
ไฮโดรเจน H	5.7	1	5.7
ออกซิเจน O ₂	41.6	16	2.6
ไนโตรเจน N ₂	0.69	14	0.049
ซัลเฟอร์ S	0.06	32	0.001875
ขี้เถ้า Ash	14	-	-

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงรวม (แกลบ)

ในปัจจุบันได้ศึกษาวิจัยพัฒนารูปแบบเตาเผาแกลบชนิดใหม่ เช่น แบบ Cyclone fluidized bed เป็นต้น การเผาแกลบข้าวที่สภาวะที่ถูกควบคุม (700 – 800 °C) นอกจากได้พลังงานความร้อนยังได้ขี้เถ้าแกลบที่ประกอบด้วยซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) ที่ไวต่อปฏิกิริยามาก เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุดิบ หรับการผลิตวัสดุเชื่อมประสาน

3.1.3 การศึกษาการนำเอาแกลบมาเป็นเชื้อเพลิง [14]

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาในเรื่องการนำแกลบมาเป็นเชื้อเพลิง และได้ค้นคว้าหารูปแบบของเตาเผาแกลบขึ้นมามากมายทั้งในประเทศและต่างประเทศ

Xuan N.V. ได้ทำการศึกษาเตาเผาแกลบ 2 ชนิด ในประเทศเวียดนาม แบบแรกคือ Inclined grate และแบบที่สองคือ Vortex type

เตาเผาแบบแรกจะเรียกว่า IGC (Inclined Grate and Cylindrical Combustion Chamber) ลักษณะเป็นกล่อง (Box) อยู่ทางด้านล่างที่ทำจากอิฐทนไฟ ในส่วนนี้จะเป็นห้องเผาไหม้ด้วย ภายในห้องเผาไหม้จะมีการวางตะแกรงเอียงซึ่งทำจากเหล็กหล่อ ส่วนบนจะเป็นเหล็กทรงกระบอก แกลบจะผ่านทางที่บรรจุแกลบ ที่ติดกับตัวเตาแล้วผ่านผิวหน้าของตะแกรงในห้องเผาไหม้ ส่วนอากาศจะเข้ามาทางด้านล่างของตะแกรงและเกิด การเผาไหม้ที่หน้าตะแกรงและแก๊สร้อนที่ได้จะถูกดูดโดยพัดลมผ่านท่อออกไป

เตาเผาแบบที่ 2 PNF (Pneumatic - Fed Furnace) มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ห้องเผาไหม้และระบบป้อนแกลบ โดยลักษณะโครงสร้างเตาล้ำกับแบบ IGC. แต่ต่างกันที่แกลบจะเข้ามาทางกรวยที่มี Vibration Motor และผ่านมาที่ทางเข้าอากาศปฐมภูมิ (primary air) อากาศและแกลบถูกเป่าโดยพัดลมเป่า (blower) ไปยังห้องเผาไหม้ โดยส่งเข้าไปในแนวสัมผัส (Tangent) แกลบที่ถูกเผาไหม้จะตกลงด้านล่างอากาศร้อนจะลอยขึ้นด้านบนอากาศทุติยภูมิ (Secondary air) ถูกส่งมาในแนวสัมผัสด้วย ซึ่งเป็นตัวจับฝุ่นเพื่อให้อากาศร้อนมีความสะอาดมากขึ้น และอากาศร้อนจะถูกดูดโดยพัดลมผ่านท่อด้านบนออกไป ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของเตาเผาจะใช้ท่อลมยาว 6 m เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 m และติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิ ความดัน และอุปกรณ์วิเคราะห์แก๊ส จากการทดลองของเตาทั้งสองแบบจะพบว่า เตาแบบที่ 1 ในการอบข้าวเปลือก 367 kg/h ใช้แกลบในการเผาไหม้ 20 - 25 kg/h ประสิทธิภาพ 70 - 75 % ซึ่งจะลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 26 % ลงเหลือ 14 % มาตรฐานเปียก และอุณหภูมิในการอบแห้งเฉลี่ย 42 °C เตาแบบที่ 2 อบข้าวเปลือก 2 tons/day ใช้แกลบประมาณ 10 - 20 kg/h มีประสิทธิภาพ 70 - 84 % อุณหภูมิในการอบแห้ง 29 - 30 °C ± 1 °C และเตาแบบที่ 2 นี้จะให้อากาศร้อนที่สะอาดกว่าเตาแบบแรก

Singh et.al., ออกแบบเตาเผาไซโคลน ใช้ในการอบข้าวเปลือก 1 ตัน ให้ลดความชื้นจาก 35 % ลดลงเหลือ 14 % มาตรฐานแห้ง โดยเตามีลักษณะรูปทรงกระบอก และรูปกรวยด้านล่าง และมี Cyclone chamber อยู่ด้านล่าง เตามีความจุ 0.34 m³ มีท่อที่ทางออกที่ตอนล่างของรูปกรวยเป็นทางออกของแก๊สเชื้อเพลิง และมีแผ่นเหล็กเจาะรูติดกับทางออกเพื่อคัดขี้เถ้าในกรวยและปล่อยออกเป็นวงๆ ทางช่องด้านข้างของกรวย Cyclone chamber จะประกอบด้วย Cylinder ที่มีความยาว 70 cm. กว้าง 40 cm. พร้อมทำมุมกับตัวเตา 30 องศา ในการปฏิบัติงานของเตาเผาแกลบ ความเร็วของอากาศจะถูกกำหนดโดย Pitot tube ซึ่งจะติดอยู่ในท่อที่ติดกับพัดลมเป่า เพื่อคำนวณความจุของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ส่วนตัวป้อนแกลบจะติดกับรางยาวและสั่นได้โดย Vibratory feeder ในการทดลองใช้เทอร์โมคัปเปิล (0 - 1200 °C) วัดอุณหภูมิภายในและภายนอกผิวของเตาจำนวน 6 จุด และการวิเคราะห์แก๊สในท่อโดยเครื่องมือ Orsat gas apparatus เพื่อที่จะหาประสิทธิภาพเตาเผา ในการทดลองนี้ใช้อัตราการไหลของอากาศ 3 ค่าคือ 1.78, 2.25 และ 2.80 m³/min (60, 80 และ 100 cfm) และ 6 อัตราการป้อนแกลบ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 kg/h เมื่อนำไปคำนวณและวิเคราะห์พบว่า ที่อัตราการป้อนแกลบและอากาศที่ต่างกันจะทำให้ประสิทธิภาพ ของเตาเผาต่างกัน ประสิทธิภาพสูงสุด (80%) จะอยู่ที่อัตราการป้อนแกลบ 20 kg/h และอัตราการไหลของอากาศ 168 m³/h (100 cfm) และอุณหภูมิในเตาประมาณ 100 C ซึ่งถ้าจะมีปัญหาอย่างต่อเนื่องในการออกแบบเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Yamashita ได้วิจัยแหล่งพลังงานจากธรรมชาติที่มีในโลก บางชนิดก็ไม่สามารถ นำมาใช้ประโยชน์อย่างแท้จริงได้ แต่กลับสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย เช่น นำมาเป็นแหล่งพลังงานความร้อน เตาเผาแกลบที่นำมาใช้กันอยู่หลายปีในประเทศญี่ปุ่น และความหนาแน่นของฝุ่นที่สร้างปัญหาให้กับระบบ ในการที่จะให้อากาศและขี้เถ้า เข้า - ออก ในปริมาณที่ต้องการออกแบบและใช้แรงของอากาศให้หมุนรอบๆ ไชโคลน

3.2 เตาเผาที่ใช้กับเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ในปัจจุบัน

เตาเผาที่ใช้เชื้อเพลิงแข็งในปัจจุบันมีหลายชนิดด้วยกันซึ่งมีลักษณะต่างๆ กันไป ในการพัฒนารูปแบบและลักษณะการเผาไหม้จึงนำเตาเผาที่มีการใช้และพัฒนาอยู่ในปัจจุบันมาเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพ และข้อดี ข้อเสีย ของเตาแต่ละชนิด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการหาลักษณะที่ดีของเตา และรวบรวมข้อดีมาในการออกแบบสร้างเตาขึ้น เตาเผาแบบ Vortex ก็เป็นอีกชนิดหนึ่งที่มีการพัฒนาขึ้น โดยการประยุกต์มาจากเตาแบบไชโคลน ที่มีลักษณะการหมุนวน (Seirl flow) ของของไหลและเชื้อเพลิง

เตาเผาแบบ Vortex เป็นอุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิง โดยใช้อากาศปฐมภูมิและอากาศส่วนที่ 2 (ทุติยภูมิ) อากาศปฐมภูมิจะเป็นตัวพาเชื้อเพลิง ซึ่งถูกบังคับมายัง Feed screw เข้ายังห้องเผาไหม้ในแนวผิวสัมผัสกับผิวด้านใน แล้วจะไหลในลักษณะหมุนวนเป็นเกลียว (Helical Motion) ขึ้นสู่ด้านบนห้องเผาไหม้ภายใต้อิทธิพลของแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) ของไหลจะไหลวนพาเชื้อเพลิงไปในทิศทางเดียวกันตามแนวแกนสู่ทางออก ซึ่งมีลักษณะเป็นแกนที่ออกกลางห้องเผาไหม้ ขณะที่เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันและส่วตัวขึ้นสู่ด้านบนนั้นจะมีอากาศส่วนที่ 2 (ทุติยภูมิ) ออกจากหัวฉีดที่ฝังเข้าไปข้างเตาในตำแหน่งต่างๆ ช่วยในการเพิ่มเกลียวลักษณะเกลียวจะถี่ขึ้น ข้อดีคือ ช่วยเพิ่มเวลาในการเผาไหม้ (Residence time) ในเวลาที่เผาไหม้สมบูรณ์ เนื่องจากการไหลวน (Swirl flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence flow) ซึ่งเอื้ออำนวยต่อการคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิง

3.2.1 เตาเผาไชโคลน (Cyclone Furnaces)

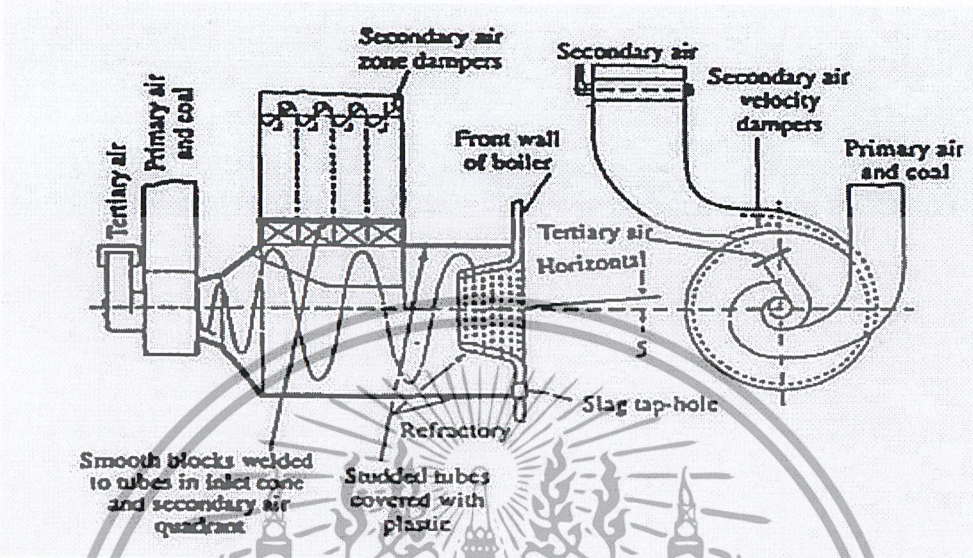
การเผาไหม้ในเตาเผาแบบไชโคลน นำมาใช้ในราวปลายคริสต์ทศวรรษ 1930 นับเป็นระบบเผาไหม้ถ่านหินระบบที่สามที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมา เตาเผาไชโคลนได้รับการออกแบบจากแนวคิด ที่ต้องการใช้กับถ่านหินทุกชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ่านหินเกรดต่ำ จึงเป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน เตาลักษณะนี้เผาถ่านหินที่มีปริมาณขี้เถ้าสูงและอุณหภูมิอ่อนตัวของขี้เถ้าที่ $1,425^{\circ}\text{C}$ หรือต่ำกว่า เมื่อเทียบกับระบบถ่านหินบดละเอียด ปัจจุบันเตาชนิดนี้ถูกนำมาพัฒนาดัดแปลงใช้กับเชื้อเพลิงชนิดอื่น เช่น แกลบ, ขี้เลื่อย

ข้อดี

1. ปริมาณฝุ่นขี้เถ้าในการสันดาปน้อย
2. ขนาดของเตามีขนาดเล็ก
3. ราคาในการเตรียมเชื้อเพลิงต่ำ

ข้อเสีย

1. ต้องใช้ความดันของพัดลมเป่าสูงกว่า
2. การรวมตัวออกไซด์ของไนโตรเจน Nox เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นมลภาวะในกระบวนการสันดาป



รูปที่ 3.1 เตาเผาไซโคลน

3.2.2 เตาเผา Fluidized-Bed (Fluidized – Bed Combutor)

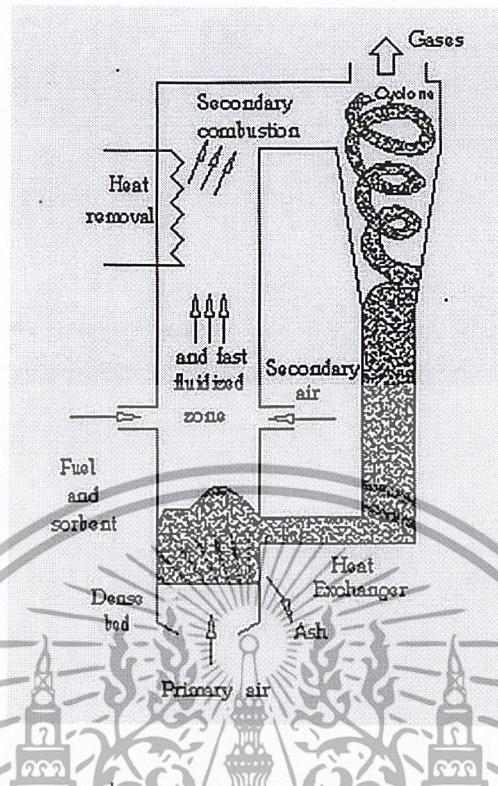
เป็นแบบล่าสุดที่นำมาใช้ได้ไม่นานนี้ เชื้อเพลิงจะถูกพ่นเข้าไปให้แผ่กระจายตลอดช่วงตะแกรงจ่ายอากาศ อากาศสันดาปถูกเป่าผ่านตะแกรงออกมา โดยมีความเร็วสูงซึ่งเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงไหลแบบของไหล คือ ทำให้มันลอยขึ้นในขณะเผาไหม้ สำหรับคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้จะถูกส่งเก็บไว้ในเครื่องแยกไซโคลน (Cyclone Separator) เพื่อส่งกลับให้เกิดการสันดาปอีกครั้งหนึ่ง

ข้อดี

1. สามารถกำจัดกำมะถันจากเชื้อเพลิงระหว่างการสันดาป การกำจัดกำมะถันที่ได้ผล คือ เพิ่มปูนขาวโดยตรงสู่เตาเผา
2. เตาไหม้สมบูรณ์
3. ประหยัด
4. มีการกำจัด SO_2 ออกจากไอเสียใช้ดรัมเบอร์จำกัด
5. มีการสันดาปที่อุณหภูมิต่ำ
6. ประหยัดวัสดุก่อสร้าง

ข้อเสีย

1. การป้อนถ่านหินและปูนขาวเข้าสู่เบดร่วมกันยังมีปัญหาอยู่



รูปที่ 3.2 Fluidized bed combustor

3.2.3 เตาแบบตะกรับ

เตาชนิดนี้มีใช้อยู่กันในโรงสีข้าว โดยใช้ถกบเป็นเชื้อเพลิง ตะกรับที่ใช้มี 2 แบบ

- แบบ Flat grate
- แบบขั้นบันไดเอียงเป็นมุม (Inclined step grate)

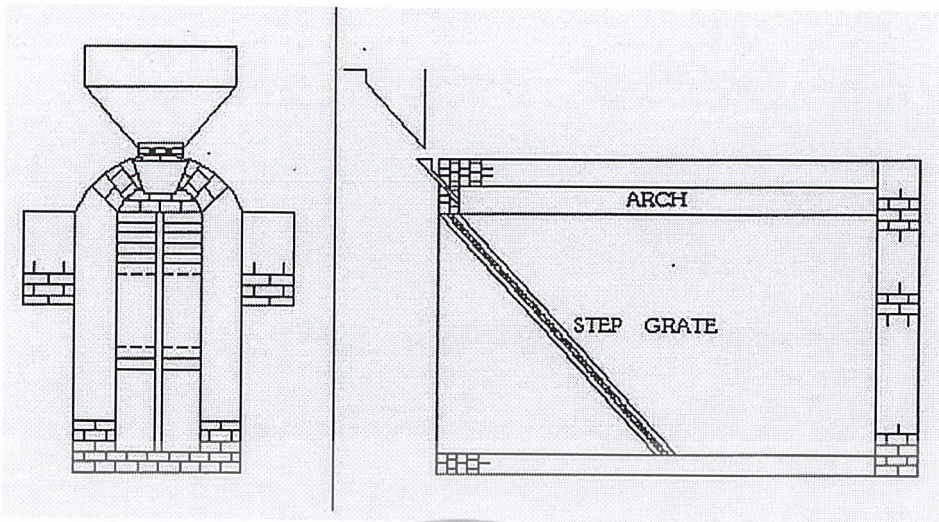
เตาเผาแบบนี้เชื้อเพลิงจะไหลออกมาจากตะกรับเอียงเป็นขั้นบันได และเกิดการเผาไหม้โดยการเผาภายในเตาซึ่งเป็นการก่อโดยใช้อิฐ และซีเมนต์ไหลลงสู่ด้านล่างของตะกรับ

ข้อดี

1. ราคาถูก
2. โครงสร้างไม่ซับซ้อน
3. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานถูก

ข้อเสีย

1. ประสิทธิภาพต่ำ
2. เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ไม่หมด
3. ต้องใช้คนเขี่ยซีเมนต์ออกจากเตา



รูปที่ 3.3 เตาเผาแกลบแบบ Inclined step grate

3.2.4 เตาเผาแบบวอร์เทก (Vortex Combustor)

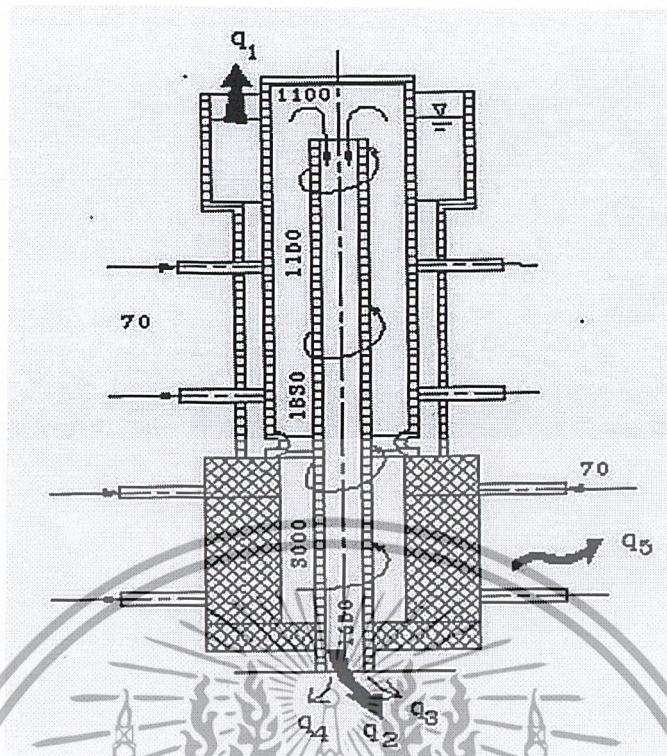
เตาชนิดนี้ได้ถูกพัฒนาจากเตาเผาแบบไซโคลน (Cyclone Furnaces) มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีช่องอากาศตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงที่ผนังของห้องเผาไหม้ เพื่อช่วยให้เกิดการคลุกเคล้าและการกระจายตัวระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นด้วย ซึ่งเตาแบบนี้เพิ่งได้รับการพัฒนาเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา ในต่างประเทศทำการวิจัยเตาชนิดนี้โดยการใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง ลักษณะของเตาเผาตามรูปที่ 3.10

ข้อดี

1. ประสิทธิภาพสูง
2. ผลในการเผาไหม้สมบูรณ์ให้ปริมาณขี้เถ้าน้อย
3. ราคาในการเตรียมเชื้อเพลิงต่ำ
4. ขนาดของเตามีขนาดเล็ก

ข้อเสีย

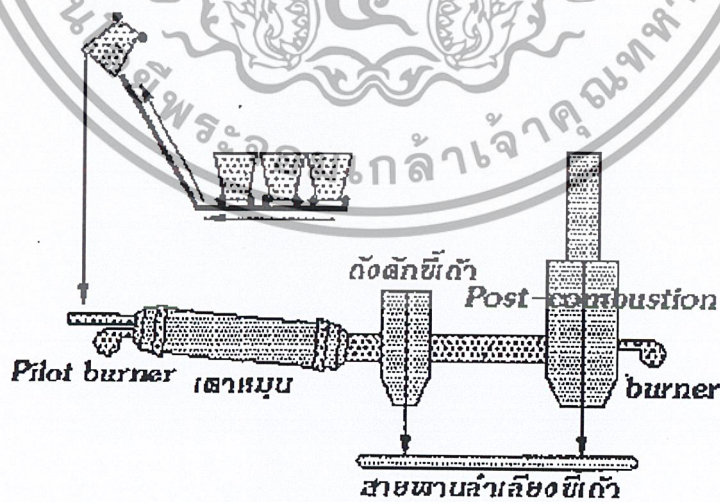
1. ใช้แรงลมในการป้อนเชื้อเพลิงมาก
2. ใช้อุปกรณ์มากในการเผา
3. ในช่วงเผาไหม้ที่ไม่เหมาะสมควบคุมยาก เพราะมีการไหลแบบปั่นป่วน



รูปที่ 3.4 เตาเผาแบบ Vortex

3.2.5 หลักการของเตาเผาแบบหมุน

เดิมทีเตาเผาแบบหมุนนิยมใช้ในการเผาปูนซีเมนต์ เนื่องจากเป็นเตาที่สามารถใช้กังหันที่มีอุณหภูมิสูง และการควบคุมการเผาไหม้ทำได้ง่าย ระบบเตาเผาแบบหมุนสามารถแสดงได้ดังรูป 3.11



ระบบเตาเผาขยะแบบหมุน

รูปที่ 3.5 ระบบเตาเผาขยะแบบหมุน

ระบบนี้ประกอบไปด้วยเตาหมุน (Rotary Kiln) ซึ่งเป็นเตาเผารูปร่างทรงกระบอกหมุนได้รอบแกน ทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้แรก (Primary combustion chamber) กระบวนการความร้อนที่เกิดขึ้นในเตาเผาหมุนนี้เป็นกระบวนการ Pyrolysis ซึ่งจะทำให้ขี้เถ้าส่วนที่เป็นของแข็งถูกเผาไหม้ทันที ในขณะที่ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้จะไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ส่วนที่ 2 เรียกว่า Post – combustion chamber กระบวนการที่ห้องเผาไหม้เป็นการเผาไหม้ในภาคของวงก๊าซและอุณหภูมิยังไม่สมบูรณ์ อุณหภูมิในห้องเผาไหม้จะสูงถึง 1200 °C ในขณะที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้แรกจะอยู่ที่ประมาณ 700 °C ส่วนขี้เถ้าจากการเผาไหม้ส่วนใหญ่ถูกดักไว้ในถังระหว่างเตาหมุนและห้อง Post – combustion

3.3 ปฏิกริยาริยาเคมีของการเผาไหม้ [21]

การเผาไหม้เป็นปฏิกริยาการรวมตัวของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็วพร้อมกับการเกิดลูกไหม้และคายความร้อน ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่ไม่ใช่ออกซิเจนบริสุทธิ์ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง จะใช้อากาศที่หาได้ในราคาถูกแทนในอากาศ จะมีก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ก๊าซอื่นมีน้อยมากจนไม่สำคัญ ออกซิเจนจะมีอยู่ในอากาศร้อยละ 21 และไนโตรเจนร้อยละ 79 โดยปริมาตร หรือมีออกซิเจนประมาณ ร้อยละ 23 และไนโตรเจนประมาณร้อยละ 77 โดยน้ำหนัก

เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ประกอบด้วย คาร์บอน, ไนโตรเจน และปริมาณธาตุอื่นปนอยู่บ้าง เช่น กำมะถันเมื่อเผาไหม้จะเกิดปฏิกริยาเคมีดังสมการต่อไปนี้



3.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ [21]

ต้องมีสัดส่วนที่พอดีกันระหว่าง ปริมาณเชื้อเพลิงกับปริมาณออกซิเจนตามสมการการเผาไหม้ ปริมาณของอากาศตามทฤษฎี (Theoretical air) คือปริมาณน้อยที่สุดของ อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์จนคาร์บอน ไนโตรเจน และกำมะถัน เปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, น้ำ และ ก๊าซซัลเฟอร์ไดร็อกไซด์ ในทางปฏิบัติจริงของอากาศที่ต้องการตามทฤษฎีไม่พอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ การสันดาปที่ไม่สมบูรณ์การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอน ในก๊าซทิ้ง

การผสมหรือการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน คือการที่อุณหภูมิของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซ การเผาไหม้จะเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าเป็นของแข็งหรือของเหลวการผสมจะยุ่งยากขึ้น ในกรณีที่เชื้อเพลิงส่วนใหญ่เป็นของเหลว จะมีการทำให้อนุภาคเล็ก โดยใช้หัวพ่นซึ่งจะทำให้รวมตัวกับอากาศได้ง่ายแล้วจึงทำการเผาไหม้ และการเผาไหม้จะเกิดได้ดีเมื่อเชื้อเพลิงเป็นก๊าซ

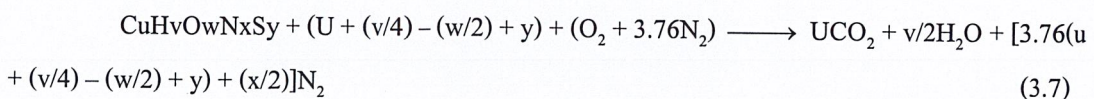
อุณหภูมิที่สูงพอต่อการเผาไหม้ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหรือการรวมตัวกันทาง เคมีของเชื้อเพลิงกับอากาศจะขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิ ตอนแรกจะเกิดช้าและเกิดต่อไปเรื่อยๆ ความร้อนที่ได้จะเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้สูงขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้สูงขึ้นด้วยฉะนั้น การเผาไหม้แบบเกิดขึ้นเองและต่อเนื่อง (Spontaneous Combustion) ต้องมีความร้อนจากภายนอกช่วยเพิ่มปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนมากขึ้นจนอุณหภูมิสูงพอต่อการเผาไหม้แบบต่อเนื่อง โดยปกติแล้วอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้รวดเร็ว แต่อุณหภูมิจะสูงได้มากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ สามารถให้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นสารที่ไม่ต้องการได้ เช่น สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน หรือ ถ้าหลอมตัวเป็นซิลิโหล (Slag) เกาะติดอยู่บนผนังเหล็กที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดการกัดกร่อนได้

เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาควรรานพอที่จะให้เกิดการเผาไหม้มากที่สุด การเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์เป็นไปได้ยากเพราะต้องใช้เวลาาน การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งประกอบด้วย 4 ขั้นตอน

1. เริ่มด้วยออกซิเจนสัมผัสกับผิวคาร์บอน และเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และเกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ หลังจากนั้นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
2. หลังจากเหตุดังกล่าวจะเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้โดยบดเชื้อเพลิงแข็งให้เล็กลงซึ่ง เป็นการเพิ่มผิวสัมผัสให้มากขึ้น เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง จะเกิดการผสมแบบ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heter Wenmus) ให้พื้นผิวที่สัมผัสกับออกซิเจนจำกัด ฉะนั้นการออกแบบระบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งควรคำนึงถึงเหตุผลดังนี้
3. ควรมีพื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับปฏิกิริยามากที่สุดทำได้โดย บดเชื้อเพลิงให้เล็กลงเพื่อ เพิ่มพื้นที่ผิว หรือก๊าซในเตาเคลื่อนไหวน้อยอย่างรุนแรง เพื่อกวาดพื้นผิวของเชื้อเพลิงแข็งไม่ให้มีเลื้อเกาะอยู่
4. อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนพื้นผิวของเชื้อเพลิง ที่สัมผัสกับอากาศ จึงต้องมีเวลาในการเผาไหม้อย่างเพียงพอ เพื่อให้เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้หมด อุณหภูมิ ในการเผาไหม้ต้องสูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง

3.3.2 การเผาไหม้แบบสตอยคิโอเมตริก

เชื้อเพลิงแข็งสามารถเขียนเป็นสูตรทางเคมีพื้นฐานได้แก่ $CuHvOwSy$ ปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบสตอยคิโอเมตริกกระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ สามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังสมการที่ 3.5 เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการจะได้ปริมาณอากาศพอดีในการเผาไหม้ตามทฤษฎี

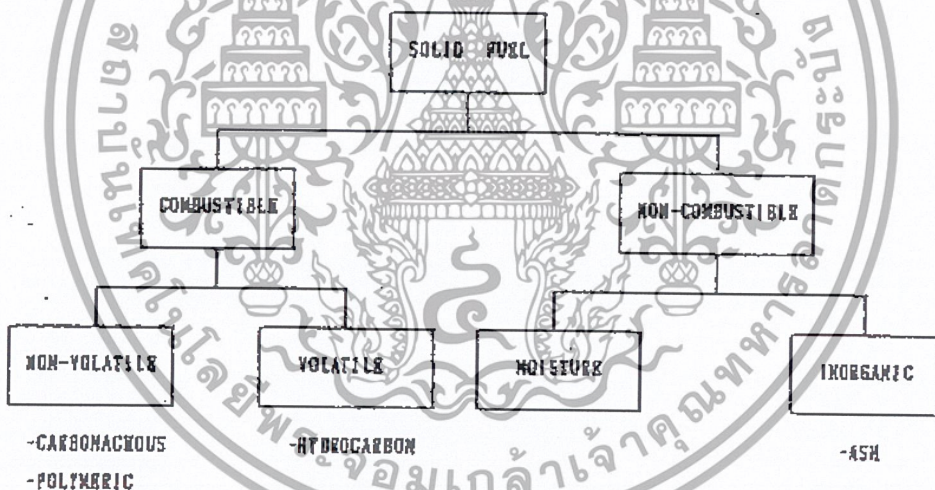


3.3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งที่ใช้อยู่ทั่วไป มีหลายชนิด เช่น ถ่านหิน ฟืน ชี๊เลื่อย แกลบ เป็นต้น ขบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง จะมีความแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลวและก๊าซ เนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งมักเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่างๆ ภายในเชื้อเพลิงแข็งยังไม่แน่นอนนอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งยังขึ้นอยู่กับ ขนาดของเชื้อเพลิงแข็งด้วย เชื้อเพลิงประกอบด้วยสารต่างๆ ซึ่งมีทั้งที่เผาไหม้ได้ และเผาไหม้ไม่ได้ดังแสดงรูปที่ 3.6

สารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้เรียกว่า สารเฉื่อย (Inert) สารเฉื่อยนี้เปรียบเทียบกับก๊าซไนโตรเจนในอากาศที่ไม่ช่วยให้เกิดการสันดาป แต่ในบางครั้งสารเฉื่อยเหล่านี้ก็อาจเกิดปฏิกิริยาได้ในบางกระบวนการเผาไหม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงๆ สารเฉื่อยที่ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ความชื้นและสารอนินทรีย์ที่ประกอบเป็นชี๊เถ้าสารอนินทรีย์เหล่านี้ส่วนมาจะเป็นสารจำพวกซิลิเกต (Silicats) ซัลไฟด์

(Sulfides) และเกลือของฮาโลเจน (Halogen Salts) เป็นต้น เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง สารเหล่านี้จะกลายเป็นชี๊เถ้า บางส่วนจะตกอยู่ในห้องเผาไหม้ บางส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะปลิวออกไปกับแก๊สเสียหรือเรียกว่า เถ้าปลิว (Fly Ash)

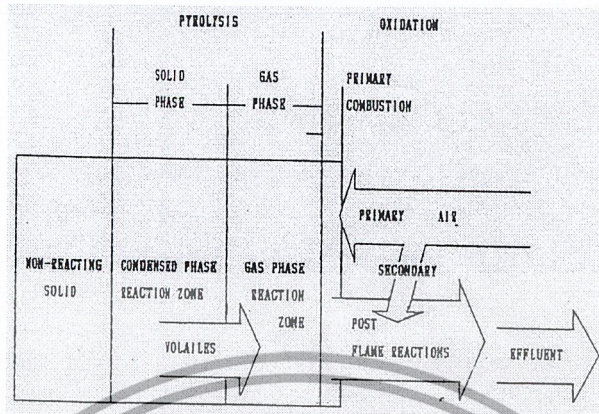


รูปที่ 3.6 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งส่วนที่เผาไหม้ได้สามารถแยกเป็นส่วนที่ระเหยได้ (Volatile) และส่วนที่ไม่ระเหย (Non volatile) ในส่วนที่ไม่ระเหยนี้ประกอบด้วย คาร์บอน สารประกอบของคาร์บอน C_xH_y โดยที่ค่า x มากกว่าค่า y มากๆ หรือเป็นสารที่น้ำหนักโมเลกุลสูงนั่นเอง ส่วนสารระเหยที่ได้ในที่นี้จะหมายถึงสารประกอบที่ระเหยในช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้ ซึ่งจะประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่น้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ หลักการในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นดังรูปที่ 3.2

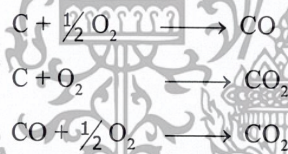
โดยจะเกิดกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ในช่วงของคอนเดนส์เฟส (Condensed phase) และแก๊ส เฟส (Gas phase) ในขบวนการไพโรไลซิส สารที่ระเหยได้ในเชื้อเพลิงจะระเหยออกมาจากผิว

ของอนุภาคของเชื้อเพลิงแข็ง และผสมกับอากาศรอบๆ เกิดการเผาไหม้ขึ้น ซึ่งเรียกว่า การเผาไหม้ช่วงแรก (Primary Combustion) หลังจากการเผาไหม้มีส่วนที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เมื่อมาพบกับอากาศส่วนที่สอง

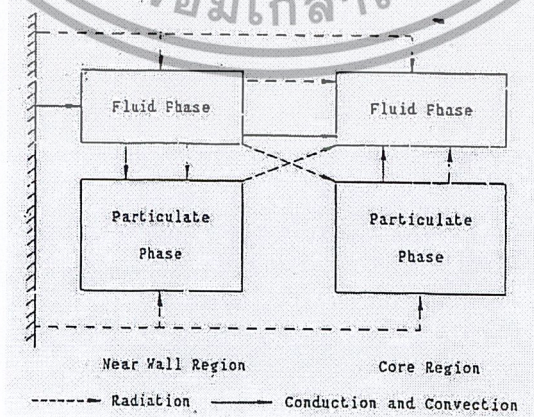


รูปที่ 3.7 ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

ในส่วนของสารที่ไม่ระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง เช่น คาร์บอน เมื่อเกิดขบวนการเผาไหม้ ออกซิเจน จะเข้าไปสัมผัสกับผิวคาร์บอน ตามขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนดังนี้



อัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอน เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของคาร์บอนมากที่สุด คือ คาร์บอนได้รับการถ่ายเทความร้อน ตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงกลไกการถ่ายเทความร้อน

โดนการแผ่รังสี จัดเป็นกลไกที่สำคัญที่สุด ถ้า T_w , T_s คือ อุณหภูมิรอบผิวและที่ผิวตามลำดับ จะได้ฟลักการแผ่รังสี q_{ra} คือ

$$q_{ra} = \sigma \epsilon (T_w^4 - T_s^4) \quad (3.7)$$

ซึ่ง σ เป็นค่าคงที่ Stefan – Boltzmann มีค่าเท่ากับ $5.76 \times 10^{-8} \text{ Wm}^2\text{k}^{-4}$ และ ϵ คือค่าการแผ่รังสี การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ จะมีบทบาทมากที่อุณหภูมิขนาดเล็กเมื่อ k เป็นค่าการนำความร้อน ดังนั้นฟลักซ์ของการนำความร้อน q_c หาได้จากสมการ

$$q_c = -k[dT/dr] \quad (3.8)$$

ในกรณีที่มีการป้อนเชื้อเพลิงคั้นค่าความเร็วสูงทำให้ค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Re) มีค่าสูงด้วย จะเกิดการถ่ายเทฟลักซ์ความร้อน q_v โดยการพาคือ

$$q_v = h(T_\infty - T_s) \quad (3.9)$$

โดยที่ h สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ขณะที่ T_∞ คือ อุณหภูมิแวดล้อม จากสมการที่ 3.6, 3.7 และ 3.8 สามารถจัดรูปของสมดุลของพลังงานได้

$$\sigma \epsilon (T_w^4 - T_s^4) - k[dT/dr] + h(T_\infty - T_s) = 0 \quad (3.10)$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเชื้อเพลิงของแข็ง และเชื้อเพลิงแข็งนี้จะได้รับการถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสีมากที่สุด

ในส่วนของสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เช่น ความชื้น ซึ่งจะระเหยออกไปในช่วงที่มีการเผาไหม้ และออกไปกับแก๊สเสีย ความชื้นเหล่านี้จะทำให้อุณหภูมิจการเผาไหม้ลดลงเพราะจะต้องสูญเสียความร้อน เพื่อทำให้ความชื้นขยายตัว และมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจการเผาไหม้ และสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้จำพวก สารอนินทรีย์ต่างๆ จะเกิดเป็นขี้เถ้า ถ้าอุณหภูมิจการเผาไหม้สูงมากๆ ขี้เถ้าเหล่านี้จะกลายเป็นสแลก (Slag) เช่น ซิลิเกต จะละลายเมื่ออุณหภูมิจการเผาไหม้สูงกว่า 1000°C เป็นต้น

3.3.4 อากาศส่วนเกิน อัตราส่วนผสม

อากาศส่วนเกิน (Excess air) เป็นปริมาณอากาศที่ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ แต่ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน เนื่องจากความร้อนสัมผัสเพิ่มขึ้น การสูญเสียความร้อนไปกับแก๊สเสีย จะมีค่าสูงขึ้นที่อุณหภูมิของแก๊สเสียสูง การที่ใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินมากขึ้น จะเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เผาไหม้ต่ำลง และแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ จะมีอุณหภูมิต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลให้มีการถ่ายเทความร้อน โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแผ่รังสีเกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ลดลง แต่จะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ดังนั้นการสูญเสียความร้อนในแก๊สเสีย เนื่องจากอากาศส่วนเกินจึงเป็นปริมาณที่ต้องพิจารณา ระดับปริมาณของอากาศส่วนเกินซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง โดยการพิจารณาถึงความสามารถในการผสม ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงภายในอุปกรณ์เผาไหม้

$$\% \text{ Excess air} = [W_A - W_T] W_T \times 100 \quad (3.11)$$

W_A หมายถึง ปริมาณอากาศทั้งหมดที่เกิดขึ้นจริง สำหรับการสันดาป

W_T หมายถึง ปริมาณอากาศทั้งหมดตามทฤษฎี สำหรับการสันดาปอย่างสมบูรณ์

อัตราส่วนผสม (Mixture ratio) การเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นไปได้ยากที่จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว การเผาไหม้จึงใช้อากาศเข้าทำปฏิกิริยา เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ จึงกำหนดให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิง และเชื้อเพลิงกับอากาศ เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนสมมูล ในการเผาไหม้จริง ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้อาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่า ทางทฤษฎี ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมบาง (Lean Mixture) ตรงกันข้าม ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมหนา (Rich Mixture) ดังนั้น จึงกำหนดให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง $(A/F)_{\text{stoic}} = (m_{\text{air}} / m_{\text{fuel}})_{\text{stoic}}$ และอัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio, Φ) จะหมายถึง

$$\Phi = \frac{(A/F)_{\text{Stoic}}}{(A/F)_{\text{Actual}}} = \frac{(F/A)_{\text{actual}}}{(F/A)_{\text{Stoic}}} \quad (3.12)$$

Fuel - rich mixtures, $\Phi > 1$ มีเชื้อเพลิงมาก อากาศน้อย

Stoichiometric mixtures, $\Phi = 1$ ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี

Fuel - lean mixtures, $\Phi < 1$ มีเชื้อเพลิงน้อย อากาศมาก

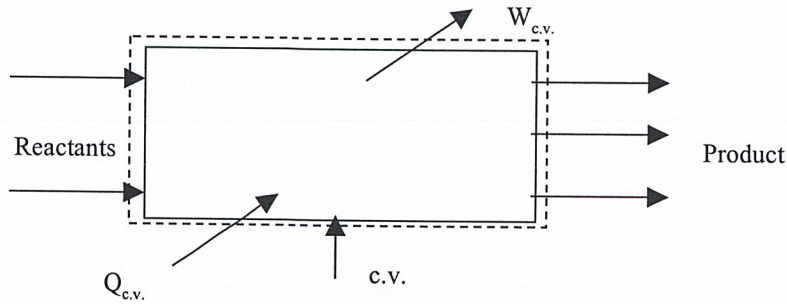
ในการเผาไหม้จริง ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้อาจจะมีมากกว่าหรือน้อยกว่าทางทฤษฎี ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี จะเรียกว่า อัตราส่วนผสมบาง (Lean mixtures) ตรงกันข้ามหากปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่า จะเรียกว่า อัตราส่วนผสมหนา (Rich mixtures)

3.3.5 ความร้อนของการสันดาป

สำหรับระบบปริมาตรควบคุมที่เกิดปฏิกิริยาเคมี ในสภาวะที่ไหลสม่ำเสมอตั้งรูปที่ 3.9

สมการพลังงานสามารถเขียนได้ดังนี้

$$H_R + Q_{cv} = H_P + W_{cv} \quad (3.13)$$



รูปที่ 3.9 ระบบปฏิกริยาเคมีในสภาวะการไหลอย่างสม่ำเสมอ

ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลและพลังงานศักย์ ค่า H_R และ H_p คือ เอนทัลปีของสารตั้งต้น และผลิตภัณฑ์ ตามลำดับ Q_{cv} คือ ความร้อนสุทธิของระบบ (ซึ่งปกติจะมีค่าเป็นลบเพราะความร้อนจากการสันดาปจะถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อม) และ W_{cv} คืองานสุทธิที่ทำโดยระบบสมการที่ 3.32 สามารถเขียนในรูปของ

$$\sum_R (m\bar{h}) + Q_{cv} = \sum_P (m\bar{h}) + W_{cv} \quad (3.14)$$

โดยที่ m คือมวล และ \bar{h} คือ เอนทัลปีจำเพาะ

สมการที่ 3.33 สามารถเขียนในรูปของ

$$\sum_R n_i (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_i + Q_{cv} = \sum_P n_e (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_e + W_{cv} \quad (3.15)$$

\bar{h}_f^0 = คือ Enthalpy of formation kJ/kg mol at $25^\circ\text{C}, 1 \text{ atm}$

\bar{h} = คือ Enthalpy at the specified state

\bar{h}^0 = คือ Enthalpy at $298 \text{ K}, 1 \text{ atm}$ (enthalpy of combustion)

สำหรับกระบวนการสันดาป เอนทัลปีของปฏิกริยา ปกติจะอ้างถึงเอนทัลปีของการสันดาป คือความแตกต่างระหว่าง เอนทัลปีของสารผลิตภัณฑ์ กับสารตั้งต้น เมื่อการสันดาปเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิและความดันสถานะหนึ่ง เขียนสมการได้ดังนี้

$$h_c = H_p - H_R \quad (3.16)$$

หรือ

$$h_c = \sum_P n_e (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_e - \sum_R n_i (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_i \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอนทัลปีของการสันดาป จะไม่ใช่เมื่อการสันดาปไม่สมบูรณ์ ในทางปฏิบัติจะใช้คุณสมบัติพื้นฐานแสดงถึงพลังงานเคมีของธาตุ กรือสารประกอบที่สถานะอ้างอิง คุณสมบัตินี้คือ เอนทัลปีของการจัดรูป (Enthalpy of formation, \bar{h}_f^0)

เทอมสามัญที่ใช้ร่วมกับการสันดาปของเชื้อเพลิง คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating value) ซึ่งแสดงถึงความร้อนทั้งหมดที่ปล่อยออกมา เมื่อเชื้อเพลิงเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในขบวนการเผาไหม้อย่างสม่ำเสมอ และสารผลิตภัณฑ์ มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้นกล่าวได้ว่า ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก็คือ ค่าสัมบูรณ์ของเอนทัลปีของการสันดาปเชื้อเพลิงนั่นเอง

$$\text{Heating value} = \text{lhcl} \text{ (kj/kg}_{\text{fuel}}) \quad (3.18)$$

ค่าความร้อนขึ้นอยู่กับสถานะของน้ำในผลิตภัณฑ์ ค่าความร้อนจะเรียกว่า higher heating value (HHV) เมื่อน้ำในผลิตภัณฑ์เป็นไอ ซึ่งค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$\text{HHV} = \text{LHV} + (N \bar{h}_{fg})_{\text{H}_2\text{O}} \text{ (kj/kg}_{\text{fuel}}) \quad (3.19)$$

