

เตาเผาแกลบนฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน

VORTEXING FLUIDIZED-BED COMBUSTOR FOR BURNING RICE HUSK



โดย
นาย คณินท์ แสงเดือน
นาย สุธี เพชรเกอร์
นาย อมรชัย ต้นวัฒนเสรี

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 50145
วัน,เดือน,ปี 21 เม.ย. 2547

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมเครื่องกล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เตาเผาแกลบบลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน

VORTEXING FLUIDIZED-BED COMBUSTOR FOR BURNING RICE HUSK

ผู้จัดทำ

นาย คณินท์ แสงเดือน รหัสประจำตัว 43515953

นาย สุธี เพชรเกอร์ รหัสประจำตัว 43515977

นาย อมรชัย ตันวิวัฒนเสรี รหัสประจำตัว 43515984



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนสำหรับเผาแกลบ

นาย คณินท์	แสงเดือน	43515953
นาย สุทธิ	เพชรเกอร์	43515977
นาย อมรชัย	ตันวิวัฒนเสรี	43515984

รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาและออกแบบสร้างเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน รวมถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน ซึ่งภายในเตาจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนล่างจะเป็นการเผาไหม้แบบเผาฟลูอิดไดซ์เบดและส่วนบนจะเป็นการเผาไหม้แบบบอร์เทค โดยมีคอคอดคั่นอยู่ระหว่างสองส่วนนี้ ความสูงทั้งหมดของห้องเผาไหม้ เท่ากับ 1800 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตา เท่ากับ 300 มิลลิเมตร โดยการทดลองจะกำหนดค่าการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจะปรับให้มีค่าอัตราส่วนสมมูล (Φ) หรืออากาศส่วนเกินเท่ากับ 0.5(100%), 0.6(66.67%), 0.7(42.86%) และ 0.8(25%) สำหรับค่าอัตราการป้อนและที่อัตราส่วนสมมูลทำการกำหนดให้มีอัตราการไหลของอากาศทุกชนิดต่ออากาศทั้งหมด เท่ากับ 0, 0.15 และ 0.25 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่ $\Phi = 0.8$ และ $\lambda = 0$ อุณหภูมิภายในเตาจะมีค่าสูงสุด เท่ากับ 1130°C ที่ระยะ $X = 1.275$ เมตร แต่ช่วงการกระจายอุณหภูมิที่เหมาะสม จะอยู่ที่ $\Phi = 0.5$ ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานของเตาเผาชนิดนี้

Vortexing Fluidized-bed Combustor for Burning Rice Husk

Kanin	Sangduean	43515953
Sutee	Patchkoe	43515977
Amornchai	Tunvatanaseree	43515984

Assoc.Prof, Dr. Pongjet Promvong Advisor

ABSTRACT

The project concerns the study and design of a rice vortexing fluidized-bed combustor and rice husk combustion characteristics. The furnace has two combustion chambers as bottom chamber for fluidized-bed combustor and top chamber for vortex combustion. Throat is connected between the two combustor chambers. The combustor has a cylindrical shape with 300 mm. In diameter and 1800 mm. height. The feeding rate of rice husk is 0.3 kg/min and kept constant for all tests. Measurements are made by setting the equivalence ratio and excess air to be 0.5(100%), 0.6(66.67%), 0.7(42.68%) and 0.8(25%) with varying the ratio of volumetric flow rate of secondary to total air (λ) of 0, 0.15 and 0.25 at each run of the ratio to find the optimum of combustion state inside the chamber. From experiment, at $\Phi = 0.8$ and $\lambda = 0$, maximum temperature in combustor of 1130 °C at 1.275 m. is found but the optimum temperature distribution at $\Phi = 0.5$ is suitable for this furnace

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ขอขอบคุณกองทุนอนุรักษ์พลังงานที่ให้การสนับสนุนโครงการนี้ และขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำที่เป็นประโยชน์เกี่ยวข้องกับปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณที่ปรึกษาโท ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา รวมทั้งข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ลุงมณฑา เข็มเมือง ที่ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือต่าง ๆ ตลอดมา

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และเพื่อน ๆ กลุ่มเตาเผาที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ และให้กำลังใจในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้



นาย คณินท์ แสงเคื่อน
นาย สุทธิ เพชรเกอร์
นาย อมรรชัย ต้นวัฒนเสรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา	2
1.7 งานประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 ทฤษฎี	13
3.1 ประเภทของเชื้อเพลิง	13
3.1.1 เชื้อเพลิงก๊าซ	13
3.1.2 เชื้อเพลิงเหลว	13
3.1.3 เชื้อเพลิงแข็ง	13
3.2 การเผาไหม้	14
3.2.1 ปฏิกริยาเคมีของการเผาไหม้	14
3.2.2 ปัจจัยการเผาไหม้	14
3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	16
3.4 อุณหภูมิอะเดียแบติก	18
3.5 องค์ประกอบของอากาศ	19
3.6 อัตราส่วนสมมูล	20
3.7 ออร์ฟิส	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.8 ทฤษฎีฟลูอิดไดเซชัน	21
3.8.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน	21
3.8.2 ลักษณะฟลูอิดไดซ์เบด	22
3.8.3 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไดซ์เบด	24
3.8.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิดไดเซชัน	25
3.8.5 แผ่นกระจายของไหล	30
3.8.6 การหมุนวนของอากาศหุดิยุมิ	37
บทที่ 4 การดำเนินงานวิจัย	38
4.1 การคำนวณค่าต่าง ๆ ในการทดลอง	39
4.1.1 การคำนวณหาค่าปริมาณอากาศที่ต้องการใช้	39
4.1.2 การคำนวณอัตราส่วนผสม	42
4.1.3 การคำนวณอัตราการใช้	42
4.1.4 การคำนวณหาค่าความแตกต่างระดับน้ำในมานอมิเตอร์	43
4.2 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวัด	48
4.2.1 ห้องเผาไหม้	48
4.2.2 ห้องอุ่นเบด	49
4.2.3 ห้องเผาไหม้ระบบป้อนอากาศหุดิยุมิ	49
4.2.4 ฝาคอบเตา	50
4.2.5 แผ่นกระจายลม	50
4.2.6 ระบบป้อนอากาศปฐมภูมิ และอากาศหุดิยุมิ	51
4.2.7 ชุดป้อนอากาศปฐมภูมิ และอากาศหุดิยุมิที่ประกอบด้วยชุดออริฟิส	51
4.2.8 หัวเผา	52
4.2.9 เทอร์โมคัปเปิ้ล	52
4.2.10 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ	53
4.2.11 แผ่นออริฟิส	53
4.2.12 ระบบป้อนแก๊ส	54
4.2.13 มานอมิเตอร์	54
4.2.14 ถังก๊าซ	55
4.2.15 ไซโคลน	55
4.2.16 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย	56
4.3 ขั้นตอนการทดลอง	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดลองและการวิจารณ์	58
5.1 บทนำ	58
5.2 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล	58
5.3 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ห้องผสม	61
บทที่ 6 สรุป วิจารณ์และข้อเสนอแนะ	77
6.1 สรุป	77
6.2 วิจารณ์และข้อเสนอแนะ	78
บรรณานุกรม	79
ภาคผนวก	81
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแก๊ส	82
ภาคผนวก ข. แบบเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน	86
ภาคผนวก ค. ตารางบันทึกผลการทดลอง	92



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างค่าความพรุนของอนุภาคชนิดต่างๆ	28
ตารางที่ 4.1 สัดส่วนของข้าวเปลือก	39
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงรวม(แกลบ)	39
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองกับอัตราป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min	43
ตารางที่ 4.4 แสดงความสูงของระดับน้ำในमानอมิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิ และทุติยภูมิที่อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min	47



สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 2.1	ลักษณะของห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบคของ ศศิวิมล สูงสว่าง	4
รูปที่ 2.2	แสดงลักษณะเตาเผาและอุปกรณ์ในการทดลองของ อภิรัช เทอดเทียนวงษ์	6
รูปที่ 2.3	เตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรแบบใช้อากาศหมุนวนของ รัชชชัย ท้วถวิล และ สันติ วัชรอากาศไพบุลย์	7
รูปที่ 2.4	แสดงลักษณะของห้องเผาไหม้แบบจำลองของ สุพจน์ นำนำโชค	8
รูปที่ 2.5	แสดงลักษณะของห้องเผาไหม้จริงของ สุพจน์ นำนำโชค	8
รูปที่ 2.6	แสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ของเตาของ อติศักดิ์ ชูจินดา	9
รูปที่ 2.7	แสดงแผนผังและอุปกรณ์การทดลองของ นิวัต พิริยะรุ่งโรจน์	10
รูปที่ 2.8	แสดงแผนภูมิอุปกรณ์การทดลองของ Tim T. Fu and Sen Nich	11
รูปที่ 3.1	ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	17
รูปที่ 3.2	แสดงการไหลผ่านแผ่นออริฟิส	21
รูปที่ 3.3	แสดงระดับของเบคในหอทดลอง	22
รูปที่ 3.4	ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบค	24
รูปที่ 3.5	แสดงความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในชุดการทดลอง	26
รูปที่ 3.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบค	29
รูปที่ 3.7	ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรู	31
รูปที่ 3.8	ลักษณะของตัวกระจายแบบตะแกรง	32
รูปที่ 3.9	ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นอัด	32
รูปที่ 3.10	ลักษณะของตัวกระจายแบบแขนวิช	33
รูปที่ 3.11	ลักษณะของตัวกระจายแบบท่อ	33
รูปที่ 3.12	ลักษณะของตัวกระจายแบบมีหมวก	34
รูปที่ 3.13	ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นกรอง	34
รูปที่ 3.14	ลักษณะของตัวกระจายแบบผสม	34
รูปที่ 3.15	ลักษณะของตัวกระจายแผ่นเจาะรูหรือตะแกรงประยุกต์	35
รูปที่ 3.16	คุณภาพของฟลูอิดไดซ์เบคชั้นเกิดจากแผ่นกระจายของไหลต่างชนิดกัน	36
รูปที่ 3.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_{d,oc}$ กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_p)	37
รูปที่ 4.1	เตาเผาแลกเปลี่ยนฟลูอิดไดซ์เบคแบบอากาศหมุนวน	48
รูปที่ 4.2	ห้องเผาไหม้	48
รูปที่ 4.3	ห้องอุ่นเบค	49
รูปที่ 4.4	ห้องเผาไหม้ที่มีระบบป้อนอากาศทุติยภูมิ	49
รูปที่ 4.5	ฝาครอบ	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 แผ่นกระจายลม	50
รูปที่ 4.7 ระบบป้อนอากาศปฐมภูมิ และอากาศทุติยภูมิ	51
รูปที่ 4.8 จุดป้อนอากาศปฐมภูมิ และอากาศทุติยภูมิที่ประกอบด้วยชุดออริฟิส	51
รูปที่ 4.9 หัวเผา	52
รูปที่ 4.10 เทอร์โมคัปเปิ้ล Type K	52
รูปที่ 4.11 Digital indicator	53
รูปที่ 4.12 แผ่นออริฟิส	53
รูปที่ 4.13 เครื่องป้อนแกลบ	54
รูปที่ 4.14 มานอมิเตอร์	54
รูปที่ 4.15 ถังก๊าซ	55
รูปที่ 4.16 ไซโคลน	55
รูปที่ 4.17 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ ไอเสีย TESTO 342-1	56
รูปที่ 4.18 โคอะแกรมอุปกรณ์การทดลอง	57
รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 0.3 kg/min	59
รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 0.3 kg/min	60
รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซ CO กับ λ ที่อัตราส่วนสมมูล (Φ) ต่างๆ	61
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซ CO ₂ กับ λ ที่อัตราส่วนสมมูล (Φ) ต่างๆ	62
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซ O ₂ กับ λ ที่อัตราส่วนสมมูล (Φ) ต่างๆ	62
รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิห้องผสม (°C) กับอัตราส่วนสมมูล (Φ) ที่ค่า λ ต่างๆ	63
รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหลของอากาศกับ Δh Pressure drop ภายใน เตา	63
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.5 อากาศปฐมภูมิ 100 % และอากาศทุติยภูมิ 0 %	64
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.5 อากาศปฐมภูมิ 85 % และอากาศทุติยภูมิ 15 %	65
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.5 อากาศปฐมภูมิ 75 % และอากาศทุติยภูมิ 25 %	66
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.6 อากาศปฐมภูมิ 100 % และอากาศทุติยภูมิ 0 %	67
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.6 อากาศปฐมภูมิ 85 % และอากาศทุติยภูมิ 15 %	68
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.6 อากาศปฐมภูมิ 75 % และอากาศทุติยภูมิ 25 %	69
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.7 อากาศปฐมภูมิ 100 % และอากาศทุติยภูมิ 0 %	70
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.7 อากาศปฐมภูมิ 85 % และอากาศทุติยภูมิ 15 %	71
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.7 อากาศปฐมภูมิ 75 % และอากาศทุติยภูมิ 25 %	72
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 100 % และอากาศทุติยภูมิ 0 %	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 85 % และอากาศทุติยภูมิ 15 %	74
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 75 % และอากาศทุติยภูมิ 25 %	75
รูปที่ 5.20 ลักษณะซี่เต้าที่ได้จากการเผาไหม้ที่ อัตราส่วนสมมูล 0.5 อากาศปฐมภูมิ 100% อากาศทุติยภูมิ 0 %	76
รูปที่ 5.21 ลักษณะซี่เต้าที่ได้จากการเผาไหม้ที่ อัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 100% อากาศทุติยภูมิ 0 %	76



รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_o	พื้นที่หน้าตัดรูออริฟิส , (m ²)
A_p	พื้นที่หน้าตัดท่ออากาศปฐมภูมิ , (m ²)
A_s	พื้นที่หน้าตัดท่ออากาศทุติยภูมิ , (m ²)
A/F	อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง
$(A/F)_{actual}$	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางปฏิบัติ
$(A/F)_{stoic}$	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี
C_d	discharge coefficient
D_p	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศปฐมภูมิ , (m)
D_s	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศทุติยภูมิ , (m)
DW	น้ำหนักของแกลบแห้ง , (kg)
d_p	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของออริฟิสของท่ออากาศปฐมภูมิ , (m)
d_s	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของออริฟิสของท่ออากาศทุติยภูมิ , (m)
g	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก , (m/s ²)
MC_{wet}	ปริมาณความชื้นตามมาตรฐานเปียก , (%)
MW	มวลโมเลกุล , (kmol)
m_a	มวลของอากาศแห้ง , (kg)
m_g	ปริมาณไอน้ำในอากาศสูงสุดที่อุณหภูมิใด ๆ , (kg)
m_v	มวลของไอน้ำ , (kg)
\dot{m}_{air}	อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)
\dot{m}_{fuel}	อัตราการป้อนแกลบ , (kg/min)
n	จำนวนโมล
P	ความดันของอากาศชื้น , (Pa)
P_a	ความดันย่อยของอากาศแห้ง , (Pa)
P_g	ความดันของอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิใด ๆ , (Pa)
P_v	ความดันไอ , (Pa)
Q_{ac}	อัตราการไหลจริงเชิงปริมาตร , (m ³ /s)
R	รัศมีภายในของเตาเผาออร์เทค , (m)
R_a	ค่าคงที่ของอากาศ , (kJ/kg·K)
R_v	ค่าคงที่ของไอน้ำ , (kJ/kg·K)
r	พิกัดในแนวรัศมีภายในเตาเผาออร์เทค , (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T	อุณหภูมิ, ($^{\circ}C$)
T_{db}	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, ($^{\circ}C$)
T_{wb}	อุณหภูมิกระเปาะเปียก, ($^{\circ}C$)
V	ปริมาตร, (m^3)
WW	น้ำหนักของแกลบเปียก, (kg)
X	ความสูงของเตาเผาออร์เทคในแนวตั้ง, (m)
x	ระยะตำแหน่งความสูงของเตาเผาออร์เทคในแนวตั้ง, (m)
Φ	อัตราส่วนสมมูล
ϕ	ความชื้นสัมพัทธ์
ω	อัตราส่วนความชื้น, (kg/kg-dry air)
ρ_a	ความหนาแน่นของอากาศ, (kg/m^3)
ρ_g	ความหนาแน่นของอากาศอิมิต์ที่อุณหภูมิใด ๆ, (kg/m^3)
ρ_v	ความหนาแน่นของไอน้ำ, (kg/m^3)
ρ_w	ความหนาแน่นของน้ำ, (kg/m^3)
γ	น้ำหนักจำเพาะ, (N/m^3)
β	อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรูของออร์ฟิสต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
Δh	ความสูงของระดับน้ำในमानometer, (m)
λ	อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้พลังงานในปริมาณมากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งพลังงานที่ได้นั้นส่วนใหญ่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมันปิโตรเลียม ถ่านหิน ลิกไนต์ ซึ่งนับวันจะหมดลงไปเรื่อยๆ แต่อัตราการใช้เชื้อเพลิงเหล่านี้ก็เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆทุกปี เพราะฉะนั้นเราจะเห็นได้ว่าประเทศต่างๆ พยายามที่จะใช้เชื้อเพลิงอย่างอื่นมาทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้อยู่

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยก็ได้มีการหาเชื้อเพลิงมาทดแทนเชื้อเพลิงที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ทำให้ต้องสูญเสียเงินตรา และขาดดุลการค้ากับต่างประเทศมากขึ้นด้วย ดังนั้น ถ้าเรามีการนำเอาสิ่งที่มีอยู่มากมายภายในประเทศทั้งที่ได้จากเกษตรกรรมและสิ่งที่เหลือจากกิจกรรมในเมืองหลวงของประเทศ เช่น ขี้เลื่อย ฟาง แกลบ ขยะ ปากตะกอน ฯลฯ มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านพลังงานทดแทนการใช้น้ำมัน ก๊าซ หรือ ถ่านหินก็สามารถช่วยลดการนำเข้าได้ และยังสามารถลดปัญหามลพิษด้านสถานะแวดล้อมได้ด้วย

เนื่องจากประเทศไทยในอดีตจนถึงปัจจุบันประเทศไทยได้ขึ้นชื่อว่าเป็นประเทศเกษตรกรรม พื้นที่แทบทุกภาคของประเทศจะมีการทำนา วัสดุที่เหลือจากการเก็บเกี่ยว คือ ฟางข้าว และเมื่อมีการเก็บเกี่ยวแล้วต้องนำไปสี วัสดุที่เหลือจากโรงสี คือ แกลบ ซึ่งถ้าสีข้าว 1 ตัน จะได้แกลบออกมาถึง 220 กิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 22 สำหรับประเทศไทยมีการประเมินได้ว่าแต่ละปีจะมีแกลบประมาณ 4.4 ถึง 4.6 ล้านตัน โดยจะพบว่าปริมาณมาก และมีศักยภาพเชิงความร้อนเทียบเท่าการใช้ น้ำมันดิบ 1.46 ถึง 1.53 ล้านตัน เพราะฉะนั้น แกลบ จึงเป็นเชื้อเพลิงหนึ่งที่น่าสนใจ ค่าความร้อนของแกลบ (overall gross calorific value of rice husk) ประมาณ 2900 ถึง 4560 kcal/kg เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนกับน้ำมันเตา ที่มีค่าความร้อนประมาณ 9900 kcal/kg จะเห็นว่าค่าความร้อนของแกลบมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำมันเตาแต่ราคาถูกกว่ามาก

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ศึกษาการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบ อากาศหมุนวน
- 1.2.2 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน ได้แก่ อัตราส่วนสมมูล, ϕ และปริมาณอากาศหุดยุมิต่ออากาศทั้งหมด, λ
- 1.2.3 วิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 เป็นระบบที่ไม่เกิดการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อม (Adiabatic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.2 ควบคุมความปริมาตรความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบให้คงที่
- 1.3.3 ลักษณะของอากาศภายในห้องเผาไหม้มีลักษณะการไหลแบบผสมกันช่วงล่างของเตาจะเป็นแบบฟลูอิดไดซ์เบดส่วนช่วงบนจะเป็นแบบวอร์เทค

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนเป็นนำเตา2ชนิดมารวมกันจึงประกอบด้วย2 ทฤษฎี

- 1.4.1 ทฤษฎีการไหลวนเตาเผาวอร์เทคเป็นเตาที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยใช้เทคนิคของไหลแบบหมุนวน ความเร็วสูงช่วยในการเผาไหม้ และเพิ่มการผสมคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงและอากาศในห้องเผาไหม้เพื่อให้เกิดความปั่นป่วนอย่างรุนแรง
- 1.4.2 ทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เบด ฟลูอิดไดซ์เซชัน เป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคของของแข็งขนาดเล็กถูกทำให้อยู่ในสภาพลอยของไหล ด้วยการพุงโดยก๊าซ หรือของเหลวที่ไหลผ่านเบดของของแข็งขึ้นไปด้านบนด้วยอัตราการไหลค่าหนึ่ง โดยมีการถ่ายเทมวลสาร ความร้อนและปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น ในขณะที่มีการสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็ง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

- 1.5.1 ขนาดของเชื้อเพลิงแกลบขนาดปกติ 2.0 x 8.0 มม. โดยเชื้อเพลิงมีความชื้นประมาณ 11 %
- 1.5.2 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงแกลบอยู่ในช่วง 0.3 kg/min
- 1.5.3 ทำการปรับค่าอัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio) เท่ากับ 0.5,0.6,0.7และ0.8
- 1.5.4 ทำการศึกษาคุณลักษณะของการเผาไหม้ โดยกำหนดให้อัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศสุดท้ายต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0, 0.15 และ 0.25
- 1.5.5 ทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่จุดต่างๆภายในเตา
- 1.5.6 วิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.6.1 ทำการศึกษารวบรวมทฤษฎีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง และคุณสมบัติต่างๆของเชื้อเพลิงแกลบ
- 1.6.2 ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาในอดีต เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาทดลอง
- 1.6.3 ทำการทดลองหาค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ ภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน บันทึกผลการทดลอง
- 1.6.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.6.5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 สามารถนำวัสดุที่เหลือใช้จากการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านพลังงานความร้อน
- 1.7.2 สามารถนำความร้อนที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับภาคอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.7.3 ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ
- 1.7.4 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา และพัฒนาเทคโนโลยีให้มีประสิทธิภาพสูงสุด



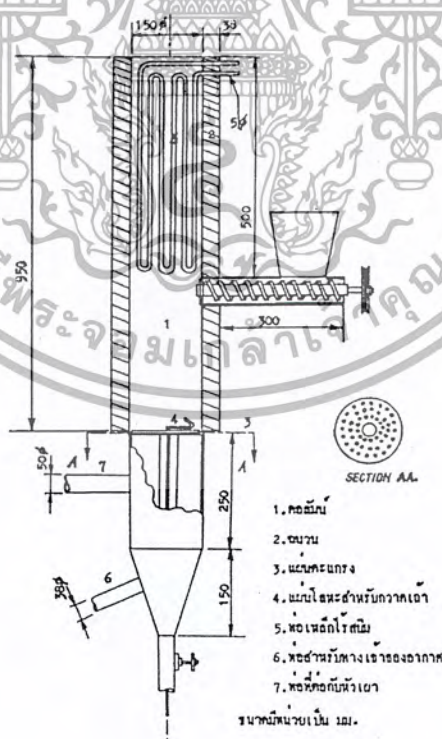
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในดำรงชีวิต และการพัฒนาประเทศทางด้านอุตสาหกรรม พลังงานสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆดังนี้ พลังงานความร้อน พลังงานกล พลังงานไฟฟ้า และพลังงานเคมี พลังงานทั้งสี่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงส่วนใหญ่เป็นเชื้อเพลิงที่ได้จาก น้ำมันปิโตรเลียม ถ่านหิน และลิกไนต์ เชื้อเพลิงดังกล่าวมีปริมาณน้อยลงทุกปี แต่มีราคาสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการหาแหล่งพลังงานอื่นๆมาทดแทนเช่น เชื้อเพลิงชีวมวลได้แก่ แกลบ ขี้เลื่อย และชานอ้อย ซึ่งเชื้อเพลิงดังกล่าวเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพต่ำ การนำมาใช้งานจำเป็นต้องมีการออกแบบระบบเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพสูง จึงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบการเผาไหม้ในลักษณะต่างๆทั้งในประเทศ และต่างประเทศ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศศิวิมล สูงสว่าง [1] ทำการศึกษาวิจัยการเผาไหม้แกลบในฟลูอิดไคซ์เบด โดยศึกษาคุณลักษณะของเชื้อเพลิงแกลบ และหลักการทำงานของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.1

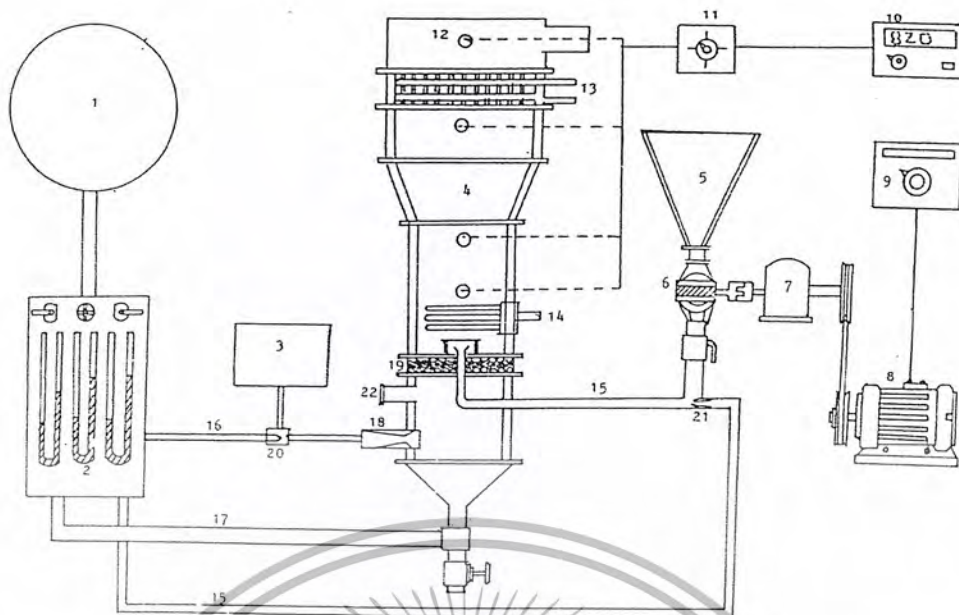


รูปที่ 2.1 ลักษณะของห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเผาไหม้ เช่น อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิของการเผาไหม้ เพื่อหาความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของความร้อนที่เกิดขึ้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด จากการทดลองทำการปรับค่าความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 20.62 ถึง 45.67 เมตรต่อวินาที และกำหนดอุณหภูมิของการเผาไหม้อยู่ในช่วง 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด เมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 3.05 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วของอากาศที่ใช้เท่ากับ 32.77 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิของการเผาไหม้เท่ากับ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ร้อยละ 96.91 นอกจากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบเชื้อเพลิงที่ได้จากการเผาไหม้ที่ใช้อยู่ก่อนหน้านี้กับเชื้อเพลิงแกลบจากการเผาไหม้ในฟลูอิดไคซ์เบด พบว่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้โดยฟลูอิดไคซ์เบดจะสูงกว่าประมาณร้อยละ 47 ถึง 53

อภิชัย เทอดเทียนวงษ์ [2] ศึกษาทดลองและออกแบบเตาเผาไหม้ชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ความเร็วของอากาศในการฟลูอิดไคซ์เบด ขนาดของทรายที่ใช้ทำเบดที่มีผลต่อการเผาไหม้ และศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างเบดกับท่อน้ำรับความร้อน การศึกษาทดลองได้ทำการออกแบบเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบต่อเนื่อง ดังแสดงดังรูปที่ 2.2 และเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบ 2 ชนิดคือ เชื้อเพลิงขี้เลื่อย และเชื้อเพลิงแกลบ จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และอุณหภูมิสูงสุดคือ 9:1 ถึง 10:1 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงที่เหมาะสมเท่ากับ 8.5:1 เทียบเป็นอากาศมากเกินพอประมาณ 50 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วของอากาศมีค่า 2 ถึง 4 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์เบด (ประมาณ 85 เซนติเมตรต่อวินาที) เนื่องจากอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มากกว่าจะให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่า และใช้อัตราส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ขนาดของทรายที่ใช้ทำเบดที่มีขนาดเล็กกว่า (ประมาณ 40 ถึง 50 เมช) เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อุณหภูมิสูงกว่า และอัตราส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงต่ำกว่า ทรายขนาดใหญ่กว่า (ประมาณ 30-40 เมช) ซึ่งช่วยลดการสูญเสียความร้อนไปกับก๊าซร้อนที่ออกจากเตาเผาได้ กรณีการถ่ายเทความร้อนของเตาฟลูอิดไคซ์เบดพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างเบดกับท่อน้ำรับความร้อน มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วของอากาศ และขนาดของทรายที่เล็กกว่าจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าทรายขนาดใหญ่ สำหรับท่อน้ำรับความร้อนในเบดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 190 ถึง 260 วัตต์ต่อเมตร² พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้ท่อน้ำที่อยู่ในเบดสูงกว่า การถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนกับท่อน้ำประมาณ 23 เท่า