เมื่อ N คือจำนวนโมลของน้ำในผลิตภัณฑ์และ \bar{h}_{fg} คือเอนทัลปีการกลายเป็นไอของไอน้ำที่อุณหภูมิจำเพาะ

3.3.6 อุณหภูมิเปลวไฟเชิงทฤษฎี

ถ้ากระบวนการสันดาปไม่สูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม (adiabatic) ไม่พิจารณางานระหว่างเกิดปฏิกิริยา หรือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ ดังนั้น สมการพลังงานการไหลอย่างสม่ำเสมอคือ

$$\text{HR} = \text{Hp} \quad (3.20)$$

$$\text{หรือ} \quad \sum_p n_e (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_e = \sum_R n_i (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_i \quad (3.21)$$

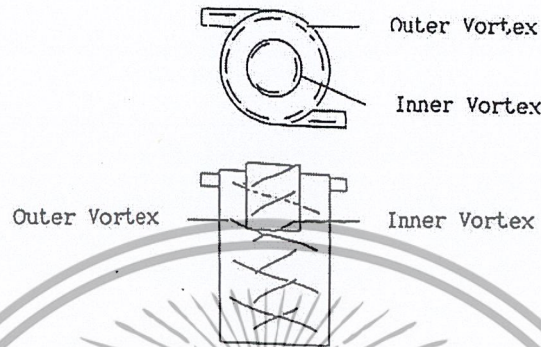
สำหรับการะบวนการนี้ อุณหภูมิของสารผลิตภัณฑ์ จะเรียกว่า adiabatic flame temperature อุณหภูมิเปลวไฟเชิงทฤษฎีจะมีค่าสูงสุดเมื่อการสันดาปสมบูรณ์, อากาศส่วนเกิน, การสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมจากผนัง และการสูญเสียความร้อน เนื่องจากอนุภาคที่แตกตัวในผลิตภัณฑ์

3.3.7 การไหลวน ตัวเลขการหมุนวน

- การไหลวนหากพิจารณาการเคลื่อนที่ของของไหล ที่มีอนุภาคของแข็งเจือปนเข้าภายในไซโคลนปรากฏว่ามีการไหลเวียน (Circulation Flow) รอบไซโคลน ลักษณะเป็นเกลียวหรือเป็นชุดสปริงสองวง คือ วงแรกเรียกว่า การไหลวนรอบนอก (Outer Vortex) มีทิศทางเวียนลงสู่ก้นไซโคลน ดังในภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบเขียวหรือเห็นที่ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 3.10 วงที่สองเรียกว่าการไหลวนภายใน (Inner Vortex) มีทิศทางเวียนออกสู่ปากไซโคลน นอกจากนี้ บริเวณก้นไซโคลนจะมีการไหลวนผสมกับการไหลเข้าสู่ศูนย์กลางเรียกว่า Sink Flow ซึ่งทำหน้าที่กวาดอนุภาคที่มีน้ำหนักมากออก ในขณะที่เดียวกันบริเวณเหนือผนังของไซโคลนก็มีการไหลวนผสมกับการไหลออกจากศูนย์กลาง เรียกว่า Sorce Flow ซึ่งทำหน้าที่ยกอนุภาคให้ลอยขึ้น



รูปที่ 3.10 แสดงการไหลวน

- ตัวเลขการหมุนวน (Swirl Number) การไหลแบบหมุนวนนี้ จะมีลักษณะการไหลเช่นเดียวกับการไหลของน้ำพัดผ่านใบพัดอัดเกิดจากการกระทำของฟลักซ์ของโมเมนตัมเชิงมุม G_e (Flux of Angular Momentum) และฟลักซ์ของโมเมนตัมในแนวแกน G_x (Flux of Axial Momentum) หรือแรงรุนแรงในแนวแกน (Axial Thrust)

$$G_e = 2 \int_1^2 \pi \rho V_z V_\theta r^2 dr = \text{constant} \quad (3.22)$$

$$G_x = 2 \int_1^2 \pi r (P + \rho V_z^2) dr = \text{constant} \quad (3.23)$$

โดยที่ V_z = ความเร็วในแนวแกน
 V_θ = ความเร็วในแนวสัมผัส
 P = ความดัน
 r = รัศมี

ปริมาณที่บ่งบอกคุณลักษณะของการไหล (Flow Characteristic) ดังกล่าว เรียกว่าตัวเลขการหมุนวน S^* เมื่อกำหนดให้ R คือรัศมีของการเผาไหม้แบบไซโคลน Beer และ Chigier [8] ได้ในนิยามไว้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S^* = \frac{G_e}{G_{xR}} \quad (3.24)$$

Styles ได้ให้นิยามของ S^* เป็นฟังก์ชัน (Function) ของรูปทรงห้องเผาไหม้แบบไซโคลน คือขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดรวม A_{iT} ของช่องทางเข้าในแนวสัมผัส ปากทางออก D_e และเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ ที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ [8] ไว้ดังนี้

$$S^* = \eta \frac{D_e D_o}{4A_{\pi}} \quad (3.25)$$

ความสามารถในการหมุนวนจะแสดงถึงความเข้มข้นของการหมุนวน (Swirl Intensity) ที่เกิดจากปลั๊กซ์ของโมเมนตัมเชิงมุมและปลั๊กซ์ของโมเมนตัมในแนวแกน ดังนั้น S^* เป็นตัวแปรสำคัญที่แสดงถึงคุณลักษณะการไหลและการเผาไหม้ กล่าวคือ ถ้า S^* มีค่ามากจะส่งผลให้ช่วงการเผาไหม้ยาวนาน ความเข้มข้นของการเผาไหม้ (Combustion Intensity) สูงขึ้น และป้องกันเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดจนเกินไป โดยทั่วไปแล้วห้องเผาไหม้แบบไซโคลนชนิดต่างๆ มีค่าของ S^* ประมาณ 6 ถึง 30 [8]

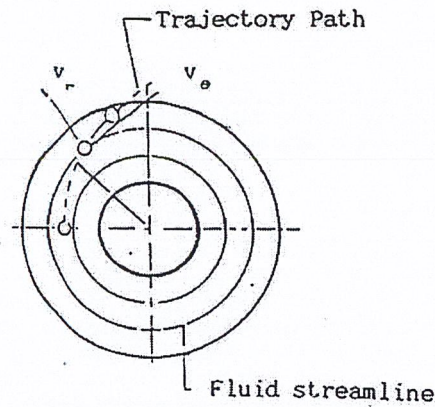
3.3.8 แรงหนีศูนย์กลาง แรงดุด

- แรงหนีศูนย์กลาง พิจารณาการเคลื่อนที่ของของไหลนำพอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D_p และมวล m_p เข้าไซโคลนในแนวสัมผัส ดังรูปที่ 3.15 ขณะที่ของไหลเคลื่อนที่ตามแนวเส้นรอบวงนั้น แต่อนุภาคเคลื่อนที่ตามวิถีโค้ง (Trajectory Path) ที่เบี่ยงเบนจากแนวของไหล ที่รัศมี r ใดๆ ของวิถีโค้งอนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V_c ประกอบในแนวสัมผัส และ V_r ประกอบในแนวรัศมีในการนี้อนุภาคจะถูกกระทำโดยแรงหนีศูนย์กลาง F_c นั่นคือ

$$F_c = \frac{m_p V_c^2}{r} \quad (3.26)$$

แต่เนื่องจาก $m_p = \frac{\eta \rho_p D_p^3}{6}$ (3.27)

ดังนั้น $F_c = \frac{\eta \rho_p D_p^3 V_c^2}{6r}$ (3.28)



รูปที่ 3.11 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้

- แรงจุด (Drag Force) เป็นแรงที่เกิดจากผลของความหนืดของไหล และผลต่างความดันที่กระทำกับอนุภาคในทิศทางตรงกันข้ามกับความเร็วสัมพัทธ์ รูปที่ 3.12 แสดงทิศทางของแรงจุด F_D ของอนุภาคในสองมิติ ซึ่งประกอบด้วยแรงในแนวตั้งฉาก F_n และแรงในแนวขนาน F_t นั่นคือ

$$F_n = \pi \mu D_p V_r \quad (3.29)$$

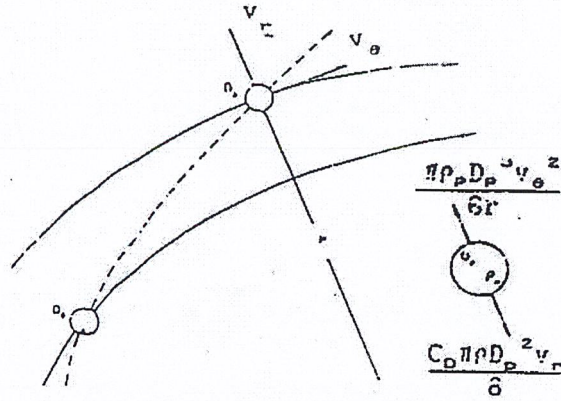
$$F_t = 2\pi \rho D_p V_r \quad (3.30)$$

โดยที่ μ คือความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล ดังนั้นแรงจุดของอนุภาคที่กระทำโดยของไหลคือ

$$F_D = F_n + F_t = 3\pi \mu D_p V_r \quad (3.31)$$

จากการทดลองของนิวตัน (Newton) ได้ให้ความสัมพันธ์ของ F_D ไว้ว่า

$$F_D = \frac{C_d \eta \rho D_p^2 V_r}{8} \quad (3.32)$$



รูปที่ 3.12 แสดงแรงกดที่กระทำกับอนุภาค

โดย C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงกด (Drag Coefficient) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ Reynolds Number (Re) ดังนี้

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re < 0.1 (\text{Stokes' Law}) \\ \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re + \frac{9}{160} Re^2 \ln 2 Re \right) & 0.1 < Re < 2 \\ \frac{24}{Re} \left(1 + 0.15 Re^{0.687} \right) & 2 < Re < 500 \\ 0.44 & 500 < Re < 2 \times 10^5 \end{cases} \quad (3.33)$$

3.3.9 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค

นอกจากแรงหนืดศูนย์กลางและแรงกดดังกล่าวแล้ว ขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ในของไหลจะมีแรงภายนอก F_{ei} มากกระด้วย เช่น แรงโน้มถ่วง F_g และแรงไฟฟ้า F_e ฉะนั้นในการออกแบบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคแล้วจะต้องคำนึงถึงแรงเหล่านี้ด้วยเนื่องจากมีผลกระทบหรือมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ จากกฎข้อที่สองของนิวตัน

$$m_p \frac{dv}{dt} = \frac{3\pi\mu D_p}{C_{SL}} (u-v) + V_p \rho \frac{du}{dt} + 0.5V_p \left(\frac{du}{dt} - \frac{dv}{dt} \right) + 1.5D_p^2 (\pi\rho\mu)^{1/2} \int_0^t \frac{(du/dt') - (dv - dt')}{(t-t')^{1/2}} dt' + \sum_i F_{ei} \quad (3.34)$$

โดยที่ C_{SL} คือค่าปรับการเลื่อนไหล (Slip Correction Factor) และเป็นฟังก์ชันของ D_p จากผลงานของ Allen และ Raabe ได้แสดงค่า C_{SL} ไว้ในตารางที่ 3.3

เมื่อพิจารณา D_p และ C_{SL} พบว่า $D_p > 10 \mu m$ แล้ว C_{SL} จะมีค่าเข้าใกล้ 1 ขณะที่ขี้เลื่อยมี $D_p > 600 \mu m$ ด้วยเหตุนี้จะมีผลกระทบน้อยมาก ฉะนั้นจึงสามารถตัด C_{SL} ทิ้งได้ และ V_p คือปริมาตรของอนุภาค ในเทอมที่ 2 ทางขวามือคือแรงที่ถูกกระทำจากความดันของของไหลรอบอนุภาค เทอมที่ 3 คือแรงเนื่องจากความเร่งของความเร็วมัพัทธ์ $V_R = (u-v)$ เทอมที่ 4 คือแรงเนื่องจากการเลื่อนไหลของความเร็วดังนั้น

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาเทอมที่ 2,3 และ 4 สามารถตัดทิ้งได้ เมื่ออนุภาคทรงกลมมีมวล m_p แรงภายนอกในเทอมที่ 5 จะพิจารณาเฉพาะ $F_g = m_p g$ จากสมการที่ 3.67 จะได้

$$m_p \frac{dv}{dt} = \frac{3\pi\mu D_p}{C_{SL}}(u - v) + m_p g \quad (3.35)$$

เมื่อหารสมการ 3.68 ด้วย $\frac{3\pi\mu D_p}{C_{SL}}$ จะได้

$$\tau \frac{dv}{dt} + v = u + \tau g \quad (3.36)$$



รูปที่ 3.13 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้แบบไซโคลน

D_p (μm)	C_{SL}
0.01	22.700
0.05	5.060
0.10	2.310
0.50	1.337
1.00	1.168
5.00	1.034
10.00	1.017

ตารางที่ 3.3 ค่าปรับการเลื่อนไหลของอนุภาค [27]

ซึ่ง $\tau = m_p C_{SL} / 3\pi\mu D_p$ คือเวลาเฉพา (Charactertic Time) -ของการเคลื่อนที่ ดังนั้นเมื่อกำหนดให้อนุภาคทรงกลมมีความหนาแน่น ρ_p จะได้ $m_p = (\pi/\theta)D_p^3(\rho_p - \rho)$ เฟกเตอร์ของ $(\rho_p - \rho)$ จะมีความสำคัญเมื่อการไหลและแรงดึงดูดของโลกมีทิศทางเดียวกัน ทำให้แรงลอยตัว $F_B = (\pi/6)D_p^3\rho_g$ รวมกับแรงจุด F_D จะเท่ากับน้ำหนักของของไหลที่ถูกแทนที่โดยอนุภาค ทำให้แรงเนื่องจาก $m_p g$ คือ $F_g = (\pi/6)\rho_p D_p^3 g$ ลดลงสำหรับไซโคลอน $F_c/F_g = 1$ แต่ถ้า $\rho_p \gg \rho$, $m_p \approx (\pi/6)D_p^3\rho_p$ และจะได้

$$\tau = \frac{D_p^2 \rho_p C_{SL}}{18\mu} \quad (3.37)$$

จากรูปที่ 3.14 เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ในทิศทาง X และ Z จะได้

$$\tau \frac{dv_x}{dt} + v_x = u_x \quad (3.38)$$

$$\tau \frac{dv_z}{dt} + v_z = u_z + \tau g \quad (3.39)$$

เนื่องจาก

$$v_x = \frac{dx}{dt}$$

และ

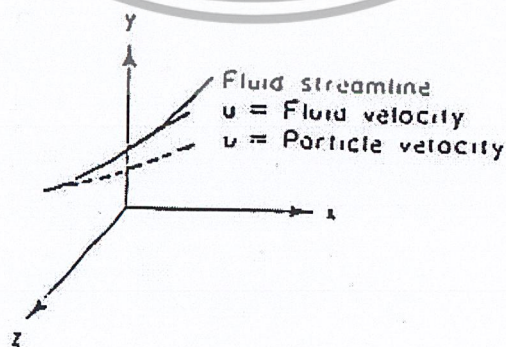
$$v_z = \frac{dz}{dt}$$

จะได้

$$\tau \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = u_x \quad (3.40)$$

และ

$$\tau \frac{d^2z}{dt^2} + \frac{dz}{dt} = u_z + \tau g \quad (3.41)$$



รูปที่ 3.14 แสดงความเร็วของอนุภาค

ถ้า $t=0$ ความเร็วทั้ง 2 ทิศทาง คือ $v_x(0) = v_{x0}$ และ $v_z(0) = v_{z0}$ เมื่อ อินทิเกรต สมการที่ 3.40 และ 3.41 จะได้

$$v_x(t) = u_x + (v_{x0} - u_x)e^{-t/\tau} \quad (3.42)$$

และ
$$v_z(t) = (u_z + \tau g) + (v_{z0} - u_z - \tau g)e^{-t/\tau} \quad (3.43)$$

เมื่อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่ออกจากจุดกำเนิด (Origin) ในตำแหน่งที่เวลา t ใดๆ พบว่าเมื่ออินทิเกรตสมการ 3.42 และ 3.43 ที่ $x(0) = z(0)$ และ $\left(\frac{dx}{dt}\right)_0 = v_{x0}$, $\left(\frac{dz}{dt}\right)_0 = v_{z0}$ จะได้

$$x(t) = u_x t + \tau(v_{x0} - u_x)(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.44)$$

และ
$$z(t) = (u_z + \tau g)t + (v_{z0} - u_z - \tau g)(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.45)$$

ถ้าอนุภาคหยุดนิ่งที่ $t=0$ และของไหลเคลื่อนที่ในทิศทาง z เท่านั้น

$$v_z(t) = \tau g (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.46)$$

สำหรับ $t \gg \tau$ ความเร็วของอนุภาคจะคงที่ ดังนั้นความเร็วที่เกิดขึ้นจริงที่เวลา t คือ

$$v_t = \tau g = \frac{D_p^2 \rho_p g C_{sl}}{18\mu} \quad (3.47)$$

เมื่อนุภาคมีขนาดเล็กมาก จะเคลื่อนที่ตามแนวการไหลของอากาศหรือของไหลแล้ว ดังนั้นช่วงเวลาการเคลื่อนที่หาได้จาก

$$t = \frac{\rho v_0}{m} \quad (3.48)$$

โดยที่ v_0 , m คือปริมาตรห้องเผาไหม้และอัตราการไหลตามลำดับ

3.3.10 การสมมูลในวงโคจร

เมื่อของไหลนำพาอนุภาคเคลื่อนที่เวียนรอบไซโคลอน อนุภาคจะถูกแรงตามหัวข้อ 3.4.9 กระทำในแนวการเคลื่อนที่ที่เบี่ยงเบนออกจากแนวการไหลของของไหลไปตามวิถีโค้ง ในขณะที่เดียวกันอนุภาค

บางอนุภาคยังคงรักษาสภาพการเคลื่อนที่ตามแนวการไหลต่อไป ซึ่งแสดงว่าเกิดสมดุลของแรงต่างๆ ลักษณะนี้เรียกได้ว่า การสมดุลในวงโคจร [26]

3.3.11 ซอลเตชัน (Saltation)

อนุภาคเคลื่อนที่ไปกับผนังที่ $\theta = \theta_f$ ตามรูปที่ 3.19 ด้วยอัตราเร็วตกกระทบ (Falling Speed) ค่าหนึ่งทำมุม α กับผนังในขณะนี้ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกจากผิวในทิศทางที่ไม่แน่นอนตามวิถีโค้งห่างจากพื้นเป็นระยะ H และเคลื่อนที่กับมากระทบกับผิวหนังก่ออีกในระยะทาง L ขนานกับผนัง หลังจากนั้นอนุภาคเคลื่อนที่ออกจากผิวตามลักษณะดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การเกิดซอลเตชัน [26] สิ่งที่มีผลต่อการเกิดซอลเตชัน

- การลอยตัว (Suspension)

เป็นปรากฏการณ์ที่มีจุดกำเนิดในสภาพเริ่มต้นแบบเดียวกันกับการเกิดซอลเตชัน แต่เมื่อเคลื่อนที่ออกจากผิวจะไม่เคลื่อนที่กลับมากระทบกับผิวอีก คือ จะปลิวออกในทิศทางที่ไม่แน่นอน ตามรูปที่ 3.15 เกิดจากเส้นทางการไหลในชั้นที่ห่างจากผิวการไหลแบบปั่นป่วน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการลอยตัว



รูปที่ 3.15 แสดงการเกิดซอลเตชันและการลอยตัว

3.4 การวัดอัตราการไหล (Measurement of Discharge) [12]

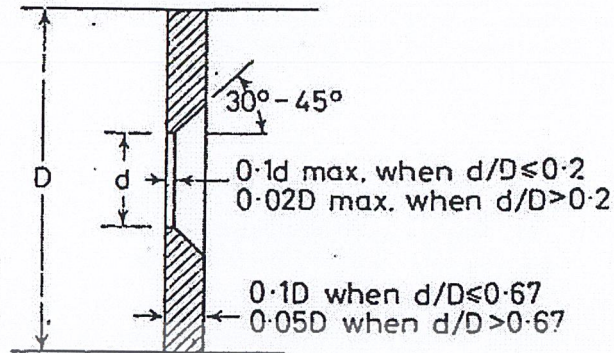
จากโครงการงานเก่าที่ผ่านมานั้นจะสังเกตเห็นว่าไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถควบคุมปริมาณ การไหลของอากาศและเชื้อเพลิงได้ การควบคุมปริมาณอากาศนั้น จำเป็นต้องใช้ตัว Invertor เป็นตัวปรับปริมาณอากาศเข้า ส่วนวิธีวัดอัตราการไหลนั้นจะมีอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลมีหลายชนิดคือ ออร์ฟิส (Orifice), เวนจูรี (Venturi), ท่อวัด (Tube)

3.4.1 ออร์ฟิส

ออร์ฟิสชนิดต่างๆคล้ายคลึงกันสามารถอธิบายด้วยกันได้แต่ละชนิดแตกต่างกันที่ pressure tapping ซึ่ง orifice มาตรฐานกำหนดดังนี้

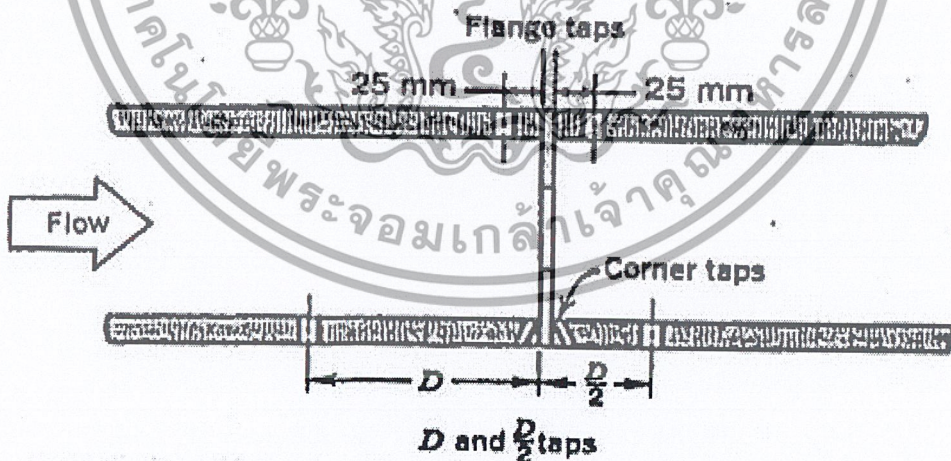
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่างลักษณะ (description) ออริฟิส (orifice) ได้แสดงหน้าตัดต่างๆ ดังรูปที่ 3.16

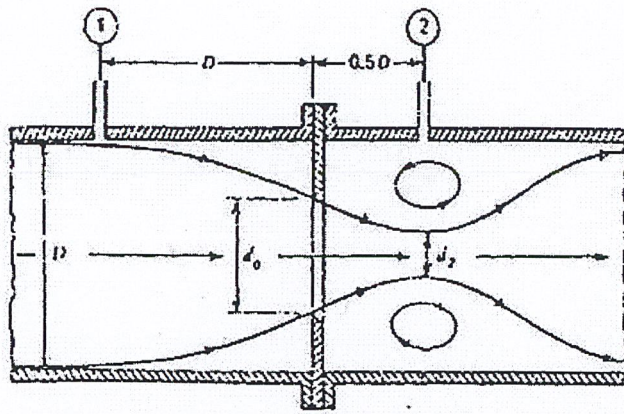


รูปที่ 3.16 Standard orifice plate

ออริฟิสเป็นแผ่นบางๆ ที่ถูกจับยึดระหว่างขอบของท่อเนื่องจากมีรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่าย ดังนั้นจึงมีราคาถูก และง่ายในการติดตั้ง หรือการย้ายตำแหน่ง แต่อย่างไรก็ตามขอบของแผ่น อาจจะมีการสึกกร่อนได้ อันเนื่องมาจากการชนของอนุภาคเล็กๆ ที่กระจายอยู่ในของไหล ข้อเสียอีกประการก็คือ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมการขยายของด้านล่างของกระแส ทำให้มี head loss ต่ำกว่าที่สูงมาก จุดวัดความดันสำหรับออริฟิสนั้นสามารถกำหนดตำแหน่งได้หลายตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.17 เนื่องจากตำแหน่งของจุดวัดความดันมีอิทธิพลต่อการหาสัมประสิทธิ์การไหล



รูปที่ 3.17 แสดงโครงสร้างเรขาคณิต และจุดวัดความดันของออริฟิส

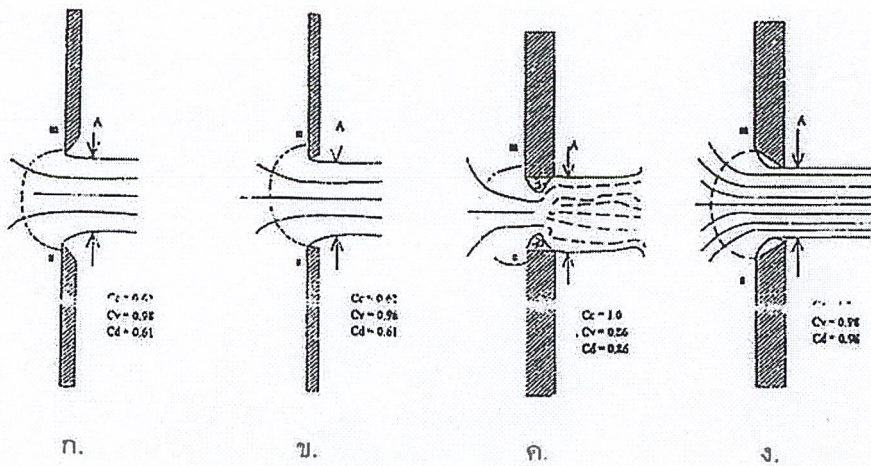


รูปที่ 3.18 แสดงการไหลผ่านแผ่นออริฟิส (Orifice)

สำหรับการวัด อัตราการไหลของของไหลภายในท่อและจัดได้ว่า ออริฟิสเป็นเครื่องมือวัดที่ขีดขวางการไหลของพื้นที่หน้าตัดให้ของไหล ไหลผ่านออริฟิสมีขนาดน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังรูปที่ 3.18 ดังนั้นเมื่อนำเอาออริฟิสไปติดตั้งกับท่อซึ่งมีของไหล ไหลผ่านจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมออริฟิส ซึ่งความดันตกคร่อมนี้ จะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการไหล กล่าวคือถ้าอัตราการไหลมีค่าสูง ความดันตกคร่อมออริฟิสก็จะมีค่าสูง และถ้าอัตราการไหลมีค่าความดันตกคร่อมออริฟิสก็จะมีค่าต่ำ โดยทั่วไปออริฟิสจะถูกนำไปใช้ในการหาอัตราการไหลที่สภาวะที่ Steady state เท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้วัดอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

ในบรรดาเครื่องมือวัดอัตราการไหลทั้งหลาย ออริฟิสถือว่าเป็นเครื่องมือที่มีผู้นำไปใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด ออริฟิสมาตรฐานที่มีขอบคม ดังรูปที่ 3.19ก หรือขอบเป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.19ข นั้นจะสัมพันธ์ลำน้ำที่ไหลผ่านในลักษณะที่เป็นการสัมผัสแบบเส้นส่วนออริฟิส ดังรูปที่ 3.19ค และ 3.19ง นั้นไม่ใช่เป็นออริฟิสมาตรฐาน ทั้งนี้เพราะลำน้ำที่ไหลผ่านรูออริฟิสนั้น ถูกกระทบจากความหนาของวัตถุกับความหนาของผิวและรัศมีมีความโค้ง ดังนั้นจึงต้องมีการสอบเทียบเพื่อความถูกต้อง

ข้อดีของออริฟิสคือมีราคาต่ำกว่าเครื่องมือชนิดอื่นๆ ที่อาศัยหลักการวัดเดียวกัน และสะดวกในการสร้างเพราะมีรูปร่างไม่ซับซ้อน รวมทั้งมีข้อมูลของการทำวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมในการวัดของไหลที่มีเงื่อนไขต่างๆ ใว้อย่างมากมาย ของไหลเมื่อไหลผ่าน Square-edged orifice จะมีทิศทางการไหลเป็นไปดังรูป สมมุติว่าของไหลก่อนเข้าปะทะกับออริฟิสมีความเร็วคงที่ตลอดหน้าตัดท่อ (หน้าตัดวงกลม) เท่ากับ V_1 เมตรต่อวินาที ของไหลที่บริเวณด้านหลังของออริฟิส จะมีลักษณะเป็นลำของการไหล ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำการไหลลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ $D/2$ เมตร ณ บริเวณจุดวัดความดันที่ 2 ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดที่มีพื้นที่หน้าตัดของการไหลน้อยที่สุด (Vena Contracta) ของ jet ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ jet จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านจุดที่ 2 ไปแล้ว จุดที่ 2 หรือเรียกว่าจุด Vena Contracta ถือได้ว่าเป็นจุดกึ่งกลางที่ของไหลที่มีความเร็วเฉลี่ยสูงสุดหรือ มีความดันสถิตต่ำสุด (จากสมการของ Bernulli)



รูปที่ 3.19 ออร์ฟิสแบบต่างๆ

สมการ Bernoulli สามารถนำมาใช้อธิบายคุณสมบัติในการไหลที่จุดต่างๆภายในท่อได้ดังนั้น สมการ Bernoulli สำหรับจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของการไหลคือ

$$\frac{V_{1t}^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_{2t}^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \tag{3.48}$$

เมื่อ

- V = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)
- P = ความดันสถิตของของไหล (N/m²)
- γ = น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight, N/m³)
- Subscript 1t = ค่าที่จุดที่ 1 ในทางทฤษฎี
- Subscript 2t = ค่าที่จุดที่ 2 ในทางทฤษฎี

สมการไหลต่อเนื่อง (Continuity equation) เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของ V_{1t} และ V_{2t} กับ Contraction coefficient ($C_c = A_2/A_0$) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของของไหลที่จุด Vena contracta กับพื้นที่หน้าตัดของออร์ฟิส

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \tag{3.49}$$

และ
$$C_c = \frac{A_2}{A_0} \tag{3.50}$$

แต่ในทางทฤษฎีไม่คิดค่า C_c ที่ Contracta ดังนั้น $A_2 = A_0$

$$V_1 = \frac{V_2 A_0}{A_0} \tag{3.51}$$

แทน V_1 ลงในสมการ Bernoulli ได้ว่า

$$\left[\frac{V_2^2 \frac{\pi D_0^2}{4}}{\frac{\pi D_1^2}{4}} \right] + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \tag{3.52}$$

$$\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_2^2 \left(\frac{D_0}{D_1} \right)^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \tag{3.53}$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\rho g \left[1 - \left(\frac{D_0}{D_1} \right)^4 \right]}} \tag{3.54}$$

เมื่อ

$$Q_{th} = V_2 A_2 = V_2 A_0$$

$$Q_{th} = A_0 \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\rho g \left[1 - \left(\frac{D_0}{D_1} \right)^4 \right]}} \tag{3.55}$$

$$Q_{ac} = C_d A_0 \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\rho g \left[1 - \left(\frac{D_0}{D_1} \right)^4 \right]}} \tag{3.56}$$

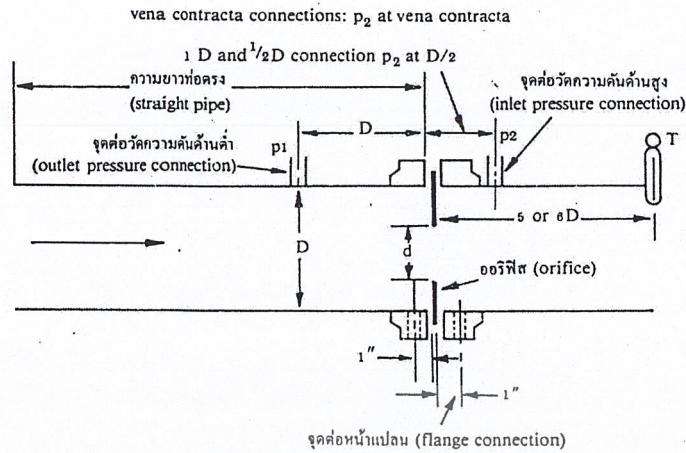
เมื่อกำหนดให้

V = ความเร็วของไหล (m/s)

A = พื้นที่หน้าตัด (m²)

3.4.2 การวัดอัตราการไหลโดยใช้แผ่นออริฟิส

เพื่อวัดหาอัตราไหลโดยใช้แผ่นออริฟิส เพื่อวัดหาความดันแตกต่างโดยต่อเข้ามานอมิเตอร์ และนำไปคำนวณหาอัตราการไหล แผ่นออริฟิสมีหลายชนิด ชนิดที่เลือกใช้เป็นแบบออริฟิสแบบที่มีจุดศูนย์กลางร่วม (Concentric) ขนาดของช่องออริฟิสจะบอกเป็นอัตราส่วนกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϕ) ในของท่อเรียกว่าอัตราส่วนเบต้า (β ratio) ค่าของ β นี้ มีขีดจำกัดเพื่อให้ผลของการวัดมีความเที่ยงตรงสำหรับ fluid ที่เป็นของเหลวและเป็นก๊าซ ค่า β จะอยู่ระหว่าง 0.15 – 0.75 เช่น ใอน้ำค่า β จะอยู่ระหว่าง 0.20 – 0.70 แต่ค่าที่ดีที่สุดควรจะอยู่ระหว่าง 0.40 – 0.60



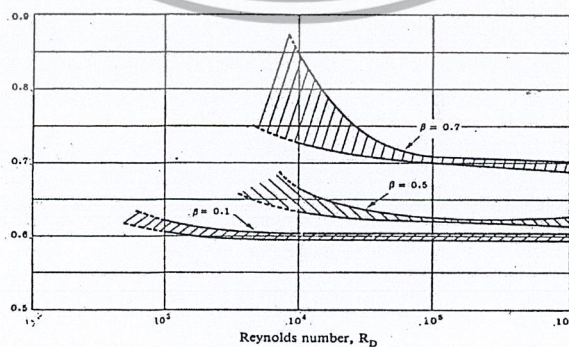
รูปที่ 3.20 จุดต่อวัดความดันแตกต่าง (ΔP)

ค่า β นี้ขึ้นอยู่กับวิธีการต่อ Pressure taps ด้วย ถ้าเป็นแบบ Flange taps (ต่อจุดวัด ΔP ที่ละหน้าแปลนประกอบกับออร์ฟิส) ค่า β สามารถกำหนดได้ระหว่าง 0.15 – 0.70 แต่ถ้าเป็น Pipe taps (ต่อจุดวัด ΔP) ที่ต่อส่งค่า β ควรอยู่ระหว่าง 0.2–0.67

กำหนด β ในทางปฏิบัติจะต้องกำหนดจาก ΔP สูงสุดที่ต้องการ เมื่อค่า flow ในระบบสูงสุด ΔP สูงสุด 100 H₂O แล้วคำนวณย้อนกลับมาหาค่า β

3.4.3 ความสัมพันธ์ของ C_d กับ R_D ของแบบออร์ฟิส

ความสัมพันธ์ของ C_d กับ R_D ของออร์ฟิสจะเป็นไปตามรูปที่ 3.27 และต่างกับสองแบบแรกที่กำลังกล่าวมาแล้วคือ ในย่าน R_D ต่ำ ค่า C_d จะสูงขึ้นและจะลดลงจนมีค่าเกือบคงที่ที่ R_D มากกว่า 10^5 ค่า β ของออร์ฟิสที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีค่า C_d ก่อนข้างลงที่ในย่านกว้างกว่าแบบที่มี β ใหญ่กว่านี้เป็นเหตุผลอันหนึ่งในการจำกัดขนาดของ β ไม่ให้เกิน 0.75 แต่อย่างไรก็ดีค่า β สูงๆ จะให้ค่า C_d มากกว่า β ขนาดเล็ก



รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ของ C_d กับ R_D ของแบบออร์ฟิส

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหล

$$\dot{m} = \frac{C_d \times A_t \times \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_0}{D_1}\right)^2}} \quad (3.55)$$

เมื่อ $\beta = d_t/D_1$

$$\beta^4 = (A_t/A_1)^2 = (d_t/D_1)^4$$

$$\dot{m} = \frac{C_d \times A_t \times \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (3.56)$$

A_1 = พื้นที่หน้าตัดของท่อ

A_t = พื้นที่หน้าตัดของ Orifice

C_d = สัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล

ρ_{air} = ความหนาแน่นของอากาศ

3.5 มานอมิเตอร์ (manometer) [12]

มานอมิเตอร์นี้ใช้วัดความแตกต่างของความดันภายในท่อระหว่าง 2 จุด หรือระหว่างท่อ 2 ท่อ หรือระหว่างความดันอื่นที่ต้องการรู้ค่าความแตกต่างก็ได้ เราอาจใช้มานอมิเตอร์แบบวัดความแตกต่างของความดันวัด โดยปกติแล้วมานอมิเตอร์แบบนี้ประกอบด้วยหลอดแก้วอโรลิง ปลายแต่ละด้านนำไปต่อเข้ากับแหล่งความดันแตกต่าง ที่เราต้องการทราบค่า มอมิเตอร์แบบวัดความแตกต่างของความดันแบ่งออกได้ดังนี้

1. มานอมิเตอร์แบบไพโซมิเตอร์ (Two – piezometer manometer)
2. มานอมิเตอร์วัดความดัน แบบหลอดแก้วรูปตัวยูกลับทาง (Inverted U – tube manometer)
3. มานอมิเตอร์วัดความดันแตกต่าง แบบหลอดแก้วรูปตัว U (U – tube differential manometer)
4. มานอมิเตอร์แบบละเอียด (Micro manometer)

มานอมิเตอร์ความดันแตกต่างแบบหลอดแก้วรูปตัวยู มานอมิเตอร์ชนิดนี้ ประกอบด้วยหลอดแก้วที่โค้งงอเป็นรูปตัวยู ปลายทั้งสองของหลอดแก้วใช้ต่อเข้ากับแหล่งความดันแตกต่างที่ต้องการทราบค่า ซึ่งแสดงถึงมานอมิเตอร์แบบหลอดแก้วรูปตัวยูที่ใช้สำหรับวัดความดันแตกต่างของจุด A และจุด B ที่ส่วนล่างของมานอมิเตอร์ จะบรรจุของเหลวบ่งออกความดัน ซึ่งมีน้ำหนักมากกว่าของเหลวที่ต้องการวัดค่าความดันแตกต่าง และจะต้องไม่รวมตัวเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การคำนวณและการออกแบบ

4.1 การคำนวณ

ในส่วนนี้จะคำนวณถึงที่มาของค่าปริมาณต่างๆ ที่ต้องใช้ในการทดลอง

4.1.1 การคำนวณหาค่าปริมาณอากาศที่ต้องการใช้

- พิจารณาที่ข้าวเปลือก 100 kg เมื่อนำไปผ่านกระบวนการสีจะสามารถแยกสัดส่วนของข้าวเปลือกได้ดังต่อไปนี้

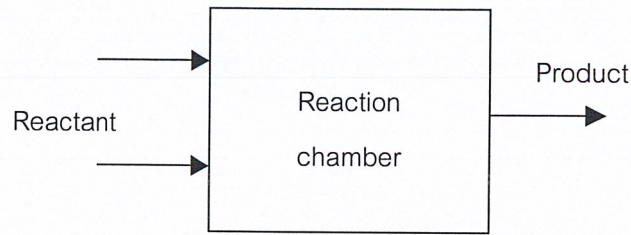
ส่วนประกอบ	จำนวน (Kg)
ข้าวสาร	44.14
ข้าวท่อน	18.04
ปลายข้าว	2.68
รำละเอียด	7.20
รำหยาบ	1.7
แกลบ	26.12

ตารางที่ 4.1 สัดส่วนของข้าวเปลือก [17]

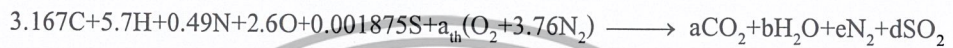
สาร	%	MW	จำนวนโมล
คาร์บอนมอนไดออกไซด์ C	38	12	3.167
ไฮโดรเจน H	5.7	1	5.7
ออกซิเจน O ₂	41.6	16	2.6
ไนโตรเจน N	0.69	14	0.049
ซัลเฟอร์ S	0.06	32	0.001875
ขี้เถ้า Ash	19.8	-	-

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงรวม (แกลบ)

- ทำการสมดุลสมการทางเคมี



จะได้สมการเคมีดังนี้



หาค่าที่ได้จากการ Balance

$$C : 3.167 = a$$

$$H : 5.7 = 2b$$

$$\therefore b = 2.85$$

$$S : 0.001875 = d$$

$$O : 2.6 + (a_{th} \times 2) = 2a + b + 2d$$

$$\therefore a_{th} = \frac{(2 \times 3.167) + 2.85 + (2 \times 0.001875) - 2.6}{2}$$

$$= 3.293875$$

$$N : 0.049 + (a_{th} \times 3.76 \times 2) = 2e$$

$$\therefore e = 12.40947$$

หาปริมาณความชื้นที่มากับอากาศแห้งจำนวน $4.76 a_{th} = 4.76 \times 3.293875 \times 15.78845$ Kmol
ความดันย่อยของละอองน้ำในอากาศเท่ากับ

$$T_{db} = \text{Dry - bulb temperature} = 33 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\%RH = \text{Relative humidity} = 53\%$$

$$P_{v,air} = \phi_{air} P_{sat,water @ 33^\circ\text{C}} = 0.53 \times 5.0752 \text{ kPa} = 2.690 \text{ kPa}$$

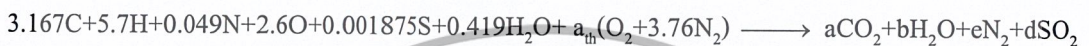
จำนวนโมลของละอองน้ำในอากาศเท่ากับ

จากสูตร
$$Nv_{\text{air}} = \left(\frac{Pv_{\text{air}}}{P_{\text{total}}} \right) N_{\text{total}}$$

$$Nv_{\text{air}} = \left(\frac{2.690 \text{ kPa}}{101.325 \text{ kPa}} \right) (15.678845 + Nv_{\text{air}})$$

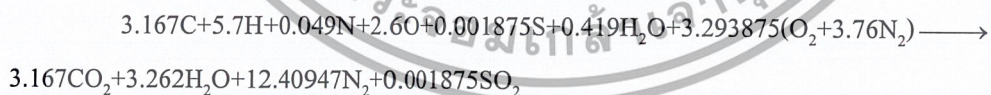
$$Nv_{\text{air}} = 0.428 \text{ kmol}$$

ทำการสมดุลสมการทางเคมี โดยเอาจำนวนโมลของละอองน้ำมาแทนลงในสมการ



$$\begin{aligned} \text{C} : 3.167 &= a \\ \text{H} : 5.7 + (0.419 \times 2) &= 2b \\ \therefore b &= 3.269 \\ \text{S} : 0.001875 &= d \\ \text{O} : 2.6 + 0.419 + (a_{\text{th}} \times 2) &= 2a + b + 2d \\ \therefore a_{\text{th}} &= \frac{(2 \times 3.167) + 3.269 + (2 \times 0.001875) - 2.6 - 0.419}{2} \\ &= 3.293875 \\ \text{N} : 0.049 + (a_{\text{th}} \times 3.76 \times 2) &= 2e \\ \therefore e &= 12.40947 \end{aligned}$$

∴ นำค่าที่ได้จากการ Balance สมการมาแทนค่า จะได้สมการเผาไหม้พอดีดังต่อไปนี้



จากสูตร
$$\frac{A}{F_{\text{(ratio)}}} = \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{air}} &= 3.293875(4.76 \times 29) \text{ kmol} \times (0.428 \times 18) \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \\ &= 462.269 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{fuel}} &= (3.167 \times 12) + (5.7 \times 1) + (0.049 \times 14) + (2.6 \times 16) + (0.001875 \times 32) \\ &= 86.05 \text{ kg} \end{aligned}$$

ดังนั้น
$$\frac{A}{F}_{(ratio)} = \frac{462.269}{86.05} = 5.372$$

กรณี Equivalent Ratio, $\Phi = 1$ จาก $\frac{A}{F}_{(ratio)}$ ที่ได้แสดงว่า

ถ้าใช้เชื้อเพลิงแกลบ 1.0 kg ต้องใช้อากาศ 4.858 kg/min

ถ้าใช้เชื้อเพลิงแกลบ 0.3 kg ต้องใช้อากาศ = $0.3 \times 4.858 \text{ kg/min} = 1.457 \text{ kg/min} = 0.024 \text{ kg/sec}$

4.1.2 การคำนวณอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio Φ)

หาได้จากสูตร

$$\Phi = \frac{(A/F)_{Stoic}}{(A/F)_{Actual}} = \frac{(F/A)_{Actual}}{(F/A)_{Stoic}}$$

Fuel - rich mixtures, $\Phi > 1$ มีเชื้อเพลิงมาก อากาศน้อย

Stoichiometric mixtures, $\Phi = 1$ ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี

Fuel - lean mixtures, $\Phi < 1$ มีเชื้อเพลิงน้อย อากาศมาก

4.1.3 การคำนวณอัตราการไหล

เมื่อ $A/F \text{ ratio} = 5.372$

$$\begin{aligned} \text{ในการทดลองใช้แกลบมีอัตราการไหล} &= 0.3 && \text{kg/min} \\ \text{ฉะนั้นจะใช้อากาศเท่ากับ} &= 0.3 \times 5.372 && \text{kg/min} \\ &= 1.6116 && \text{kg/min} \\ &= (1.6116/60) && \text{kg/min} \\ &= 0.02686 && \text{kg/s} \end{aligned}$$