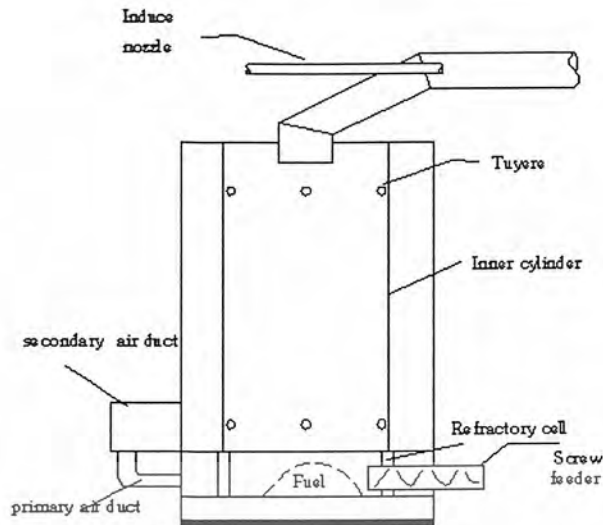


- 1. ระบบอัดอากาศ 2. เครื่องควบคุมความเร็วอากาศและน้ำ 3. ถังก๊าซ
- 4. ฟลูอิดไดซ์บดคอกอลมันน์ 5. ที่ใส่เชื้อเพลิงชีวมวล 6. ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบหมุนวน
- 7. เกียร์ทด 8. มอเตอร์
- 9. เครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์
- 10. เครื่องอ่านอุณหภูมิ 11. Selector switch 12. Thermocouple
- 13. ท่อนำรับความร้อนเหนือเบด 14. ท่อนำรับความร้อนในเบด 15. ท่ออากาศ
- 16. ท่ออากาศผสมแก๊สเชื้อเพลิง 17. ท่ออากาศสำหรับการฟลูอิดไดซ์เบด 18. หัวเผา
- 19. ตัวกระจายลม 20. ระบบผสมแก๊สเชื้อเพลิงกับอากาศ 21. หัวพ่นอากาศ 22. ช่องคูไฟ

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะเตาเผา และอุปกรณ์ในการทดลอง[2]

รัชชัย ทวีถวิล และ ลลิตา วัชรธนาไพบูลย์ [3] ทำการศึกษาทดลองเตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรแบบใช้อากาศหมุนวน ได้ทำการพัฒนาระบบการเผาไหม้เดิมให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยห้องเผาไหม้มีลักษณะดังรูปที่ 2.3 จากการทดลองทำการเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F ratio) ที่มีผลต่ออุณหภูมิของก๊าซร้อน และทำการศึกษาลักษณะอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านพัดลมดูดต่ออุณหภูมิของก๊าซร้อนที่อัตราส่วนของอากาศและเชื้อเพลิงคงที่ การทดลองให้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.225 กิโลกรัมต่อวินาที และกำหนดค่าอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงมีค่า 5:1, 6:1, 7:1, 8:1 และ 9:1 ท่ออากาศปฐมภูมิและท่ออากาศทุติยภูมิเปิดประมาณ 30 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ท่อตามลำดับ ช่องพัดลมดูดอากาศเปิดที่ 100 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนของอากาศต่ออัตราส่วนของเชื้อเพลิงเท่ากับ 6:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซร้อนสูงสุดเท่ากับ 595 องศาเซลเซียส และปริมาณความร้อนที่ได้รับอยู่ในปริมาณสูง และเมื่อทำการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงช่องเปิดของพัดลมดูดที่ 0, 20, 60, และ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่า 6:1 พบว่าอุณหภูมิสูงสุดของก๊าซร้อนเท่ากับ 639 องศาเซลเซียส โดยที่ไม่ใช้พัดลมดูดอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



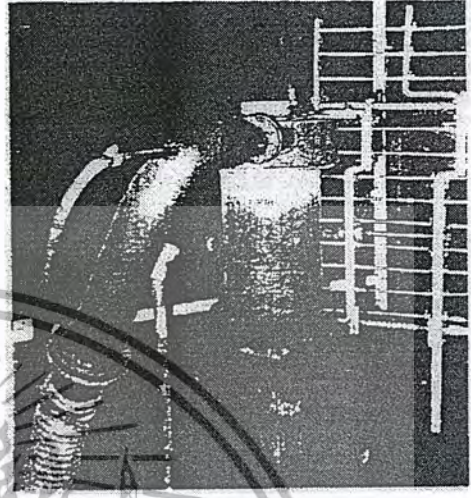
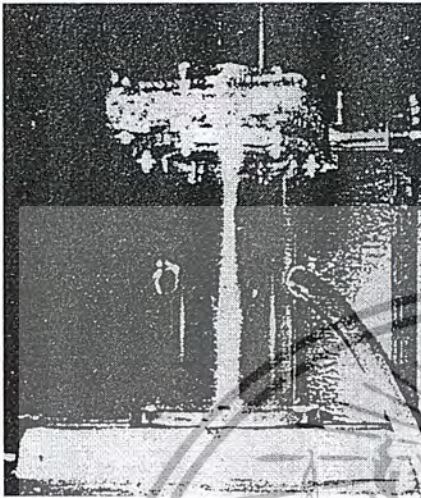
รูปที่ 2.3 เตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรแบบใช้อากาศหมุนวน[3]

สุพจน์ น้านาโชค [4] ได้ทำการศึกษาวิจัยการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้แบบไซโคลนชนิดอากาศเข้าหลายช่องทาง ศึกษาอิทธิพลของอากาศชุดิยภูมิต่อลักษณะการเผาไหม้ โดยทดลองใช้ห้องเผาไหม้แบบจำลอง เพื่อศึกษาลักษณะการไหลภายในของอนุภาคเชื้อเพลิงที่ละเอียด และห้องเผาไหม้จริงเพื่อศึกษาลักษณะของการเผาไหม้ภายใน ซึ่งองค์ประกอบของห้องเผาไหม้ทั้ง 2 มีลักษณะคล้ายคลึงกันคือ ทางเข้าของอากาศชุดิยภูมิอยู่บริเวณส่วนบนของห้องเผาไหม้ไซโคลน บริเวณกึ่งกลางของห้องเผาไหม้จะมีอากาศชุดิยภูมิป้อนเข้าทางด้านข้างในแนวสัมผัส และทางออกของก๊าซไอเสียอยู่บริเวณส่วนบนสุดของไซโคลน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5

การศึกษาลักษณะการไหลของอนุภาคเชื้อเพลิงพบว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราการไหลของอากาศชุดิยภูมิ และลดค่าอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิเพื่อให้ปริมาณอัตราการไหลของอากาศทั้งระบบมีปริมาณเท่าเดิม ทำให้ระยะพิทของเกลียวและความชันของเกลียวน้อยลง ส่งผลให้จำนวนเกลียวเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการเพิ่มอัตราส่วนของอากาศชุดิยภูมิ มีผลต่ออัตราการไหลเวียนของอนุภาคเชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ได้นานขึ้น จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดียิ่งขึ้น ส่วนการศึกษาลักษณะการเผาไหม้นั้น ทำการปรับค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิงในช่วง 0.128 ถึง 0.135 กิโลกรัมต่อนาที อัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วง 0.687 ถึง 1.010 กิโลกรัมต่อนาที และทำการคงที่ค่าอัตราการไหลของอากาศชุดิยภูมิเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการปรับค่า Φ ในช่วง 1.0 ถึง 1.5 พบว่าในส่วนของที่ทำการปรับค่า $\Phi = 1.5$ ทำให้เกิดการเผาไหม้ในบริเวณกว้างทั่วทั้งห้องเผาไหม้ ก๊าซไอเสียประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 885 ถึง 2120 ppm ปริมาณออกซิเจนอยู่ในช่วง 7.1 ถึง 14.2 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าที่ค่า Φ อื่นๆ การศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณอากาศชุดิยภูมิต่อลักษณะการเผาไหม้ โดยคงที่ค่า $\Phi = 1.5$ ทำการปรับค่าปริมาณอากาศชุดิยภูมิให้มีค่าเท่ากับ 5, 10, และ 15 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่ปริมาณอากาศชุดิยภูมิเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ การเผาไหม้เกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้างคือ เกิดการเผาไหม้บริเวณก้นของห้องเผาไหม้จนถึงปากทางออก องค์ประกอบของก๊าซไอเสียมีปริมาณคาร์บอน

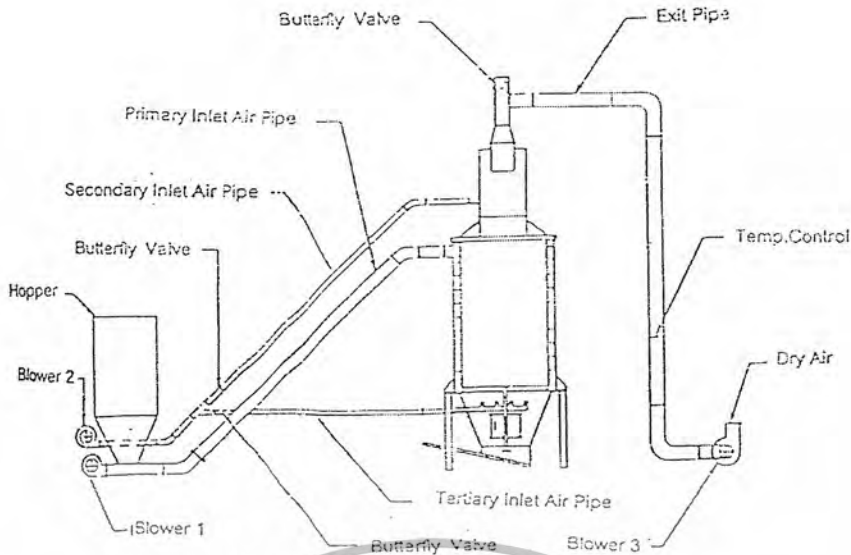
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอนนอกไซด์ต่ำอยู่ในช่วง 885 ถึง 2120 ppm ปริมาณออกซิเจนประมาณ 7.1 ถึง 14.2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปรับค่าอากาศหตุยภูมิมากขึ้นจะเกิดการเผาไหม้บริเวณกว้างภายในห้องเผาไหม้ เนื่องจากอากาศหตุยภูมิจะทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงไหลวนภายในห้องเผาไหม้ได้นานขึ้น จึงเป็นเหตุให้มีเวลาในการเผาไหม้นานขึ้นด้วย



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของห้องเผาไหม้แบบจำลอง รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของห้องเผาไหม้จริง[4]

อดิศักดิ์ ชูจินดา [5] ศึกษาและทำการออกแบบสร้างเตาเผาแลกเปลี่ยนสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิด ไคซ์ขนาด 10 ตันต่อชั่วโมง ลักษณะห้องเผาไหม้เป็นห้องเผาไหม้ทรงกระบอก ความสูง 2.75 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.37 เมตร ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.7 อัตราการป้อนแลกเปลี่ยนเท่ากับ 120 ถึง 150 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศ 1.11 กิโลกรัมต่อวินาที เชื้อเพลิงและอากาศถูกป้อนเข้าห้องเผาไหม้ในแนวสัมผัส เพื่อให้เชื้อเพลิงเกิดการไหลวนภายในห้องเผาไหม้ การทดลองปรับค่าความสูงของซีเมนต์แลกเปลี่ยน 30, 45, 50 และ 60 เซนติเมตร อุณหภูมิเฉลี่ยภายในประมาณ 293, 296, 296 และ 297 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ถ้าความสูงของซีเมนต์ต่ำกว่า 30 เซนติเมตร เกิดผลต่อการเผาไหม้คือแลกเปลี่ยนจะเข้ามารวมกันอยู่บนตะแกรง ทำให้อุณหภูมิแกว่งในช่วงล่าง แต่ถ้าความสูงของซีเมนต์สูงกว่า 60 เซนติเมตร มีผลต่อการเกิดไซโคลน จากการทดลองพบว่าความสูงของเบดที่เหมาะสมเท่ากับ 50 เซนติเมตร อัตราการป้อนแลกเปลี่ยน 126 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศร้อน 296 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบประมาณ 61 ถึง 63 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการเผาไหม้จากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในซีเมนต์เท่ากับ 85 ถึง 92 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณของคาร์บอนที่เผาไหม้จากการวิเคราะห์คาร์บอนในก๊าซเท่ากับ 94 เปอร์เซ็นต์



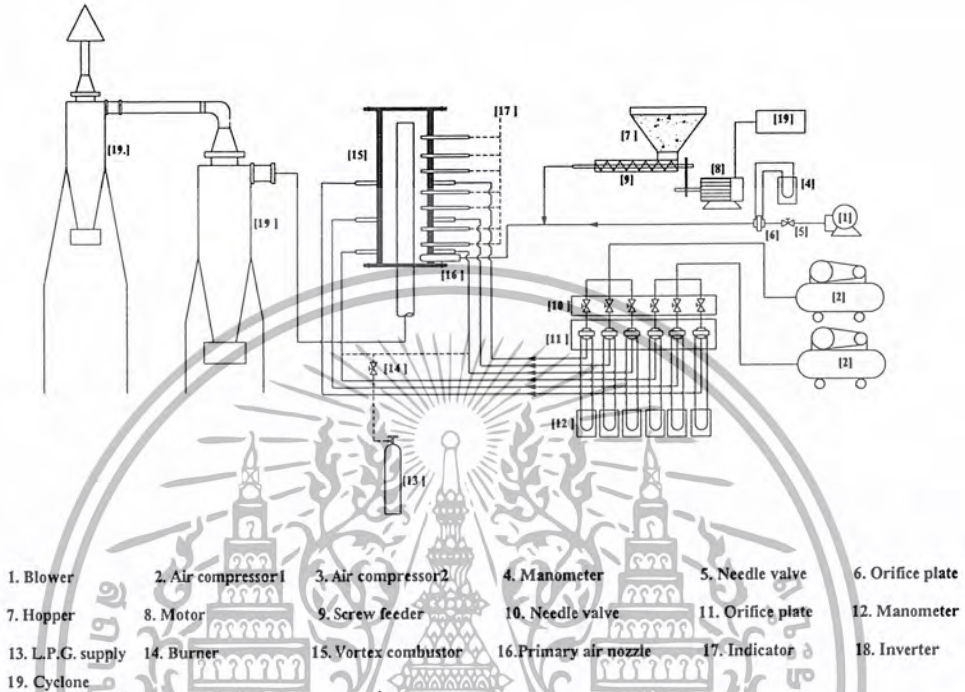
รูปที่ 2.6 แสดงองค์ประกอบต่างๆของเตา[5]

บุญเรือง ศรีสวัสดิ์ [6] ได้ศึกษาวิจัยปรับปรุงสมรรถนะของเตาเผาเคลือบสำหรับอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิโดซ์เบด ต่อเนื่องจากงานวิจัยของ อติศักดิ์ ชูจินดา โดยใช้ห้องเผาไหม้ในลักษณะเดิมและปรับปรุงในส่วนต่างๆดังนี้ ชุดกระจายลมด้านล่างเตาเผาเคลือบ (tertiary air) หุ้มฉนวนบริเวณส่วนบนห้องเผาไหม้ ปรับปรุงชุดใบปาดซีเมนต์เคลือบ เพิ่มความแข็งแรงของตัวรองรับตะแกรง ประตูทางเข้าห้องเผาไหม้ ระบบควบคุมต่างๆ ระบบส่งกำลังของใบปาดซีเมนต์ และปรับปรุงชุดป้อนเชื้อเพลิงเคลือบ อัตราการป้อนเคลือบ 110 ถึง 136 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เชื้อเพลิงและอากาศถูกป้อนเข้าห้องเผาไหม้ในแนวสัมผัสทำให้เกิดการไหลวนภายในห้องเผาไหม้ จากการทดลองพบว่าที่ความสูงของตะแกรง 30, 45, 50 และ 60 เซนติเมตร อากาศส่วนเกิน 260 ถึง 350 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิเฉลี่ยก่อนออกจากระบบห้องเผาไหม้อยู่ในช่วง 295 ถึง 311 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทั้งระบบ 57 ถึง 73 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน 89 ถึง 96 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองความสูงของซีเมนต์ในตะแกรงที่เหมาะสมเท่ากับ 50 เซนติเมตร โดยมีอัตราการป้อนเคลือบ 110 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอากาศส่วนเกิน 350 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนทั้งระบบ 73 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน 69 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นตามปริมาณอากาศส่วนเกิน และความสูงของซีเมนต์บนตะแกรงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ

นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ [7] ได้ทำการศึกษาทดลองเตาเผาเวอร์เทค ทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเคลือบในเตาเผาแบบเวอร์เทค โดยทำการวัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ตำแหน่งต่างๆ และก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ในการทดลองปรับค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิงคงที่เท่ากับ 0.2 กิโลกรัมต่ออนาที ค่า Equivalence ratio, (Φ) เท่ากับ 0.7, 0.8, 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ การเผาไหม้กำหนดค่าอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศชุดิยภูมิต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมด,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(λ) เท่ากับ 0, 0.2 และ 0.4 ลักษณะของเตาเผาและอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.7 จากการทดลองพบว่า ที่ค่า $\Phi = 1.0$ มีการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาสูงกว่าการกระจายอุณหภูมิที่ค่า Φ อื่นๆ และผลของอัตราส่วนของอากาศหตุยภูมิต่ออัตราการใช้ของอากาศทั้งหมดที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้เท่ากับ $\lambda = 0.4$ เนื่องจากการเพิ่มอากาศหตุยภูมิจะช่วยเพิ่ม



รูปที่ 2.7 แสดงแผนผังและอุปกรณ์การทดลอง[7]

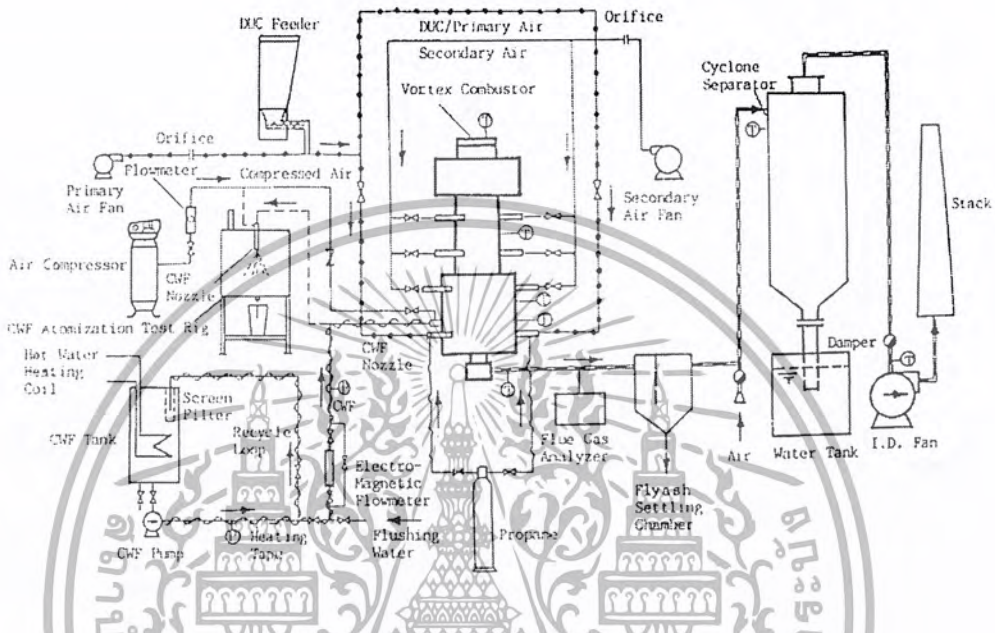
การใช้ของอากาศ ทำให้เชื้อเพลิงมีเวลาอยู่ในเตาเผาขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ประมาณ 1135 °C และการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำประกอบด้วย ออกซิเจนประมาณ 4.41 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 15.34 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 130.25 ppm และปริมาณของ ไนโตรเจนไดออกไซด์ ประมาณ 764 ppm

Tim T. Fu and Sen Nieh [8] ทำการศึกษาทดลองเตาเผาออร์เทค รายละเอียดของอุปกรณ์และลักษณะของเตาเผาดังแสดงในรูปที่ 2.8 ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ซึ่งถ่านหินที่นำมาทดสอบมี 2 ชนิดคือ DUC (Dry Ultrafine Coal) เป็นเชื้อเพลิงถ่านหินที่นำมาบดให้เป็นผงเหมือนกับแป้งมีขนาดเท่ากับ 11.5 μm และ CWF (Coal Water Fuel) เป็นเชื้อเพลิงถ่านหินที่มีน้ำปนอยู่มีลักษณะคล้ายกับโคลน การทดสอบทำการวัดอุณหภูมิภายในและวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น

จากการทดลองพบว่า การเผาไหม้มีอัตราความร้อนเท่ากับ 0.15 MB/H (0.15 x 10⁶ Btu/hr) และอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้บริเวณส่วนล่างของห้องเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 2000 °F อุณหภูมิจะลดลงเมื่อความสูงของห้องเผาไหม้สูงขึ้นบริเวณส่วนบนสุดของห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิเท่ากับ 1100 °F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และบริเวณทางออกของท่อไอเสียอุณหภูมิเท่ากับ $1650^{\circ}F$ จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ประกอบด้วย O_2 , CO_2 , CO , NO_x , SO_x และคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ ปริมาณของ O_2 จะลดลงตามความสูงของห้องเผาไหม้ เนื่องจาก O_2 ถูกนำไปใช้เพื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ปริมาณก๊าซ CO บริเวณส่วนล่างของห้องเผาไหม้เท่ากับ 550 ppm และบริเวณท่อทางออกของก๊าซไอเสียมีปริมาณ CO เท่ากับ 250 ppm



รูปที่ 2.8 แสดงแผนภูมิอุปกรณ์การทดลอง[8]

อิทธิพลของอากาศชุดิกภูมิต่อการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิง DUC พบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ในกรณีที่ไม่ใช้อากาศชุดิกภูมิเท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์ และกรณีที่ใช้อากาศชุดิกภูมิประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเท่ากับ 98.5 เปอร์เซ็นต์ เพราะเนื่องจากอากาศชุดิกภูมิทำให้เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันได้ดีขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้น และปริมาณ NO_x ต่ำกว่า 50 ppm ปริมาณคาร์บอนในขี้เถ้าลดลงถึง 4 เปอร์เซ็นต์

งานวิจัยของ สมศักดิ์ โพร้ถวิลเกียรติ[9] นำเสนอการศึกษาทดลองถึงพฤติกรรมของการเผาไหม้ของขนาดเชื้อเพลิงเกลบในเตาเผาเกลบในเตาเผาแบบวอร์เทคและการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งขนาดเชื้อเพลิงเกลบที่ใช้ในการทดลองมีสองขนาดอยู่ในช่วง 0.84-1.00 และ 1.19-1.41 มม. การทดลองปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเกลบเท่ากับ 0.3 kg/min สำหรับแต่ละขนาดของเชื้อเพลิงเกลบ ส่วนค่าอัตราส่วนสมมูล (Φ) เท่ากับ 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 และ 1.2 อัตราส่วนการไหลอากาศชุดิกภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) เท่ากับ 0.2, 0.3 และ 0.4 ซึ่งลักษณะเตาเผาเวอร์ทคเป็นท่อรูปทรงกระบอก 2 ชั้น ผนังห้องเผาไหม้ชั้นนอกประกอบด้วยเหล็ก และผนังห้องเผาไหม้ด้านในทำจากอิฐทนไฟ โดยทำการวัดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายอุณหภูมิภายในเตาทั้งสิ้น 7 ตำแหน่งตามแนวแกน ที่ตำแหน่ง $x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ และ 0.7 เมตร และ 5 ตำแหน่งตามแนวรัศมีที่ $r = 0.055, 0.065, 0.075, 0.085$ และ 0.095 เมตร

จากการทดลองพบว่า อิทธิพลของค่าอัตราส่วนสมมูล ในช่วง $0.9-1.0$ ให้ลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอทั่วทั้งเตาเผาในแนวรัศมี อุณหภูมิภายในเตาเผาที่มีค่าสูงสุดประมาณ 1000°C สำหรับอิทธิพลของปริมาณอัตราการไหลของอากาศทุกชนิดต่ออากาศทั้งหมดที่ค่า $\lambda = 0.3$ จะให้อุณหภูมิภายในเตาเผาสูงสุด แต่ในช่วง $\Phi \leq 1$ จะไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา ในส่วนอิทธิพลของขนาดเชื้อเพลิงแกลบ เมื่อนำลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผามาเปรียบเทียบกัน พบว่าช่วง Φ เท่ากับ $0.9-1.0$ ขนาดของเชื้อเพลิงแกลบ $0.84-1.00$ และ $1.19-1.41$ มม. จะมีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเตาเผาที่ขนาดของเชื้อเพลิงแกลบ $0.84-1.00$ มม. มีอุณหภูมิสูงกว่าที่ขนาดเชื้อเพลิงแกลบ $1.19-1.41$ มม. เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ค่าเชื้อเพลิงแกลบขนาด $0.84-1.00$ มม. จะสิ้นเปลืองในการเตรียมเชื้อเพลิงสูง ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงความสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการลดขนาดของเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็กลง

งานวิจัยของ สุภชัย เลื่อนลอย[10] ได้ทำการศึกษาของคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบที่มีความชื้นภายในเตาเผาแบบวอร์เทค ระดับความชื้นของแกลบจำนวน 3 ค่า ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 9.2%, 12% และ 15% โดยน้ำหนัก การทดลองทำการกำหนดค่าอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.3 kg/min โดยตลอด อัตราการไหลโดยมวลของอากาศจะปรับให้มีค่าอัตราส่วนสมมูล (Φ) เท่ากับ 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 และ 1.2 สำหรับแต่ละอัตราการไหล ที่แต่ละอัตราส่วนสมมูลจะกำหนดสัดส่วนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออากาศทั้งหมด (อากาศปฐมภูมิ+อากาศทุติยภูมิ), (λ) เท่ากับ 0.2, 0.3 และ 0.4 เพื่อตรวจสอบอิทธิพลจากค่า λ ในการทดลองนี้เราจะทำการทดลองกับเชื้อเพลิงแกลบละเอียดซึ่งมีขนาดเท่ากับ $0.84-1.00$ มม.

ซึ่งการทดลองสามารถสรุปผลได้ว่าการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบวอร์เทค ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $0.9-1.0$ ให้การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและมีค่าสูง สำหรับค่าปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงแกลบที่ 9.2 % จะให้การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่มีค่าสูงสุดประมาณ 1000°C และหากความชื้นเชื้อเพลิงแกลบสูงเกินกว่า 15% จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่ต่อเนื่องเพราะจะทำให้เกิดการดับซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ต่ำกว่าจุดติดไฟได้เองของเชื้อเพลิงแกลบ ส่วนผลของอากาศทุติยภูมิที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่ λ เท่ากับ 0.3 จะให้การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและมีค่าสูงที่สุด แต่ผลของอากาศทุติยภูมินี้จะไม่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เมื่ออัตราส่วนสมมูล < 1.0 แต่จะมีผลในการช่วยลดขนาดของชี้ถ่านลอยที่ออกจากห้องเผาไหม้ ดังนั้นในการนำเชื้อเพลิงแกลบที่มีความชื้นมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเราจะต้องทำการลดปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในแกลบให้มีค่าที่ต่ำ เพื่อลดปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปในการไล่ความชื้นและจะทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาเพิ่มขึ้น

บทที่ 3

ทฤษฎี

เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถให้พลังงานออกมาเมื่อเกิดขบวนการเผาไหม้ โดยพื้นฐานของเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทคือ เชื้อเพลิงที่ได้จากการทับถมของซากพืชซากสัตว์เช่น น้ำมันปิโตรเลียม ถ่านหิน และเชื้อเพลิงอีกประเภทหนึ่งคือ เชื้อเพลิงชีวมวล ได้แก่ แกลบ ไม้ และขานอ้อย ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน ดังนั้นการเลือกใช้เชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

3.1 ประเภทของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงคือ สารซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้กับอากาศ หรือออกซิเจน แล้วให้พลังงานความร้อนออกมาในปริมาณสูงซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเกิดการเผาไหม้อยู่ในระดับที่สามารถควบคุมได้ โดยเชื้อเพลิงเป็นสารประกอบจำพวก ไฮโดรคาร์บอน หรือสารประกอบที่มีคาร์บอน และไฮโดรเจนอยู่เป็นส่วนใหญ่ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ เชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงก๊าซ

3.1.1 เชื้อเพลิงก๊าซ (Gaseous Fuels)

หมายถึง เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิห้อง เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซหุงต้ม (LPG) ก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวมวล เป็นต้น เป็นเชื้อเพลิงที่นิยมใช้ในครัวเรือน ยานพาหนะ และอุตสาหกรรม

3.1.2 เชื้อเพลิงเหลว (Liquid Fuels)

หมายถึง เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง เช่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ได้แก่ น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา (fuel oil) เป็นต้น ตลอดจนแอลกอฮอล์ซึ่งได้จากกรรมวิธีการผลิตจากพืชผลทางการเกษตร เชื้อเพลิงเหลวเป็นเชื้อเพลิงที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมต่างๆ และยานพาหนะ เพราะสะดวกในการใช้และให้ค่าความร้อนสูง

3.1.3 เชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuels)

หมายถึง เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เช่น ไม้ ฟืน ถ่านไม้ แกลบ หินน้ำมัน ถ่านหิน ลิกไนต์ ถ่านโค้ก เชื้อเพลิงอัดแท่ง (fuel briquettes) เป็นต้น เป็นเชื้อเพลิงที่สามารถใช้ประโยชน์ได้แพร่หลาย เช่น เป็นเชื้อเพลิงของหม้อน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมโรงจักรกังหันไอน้ำ ตลอดจนเป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน

เชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่ว ๆ ไป จะเป็นเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง มีปริมาณความชื้นสูงและ ความหนาแน่นน้อย องค์ประกอบของเชื้อเพลิงจะแตกต่างกันตามประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล และการที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณความชื้นและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าแตกต่างกันด้วย ดังนี้

แกลบ	มีคุณค่าทางความร้อนเท่ากับ	3,300	Kcal/kg
ขี้เลื่อย	มีคุณค่าทางความร้อนเท่ากับ	4,000	Kcal/kg
ซานอ้อย	มีคุณค่าทางความร้อนเท่ากับ	1,900	Kcal/kg
ขยะ	มีคุณค่าทางความร้อนเท่ากับ	2,000	Kcal/kg

ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลที่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน ส่วนมากจะเป็น ขี้เลื่อยและแกลบข้าว เพราะให้ค่าความร้อนสูงและความชื้นต่ำ

3.2 การเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (combustion reaction) หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ (combustible element) ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง ๆ สารเผาไหม้ได้ในที่นี้มีธาตุหลัก 3 ตัว คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถัน สำหรับกำมะถันขณะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะให้ความร้อนไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ในทางตรงกันข้ามกลับเพิ่มปัญหาในด้านการกัดกร่อนชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ รวมทั้งทำให้เกิดปัญหามลพิษในอากาศ

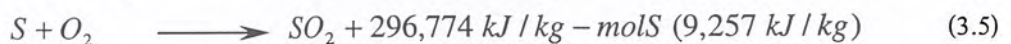
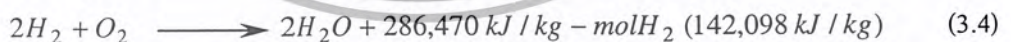
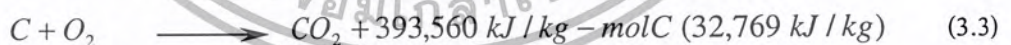
3.2.1 ปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้

สารประกอบส่วนใหญ่ในเชื้อเพลิงประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และสารประกอบอื่นๆ ปนอยู่บ้างเช่น กำมะถัน เมื่อเกิดการเผาไหม้จะได้ปฏิกิริยาเคมีดังสมการ

สำหรับการเผาไหม้ของคาร์บอนกับออกซิเจน



สามารถเขียนสมการการเผาไหม้รวมได้เป็น



ซึ่งจะพบว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยปลดปล่อยความร้อนออกมาด้วยหลังจากเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบใหม่

3.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้

ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ที่สำคัญมี 4 ประการ คือ Turbulent (การปั่นป่วนหรือการผสมคลุกเคล้า), Temperature (อุณหภูมิ), Theoretical Air (ปริมาณอากาศที่ต้องการ) และ Time (เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.1 การปั่นป่วนหรือการผสมคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ

การผสมหรือการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน คือการที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซในการผสมจะเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าเป็นเชื้อเพลิงแข็งหรือของเหลวการผสมจะยุ่งยากขึ้น ในกรณีที่เชื้อเพลิงส่วนใหญ่เป็นของเหลวจะมีการทำให้เป็นอนุภาคเล็ก โดยใช้หัวพ่นแล้วจึงทำการเผาไหม้ ซึ่งจะช่วยให้รวมตัวกับอากาศได้ง่ายขึ้น

ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้น แต่ละโมเลกุลของออกซิเจนจะสัมผัสกับผิวของเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จากนั้นออกซิเจนจะเข้าผสมกับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด ดังนั้นจะกล่าวได้ว่าจุดประสงค์ของการทำให้เกิดการปั่นป่วนขึ้นก็เพื่อที่จะทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดบริเวณของพื้นผิวที่จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นใหม่

3.2.2.2 อุณหภูมิที่สูงพอต่อขบวนการเผาไหม้

ขบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหรืออัตรารวมตัวกันทางเคมีของเชื้อเพลิงกับอากาศนั้นขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นในครั้งแรกๆ และเกิดต่อไปเรื่อย ๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้มากขึ้นทำให้อัตราการเผาไหม้มากขึ้นด้วยฉะนั้นสิ่งที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้แบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Combustion) จะประกอบด้วย

1. อุณหภูมิสูงพอสำหรับขบวนการเผาไหม้
2. สารเชื้อเพลิง
3. อากาศที่เพียงพอ

ขบวนการเผาไหม้นั้น ไม่ได้เป็นขบวนการที่เกิดขึ้นได้เอง โดยส่วนใหญ่จะใช้ปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมามากขึ้น นอกจากนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับการเผาไหม้แบบต่อเนื่องก็คือ อุณหภูมิ ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็ทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถลุกไหม้แบบต่อเนื่องได้ แต่ถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงพอเพียง การลุกไหม้ก็จะเกิดต่อไปได้เรื่อย ๆ โดยปกติแล้วการเผาไหม้นั้นต้องการให้มีอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้เร็ว แต่การที่จะให้อุณหภูมิจะสูงได้มากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ ซึ่งจะสามารถให้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ในกรณีที่อุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นสารที่ไม่ต้องการได้ เช่น สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน หรือ เกิดเถ้าหลอมรวมตัวเป็นซีโลส (slag) ก็จะเกาะติดอยู่บนผนังเหล็ก ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดการกัดกร่อนได้

3.2.2.3 อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับปริมาณอากาศ

อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับปริมาณอากาศที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้ เพื่อให้ได้ผลอย่างสมบูรณ์นั้น จะต้องมีสัดส่วนที่พอดีกันระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงกับปริมาณออกซิเจน ตามสมการเผาไหม้ ปริมาณของอากาศตามทฤษฎี (Theoretical air) คือปริมาณน้อยที่สุดของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์ จนคาร์บอน, ไฮโดรเจน และกำมะถันเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, น้ำ และ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามลำดับ ในทางปฏิบัติจริงของอากาศที่ต้องการตามทฤษฎีไม่พอที่จะทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ การสันดาปที่ไม่สมบูรณ์คือ การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไอเสีย

3.2.2.4 เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง

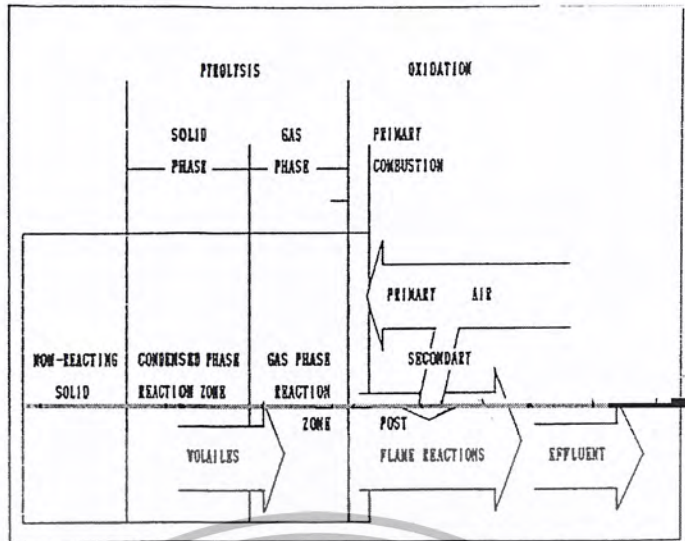
เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง คือเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาควรมานพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้มากที่สุด แต่การเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์เป็นไปได้ยากเพราะต้องใช้เวลานาน และเสียค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องใช้เตาเผาที่มีความสูงมาก ๆ ดังนั้นจึงนำเทคนิคการหมุนวนความเร็วสูงของเตาเผาออร์ตมาเพื่อช่วยให้เกิดการไหลหมุนวน (Recirculating Flow) ของเชื้อเพลิงกับอากาศ ขณะเกิดการเผาไหม้ภายใน ทำให้เวลาในการเผาไหม้นานขึ้น

3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งที่ใช้อยู่ทั่ว ๆ ไปมีหลายชนิด เช่น ไม้ วัสดุชีวมวล เป็นต้น ขบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะมีความแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลว และก๊าซเชื้อเพลิง เนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งมักเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่าง ๆ มากมายและผสมกันอยู่อย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกันนัก อีกทั้งอัตราส่วนของสารต่าง ๆ ภายในเชื้อเพลิงแข็งยังไม่แน่นอน นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งยังขึ้นอยู่กับขนาดของเชื้อเพลิงแข็งด้วย เชื้อเพลิงแข็งประกอบด้วยสารต่าง ๆ ซึ่งมีทั้งสามารถเผาไหม้ได้และไม่สามารถเผาไหม้ได้ ส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้เรียกว่า สารเฉื่อย (Inert) สารเฉื่อยนี้สามารถเปรียบเทียบได้กับ ก๊าซไนโตรเจนในอากาศ ซึ่งไม่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้ แต่ในบางครั้งสารเฉื่อยเหล่านี้ ก็อาจเกิดปฏิกิริยาได้ในบางขบวนการของการเผาไหม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขบวนการที่มีอุณหภูมิสูง ๆ สารเฉื่อยที่ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ความชื้น และสารอนินทรีย์ที่ประกอบเป็นขี้เถ้า ซึ่งสารเหล่านี้ส่วนมากเป็นสารจำพวก ซิลิเกต (Silicates) ซัลไฟด์ (Sulfides) เป็นต้น เมื่อเผาไหม้สารเหล่านี้จะกลายเป็นขี้เถ้า บางส่วนจะตกอยู่ภายในห้องเผาไหม้ บางส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะปลิวออกไปกับก๊าซไอเสีย เรียกว่า เถ้าปลิว (Fly Ash)

เชื้อเพลิงแข็ง เป็นวัสดุที่มีส่วนผสมเป็นสารประกอบที่รวมตัวกับออกซิเจน อาจเกิดปฏิกิริยาและไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้รวมกัน สารประกอบที่เกิดการเผาไหม้แบ่งออกได้ 2 ชนิด ชนิดที่เป็นสารระเหย (Volatile matter) ในที่นี้จะหมายถึง สารประกอบที่ระเหยในช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้ เช่น ไฮโดรเจน ไฮโดรคาร์บอน ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ และชนิดที่ไม่เป็นสารระเหย (Nonvolatile) หรือ เป็นสารที่น้ำหนักโมเลกุลสูงนั่นเอง เช่น คาร์บอน โพลีเมอร์ลิก (Polymeric)

ในขบวนการไพโรไลซิส สารที่ระเหยได้ในเชื้อเพลิงจะระเหยออกจากผิวอนุภาคของเชื้อเพลิงและผสมกับอากาศรอบๆ เกิดการเผาไหม้ขึ้น ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า การเผาไหม้ช่วงแรก (Primary Combustion) หลังจากเผาไหม้แล้ว ยังมีบางส่วนที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เมื่อมาพบกับอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) จะเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ต่อไปและออกมาเป็นก๊าซไอเสียในที่สุด ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

ในส่วนของสารที่ไม่ระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง เช่น คาร์บอนเมื่อเกิดขบวนการเผาไหม้ ออกซิเจนจะเข้าไปสัมผัสกับผิวคาร์บอนตามขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนดังนี้



หลังจากที่เกิดปฏิกิริยาทั้ง 3 สมการจะให้ผลิตภัณฑ์ไพโรซีต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องทำปฏิกิริยาต่อไปอีก มีสองสถานะ คือ ก๊าซ และของแข็ง สำหรับก๊าซประกอบด้วย CO, CO₂, H₂, O₂, H₂O และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกเล็กน้อยที่ปล่อยออกมารอบๆ อนุภาคเชื้อเพลิง เมื่อปฏิกิริยาสารระเหยต่อพื้นที่ผิว (Surface Flux of Volatile) ของอนุภาคน้อย ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซดังกล่าว เกิดการเผาไหม้แบบผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันของก๊าซแต่ละชนิด ในทางตรงกันข้าม ถ้าปริมาณของสารระเหยต่อพื้นที่ผิวมาก จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซ เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาหรือเกิดน้อย ฉะนั้นจึงต้องใช้เวลาเพื่อให้ปริมาณของสารระเหยเจือจางลงจึงจะเกิดปฏิกิริยา ในส่วนที่เป็นของแข็งจำพวกถ่าน จะไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเวลานั้น เนื่องจากก๊าซที่เกิดในกระบวนการไพโรซีตจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิยังต่ำพอที่จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้แต่หลังจากก๊าซต่างๆ เกิดปฏิกิริยาจะถ่ายเทความร้อนให้กับคาร์บอนทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดที่เกิดปฏิกิริยา และมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อัตราการเกิดปฏิกิริยาของการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับของเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงแข็งนี้จะได้รับการถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสีมากที่สุด

ในส่วนของสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เช่น ความชื้น ซึ่งจะระเหยออกไปในขณะที่เกิดการเผาไหม้ และออกไปกับก๊าซไอเสีย ความชื้นเหล่านี้จะทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ลดลงเพราะจะต้องสูญเสียความร้อน เพื่อทำให้ความชื้นระเหยตัว และมีอุณหภูมิสูงเท่ากับอุณหภูมิการเผาไหม้ และสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้จำพวก สารอนินทรีย์ต่างๆ จะเกิดเป็นขี้เถ้า ถ้าอุณหภูมิสูงมากๆ สารเหล่านี้จะละลายกลายเป็นสแลก (Slag)

3.4 อุณหภูมิอะเดียแบติก (Adiabatic Flame Temperature)

ในกรณีไม่มีงานเกี่ยวข้องและไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์หรือพลังงานศักย์ พลังงานเคมีที่ปล่อยออกมาในระหว่างการเผาไหม้นั้นอาจสูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อม ในรูปของพลังงานความร้อนหรืออาจถูกใช้ไปในการเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ถ้าการสูญเสียความร้อนมีค่าน้อยอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก็จะสูง ค่าจำกัดของมันคือเมื่อไม่มีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม ($Q=0$) และ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก็จะมีค่าสูงที่สุด ซึ่งเราเรียกอุณหภูมินี้ว่าอุณหภูมิเปลวอะเดียแบติก (adiabatic flame Temperature)

อุณหภูมิดังกล่าวนี้หาได้จากทำให้ Q และ W มีค่าเท่ากับศูนย์ในกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งจะได้ว่า

$$H_P = H_R \quad (3.11)$$

หรือ

$$\sum N_P (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_P = \sum N_R (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_R \quad (3.12)$$

เมื่อรู้สถานะของสารตั้งต้นเราก็สามารถหา H_R ได้โดยง่าย แต่การหา H_P นั้นไม่เป็นเรื่องที่น่าจะง่ายเพราะเรายังไม่รู้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการคำนวณเปลวอะเดียแบติก (adiabatic flame temperature) จะต้องใช้วิธีสมมติค่าจนกว่าจะได้ $H_P = H_R$ (เรียกว่า "iterative procedure") ถ้าเป็นการเผาไหม้ด้วยอากาศซึ่งประกอบด้วย N_2 ส่วนใหญ่ ค่าอุณหภูมิแรกที่เราคงจะเดา คือการสมมติว่าผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเป็น N_2

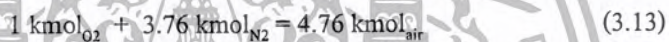
อุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้นั้นถูกจำกัดโดยความทนทานของวัตถุ ดังนั้นอุณหภูมิเปลวอะเดียแบติกจึงมีความสำคัญมากในการออกแบบห้องเผาไหม้ เครื่องยนต์กังหันก๊าซ และหัวฉีด อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์เหล่านี้ที่จริงแล้วจะน้อยกว่าอุณหภูมิเปลวอะเดียแบติกมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเผาไหม้อาจไม่สมบูรณ์ มีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งก๊าซบางชนิดอาจแยกตัวออก

(dissociate) อุณหภูมิสูงสุดในห้องเผาไหม้อาจควบคุมได้โดยการปรับแต่งปริมาณของอากาศส่วนที่เกิน (excess air) ซึ่งเปรียบเสมือนการระบายความร้อน

3.5 องค์ประกอบของอากาศ

ปฏิกิริยาเคมีซึ่งเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (เรียกว่าถูก Oxidized) และให้พลังงาน ออกมาเป็นจำนวนมากเรียกว่า การสันดาป หรือ การเผาไหม้ (combustion) อากาศเป็นตัว oxidizer ที่ใช้บ่อยที่สุดในกระบวนการเผาไหม้ ทั้งนี้เพราะมันสามารถหาได้ง่ายและไม่เสียค่าใช้จ่าย ส่วนออกซิเจนบริสุทธิ์ (pure oxygen : O_2) นั้นถูกใช้เป็นตัว Oxidizer เฉพาะในกรณีพิเศษซึ่งไม่สามารถใช้อากาศได้ ดังนั้นเราจึงจะพิจารณาองค์ประกอบของอากาศก่อนที่จะไปพิจารณาด้านอื่น ๆ เช่น พลังงานจากการเผาไหม้

ตามจำนวนโมล (หรือปริมาตร) นั้นพบว่าอากาศแห้งประกอบด้วยออกซิเจน 20.9 % ไนโตรเจน 78.1 % อาร์กอน 0.9 % และสารอื่น ๆ จำนวนเล็กน้อย ในการวิเคราะห์กระบวนการเผาไหม้ อาร์กอนในอากาศจะพิจารณาว่าเป็นไนโตรเจน และสารอื่น ๆ ที่มีจำนวนเล็กน้อยจะไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นจึงจะพิจารณาว่าอากาศแห้งประกอบไปด้วยออกซิเจน 21 % ไนโตรเจน 79 % (ตามจำนวนโมล) ดังนั้นแต่ละโมลของออกซิเจนจะมีไนโตรเจนจำนวน 3.76 โมลผสมอยู่ด้วยในอากาศ นั่นคือ



ที่อุณหภูมิการเผาไหม้ปกติ ไนโตรเจนมีพฤติกรรมเป็นก๊าซเฉื่อย ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นถึงอย่างไรก็ตาม แม้ไนโตรเจนไม่ทำปฏิกิริยาแต่ก็มีผลต่อกระบวนการเผาไหม้อย่างมาก ทั้งนี้เพราะไนโตรเจนจะเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในปริมาณมากที่อุณหภูมิต่ำ และออกจากห้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นการดูดซับพลังงานเคมีส่วนหนึ่งที่ถูกลบออกมาระหว่างกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งจะสมมุติว่าไนโตรเจนเป็นก๊าซเฉื่อยโดยสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิสูงไนโตรเจนจำนวนหนึ่ง (ซึ่งอาจไม่มากนัก) จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนให้สารพิษ เช่น Nitric oxide

อากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้จะมีละอองน้ำปนอยู่ ละอองน้ำนี้จะต้องนำมาพิจารณาเพราะแม้ว่าในกระบวนการเผาไหม้ส่วนใหญ่ซึ่งจะกดให้เป็นก๊าซเฉื่อยเช่นเดียวกับไนโตรเจน อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงละอองน้ำอาจแยกตัว(dissociate) เป็น H_2 และ O_2 รวมทั้งอาจแยกเป็น H, O, OH และเมื่อก๊าซจากการเผาไหม้ทำให้เย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) ของละอองน้ำ จะทำให้ละอองน้ำส่วนหนึ่งกลั่นตัวออกมาเป็นหยดน้ำ และจำเป็นที่จะต้องรู้จุดน้ำค้างนี้เพราะหยดน้ำมักจะรวมตัวกับ sulfur dioxide ซึ่งอาจมากับก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ กลายเป็นกรดกำมะถัน(sulfuric acid) ซึ่งทำให้เกิดการผุกร่อนอย่างมาก

ปริมาณที่ใช้ในการวิเคราะห์การเผาไหม้ ได้แก่ สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (air-fuel ratio : AF) ปกติแล้วมันจะเขียนอยู่ในรูปสัดส่วนเชิงมวลและมีคำจำกัดความเป็น มวลของอากาศต่อมวลเชื้อเพลิง ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้นั้นคือ

$$AF = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \quad (3.14)$$

มวลสาร (m) ของสารนั้นสัมพันธ์กับจำนวนโมล (N) โดยสมการเขียนเป็นสมการได้ว่า $m = NM$ โดยที่ M คือ มวลโมเลกุล (molar mass) ของสาร

สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงนี้สามารถเขียนอยู่ในรูปของจำนวนโมลได้เป็นจำนวนโมล ของอากาศต่อจำนวนโมล ของเชื้อเพลิงดังนั้นจะได้ว่า ส่วนกลับของ AF จึงเรียกว่า สัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ (fuel-air ratio)

3.6 อัตราส่วนสมมูล (Φ)

ในการเผาไหม้จริงปริมาณอากาศ ที่ใช้ในการเผาไหม้อาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่าทางทฤษฎี ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมบาง (Lean Mixture) ตรงกันข้ามหากปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมหนา (Rich Mixture) เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง จึงกำหนดให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของเชื้อเพลิงต่ออากาศ $(F/A)_{stoc} = (m_{fuel} / m_{air, stoc})$ และอัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio, Φ) จะหมายถึง

$$\Phi = \frac{(F/A)_{Actual}}{(F/A)_{Stoc}} \quad (3.15)$$

หรือถ้าอยู่ในรูปของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

$$\Phi = \frac{(A/F)_{Stoc}}{(A/F)_{Actual}} \quad (3.16)$$

Fuel rich mixture	$\Phi > 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
Stoichiometric	$\Phi = 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
Fuel lean mixture	$\Phi < 1$	ปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี

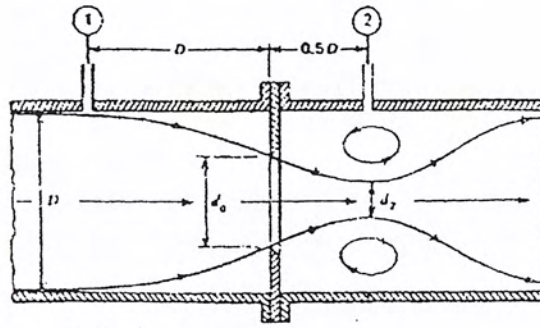
3.7 ออร์ฟิส(Orifice)

สมมติฐานเบื้องต้นสำหรับการวัดอัตราการไหลด้วยออร์ฟิสในการทดลองนี้คือของไหลที่อยู่ภายในท่อไม่สามารถอัดตัวได้ ความเร็วของของไหลมีค่าคงที่ตลอดหน้าตัด (โดยไม่คิดบริเวณที่เรียกว่า บริเวณกระแสไหลวน) ของไหลไม่มีความหนืดและการไหลเกิดขึ้นแบบ Steady flow (อัตราการไหลมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับเวลา)

สมการ Bernoulli สามารถนำมาใช้อธิบายคุณสมบัติในการไหลที่จุดต่างๆ ภายในท่อได้ดังนั้น

สมการ Bernoulli สำหรับจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของการไหลดังแสดงในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงการไหลผ่านแผ่น ออร์ริฟิส (Orifice)

$$Q_{ac} = C_d A_o \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\rho g \left[1 - \left(\frac{d_o}{D} \right)^4 \right]}} \tag{3.17}$$

เมื่อ

- P = ความดันสถิตของของไหล (N/m²)
- γ = น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight, N/m³)
- Subscript 1 = ค่าที่จุดที่ 1 ในทางทฤษฎี
- Subscript 2 = ค่าที่จุดที่ 2 ในทางทฤษฎี
- A_o = พื้นที่หน้าตัดรูออร์ริฟิส (m²)
- D = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
- d_o = เส้นผ่านศูนย์กลางรูออร์ริฟิส
- C_d = discharge coefficient

3.8 ทฤษฎีฟลูอิดไดเซชัน

ฟลูอิดไดเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคของแข็งขนาดเล็กถูกทำให้อยู่ในสภาพคล้ายของไหล ด้วยการพองโดยก๊าซหรือของเหลวที่ไหลผ่านเบดของแข็งขึ้นไปด้านบนด้วยอัตราการไหลค่าหนึ่ง โดยมีการถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในขณะที่มีการสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็ง

3.8.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน

กระบวนการฟลูอิดไดเซชัน แบ่งตามลักษณะการเกิดได้สองแบบ คือ

3.8.1.1 ฟลูอิดไอเซชัน สองสถานะ (Two - phases fluidization) หมายความว่าในหอทดลอง หรือเบดที่ใช้งานจะประกอบด้วยสองสถานะคือ ของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไอเซชัน จึงแบ่งออกอีก 2 ประเภท คือ ก๊าซฟลูอิดไอเซชัน (Gas fluidization) ฟลูอิดไอเซชันของของเหลว (Liquid fluidization)

3.8.1.2 ฟลูอิดไอเซชันสามสถานะ (Three - phases fluidization) หมายความว่าภายในหอทดลองจะประกอบด้วยของสามสถานะในเวลาเดียวกันคือ ของแข็ง, ของเหลวและก๊าซ สำหรับฟลูอิดไอเซชัน สามสถานะเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากฟลูอิดไอเซชันสองสถานะ

3.8.2 ลักษณะฟลูอิดไอซ์เบด

เบด (Bed) หมายถึงอาณาเขตในหอทดลองที่มีอนุภาคของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าอนุภาคของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในห้องทดลอง จะระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหลจนถึงระดับสูงสุด คือผิวหน้าของอนุภาคของแข็งที่อยู่ในหอทดลอง ดังรูปที่ 3.3



ปรากฏการณ์ฟลูอิดไอเซชันเกิดขึ้นได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบบางประการ ความเร็วของของไหล ชนิดของเม็ดวัสดุที่ประกอบกันเป็นเบด ลักษณะของแผ่นกระจายของไหล เมื่อความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ความดันลดในเบดเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังรูปที่ 3.4 ถ้าดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วของของไหลสรุปได้ดังนี้คือ

3.8.2.1 เมื่อป้อนของไหลด้วยความเร็วต่ำๆ ของไหลจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งไปโดยไม่ทำให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ เบดลักษณะนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed)