ϕ	Primary Air (kg/sec)			Secondary Air (kg/s)	
	100%	85%	75%	15%	25%
0.8	0.0336	0.0285	0.0252	0.00504	0.0084
1.0	0.0269	0.0229	0.0202	0.00403	0.0067
1.2	0.0224	0.0190	0.0168	0.00336	0.0056

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลอง

4.1.4 การคำนวณหาความแตกต่างระดับน้ำใน Manometer

โดยใช้แผ่น Orifice คำนวณหาอัตราการไหล

จากสมการความสูงของระดับน้ำในมานอมิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิ

จากสูตร

$$\dot{m} = \frac{C_d \times A_t \times \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_t}{A_1}\right)^2}}$$

$$0.022865 = 0.62(1.64 \times 10^{-3}) \frac{\sqrt{(2 \times 1.2)\Delta p}}{\sqrt{1 - (0.6)^4}}$$

$$\Delta P = 183.391 N / m^2$$

$$\Delta P = \rho_w gh$$

$$183.391 \frac{N}{m^2} = 1000 \frac{kg}{m^3} \times 9.81 \frac{m}{s^2} \times \Delta h m$$

$$\Delta h = 1.87 cm.$$

จากสมการของความสูงของระดับน้ำในมานอริเตอร์ของอากาศทุติยภูมิ

จากสูตร

$$\dot{m} = \frac{C_d \times A_s \times \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_t}{A_1}\right)^2}}$$

$$4.035 \times 10^{-3} = 0.62(8.04 \times 10^{-4}) \frac{\sqrt{(2 \times 1.2)\Delta p}}{\sqrt{1 - (0.6)^4}}$$

$$\Delta P = 23.267 N / m^2$$

$$\Delta P = \rho_w gh$$

$$23.267 \frac{N}{m^2} = 1000 \frac{kg}{m^3} \times 9.81 \frac{m}{s^2} \times \Delta h m$$

$$\Delta h = 0.24 cm.$$

φ	Primary Air (kg/sec)			Secondary Air (kg/s)	
	100%	85%	75%	15%	25%
0.8	4.03	2.91	2.27	0.37	1.03
1.0	2.58	1.87	1.45	0.24	0.66
1.2	1.79	1.29	1	0.16	0.46

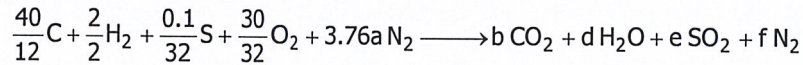
ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ

4.1.5 การคำนวณการสันดาปทางทฤษฎี

เชื้อเพลิงแข็งแกลบ : แกลบ

Ultimate analysis : C =40%, H = 20%, O = 30%, S= 0.1%

Stoichiometric combustion equation (for 100 kg fuel)



$$C : b = 3.333 \quad S : e = 0.003$$

$$H_2 : d = 1 \quad N_2 : f = 10.896$$

$$O_2 : a = 3.33 + 0.5 + 0.003 - 0.938 = 2.898$$

Theoretical air required per kg fuel (WT)

$$\begin{aligned} WT &= 11.5C + 34.5[H - (O/8)] + 4.3(0.001) = 4 \text{ Kg} \\ &= 11.5(0.4) + 34.5[0.02 - [0.02 - (0.3/8)]] + 4.3(0.001) = 4 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{Air - Fuel ratio (AF)} = 4 \text{ kg air / kg fuel}$$

เมื่อ N_t คือ จำนวนโมลของแก๊สที่ได้จากที่ใดจากการเผาไหม้

$$N_t = 3.000 + 1 + 0.003 + 10.896 = 15.232$$

สัดส่วนย่อย (Mole Fraction) ของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้

$$Y_{CO_2} = \frac{3.333}{15.232} = 0.219 = 21.9\%$$

$$Y_{H_2O} = \frac{1}{15.232} = 0.066 = 6.6\%$$

$$Y_{N_2} = \frac{10.896}{15.232} = 0.715 = 71.5\%$$

$$Y_{SO_2} = \frac{0.003}{15.232} = 0.0002 = 0.02\%$$

อัตราการผลิตอากาศทฤษฎีและอัตราการผลิตของเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของอากาศ	$\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$
ความหนาแน่นของแกลบ	$\rho_f = 100 \text{ kg/m}^3$
ความเร็วของอากาศ	$V = 40 \text{ m/s}$
เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศทุติยภูมิ	$d_s = \text{m}$
เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศปฐมภูมิ	$d_p = \text{m}$
อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎี	$AF = 4 \text{ kg air / kg fuel}$
พื้นที่หน้าตัดท่ออากาศทุติยภูมิ	$a_s = \frac{\pi d_s^2}{4} = \frac{22 \times}{7 \times 4} = \text{m}^2$
อัตราการไหลอากาศทุติยภูมิแต่ละท่อ	$m_s = \rho_a v a_s = 1.2 \times \times = \text{kg/min}$
ท่ออากาศทุติยภูมิมี ท่อ :	$m = x = \text{kg/min}$

อัตราการไหลอากาศทุติยภูมิ

ปริมาณอากาศปฐมภูมิเป็น 20% ของอากาศทั้งหมด : $m_p = \frac{20 \times}{80} = \text{kg/min}$

อัตราการไหลปฐมภูมิ

อัตราการไหลอากาศ $m_a = \times = \text{kg/min}$

$$AF = \frac{m_a}{m_f}$$

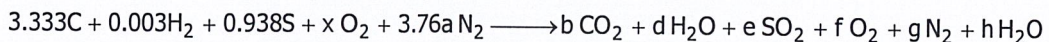
$$m_f = \frac{m_a}{AF} = \text{kg/min}$$

อัตราการไหลของเชื้อเพลิง = 0.3. kg/s

4.1.6 การคำนวณกำลังความร้อนของเตาเผา (Heating power of the furnace, Q_f)

$$Q_f = W_f \times HHV$$

การสันดาปเชื้อเพลิงแกลบที่ 20% excess air



moles balance

Carbon : $b + d = 3.333$

Sulpher : $e = 0.003$

Nitrogen : $g = 3.76 x$

Hydrogen : $h = 1$

$$\text{Oxygen} \quad : x \quad = b + (d/2) + e + f + (h/2) = 0.938$$

$$\text{Dry flue gas analysis: CO}_2 = 10.33\%, \text{CO} = 8.45\%$$

$$\frac{b}{b+d+e+f+g} = 0.1033, \quad \frac{d}{b+d+e+f+g} = 0.0845$$

$$\text{On dividing ;} \quad b/d = (0.1033/0.0845) = 1.2225 \longrightarrow b = 1.2225d$$

$$1.2225d + d = 3.333 \longrightarrow d = 3.333 = 1.5$$

$$b = 3.333 - 1.5 = 1.833$$

$$b + d + e + f + g = (1.8333/1.833) = 17.74$$

$$x + g = b + d + e + f + g - (d/2) + (h/2) = 0.938$$

$$x + 3.76x = 17.74 - (1.5/2) + (1/2) = 0.398$$

$$x = 3.4776$$

$$f = 3.4776 - 1.833 - 0.75 - 0.003 - 0.5 + 0.938 = 0.3296$$

$$g = 3.76(3.4776) = 13.0758$$

Dry flue gas analysis ;

$$\text{CO}_2 = (1.88300/17.74) = 0.10330 = 10.330\%$$

$$\text{CO} = (1.50000/17.74) = 0.08450 = 8.450\%$$

$$\text{SO}_2 = (0.00300/17.74) = 0.00017 = 0.017\%$$

$$\text{O}_2 = (1.32960/17.74) = 0.07490 = 7.490\%$$

$$\text{N}_2 = (13.0758/17.74) = 0.73700 = 73.700\%$$

$$\% \text{excess} = \frac{3.4776 - 2.898}{2.898} \times 100 = 20\%$$

Mass of dry flue gas produced per kg fuel

$$= \frac{C_{ab}(44\text{CO}_2 + 28\text{CO} + 32\text{O}_2 + 28\text{N}_2)}{12(\text{CO}_2 + \text{CO})}$$

$$= \frac{0.4(44 \times 0.1033 + 28 \times 0.0845 + 32 \times 0.0749 + 28 \times 0.737)}{12(0.1033 + 0.0845)}$$

$$= \frac{11.976}{2.2536} = 5.31 \text{ kg}$$

$$= W_{dfg} \bar{C}_p (t_g - t_a) = 5.31 \times 1.05 (170 - 30)$$

$$= 780.57 \text{ k}_j/\text{k}_g \text{ fuel}$$

Energy loss due to incomplete combustion

$$= 1000 W_{dfg} \frac{28\text{CO}}{44\text{CO}_2 + 28\text{CO} + 32\text{O}_2 + \text{N}_2}$$

$$= 10100 \times 5.31 \times \frac{28 \times 0.0845}{44 \times 0.1033 + 28 \times 0.0845 + 32 \times 0.0749 + 28 \times 0.737}$$

$$= 4,237.6 \text{ k}_j/\text{k}_g$$

Energy loss other = 3% of HHV

$$\text{Energy loss other} = 0.03 \times 12,142.3 = 364.27 \text{ k}_j/\text{k}_g$$

$$\text{Total energy loss} = 780.57 + 4,237.61 + 188.73 + 485.31 + 364.27$$

$$= 6,056.49 \text{ k}_j/\text{k}_g$$

$$\text{Useful energy} = 12,142.3 - 6,056.49 = 6085.81 \text{ k}_j/\text{k}_g$$

4.2 การออกแบบเตา

4.2.1 ขนาดความกว้างของเตาเผา

ในการออกแบบเตาเผาได้ทำการออกแบบเตาเผาให้มีขนาดความกว้างของเตาเผาส่วนด้านล่าง (ห้องเผาไหม้หลัก) สามารถเปลี่ยนแปลงได้ และจะกำหนดความลึกของท่อทิ้งเถ้าลอยคงที่ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพล การเผาไหม้ของเตาเผา การออกแบบได้พิจารณาอยู่ 2 อย่างคือ

1. ขนาดความกว้างของเตาออร์เทคตัวล่าง (ห้องเผาไหม้หลัก) มี 3 ขนาด คือ

$$0.5D = 150 \text{ mm}$$

$$0.75D = 225 \text{ mm}$$

$$1.0D = 300 \text{ mm}$$

มีความสูงคงที่ ที่ 1200 mm

อัตราส่วนการลดขนาดความกว้างของเตาเผาแบบออร์เทค คือ 0.5D, 0.75D, 1.0D

2. ขนาดความกว้างของเตาออร์เทคตัวบน (ห้องเผาไหม้รอง) มี 1 ขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1D และ สูง 1D จำนวน 3 ชั้น ความสูงรวม 3D

3. ความยาวของท่อทางออกของแก๊สภายในเตาจะกำหนดไว้ที่ความสูง 1,100 mm.

4.2.2 การออกแบบตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ

ในการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะศึกษาลักษณะการกระจายความร้อนของอุณหภูมิ จะออกแบบการทดลองให้มีการวัดความร้อนภายในเตาเผาแก๊สแบบวอร์เทค เพื่อที่จะให้ได้นำความร้อนที่ได้มาเปรียบเทียบลักษณะการกระจายของอุณหภูมิทั่วเตาเผา และเพื่อที่จะได้ศึกษาถึงแนวโน้มของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเตาเผา ในการวัดอุณหภูมิจะแบ่งตำแหน่งการวัดออกเป็น 8 ตำแหน่ง ซึ่งจะมีระยะห่างดังนี้คือ $X1 = 0.075 \text{ m.}$, $X2 = 0.225 \text{ m.}$, $X3 = 0.375 \text{ m.}$, $X4 = 0.525 \text{ m.}$, $X5 = 0.675 \text{ m.}$, $X6 = 0.825 \text{ m.}$, $X7 = 0.975 \text{ m.}$ และ $X8 = 1.125 \text{ m.}$ ซึ่งเป็นระยะห่างของเทอร์โมคัปเปิลตั้งแต่ตัวที่ 1-8 ทั่วทั้งเตา

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	ระยะตำแหน่งของ Thermocouple (cm)							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
L1	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
L2	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.4	0.4	0.4
L3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7
L4	-	-	-	-	-	1.0	1.0	1.0

ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิที่ขนาดเตาเท่ากับ 0.5D

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	ระยะตำแหน่งของ Thermocouple (cm)							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
M1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
M2	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.4	0.4	0.4
M3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7
M4	-	-	-	-	-	1.0	1.0	1.0

ตารางที่ 4.6 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิที่ขนาดเตาเท่ากับ 0.75D

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	ระยะตำแหน่งของ Thermocuple (mm)							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
N1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
N2	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.4	0.4	0.4
N3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7
N4	-	-	-	-	-	1.0	1.0	1.0

ตารางที่ 4.7 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิที่ขนาดเตาเท่ากับ 1.0D



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

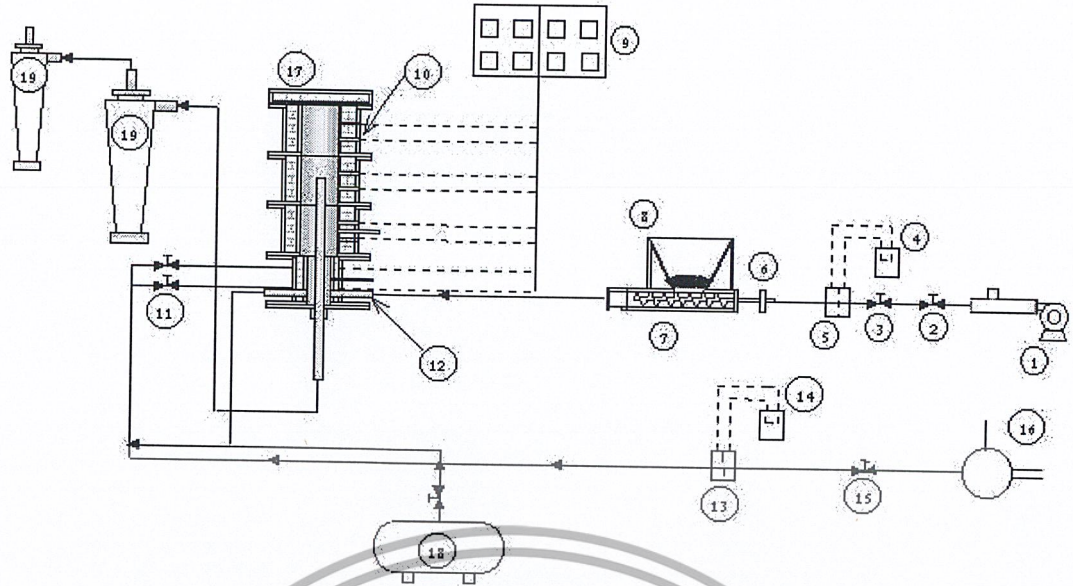
5.1 จุดประสงค์การทดลอง

การทดลองมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการทดลองถึงอิทธิพลของห้องเผาไหม้ เพื่อเป็นข้อมูลในการพิจารณาขนาดของห้องเผาไหม้ เพื่อเป็นข้อมูลในการพิจารณาขนาดห้องเผาไหม้และท่อทิ้งเถ้าลอยภายในเตาเผาโดยการวัดของเทอร์โมคัปเปิล Type K ทั้ง 8 จุดซึ่งข้อมูลและผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ๆ คือ

- 5.1.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalence ratio (Φ) กับการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้
- 5.1.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของห้องเผาไหม้ กับการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้
- 5.1.3 ศึกษาความสัมพันธ์ของท่อทางออกกับการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้
- 5.1.4 ศึกษาความสัมพันธ์ของ Equivalence ratio (Φ) กับขนาดห้องเผาไหม้ และอุณหภูมิในห้องเผาไหม้

5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

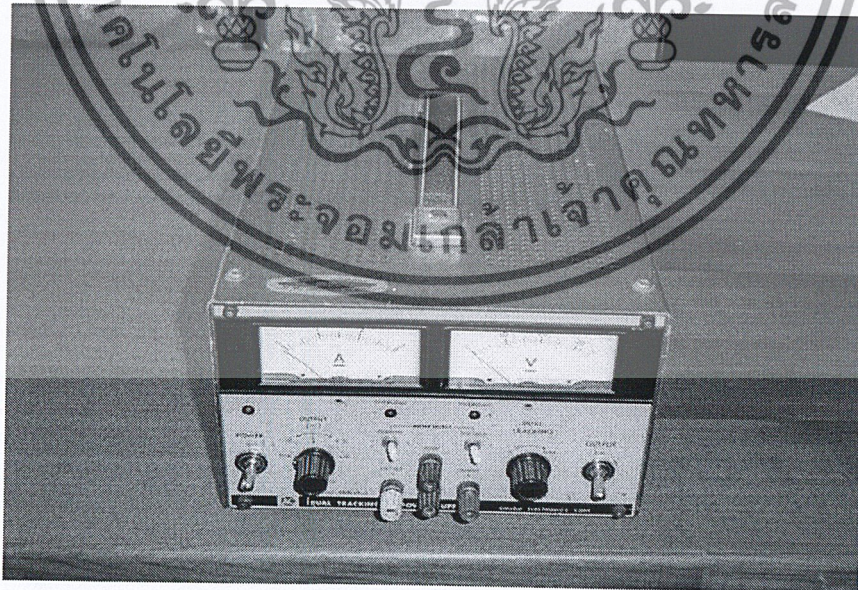
1. เตาเผาแบบวอร์เทก (Vortex Combustor) ประกอบด้วย
 - ช่องทางออกที่ระดับคงที่ (ระดับความสูงของท่อทิ้งภายในเตา)
 - ห้องเผาไหม้มี 3 ขนาด คือ 0.5D, 0.75D และ 1D
 - ส่วนให้ความร้อน
2. ชุดป้อนแก๊สแบบเกลียวล้าเฉียง
3. Inverter ควบคุมมอเตอร์
4. ชุดป้อนอากาศปฐมภูมิ (Primary air)
5. ชุดป้อนอากาศทุติยภูมิ (Secondary air)
6. ชุดวัดความดันแบบ Orifice และ Manometer
7. Air pump ขนาด bar (hp) ปริมาณการจ่ายลม m^3/min
8. ชุด Blower ขนาด 7.5 hp ปริมาณการจ่ายลม m^3/min
9. ตัวแสดงค่าอุณหภูมิแบบดิจิตอล
10. เทอร์โมคัปเปิล Type K (ช่วงการวัด 0 – 1300 °C)
11. อุปกรณ์จุดติดไฟ (Ignition subsystem) แบบหัวเผาใช้แก๊สปิโตรเลียม (LPG)
12. อุปกรณ์วัดความชื้นของอากาศ



- 1) Blower 2) Bypass valve 3) Needle valve 4) Manometer 5) Orifice plate 6) Inverter 7) Screw feeder 8) Hopper 9) Digital thermocouple 10) Thermocouple 11) Needle valve 12) Primary air nozzle 13) Orifice plate 14) Manometer 15) Needle valve 16) Air compressor 17) Vortex Combustor 18) LPG Supply 19) Cyclone

รูปที่ 5.1 แสดงอุปกรณ์ในการทดลอง

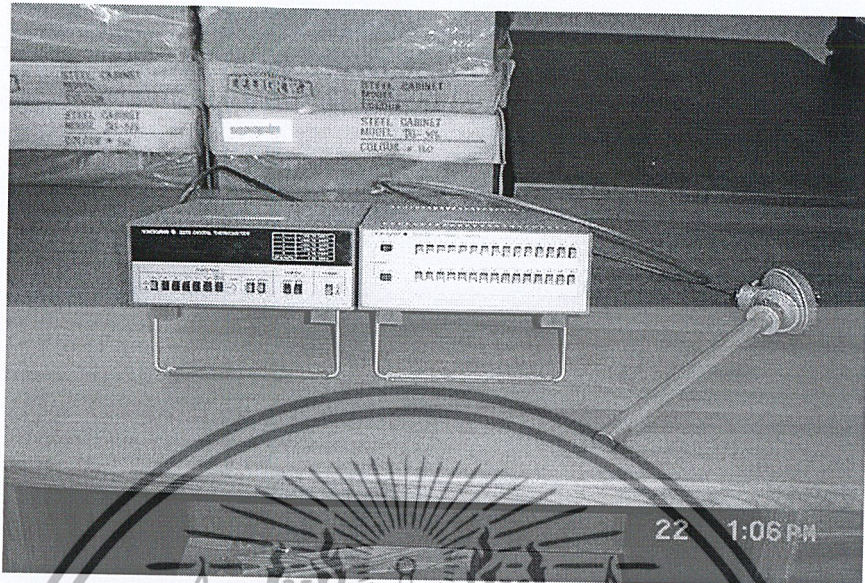
ภาพอุปกรณ์และภาพการทดลอง



เป็นชุดปรับอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ

รูปที่ 5.2 Power supply

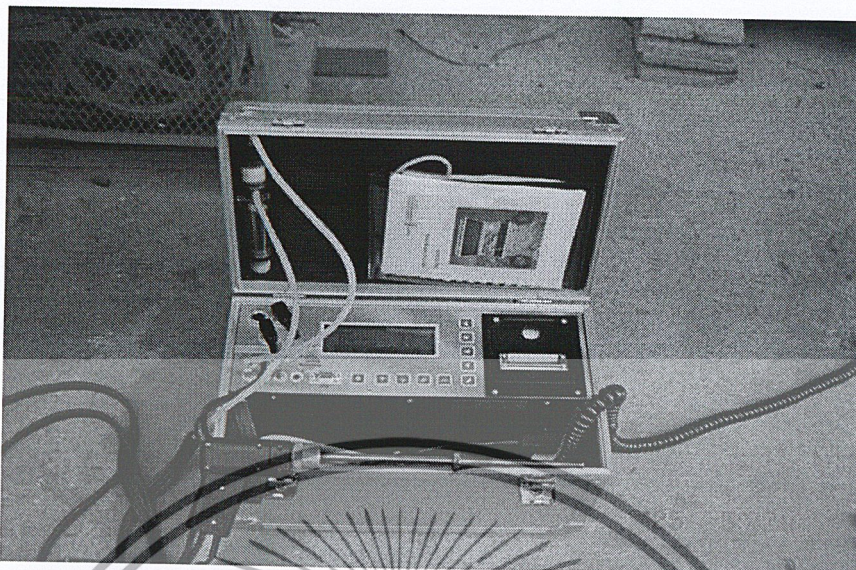
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



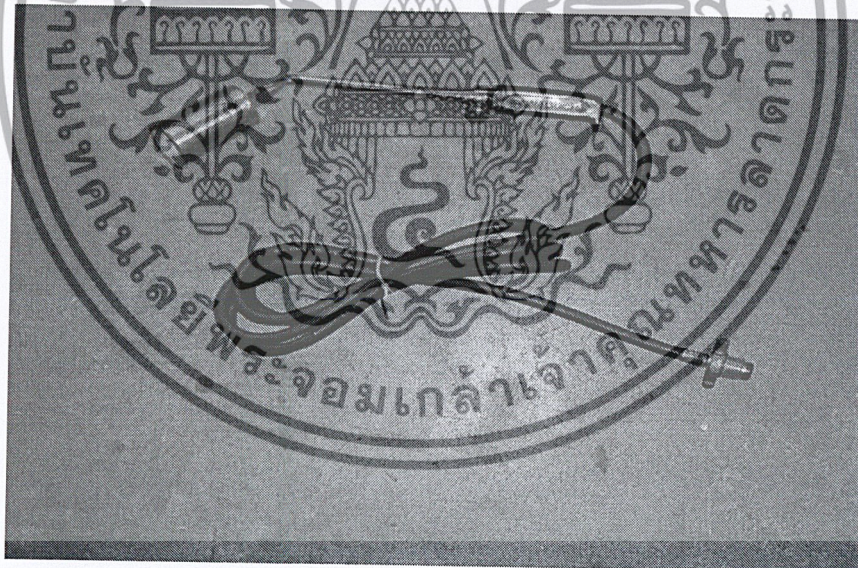
เป็นอุปกรณ์แสดงผลการวัดอุณหภูมิ ยี่ห้อ MAXTHERMO รุ่น MC - 1730 แสดงได้ดังรูป
รูปที่ 5.3 Digital thermocouple



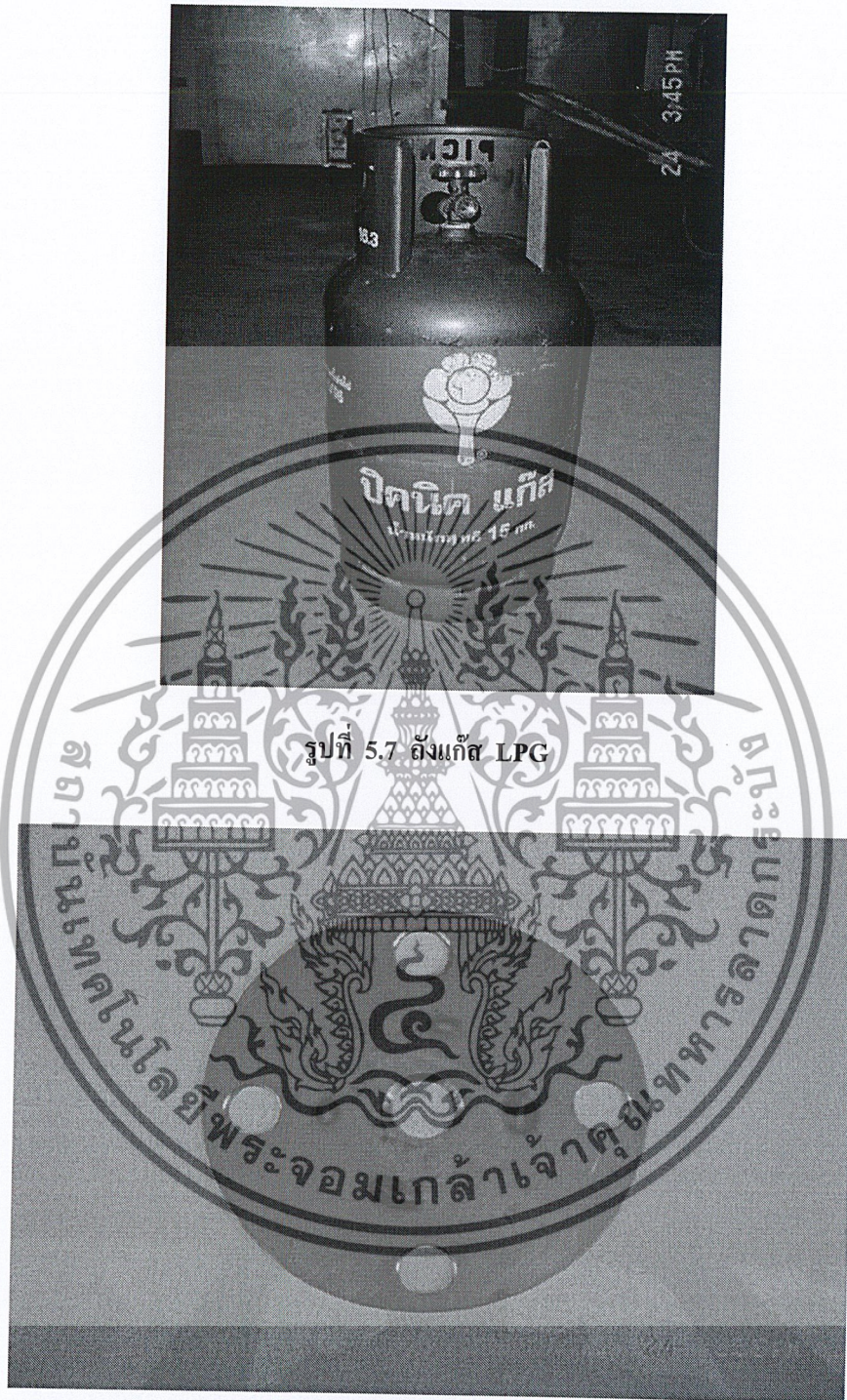
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิภายในเตา โดยเทอร์โมคัปเปิ้ลที่เป็น Type K
ยี่ห้อ MAXTHERMO วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0 - 1200 องศาเซลเซียส มีลักษณะดังรูป
รูปที่ 5.4 Thermocouple Type K



เป็นชุดวัดแก๊สไอเสียที่ออกจากเตาเผาแบบวอร์เทค
รูปที่ 5.5 Gas analyier



ใช้สำหรับอุ่นเตา ยี่ห้อ KAWAGUCHI โดยปลายสายจะต่อเข้ากับถังก๊าซ ซึ่งมีลักษณะดัง
รูปที่ 5.6 Burner



รูปที่ 5.8 Orifice plate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

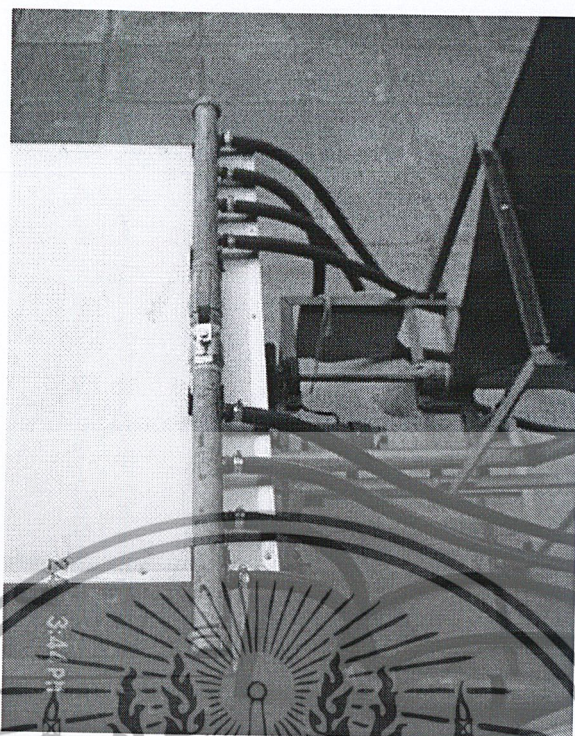


รูปที่ 5.9 Manometer

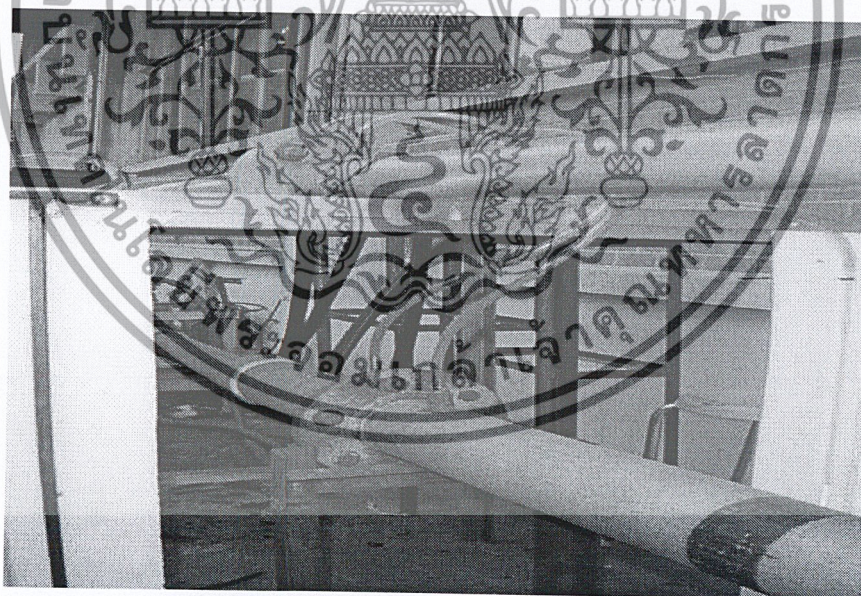
เป็นชุดอากาศแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิ

รูปที่ 5.10 Primary air And Secondary air System

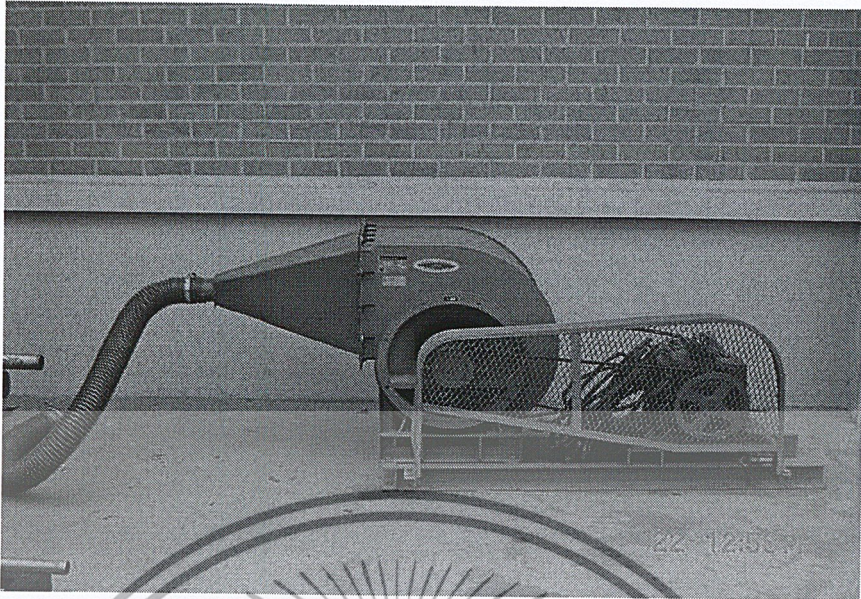
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชุดอากาศทุติยภูมิ
รูปที่ 5.11 Secondary air



ชุดอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิที่ประกอบด้วยชุดออริฟิส
รูปที่ 5.12 Orifice Plate System



เป็นชุดป้อนอากาศให้แก่ระบบป้อนภูมิและทุติยภูมิ
รูปที่ 5.13 Blower



แบ่งเป็นสองส่วน ด้านบนเป็นโครงเหล็กทำเป็นสี่เหลี่ยมเอาไว้สำหรับเก็บแกลบ ด้านล่างทำเป็นกรวยสี่เหลี่ยม ทำการป้อนแกลบโดยใช้สกรูในการขนส่ง (Screw feeder) โดยอัตราการป้อนแกลบ 0.3 kg/min โดยใช้มอเตอร์ขนาด 0.2 KW.3 เฟส 1 ตัว พร้อมกับอินเวอร์เตอร์ไว้ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ แสดงได้ดังรูป

รูปที่ 5.14 Screw Feeder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

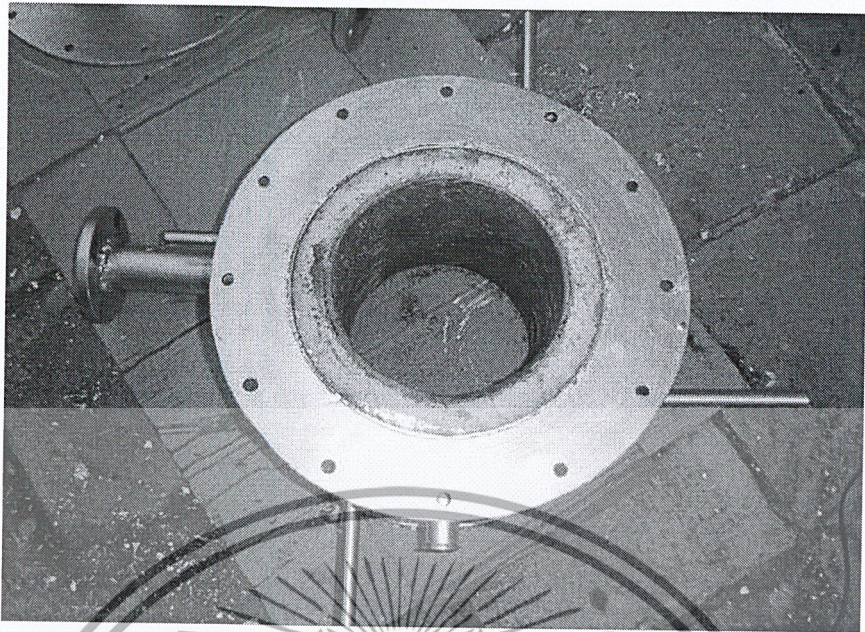


เป็นท่อทางออกของไอเสียของระบบ

รูปที่ 5.15 Exhaust Tube

เป็นห้องเผาไหม้ด้านล่างที่มี ขนาด 0.5D
รูปที่ 5.16 Vortex Combustor 0.5D Part 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เป็นห้องเผาไหม้ด้านล่างที่มี ขนาด 0.75D

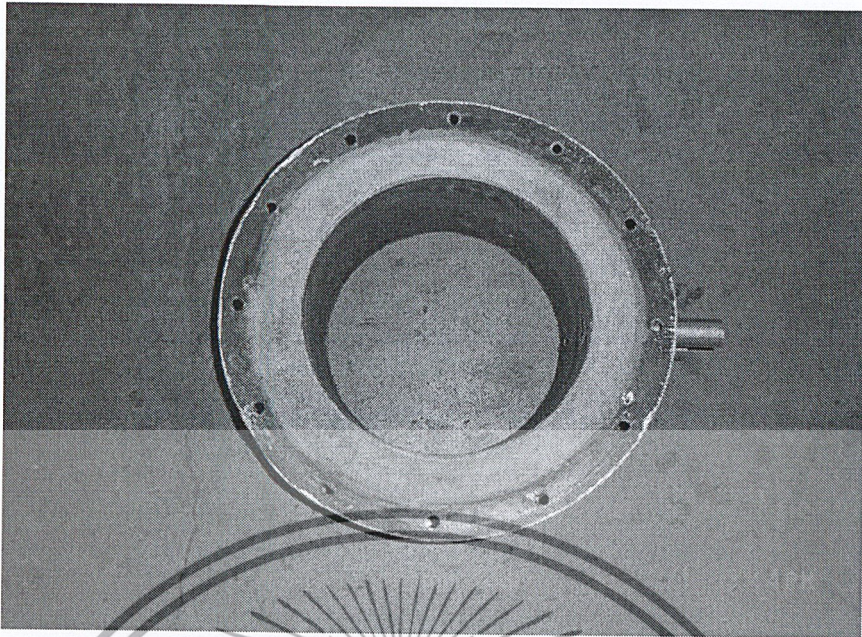
รูปที่ 5.17 Vortex Combustor 0.75D Part 1



เป็นห้องเผาไหม้ชุดที่2ซึ่งจะมีท่อทูดึงมียู่ด้วย

รูปที่ 5.18 Vortex Combustor 1D Part 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

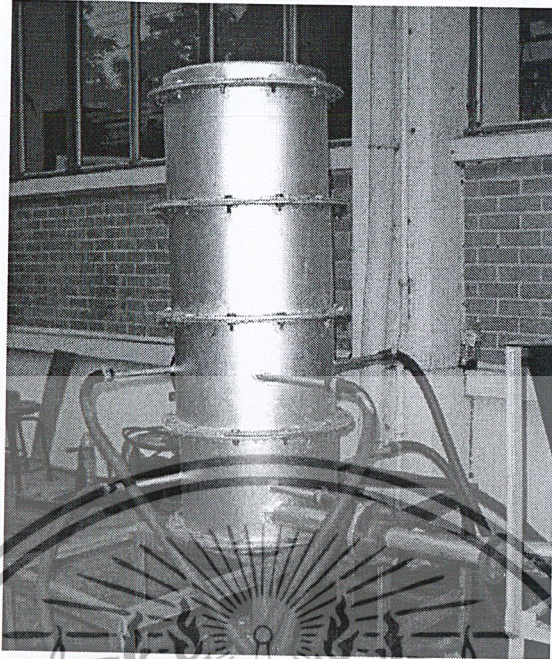


เป็นห้องเผาไหม้ตัวด้านบนซึ่งจะมีช่องวัดเทอร์โมคัปเปิ้ลอยู่ 2 ตำแหน่ง
รูปที่ 5.19 Vortex Combustor 1D Part 3 And 4



เป็นชุดเตาเผาที่ประกอบครบทุกเตาที่มีเตาเผาส่วนล่างที่มีขนาด 0.5D
รูปที่ 5.20 Vortex Combustor (0.5D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เป็นชุดเตาเผาที่ประกอบครบทุกเตาที่มีเตาเผาส่วนล่างที่มีขนาด 1.0D

รูปที่ 5.21 Vortex Combustor (ID)

5.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในขั้นตอนการทดลองลักษณะการเผาไหม้ เพื่อศึกษาลักษณะการเผาไหม้และอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ในเตาเผา โดยมีอัตราส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นตัวแปรหลัก

5.3.1 วิธีอรเผาไหม้แกลบในเตา

- วิธีการอุ่นเตา สำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในห้องเผาไหม้ต้องอุ่นให้อุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงถึงจุดติดไฟของแกลบ โดยใช้หัวเผา เริ่มเปิดวาล์วแก๊ส PEG ในปริมาณน้อยแล้วจุดหัวเผาให้ติดไฟ หลังจากนั้นเปิดวาล์วออกซิเจนและปรับอัตราส่วนให้พอเหมาะ โดยให้เปลวไฟเป็นสีน้ำเงิน และมีความยาวเปลวไฟประมาณ 20 cm. (จะทำให้อุณหภูมิของเตาขึ้นเร็ว) และอุ่นจนอุณหภูมิภายในเตาสูงถึง 450 °C ในช่วงนี้จะเวลาไม่น้อยกว่า 20 นาที

- เมื่ออุณหภูมิ ประมาณ 450 °C เริ่มปล่อยแกลบเข้าไปทางท่อ Primary air ที่ละน้อยเพื่อให้แกลบได้เผาไหม้ ช่วยในการเพิ่มอุณหภูมิในเตาให้สูงขึ้น จนถึง 750 – 800 °C ขณะเดียวกันเริ่มเพิ่มอากาศส่วนที่สอง โดยวัดจากมานอมิเตอร์ให้ได้ประมาณ 5 mm H₂O และทำการดับหัวเผาแล้วปรับอัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงแกลบกับอากาศ ขึ้นทีละน้อย จนการเผาไหม้มีความเสถียรจากนั้นจึงทำการทดลองต่อไป

5.3.2 การทดลองหาขอบเขตการติดไฟของแกลบ (Flame Stability)

เพื่อทดลองหาขอบเขตการติดไฟของแกลบ ภายในสภาวะต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ คือ

ค่า AF ratio อัตราการป้อนแกลบ และปริมาณอากาศส่วนที่สอง มีวิธีการทดลองดังนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

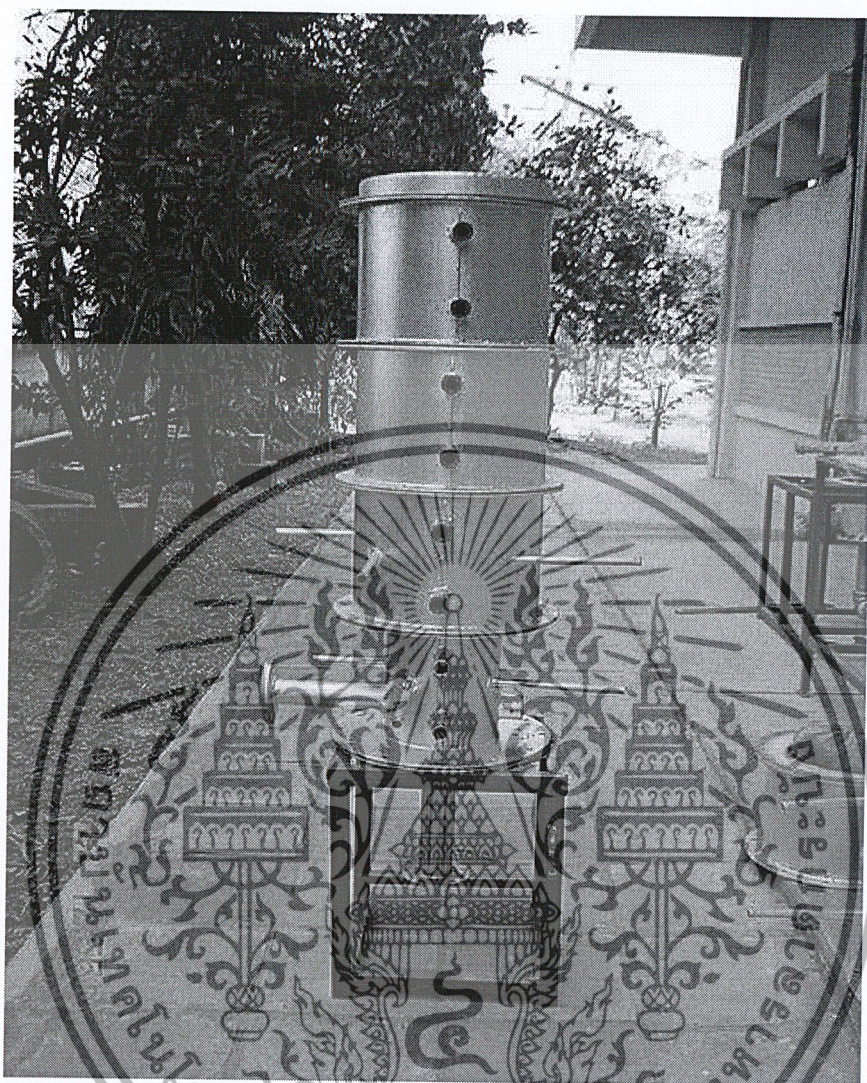
- ทำการอุ่นห้องเผาไหม้ และเผาแลกเปลี่ยนตามวิธีข้อ 5.3.1 ปรับปริมาณการป้อนแลกเปลี่ยนให้ได้ตามที่กำหนดไว้ และปรับอากาศให้การเผาไหม้เสถียร ทั้งสภาวะนี้ไว้ประมาณ 5 นาทีเพื่อให้เกิดการคงตัว เพิ่มปริมาณอากาศให้มากขึ้นตามสัดส่วนที่ได้กำหนดเอาไว้ และทั้งสภาวะนี้ไว้ประมาณ 5 นาที เพื่อให้เกิดสภาวะคงตัว และเริ่มบันทึกข้อมูลจากสัญญาณ จากเครื่องมือวัดทั้งหมด 8 จุด บันทึกนาที่ละ 1 ครั้ง ใช้เวลา 15 นาที ให้ครบทุกตำแหน่ง เมื่อครบแล้ว เริ่มปรับอากาศเพิ่มและทำการเก็บข้อมูลเช่นเดิม จนกว่าอัตราการป้อนอากาศเข้าจะทำให้ไฟดับแลกเปลี่ยนไม่ติดไฟ
- ลดอากาศ ทำการจุดเตาตามหัวข้อ 5.3.1 และปริมาณอากาศตามสัดส่วน ตามกำหนด บันทึกค่าอุณหภูมิ ณ ที่เวลาตามตำแหน่งทั้ง 8 ตำแหน่ง ให้เวลา 15 นาที ลดปริมาณแลกเปลี่ยนจนไม่ติดไฟ

5.3.3 การทดลองหาอุณหภูมิการเผาไหม้

เพื่อการแพร่กระจายของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ ที่ค่าอัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงต่างๆ ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ 1 นาทีต่อครั้ง

5.3.4 สรุปขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

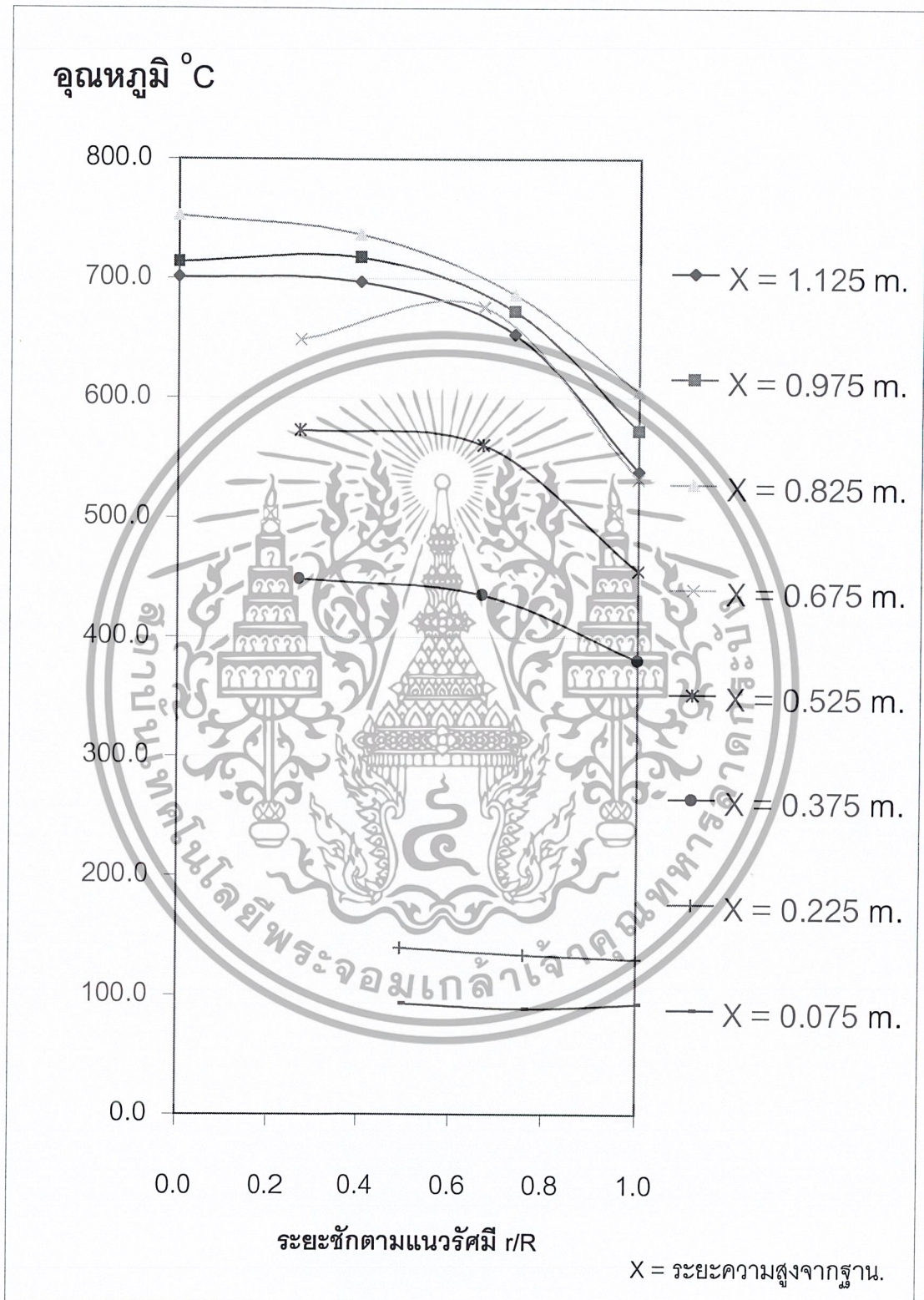
1. ติดตั้งเตาเผาห้องเผาไหม้หลักที่มีขนาด 0.5D (เป็นห้องเผาไหม้ที่มีขนาดเล็กที่สุด) และตั้งความลึกของท่อทางออก
2. อุ่นห้องเผาไหม้เตาเผาเวอร์เทคร์ให้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดติดไฟของแลกเปลี่ยน โดยเปิดวาล์วแก๊ส LPG ในปริมาณน้อยแล้วติดไฟที่หัวเผา ให้เปลวไฟเป็นสีน้ำเงินมีความยาวของเปลวไฟประมาณ 20 cm. จากการทดลองจะให้ความร้อนดีกว่าเปลวไฟที่สีน้ำตาลให้เตามีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเร็ว และให้ภายในเตามีอุณหภูมิสูงถึง 450 °C เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยโดยดูจากเทอร์โมคัปเปิล Type K ตัวที่ 5 – 8 ดังรูปที่ 5.2 พิจารณาจุดที่อุณหภูมิสูงสุด จึงเริ่มทดลองขึ้นต่อไป
3. ปรับปริมาณอากาศที่ท่อ Primary air ให้ได้ 60% ปลอ่ยไว้ประมาณ 5 นาที เพื่อให้เกิดสภาวะคงตัว แล้วเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่ 2 (Secondary air) ให้ได้ค่า 40% ที่ equivalence ratio (Φ) = 1.2 ปลอ่ยไว้ 5 นาที เพื่อให้เกิดสภาวะคงตัว แล้วปรับปริมาณการป้อนแลกเปลี่ยนโดยปรับที่ Inverter ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ เพื่อให้ได้อัตราการไหลของแลกเปลี่ยนที่ 0.3 kg/min
4. เริ่มบันทึกอุณหภูมิทั้ง 8 จุด บันทึกทุกๆ 1 นาที และคาเปอร์เซ็นความชื้น (%RH) ใช้เวลา 25 นาที ให้ครบทุกตำแหน่ง เมื่อครบทุกตำแหน่ง
5. ปรับอัตราการไหลของอากาศให้ (Φ) = 1.0 และ 0.8 ตามลำดับ ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 4
6. เปลี่ยนขนาดห้องเผาไหม้หลักที่มีขนาด 0.75D และ 1D ตามลำดับ ทดลองซ้ำ ข้อที่ 1 – 5



รูปที่ 5.22 แสดงตำแหน่งที่ใช้วัดอุณหภูมิของเปลวไฟ

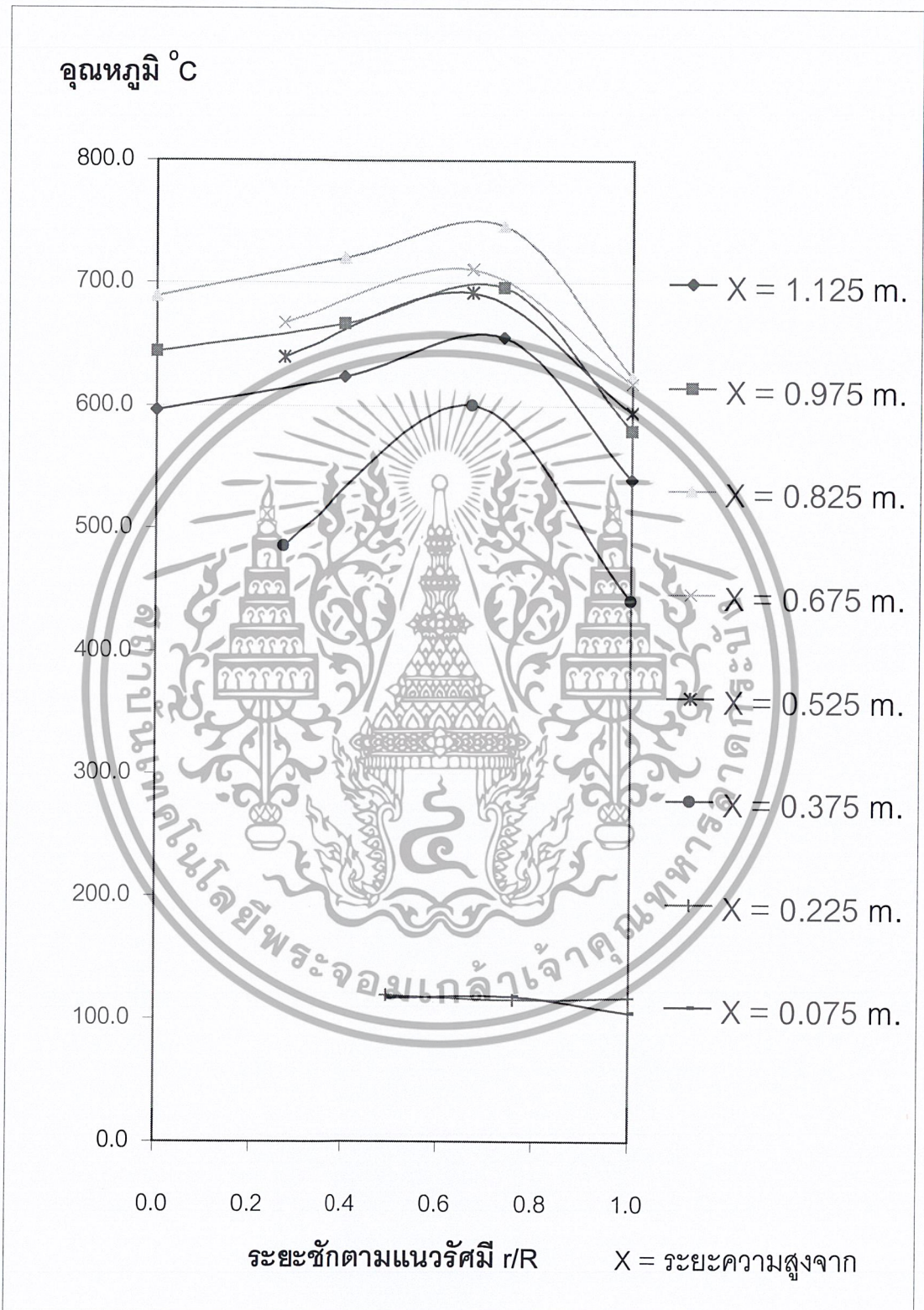
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ผลการทดลอง



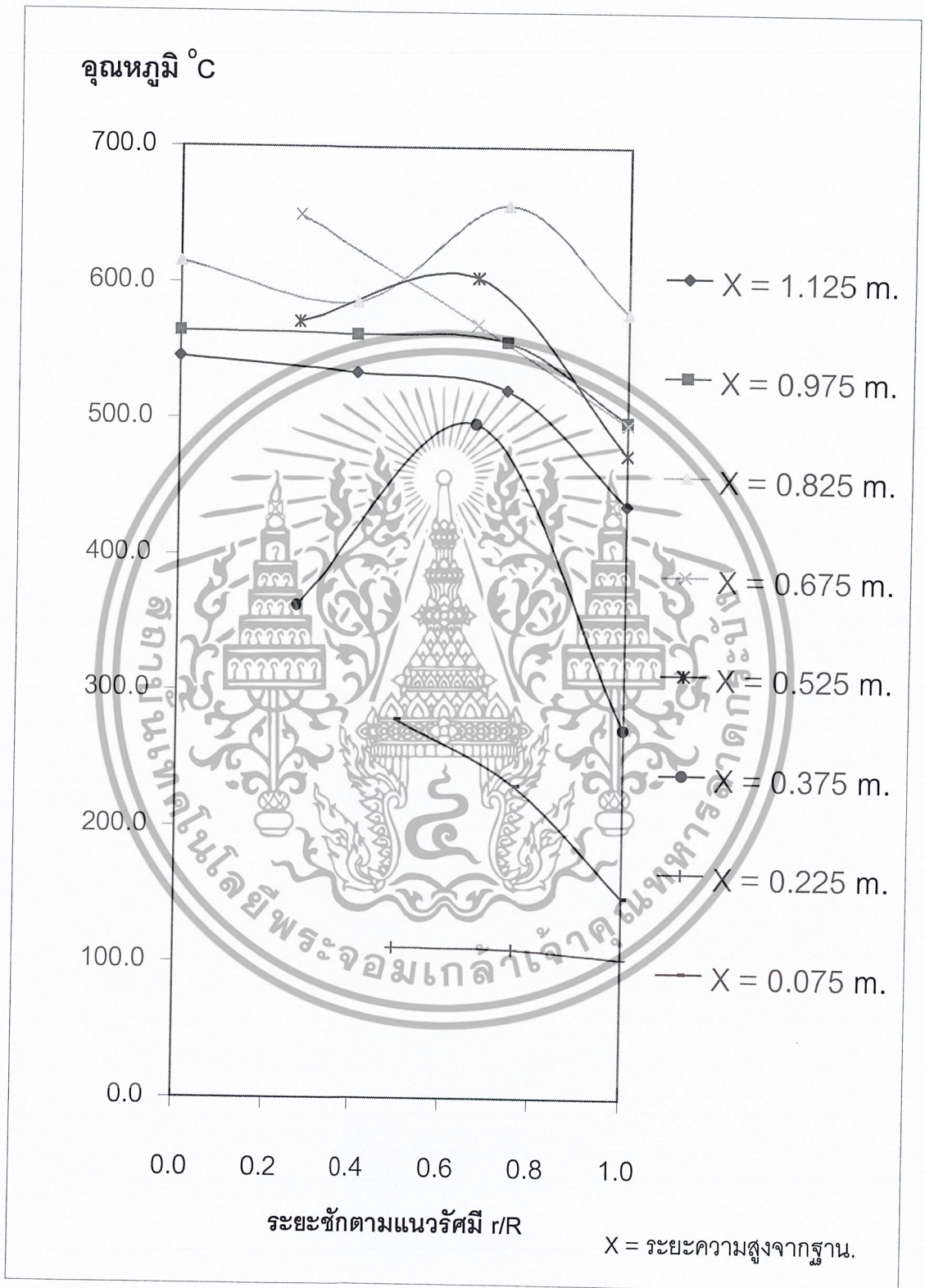
รูปที่ 5.23 การทดลองที่ 1 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.5D Eq.0.8 Pri.100% Sec.0%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



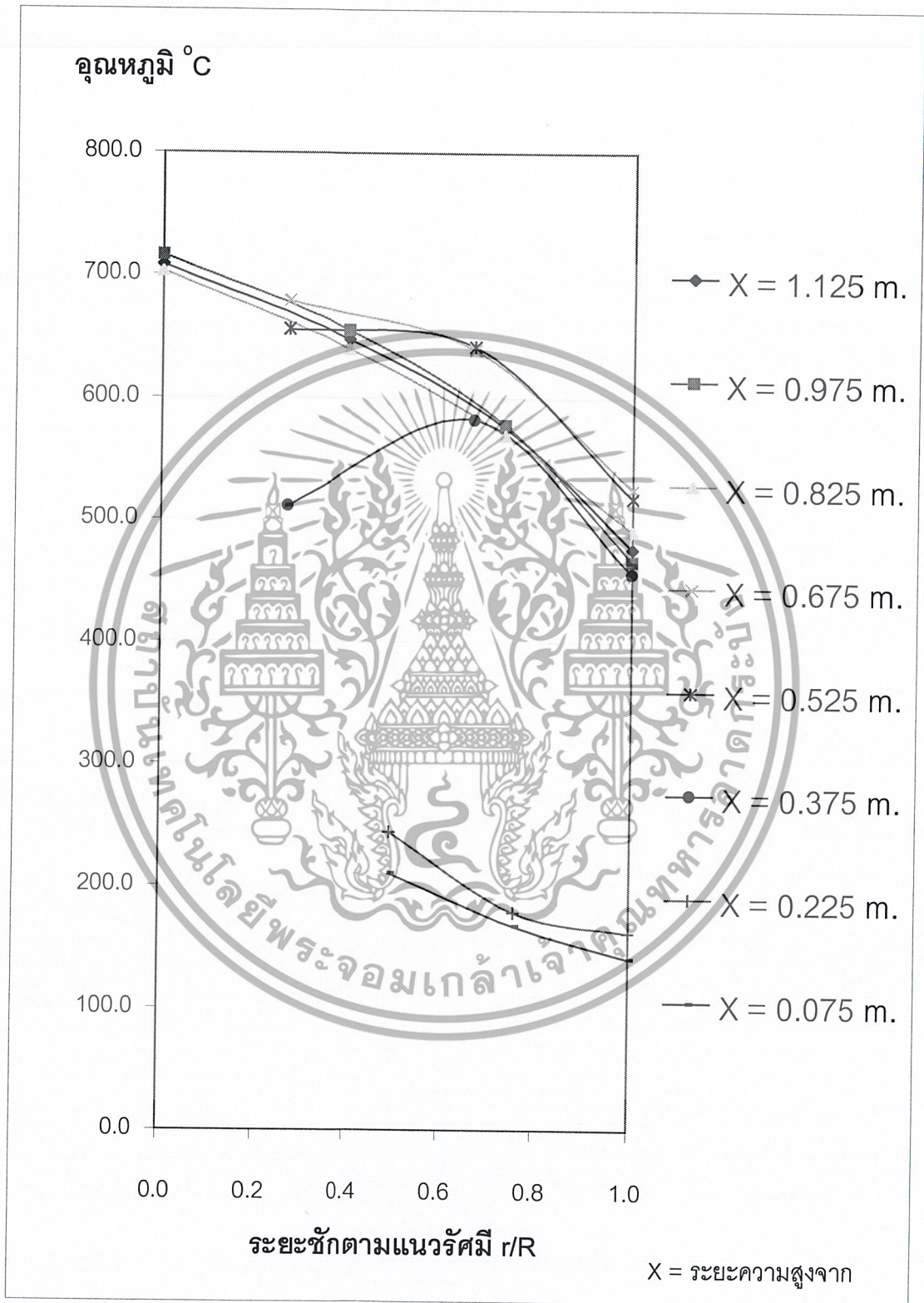
รูปที่ 5.24 การทดลองที่ 2 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.5D Eq.0.8 Pri.85% Sec.15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



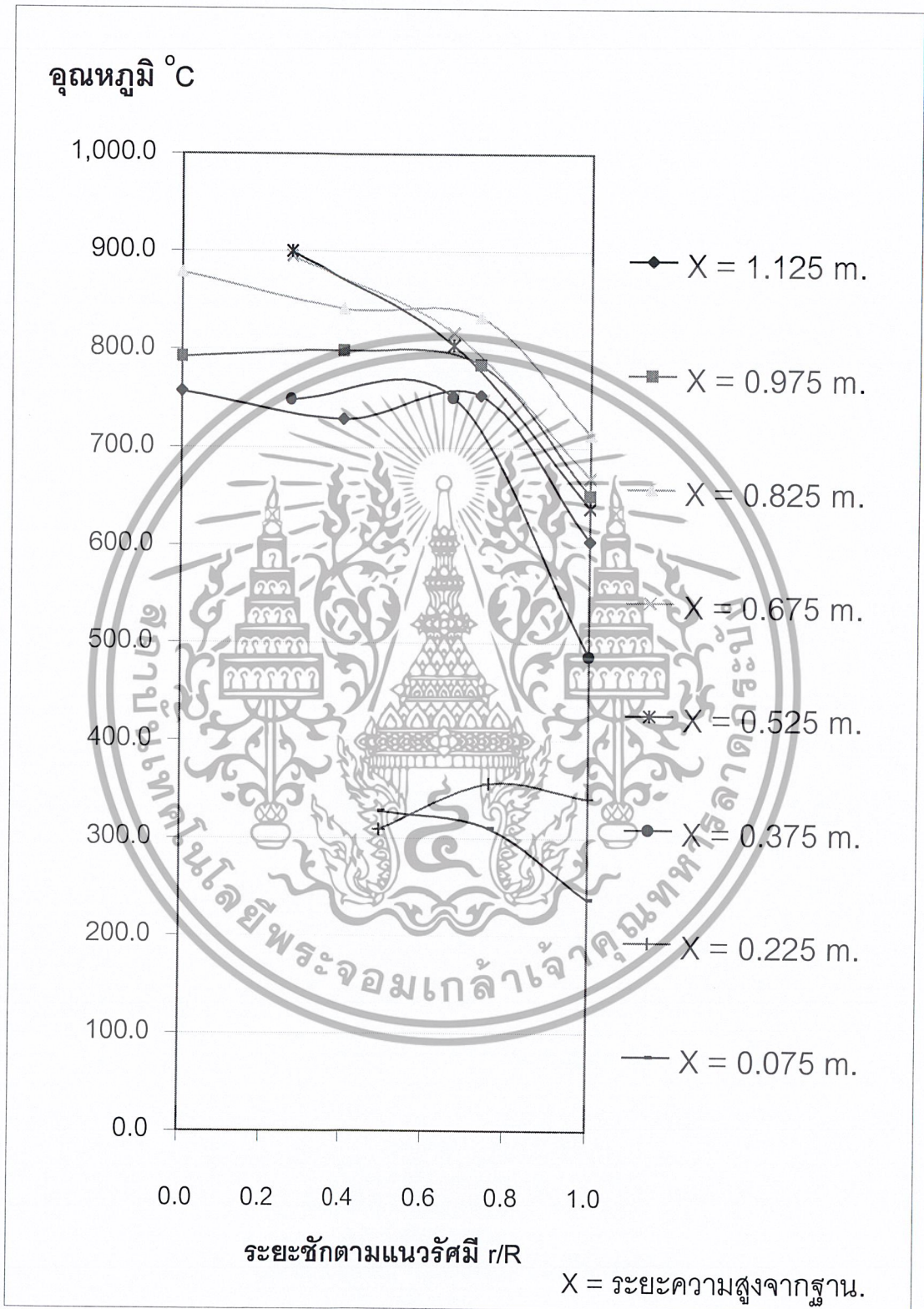
รูปที่ 5.25 การทดลองที่ 3 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเพาโหล่ Dia. 0.5D Eq.0.8 Pri.75% Sec.25%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



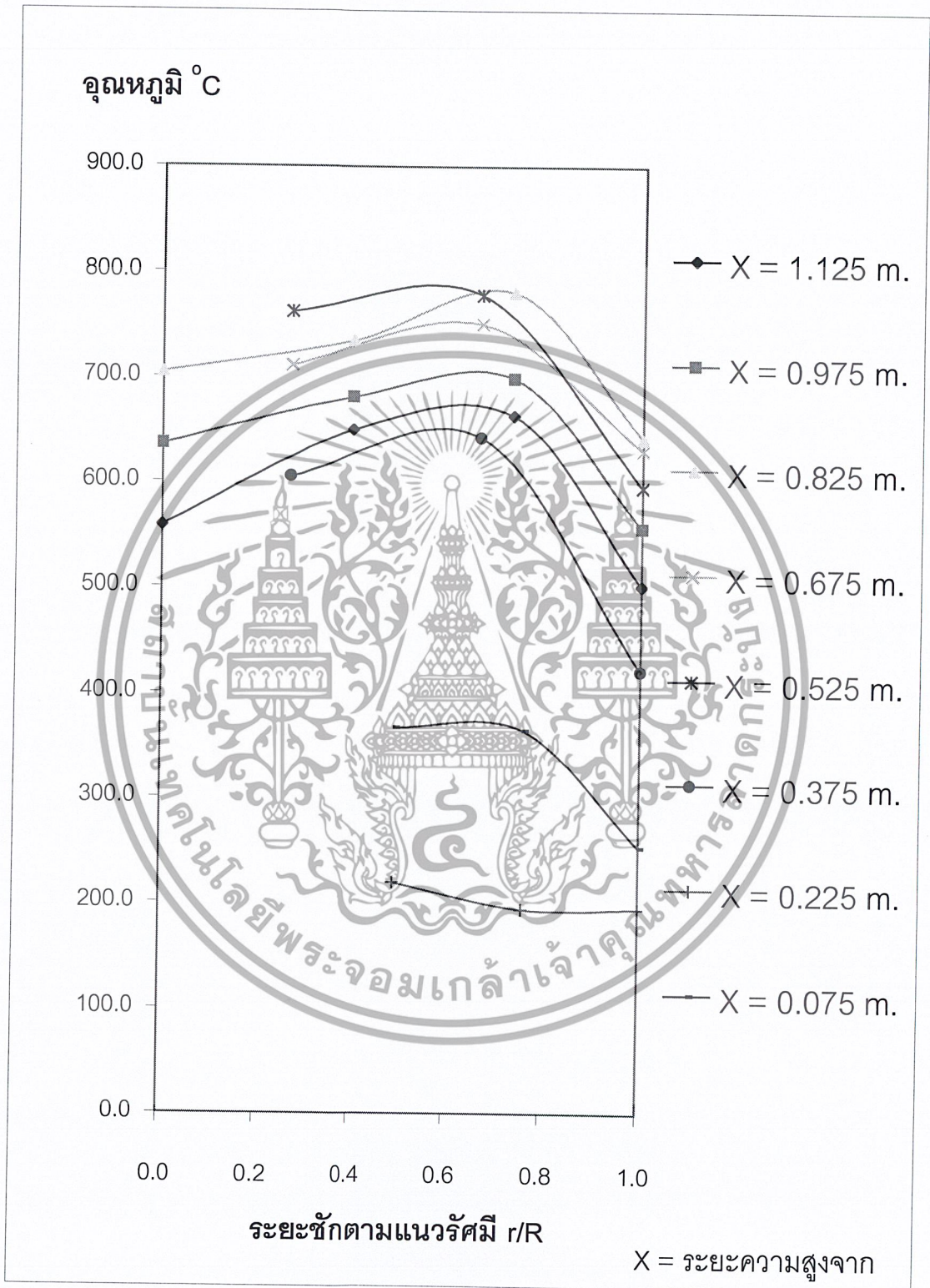
รูปที่ 5.26 การทดลองที่ 4 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.5D Eq.1.0 Pri.100% Sec.0%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

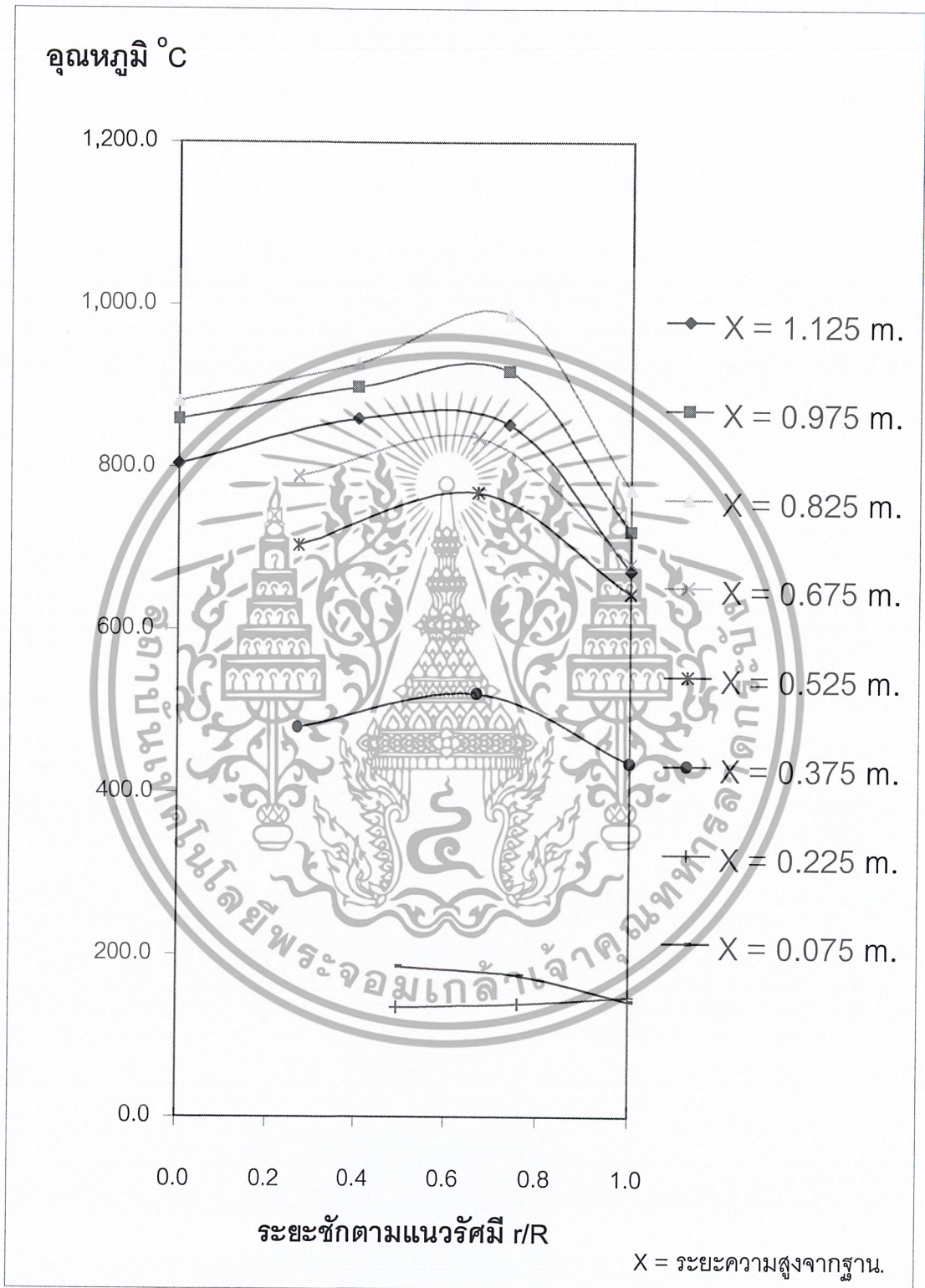


รูปที่ 5.27 การทดลองที่ 5 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.5D Eq.1.0 Pri.85% Sec.15%

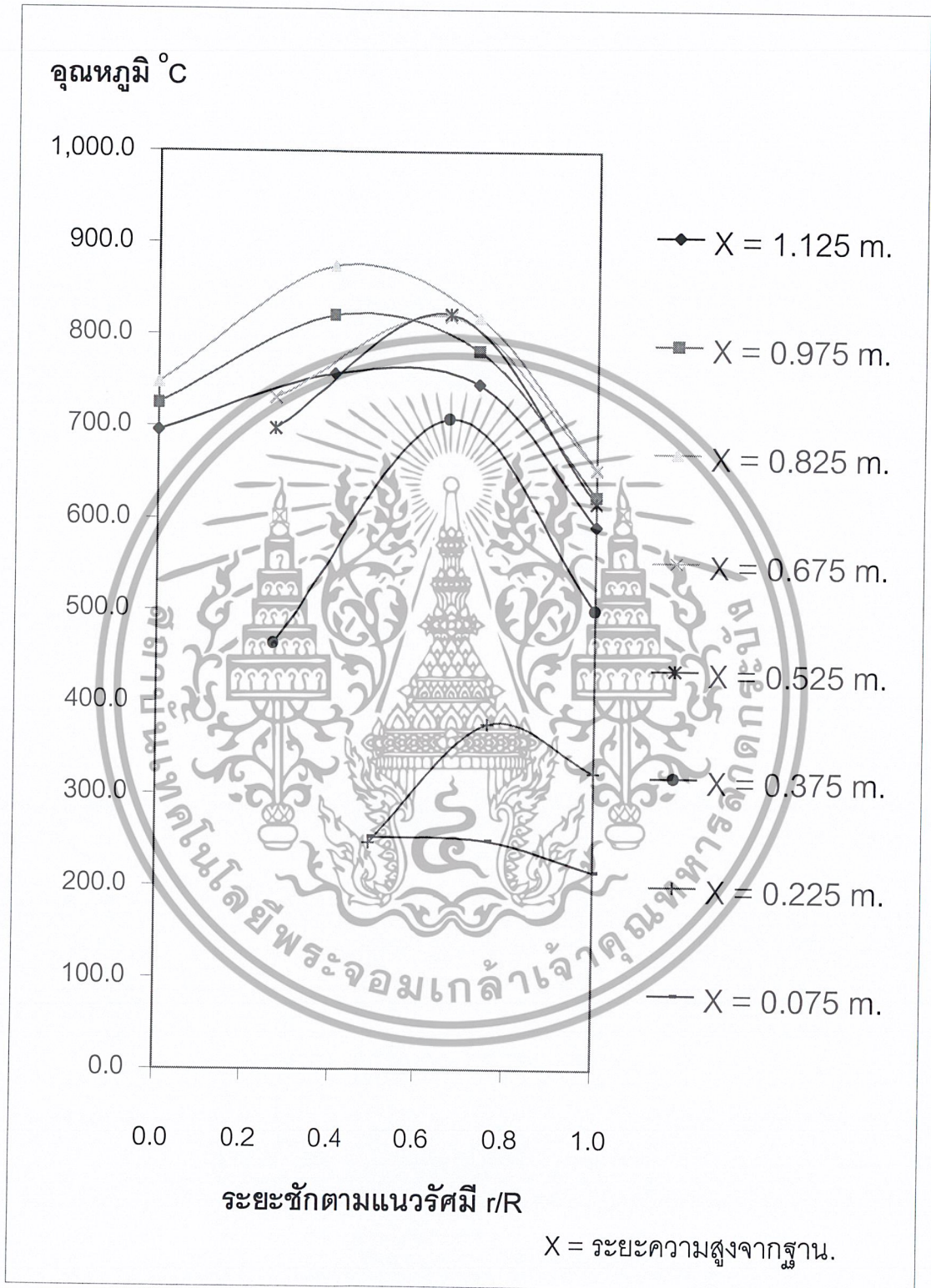
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



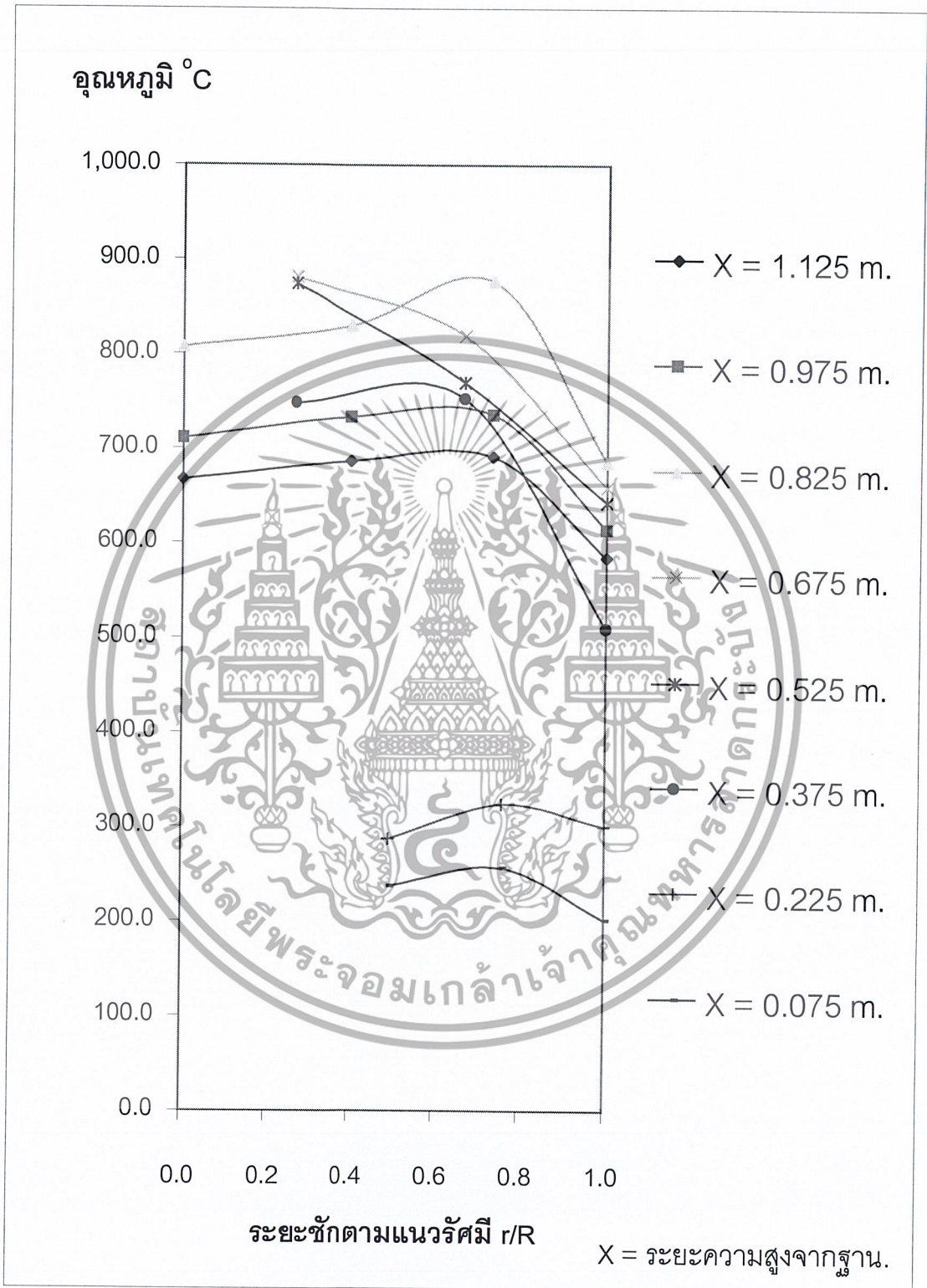
รูปที่ 5.28 การทดลองที่ 6 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.5D Eq.1.0 Pri.75% Sec.25%



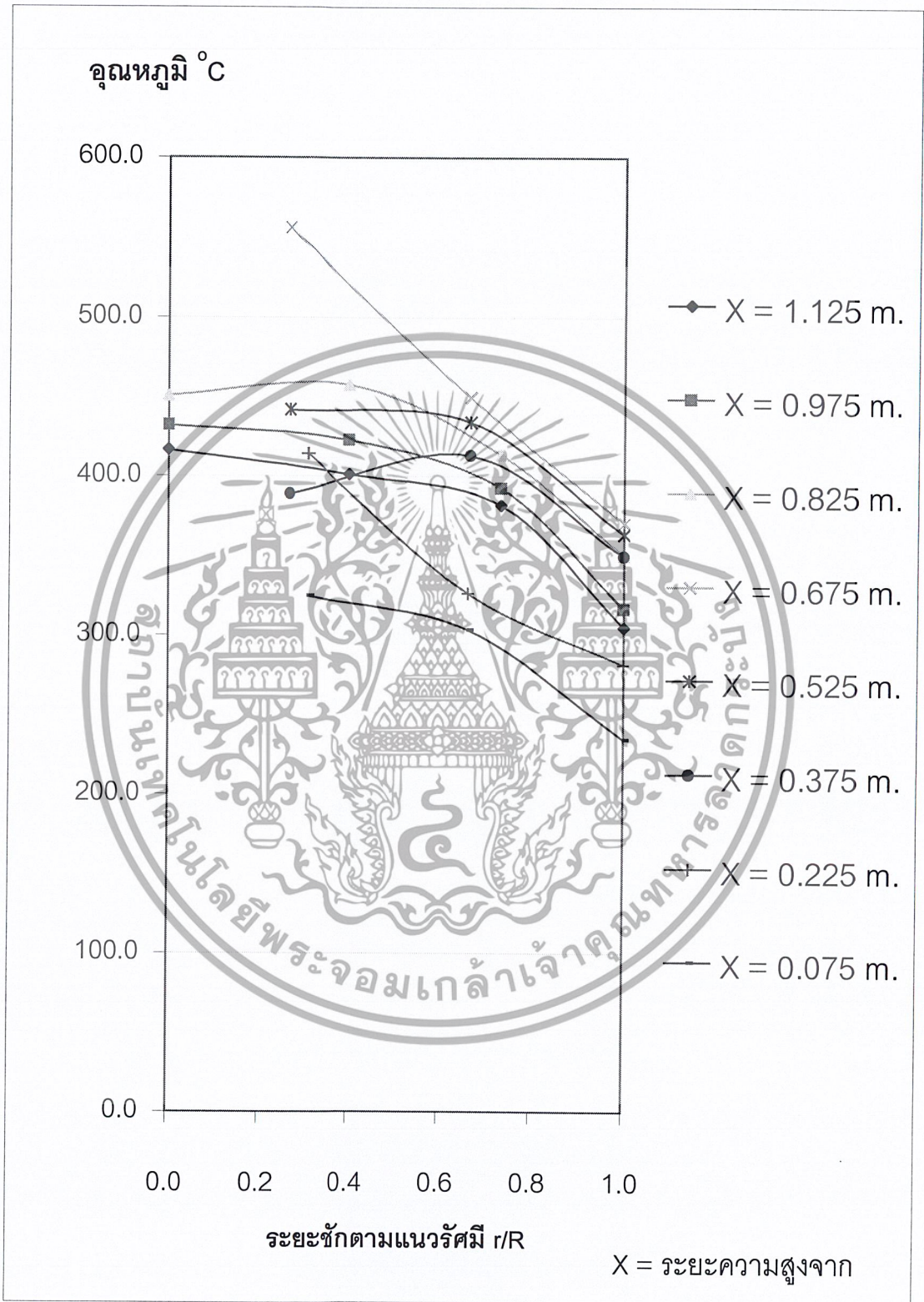
รูปที่ 5.29 การทดลองที่ 7 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.5D Eq.1.2 Pri.100% Sec.0%



รูปที่ 5.30 การทดลองที่ 8 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.5D Eq.1.2 Pri.85% Sec.15%



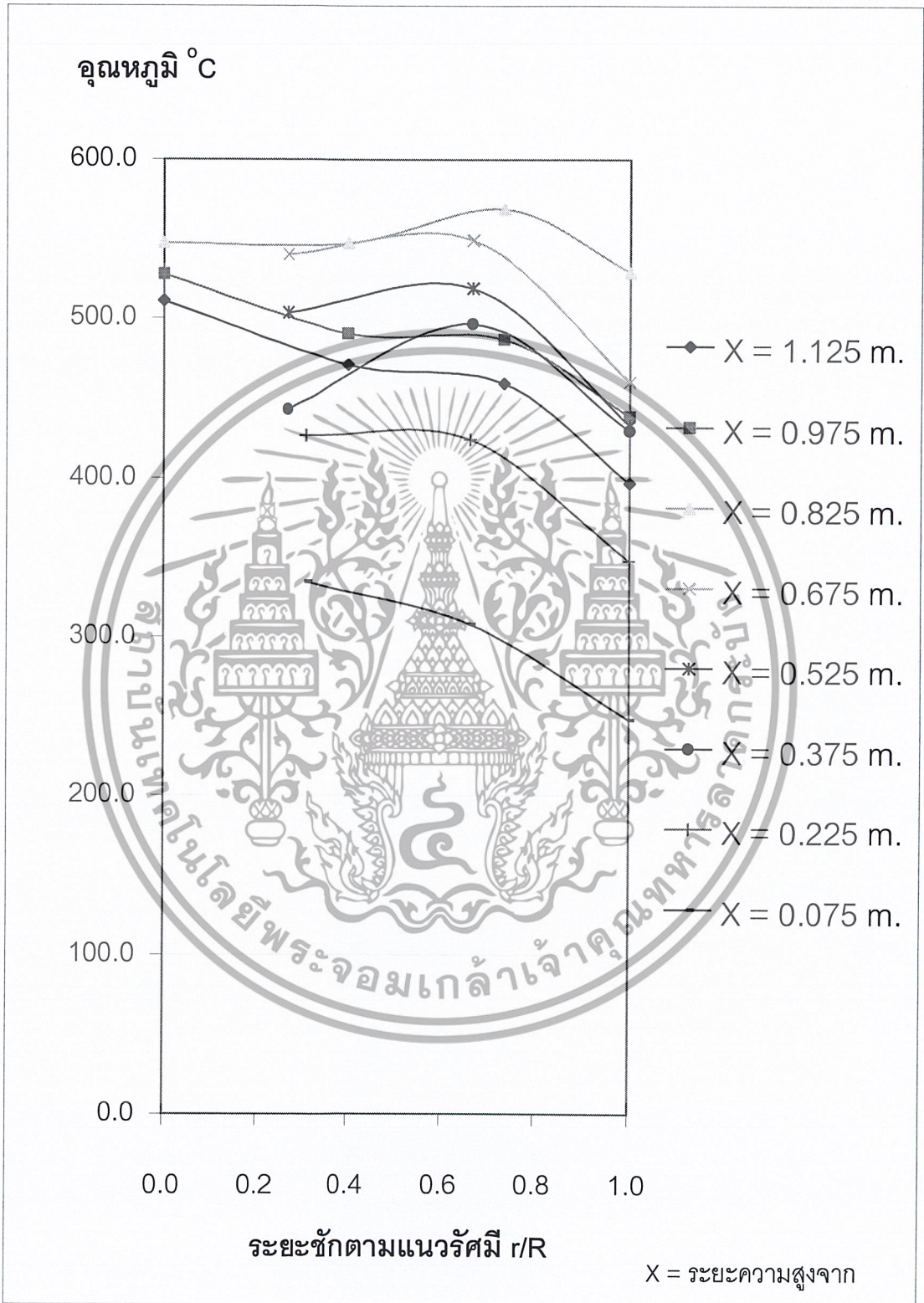
รูปที่ 5.31 การทดลองที่ 9 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.5D Eq.1.2 Pri.75% Sec.25%