3.8.2.2 เมื่อความเร็วของของไหลสูงขึ้น อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ห่างออกจากกัน ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เบดขยาย (Expanded bed)

3.8.2.3 เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีกจนถึงจุดหนึ่ง ซึ่งแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลสมดุลกับน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง และแรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งในแนวตั้งหายไป อนุภาคของแข็งที่ประกอบกันเป็นเบดจะลอยตัวเป็นอิสระ แรงกระทำเนื่องจาก

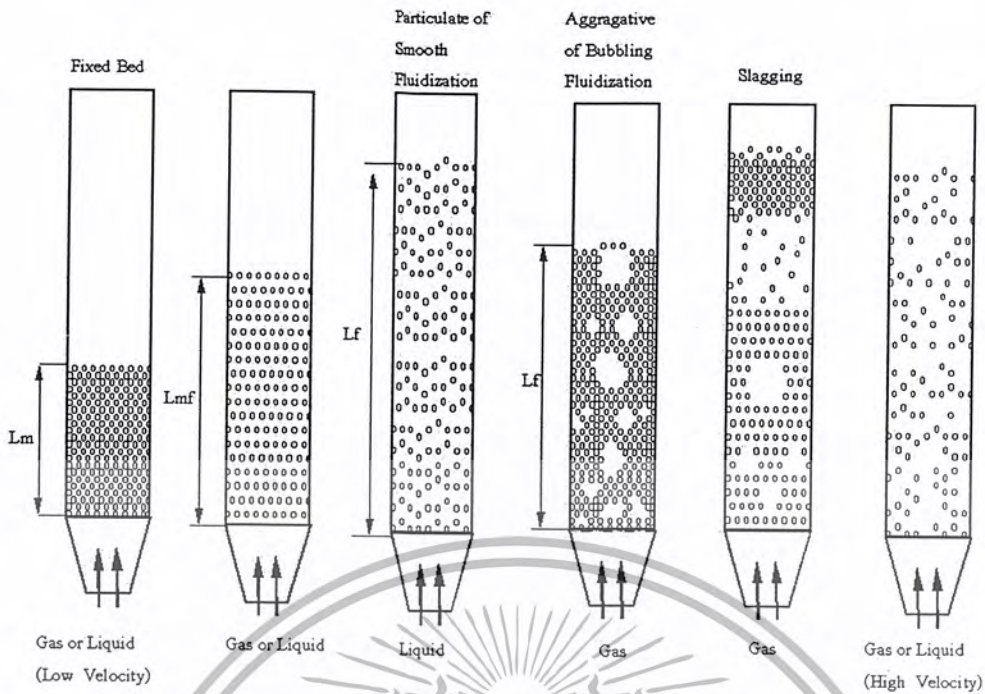
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันลดในเบรกระนาตัดใดๆ ของเบรจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและอนุภาคของแข็งระหว่างหน้าตัดนั้นๆ เบรในสภาพเช่นนี้เป็นเบรที่เริ่มฟลูอิดไดซ์ เรียกเบรในลักษณะนี้ว่า อินซิเพียนฟลูอิดไดซ์เบร (Incipiently fluidized bed) หรือเบรที่มีสภาพฟลูอิดไดซ์ขั้นต่ำสุด (Minimum fluidization)

3.8.2.4 เมื่อของไหลมีความเร็วมากกว่าความเร็วที่กล่าวในหัวข้อ 3.8.2.3 อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนตัวห่างออกจากกันมากขึ้นตามความเร็วของของไหล จะเริ่มเกิดฟองก๊าซ (Bubbles) เกิดขึ้น อนุภาคของแข็งเริ่มไหลหมุนเวียนดีขึ้น เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เกิดการผสมผสานและการไหลเวียนของของแข็งจะรุนแรงยิ่งขึ้นเบรในลักษณะเช่นนี้เรียกว่าบับบลิงฟลูอิดไดซ์เบร (Bubbling fluidized bed) ส่วนของเบรที่ไม่รวมฟองเรียกว่า อิมัลชันเฟส (Emulsion phase)

3.8.2.5 ฟลูอิดไดซ์เบรที่สามารถบงบอกระดับเบรได้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบรแบบหนาแน่น (Dense phase fluidized bed) และเมื่อความเร็วของของไหลมากกว่าความเร็วขณะหลุดลอย (Terminal velocity) อนุภาคของของแข็งจะหลุดลอยไปกับกระแสการไหลของของไหล สถานะเรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบรแบบเจือจาง (Lean phase fluidized bed) หรือการขนถ่ายด้วยของไหล (Pneumatic or Hydraulic transport)

3.8.2.6 ฟลูอิดไดซ์เบรที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบรเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเองของอนุภาคของแข็งเป็นไปอย่างช้าๆ เราเรียกเบรแบบนี้ว่าเบรสม่ำเสมอ (Smoothly fluidized bed) ฟลูอิดไดซ์เบรที่ของไหลเป็นก๊าซลักษณะของเบรจะแตกต่างจากของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ขั้นแล้วก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของอนุภาคของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวแล้วเกิดเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซจะแทรกตัวเองขึ้นมาอยู่บนผิวหน้าของเบรและแตกตัวในที่สุดการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งภายในเบรจะเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 3.4 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด

3.8.3 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไดซ์เบด

เป็นการเปรียบเทียบการได้เปรียบและการเสียเปรียบระหว่างการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดกับเทคนิคอื่นๆ ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.8.3.1 ข้อได้เปรียบ

1. เนื่องจากอนุภาคของแข็งที่เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอด ซึ่งต่างจากเบดนิ่งซึ่งอุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด
2. การทำงานด้วยฟลูอิดไดซ์เบดจะเสียพลังงานน้อยกว่า เพราะแรงเสียดทานและแรงดันตกคร่อมเบดน้อยกว่าแบบบรรจุมาก
3. มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็งอนุภาคที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบนส่วนอนุภาคที่มีน้ำหนักมากกว่าจะอยู่ด้านล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของอนุภาคของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก
4. จากคุณสมบัติที่คล้ายของไหลจึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้คือปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบดและไหลเดิมเข้าไปในเบดได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย
5. พื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหล จะมากกว่าเมื่อเทียบกับเบดนิ่งที่มีอนุภาคของแข็งเท่ากัน จึงมีประโยชน์ในการใช้งานที่มีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร
6. ที่อนุภาคของไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบคอนุภาคของแข็งนี้สามารถจะเป็นตัวนำความร้อนจากแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.3.2 ข้อเสียเปรียบ

1. เนื่องจากการผสมกันอย่างรวดเร็ว บางครั้งอนุภาคของของแข็งมีช่วงเวลาอยู่ในเบดสั้นเกินไป เมื่อทำงานแบบต่อเนื่องจึงทำให้ผลลัพธ์เลวลง หรืออนุภาคของแข็งมีคุณสมบัติทางกายภาพไม่ตรงตามข้อกำหนด
2. การสั่นสะเทือนของหอตลอดหรือเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากอนุภาคของแข็งมากระทบกับผนังหอตลอด
3. เวลาที่ของไหลสัมผัสกับอนุภาคของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบดสูงๆหรือเบดหลายๆชั้นซึ่งเปลืองเงินลงทุนมาก
4. มักเกิดฟองก๊าซในเบด ทำให้การสัมผัสกันไม่ดีเป็นการสูญเสียเปล่า ถ้ายังเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจะต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง
5. ใช้กับอนุภาคของแข็งที่เปื่อยหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด
6. การทำงานมีข้อจำกัด เพราะถ้ามีความเร็วของของไหลมากเกินไปเมื่อดของแข็งก็จะออกมาจากเบดไปพร้อมกับของไหล
7. ในปฏิกิริยาที่ทำให้ตัวเร่งมีขนาดลดลง จะต้องปรับความเร็วของก๊าซเพื่อไม่ให้ตัวเร่งปลิวทำให้ได้ผลิตผลน้อยลง

3.8.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิดไดเซชัน

ขณะที่ของไหลไหลผ่านขึ้นมาด้านบนใกล้ผนัง ความเร็วของไหลจะต่ำมากหรือเกือบไม่มีการไหลเลยเนื่องจากเกิดแรงเสียดทาน เมื่อในหอตลอดที่บรรจุอนุภาคของแข็งมีอิทธิพลของฝาผนังเกิดขึ้น ขอบเขตการไหลชนิดเรียบจะสูงมากขึ้น พื้นที่ในการไหลของของไหลในหอตลอดจะลดน้อยลง หรือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำงานที่แท้จริงของของไหลเล็กกว่าเดิมมากประสิทธิภาพการทำงานจะน้อยลงด้วย

ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันคือ

ความเร็วของของไหล

ตัวกระจายของไหล

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอตลอด

อนุภาคของแข็ง

ความหนาแน่นของของไหล

ความหนืด

ความสูงของเบด

ความสูงของเบคเมื่อเริ่มฟลูอิดไดเซชันสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{L_o}{L_{mf}} = \frac{1 - \epsilon_{mf}}{1 - \epsilon_0} \tag{3.18}$$

ขณะที่อนุภาคของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระแสดงว่า อนุภาคของแข็งกำลังอยู่ในสมดุลของแรง ซึ่งได้แก่แรงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง แรงพยุงของของไหล (Bouyance force) และแรงต้านการไหล (Drag force) อาจเขียนในสมการสมดุลแรงต่างๆ ได้ดังนี้

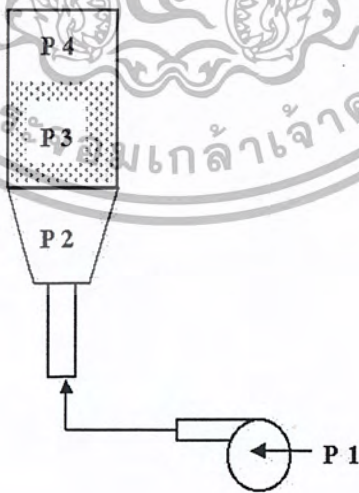
$$(\text{แรงพยุงของของไหล}) + (\text{แรงต้านทานการไหล}) = (\text{น้ำหนักของอนุภาคของแข็งในเบค}) \tag{3.19}$$

$$(\text{ความดันลคในเบค}) (\text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์}) = (\text{ปริมาตรของเบค}) (\text{แฟรคชันของของแข็ง}) (\text{น้ำหนักจำเพาะของของแข็ง}) \tag{3.20}$$

$$\Delta P_b A_f = W = (A_f L_{mf}) (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \tag{3.21}$$

จัดเทอมใหม่สำหรับสภาพฟลูอิดไดเซชันต่ำสุด

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \tag{3.22}$$



รูปที่ 3.5 แสดงความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆในชุดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการความดันตกคร่อมที่ผ่านเบดนิ่งจะได้ว่า กลไกของความดันตกคร่อมในเบดที่ใช้ อนุภาคของแข็งขนาดสม่ำเสมอแล้ว พบว่าความดันตกคร่อมนี้เป็นสัดส่วนกับแฟกเตอร์ 2 แฟกเตอร์ คือ

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})\mu U}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)^2} + \frac{1.75(1-\varepsilon_{mf})\rho_g U^2}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)} \quad (3.23)$$

เทอมแรกทางซ้ายขวานของสมการ 3.23 แทนการสูญเสียความดันเนื่องจากผลของความเสียดทาน เทอมที่สองเป็นผลของการสูญเสียพลังงานจลน์ที่ $Re_p < 20$ โดยที่แรงเสียดทานจะมีค่ามากกว่า ดังนั้นสมการที่ 3.23 สามารถตัดเทอมที่สองได้เป็น

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})\mu U}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)^2} \quad (3.24)$$

ที่ $Re_p > 1000$ ผลของการสูญเสียพลังงานจลน์จะมีค่ามากกว่าผลของแรงเสียดทาน สมการที่ 3.23 จัดใหม่ได้เป็นดังนี้

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{1.75(1-\varepsilon_{mf})\rho_g U^2}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s d_p)} \quad (3.25)$$

ซึ่งสมการของ Ergun นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสมการที่ 3.23 ได้ เมื่อเบดอยู่ที่จุดเริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชัน ดังนั้นจะแทนสมการที่ 3.23 ลงในสมการที่ 3.22 ในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชันได้ ดังสมการที่ 3.26

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left[\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right]^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})(U_{mf} d_p \rho_g)}{\mu \varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (3.26)$$

ในเบดที่ใช้อนุภาคของแข็งขนาดเล็กจะทำให้สามารถใช้ความเร็วของของไหล เพียงเล็กน้อย ก็ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันได้แล้ว เพราะฉะนั้นความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันเมื่อ $Re_p < 20$ สามารถคำนวณได้จาก

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2 (\rho_s - \rho_g) g \varepsilon_{mf}^3}{150 \mu (1 - \varepsilon_{mf})} \quad (3.27)$$

สำหรับอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ต้องใช้ความเร็วของไหลสูงมาก ๆ จึงทำให้อนุภาคของแข็งลอยเป็นอิสระได้ ดังนั้นความเร็วต่ำสุดของของไหลที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชันเมื่อ $Re_p > 1000$ กำหนดได้จากสมการ

$$U_{mf} = \sqrt{\frac{\phi_s d_p (\rho_s - \rho_g) g \varepsilon_{mf}^3}{1.75 \rho_g}} \quad (3.28)$$

ค่าความพรุนของเบด (ε_{mf}) มีค่าเท่ากับปริมาตรช่องว่างหารด้วยปริมาตรของเบด เป็นค่าที่วัดได้โดยตรง เช่น โดยการแทนที่ด้วยของเหลว ดังแสดงตัวอย่างค่าความพรุนของอนุภาคที่ความกลมและขนาดอนุภาคต่างๆใน ตารางที่ 3.1

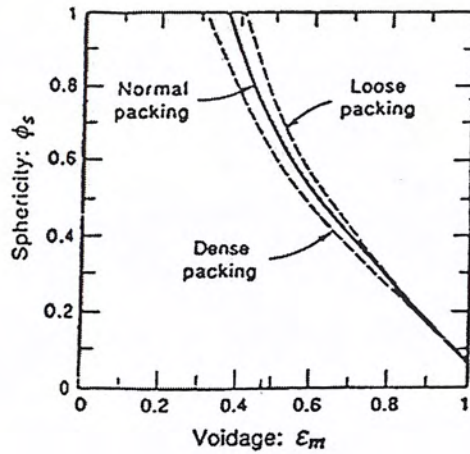
Particle	Size, d_p (mm)						
	0.02	0.05	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40
Sharp sand $\phi_s = 0.67$	-	0.60	0.59	0.58	0.54	0.50	0.49
Round sand $\phi_s = 0.86$	-	0.56	0.52	0.48	0.44	0.42	-
Mixed round sand	-	-	0.42	0.42	0.41	-	-
Coal and glass powder	0.72	0.67	0.64	0.62	0.57	0.56	-
Anthracite $\phi_s = 0.63$	-	0.62	0.61	0.60	0.56	0.53	0.51
Absorption carbon	0.74	0.72	0.71	0.69	-	-	-
Fischer - Tropsch catalyst $\phi_s = 0.58$	-	-	-	0.58	0.56	0.55	-
Carborundum	-	0.61	0.59	0.56	0.48	-	-

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างค่าความพรุนของอนุภาคชนิดต่างๆ

ค่าความกลมของอนุภาค (ϕ_s) ใช้บ่งบอกถึงรูปร่างว่าอนุภาคเบี่ยงเบนจากทรงกลมมากน้อยเพียงใด นิยามว่า

$$\phi_s = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลม}}{\text{พื้นที่ผิวของอนุภาค}} \quad \text{เมื่อปริมาตรเท่ากัน} \quad (3.29)$$

จากรูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด จะเห็นได้ว่าเมื่อความกลมของอนุภาคลดลง ค่าความพรุนจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด

ถ้ายังไม่ทราบค่าของ ϵ_{mf} และ ϕ_s Wen และ Yu (1996) แนะนำให้ใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} = 14 \quad (3.30)$$

$$\frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} = 11 \quad (3.31)$$

แทนค่าสมการที่ 3.31 ลงในสมการที่ 3.26 แล้วค่า U_{mf} จะได้

$$U_{mf} = \frac{\mu}{d_p \rho_g} \left\{ (33.7)^2 + \frac{0.0408 d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right\}^{-0.337} \quad (3.32)$$

สมการที่ 3.32 นี้ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 34% ในช่วง $0.001 < Re_p < 4000$

ความเร็วเริ่มหลุดลอยหรือความเร็วตกอิสระของอนุภาคของแข็งเป็นความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านฟลูอิดไดซ์เบดถูกจำกัดด้วยความเร็วต่ำสุด ความเร็วเริ่มหลุดลอยแสดงได้ดังสมการ

$$U_T = \left[\frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.33)$$

โดยที่ C_d เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานซึ่งหาได้จากการทดลอง และจากการทดลองพบว่าค่า C_d ขึ้นอยู่กับค่า Re_p ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (3.34)$$

$$C_d = \frac{10}{\sqrt{Re_p}} \quad \text{เมื่อ } 0 < Re_p < 500 \quad (3.35)$$

$$C_d = 0.43 \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200000 \text{ หรือ } 1000 < Re_p \quad (3.36)$$

แทนค่าจากสมการ 3.34, 3.35 และ 3.36 ลงในสมการที่ 3.33 แล้วหาค่า U_t จะได้

$$U_t = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (3.20)$$

$$U_t = d_p \left[\frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225\rho_g\mu} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.21)$$

$$U_t = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200000 \text{ หรือ } 1000 < Re_p \quad (3.22)$$

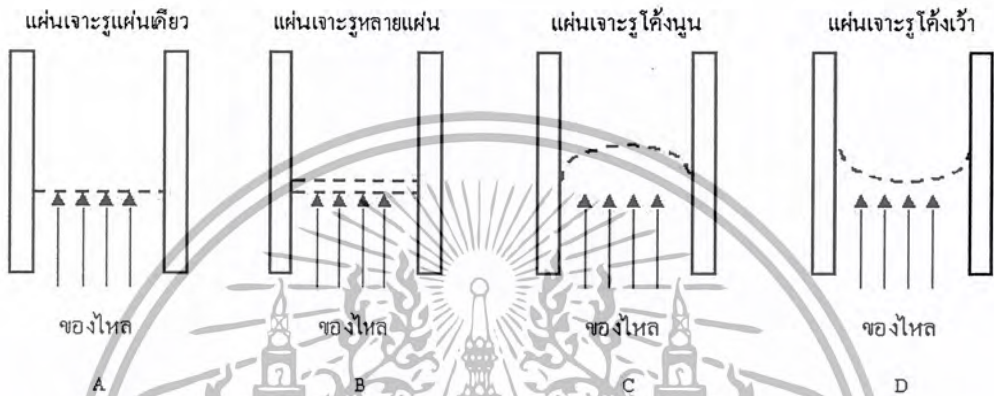
เพื่อหลีกเลี่ยงมิให้อนุภาคของแข็งหลุดลอยออกจากเบด ความเร็วของของไหลที่ใช้ในระบบฟลูอิดไดซ์เบดจะต้องมีค่าอยู่ระหว่างความเร็ว U_{mf} และความเร็ว U_t ในการคำนวณหาความเร็ว U_{mf} เนื่องจากอนุภาคของแข็งมีการกระจายขนาด ดังนั้นขนาดของอนุภาคของแข็งที่ใช้จะเป็นขนาดโดยเฉลี่ย ส่วนการคำนวณความเร็ว U_t จะใช้ขนาดของอนุภาคของแข็งที่เล็กที่สุดปะปนอยู่ในเบด

3.8.5 แผ่นกระจายของไหล

หน้าที่ของแผ่นกระจายของไหลคือ เป็นอุปกรณ์ป้องกันเพื่อมิให้อนุภาคหลุดลงมาด้านล่าง และสามารถให้ของไหลไหลผ่านได้ โดยสามารถกระจายของไหลออกได้เต็มพื้นที่ผิวหน้าตัดของตัวเครื่อง โดยที่ความเร็วของของไหลที่เหนือแผ่นกระจายของไหลควรมีค่าเท่ากันทุกจุด และองค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้ลักษณะของกลุ่มอนุภาคอยู่ในสภาวะเสมือนของไหลได้ดีหรือไม่ก็คือ ความดันตกคร่อม โดยของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกระจายของไหล ถ้าหากความดันตกคร่อมน้อยเกินไปจะไม่ดี ความดันตกคร่อมโดยทั่วไปจะต้องไม่ต่ำกว่า 10 % ของความดันตกคร่อมที่เกิดจากการไหลของของไหลผ่านกลุ่มอนุภาคขณะลอยตัว

ลักษณะของแผ่นกระจายของไหลแบบต่างๆมีดังต่อไปนี้

3.8.5.1 แบบแผ่นเจาะรู (Perforate plate) แผ่นกระจายของไหลแบบแผ่นเจาะรูนั้นทำได้โดยการนำแผ่นวัสดุมาเจาะรูให้มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ โดยทั่วไปถ้าเจาะรูน้อยลักษณะของอนุภาคเหนือแผ่นกระจายในขณะลอยตัว หรืออยู่ในสถานะเสมือนของไหลจะมีผลทำให้ความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ จะมีฟองอากาศใหญ่เกิดขึ้น โดยเฉพาะเมื่อความเร็วสูงๆ ดังนั้นจำนวนรูและการเจาะจึงมีส่วนสำคัญ แผ่นกระจายของไหลแบบนี้ใช้กันมากในห้องปฏิบัติการและเครื่องทดลองขนาดกลาง เพราะทำงานง่าย ราคาถูก และมีคุณสมบัติดีพอสมควร แสดงได้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.7 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรู

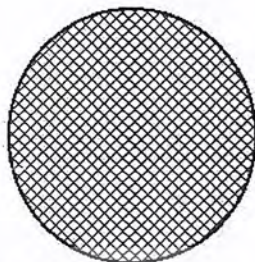
ในกรณีของขนาดตัวเครื่องใหญ่มาก ถ้าใช้แผ่นกระจายของไหลแบบดังกล่าวจะมีปัญหาเรื่องการรับน้ำหนัก หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความร้อนทำให้งอหรือบิดโค้ง จึงดัดแปลงทำเป็นแบบโค้งดังแสดงใน รูปที่ 3.7 C และรูปที่ 3.7 D

สำหรับในรูป C นั้นจะช่วยลดหรือแก้ปัญหาการเกิดฟอง และการผ่านไปเป็นช่องที่มักจะเกิดขึ้นตรงกลางแผ่นรูเจาะได้ดี

สำหรับในรูป D นั้นถ้าเจาะรูด้านข้างๆ ให้มากกว่าตรงกลางแล้ว จะทำให้เกิดความสม่ำเสมอภายในกลุ่มอนุภาคเหนือแผ่นกระจายของไหลมากยิ่งขึ้น

3.8.5.2 แบบตะแกรง (Sieves) แผ่นกระจายของไหลแบบนี้เป็นตะแกรงเหมือนมุ้งลวดเหมาะสำหรับตัวเครื่องขนาดเล็ก เพราะตะแกรงจะรับน้ำหนักมากๆ ไม่ได้ และอีกประการหนึ่งความดันของการไหลผ่านตะแกรงจะต่ำมาก ดังนั้นเขามักจะบรรจุกลุ่มอนุภาคไว้ด้านล่างของตะแกรงเป็นกลุ่มอยู่กับที่นอกจากจะช่วยให้ความดันลดของแผ่นกระจายเพิ่มขึ้นเท่ากับค่าต่ำสุดของค่าที่ต้องการ และยังช่วยให้ลักษณะการไหล (Profile) ของของไหลเป็นแบบเรียบไม่เหมือนกับสภาพของไหลที่ไหลอยู่ในท่อโดยทั่วไป ซึ่งมีความเร็วบริเวณส่วนกลางท่อจะสูงกว่าข้างๆ

ตะแกรงนั้นถ้าใช้ในกรณีรับน้ำหนักมากๆ อาจต้องใช้ร่วมกับแผ่นเจาะรูโดยใส่ตะแกรงให้อยู่ในระหว่างแผ่นเจาะรู ซึ่งทำให้หนักจากจะแข็งแล้วยังไม่จำเป็นต้องเจาะรูบนแผ่นให้เล็กมากซึ่งจะเสียเวลามากกว่า แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลักษณะของตัวกระจายแบบตะแกรง

3.8.5.3 แบบแผ่นอัด (Sintered plate) เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบที่ทำจากการนำเอาวัสดุที่จะนำมาทำแผ่นกระจายของไหลที่มีขนาดเล็ก และอัดเป็นก้อนติดกัน โดยที่แผ่นวัสดุดังกล่าวเมื่อถูกอัดแล้วยังยอมให้ของไหลไหลผ่านได้

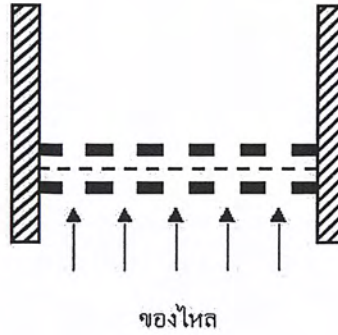
แผ่นกระจายของไหลแบบนี้เป็นแบบที่ดีที่สุดทำให้เกิดสถานะเสมือนของไหลที่ตีมาก การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกลุ่มสถานะเสมือนของไหลน้อยมาก ขนาดของช่องเล็กลงมีการใช้งานตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงปานกลาง

ข้อเสียของแผ่นกระจายของไหลแบบนี้ก็คือ เวลาของไหลไหลผ่านจะเกิดความดันลดอย่างมาก ทำให้สูญเสียพลังงาน หรือค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆที่กล่าวมาแล้ว ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นอัด

3.8.5.4 แบบแซนวิช (Sandwiched) เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบที่มีลักษณะคล้ายกับแบบที่ 1 และ 2 แต่จะมีกลุ่มอนุภาคทองอยู่ระหว่างแผ่นดังกล่าวด้วย ระบบการกระจายของไหลแบบนี้จะทำให้การกระจายของของไหลสม่ำเสมอขึ้นและในกรณีที่มีความร้อนเกิดขึ้นด้วยจะสามารถแยกตัวออกของแผ่นกระจายของไหลจากความร้อนดังกล่าวได้ดี แต่ไม่เหมาะสำหรับกรณีที่อยู่ในของไหลมีอนุภาคที่เล็กๆปนอยู่ เพราะจะทำให้เกิดการอุดตันได้เมื่อใช้งานไปสักระยะหนึ่งทำให้ของไหลไหลผ่านได้สะดวกไม่เกิดความดันลดสูงกว่าที่ต้องการ แสดงได้ดังรูปที่ 3.10



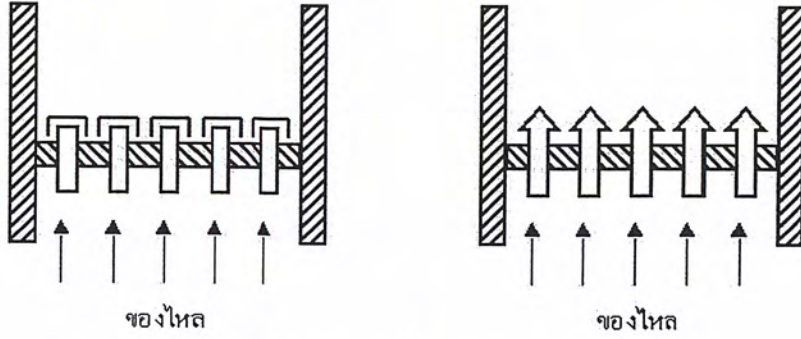
รูปที่ 3.10 ลักษณะของตัวกระจายแบบแขนวิช

3.8.5.5 แบบท่อ หรือท่อเจาะรู ในกรณีที่เป็นอนุภาคขนาดใหญ่อาจใช้แบบท่อวางขนานกันแล้วให้ของไหลไหลผ่านท่อหรือเจาะรูบนท่อแล้วของไหลไหลผ่านท่อและผ่านรูดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ลักษณะของตัวกระจายแบบท่อ