รูปที่ 5.32 การทดลองที่ 10 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.75D

Eq.0.8 Pri.100% Sec.25%

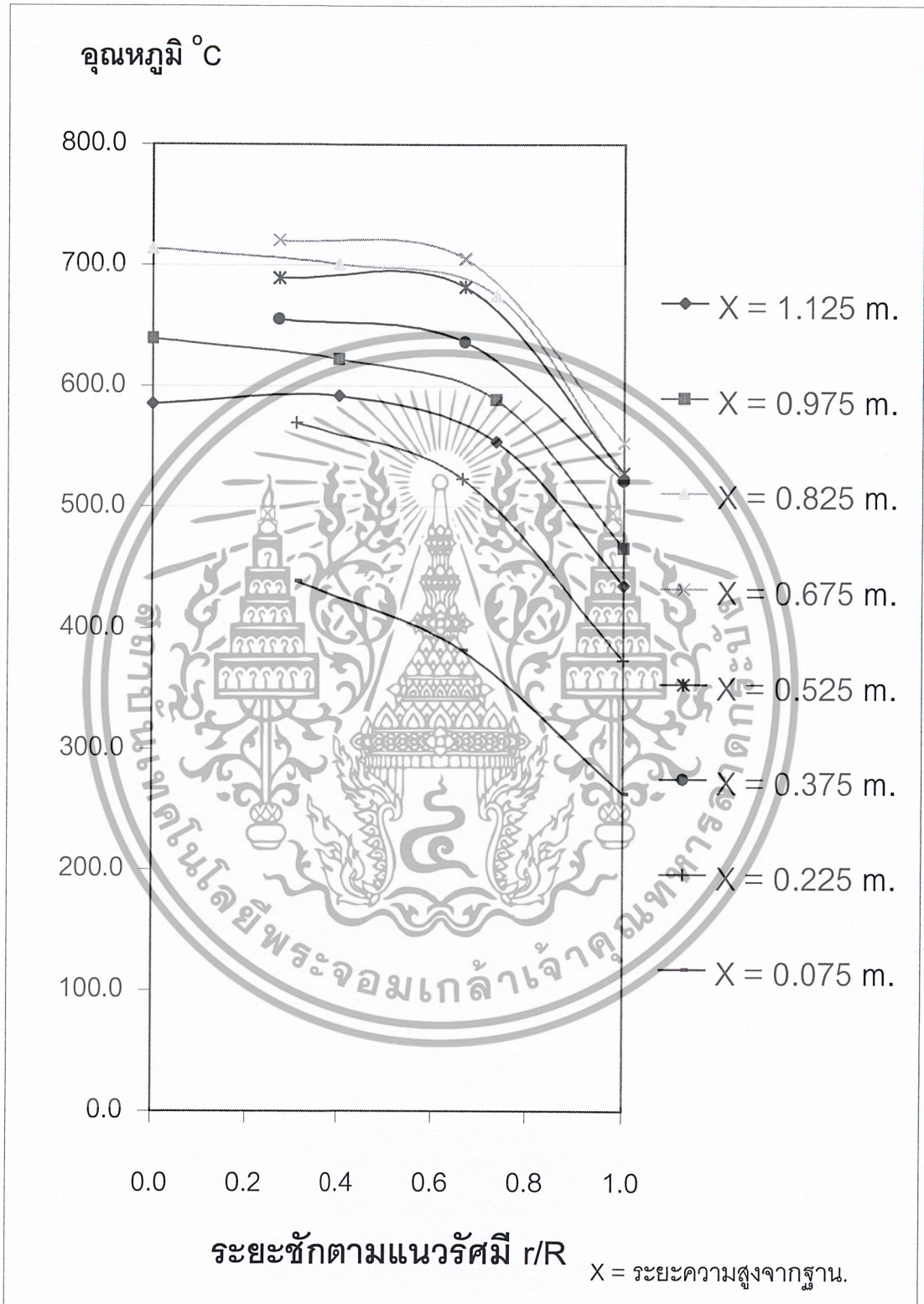
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.33 การทดลองที่ 11 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.75D

Eq.0.8 Pri.85% Sec.15%

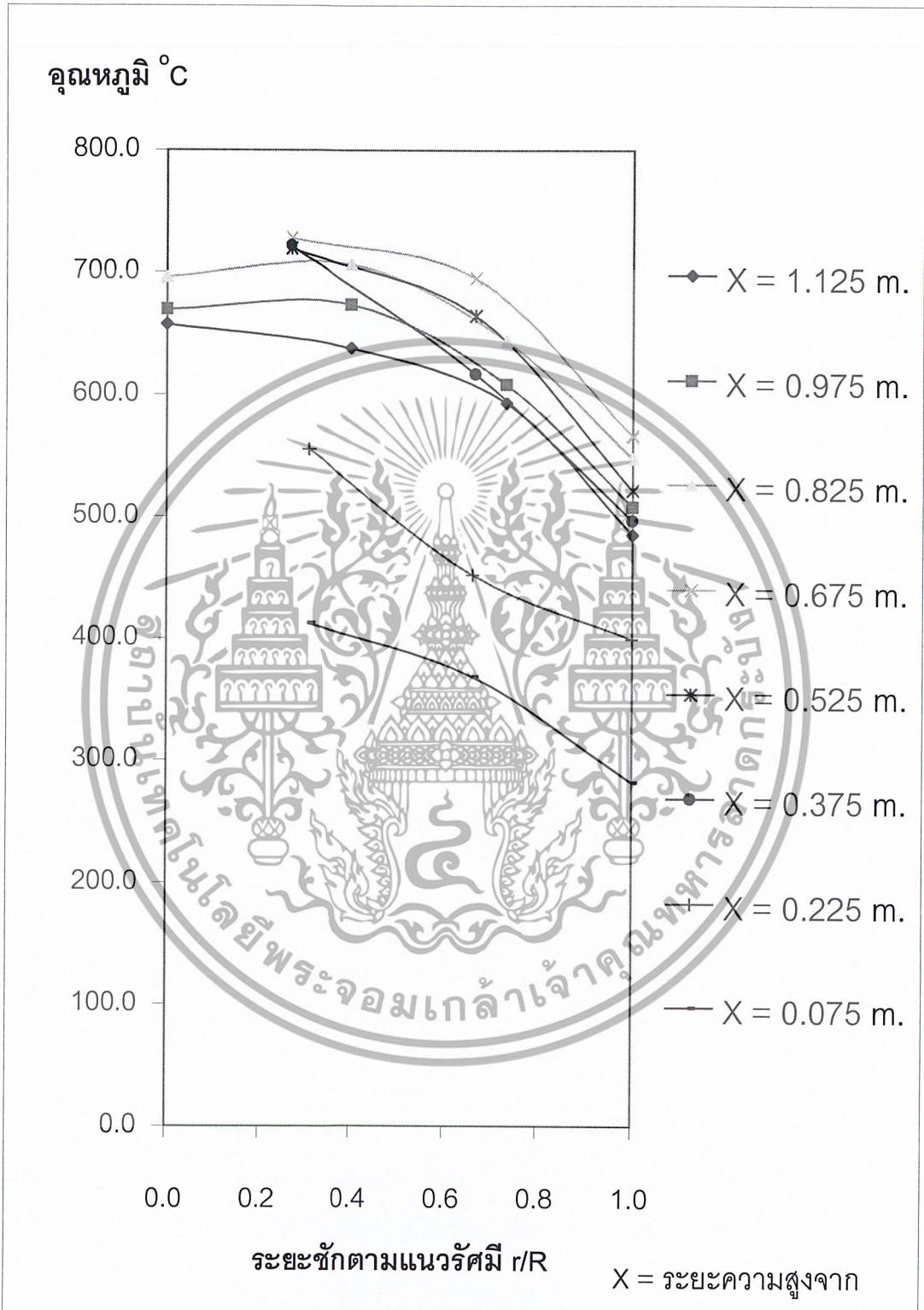
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.34 การทดลองที่ 12 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.75D

Eq.0.8 Pri.75% Sec.25%

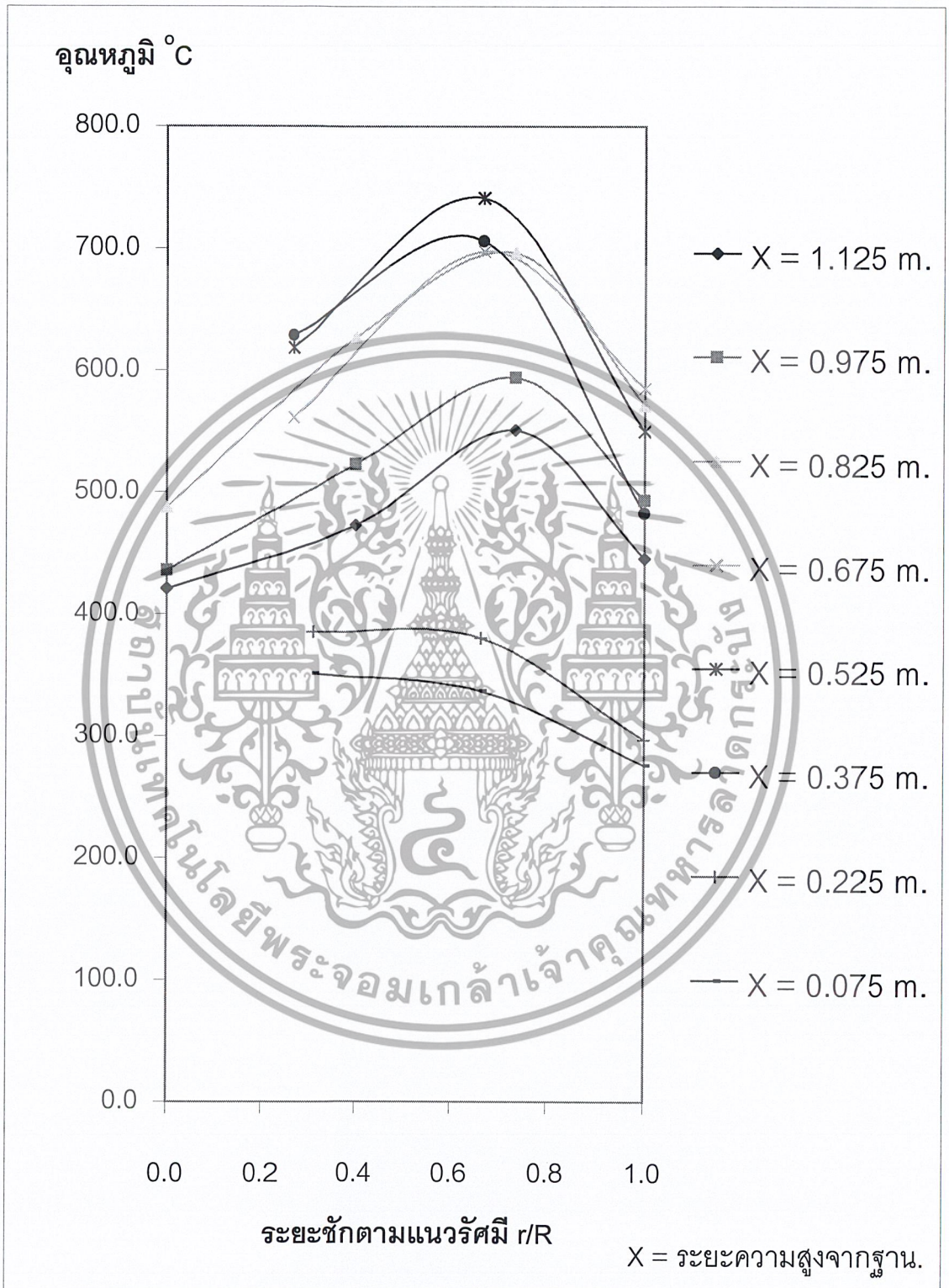
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.35 การทดลองที่ 13 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.75D

Eq.1.0 Pri.100% Sec.0%

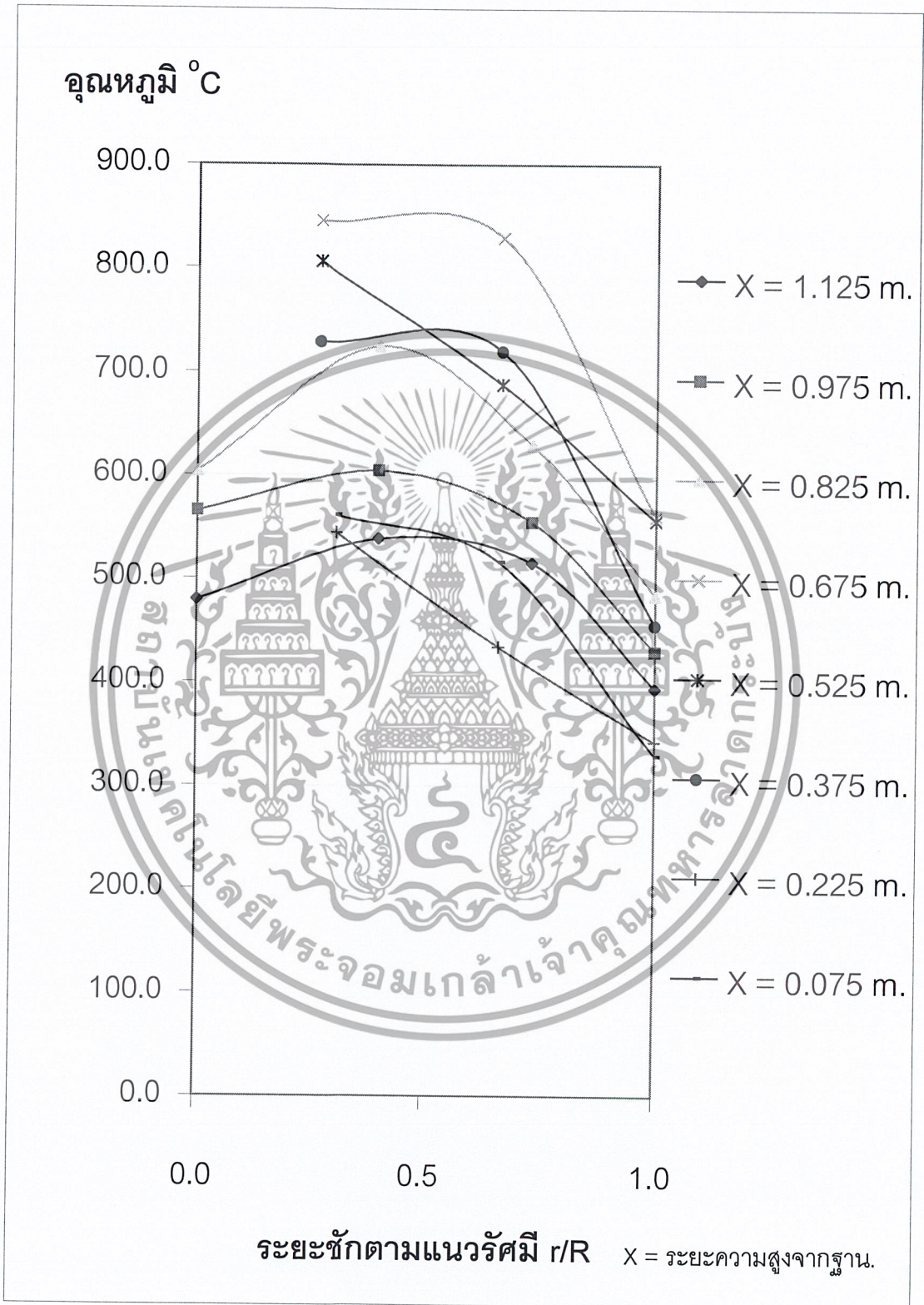
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.36 การทดลองที่ 14 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.75D

Eq.1.0 Pri.85% Sec.15%

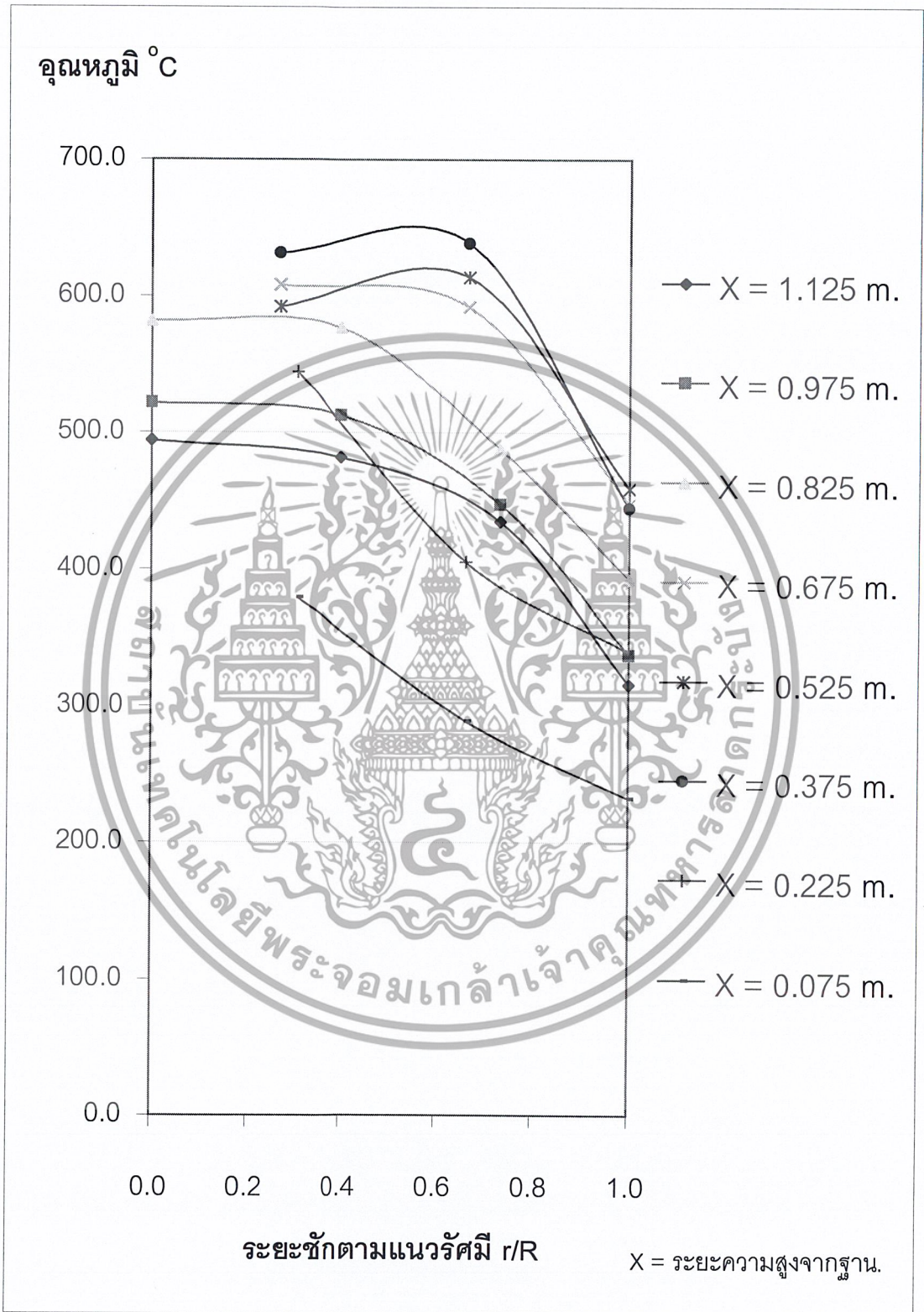
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.37 การทดลองที่ 15 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.75D

Eq.1.0 Pri.75% Sec.25%

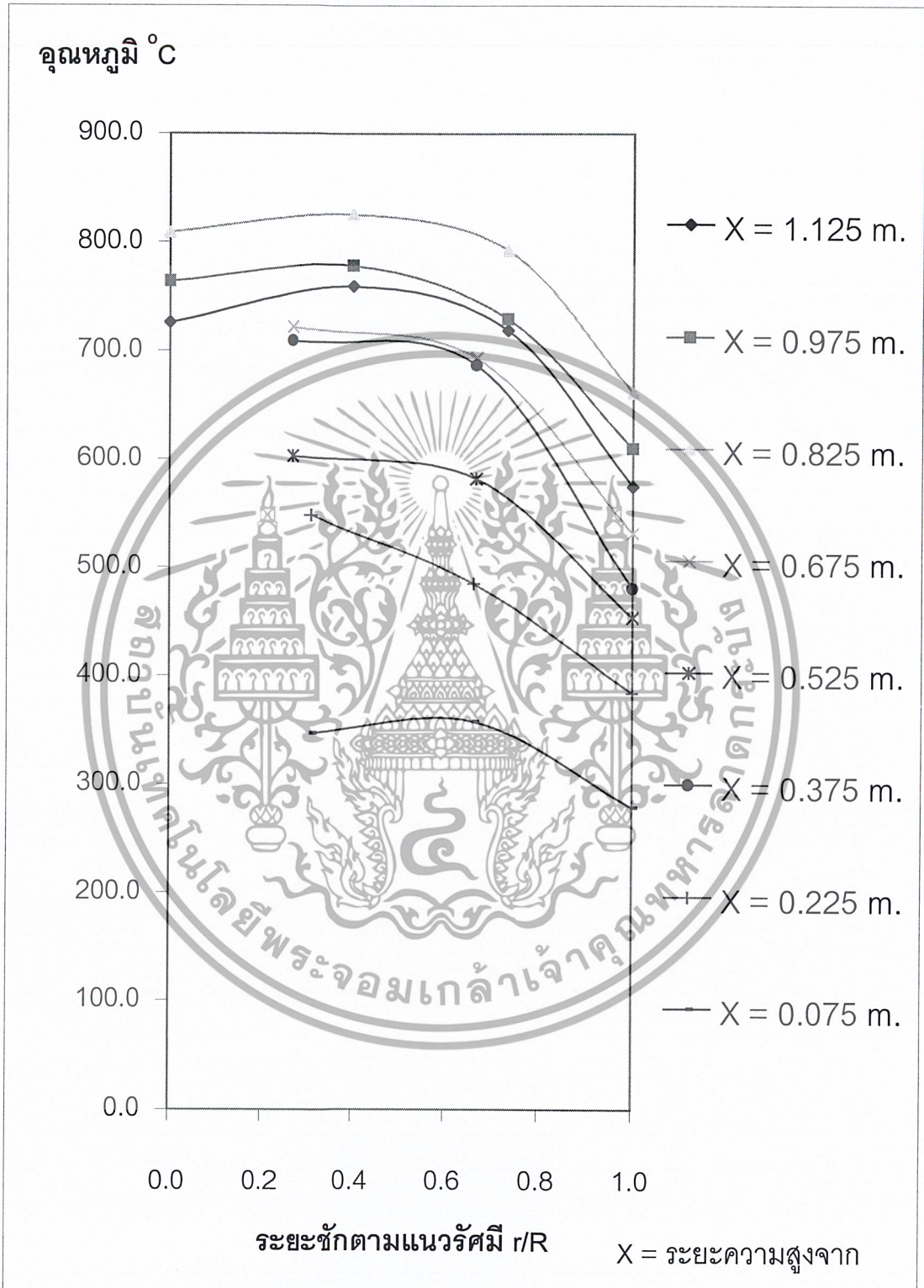
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.38 การทดลองที่ 16 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.75D

Eq.1.2 Pri.100% Sec.0%

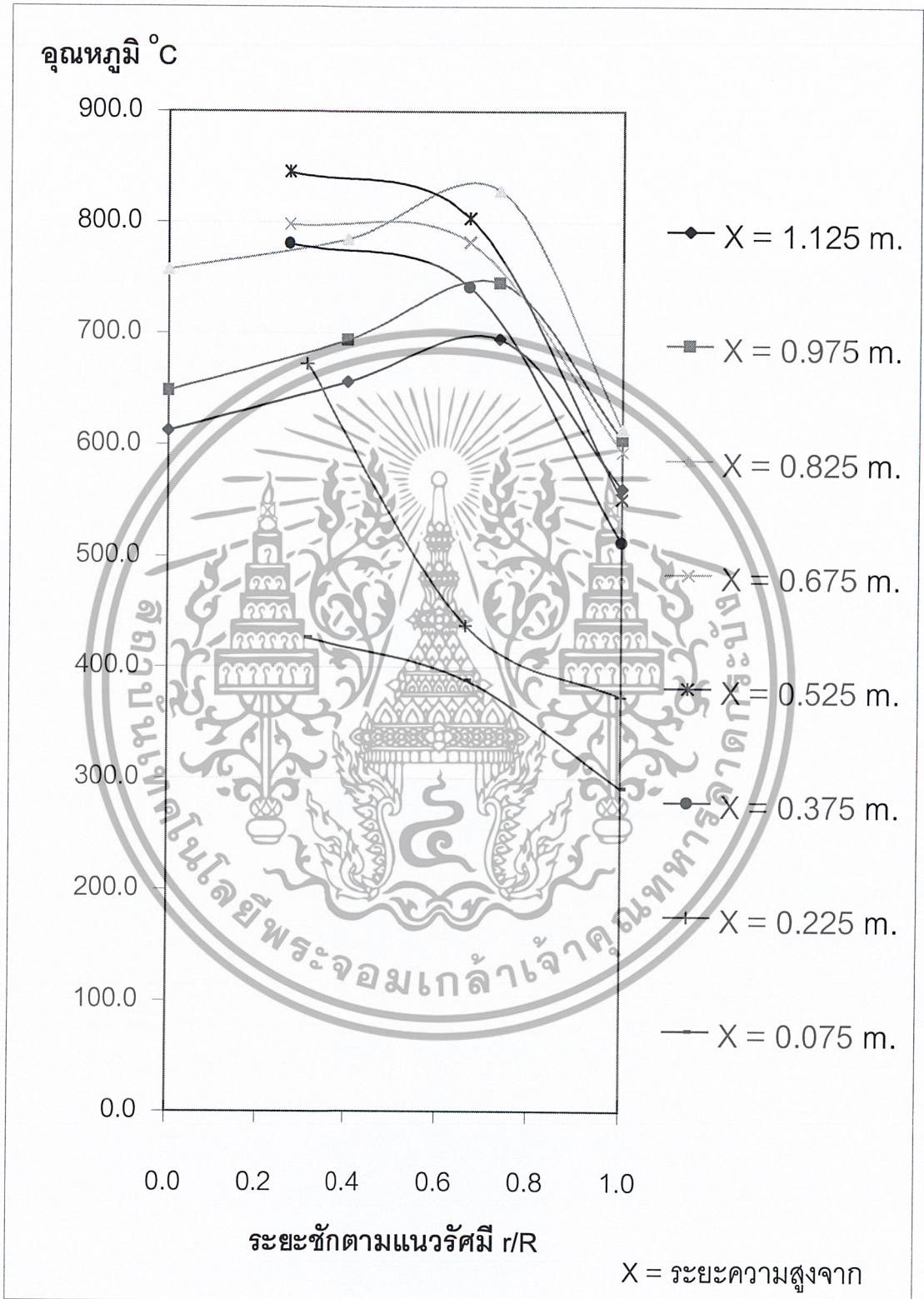
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.39 การทดลองที่ 17 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.75D

Eq.1.2 Pri.85% Sec.15%

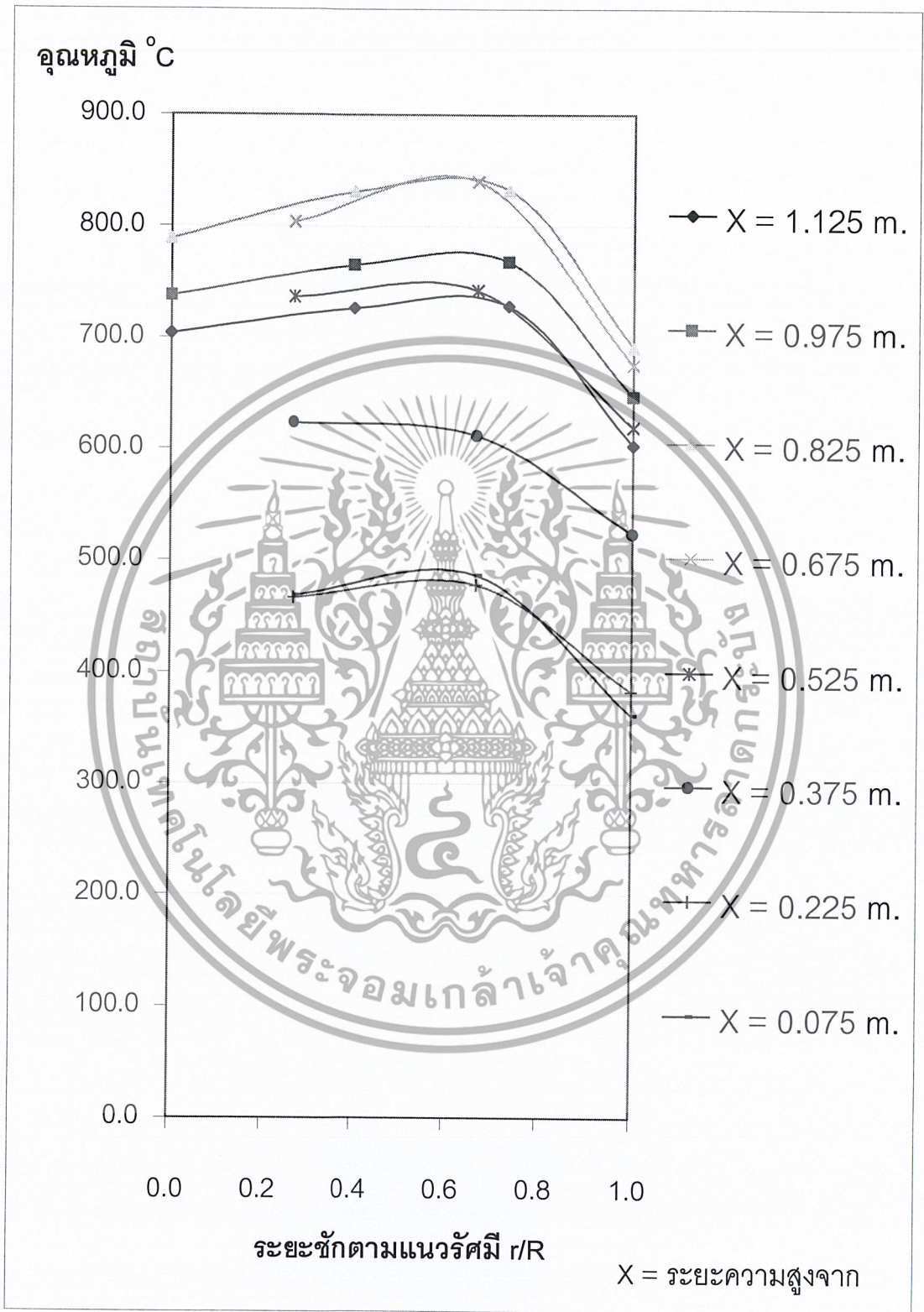
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.40 การทดลองที่ 18 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 0.75D

Eq.1.2 Pri.75% Sec.25%

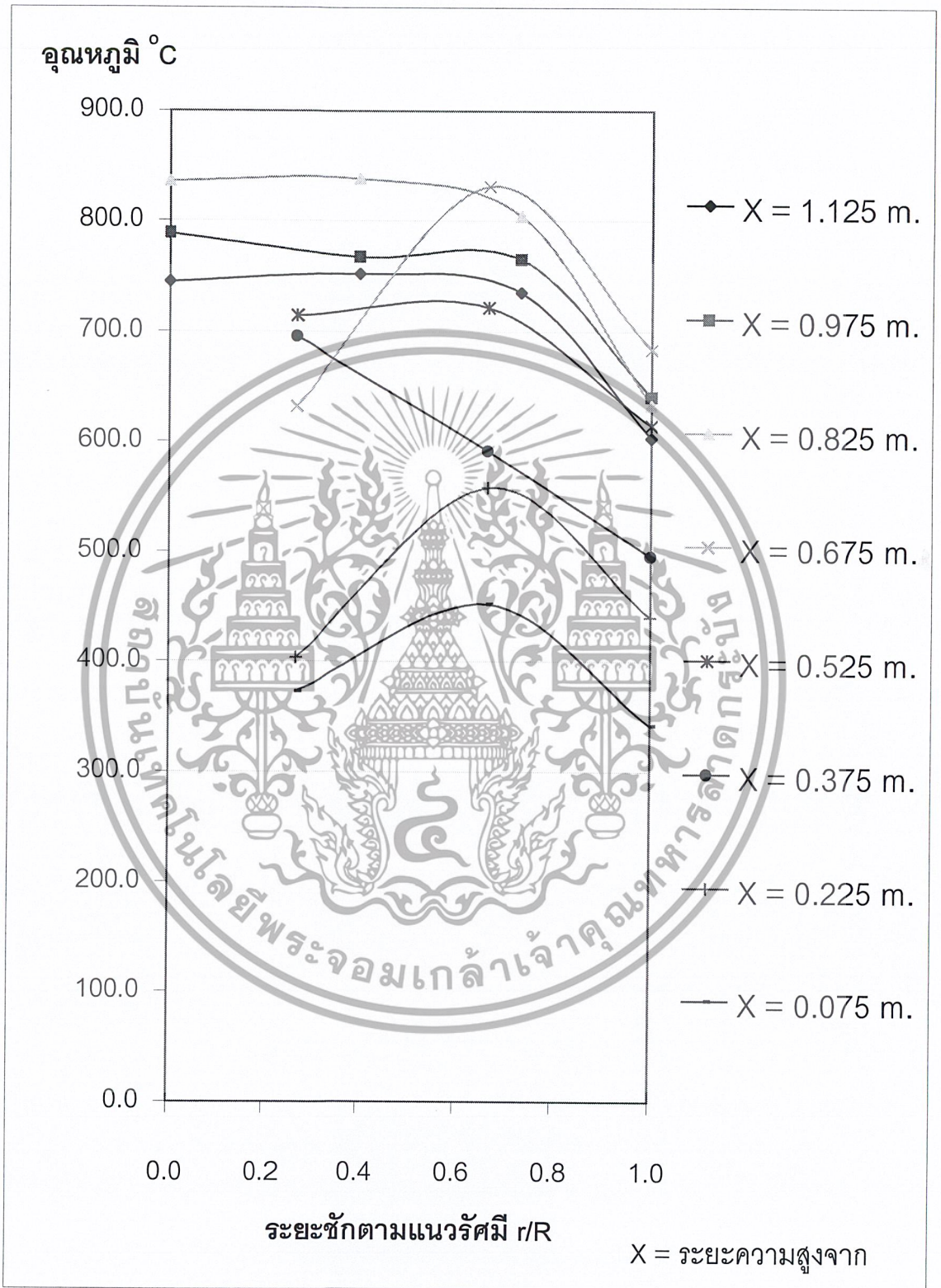
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.41 การทดลองที่ 19 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 1.0D

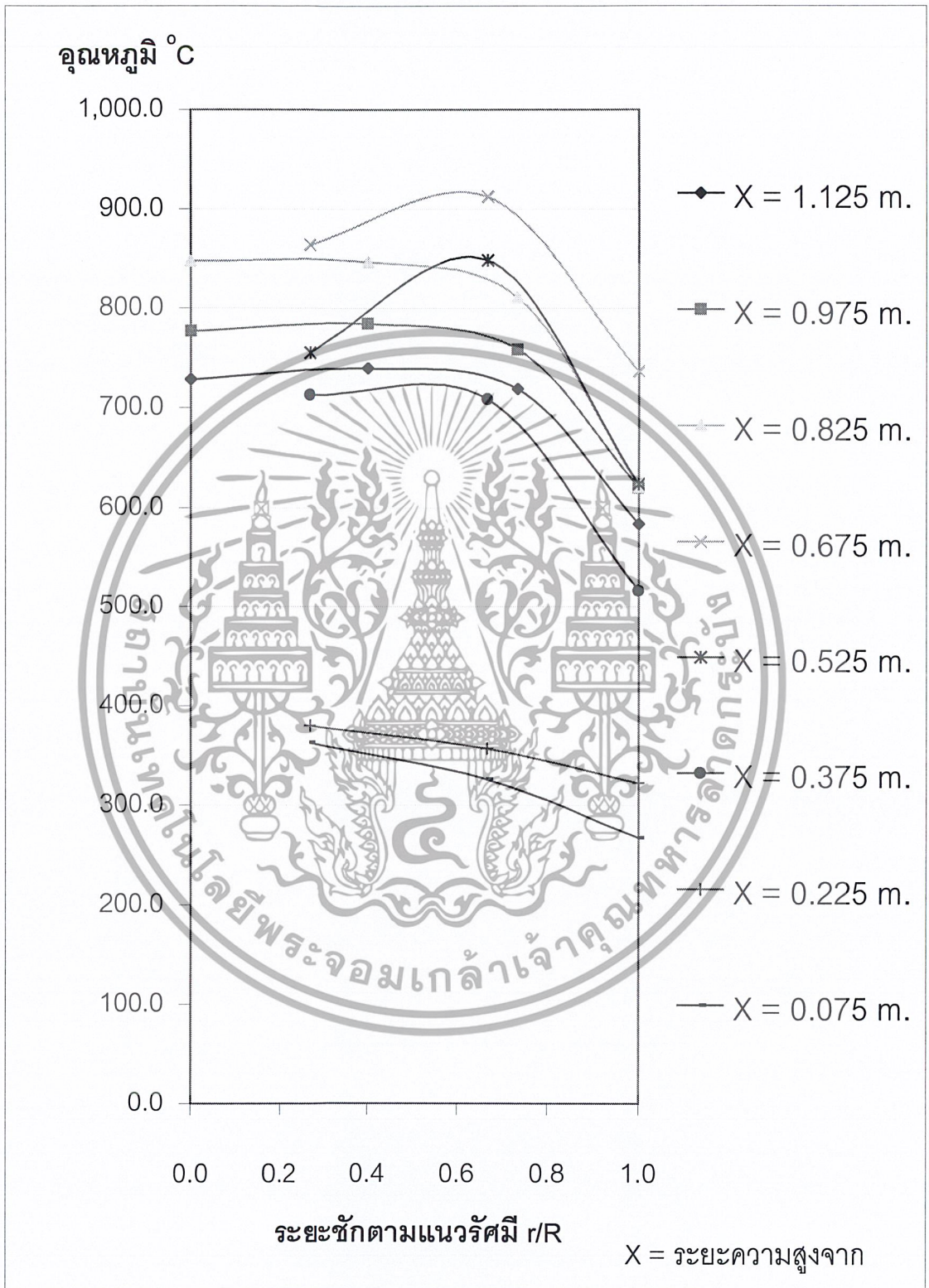
Eq.0.8 Pri.100% Sec.0%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



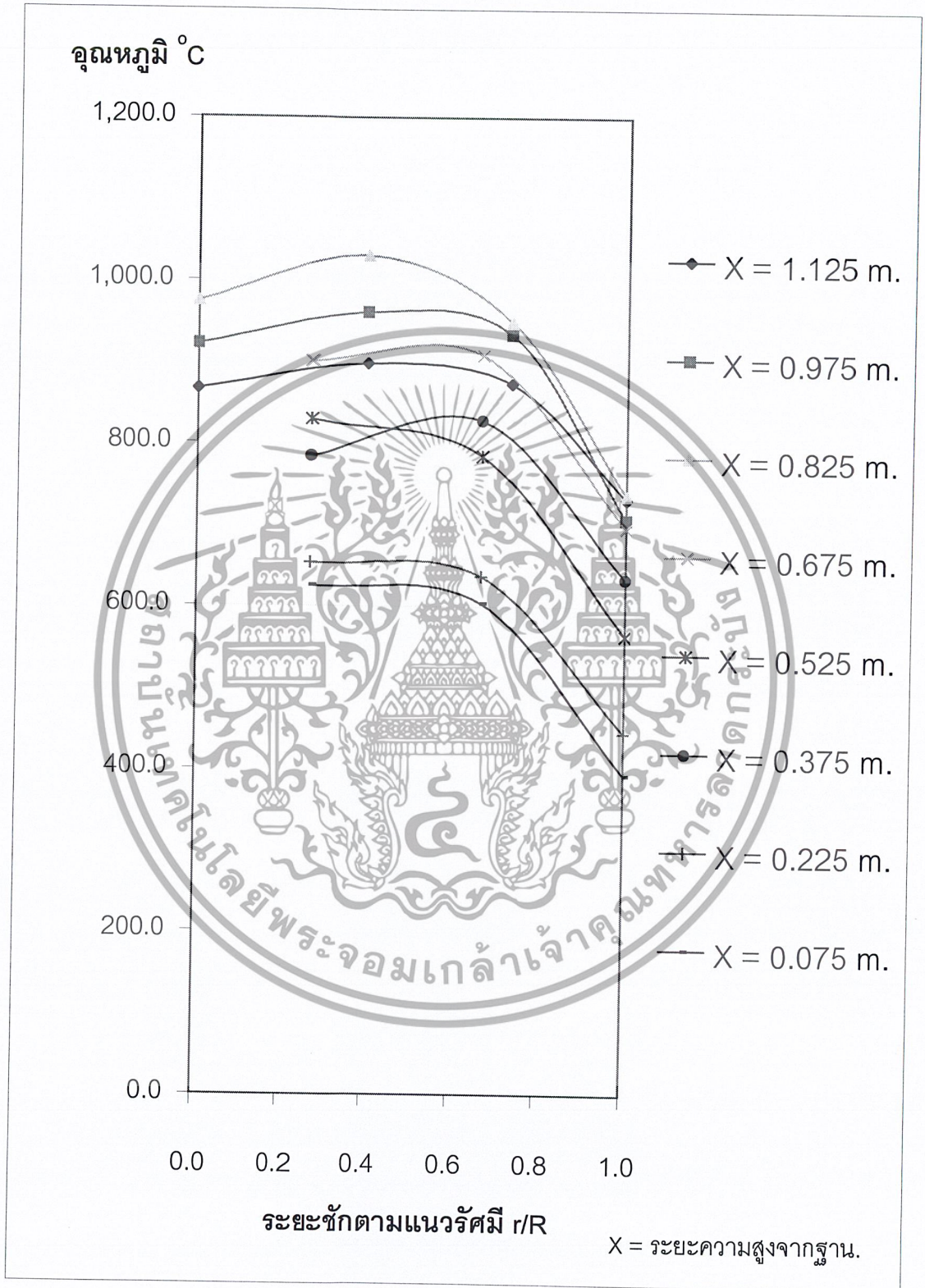
รูปที่ 5.42 การทดลองที่ 20 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 1.0D

Eq.0.8 Pri.85% Sec.15%



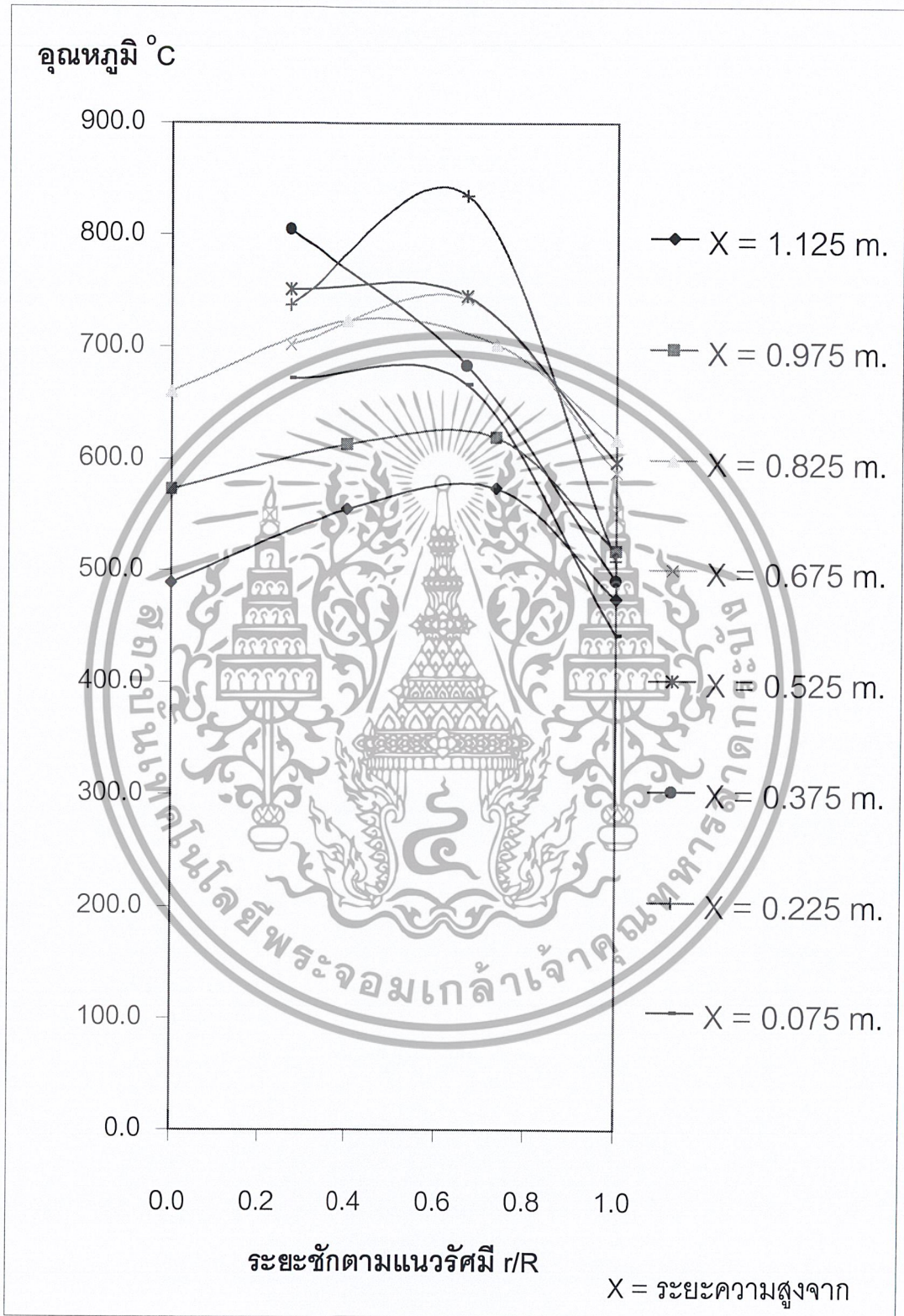
รูปที่ 5.43 การทดลองที่ 21 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 1.0D

Eq.0.8 Pri.75% Sec.25%



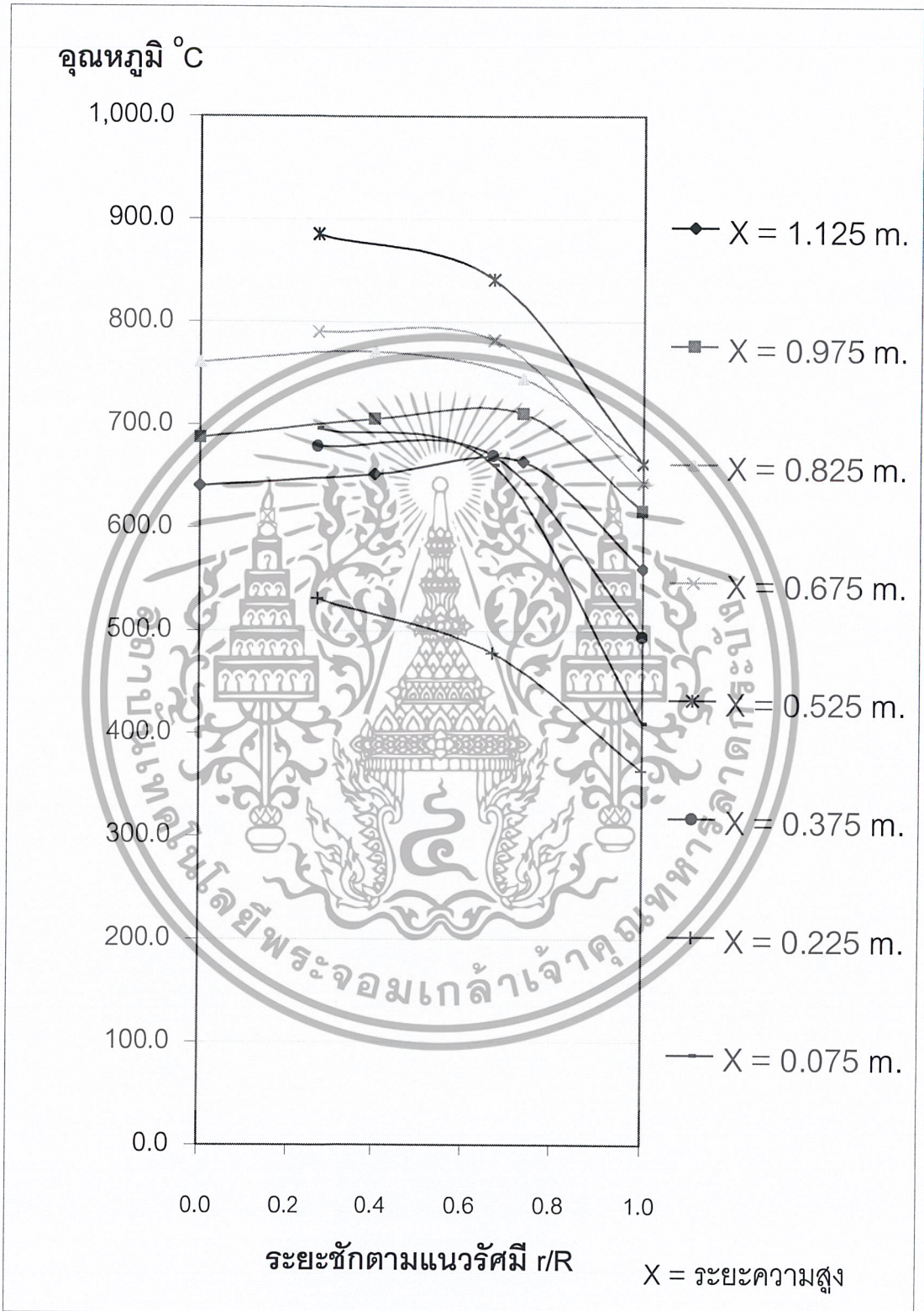
รูปที่ 5.44 การทดลองที่ 22 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 1.0D

Eq.1.0 Pri.100% Sec.0%



รูปที่ 5.45 การทดลองที่ 23 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 1.0D

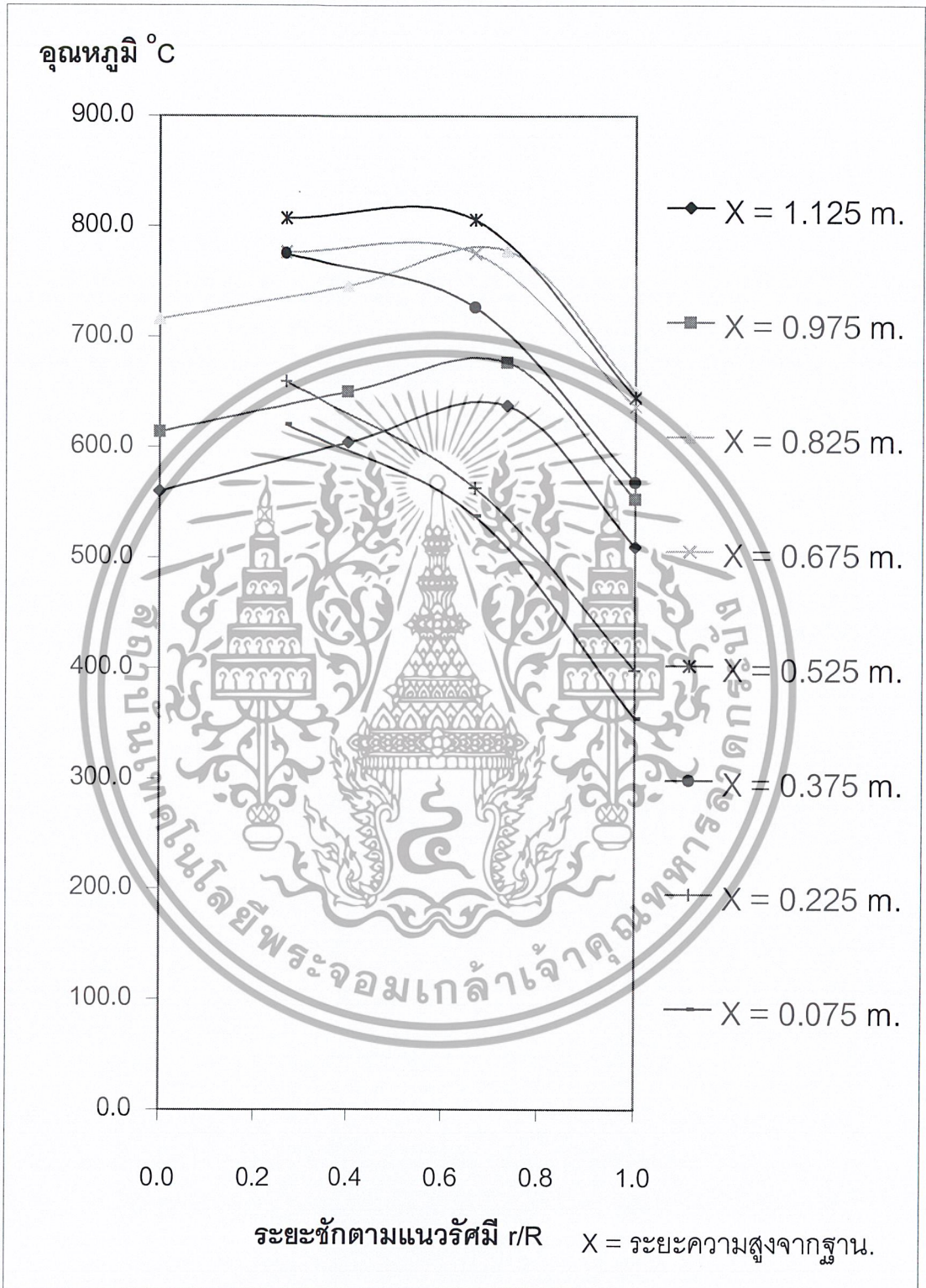
Eq.1.0 Pri.85% Sec.15%



รูปที่ 5.46 การทดลองที่ 24 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 1.0D

Eq.1.0 Pri.75% Sec.25%

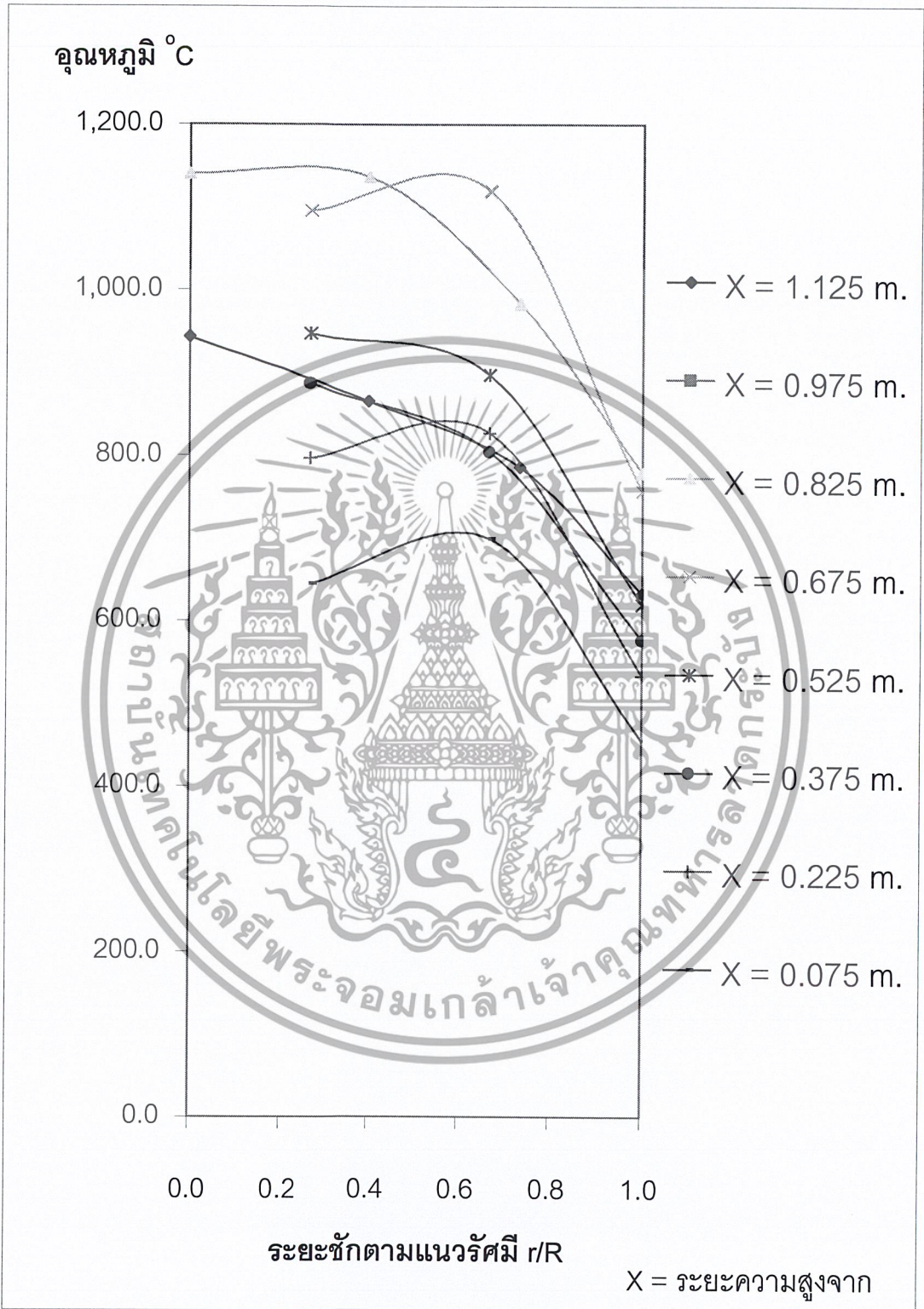
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.47 การทดลองที่ 25 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 1.0D

Eq.1.2 Pri.100% Sec.0%

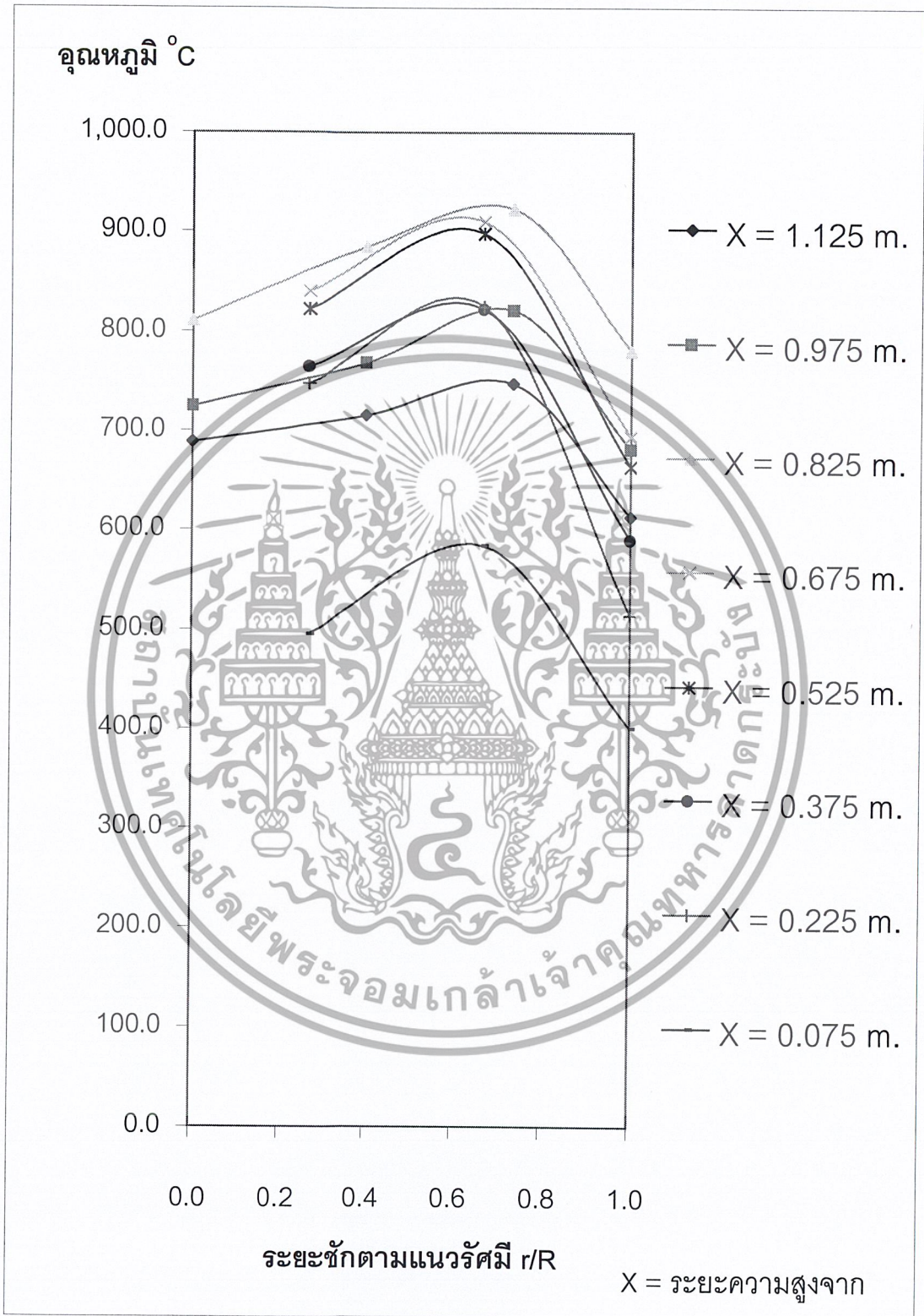
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.48 การทดลองที่ 26 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 1.0D

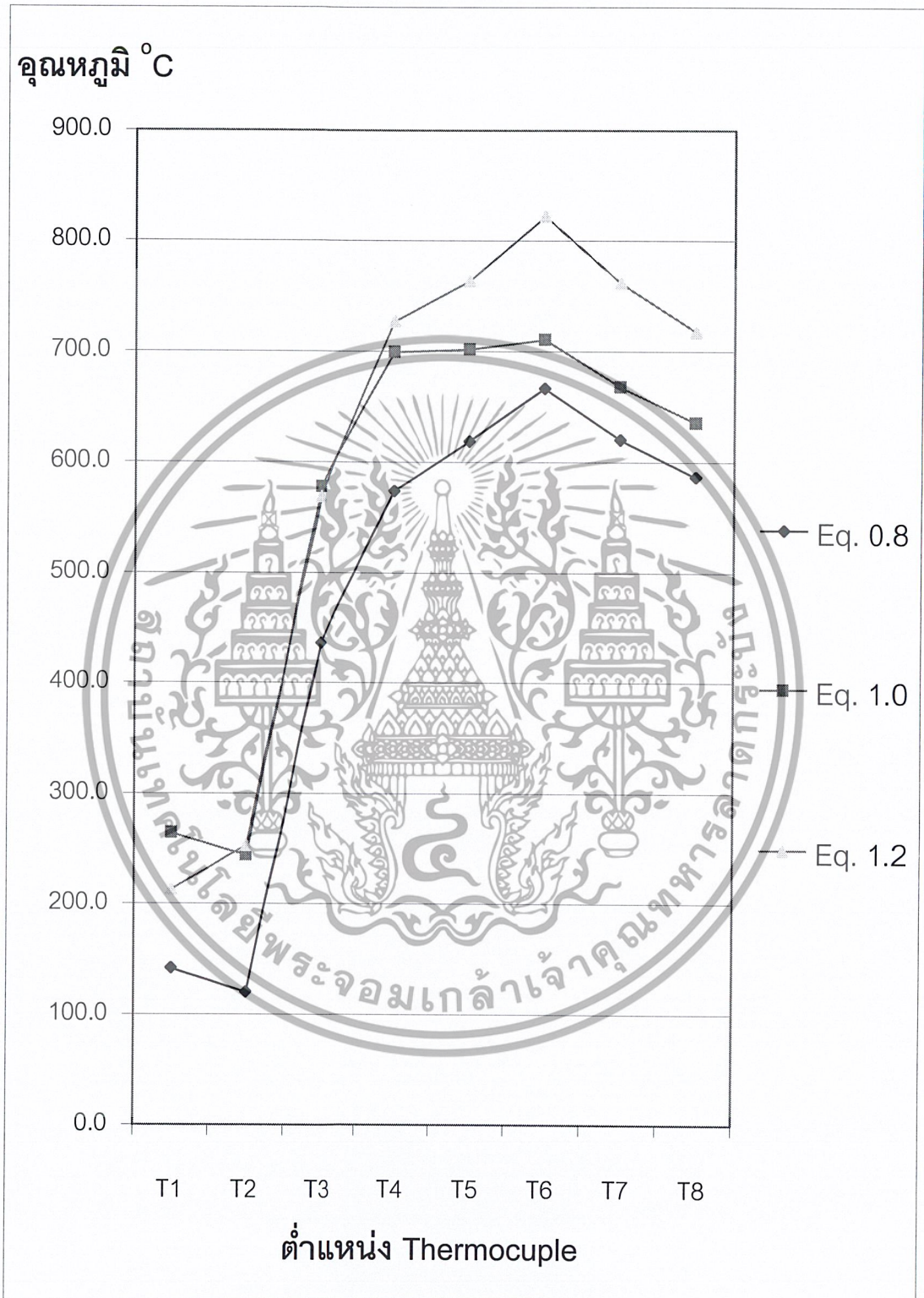
Eq.1.2 Pri.85% Sec.15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



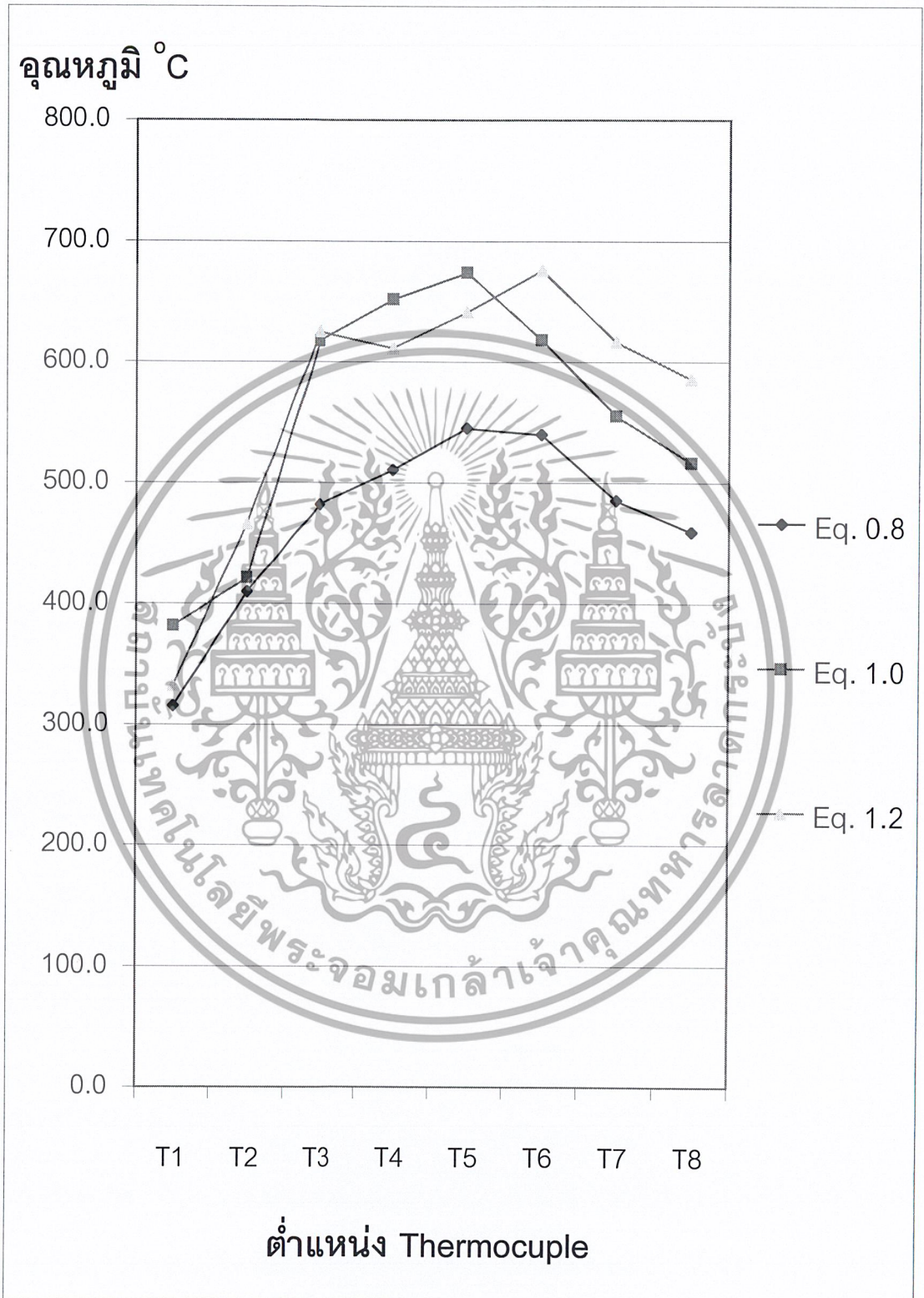
รูปที่ 5.49 การทดลองที่ 27 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ Dia. 1.0D

Eq.1.2 Pri.75% Sec.25%



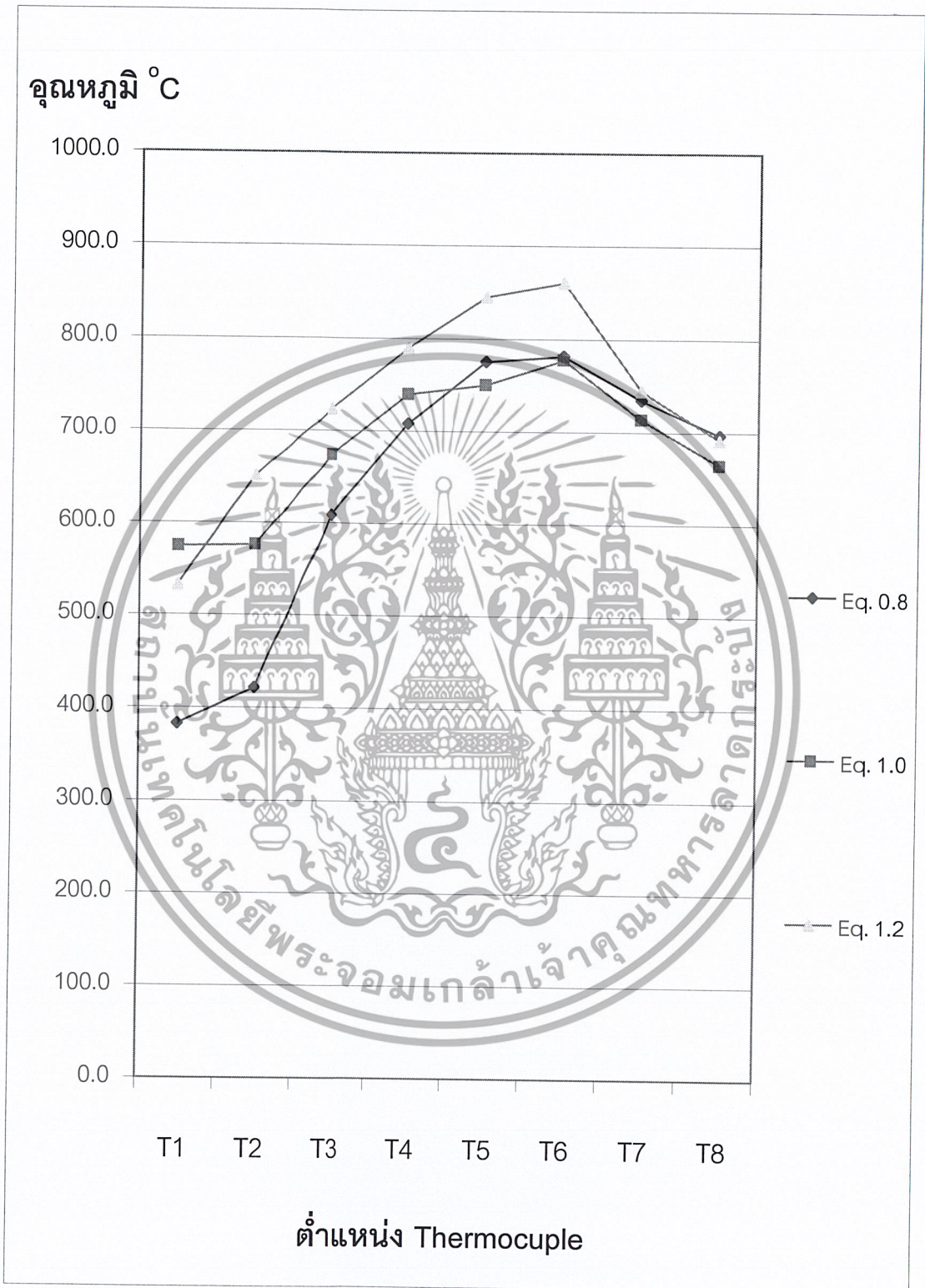
รูปที่ 5.50 กราฟอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา Dia. 0.5D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.51 กราฟอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา Dia. 0.75D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.52 กราฟอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา Dia. 1.0D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. เมื่อเปรียบเทียบจากกราฟที่ค่า Equivalence Ratio 0.8, อากาศปฐมภูมิ 100% และอากาศทุติยภูมิ 0% พบว่า

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาจะค่อนข้างต่ำและการกระจายอุณหภูมิไม่ค่อยสม่ำเสมอ ในแนวความสูงของเตา

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาจะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า และการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะเริ่มสม่ำเสมอมากขึ้น

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาจะค่อนข้างสูง การกระจายอุณหภูมิจะค่อนข้างสม่ำเสมอ และให้ค่าความร้อนสูงสุด

2. เมื่อเปรียบเทียบจากกราฟที่ค่า Equivalence Ratio 0.8, อากาศปฐมภูมิ 85% และอากาศทุติยภูมิ 15% พบว่า

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาจะค่อนข้างต่ำ แต่การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีด้านบนของเตาจะค่อนข้างสม่ำเสมอ

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาจะเริ่มสูงขึ้น อุณหภูมิด้านบนของเตาจะค่อนข้างสม่ำเสมอ ทั้งระดับความสูงของเตาและในแนวรัศมี

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาจะค่อนข้างสูง และการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีด้านบนของเตาจะค่อนข้างสม่ำเสมอ และจะให้ค่าความร้อนสูงสุดที่ปลายทางออกของท่อทิ้ง

3. เมื่อเปรียบเทียบจากกราฟที่ค่า Equivalence Ratio 0.8, อากาศปฐมภูมิ 75% และอากาศทุติยภูมิ 25% พบว่า

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาสุดมีอุณหภูมิก่อนข้างต่ำ และเกิดการลดอุณหภูมิลงในช่วงด้านล่าง อันเป็นผลมาจาก การเพิ่มอากาศทุติยภูมิ ส่วนอุณหภูมิด้านบนจะสูงที่ปลายทางออกท่อทิ้ง

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาจะค่อยๆสูงขึ้น และจะมีอุณหภูมิสูงสุด ที่ระดับกลางเตา การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีค่อนข้างสม่ำเสมอ

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาจะค่อนข้างสูง และการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วนอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ในระดับกลางเตา

4. เมื่อเปรียบเทียบจากกราฟที่ค่า Equivalence Ratio 1.0, อากาศปฐมภูมิ 100% และอากาศทุติยภูมิ 0% พบว่า

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างจะค่อนข้างต่ำ แต่อุณหภูมิด้านบนค่อนข้างสม่ำเสมอ ตามแนวความสูงของเตา และการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะสูงที่กึ่งกลางเตาแล้วค่อยๆ ลดลงจนถึงผนังเตา

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาจะเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับความสูงของเตา และจะมีอุณหภูมิก่อนข้างสม่ำเสมอ รวมทั้งการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีด้วย

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างค่อนข้างสูงและสม่ำเสมอ ในแนวรัศมี แล้วจะมีอุณหภูมิสูงสุดที่ปลายท่อทิ้ง

5. เมื่อเปรียบเทียบจากกราฟที่ค่า Equivalence Ratio 1.0, อากาศปฐมภูมิ 85% และอากาศทุติยภูมิ 15% พบว่า

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างค่อนข้างต่ำ แต่การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วนอุณหภูมิด้านบนของเตาจะสม่ำเสมอ แต่การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะไม่ค่อยสม่ำเสมอ

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาค่อนข้างสูง และการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วนอุณหภูมิที่สูงที่สุดจะเกิดขึ้นเหนือห้องเผาไหม้ด้านล่าง การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะไม่ค่อยสม่ำเสมอ

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างค่อนข้างสูง ส่วนอุณหภูมิที่สูงที่สุดจะเกิดขึ้นขึ้นที่บริเวณที่ท่อเชื่อมเพลิงเกิดการหมุนวน ทำให้การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะไม่สม่ำเสมอ

6. เมื่อเปรียบเทียบจากกราฟที่ค่า Equivalence Ratio 1.0, อากาศปฐมภูมิ 75% และอากาศทุติยภูมิ 25% พบว่า

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาค่อนข้างต่ำ และเกิดการลดของอุณหภูมิขึ้น ส่วนอุณหภูมิด้านบนของเตาค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะไม่ค่อยสม่ำเสมอ

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาค่อนข้างสูง และอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดบริเวณที่ปลายท่อทิ้ง และการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะไม่ค่อยสม่ำเสมอ

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาจะสูงมาก ส่วนอุณหภูมิที่สูงที่สุดจะเกิดขึ้นขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางความสูงของเตา ส่วนการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะไม่ค่อยสม่ำเสมอ

7. เมื่อเปรียบเทียบจากกราฟที่ค่า Equivalence Ratio 1.2, อากาศปฐมภูมิ 100% และอากาศทุติยภูมิ 0% พบว่า

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาค่อนข้างต่ำ แต่การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะค่อนข้างสม่ำเสมอ อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามลำดับความสูงของเตา และอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่ปลายท่อทิ้ง ส่วนการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีด้านบนไม่ค่อยสม่ำเสมอ

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาเริ่มเพิ่มขึ้น แต่การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะไม่ค่อยสม่ำเสมอ ส่วนอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณระดับความสูงกึ่งกลางเตาการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะไม่ค่อยสม่ำเสมอ

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาค่อนข้างสูง แต่การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะไม่ค่อยสม่ำเสมอ อุณหภูมิสูงสุดจะเกิดที่ระดับกึ่งกลางเตา ส่วนการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะไม่ค่อยสม่ำเสมอนัก

8. เมื่อเปรียบเทียบจากกราฟที่ค่า Equivalence Ratio 1.2, อากาศปฐมภูมิ 85% และอากาศทุติยภูมิ 15% พบว่า

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาค่อนข้างต่ำ แต่การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะไม่ค่อยสม่ำเสมอ ส่วนอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดที่ระดับปลายท่อทิ้ง แต่การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมี จะไม่สม่ำเสมอ

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาเริ่มสูงขึ้น ส่วนการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีก็เริ่มสม่ำเสมอ ส่วนอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณปลายท่อทิ้ง และการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะค่อนข้างสม่ำเสมอ

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาจะสูงมาก แต่การกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะไม่ค่อยสม่ำเสมอ อุณหภูมิสูงสุดจะเกิดที่ปลายท่อทิ้ง ส่วนการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะไม่ค่อยสม่ำเสมอ และให้ค่าความร้อนสูงสุด

9. เมื่อเปรียบเทียบจากกราฟที่ค่า Equivalence Ratio 1.2, อากาศปฐมภูมิ 75% และอากาศทุติยภูมิ 25% พบว่า

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาค่อนข้างต่ำ ส่วนการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีเตาด้านล่างจะค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วนอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดที่ระดับปลายท่อทิ้ง และการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีเตาด้านบนจะสม่ำเสมอ

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาเริ่มสูงขึ้น ส่วนอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางเตา และการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีจะไม่สม่ำเสมอ

ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0D อุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาจะสูงมาก และการกระจายอุณหภูมิภายในเตาค่อนข้างสม่ำเสมอ ทั้งในระดับความสูงของเตาและในแนวรัศมี อุณหภูมิสูงสุดจะเกิดที่ปลายท่อทิ้ง

5.6 สรุปผลการทดลอง

จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในเตาเผาแล้วในแต่ละกรณีนั้นมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ในระดับความสูงของเตาและการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีก็แตกต่างกัน อิทธิพลเหล่านั้นอาจเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้, ปริมาณอากาศที่ใช้ในการทำให้เชื้อเพลิงเกิดการหมุนวนเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์, พื้นที่ๆ ใช้ในการเผาไหม้ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผา) อันเป็นผลทำให้เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้น้อยลงไปตามขนาดพื้นที่ๆ ใช้ในการเผาไหม้ และปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้โดยพบว่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงของเตาเผาอาจเกิดจากการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผา หรือปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงต่ออากาศและการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมี ที่ไม่สม่ำเสมอ อาจเป็นผลมาจากปริมาณอากาศที่ใช้ในการทำให้เชื้อเพลิงหมุนวนในห้องเผาไหม้ เป็นต้น

5.7 ข้อเสนอแนะ

เตาเผาแบบวอร์เทคเป็นโครงการเบื้องต้นที่ได้ทำการศึกษาถึงการกระจายอุณหภูมิ ภายในห้องเผาไหม้โดยการเปรียบเทียบขนาดห้องเผาไหม้ด้านล่าง, ค่า Equivalence Ratio และปริมาณอากาศที่ใช้ในการหมุนวน ดังนั้นเพื่อให้ได้เตาเผาแบบวอร์เทคที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นจึงควรพิจารณาถึงตัวแปรอื่นๆ อีก เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบเตาเผาแบบวอร์เทค และแก้ไขข้อบกพร่องต่อไป



เอกสารอ้างอิง

- [1] สุพจน์ นำนำโชค, “การเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้แบบไซโคลนชนิดอากาศเข้าหลายช่องทาง”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [2] นายรัชชัย ท้ววลิล และนายสันติ วัชรอภาไพบุลย์, “เตาเผาวัสดุทางการเกษตรโดยใช้อากาศหมุนวน”, ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2534
- [3] เรือโท ประจักษ์ จิตรีพิทย, “การศึกษารูปแบบการไหลและลักษณะการสันดาปของห้องเผาไหม้แบบไซโคลนที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิง”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2534
- [4] Sen Nieh and Tim. T. Fu., “Development of a Non – Slagging Vortex combustor (VC) for Space /Mater Heating Applications”, Proc. 5 Internation Coal conf., 1988, pp.761 – 768.
- [5] วิศิษฐ์ จาดูรमार และ ขวัญชัย สันทิพย์สมบุรณ์, “กลศาสตร์ของไหล”, บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, pp. 312 – 315, 400 – 410.
- [6] ชาลูนัดงาน, “fluid mechanics กลศาสตร์ของไหล”, ป๊อคเซ็นเตอร์, pp. 140 – 152.
- [7] Sen Nieh and Tim. T. Fu., “Design and Test of 0.5 NB/H Vortex Combustor Firing DUC and CWF”, U.S., Department of Energy Pittsburgh Energy Technology Center.
- [8] นาวาอากาศตรี ตรีการ ถ้าวถกสิกรรม, “หนังสือวิศวกรรมโรงไฟฟ้า”, สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น) พิมพ์ครั้งที่ 1, มีนาคม 2537, หน้า 72.
- [9] WILLIAM S. JANNA, “INTRODUCTION TO FLUID MECHANICS”, PWS PUBLISHING COMPANY, VOL. 3, pp. 576 – 579.
- [10] Robert W. Fox and Alan T. McDonald, “Introduction to Fluid Mechanics”, JOHN WILEY & SONS., INC, VOL 4, pp. 360 – 370.
- [11] Stephen R. Turns, “AN INTRODUCTION TO COMBUSTION”, McGraw – Hill., Inc, pp. 19.
- [12] นายประภพ พิชิตผองกิจ, นายสุวิทย์ เทพช่วย และนายอนุรักษ์ พบหิรัญ, “เตาเผาแกลบแบบวอร์เทค Rice Husk Fired Vortex Combustor”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีมหานคร.
- [13] ดร. สมรัฐ เกิดสุวรรณ, ผศ.ดร. บัณฑิต พึ่งธรรมสาร, Dr. JC. GOUDEAU, “การศึกษาการเผาไหม้ขยะมูลฝอยในเตาแบบหมุน”, วรสารพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, เดือนตุลาคม, 2537.
- [14] นายอดิศักดิ์ ชูจินดา, “เตาเผาแกลบสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไคซ์เบ ต”, คณะพลังงานและวัสดุ, 2540.
- [15] DWYER INSTRUMENTS., INC., MICHIGAN, CITY, INDIANA, U.S.A.