3.8.5.6 แบบมีหมวก (Bubble cap) เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบคล้ายกับที่ใช้ในหอกลับ (Bubble plate) เพื่อไม่ให้อนุภาคไหลผ่านแผ่นกระจายของไหลลงไปสู่ด้านล่าง แต่ก็ไม่ได้หลายประการด้วยกัน เช่น ทำให้เกิดกองอยู่เป็นหย่อมๆบนแผ่น อาจทำให้เกิดการไม่สม่ำเสมอของคุณสมบัติภายในตัวเครื่องได้ การเกิดติดกันบนแผ่นและติดกันบนแผ่นกระจายยากต่อการสร้าง ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.11



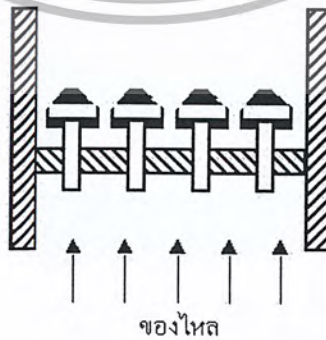
รูปที่ 3.12 ลักษณะของตัวกระจายแบบมีหมวก

3.8.5.7 แบบแผ่นกรอง (Multiple filter plate) เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบที่เหมาะสมมากสำหรับอนุภาคขนาดเล็กๆที่ไม่ต้องการให้หล่นผ่านแผ่นกระจายของไหลลงไปข้างล่างแต่ก็มีข้อเสีย เช่น ของไหลที่ไหลผ่านจะต้องไม่มีสารที่ทำให้เกิดการอุดตัน ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นกรอง

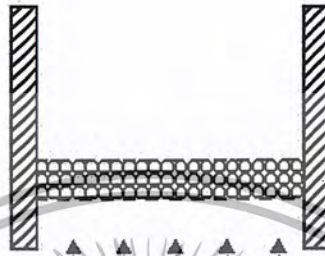
3.8.5.8 แบบระบบผสม (Mixing nozzle system) เป็นระบบกระจายของไหลโดยให้หัวพ่นของไหลอยู่ทางด้านล่างของกลุ่มอนุภาคทำให้เกิดการหมุนเวียนภายในกลุ่มอนุภาคดีขึ้นดัง รูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ลักษณะของตัวกระจายแบบผสม

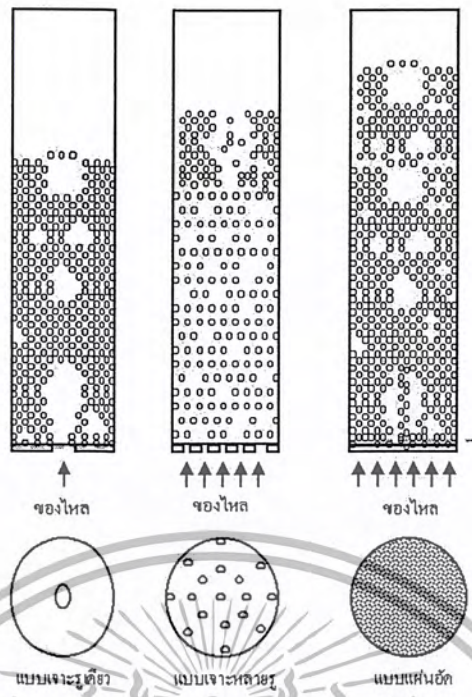
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.5.9 แบบแผ่นเจาะรูหรือตะแกรงประยุกต์ แผ่นกระจายของไหลแบบนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับแบบที่ 1 และแบบที่ 2 แต่ด้านบนของแผ่นจะมีลูกวัสดุทรงกลมวางเรียงกันอยู่เป็นชั้นๆ ลูกวัสดุทรงกลมดังกล่าวจะต้องไม่อยู่ในสภาวะเสมือนของไหลเมื่อใช้งาน ลักษณะของแผ่นกระจายของไหลแบบนี้ทำให้ได้สภาพเสมือนของไหลที่มีลักษณะที่ดีมาก การสูญเสียความดันสามารถลดลงได้มากขนาดของอนุภาค จำนวนและชนิดของวัสดุมีส่วนต่อลักษณะของสภาวะการเสมือนของไหลและความดันลด ความดันลดของการไหลของของไหลผ่านแผ่นกระจายของไหลจะต่ำมากเมื่อเทียบกับแบบอื่น ดังรูป 3.15



รูปที่ 3.15 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรูหรือตะแกรงประยุกต์

ในขณะที่เกิดฟลูอิดไดซ์เบดด้วยความเร็วของของไหลต่ำสุด ลักษณะของเบดยังเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งเบด จากนั้นถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้น ความเร็วที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะก่อตัวเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกระจายของไหลที่รองรับเบดว่าเป็นชนิดใด อย่างเช่น ตัวกระจายทำด้วยแผ่นโลหะเจาะรูฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่กว่าตัวกระจายของไหลที่เป็นรูพรุน ซึ่งเกิดจากใช้เม็ดโลหะขนาดเล็กมาอัดด้วยความดันอัดสูงๆจนติดกับแผ่นกระจายของไหล ตัวกระจายของไหลแบบหลังนี้ของไหลผ่านได้อย่างสม่ำเสมอ ฟองก๊าซจึงเกิดขึ้นได้เป็นจำนวนมากตัวกระจายที่เป็นแผ่นเจาะรูของไหลจะผ่านออกไปเหมือนกับเจ็ท (Jet) จำนวนการเกิดของฟองก็ขึ้นอยู่กับจำนวนรูเจาะบนตัวกระจายดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 คุณภาพของฟลูอิดไอเซชันที่เกิดจากแผ่นกระจายของไหลต่างชนิดกัน

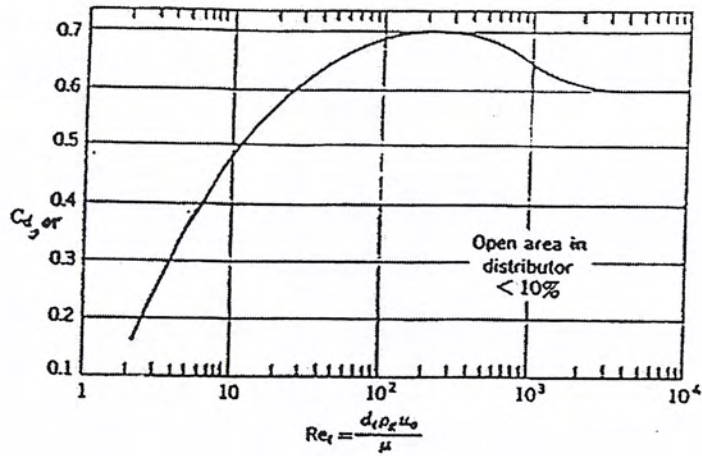
การออกแบบแผ่นกระจายของไหลนั้นมีสิ่งที่สำคัญคือ ความดันลดของก๊าซที่เกิดจากแผ่นกระจายอากาศ สำหรับกฎของการคำนวณความดันลดบนแผ่นกระจายอากาศนั้น สมการที่สามารถใช้ในการออกแบบได้ดีคือ

$$\Delta P_d = (0.2 \text{ ถึง } 0.4) \Delta P_b \quad (3.40)$$

โดยที่ค่า Reynolds Number (Re) และเลือกค่าสัมประสิทธิ์ของออริฟิส (Orifice coefficient, $C_{d,or}$) ที่เหมาะสมจากรูปที่ 3.17

คำนวณหาความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านรูออริฟิสจากสมการ 3.41

$$U_{or} = C_{d,or} \left[2g_c \frac{\Delta P_d}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad (3.41)$$



รูปที่ 3.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_{d,or}$ กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_t)

กำหนดจำนวนรูเจาะของตะแกรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของตะแกรงหรือตัวกระจายได้จากสมการ

$$U_0 = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 U_{or} N_{or} \quad (3.42)$$

3.8.6 การหมุนวนของอากาศทุติยภูมิ

อากาศปฐมภูมิจะทำหน้าที่เป็นตัวพาอนุภาคของเชื้อเพลิงเข้ายังห้องเผาไหม้ในแนวตั้งฉาก แล้วจะพองอนุภาคของเชื้อเพลิงขึ้นสู่ด้านบนห้องเผาไหม้ ขณะที่เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันและส่งตัวขึ้นสู่ด้านบนนั้นจะมีอากาศทุติยภูมิเข้ามาในแนวสัมผัสกับผนังของเตา ทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศและทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงหมุนตามไปด้วย ช่วยเพิ่มเวลาในการเผาไหม้ให้นานขึ้นทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ เนื่องจากการไหลวนของอากาศและการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศ ซึ่งเอื้ออำนวยต่อการคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิง

บทที่ 4

การดำเนินงานวิจัย

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะของการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน ซึ่งเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเตาเผารูปทรงกระบอกและ ท่อทิ้งเถ้าลอยด้านใน โดยประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนหลายๆ ส่วนซึ่งแต่ละส่วนมีผนังของห้องเผาไหม้ที่ประกอบขึ้นจากท่อเหล็กทรงกระบอก 2 ชั้นมีความสูงเท่ากับ 300 มิลลิเมตร ท่อเหล็กชั้นนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 400 มิลลิเมตร ท่อเหล็กชั้นใน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 300 มิลลิเมตร โดยท่อเหล็กชั้นนอกมีความหนา 4.5 มิลลิเมตร ชั้นในมีความหนา 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ ช่องว่างระหว่างของท่อเหล็กทั้งสองจะถูกหล่อด้วยปูนทนไฟที่มีความหนา 40 มิลลิเมตร เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนจากห้องเผาไหม้ ที่ส่วนล่างของแต่ละส่วนจะมีแผ่นเหล็กลักษณะวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 481 มิลลิเมตร และ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 300 มิลลิเมตร เชื่อมปิดอยู่เพื่อรองรับปูนทนไฟ และ ที่วงแหวนเจาะรูขนาด 12 มิลลิเมตร ตามแนวรัศมีจำนวน 12 รู ระยะจากขอบเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ไว้สำหรับยึดน๊อตเพื่อประกอบแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน โดยความหนาของแผ่นเหล็กวงแหวนนี้มีค่าเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ที่ขอบบนของแต่ละชิ้นส่วนก็เช่นเดียวกัน มีแผ่นเหล็กลักษณะวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 481 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 400 มิลลิเมตร มีความหนาเท่ากับ 6 มิลลิเมตร เชื่อมติดอยู่เพื่อยึดประกอบกับส่วนอื่นๆ ท่อทิ้งเถ้าลอยด้านใน ทำจาก สแตนเลสมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 73 มิลลิเมตร มีความหนาเท่ากับ 3 มิลลิเมตร มีความสูงเท่ากับ 675 มิลลิเมตร ที่ส่วนบนสุดของเตาเผาจะมีฝาปิดอยู่ โดยฝาปิดด้านบนเป็นแผ่นเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 481 มิลลิเมตร โดยมีปูนทนไฟหล่ออยู่ภายใน โดยที่ทำการกำหนดตำแหน่งการวัดในแนวความสูงของตัวเตาเป็นจำนวน 11 ตำแหน่ง โดยที่แต่ละตำแหน่งห่างกันเป็นระยะ 30 มิลลิเมตร และ ทำการวัดค่าอุณหภูมิในแนวรัศมีจำนวน 5 จุด ของเทอร์โมคัปเปิ้ล 5 ตัวล่างจากฐานเตาและ 6 จุด ของเทอร์โมคัปเปิ้ล 3 ตัวบน และทำการบันทึกค่าที่อ่านได้จากดิจิตอลอินดิเคเตอร์ลงในตารางบันทึกผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ยังได้ทำการศึกษาของอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้โดยในการศึกษานี้ได้ทำการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ คือ

1. ความชื้นของแกลบเท่ากับ 11% โดยน้ำหนัก
2. อัตราส่วนสมมูล, Φ เท่ากับ 0.8, 0.7, 0.6 และ 0.5
3. อัตราส่วนอากาศตุนิยมต่ออากาศทั้งหมด, λ เท่ากับ 0, 0.15 และ 0.25
4. อัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min

4.1 การคำนวณหาค่าต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

4.1.1 การคำนวณหาค่าปริมาณอากาศที่ต้องการใช้

- พิจารณาที่ข้าวเปลือก 100 กิโลกรัม เมื่อนำไปผ่านกระบวนการสีจะสามารถแยกสัดส่วนของข้าวเปลือกได้ดังต่อไปนี้

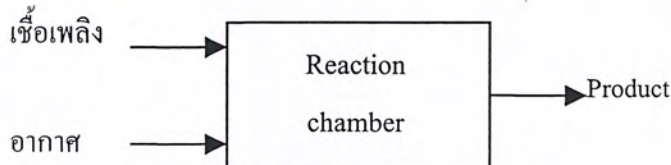
ส่วนประกอบ	จำนวน (kg)
ข้าวสาร	44.14
ข้าวท่อน	18.04
ปลายข้าว	2.68
รำละเอียด	7.20
รำหยาบ	1.7
แกลบ	26.12

ตารางที่ 4.1 สัดส่วนของข้าวเปลือก

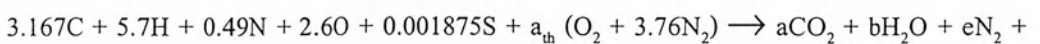
สาร	เปอร์เซ็นต์	MW	จำนวนโมล
คาร์บอนไดออกไซด์ (C)	38	12	3.167
ไฮโดรเจน (H)	5.7	1	5.7
ออกซิเจน (O ₂)	41.6	16	2.6
ไนโตรเจน (N)	0.69	14	0.049
ซัลเฟอร์ (S)	0.06	32	0.001875
ขี้เถ้า (Ash)	19.8	-	-

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงรวม (แกลบ)

- ทำการสมดุลสมการทางเคมี



จะได้สมการเคมีดังนี้



dSO_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าที่ได้จากการ Balance

$$C : 3.167 = a$$

$$H : 5.7 = 2b$$

$$\therefore b = 2.85$$

$$S : 0.001875 = d$$

$$O : 2.6 + (a_{\text{H}_2\text{O}} \times 2) = 2a + b + 2d$$

$$\therefore a_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{(2 \times 3.167) + 2.85 + (2 \times 0.001875) - 2.6}{2}$$

$$= 3.293875$$

$$N : 0.049 + (a_{\text{H}_2\text{O}} \times 3.76 \times 2) = 2e$$

$$\therefore e = 12.40947$$

ทำการหาค่าจำนวนโมลของอากาศแห้งมีค่าเท่ากับ

$$4.76 a_{\text{H}_2\text{O}} = 4.76 \times 3.293875$$

$$= 15.678845 \text{ Kmol}$$

แต่เนื่องจากสมการข้างต้นที่ทำการหาค่าเป็นอากาศแห้ง แต่ในการทดลองไม่สามารถทำให้เป็นอากาศแห้งได้ เพราะฉะนั้นจะต้องทำการรวมเอาปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอากาศเข้าไปในสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงด้วย โดยที่จะทำการกำหนดสภาวะอากาศมาตรฐานดังนี้

อากาศมีอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-bulb temperature) เท่ากับ 33°C

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) เท่ากับ 53%

เพราะฉะนั้นทำการหาค่าความดันย่อยในอากาศที่สภาวะนี้ได้เท่ากับ

ทำการเปิดตาราง จะได้

$$P_{\text{sat}, \text{H}_2\text{O}} @ 33^\circ\text{C} = 5.0752 \text{ kPa}$$

$$\therefore P_{v, \text{air}} = \Phi_{\text{air}} P_{\text{sat}, \text{H}_2\text{O}} = 0.53 \times 5.0752$$

$$= 2.690 \text{ kPa}$$

จำนวนโมลของละอองน้ำในอากาศเท่ากับ

จากสูตร

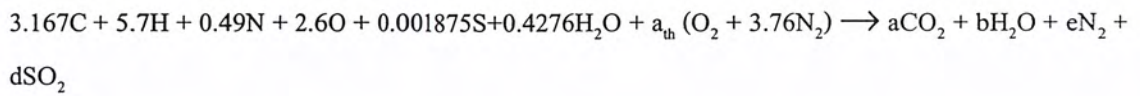
$$N_{v, \text{air}} = \left(\frac{P_{v, \text{air}}}{P_{\text{total}}} \right) N_{\text{total}}$$

$$N_{v, \text{air}} = \left(\frac{2.690 \text{ kPa}}{101.325 \text{ kPa}} \right) (15.678 + N_{v, \text{air}})$$

$$N_{v, \text{air}} = 0.4276 \text{ kmol}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการสมดุลสมการเคมี โดยเอาจำนวนโมลของละอองนำมาแทนลงในสมการ



$$C : 3.167 = a$$

$$H : 5.7 + (0.4276 \times 2) = 2b$$

$$\therefore b = 3.2776$$

$$S : 0.001875 = d$$

$$O : 2.6 + 0.419 + (a_{th} \times 2) = 2a + b + 2d$$

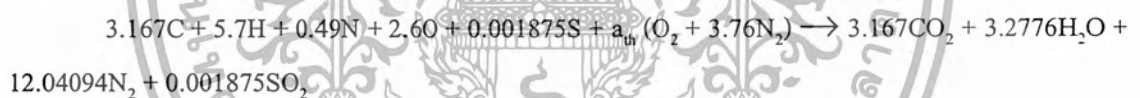
$$\therefore a_{th} = \frac{(2 \times 3.167) + 3.2776 + (2 \times 0.001875) - 2.6 - 0.428}{2}$$

$$= 3.2936$$

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

$$\therefore e = 12.40947$$

\therefore นำค่าที่ได้จากการ Balance สมการมาแทนค่า จะได้สมการการเผาทางทฤษฎีดังต่อไปนี้



จากสูตร

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{ratio} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}}$$

มวลของอากาศเท่ากับ

$$m_{air} = n_{air} \times MW_{air} = (n_{dryair} \times MW_{dryair}) + (n_{v,air} \times MW_{v,air})$$

$$m_{air} = 3.2936(4.76 \times 28.97) \text{ kmol} + (0.4276 \times 18) \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$= 461.875 \text{ kg}$$

มวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ

$$m_{fuel} = n_{fuel} \times MW_{fuel} = (n_C \times MW_C) + (n_H \times MW_H) + (n_N \times MW_N) + (n_O \times MW_O) + (n_S \times MW_S)$$

$$m_{fuel} = (3.167 \times 12) + (5.7 \times 1) + (0.049 \times 14) + (2.6 \times 16) + (0.001875 \times 32)$$

$$= 86.05 \text{ kg}$$

ดังนั้น $\left(\frac{A}{F}\right)_{ratio} = \frac{461.875}{86.05} = 5.368$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การคำนวณอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio Φ)

หาได้จากสูตร

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

Fule – rich mixture $\Phi > 1$ มีปริมาณเชื้อเพลิงมาก แต่ปริมาณอากาศน้อย

Stoichiometric mixture $\Phi = 1$ มีปริมาณอากาศที่ต้องใช้เท่ากับปริมาณอากาศที่ต้องใช้ทางทฤษฎี

Fule – lean mixture $\Phi < 1$ มีปริมาณเชื้อเพลิงน้อย แต่ปริมาณอากาศมาก

4.1.3 การคำนวณอัตราการใช้

การทดลองนี้ได้ทำการกำหนดอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min เพราะฉะนั้นจะต้องทำการหาอัตราการใช้ของอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ในทางทฤษฎี สามารถหาได้โดย (เมื่อ A/F ratio = 5.368)

ในการทดลองป้อนแกลบด้วยอัตราการใช้ = 0.3 kg/min

∴ จะใช้ปริมาณอากาศเท่ากับ = 0.3 x 5.368 kg/min

$$= 1.6104 \text{ kg/min}$$

$$= (1.6104/60) \text{ kg/s}$$

$$= 0.02684 \text{ kg/s}$$

การทดลองได้กำหนดให้มีการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนสมมูลที่ใช้กับการทดลองเพราะฉะนั้นจะต้องทำการหาอัตราการใช้ของอากาศที่แต่ละอัตราส่วนสมมูล โดยทำการกำหนดให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงให้มีค่าคงที่ สามารถหาได้จกสมการ

$$\Phi = \left(\frac{AF_{stoic}}{AF_{Act}} \right)$$

ที่ $\Phi = 0.8$ จะได้

$$0.8 = \left(\frac{5.368}{AF_{act}} \right)$$

$$AF_{act} = \frac{5.368}{0.8} \\ = 6.71$$

เพราะฉะนั้นที่อัตราส่วนสมมูล 0.8 และอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min สามารถอัตราการใช้ของอากาศได้เท่ากับ

$$\dot{m}_{air} = 6.71 \times \frac{0.3}{60} \text{ kg/s} \\ = 0.0336 \text{ kg/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Φ	Primary Air (kg/sec)			Secondary Air (kg/sec)		
	100%	85%	75%	0%	15%	25%
0.5	0.0536	0.0456	0.0402	0	0.008	0.0134
0.6	0.0447	0.00380	0.0335	0	0.0067	0.0111
0.7	0.0383	0.0325	0.0287	0	0.0057	0.0095
0.8	0.0366	0.0285	0.0252	0	0.0050	0.0084

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองกับอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min

4.1.4 การคำนวณหาความแตกต่างระดับน้ำในमानมิเตอร์

ทำการพิจารณาการไหลของแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min จากสมการที่นำมาใช้จะต้องทราบค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

อัตราการป้อนแกลบ $m_{fuel} = 0.3 \text{ kg/min}$

ความหนาแน่นของอากาศ $\rho_a = 1.184 \text{ kg/m}^3$

ความหนาแน่นของน้ำ $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศปฐมภูมิ $D_p = 0.0762 \text{ m.}$

เส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิสสำหรับท่ออากาศปฐมภูมิ $d_p = 0.04572 \text{ m.}$

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศทุติยภูมิ $D_s = 0.0508 \text{ m.}$

เส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิสสำหรับท่ออากาศทุติยภูมิ $d_s = 0.032 \text{ m.}$

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี $AF = 5.368$

Discharge Coefficient (จากภาคผนวก ข) $C_d = 0.62$

พื้นที่หน้าตัดของท่ออากาศปฐมภูมิ $A_p = \frac{\pi D_p^2}{4}$

$$= \frac{\pi \times (0.0762)^2}{4}$$

$$= 4.56 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

พื้นที่หน้าตัดของท่ออากาศทุติยภูมิ

$$A_s = \frac{\pi D_s^2}{4}$$

$$= \frac{\pi \times (0.0508)^2}{4}$$

$$= 2.027 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

ในการทดลองจะทำการคำนวณหาค่าความสูงของระดับน้ำในมานอมิเตอร์ที่ให้ ณ อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) ต่าง ๆ โดยทำการหาได้จากสมการ

$$\Phi = \frac{AF_{ac}}{AF_{th}}$$

สำหรับการทดลองนี้ได้กำหนดค่าอัตราส่วนสมมูลไว้เท่ากับ 0.5, 0.6, 0.7 และ 0.8 จากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง จะสามารถหาอัตราการไหลของอากาศได้ดังนี้ อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 1 kg/min ต้องใช้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 5.368 kg/min อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 0.3 kg/min ต้องใช้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.6104 kg/min หรือ อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.02684 kg/s

กรณีที่ 1 อัตราการไหลของอากาศปรุณภูมิ 100% อากาศทุติยภูมิ 0% อัตราส่วนสมมูล (Φ) เท่ากับ 0.8 จะสามารถคำนวณระดับน้ำในมานอมิเตอร์ของท่ออากาศปรุณภูมิได้เป็น

อัตราการไหลของอากาศปรุณภูมิจะเท่ากับ $0.02684 \times 1 \times \frac{1}{0.8} = 0.0336 \text{ kg/s}$

จากสมการ

เมื่อ

$$m_p = \frac{CA_{tp}}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{2\rho\Delta P}$$

$$A_{tp} = \frac{\pi d_p^2}{4} = \frac{\pi \times (0.04572 \text{ m})^2}{4}$$

$$= 1.642 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\beta = \frac{d_p}{D_p} = \frac{0.04572}{0.0762} = 0.6$$

ทำการแทนค่าจะได้ว่า

$$0.0336 \text{ kg/s} = \frac{0.62 \times 1.642 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{\sqrt{1-(0.6)^4}} \sqrt{2 \times 1.184 \text{ kg/m}^3 \times \Delta P}$$

$$0.0336 = \frac{1.018 \times 10^{-3}}{0.933} \sqrt{2.368 \times \Delta P}$$

$$948.30 = 2.368 \times \Delta P$$

$$\Delta P = 400.465 \text{ N/m}^2$$

จากสมการ

$$\Delta P = \rho g \Delta h$$

$$\therefore \Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า

$$\Delta h = \frac{400.465 \text{ N/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$\Delta h = 0.048 \text{ m.}$$

$$= 40.8 \text{ mm.}$$

กรณีที่ 2 อัตราการไหลของอากาศสปรูมภูมิ 85% , อากาศหตุยภูมิ 15% อัตราส่วนสมมูล (Φ) เท่ากับ 0.8 จะหาระดับน้ำในมานอมิเตอร์ของอากาศสปรูมภูมิได้เป็น

อัตราการไหลของอากาศสปรูมภูมิเท่ากับ $0.02684 \times 0.85 \times \frac{1}{0.8} = 0.02852 \text{ kg/s}$

แทนค่าลงในสมการจะได้เป็น

$$0.02852 \text{ kg/s} = \frac{0.62 \times 1.642 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{\sqrt{1 - (0.6)^4}} \sqrt{2 \times 1.184 \text{ kg/m}^3 \times \Delta P}$$

$$683.229 = 2.368 \times \Delta P$$

$$\Delta P = 288.526 \text{ N/m}^2$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

$$\Delta h = \frac{288.526 \text{ N/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$\Delta h = 0.02941 \text{ m.}$$

$$= 29.41 \text{ mm.}$$

ทำการหาระดับน้ำในมานอมิเตอร์ของอากาศหตุยภูมิ

อัตราการไหลของอากาศหตุยภูมิเท่ากับ $0.02684 \times 0.15 \times \frac{1}{0.8} = 5.0325 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

จากสมการ

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

โดยที่

$$A_{ts} = \frac{\pi d_s^2}{4} = \frac{\pi \times (0.032 \text{ m})^2}{4} = 8.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\beta = \frac{0.032}{0.0508} = 0.63$$

แทนค่าลงในสมการจะได้ว่า

$$5.0325 \times 10^{-3} \text{ kg/s} = \frac{0.62 \times 8.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{\sqrt{1 - (0.63)^4}} \sqrt{2 \times 1.184 \text{ kg/m}^3 \times \Delta P}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$5.0325 \times 10^{-3} \text{ kg/s} = \frac{4.98 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{0.918} \sqrt{2.368 \text{ kg/m}^3 \times \Delta P}$$

$$86.06 = 2.368 \times \Delta P$$

$$\Delta P = 36.342 \text{ N/m}^2$$

จากสมการ

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

จะได้

$$\Delta h = \frac{36.342 \text{ N/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$= 0.0037046 \text{ m.}$$

$$= 3.70 \text{ mm.}$$

กรณีที่ 3 อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 75% , อากาศทุติยภูมิ 25% และอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 จะหาระดับน้ำในमानมิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิได้เป็น

อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิเท่ากับ $0.02684 \times 0.75 \times \frac{1}{0.8} = 0.02516 \text{ kg/s}$

เพราะฉะนั้นทำการแทนค่าลงในสมการจะได้เป็น

$$0.02516 \text{ kg/s} = \frac{0.62 \times 1.642 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{\sqrt{1 - (0.6)^4}} \sqrt{2 \times 1.184 \text{ kg/m}^3 \times \Delta P}$$

$$\Delta P = 224.547 \text{ N/m}^2$$

ดังนั้นระดับในमानมิเตอร์เท่ากับ

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

$$\Delta h = \frac{224.547 \text{ N/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$= 0.02289 \text{ m.}$$

$$= 22.89 \text{ mm.}$$

อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิเท่ากับ $0.02684 \times 0.25 \times \frac{1}{0.8} = 8.3875 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

แทนค่าลงในสมการจะได้เป็น

$$8.3875 \times 10^{-3} \text{ kg/s} = \frac{0.62 \times 8.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{\sqrt{1 - (0.63)^4}} \sqrt{2 \times 1.184 \text{ kg/m}^3 \times \Delta P}$$

$$\Delta P = 100.95 \text{ N/m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาระดับน้ำในมอนอมิเตอร์ได้เท่ากับ

$$\begin{aligned}\Delta h &= \frac{100.95 \text{ N/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2} \\ &= 0.01029 \text{ m.} \\ &= 10.29 \text{ mm.}\end{aligned}$$