- [16] รายงานการตรวจวิเคราะห์ทดสอบ. แกลบหมายเลข TI .616 , กรมวิทยาศาสตร์บริการ, กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.
- [17] บุญสืบ อัครวัฒน์กุล, โรงสีคู้เจริญ, ห.จ.ก. อัครวัฒน์กิจ, หนองจอก, กรุงเทพฯ ฯ
- [18] นายบุญเรือง ศิริสวัสดิ์, “การปรับปรุงสมรรถนะเตาเผาแกลบ”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน, คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541.
- [19] นายชัยณรงค์ จิระพงษ์พัฒนา, “เตาเผาถ่านกะลามะพร้าวแบบกึ่งต่อเนื่อง3”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2534.
- [20] นายปฐม ชัยพฤกษ์ทล, “ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนใช้ประโยชน์ในเตาเผา กากตะกอนระบบฟลูอิด ไคซ์เบต”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมคและพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542.
- [21] นายประเสริฐ เทียนนิมิตร, “เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น”, โครงการวิชาแบบแผนช่างยนต์วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา, วิทยาลัยเขตเทคนิคภาคพายัพเชียงใหม่, บทที่2,6.
- [22] Stephen R. Turns, “An Introduction to Combustion Concepts and Applications”, McGraw - Hill, Inc.
- [23] นายจาดรงค์ กรීติวุฒิสเรษฐ และนายจำลอง จิมตระกูล, “การพัฒนาวัสดุก่อสร้างน้ำหนักเบาจากแกลบเผา”, รายงานโครงการวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า 2 – 5, 2532.
- [24] นายสมศักดิ์ กรීติวุฒิสเรษฐ, “หลักการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม”, สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), พิมพ์ครั้งที่ 6, กรกฎาคม 2535, หน้า 227 – 231.
- [25] นายชัยณรงค์ จิระพงษ์พัฒนา “เตาเผาถ่านกะลามะพร้าวแบบกึ่งต่อเนื่อง 3” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรม ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2534
- [26] RK NAG, Power Plant engineering steam and Nuclear Tata McGraw – Hill
- [27] Dr. Yunus A. Cengel . Dr.Michael A. Boles. Thermodynamice an engineering Approach. Second Edition McGraw –Hill, Inc

งบประมาณ

งบประมาณในการจัดทำโครงการวิศวกรรม 1 และ 2

เรื่อง การศึกษาเชิงการตลาด ถึงอิทธิพลของขนาดห้องเผาไหม้หลักของเตาเผาแบบวอร์เทค

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	หน่วยละ (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
1.	ชุดเตาเผา - เหล็กตัวเตาและส่วนประกอบ - ปูนทนไฟกระสอบ 50 kg	6 ตัว 4 ถุง	5,000.00 860.00	30,000.00 3,440.00
2.	ชุดวัดอุณหภูมิ - Thermocouples Type K	10 ตัว	1,000.00	10,000.00
3.	ชุดท่ออากาศ รวมอุปกรณ์ทั้งหมด - สายลม - ชุด Primary Air - ชุด Secondary Air - หัวเผาก๊าซ LPG - ก๊าซ LPG	16 เมตร 1 ชุด 1 ชุด 1 ชุด 1 ถัง	70.00 1,000.00 500.00 350.00 220.00	1,120.00 1,000.00 500.00 350.00 220.00
4.	ชุดป้อนแกลบ	1 ชุด	12,000.00	12,000.00
5.	โต๊ะวางอุปกรณ์ต่างๆ และที่วางเตา	1 ชุด	1,200.00	1,200.00
	รวมทั้งสิ้น			49,030.00

หมายเหตุ

ราคาที่แสดงให้เห็นเป็นราคาประมาณเพราะเป็น โปรเจกต์ที่ทำงานร่วมกันหลายกลุ่ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศ

อุณหภูมิ		ความหนาแน่น (ρ ; kg/m ³)	น้ำหนักจำเพาะ (γ ; N/m ³)	ความหนืดสมบูรณ์ ($\mu \times 10^5$; N·s/m ²)	ความหนืดจลน์ ($\nu \times 10^5$; m ² /s)
(°C)	(°F)				
-40	-40	1.515	14.86	1.49	0.98
-20	-4	1.395	13.68	1.61	1.15
0	32	1.239	12.86	1.71	1.32
10	50	1.248	12.24	1.76	1.41
20	68	1.205	11.82	1.81	1.50
30	86	1.165	11.43	1.86	1.60
40	104	1.128	11.06	1.90	1.68
60	140	1.060	10.40	2.00	1.87
80	176	1.000	9.81	2.09	2.09
100	212	0.946	9.28	2.18	2.31
200	392	0.747	7.33	2.58	3.45

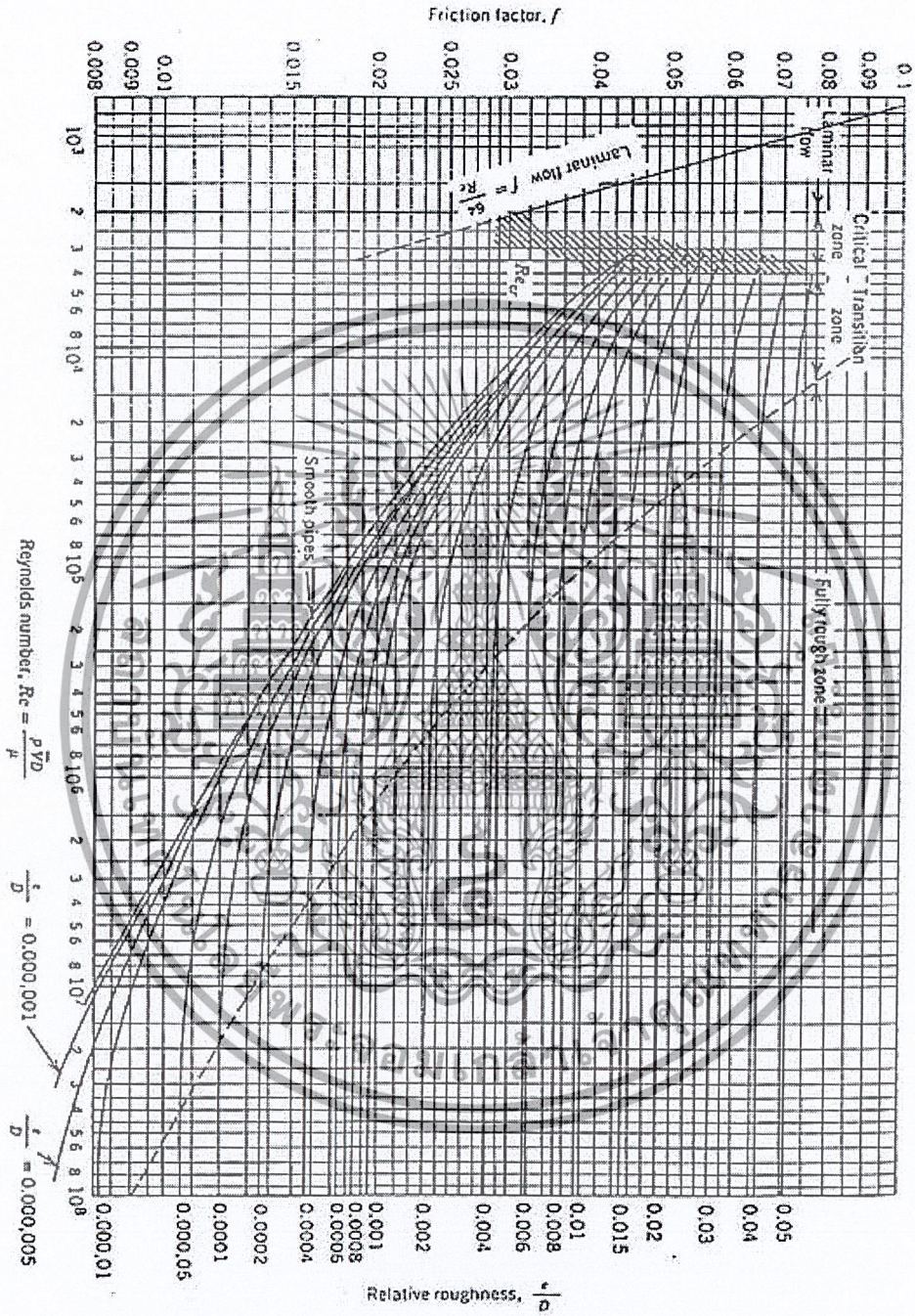
ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศ

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
100	3.5562	1.032	71.1	2.000	9.43	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.29	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.8	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.702
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	64.3	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82.0	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530.0	213.0	91.0	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557.0	240.0	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584.0	268.0	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611.0	298.0	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637.0	329.0	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663.0	362.0	128	634	0.677
2000	0.1741	1.337	689.0	396.0	137	689	0.672
2100	0.1658	1.372	715.0	431.0	147	646	0.667

ตารางที่ ก – 2 Selected properties of air

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข



ตารางที่ ข-1 Friction factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของแกลบและการเปรียบเทียบเชื้อเพลิง

คุณสมบัติของแกลบ (Rice Husk)

แกลบเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ในการสีข้าว 1 ตัน จะได้แกลบออกมาทั้งหมดประมาณ 220 กิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 22 สำหรับประเทศไทยประเมินได้ว่าแต่ละปีจะมีแกลบประมาณ 4.4 – 4.6 ล้านตัน มีศักยภาพเชิงความร้อนเทียบกับการใช้น้ำมันดิบ 1.46 – 1.53 ล้านตัน แต่ความเป็นจริงถูกนำมาใช้ในครัวเรือนและอุตสาหกรรมทั่วไปเพียงร้อยละ 12 เท่านั้น ทั้งนี้เพราะวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้อยู่กระจัดกระจาย มีความหนาแน่นไม่มากเป็นผลให้การขนส่งมีราคาแพงปัจจุบันการใช้แกลบเป็นพลังงานอยู่ในวงจำกัด ปริมาณการใช้แกลบน้อย โดยที่แกลบอาจนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้หลายวิธี เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในเตา เพื่อผลิตความร้อนให้หม้อน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า ใช้ผลิตก๊าซเพื่อใช้ในเครื่องยนต์ ทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งใช้แทนฟืนและใช้อบ โดยวิธีไพโรลิซิส (Pyrolysis) เพื่อใช้แทนถ่านเป็นต้น

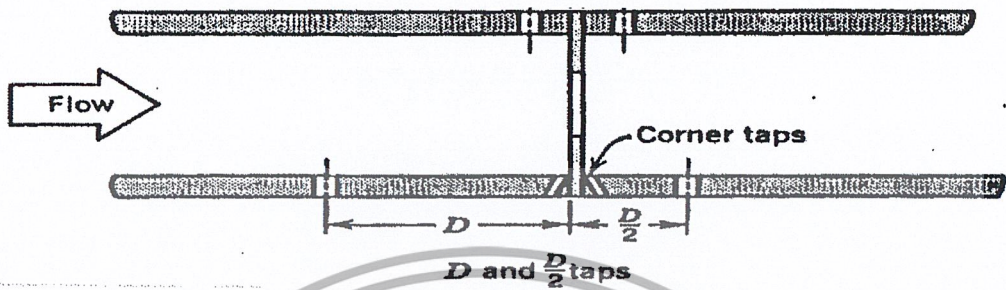
คุณสมบัติทางกายภาพ แกลบมีคุณสมบัติทางด้านการเป็นเชื้อเพลิงได้ดีพอสมควร แต่มีข้อเสียคือเมื่อทำการเผาไหม้จะมีเถ้าแกลบในปริมาณสูงถึงประมาณร้อยละ 15.8 – 24.9 ค่าความร้อนของแกลบจะอยู่ระหว่าง 2,900 – 4,560 kcal/kg ค่าความชื้น โดยประมาณ 1.1 – 9.8 %

Proximate Analysis	Moisture	1.1 – 9.8	[%]
	Fixed	12.7 – 17.4	[%]
	Volatile matter	56.4 – 69.3	[%]
	Ash	15.8 – 24.9	[%]
Ultimate Analysis	Carbon	38.2 – 55.8	[%]
	Silica	14.7	[%]
	Hydrogen	0.2 – 5.31	[%]
	Oxygen	29.9 – 31.7	[%]
	Surphur	0.07 – 0.12	[%]

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติของแกลบ

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการวัดอัตราการไหลของอากาศโดยใช้ ออร์ริฟิสมิเตอร์



รูปที่ 1 จุดวัดความดันของออร์ริฟิสมิเตอร์

ตัวอย่างการคำนวณ ความสูงของระดับน้ำในมานอริมิเตอร์กำหนดให้

1. Equivalent ratio เท่ากับ 1
2. อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎี $A/F_{ratio} = 5.372$
 kg_{air}/kg_{fuel}
3. อัตราการไหลของอากาศทั้งหมด = 0.3
 kg/min
4. ใช้อากาศอากาศปฐมภูมิเท่ากับ 85% = 0.22865 kg/s
5. ใช้อากาศทุติยภูมิเท่ากับ 15% = 4.035×10^{-3} kg/s
6. ความหนาแน่นของอากาศ $\rho_a = 1.2$
 kg/m^3
7. ความหนาแน่นของแกลบ $\rho_r = 100$
 kg/m^3
8. ความหนาแน่นของน้ำ $\rho_w =$
1000 kg/m^3
9. พื้นที่หน้าตัดอากาศต่อปฐมภูมิ $A_p = 1.164 \times 10^{-3}$
 m^2
10. อัตราส่วน เบต้า ของท่อปฐมภูมิ $\beta_p = 0.6$
11. พื้นที่หน้าตัดอากาศต่ออากาศทุติยภูมิ $A_s = 8.04 \times 10^{-4}$
 m^2

12. อัตราส่วน เบต้า ของอากาศทุติยภูมิ

$$\beta_s = 0.62$$

13. สัมประสิทธิ์การไหลผ่าน

$$C = 0.62$$

จากสมการ

ความสูงของระดับน้ำในมานอรัมิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิ

$$\begin{aligned} \dot{m}_p &= \frac{C A_p \sqrt{2 \rho \Delta P}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \\ 0.022865 &= \frac{0.62(1.64 \times 10^{-3}) \sqrt{(2 \times 1.2) \Delta P}}{\sqrt{1 - (0.6)^4}} \end{aligned}$$

$$\Delta P = 183.391 \text{ N/m}^2$$

$$\Delta P = \rho_w g h$$

$$183.391 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \Delta h \text{ m}$$

$$\Delta h = 1.87 \text{ cm.}$$

จากสมการ

ความสูงของระดับน้ำในมานอรัมิเตอร์ของอากาศทุติยภูมิ

$$\dot{m}_s = \frac{C A_s \sqrt{2 \rho \Delta P}}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

$$4.035 \times 10^{-3} = \frac{0.62(8.04 \times 10^{-4}) \sqrt{(2 \times 1.2) \Delta P}}{\sqrt{1 - (0.62)^4}}$$

$$\Delta P = 23.267 \text{ N/m}^2$$

$$\Delta P = \rho_w g h$$

$$23.267 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \Delta h \text{ m}$$

$$\Delta h = 0.24 \text{ cm.}$$

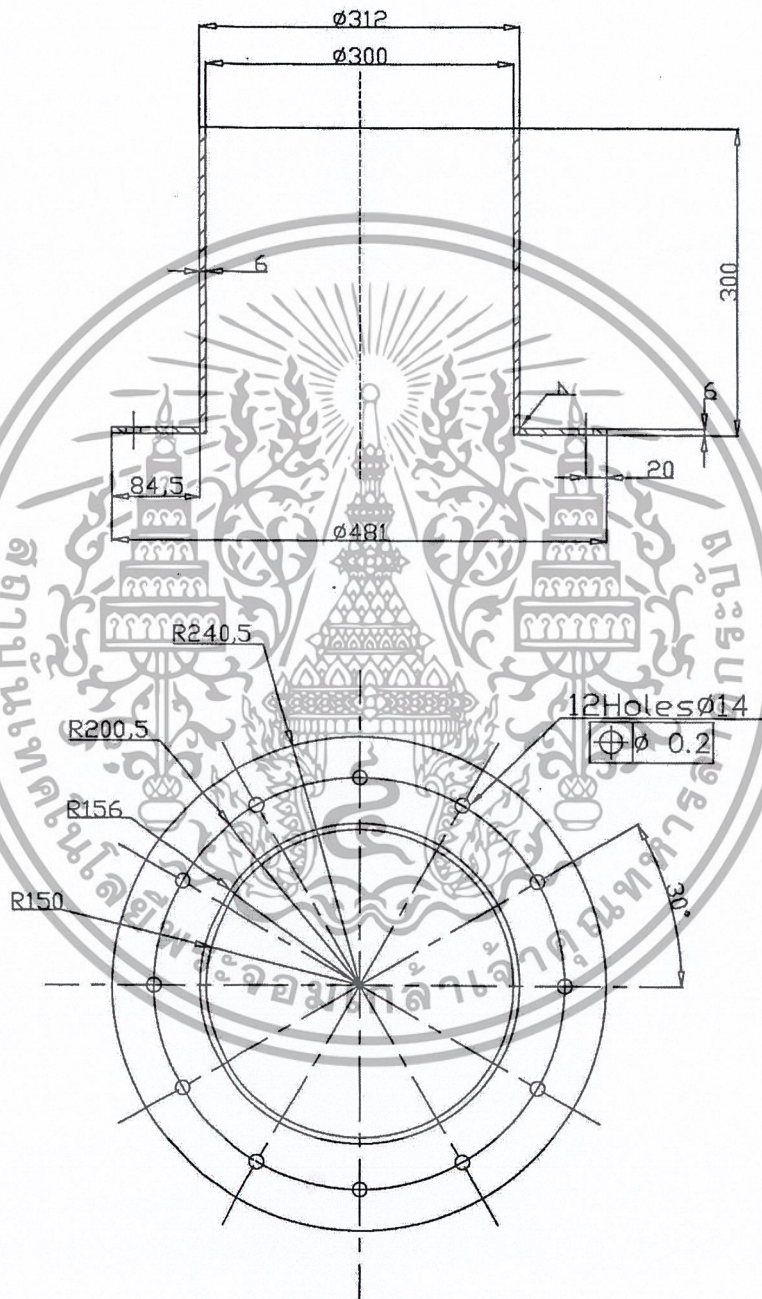
φ	Primary Air (kg/sec)			Secondary Air (kg/s)	
	100%	85%	75%	15%	25%
0.8	0.0336	0.0285	0.0252	0.00504	0.0084
1.0	0.0269	0.0229	0.0202	0.00403	0.0067
1.2	0.0224	0.0190	0.0168	0.00336	0.0056

ตารางที่ ฉ-1 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลอง

ϕ	Primary Air (kg/sec)			Secondary Air (kg/s)	
	100%	85%	75%	15%	25%
0.8	4.03	2.91	2.27	0.37	1.03
1.0	2.58	1.87	1.45	0.24	0.66
1.2	1.79	1.29	1	0.16	0.46

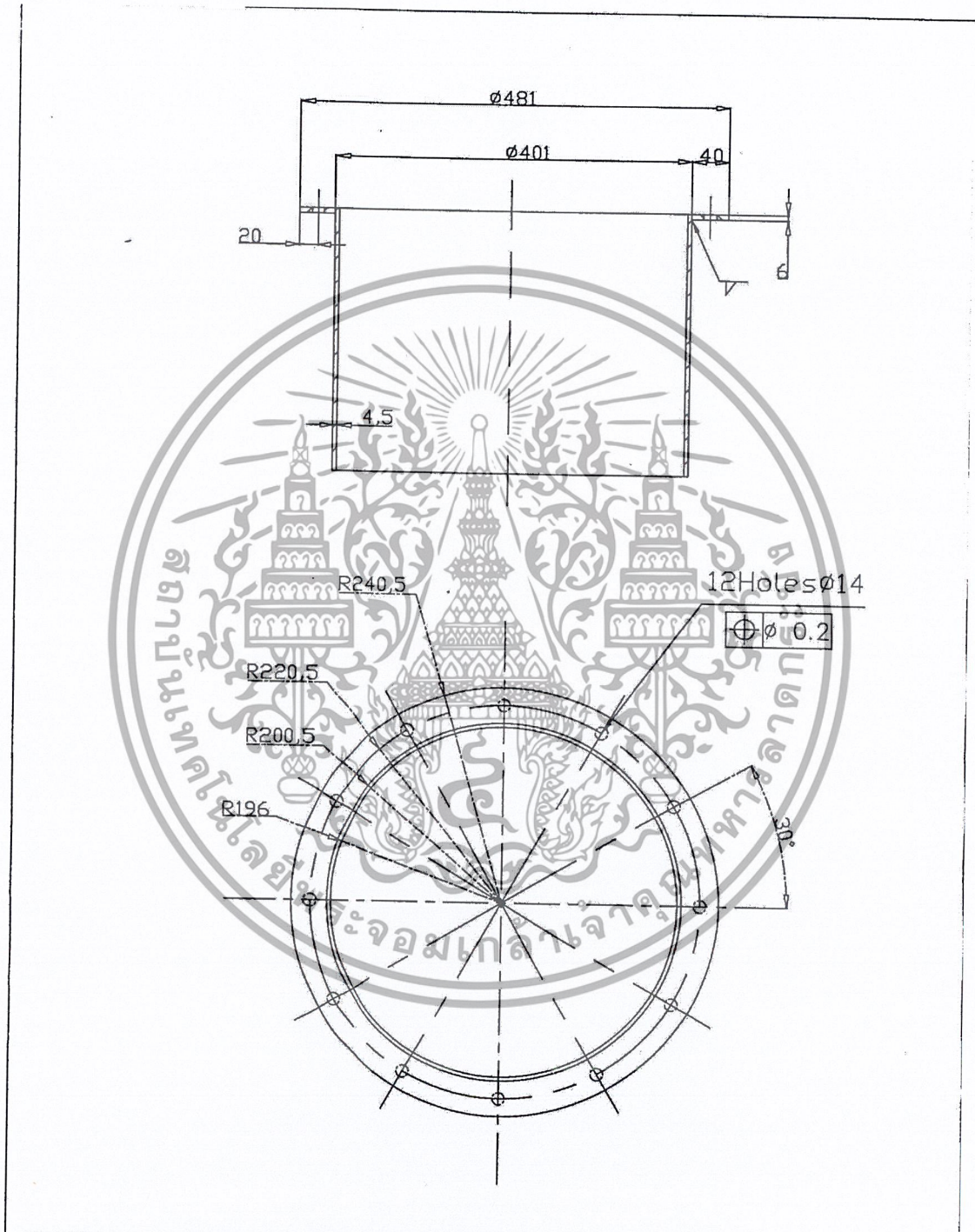
ตารางที่ ฉ-2 แสดงอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ





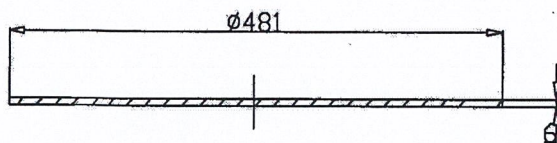
TOLERANCES	DRAWN	26/09/01	JIRAWAT .	TITLE :	SCALE :		
	CON.					SHELL OUT SIDE 1	1:6
	FACULTY		ME.				
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG				DRAWING NO :MECH44105	MATERIAL : AISI1040		
				DIMENSION :	MM.		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



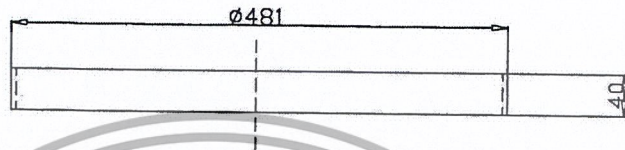
TOLERANCES	DRAWN	26/09/01	JIRAWAT .	TITLE : SHELL IN DIDE 2	SCALE : 1:6
	CON.				
	FACULTY		ME.		
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG				DRAWING NO : MECH44106	MATERIAL : AISI1040
				DIMENSION : MM.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



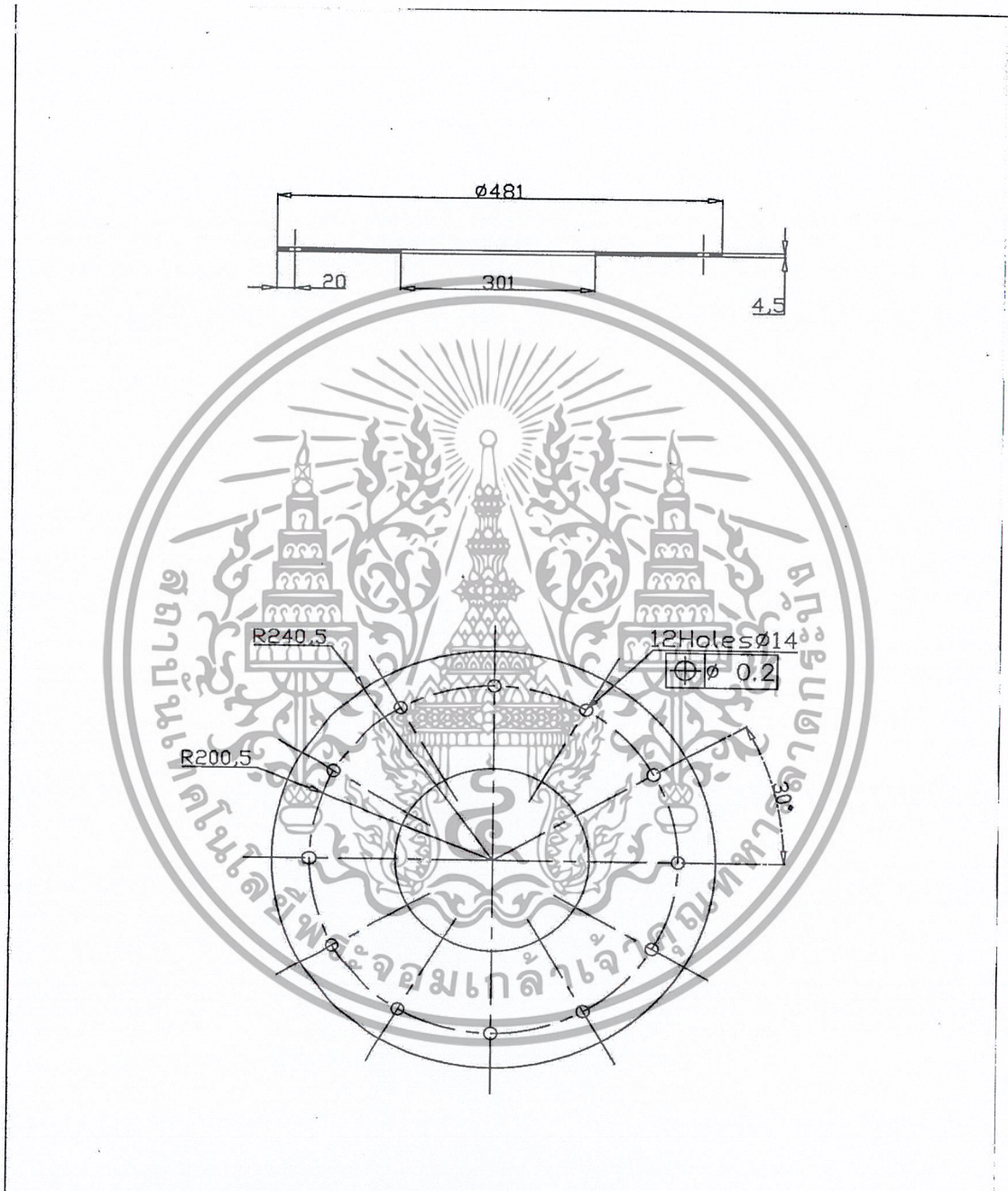
TOLERANCES	DRAWN	26/09/01	JIRAWAT .	TITLE :	SCALE :
	CON.				
	FACULTY		ME.		
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG				DRAWING NO : MECH44102	MATERIAL : AISI1040
				DIMENSION : MM.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



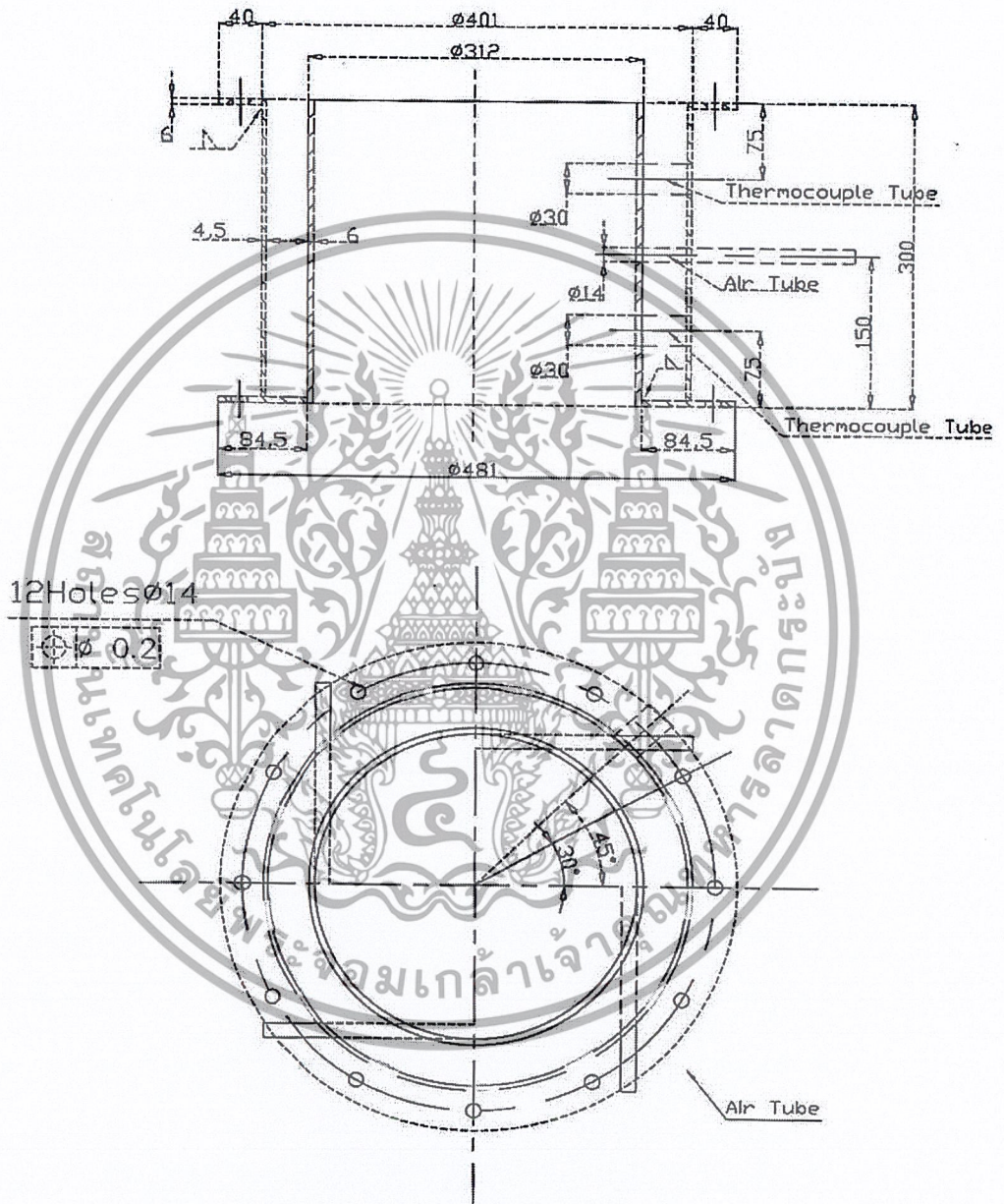
TOLERANCES	DRAWN	26/09/01	JIRAWAT .	TITLE : TOP SHELL	SCALE : 1:6
	CON.				
	FACULTY		ME.		
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG				DRAWING NO :MECH44103	MATERIAL : AISI1040
				DIMENSION : MM.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



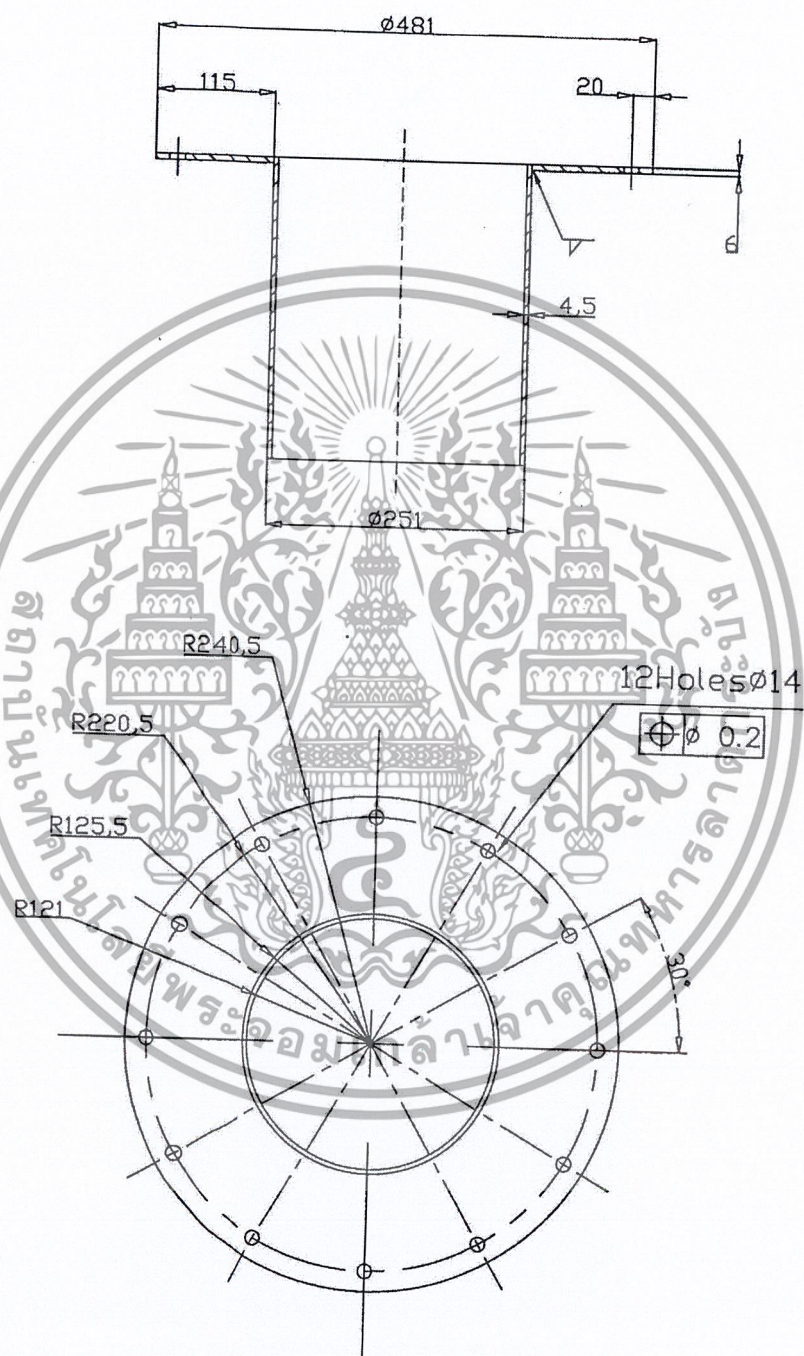
TOLERANCES	DRAWN	26/09/01	JIRAWAT .	TITLE : TOP SHELL	SCALE : 1:6
	CON.				
	FACULTY		ME.		
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG				DRAWING NO : MECH 44104	MATERIAL : AISI1040
				DIMENSION : MM.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TOLERANCES	DRAWN	26/09/01	JIRAWAT .	TITLE :	SCA
	CON.			SECONDARY AIR	
	FACULTY		ME.		
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG				DRAWING NO :MECH44110	MATERIAL :AISI1040
				DIMENSION :	MM.

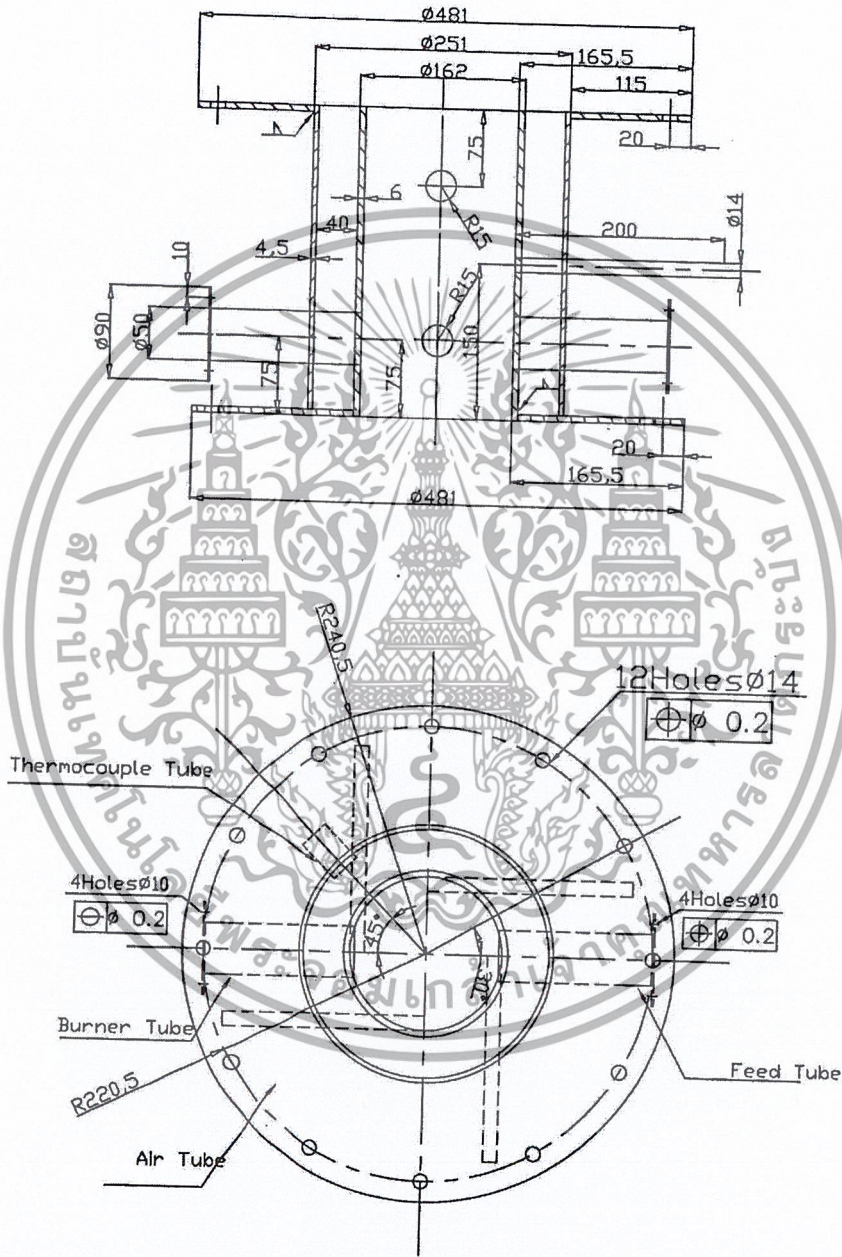
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้
 ใ้เกินกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TOLERANCES	DRAWN	26/09/01	JIRAWAT .	TITLE :	SCALE :
	CON.				
	FACULTY		ME.		
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG				DRAWING NO :MECH44107	MATERIAL : AISI1040
				DIMENSION :	MM.

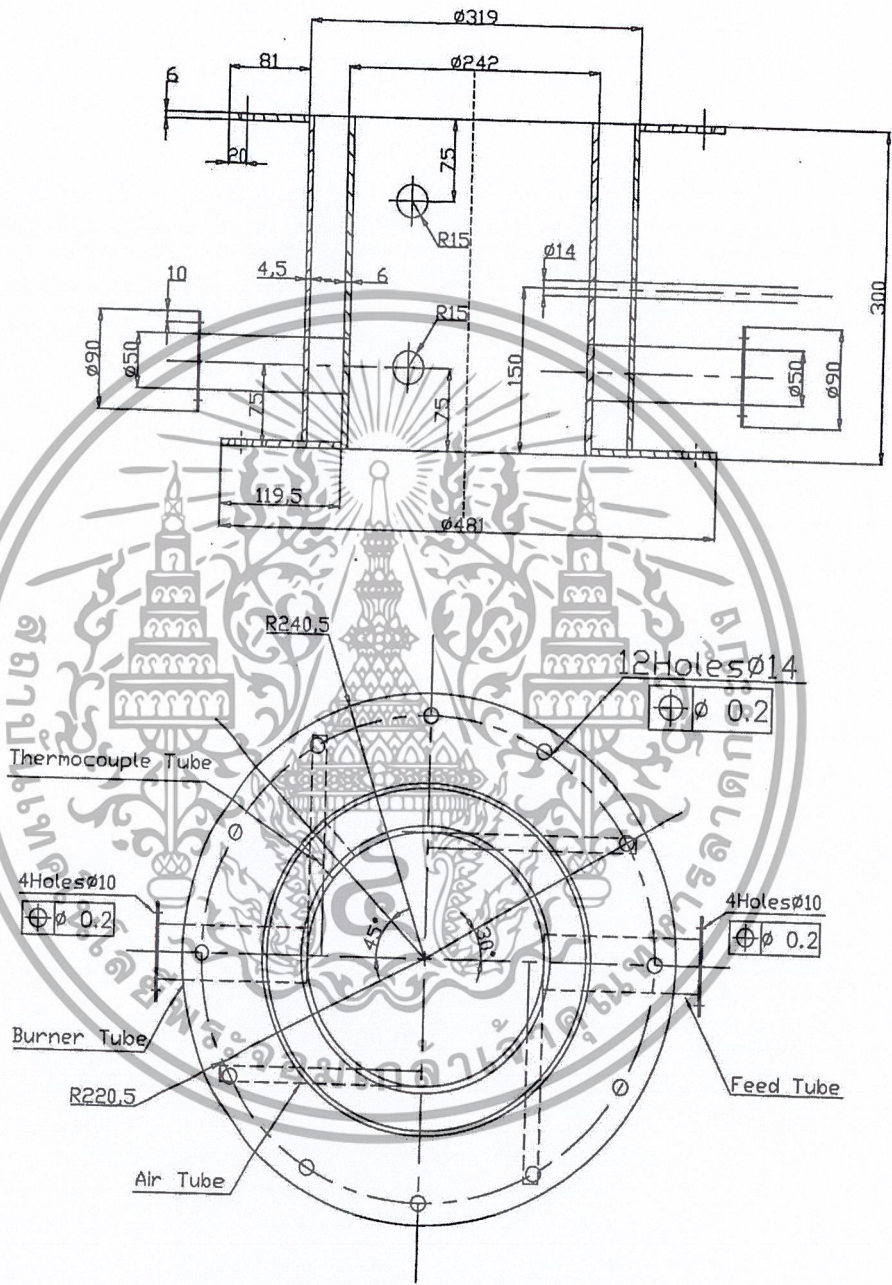
SHELL IN SIDE 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



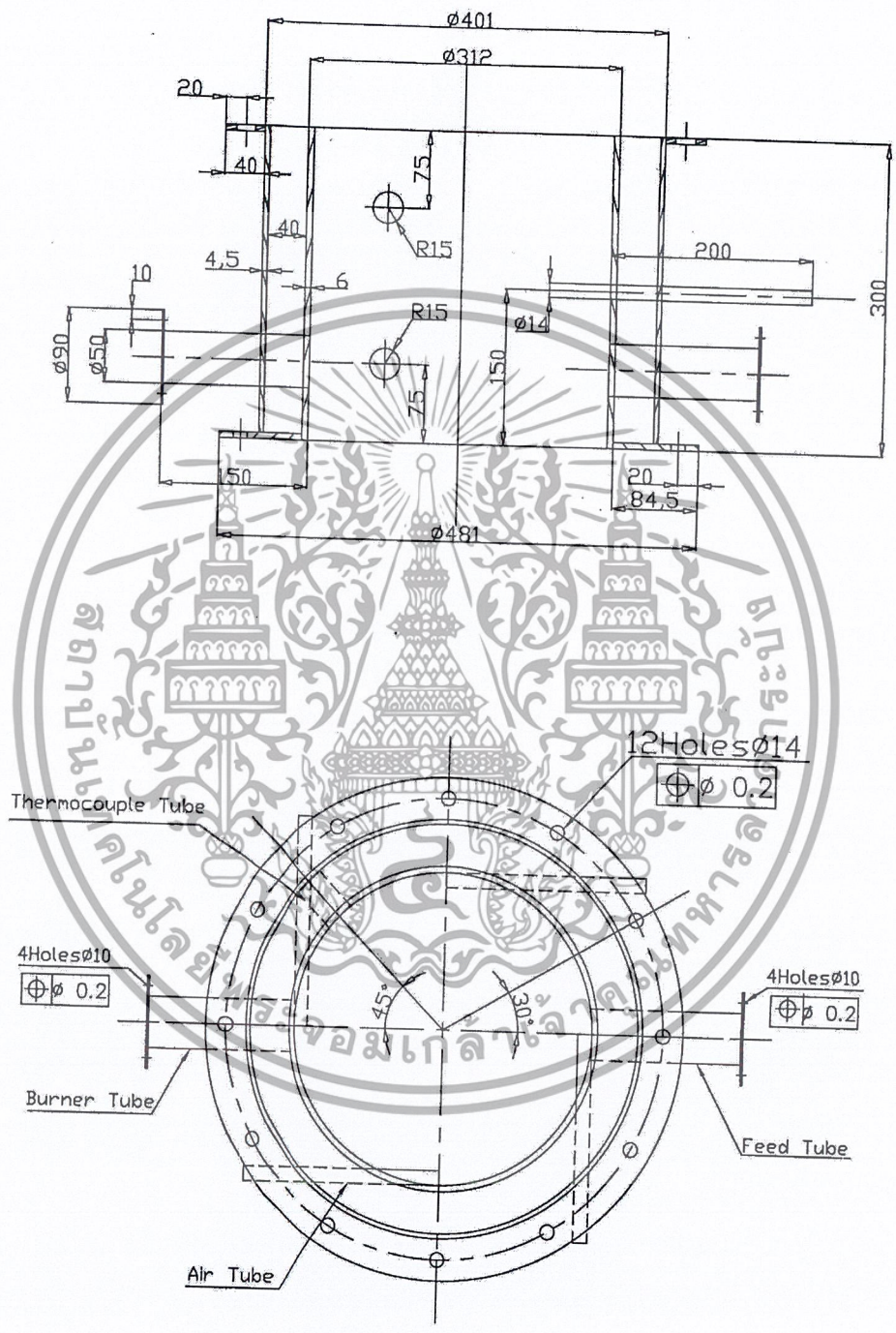
TOLERANCES	DRAWN	26/09/01	JIRAWAT .	TITLE :	SCALE :		
	CON.					PRIMARY AIRH 0.5D	1:6
	FACULTY		ME.				
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG				DRAWING NO :MECH44111	MATERIAL :AISI1040		
				DIMENSION :	MM.		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TOLERANCES	DRAWN	26/09/01	JIRAWAT .	TITLE :	SCALE :		
	CON.					PRIMARY AIR 0.75D	1:6
	FACULTY		ME.				
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG			DRAWING NO :MECH44112	MATERIAL :AISI1040			
				DIMENSION :	MM.		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TOLERANCES	DRAWN	26/09/01	JIRAWAT .	TITLE :	SCALE :
	CON.				
	FACULTY		ME.		
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG				DRAWING NO :MECH44113	MATERIAL :AISI1040
				DIMENSION :	MM.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TOLERANCES	DRAWN	26/09/01	JIRAWAT .	TITLE : BOTTM PLATE	SCALE : 1:6
	CON.				
	FACULTY		ME.		
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG				DRAWING NO :MECH44109	MATERIAL :AIS11040
				DIMENSION : MM.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 **R37.5**



TOLERANCES	DRAWN	26/09/01	JIRAWAT .	TITLE : EXHAUST TUBE	SCALE : 1:6
	CON.				
	FACULTY		ME.		
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG				DRAWING NO : MECH44106	stainlesssteel
				DIMENSION : MM.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช
ตารางบันทึกผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 1

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 0.5D Primary Air : 100% Date : 4 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมมูล : 0.8 Secondary Air : 0% Time : 23:51

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
L1	2	28.6	101.1	143.4	348.7	519.9	631.6	755.7	710.8	700.5	489.0
	4	28.4	91.5	137.5	454.8	549.5	614.4	728.7	691.6	677.7	493.2
	6	28.4	87.9	138.6	543.2	650.1	699.2	773.9	738.7	725.4	544.6
Mean		28.5	93.5	139.8	448.9	573.2	648.4	752.8	713.7	701.2	508.9
L2	2	28.5	88.1	135.6	431.3	588.8	710.9	773.3	745.7	734.6	526.0
	4	28.5	89.1	134.4	447.3	565.1	683.8	735.3	717.1	678.4	506.3
	6	28.5	90.1	131.1	428.9	529.8	633.5	702.6	690.4	678.2	485.6
Mean		28.5	89.1	133.7	435.8	561.2	676.1	737.1	717.7	697.1	506.0
L3	2	28.6	90.8	129.0	409.2	478.4	560.7	696.7	676.1	655.2	462.0
	4	28.6	93.1	130.4	384.2	455.0	530.4	689.5	678.7	659.0	452.5
	6	28.6	94.4	131.3	347.4	433.2	505.6	672.8	662.0	645.2	436.5
Mean		28.6	92.8	130.2	380.3	455.5	532.2	686.3	672.3	653.1	450.3
L4	2	28.6	-	-	-	-	-	656.6	603.2	572.7	610.8
	4	28.6	-	-	-	-	-	628.8	571.8	535.8	578.8
	6	28.6	-	-	-	-	-	529.5	542.6	507.0	526.4
Mean		28.6	-	-	-	-	-	605.0	572.5	538.5	572.0

การทดลองครั้งที่ 2

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 0.5D Primary Air : 85% Date : 4 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมมูล : 0.8 Secondary Air : 15% Time : 21:58

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
L1	2	29.6	124.1	118.5	474.1	634.5	659.8	685.7	638.2	568.7	488.0
	4	29.6	116.9	119.0	484.5	640.3	669.3	689.7	644.5	606.3	496.3
	6	29.6	109.4	120.3	497.5	645.1	674.2	691.7	649.8	614.3	500.3
Mean		29.6	116.8	119.3	485.4	640.0	667.8	689.0	644.2	596.4	494.9
L2	2	29.6	125.3	116.8	550.1	683.7	694.7	685.7	636.7	645.3	517.3
	4	29.6	116.6	114.5	674.2	684.5	708.4	719.8	660.7	634.4	539.1
	6	29.6	111.4	114.1	577.4	708.5	730.0	756.3	704.5	592.5	536.8
Mean		29.6	117.8	115.1	600.6	692.2	711.0	720.6	667.3	624.1	531.1
L3	2	29.5	111.3	116.1	487.4	642.6	664.8	778.4	699.6	652.9	519.1
	4	29.5	104.4	117.2	434.1	588.2	609.7	738.5	701.4	659.8	494.2
	6	29.5	98.0	118.2	401.7	553.2	580.9	721.5	688.0	655.0	477.1
Mean		29.5	104.6	117.2	441.1	594.7	618.5	746.1	696.3	655.9	496.8
L4	2	25.9	-	-	-	-	-	649.2	616.2	581.0	615.5
	4	25.3	-	-	-	-	-	612.5	573.2	532.3	572.7
	6	25.3	-	-	-	-	-	609.5	550.1	506.0	555.2
Mean		25.5	-	-	-	-	-	623.7	579.8	539.8	581.1

การทดลองครั้งที่ 3

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก :

0.5D

Primary Air :

75%

Date : 4 กุมภาพันธ์ 2545

อัตราส่วนสมมูล :

0.8

Secondary Air :

25%

Time : 21:09

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
L1	2	29.3	253.0	111.3	342.3	567.6	675.5	612.1	552.8	526.1	455.1
	4	29.3	285.1	110.5	352.7	566.5	645.6	619.0	568.9	536.6	460.6
	6	29.3	299.6	110.7	392.5	579.5	629.0	615.7	571.1	573.3	471.4
Mean		29.3	279.2	110.8	362.5	571.2	650.0	615.6	564.3	545.3	462.4
L2	2	29.4	261.4	110.2	546.3	624.6	605.7	609.4	579.5	548.7	485.7
	4	29.4	221.4	110.4	535.2	605.5	564.4	584.8	565.8	529.9	464.7
	6	29.4	208.9	108.5	407.9	582.6	539.6	565.5	541.8	523.8	434.8
Mean		29.4	230.6	109.7	496.5	604.2	569.9	586.6	562.4	534.1	461.7
L3	2	29.4	112.7	101.4	239.6	451.8	482.8	652.0	533.8	504.3	384.8
	4	29.4	159.3	103.2	285.6	474.8	494.4	656.5	565.8	525.3	408.1
	6	29.4	172.8	104.4	291.2	495.8	511.5	663.5	571.9	534.0	418.1
Mean		29.4	148.3	103.0	272.1	474.1	496.2	657.3	557.2	521.2	403.7
L4	2	29.4	-	-	-	-	-	617.5	530.2	434.7	527.5
	4	29.4	-	-	-	-	-	572.3	492.7	449.6	504.9
	6	29.4	-	-	-	-	-	543.6	471.7	427.5	480.9
Mean		29.4	-	-	-	-	-	577.8	498.2	437.3	504.4

การทดลองครั้งที่ 4

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก :

0.5D

Primary Air :

100%

Date : 4 กุมภาพันธ์ 2545

อัตราส่วนสมมูล :

1.0

Secondary Air :

0%

Time : 20:27

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
L1	2	29.6	199.6	274.8	584.3	750.5	770.2	766.6	763.3	744.1	606.7
	4	29.6	223.4	239.6	496.5	636.1	655.6	686.6	703.1	699.1	542.5
	6	29.6	208.4	218.1	452.6	581.5	611.3	655.5	681.2	680.4	511.1
Mean		29.6	210.5	244.2	511.1	656.0	679.0	702.9	715.9	707.9	553.4
L2	2	29.6	143.3	186.7	588.3	692.3	688.3	678.6	683.3	671.0	541.5
	4	29.6	189.2	179.2	568.8	602.6	594.7	620.7	639.4	636.2	503.9
	6	29.6	169.0	169.5	589.9	631.0	634.9	619.0	642.2	634.8	511.3
Mean		29.6	167.2	178.5	582.3	642.0	639.3	639.4	655.0	647.3	518.9
L3	2	29.5	147.4	162.9	507.5	566.2	568.7	602.0	609.7	601.1	470.7
	4	29.5	140.3	162.2	448.7	518.6	527.2	582.1	585.3	578.5	442.9
	6	29.5	134.3	160.5	410.3	468.3	480.5	524.3	538.7	547.5	408.1
Mean		29.5	140.7	161.9	455.5	517.7	525.5	569.5	577.9	575.7	440.5
L4	2	29.4	-	-	-	-	-	504.3	505.0	499.1	502.8
	4	29.4	-	-	-	-	-	491.6	428.2	465.0	461.6
	6	29.4	-	-	-	-	-	475.8	464.6	463.8	468.1
Mean		29.4	-	-	-	-	-	490.6	465.9	476.0	477.5

การทดลองครั้งที่ 5

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 0.5D Primary Air : 85% Date : 4 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมมูล : 1.0 Secondary Air : 15% Time : 19:48

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
L1	2	29.0	301.3	313.1	651.4	850.6	873.2	863.6	749.4	738.5	667.6
	4	29.0	336.3	306.8	809.8	912.7	887.2	871.9	804.9	752.2	710.2
	6	29.0	346.2	407.3	785.3	937.2	925.2	900.4	823.3	780.5	738.2
Mean		29.0	327.9	342.4	748.8	900.2	895.2	878.6	792.5	757.1	705.3
L2	2	29.0	321.4	342.0	747.5	833.4	848.3	841.0	798.1	758.1	686.2
	4	29.0	308.3	350.7	748.5	793.5	800.1	836.2	794.2	721.4	669.1
	6	29.0	301.3	375.9	756.5	786.6	802.6	848.1	804.0	708.1	672.9
Mean		29.0	310.3	356.2	750.8	804.5	817.0	841.8	798.8	729.2	676.1
L3	2	29.0	253.2	340.7	535.4	673.3	701.5	856.4	794.2	761.0	614.5
	4	29.0	235.4	343.4	480.4	632.3	662.8	825.4	785.7	755.2	590.1
	6	29.0	224.0	338.7	443.5	609.0	642.6	816.6	773.7	744.3	574.1
Mean		29.0	237.5	340.9	486.4	638.2	669.0	832.8	784.5	753.5	592.9
L4	2	29.0	-	-	-	-	-	753.3	688.5	644.2	695.3
	4	29.0	-	-	-	-	-	709.5	646.4	597.7	651.2
	6	29.0	-	-	-	-	-	676.1	618.1	571.4	621.9
Mean		29.0	-	-	-	-	-	713.0	651.0	604.4	656.1

การทดลองครั้งที่ 6

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 0.5D Primary Air : 75% Date : 4 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมมูล : 1.0 Secondary Air : 25% Time : 17:45

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
L1	2		384.4	230.4	603.7	745.1	691.6	694.2	620.7	515.6	560.7
	4		363.5	216.8	612.2	784.4	717.3	707.7	634.1	569.5	575.7
	6		353.3	210.9	599.7	756.6	723.5	711.8	651.7	590.3	574.7
Mean		0.0	367.1	219.4	605.2	762.0	710.8	704.6	635.5	558.5	570.4
L2	2		384.5	193.8	636.1	794.5	756.2	731.8	675.1	643.3	601.9
	4		356.4	193.7	644.5	771.2	750.6	732.1	679.5	646.2	596.8
	6		352.9	194.6	646.3	768.8	745.6	741.5	688.2	658.4	599.5
Mean		0.0	364.6	194.0	642.3	778.2	750.8	735.1	680.9	649.3	599.4
L3	2		277.6	195.0	452.5	631.8	646.9	794.1	700.5	665.2	545.5
	4		248.1	194.8	413.2	617.7	629.5	784.2	701.1	663.9	531.6
	6		233.5	193.7	398.0	536.4	615.6	763.8	694.5	660.7	512.0
Mean		0.0	253.1	194.5	421.2	595.3	630.7	780.7	698.7	663.3	529.7
L4	2		-	-	-	-	-	664.7	571.3	518.1	584.7
	4		-	-	-	-	-	632.2	552.7	497.4	560.8
	6		-	-	-	-	-	626.8	545.5	489.4	553.9
Mean		0.0	-	-	-	-	-	641.2	556.5	501.6	566.5

การทดลองครั้งที่ 7

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 0.5D Primary Air : 100% Date : 4 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมมูล : 1.2 Secondary Air : 0% Time : 0:22

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
L1	2	28.7	186.2	134.0	475.1	697.5	780.9	863.4	851.7	793.6	597.8
	4	28.7	186.2	135.1	486.1	709.8	794.3	891.6	863.4	808.4	609.4
	6	28.7	183.3	136.2	478.0	705.9	794.0	889.1	862.1	810.4	607.4
Mean		28.7	185.2	135.1	479.7	704.4	789.7	881.4	859.1	804.1	604.8
L2	2	28.8	171.8	136.6	501.6	746.7	821.2	907.6	882.3	847.6	626.9
	4	28.8	179.0	138.9	526.8	780.6	872.2	933.5	902.5	863.0	649.6
	6	28.8	171.9	141.6	535.4	781.9	817.7	944.9	913.2	869.8	647.1
Mean		28.8	174.2	139.0	521.3	769.7	837.0	928.7	899.3	860.1	641.2
L3	2	28.9	154.3	145.6	476.5	682.6	717.1	1,003.0	932.2	865.6	622.1
	4	28.9	141.4	147.6	433.3	641.1	675.0	985.9	917.2	857.3	599.9
	6	28.8	132.1	149.1	398.7	609.0	652.3	976.5	906.9	835.9	582.6
Mean		28.9	142.6	147.4	436.2	644.2	681.5	988.5	918.8	852.9	601.5
L4	2	28.8	-	-	-	-	-	825.2	785.0	712.3	774.2
	4	28.8	-	-	-	-	-	764.2	715.3	654.7	711.4
	6	28.8	-	-	-	-	-	729.0	664.8	649.2	681.0
Mean		28.8	-	-	-	-	-	772.8	721.7	672.1	722.2

การทดลองครั้งที่ 8

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 0.5D Primary Air : 85% Date : 4 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมมูล : 1.2 Secondary Air : 15% Time : 23:04

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
L1	2	28.8	255.0	199.6	346.0	632.4	654.2	673.6	667.4	650.5	509.8
	4	28.7	249.7	217.8	433.7	694.8	752.7	779.8	753.2	713.6	574.4
	6	28.9	255.7	323.9	612.8	765.8	787.4	788.3	753.0	721.7	626.1
Mean		28.8	253.5	247.1	464.2	697.7	731.4	747.2	724.5	695.3	570.1
L2	2	28.8	255.2	352.4	689.1	818.5	799.3	872.3	803.5	744.9	666.9
	4	28.8	248.5	379.0	724.3	834.9	831.5	886.5	831.5	744.3	685.1
	6	28.8	244.5	398.0	713.5	816.0	831.1	866.1	827.9	782.6	685.0
Mean		28.8	249.4	376.5	709.0	823.1	820.6	875.0	821.0	757.3	679.0
L3	2	28.8	221.5	353.3	572.0	672.6	718.2	889.7	838.2	782.2	631.0
	4	28.8	211.5	321.3	490.0	606.4	644.4	783.5	757.8	728.4	567.9
	6	28.8	214.2	294.5	441.1	574.5	600.5	782.8	750.9	727.8	548.3
Mean		28.8	215.7	323.0	501.0	617.8	654.4	818.7	782.3	746.1	582.4
L4	2	28.8	-	-	-	-	-	712.3	680.9	649.2	680.8
	4	28.8	-	-	-	-	-	646.1	618.1	582.7	615.6
	6	28.8	-	-	-	-	-	604.5	575.2	545.6	575.1
Mean		28.8	-	-	-	-	-	654.3	624.7	592.5	623.8

การทดลองครั้งที่ 9

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 0.5D Primary Air : 75% Date : 4 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมมูล : 1.2 Secondary Air : 25% Time : 22:31

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
L1	2	29.1	201.8	280.8	737.1	871.7	872.3	782.7	687.3	649.5	635.4
	4	29.1	243.1	277.5	734.2	875.3	877.7	807.9	713.3	670.5	649.9
	6	29.1	267.2	303.9	773.8	877.0	893.2	832.1	731.5	681.8	670.1
Mean		29.1	237.4	287.4	748.4	874.7	881.1	807.6	710.7	667.3	651.8
L2	2	29.1	271.8	338.5	749.8	772.4	831.2	850.7	756.3	696.4	658.4
	4	29.1	255.4	316.4	755.6	779.7	829.2	851.2	735.8	689.0	651.5
	6	29.1	242.8	318.5	753.3	757.3	797.2	788.3	709.2	675.2	630.2
Mean		29.1	256.7	324.5	752.9	769.8	819.2	830.1	733.8	686.9	646.7
L3	2	29.2	214.5	296.7	575.4	678.7	682.5	888.6	734.7	693.0	595.5
	4	29.2	200.4	299.2	500.1	634.5	650.6	853.7	726.8	684.6	568.7
	6	29.2	190.7	305.4	455.1	617.1	644.0	887.1	745.4	696.2	567.6
Mean		29.2	201.9	300.4	510.2	643.4	659.0	876.5	735.6	691.3	577.3
L4	2	29.2	-	-	-	-	-	745.4	657.4	668.6	690.5
	4	29.0	-	-	-	-	-	675.6	608.2	556.1	613.3
	6	29.0	-	-	-	-	-	636.0	576.3	529.7	580.7
Mean		29.1	-	-	-	-	-	685.7	614.0	584.8	628.1

การทดลองครั้งที่ 10

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 0.75D Primary Air : 100% Date : 5 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมมูล : 0.8 Secondary Air : 0% Time : 21:11

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
M1	2	30.0	318.3	449.1	429.1	484.2	512.5	486.0	454.4	433.6	445.9
	4	30.0	326.5	414.8	396.0	448.4	744.4	460.4	436.1	419.3	455.7
	6	29.7	329.7	378.3	341.3	392.7	410.6	404.9	405.4	397.0	382.5
Mean		29.9	324.8	414.1	388.8	441.8	555.8	450.4	432.0	416.6	428.0
M2	2	29.5	318.2	327.3	358.0	402.1	425.5	440.8	407.0	392.5	383.9
	4	29.8	302.9	328.0	417.5	427.8	437.3	438.8	416.3	398.2	395.9
	6	29.7	289.9	324.2	464.1	472.7	485.6	493.3	445.1	413.1	423.5
Mean		29.7	303.7	326.5	413.2	434.2	449.5	457.6	422.8	401.3	401.1
M3	2	30.0	254.0	297.8	384.1	396.5	406.3	457.4	424.8	405.1	378.3
	4	30.1	233.0	280.5	341.9	359.4	363.4	391.3	380.1	374.9	340.6
	6	29.9	216.5	265.4	323.2	334.9	342.1	392.1	373.1	365.2	326.6
Mean		30.0	234.5	281.2	349.7	363.6	370.6	413.6	392.7	381.7	348.5
M4	2	30.0	-	-	-	-	-	362.4	333.7	323.2	339.8
	4	30.0	-	-	-	-	-	339.3	312.0	301.7	317.7
	6	29.9	-	-	-	-	-	348.8	304.7	289.7	314.4
Mean		30.0	-	-	-	-	-	350.2	316.8	304.9	323.9

การทดลองครั้งที่ 11

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 0.75D Primary Air : 85% Date : 5 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมมูล : 0.8 Secondary Air : 15% Time : 17:05

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
M1	2	33.9	314.9	413.5	455.2	538.1	569.5	582.3	552.1	529.1	494.3
	4	33.9	339.7	438.0	427.2	479.5	516.3	520.4	516.6	503.8	467.7
	6	33.9	349.2	428.4	446.4	492.5	534.7	540.0	514.5	499.8	475.7
Mean		33.9	334.6	426.6	442.9	503.4	540.2	547.6	527.7	510.9	479.2
M2	2	33.6	312.7	418.5	468.5	498.8	539.7	541.0	488.5	470.5	467.3
	4	33.6	307.1	426.8	508.9	525.4	553.7	552.8	491.8	471.7	479.8
	6	33.6	303.8	427.7	512.1	532.0	554.2	547.5	491.2	470.2	479.8
Mean		33.6	307.9	424.3	496.5	518.7	549.2	547.1	490.5	470.8	475.6
M3	2	33.6	266.0	373.5	418.8	432.8	460.0	523.8	463.2	444.9	422.9
	4	33.6	245.6	341.1	433.7	431.8	459.0	577.5	490.6	461.6	430.1
	6	33.6	231.5	329.2	436.2	434.7	461.2	605.6	506.7	470.8	434.5
Mean		33.6	247.7	347.9	429.6	433.1	460.1	569.0	486.8	459.1	429.2
M4	2	-	-	-	-	-	-	552.2	463.1	423.4	479.6
	4	-	-	-	-	-	-	524.1	434.6	393.5	450.7
	6	-	-	-	-	-	-	510.6	417.2	373.3	433.7
Mean		0.0	-	-	-	-	-	529.0	438.3	396.7	454.7

การทดลองครั้งที่ 12

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 0.75D Primary Air : 75% Date : 5 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมมูล : 0.8 Secondary Air : 25% Time : 17:50

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
M1	2	31.8	426.5	427.9	626.4	652.7	686.4	707.5	673.9	596.8	599.8
	4	31.8	442.0	633.4	672.5	710.6	738.7	717.0	621.0	578.2	639.2
	6	31.8	447.7	647.5	667.5	704.6	736.9	717.8	623.3	580.5	640.7
Mean		31.8	438.7	569.6	655.5	689.3	720.7	714.1	639.4	585.2	626.6
M2	2	31.7	394.0	542.6	636.3	702.7	716.5	713.7	633.6	594.5	616.7
	4	31.7	380.9	522.3	641.8	675.1	703.5	698.5	622.4	587.1	604.0
	6	31.7	370.4	504.6	631.5	668.7	696.5	690.6	611.8	594.3	596.1
Mean		31.7	381.8	523.2	636.5	682.2	705.5	700.9	622.6	592.0	605.6
M3	2	31.9	271.4	379.6	536.5	545.2	571.1	700.5	603.3	563.7	521.4
	4	31.9	262.0	372.7	526.2	531.2	556.5	682.8	594.7	558.2	510.5
	6	31.9	255.5	368.6	501.7	508.8	532.7	641.7	568.7	540.0	489.7
Mean		31.9	263.0	373.6	521.5	528.4	553.4	675.0	588.9	554.0	507.2
M4	2	31.7	-	-	-	-	-	558.0	498.6	468.1	508.2
	4	31.7	-	-	-	-	-	517.3	462.0	432.1	470.5
	6	31.7	-	-	-	-	-	495.7	436.2	405.4	445.8
Mean		31.7	-	-	-	-	-	523.7	465.6	435.2	474.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 13

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 0.75D Primary Air : 100% Date : 5 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมมูล : 1.0 Secondary Air : 0% Time : 20:00

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
M1	2	31.1	402.5	546.4	748.8	740.3	747.5	722.3	684.4	670.1	657.8
	4	31.1	413.7	555.6	744.1	707.3	705.9	684.8	665.3	655.6	641.5
	6	31.1	421.3	563.6	671.7	710.3	730.8	681.3	658.7	646.3	635.5
Mean		31.1	412.5	555.2	721.5	719.3	728.1	696.1	669.5	657.3	644.9
M2	2	31.0	389.8	463.4	616.0	656.7	681.4	691.2	696.1	637.3	604.0
	4	31.0	365.1	447.9	633.7	678.1	707.9	720.6	666.6	642.5	607.8
	6	31.0	350.7	445.1	601.5	659.3	696.5	707.3	657.8	634.7	594.1
Mean		31.0	368.5	452.1	617.1	664.7	695.3	706.4	673.5	638.2	602.0
M3	2	30.5	308.1	466.8	528.3	559.2	605.6	665.0	625.9	608.3	545.9
	4	30.5	278.2	375.5	494.5	516.7	564.7	648.3	609.7	593.6	510.2
	6	30.5	259.8	356.6	466.9	489.1	527.4	618.7	589.7	577.1	485.7
Mean		30.5	282.0	399.6	496.6	521.7	565.9	644.0	608.4	593.0	513.9
M4	2	-	-	-	-	-	-	574.3	538.1	520.3	544.2
	4	-	-	-	-	-	-	545.0	505.9	482.1	511.0
	6	-	-	-	-	-	-	524.8	480.3	452.7	485.9
Mean		0.0	-	-	-	-	-	548.0	508.1	485.0	513.7

การทดลองครั้งที่ 14

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 0.75D Primary Air : 85% Date : 5 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมมูล : 1.0 Secondary Air : 15% Time : 16:30

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
M1	2	36.4	334.3	366.7	662.8	668.7	602.1	506.2	435.9	429.6	500.8
	4	36.4	356.7	385.4	596.6	581.5	526.7	472.3	433.8	420.1	471.6
	6	36.4	362.9	403.7	626.9	604.5	555.1	484.3	437.9	413.2	486.1
Mean		36.4	351.3	385.3	628.8	618.2	561.3	487.6	435.9	421.0	486.2
M2	2	34.8	323.6	382.8	704.8	720.7	662.7	578.3	482.5	444.1	537.4
	4	34.8	348.5	378.3	708.6	752.3	711.2	638.7	527.9	474.3	567.5
	6	34.8	339.7	380.5	705.4	750.6	718.6	662.8	558.5	500.6	577.1
Mean		34.8	337.3	380.5	706.3	741.2	697.5	626.6	523.0	473.0	560.7
M3	2	34.6	308.1	251.3	547.5	602.2	617.4	690.5	587.9	529.8	516.8
	4	34.6	269.3	326.5	471.0	540.0	572.8	695.8	595.7	576.9	506.0
	6	34.6	250.2	312.7	429.7	507.8	565.1	702.7	598.9	546.7	489.2
Mean		34.6	275.9	296.8	482.7	550.0	585.1	696.3	594.2	551.1	504.0
M4	2	34.8	-	-	-	-	-	642.4	543.0	493.8	559.7
	4	34.3	-	-	-	-	-	570.8	476.2	428.7	491.9
	6	34.2	-	-	-	-	-	500.9	460.7	414.3	458.6
Mean		34.4	-	-	-	-	-	571.4	493.3	445.6	503.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 15

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 0.75D Primary Air : 75% Date : 5 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมมูล : 1.0 Secondary Air : 25% Time : 15:50

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
M1	2	37.1	549.3	557.6	711.1	818.2	842.7	685.2	550.1	434.8	643.6
	4	37.1	562.2	545.4	726.9	810.2	842.9	410.3	567.5	495.6	620.1
	6	37.1	574.1	531.6	746.5	789.6	850.2	716.0	579.1	507.4	661.8
Mean		37.1	561.9	544.9	728.2	806.0	845.3	603.8	565.6	479.3	641.9
M2	2	36.6	557.3	463.2	753.2	694.4	845.3	717.6	590.4	526.1	643.4
	4	36.6	514.1	432.6	729.3	650.5	817.1	712.5	605.6	540.2	625.2
	6	36.6	478.1	407.6	676.3	719.4	824.9	744.0	618.5	550.8	627.5
Mean		36.6	516.5	434.5	719.6	688.1	829.1	724.7	604.8	539.0	632.0
M3	2	36.4	376.0	364.5	510.6	594.3	569.0	645.7	573.5	530.6	520.5
	4	36.4	323.6	341.0	446.7	559.3	578.9	640.7	557.6	517.9	495.7
	6	36.4	289.0	323.5	407.8	515.6	534.2	602.5	533.4	498.4	463.1
Mean		36.4	329.5	343.0	455.0	556.4	560.7	629.6	554.8	515.6	493.1
M4	2	-	-	-	-	-	-	508.2	449.1	410.8	456.0
	4	-	-	-	-	-	-	492.6	438.0	401.0	443.9
	6	-	-	-	-	-	-	451.1	402.3	370.8	408.1
Mean		0.0	-	-	-	-	-	484.0	429.8	394.2	436.0

การทดลองครั้งที่ 16

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 0.75D Primary Air : 100% Date : 5 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมมูล : 1.2 Secondary Air : 0% Time : 22:44

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
M1	2	30.0	383.3	543.5	612.5	583.8	601.5	568.0	515.6	488.5	537.1
	4	30.0	379.5	543.3	642.8	592.8	608.8	587.5	522.4	494.1	546.4
	6	30.0	375.8	546.4	640.0	599.5	614.4	590.0	528.1	499.4	549.2
Mean		30.0	379.5	544.4	631.8	592.0	608.2	581.8	522.0	494.0	544.2
M2	2	30.3	295.1	396.5	643.5	608.0	594.9	584.5	521.2	481.0	515.6
	4	30.3	287.6	407.0	635.1	607.3	580.8	567.2	506.8	480.1	509.0
	6	30.3	284.4	413.8	637.4	625.8	600.4	578.8	510.7	484.7	517.0
Mean		30.3	289.0	405.8	638.7	613.7	592.0	576.8	512.9	481.9	513.9
M3	2	30.1	258.1	374.5	537.9	545.2	528.2	543.2	491.1	473.1	468.9
	4	30.1	225.4	330.6	420.0	435.9	426.5	479.0	439.2	427.3	398.0
	6	30.1	213.4	312.8	376.0	395.5	388.8	441.0	413.0	404.3	368.1
Mean		30.1	232.3	339.3	444.6	458.9	447.8	487.7	447.8	434.9	411.7
M4	2	30.0	-	-	-	-	-	385.5	345.1	331.2	353.9
	4	30.0	-	-	-	-	-	388.1	333.6	313.6	345.1
	6	30.0	-	-	-	-	-	405.8	333.3	301.8	347.0
Mean		30.0	-	-	-	-	-	393.1	337.3	315.5	348.7

การทดลองครั้งที่ 17

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก :

0.75D

Primary Air :

85%

Date : 5 กุมภาพันธ์ 2545

อัตราส่วนสมมูล :

1.2

Secondary Air :

15%

Time : 19:20

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
M1	2	31.4	308.5	512.8	654.6	552.4	643.6	786.7	744.4	705.7	613.6
	4	31.7	352.6	558.9	725.9	610.4	740.4	822.1	772.4	731.9	664.3
	6	31.7	380.5	572.9	747.5	645.4	782.1	817.6	774.7	739.9	682.6
Mean		31.6	347.2	548.2	709.3	602.7	722.0	808.8	763.8	725.8	653.5
M2	2	31.8	370.9	502.9	701.3	605.7	702.4	857.8	805.4	778.8	665.7
	4	31.7	357.7	484.7	687.1	572.7	684.2	824.0	776.0	758.2	643.1
	6	32.1	345.9	467.7	673.2	567.5	693.4	794.0	753.5	740.6	629.5
Mean		31.9	358.2	485.1	687.2	582.0	693.3	825.3	778.3	759.2	646.1
M3	2	32.4	303.5	410.9	522.3	489.1	568.6	781.6	723.9	749.5	568.7
	4	32.0	275.5	380.3	472.8	446.4	522.0	797.9	716.3	696.4	538.5
	6	31.5	257.1	361.1	447.0	425.0	504.5	797.2	748.6	711.6	531.5
Mean		32.0	278.7	384.1	480.7	453.5	531.7	792.2	729.6	719.2	546.2
M4	2	32.1	-	-	-	-	-	692.0	649.1	618.1	653.1
	4	32.1	-	-	-	-	-	652.6	601.7	567.4	607.2
	6	32.1	-	-	-	-	-	639.7	578.7	537.3	585.2
Mean		32.1	-	-	-	-	-	661.4	609.8	574.3	615.2

การทดลองครั้งที่ 18

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก :

0.75D

Primary Air :

75%

Date : 5 กุมภาพันธ์ 2545

อัตราส่วนสมมูล :

1.2

Secondary Air :

25%

Time : 18:50

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
M1	2	31.3	417.6	732.8	784.3	829.2	739.5	735.0	641.8	587.1	683.4
	4	31.3	426.8	677.5	783.4	852.8	828.1	756.9	615.5	613.6	694.3
	6	31.3	435.3	607.5	774.4	855.0	827.1	779.7	688.2	637.1	700.5
Mean		31.3	426.6	672.6	780.7	845.7	798.2	757.2	648.5	612.6	692.8
M2	2	31.5	415.2	467.1	769.5	851.2	800.9	807.6	716.0	668.2	687.0
	4	31.5	386.2	427.5	740.5	799.4	783.1	795.7	700.5	662.8	662.0
	6	31.5	364.8	418.9	715.9	761.3	763.3	752.0	666.3	638.5	635.1
Mean		31.5	388.7	437.8	742.0	804.0	782.4	785.1	694.3	656.5	661.4
M3	2	31.5	316.4	381.7	568.6	604.3	639.1	841.4	738.4	685.7	597.0
	4	31.5	288.1	374.9	504.8	544.6	588.7	841.9	752.1	698.1	574.2
	6	31.5	268.3	362.9	465.3	506.7	554.5	802.4	746.3	701.8	551.0
Mean		31.5	290.9	373.2	512.9	551.9	594.1	828.6	745.6	695.2	574.0
M4	2	31.5	-	-	-	-	-	663.3	637.0	593.8	631.4
	4	31.5	-	-	-	-	-	608.0	599.0	567.5	591.5
	6	31.5	-	-	-	-	-	571.3	578.8	521.5	557.2
Mean		31.5	-	-	-	-	-	614.2	604.9	560.9	593.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 19

ขนาดห้องเตาใหม่หลัก : 1.0D Primary Air : 100% Date : 6 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมดุล : 0.8 Secondary Air : 0% Time : 17:00

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
N1	2	33.4	442.6	430.2	604.2	721.7	806.9	767.7	717.9	689.2	647.6
	4	33.4	464.5	447.7	619.3	736.3	798.1	784.3	740.1	703.1	661.7
	6	33.4	498.2	521.6	648.2	752.1	806.4	813.6	753.8	718.0	689.0
Mean		33.4	468.4	466.5	623.9	736.7	803.8	788.5	737.3	703.4	666.1
N2	2	33.2	491.7	522.4	626.1	751.7	830.5	821.1	756.6	718.1	689.8
	4	33.1	480.4	470.1	607.4	749.6	872.3	832.5	764.6	725.7	687.8
	6	33.0	489.5	443.0	603.1	725.3	816.8	839.2	774.3	735.6	678.4
Mean		33.1	487.2	478.5	612.2	742.2	839.9	830.9	765.2	726.5	685.3
N3	2	33.1	423.3	408.0	557.0	657.4	716.3	840.0	778.1	736.7	639.6
	4	33.0	326.9	380.0	515.3	616.4	668.0	838.4	770.1	729.5	605.6
	6	33.0	335.2	361.6	498.7	584.8	642.8	818.6	755.5	718.2	589.4
Mean		33.0	361.8	383.2	523.7	619.5	675.7	832.3	767.9	728.1	611.5
N4	2	33.0	-	-	-	-	-	728.5	686.5	646.2	687.1
	4	33.7	-	-	-	-	-	684.4	642.9	597.7	641.7
	6	33.7	-	-	-	-	-	660.8	612.1	564.7	612.5
Mean		33.5	-	-	-	-	-	691.2	647.2	602.9	647.1

การทดลองครั้งที่ 20

ขนาดห้องเตาใหม่หลัก : 1.0D Primary Air : 85% Date : 6 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนสมดุล : 0.8 Secondary Air : 15% Time : 16:35

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
N1	2	34.8	321.5	351.5	672.9	696.5	757.1	816.0	770.4	729.3	639.4
	4	34.3	375.1	401.9	697.9	715.7	307.1	840.1	789.9	745.8	609.2
	6	34.4	421.4	457.7	715.8	730.8	832.2	851.1	805.7	758.6	696.7
Mean		34.5	372.7	403.7	695.5	714.3	632.1	835.7	788.7	744.6	648.4
N2	2	34.3	448.0	529.0	624.0	724.2	842.5	841.7	729.3	754.1	686.6
	4	33.9	452.4	555.7	563.4	708.6	818.9	834.2	782.0	748.3	682.9
	6	33.8	456.2	590.3	587.3	732.7	831.7	838.9	790.4	753.4	697.6
Mean		34.0	452.2	558.3	591.6	721.8	831.0	838.3	767.2	751.9	689.1
N3	2	34.0	385.5	502.4	525.4	651.2	746.3	821.3	777.7	743.5	644.2
	4	34.1	334.9	431.2	491.7	606.1	677.1	793.0	760.1	731.0	603.1
	6	34.0	305.4	387.2	469.1	586.3	629.0	798.6	757.6	730.7	583.0
Mean		34.0	341.9	440.3	495.4	614.5	684.1	804.3	765.1	735.1	610.1
N4	2	33.9	-	-	-	-	-	678.4	679.6	645.9	668.0
	4	33.9	-	-	-	-	-	624.0	637.5	598.1	619.9
	6	33.8	-	-	-	-	-	598.5	604.9	564.5	589.3
Mean		33.9	-	-	-	-	-	633.6	640.7	602.8	625.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 21

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก :

อัตราส่วนสมมูล :

1.0D

0.8

Primary Air : 75%

Secondary Air : 25%

Date : 6 กุมภาพันธ์ 2545

Time : 16:06

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
N1	2	38.7	362.1	377.1	673.7	755.0	854.1	834.3	769.1	723.8	668.7
	4	38.5	365.0	386.9	716.6	755.2	861.4	848.7	779.4	730.0	680.4
	6	38.4	362.0	377.2	748.5	755.6	876.6	861.2	783.6	731.3	687.0
Mean		38.5	363.0	380.4	712.9	755.3	864.0	848.1	777.4	728.4	678.7
N2	2	36.1	341.4	358.1	730.2	830.0	903.0	851.3	784.9	738.9	692.2
	4	36.2	325.7	346.5	702.2	849.2	907.4	843.2	784.1	740.2	687.3
	6	36.2	311.6	367.5	694.0	865.5	925.6	846.7	785.5	739.5	692.0
Mean		36.2	326.2	357.4	708.8	848.2	912.0	847.1	784.8	739.5	690.5
N3	2	36.7	285.0	350.0	578.0	679.4	800.0	815.2	762.6	723.6	624.2
	4	38.0	266.2	319.6	507.8	617.9	727.9	814.0	760.4	720.3	591.8
	6	35.9	251.2	297.5	463.3	574.2	681.5	803.4	752.0	713.0	567.0
Mean		36.9	267.5	322.4	516.4	623.8	736.5	810.9	758.3	719.0	594.3
N4	2	37.4	-	-	-	-	-	615.4	614.7	579.5	603.2
	4	35.9	-	-	-	-	-	584.8	587.4	545.7	572.6
	6	34.9	-	-	-	-	-	621.5	620.2	583.8	608.5
Mean		36.1	-	-	-	-	-	607.2	607.4	569.5	591.4

การทดลองครั้งที่ 22

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก :

อัตราส่วนสมมูล :

1.0D

1.0

Primary Air : 100%

Secondary Air : 0%

Date : 6 กุมภาพันธ์ 2545

Time : 18:20

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
N1	2	32.0	592.2	620.5	768.4	824.1	880.0	961.4	912.9	860.9	802.6
	4	31.9	618.1	652.0	782.3	829.5	899.9	974.5	916.7	861.5	816.8
	6	31.8	665.4	686.4	802.0	834.2	922.1	987.3	934.9	876.2	838.6
Mean		31.9	625.2	653.0	784.2	829.3	900.7	974.4	921.5	866.2	819.3
N2	2	31.8	633.9	653.4	820.6	805.0	914.7	1,034.2	959.2	888.1	838.6
	4	31.7	600.7	637.3	835.9	780.4	906.6	1,025.2	945.2	896.8	828.5
	6	31.7	577.9	620.5	828.1	769.1	904.5	1,033.7	977.9	909.1	827.6
Mean		31.7	604.2	637.1	828.2	784.8	908.6	1,031.0	960.8	898.0	831.6
N3	2	31.7	451.1	501.3	672.7	614.4	731.9	962.2	963.8	898.0	724.4
	4	31.6	383.8	436.6	625.6	555.4	684.6	947.6	926.7	889.8	681.3
	6	31.6	344.2	396.8	603.7	522.9	672.4	937.2	910.6	833.3	652.6
Mean		31.6	393.0	444.9	634.0	564.2	696.3	949.0	933.7	873.7	686.1
N4	2	31.5	-	-	-	-	-	783.4	755.8	768.4	769.2
	4	31.5	-	-	-	-	-	730.6	702.9	723.8	719.1
	6	31.5	-	-	-	-	-	697.0	662.6	702.0	687.2
Mean		31.5	-	-	-	-	-	737.0	707.1	731.4	725.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 23

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก :

1.0D

Primary Air :

85%

Date :

6 กุมภาพันธ์ 2545

อัตราส่วนสมมูล :

1.0

Secondary Air :

15%

Time :

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
N1	2	38.0	669.7	730.8	797.2	726.4	674.8	634.4	526.2	474.9	654.3
	4	38.4	670.1	731.8	807.6	757.2	701.6	657.3	541.6	487.8	669.4
	6	38.4	676.3	749.2	810.6	770.0	730.0	688.5	651.1	504.1	697.5
Mean		38.3	672.0	737.3	805.1	751.2	702.1	660.1	573.0	488.9	673.7
N2	2	38.8	666.6	810.5	720.2	734.1	746.3	719.5	596.8	538.4	691.6
	4	38.8	664.3	838.8	681.7	733.9	740.4	722.8	613.5	555.8	693.9
	6	38.8	669.7	855.5	649.1	768.6	742.8	728.6	629.8	572.4	702.1
Mean		38.8	666.9	834.9	683.7	745.5	743.2	723.6	613.4	555.5	695.8
N3	2	38.4	488.1	578.3	527.2	649.1	622.2	716.0	635.7	584.8	600.2
	4	38.4	434.2	499.1	485.8	592.3	585.8	709.1	623.3	577.1	563.3
	6	38.1	405.1	450.1	460.8	551.3	555.4	683.5	600.2	560.2	533.3
Mean		38.3	442.5	509.2	491.3	597.6	587.8	702.9	619.7	574.0	565.6
N4	2	38.3	-	-	-	-	-	645.0	548.6	510.6	568.1
	4	38.3	-	-	-	-	-	613.8	512.2	469.8	531.9
	6	38.6	-	-	-	-	-	594.8	493.2	444.1	510.7
Mean		38.4	-	-	-	-	-	617.9	518.0	474.8	536.9

การทดลองครั้งที่ 24

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก :

1.0D

Primary Air :

75%

Date :

6 กุมภาพันธ์ 2545

อัตราส่วนสมมูล :

1.0

Secondary Air :

25%

Time :

15:35

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
N1	2	38.9	679.5	527.9	651.3	886.4	775.5	755.9	683.5	636.2	699.5
	4	39.3	698.3	533.2	680.1	887.5	791.3	758.9	688.0	641.5	709.9
	6	38.9	711.4	533.0	704.7	881.4	803.1	766.7	690.8	644.0	716.9
Mean		39.0	696.4	531.4	678.7	885.1	790.0	760.5	687.4	640.6	708.8
N2	2	38.7	687.7	500.8	685.1	841.7	779.7	760.5	695.2	645.8	699.6
	4	38.5	659.7	477.7	668.0	828.3	770.1	772.7	705.3	651.4	691.7
	6	38.6	635.1	456.6	656.3	852.4	797.6	780.7	716.7	659.3	694.3
Mean		38.6	660.8	478.4	669.8	840.8	782.5	771.3	705.7	652.2	695.2
N3	2	38.9	479.0	398.2	546.6	707.9	687.4	740.3	710.6	664.0	616.8
	4	38.8	390.5	355.5	480.1	645.6	628.0	743.9	708.7	662.7	576.9
	6	37.2	360.5	337.5	455.6	633.3	613.8	750.2	712.8	666.3	566.3
Mean		38.3	410.0	363.7	494.1	662.3	643.1	744.8	710.7	664.3	586.6
N4	2	39.6	-	-	-	-	-	694.1	638.8	596.5	643.1
	4	39.1	-	-	-	-	-	662.3	615.3	554.6	610.7
	6	38.3	-	-	-	-	-	631.6	595.3	529.5	585.5
Mean		39.0	-	-	-	-	-	662.7	616.5	560.2	613.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 25

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 1.0D Primary Air : 100% Date : 6 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนผสม : 1.2 Secondary Air : 0% Time :

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
N1	2	29.6	622.3	669.8	756.5	797.4	778.4	714.6	604.2	547.2	686.3
	4	29.5	621.0	665.6	775.1	820.5	783.9	721.0	617.5	562.2	695.9
	6	29.5	618.6	643.8	795.9	805.3	768.4	713.1	619.8	570.1	691.9
Mean		29.5	620.6	659.7	775.8	807.7	776.9	716.2	613.8	559.8	691.3
N2	2	29.4	572.5	596.8	658.0	778.4	761.1	725.1	632.5	589.1	664.2
	4	29.4	530.0	551.1	758.4	808.1	769.2	750.9	654.8	608.5	678.9
	6	29.4	511.4	542.6	764.7	831.5	796.9	763.7	663.7	616.0	686.3
Mean		29.4	538.0	563.5	727.0	806.0	775.7	746.6	650.3	604.5	676.5
N3	2	28.5	393.2	436.5	598.2	664.5	665.8	773.4	670.7	632.6	604.4
	4	28.3	348.1	393.0	564.8	662.3	630.2	775.5	676.0	638.0	586.0
	6	28.3	323.0	364.5	542.7	608.8	613.9	785.3	684.9	642.7	570.7
Mean		28.4	354.8	398.0	568.6	645.2	636.6	778.1	677.2	637.8	587.0
N4	2	28.0	-	-	-	-	-	678.6	583.4	544.3	602.1
	4	28.0	-	-	-	-	-	646.6	549.0	505.4	567.0
	6	28.0	-	-	-	-	-	625.8	527.3	479.2	544.1
Mean		28.0	-	-	-	-	-	650.3	553.2	509.6	571.1

การทดลองครั้งที่ 26

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก : 1.0D Primary Air : 85% Date : 6 กุมภาพันธ์ 2545
อัตราส่วนผสม : 1.2 Secondary Air : 15% Time : 18:50

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
N1	2	31.7	604.3	748.5	892.9	939.2	1,084.3	1,110.9	1,061.4	947.5	923.6
	4	31.7	639.3	788.9	884.7	944.6	1,095.8	1,135.1	1,081.4	944.1	939.2
	6	31.7	690.9	852.6	883.5	956.6	1,105.7	1,175.0	1,102.3	937.0	963.0
Mean		31.7	644.8	796.7	887.0	946.8	1,095.3	1,140.3	1,081.7	942.9	941.9
N2	2	31.7	706.1	856.9	833.1	890.7	1,109.3	1,163.4	972.7	888.8	927.6
	4	31.7	698.7	822.5	799.0	878.8	1,119.6	1,131.0	914.9	862.4	903.4
	6	31.7	695.1	802.8	781.2	922.9	1,129.7	1,115.8	890.1	845.0	897.8
Mean		31.7	700.0	827.4	804.4	897.5	1,119.5	1,136.7	925.9	865.4	909.6
N3	2	31.9	512.1	596.0	617.0	677.2	819.3	1,021.5	826.6	802.2	734.0
	4	31.9	446.6	525.2	572.0	613.5	754.0	980.2	809.3	786.0	685.9
	6	31.4	409.1	480.0	540.6	569.3	698.5	948.1	794.5	770.4	651.3
Mean		31.7	455.9	533.7	576.5	620.0	757.3	983.3	810.1	786.2	690.4
N4	2	30.7	-	-	-	-	-	827.5	685.1	683.0	731.9
	4	30.7	-	-	-	-	-	770.7	622.8	625.0	672.8
	6	30.7	-	-	-	-	-	739.7	585.0	590.6	638.4
Mean		30.7	-	-	-	-	-	779.3	631.0	632.9	681.0

การทดลองครั้งที่ 27

ขนาดห้องเผาไหม้หลัก :

1.0D

Primary Air :

75%

Date : 6 กุมภาพันธ์ 2545

อัตราส่วนสมมูล :

1.2

Secondary Air :

25%

Time : 17:45

ระยะวัดอุณหภูมิ ตามแนวรัศมี	Time (min)	T0	Temperature (oC)								Mean
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
N1	2	33.2	449.3	680.4	733.0	809.7	819.9	786.1	712.9	681.6	709.1
	4	33.1	494.6	749.4	760.5	820.9	839.2	811.3	721.9	686.1	735.5
	6	33.0	542.2	811.8	799.7	835.9	861.5	834.1	738.5	697.3	765.1
Mean		33.1	495.4	747.2	764.4	822.2	840.2	810.5	724.4	688.3	736.6
N2	2	32.7	581.7	847.9	822.2	863.7	901.4	868.9	760.0	709.3	794.4
	4	32.7	583.8	825.2	832.8	894.4	911.4	889.8	769.7	715.9	802.9
	6	32.6	586.9	802.2	811.8	936.6	916.8	896.5	776.4	721.3	806.1
Mean		32.7	584.1	825.1	822.3	898.2	909.9	885.1	768.7	715.5	801.1
N3	2	32.7	460.5	594.8	659.2	720.4	737.8	931.5	819.0	740.8	708.0
	4	32.7	391.2	503.1	581.5	657.9	681.4	917.9	822.0	749.0	663.0
	6	32.6	352.0	446.0	529.2	613.5	665.0	918.1	821.4	751.9	637.1
Mean		32.7	401.2	514.6	590.0	663.9	694.7	922.5	820.8	747.2	669.4
N4	2	32.5	-	-	-	-	-	821.2	725.9	660.4	735.8
	4	32.4	-	-	-	-	-	766.7	671.6	603.5	680.6
	6	32.3	-	-	-	-	-	754.4	646.3	576.2	659.0
Mean		32.4	-	-	-	-	-	780.8	681.3	613.4	691.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้