Φ	Δh Primary Air (mm.)			Secondary Air (mm.)		
	100%	85%	75%	0%	15%	25%
0.5	104.19	75.28	58.61	0	9.48	26.30
0.6	72.35	52.27	40.70	0	6.58	18.29
0.7	53.04	38.19	29.90	0	4.83	13.44
0.8	40.8	29.41	22.89	0	3.70	10.29

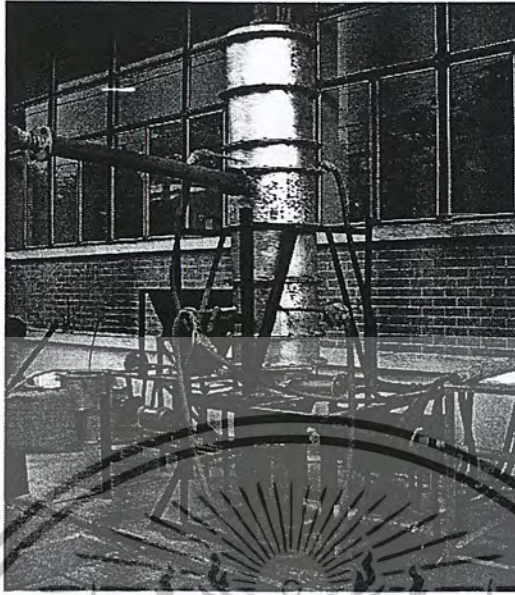
ตารางที่ 4.4 แสดงความสูงของระดับน้ำในมอนอมิเตอร์ของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิที่อัตราการป้อน
 แกลบเท่ากับ 0.3 kg/min



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวัด

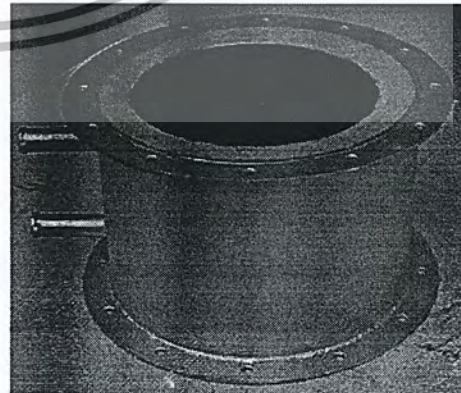
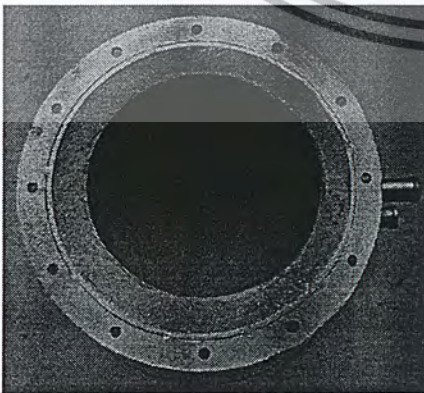
อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตาเผาแลกเปลี่ยนเป็นส่วนต่างๆได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 เตาเผาแลกเปลี่ยนฟลูอิดได้ชนิดแบบอากาศหมุนวน

4.2.1 ห้องเผาไหม้

ประกอบไปด้วยโครงสร้างเหล็กทำเป็นลักษณะวงแหวนซ้อนกันอยู่ โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของวงแหวนวงในสุดมีค่าเท่ากับ 300 มิลลิเมตร เหล็กมีความหนา 6 มิลลิเมตร ระหว่างวงแหวนจะมีปูนทนไฟซึ่งมีความหนา 40 มิลลิเมตร วงแหวนภายนอกจะเป็นเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 392 มิลลิเมตร โดยใช้เหล็กหนา 4.5 มิลลิเมตร ด้านข้างจะมีท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร สำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อวัดอุณหภูมิ 2 ท่อด้วยกัน ห้องเผาไหม้มีความสูง 300 มิลลิเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 4.2

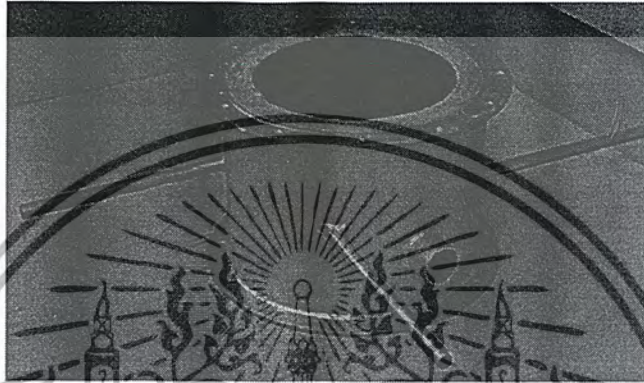


รูปที่ 4.2 ห้องเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ห้องอุ้มนวด

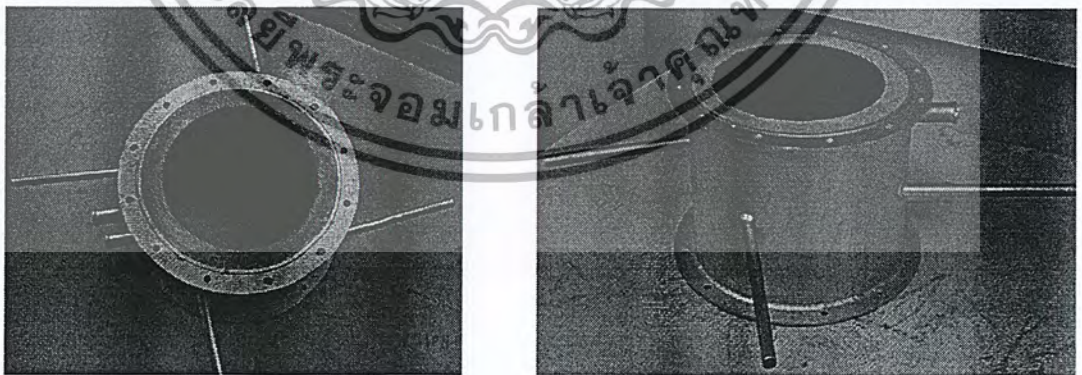
ประกอบด้วยโครงสร้างเหล็กทำเป็นวงแหวนซ้อนกันอยู่ คล้ายห้องเผาไหม้ มีขนาดความสูง 300 มิลลิเมตร ระหว่างชั้นของวงแหวนจะมีปูนทนไฟซึ่งมีความหนา 40 มิลลิเมตร แต่จะมีความแตกต่างจากห้องเผาไหม้คือ มีท่อขนาดเล็ก 4 ท่อซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร วางห่างกัน 90 องศา เพื่อที่จะให้อากาศเข้าไปตามแนวสัมผัสเพื่อที่จะทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศ (Cyclone) และช่องใส่หัวเผาสำหรับอุ้มนวด แสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ห้องอุ้มนวด

4.2.3 ห้องเผาไหม้ที่มีระบบป้อนอากาศทุติยภูมิ

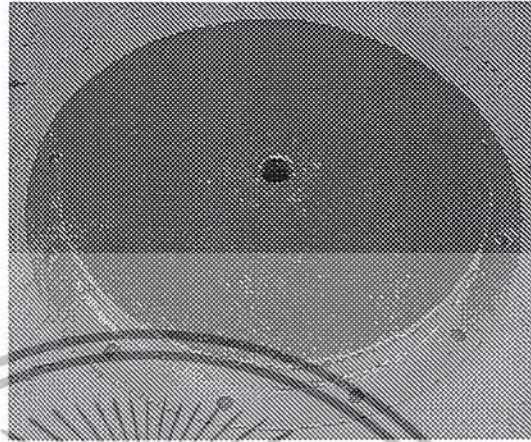
มีลักษณะเหมือนห้องเผาไหม้ จะต่างกันก็เพียงแต่มีท่อขนาดเล็ก 4 ท่อซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร วางห่างกัน 90 องศา เพื่อที่จะให้อากาศเข้าไปตามแนวสัมผัสเพื่อที่จะทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศ (Cyclone) แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ระบบป้อนอากาศทุติยภูมิ

4.2.4 ผ่าครอบเตา

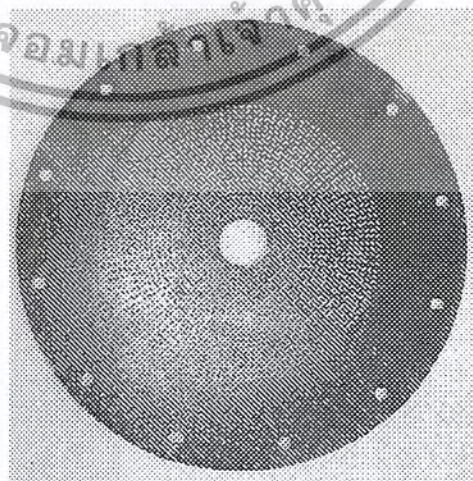
เป็นส่วนที่อยู่ด้านบนสุดของเตา ฐานของฝามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 481 มิลลิเมตร ระหว่างชั้นของฝาจะมีป็นทนไฟ แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผ่าครอบ

4.2.5 แผ่นกระจายลม

ทำหน้าที่คือเป็นอุปกรณ์ป้องกันเพื่อไม่ให้อนุภาคหลุดลงมาด้านล่างและสามารถให้ของไหลไหลผ่านได้ โดยสามารถกระจายของไหลออกได้เต็มพื้นที่ผิวหน้าตัดของตัวเครื่อง โดยที่ความเร็วของของไหลที่เหนือแผ่นกระจายของไหลควรมีค่าเท่ากันทุกจุด เป็นแผ่นเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 481 มิลลิเมตร ตรงกลางเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตรตามแนวเส้นรอบวง เป็นลักษณะของแผ่นกระจายลมแบบเจาะหลายรู แสดงได้ดังรูปที่ 4.6



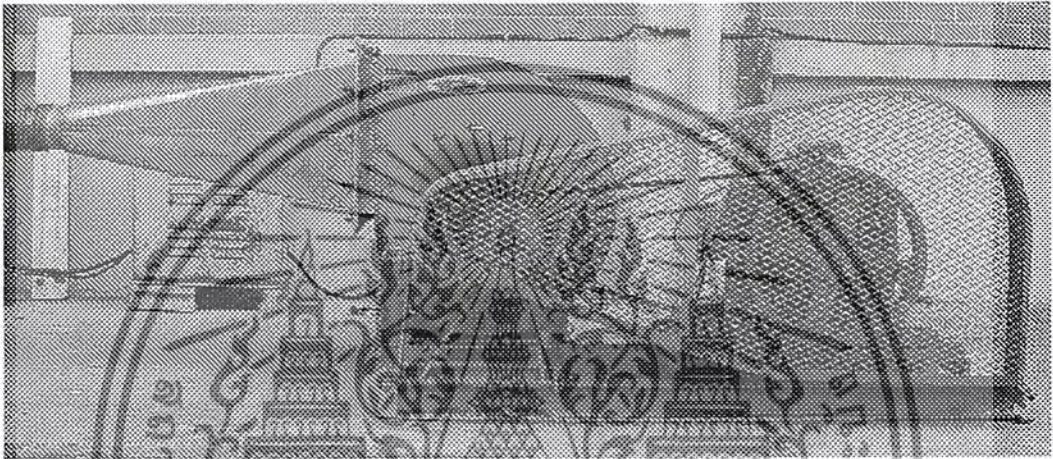
รูปที่ 4.6 แผ่นกระจายลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 ระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ (Primary air and Secondary air)

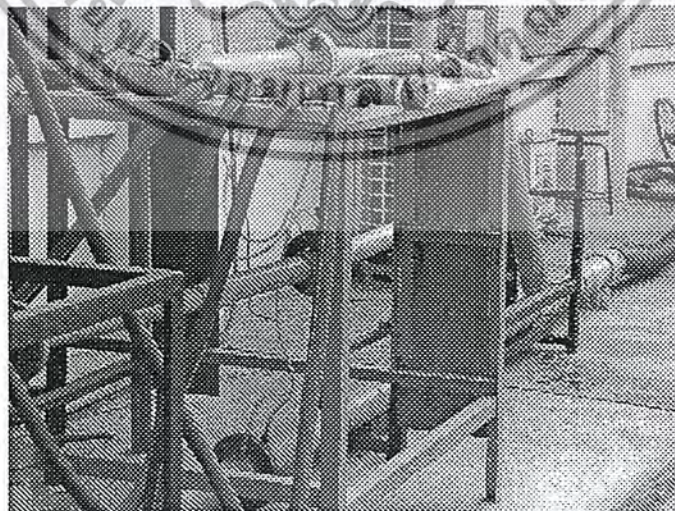
อากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาจะแยกออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ อากาศปฐมภูมิถูกป้อนพร้อมกับเชื้อเพลิงทางด้านล่างของเตาเผา และอากาศทุติยภูมิถูกป้อนทางด้านข้างของเตาเผาในแนวสัมผัส โดยอากาศทั้งสองส่วน ได้จาก Blower ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

Blower ใช้มอเตอร์ขนาด 10 Hp เป็นแบบใบพัดคู่ของ EBBARA FAN สามารถป้อนอากาศให้มีอัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ $100 \text{ m}^3/\text{min}$ ความดันสูงสุดเท่ากับ 200 mm.Aq และความเร็วรอบเท่ากับ 4050 min^{-1} ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ

4.2.7 ชุดป้อนอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิที่ประกอบด้วยชุดออริฟิส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8

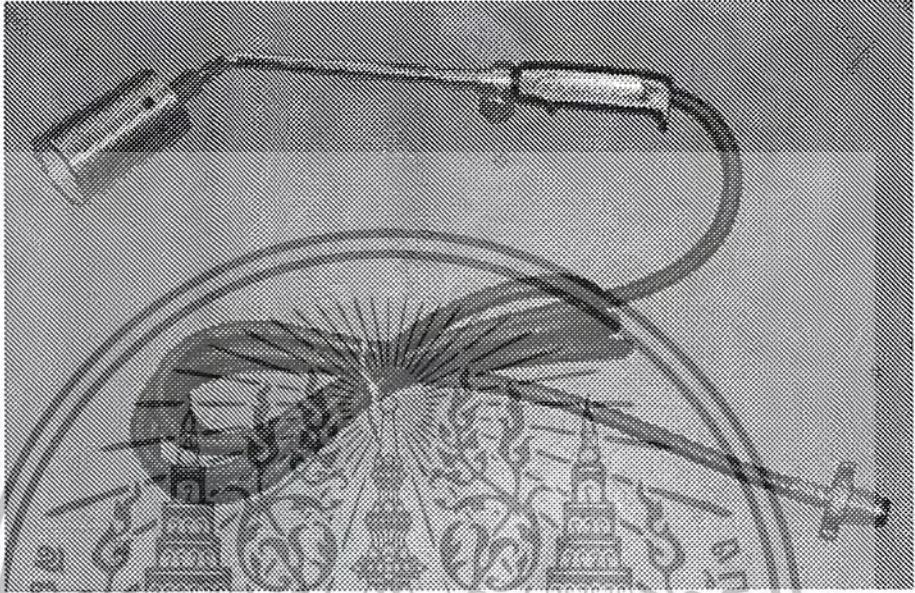


รูปที่ 4.8 ชุดป้อนอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิที่ประกอบด้วยชุดออริฟิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 หัวเผา (Burner)

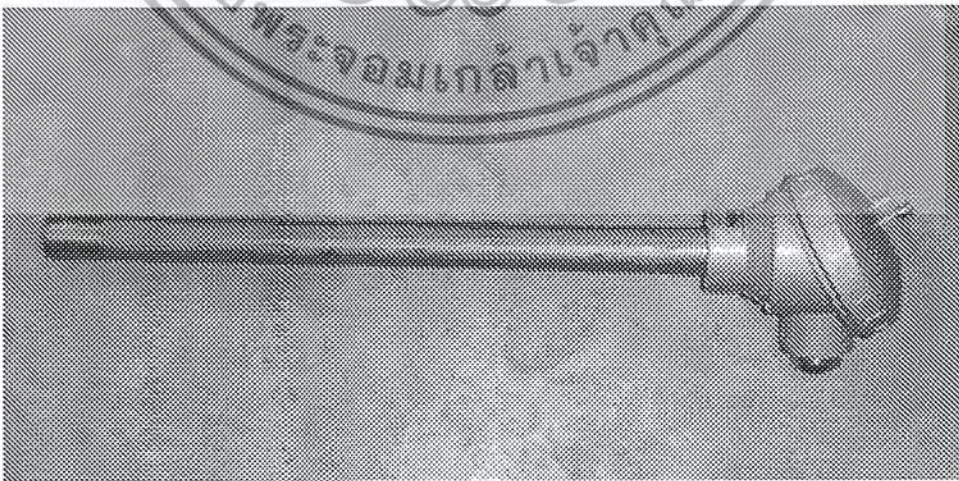
ใช้สำหรับอุ่นเตา ยี่ห้อ KAWAGUCHI โดยปลายสายจะต่อเข้ากับถังก๊าซ ซึ่งมีลักษณะ
 ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 หัวเผา

4.2.9 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิภายในเตา โดยเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็น Type K
 ยี่ห้อ MAXTHERMO วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0 - 1200 องศาเซลเซียส มีลักษณะดังรูปที่ 4.10

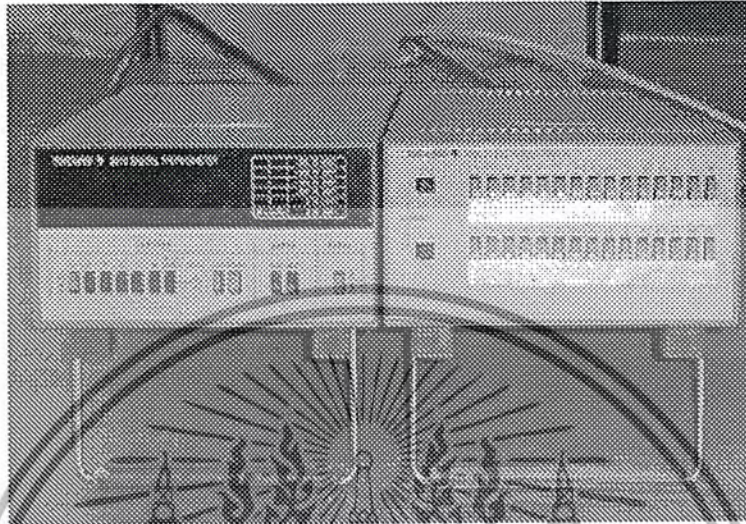


รูปที่ 4.10 เทอร์โมคัปเปิล Type K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.10 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Digital Indicator)

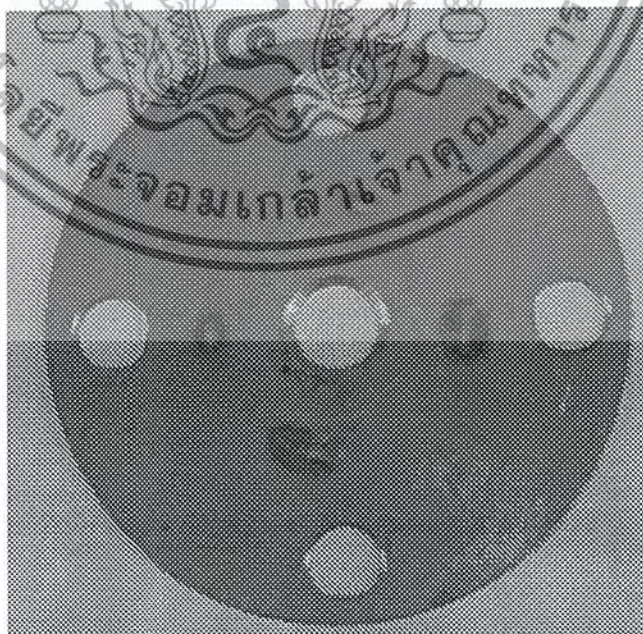
เป็นอุปกรณ์แสดงผลการวัดอุณหภูมิ ยี่ห้อ YOKOGAWA 2815 MULTICHANEL SWITCH แสดงผลได้ระหว่าง 0- 1200 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 Digital indicator

4.2.11 แผ่นออริฟิส

ใช้ในการวัดอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ ใช้ตามมาตรฐาน ANSI/API 2530

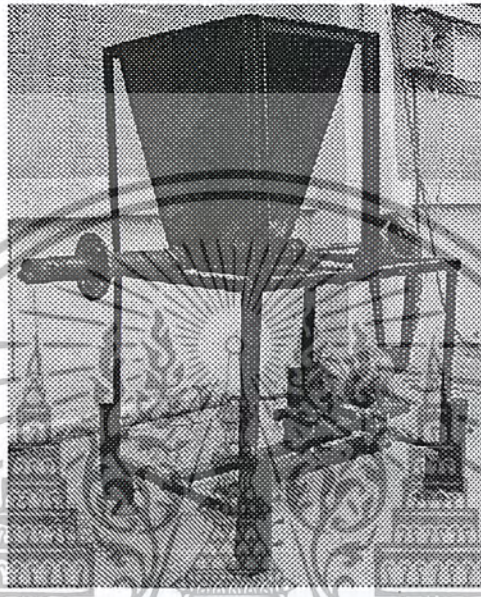


รูปที่ 4.12 แผ่นออริฟิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

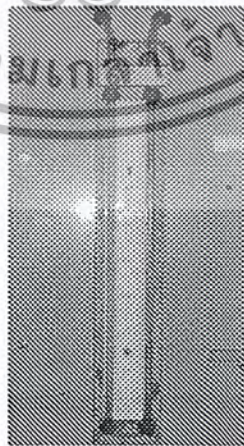
4.2.12 ระบบป้อนเกลบ

แบ่งเป็นสองส่วน ด้านบนเป็นโครงเหล็กทำเป็นสี่เหลี่ยมเอาไว้สำหรับเก็บเกลบ ด้านล่างทำเป็นกรวยสี่เหลี่ยม ทำการป้อนเกลบโดยใช้สกรูในการขนส่ง (Screw feed) โดยอัตราการป้อนเกลบ 0.2 กิโลกรัม/นาที่ โดยใช้มอเตอร์ขนาด 0.2 กิโลวัตต์ 3 เฟส 1 ตัว พร้อมกับอินเวอร์เตอร์ไว้ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 เครื่องป้อนเกลบ

4.2.13 มานอมิเตอร์



รูปที่ 4.14 มานอมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.14 ถังก๊าซ

เป็นถังก๊าซที่ใช้สำหรับอุ่นเตาโดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจี โดยถังมีน้ำหนักสุทธิ 15 กิโลกรัม แสดงได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ถังก๊าซ

4.2.15 ไซโคลน

เป็นหอเหวี่ยงแยกฝุ่นจากการเผาไหม้ โดยต่อจากปล่องทางออกของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด จะมีพัดลมช่วยดูดไอเสีย ลักษณะของไซโคลนแสดงได้ดังรูปที่ 4.16

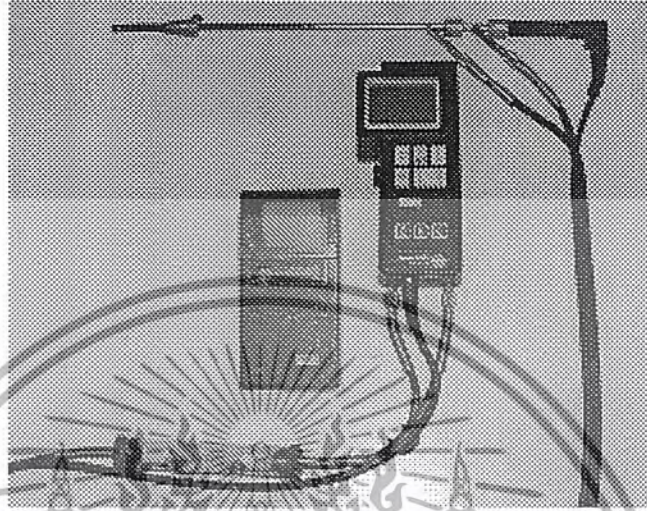


รูปที่ 4.16 ไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.216 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลองสามารถวิเคราะห์ค่าปริมาณของแก๊สต่างๆที่ออกมาด้วยเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย TESTO 342-1 ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย TESTO 342-1

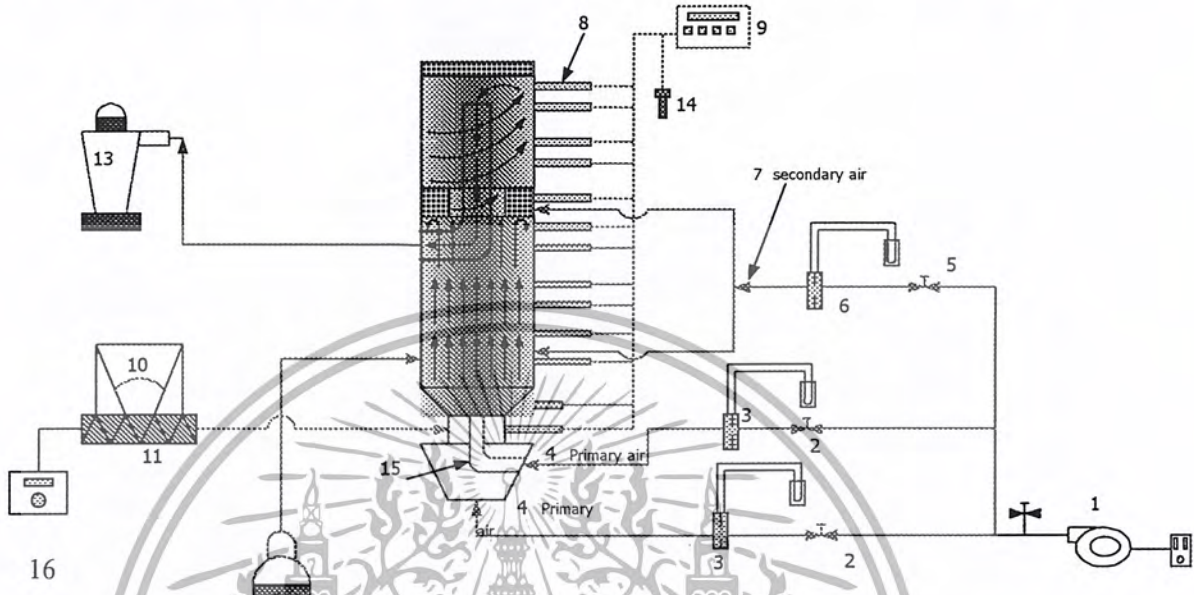
4.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองจะต้องทำการเตรียมอุปกรณ์การทดลองให้เรียบร้อย โดยทำการกำหนด ซึ่งสามารถเขียนเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. ทำการอุ่นเตาโดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซ LPG จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตามีค่าประมาณ $400-450^{\circ}\text{C}$ จากนั้นทำการป้อนเชื้อเพลิงแกลบพร้อมกับอากาศส่วนที่ 1 เข้าสู่ห้องเผาไหม้จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาประมาณ $700-750^{\circ}\text{C}$ แล้วทำการดับหัวเผาและนำหัวเผาออกจากเตา
2. ป้อนเชื้อเพลิงแกลบให้มีอัตราการไหลเท่ากับ 0.3 kg/min
3. หลังจากอุ่นเตาแล้วทำการปรับอัตราการไหลของอากาศและอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ $(\Phi)0.8$
4. ปรับรับอัตราการไหลของอากาศให้ค่า equivalence ratio เท่ากับ 0.8 และปรับอัตราส่วนของแกลบเท่ากับ 0.3 kg/mm
5. บันทึกค่าอุณหภูมิภายในเตาของเทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1-5 ตามแนวแกนที่ตำแหน่ง $x = 0.225\text{ m.}, 0.375\text{ m.}, 0.525\text{ m.}, 0.675\text{ m.}$ และ 0.825 m. ที่ระยะ $r/R = 0.2$ และที่เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6-11 ตามแนวแกนที่ตำแหน่ง $x = 0.975\text{ m.}, 1.125\text{ m.}, 1.425\text{ m.}, 1.575\text{ m.}$ และ 1.725 m. ที่ระยะ $r/R = 0.25$ บันทึกค่าของอุณหภูมิทุก 3 นาที จำนวน 3 ครั้ง
6. วัดค่าไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ สังเกตลักษณะสีเต้าและควันที่ได้จากการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 5 ตามแนวแกนที่ระยะ $r/R = 0.40, 0.60, 0.80,$ และ 1.0 ตามลำดับ ที่ความสูงตามแนวแกนที่ตำแหน่ง $x = 1.125$ m วัดที่ระยะ $r/R = 0.25, 0.40$ และ 0.50 ตามลำดับ
- 8. ทำการทดลองตามข้อที่ 4-7 โดยทำการปรับอัตราส่วนของ λ เท่ากับ 0.15 และ 0.25 ตามลำดับ
- 9. ทำการทดลองตามข้อที่ 4-8 โดยปรับค่า equivalence ratio เท่ากับ $0.7, 0.6$ และ 0.5 ตามลำดับ



- (1) Blower (2) Gate valve of Primary air (3) Manometer and Orifice plate of Primary air
- (4) Primary air (5) Gate valve of Secondary air (6) Manometer and Orifice plate of Secondary air
- (7) Secondary air (8) Thermocouple Type K (9) Digital indicator (10) Hopper
- (11) Screw feeder (12) LPG supply (13) Cyclone (14) Thermocouple Type J
- (15) ท่อลำเลียงแกลบ (16) Inverter แบบสเกล

รูปที่ 4.18 โต๊ะแกมรูปกรณ์การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์

5.1 บทนำ

จากที่ได้ทำการทดลองที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ในการทดลองนี้มุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาถึงผลการเผาไหม้ของเตาฟลูอิดไดเซคแบบอากาศหมุนวน ที่มีชุดคอคอดคั่นระหว่างกลางของช่วงฟลูอิดไดเซคกับวอร์เทค อัตราส่วนของปริมาณการไหลของอากาศตุนภูมิต่อปริมาณการไหลของอากาศทั้งหมด (λ) และอัตราส่วนสมมูล (Φ) ที่มีความเหมาะสมต่อการเผาไหม้ โดยพิจารณาจาก การกระจายอุณหภูมิภายในเตาฟลูอิดไดเซคแบบอากาศหมุนวน ถ้าวัดที่ได้จากการเผาไหม้ โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง กำหนด ดังนี้

1. อัตราป้อนแกลบ 0.3 kg/min
2. อัตราส่วนสมมูล (Φ) เท่ากับ 0.5, 0.6, 0.7 และ 0.8
3. อัตราส่วนอากาศตุนภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) = 0.00, 0.15 และ 0.25

ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสามารถวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาและปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ดังต่อไปนี้

5.2 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล (Φ)

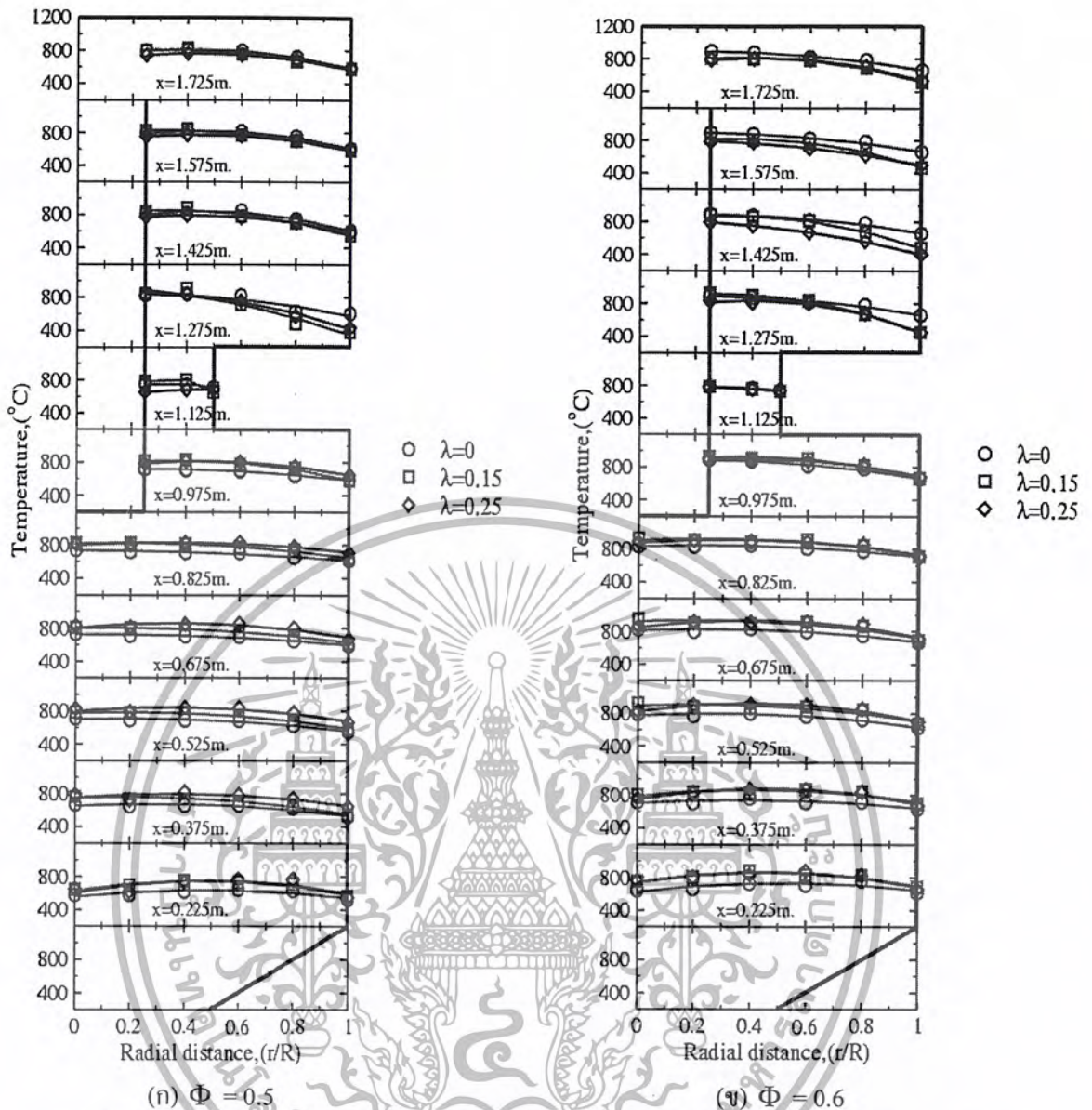
จากการศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วนสมมูล (Φ) ที่ค่าอัตราป้อนแกลบ 0.3 kg/min ที่ค่าอัตราส่วนอากาศตุนภูมิต่ออากาศทั้งหมด (λ) ต่างๆ ได้ผลดังต่อไปนี้

5.2.1 อิทธิพลของ (Φ) = 0.5 ที่ค่า $\lambda = 0.00, 0.15$ และ 0.25

พิจารณาจากรูปที่ 5.1(ก) ที่ (Φ) = 0.5 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาฟลูอิดไดเซคแบบอากาศหมุนวนส่วนแรกเป็นแบบฟลูอิดไดเซค การกระจายอุณหภูมิมีค่าสม่ำเสมอ ส่วนที่สองเป็นแบบวอร์เทคอุณหภูมิกึ่งกลางเตาสูงและอุณหภูมิลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนังเตา พิจารณาผลกระทบของอากาศส่วนที่สองที่ค่าที่กำหนดไว้ คือ $\lambda = 0.00, 0.15$ และ 0.25 ที่ห้องเผาไหม้ส่วนฟลูอิดไดเซค เมื่อค่า λ เพิ่มขึ้น การกระจายอุณหภูมิจึงจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในส่วนของวอร์เทคมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิล็กน้อย

เมื่อวิเคราะห์ผลของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ พิจารณาจากรูปที่ 5.3 เส้นกราฟที่ค่า $\Phi = 0.5$ และ $\lambda = 0.00$ มีปริมาณของ CO = 193 ppm ซึ่งน้อยกว่าค่า λ อื่นๆ เป็นผลเนื่องจาก O₂ สามารถมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับ C มากกว่าในกรณีอื่นๆจากรูป 5.4 สังเกตจากกราฟที่ $\Phi = 0.5$ และ $\lambda = 0.00$ มีปริมาณของ CO₂ = 9.1 % ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกว่า O₂ สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับ C ได้มากกว่ากรณี λ ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 0.3 kg/min

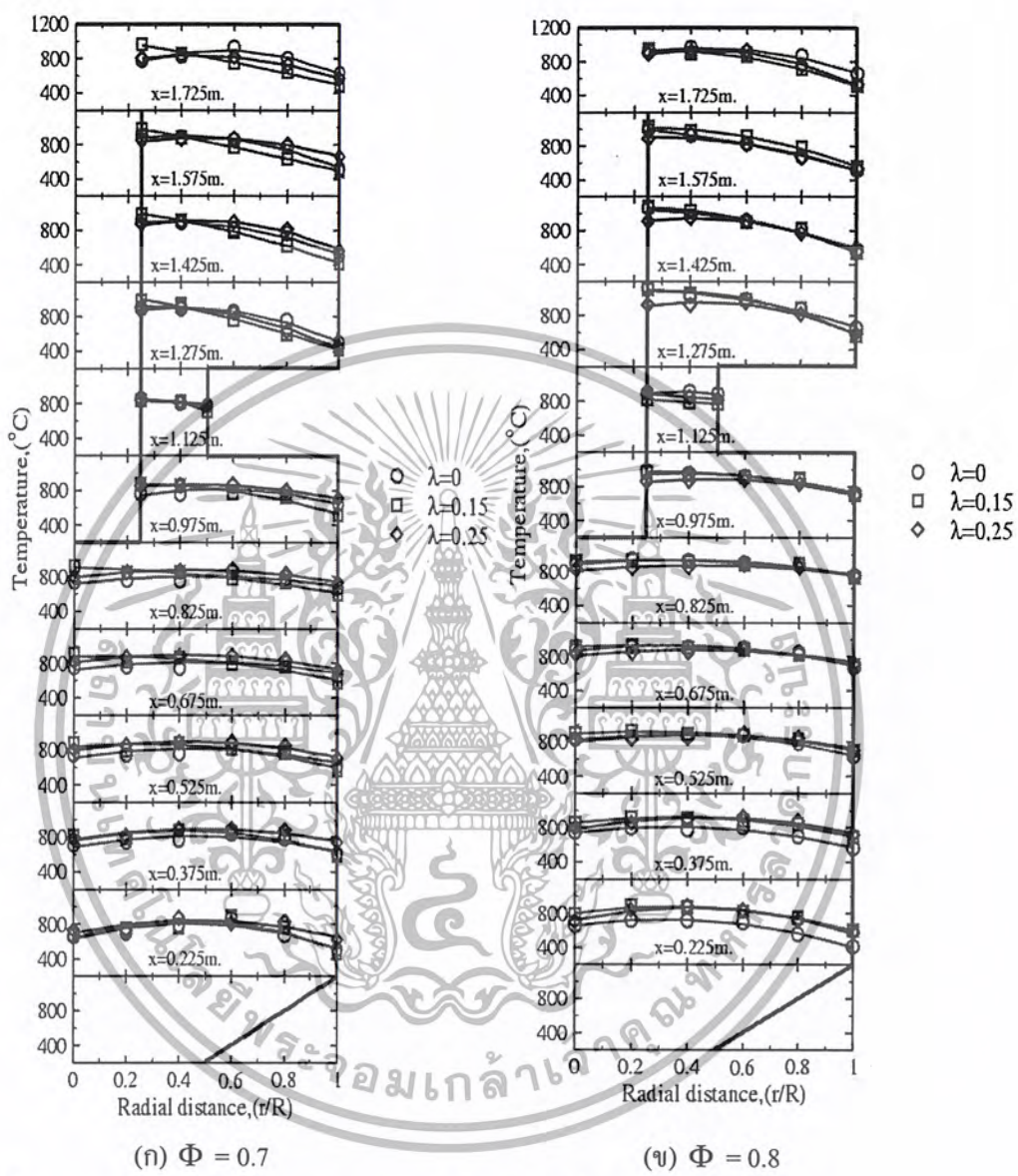
อื่นๆ พิจารณารูปที่ 5.5 ที่ค่า $\Phi = 0.5$ และ $\lambda = 0.00$ มีปริมาณของ $O_2 = 11.9\%$ ซึ่งเป็นค่า O_2 ที่เหลือหลังจากทำการเผาไหม้แล้วสามารถบ่งบอกได้ว่า O_2 สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้มากกว่ากรณีค่า λ อื่นๆ ซึ่งผลการวิเคราะห์ไอเสียทั้งหมดบ่งบอกได้ว่าเมื่อมีการแบ่งอากาศส่วนที่สองเกิดขึ้น ทำให้อุณหภูมิสูงแต่ไอเสียกลับมีค่ามากขึ้นด้วย

5.2.2 อิทธิพลของ $\Phi = 0.6$ ที่ค่า $\lambda = 0.00, 0.15$ และ 0.25

พิจารณาจากรูปที่ 5.1(ข) ที่ค่า $\Phi = 0.6$ ผลของการกระจายอุณหภูมิที่ $\lambda = 0$ ในส่วนของฟลูอิดไคซ์เบดอุณหภูมิต่ำ เพราะจะมีการเผาไหม้น้อยเพราะมีลมค่อนข้างแรงทำให้เชื้อเพลิงหลุดลอยไปเผาไหม้ในส่วนของวอร์เทค การกระจายอุณหภูมิที่ $\lambda = 0.25$ ในส่วนของเตาวอร์เทคอุณหภูมิต่ำกว่าที่ $\lambda = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะมีเวลาการเผาไหม้ในส่วนฟลูอิด ไคซ์เบคมากกว่าจึงทำให้เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดในส่วนของฟลูอิด ไคซ์เบคหลุดขึ้นมาเผาไหม้ในส่วนของวอร์เทคน้อย



รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 0.3 kg/m

พิจารณาผลของไอเสียที่ค่า $\Phi = 0.6$ ที่ค่า λ ต่างจากรูปที่ 6.3 ที่ค่า $\Phi = 0.6$ และ $\lambda = 0.15$ มีปริมาณของ CO = 102 ppm ซึ่งน้อยกว่าทุกกรณีของ λ ต่างๆพิจารณารูปที่ 5.4 ที่ค่า $\Phi = 0.6$ และ $\lambda = 0.15$ มีปริมาณของ CO₂ = 8.8 % เป็นค่าที่มากที่สุดของกรณีค่า λ ต่างๆแสดงถึงความสามารถในการเผาไหม้ที่ดีของกรณีนี้ จากรูปที่ 5.5 ก็มีปริมาณของ O₂ เท่ากับ 12.3

5.2.3 อิทธิพลของ $\Phi = 0.7$ ที่ค่า $\lambda = 0.00, 0.15$ และ 0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาการกระจายอุณหภูมิจากรูปที่ 5.2(ก) ที่ค่า $\Phi = 0.7$ และค่า λ ต่างๆ สังเกตจากรูปการกระจายอุณหภูมิในส่วนของเตาฟลูอิดไคซ์เบคมีการกระจายอุณหภูมิใกล้เคียงกันทุกค่า λ ในส่วนของวอร์เทคอุณหภูมิมีความแตกต่างกันมากกว่าในส่วนของฟลูอิดไคซ์เบค

พิจารณาผลการวิเคราะห์ไอเสียที่ค่า $\Phi = 0.7$ และ $\lambda = 0.25$ เป็นสถานะที่มีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่าง O_2 กับ C ได้มากกว่ากรณีค่า λ ค่าอื่นซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 5.3, 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ

5.2.4 อิทธิพลของ $\Phi = 0.8$ ที่ค่า $\lambda = 0.00, 0.15$ และ 0.25

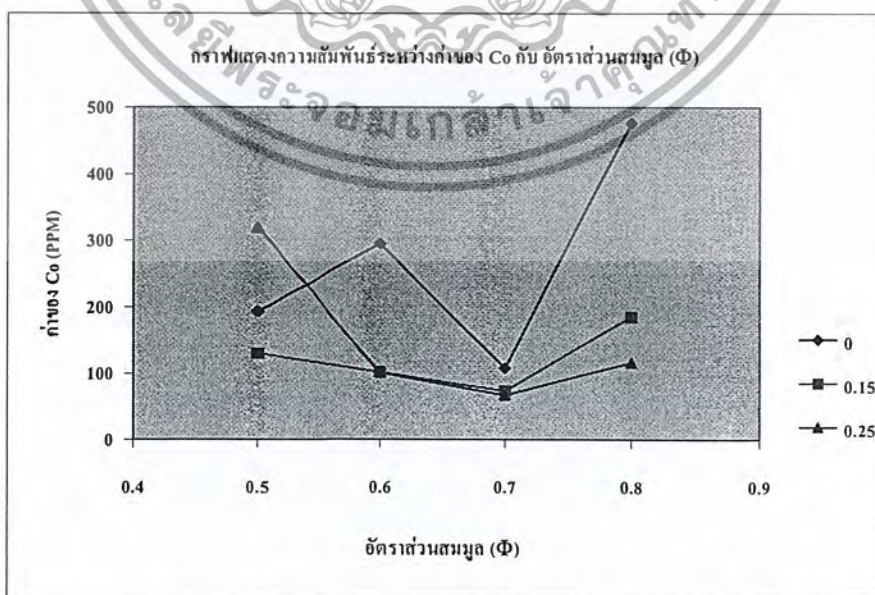
พิจารณาจากรูปที่ 5.2(ข) การกระจายอุณหภูมิที่ $\Phi = 0.8$ ในส่วนของฟลูอิดไคซ์เบคในช่วงแรก

ที่ $\lambda = 0$ อุณหภูมิค่อนข้างต่ำกว่า $\lambda = 0.15$ และ 0.25 ในช่วงถัดมาอุณหภูมิ λ ต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันในส่วน

ของวอร์เทคมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันทุกค่า λ พิจารณาผลการวิเคราะห์ไอเสียที่ค่า $\Phi = 0.8$ มีผลเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันกับกรณี $\Phi = 0.7$ ทุกๆค่าของ λ แต่มีปริมาณของก๊าซไอเสียออกมามากกว่ากรณี $\Phi = 0.7$ จัดเป็นสถานะที่ไม่เหมาะสมสำหรับเตาในลักษณะนี้

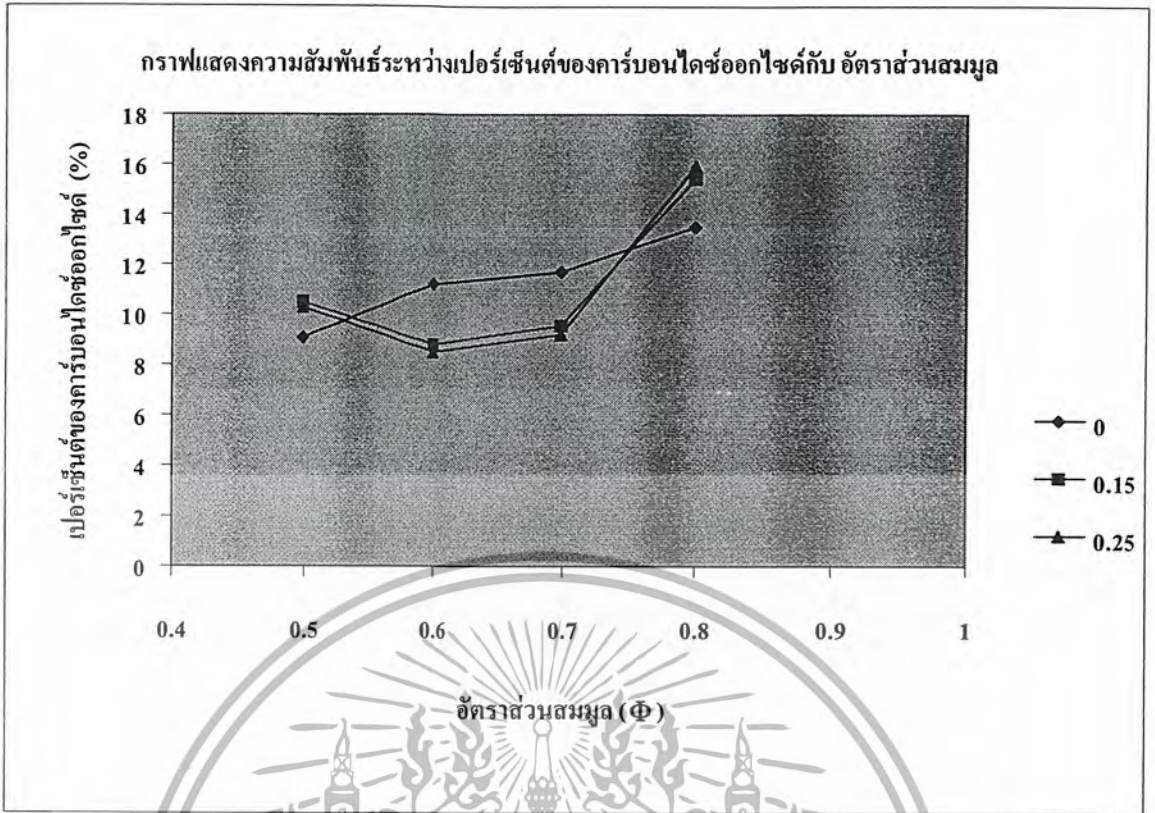
5.3 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผนังห้องผสม

พิจารณาจากรูปที่ 5.6 อุณหภูมิที่ห้องผสมมีค่าต่ำที่ Φ น้อยๆเมื่อค่า Φ เพิ่มขึ้นอุณหภูมิก็มีแนวโน้มสูงตามขึ้นไปด้วยเนื่องจากปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งมีค่าลดลงเมื่อค่า Φ เพิ่มขึ้น พิจารณาที่ค่า λ ต่างๆเมื่อค่า λ เพิ่มขึ้นอุณหภูมิก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เป็นผลเนื่องจากการแบ่งอากาศออกเป็นสองส่วนทำให้อากาศส่วนที่หนึ่งลดลง ในส่วนของอุณหภูมิห้องผสมนี้หากมีค่าสูงเกินไปทำให้เกิดการลุกไหม้เร็วเกินไปไม่เป็นผลดีต่อการกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และทำให้เกิดไฟย้อนกลับเข้าไปในชุดป้อนทำให้เกิดการลุกไหม้ใน Hopper

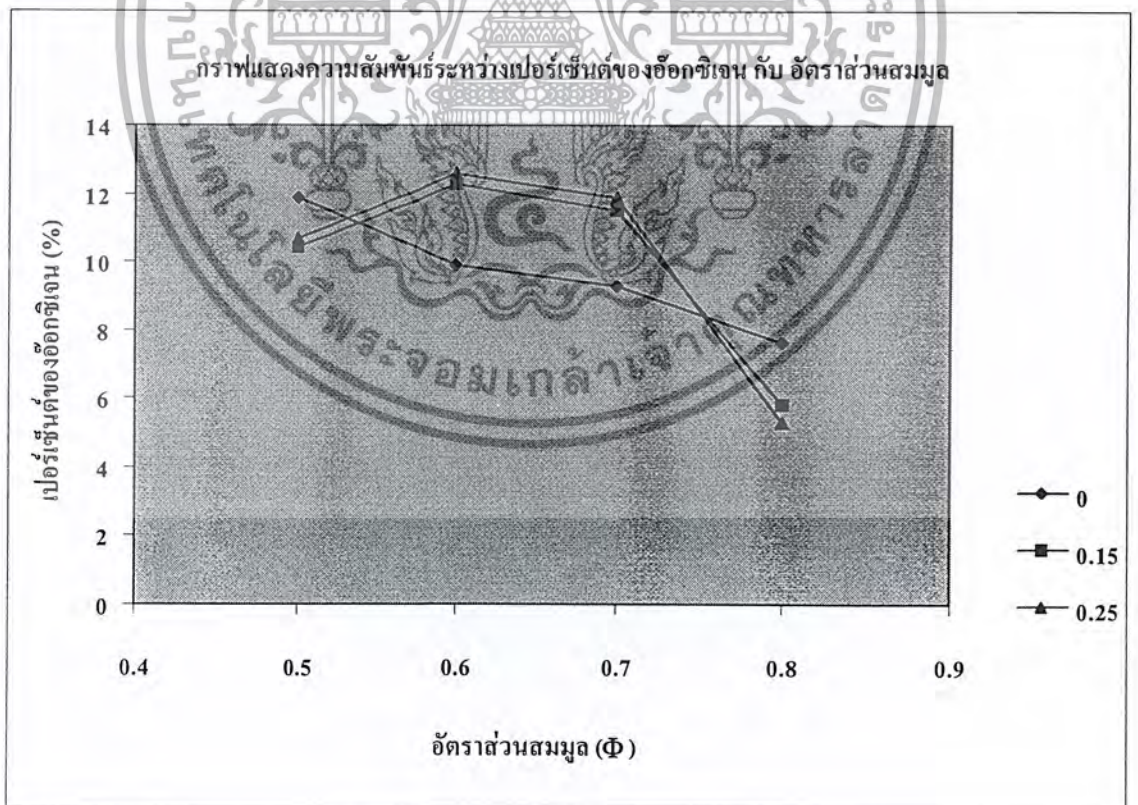


รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซ CO กับ λ ที่อัตราส่วนสมมูล (Φ) ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

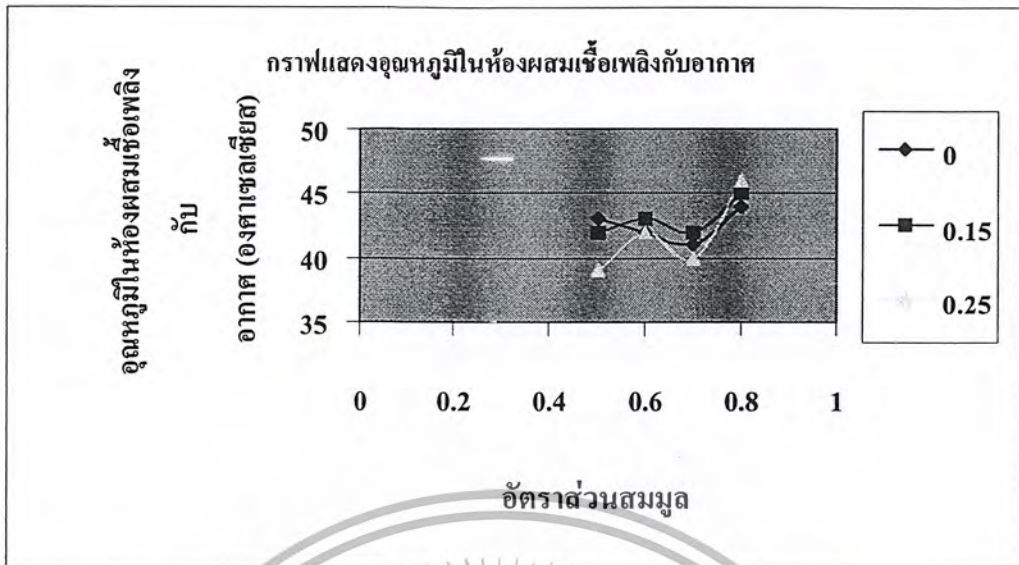


รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซ CO_2 กับ λ ที่อัตราส่วนสมมูล (Φ) ต่างๆ

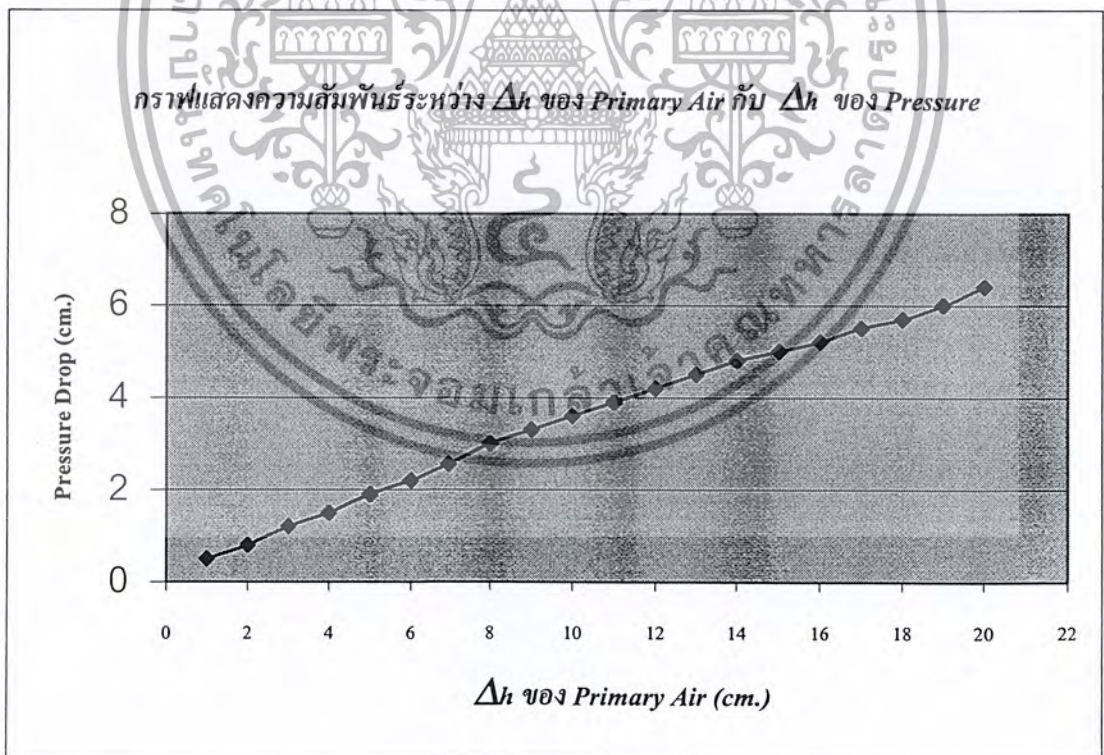


รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซ O_2 กับ λ ที่อัตราส่วนสมมูล (Φ) ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

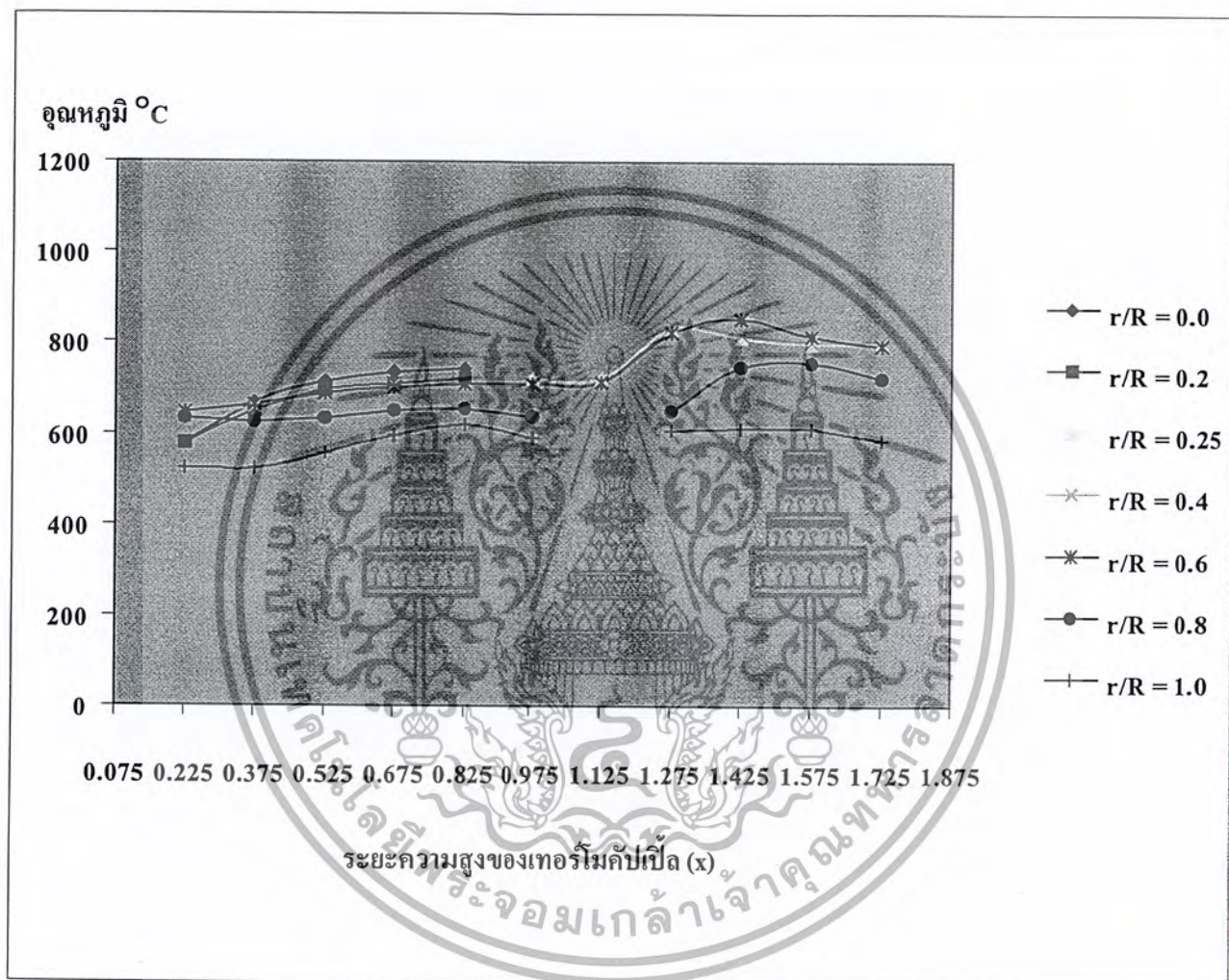


รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิห้องผสม ($^{\circ}\text{C}$) กับอัตราส่วนสมมูล (Φ) ที่ค่า λ ต่างๆ



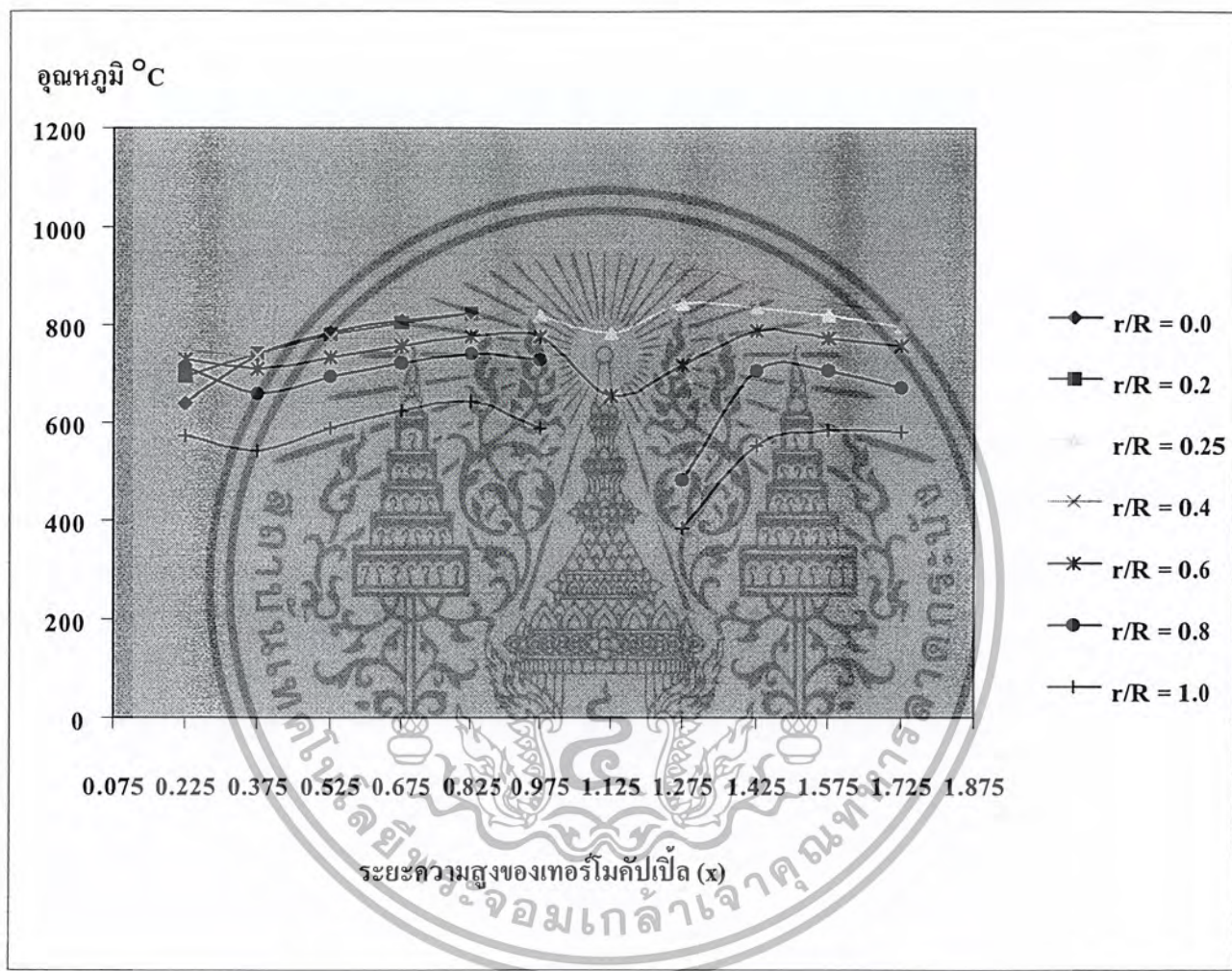
รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหลของอากาศกับ Δh Pressure drop ภายใน เต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



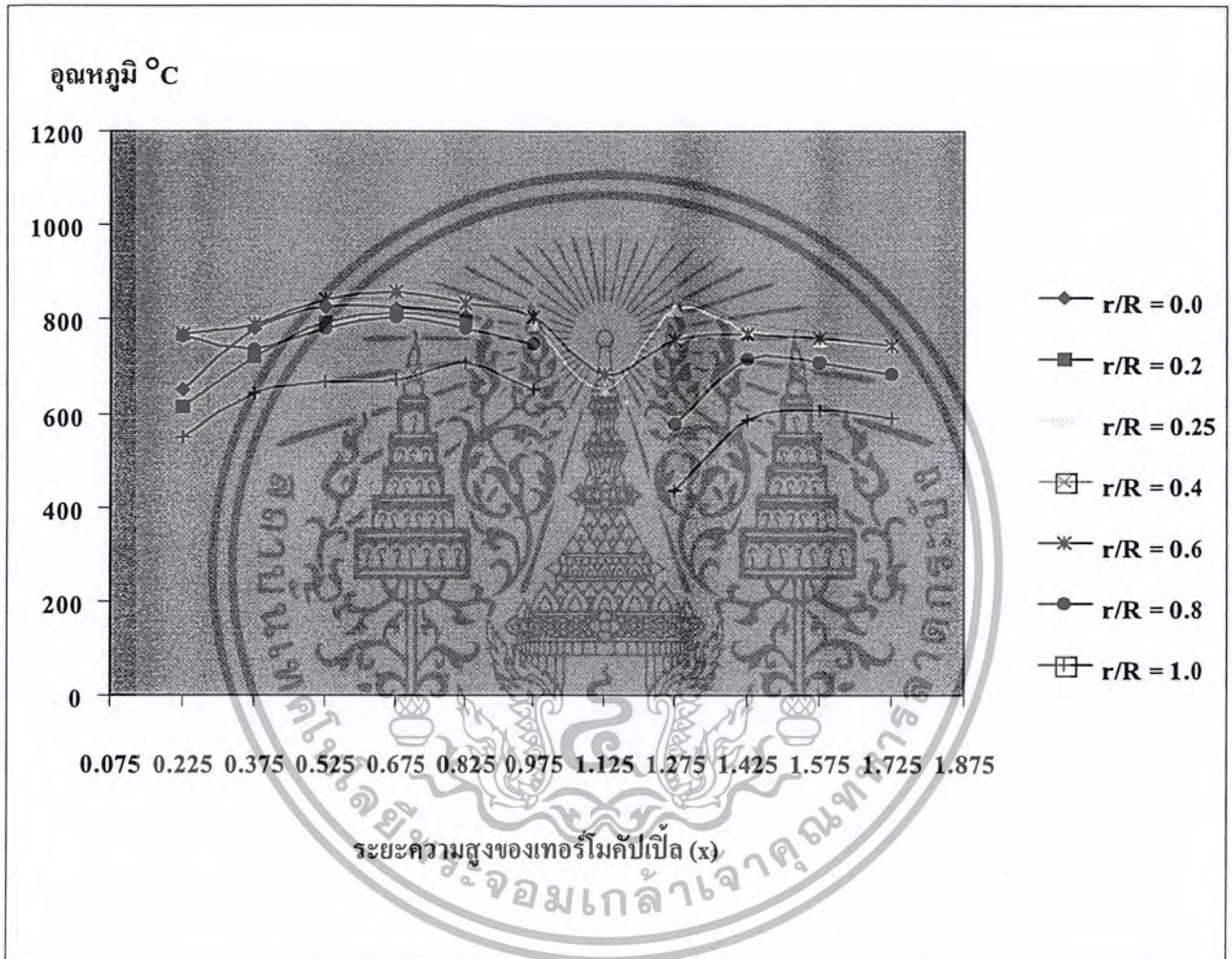
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.5 อากาศปฐมภูมิ 100% และอากาศทุติยภูมิ 0%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



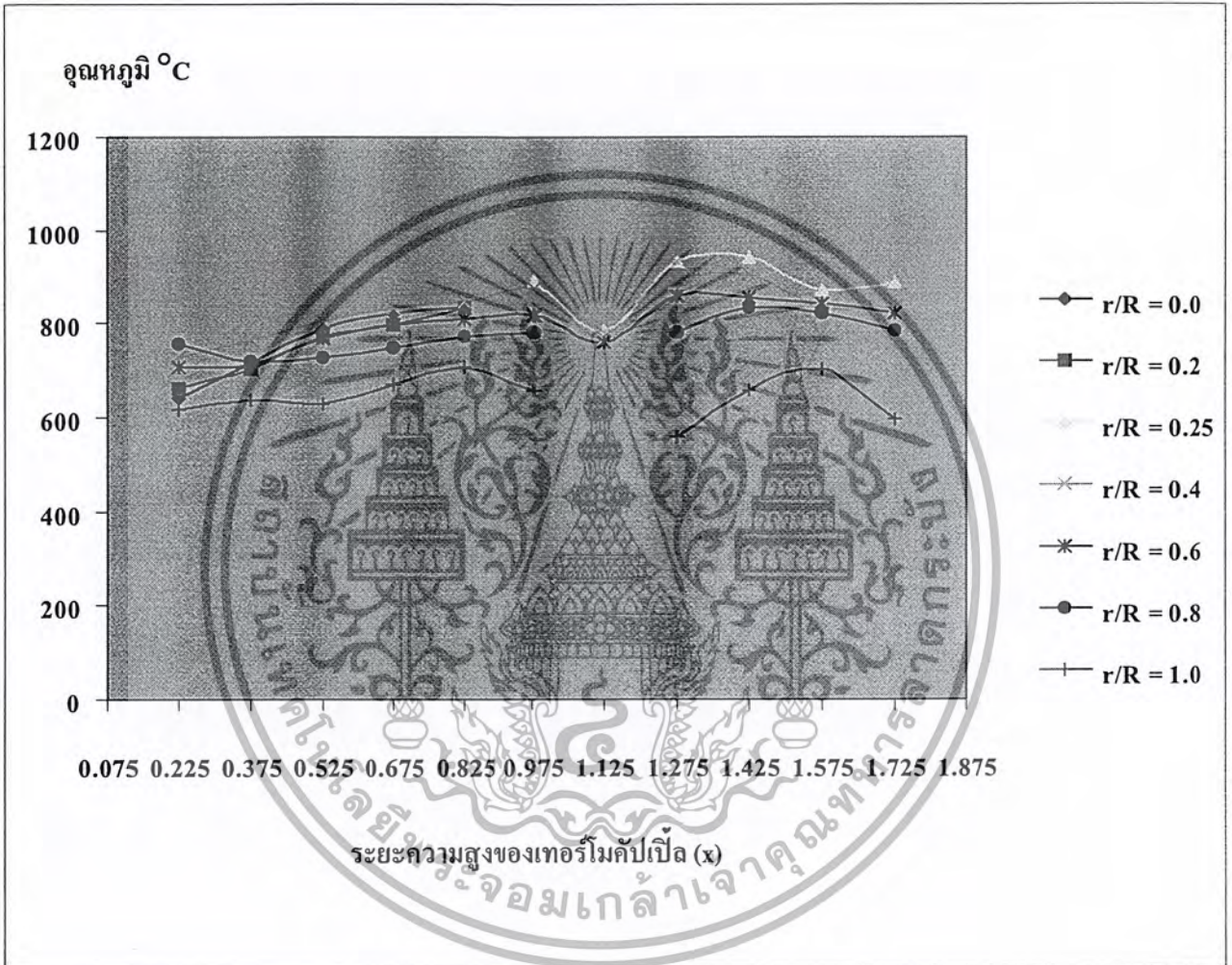
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.5 อากาศปฐมภูมิ 85% และอากาศทุติยภูมิ 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



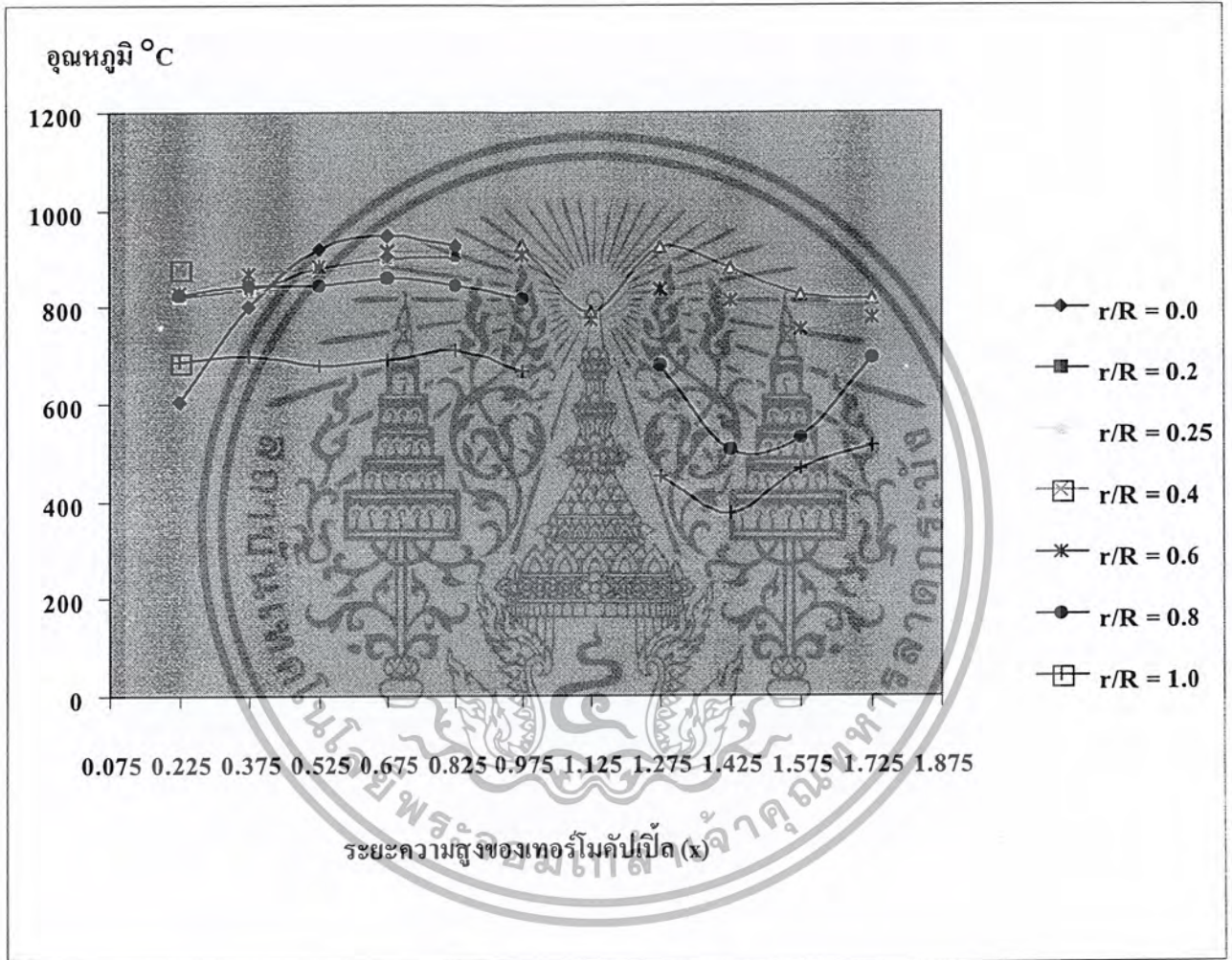
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.5 อากาศปฐมภูมิ 75% และอากาศทุติยภูมิ 25%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



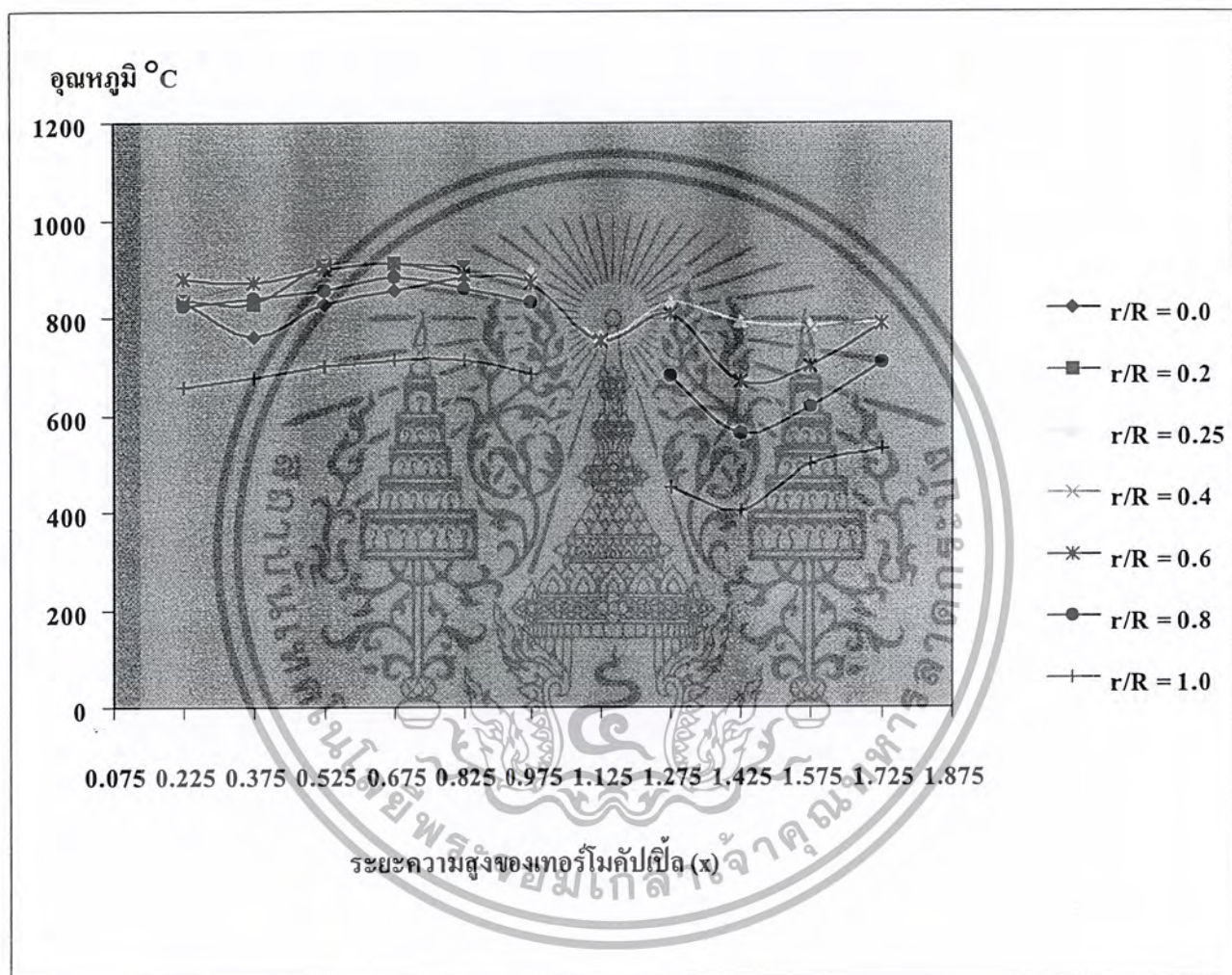
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.6 อากาศปฐมภูมิ 100% และอากาศทุติยภูมิ 0%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



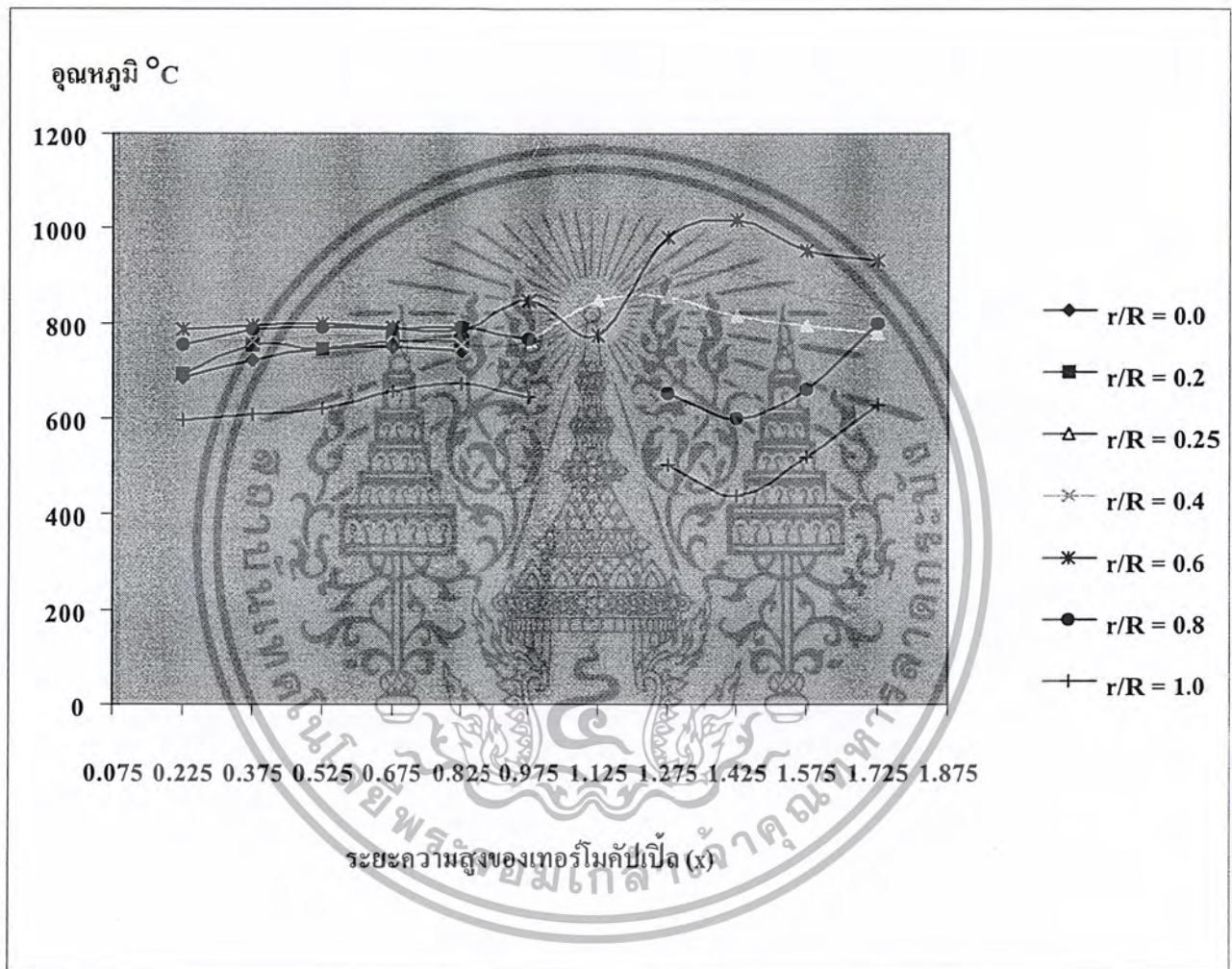
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.6 อากาศปฐมภูมิ 85% และอากาศทุติยภูมิ 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



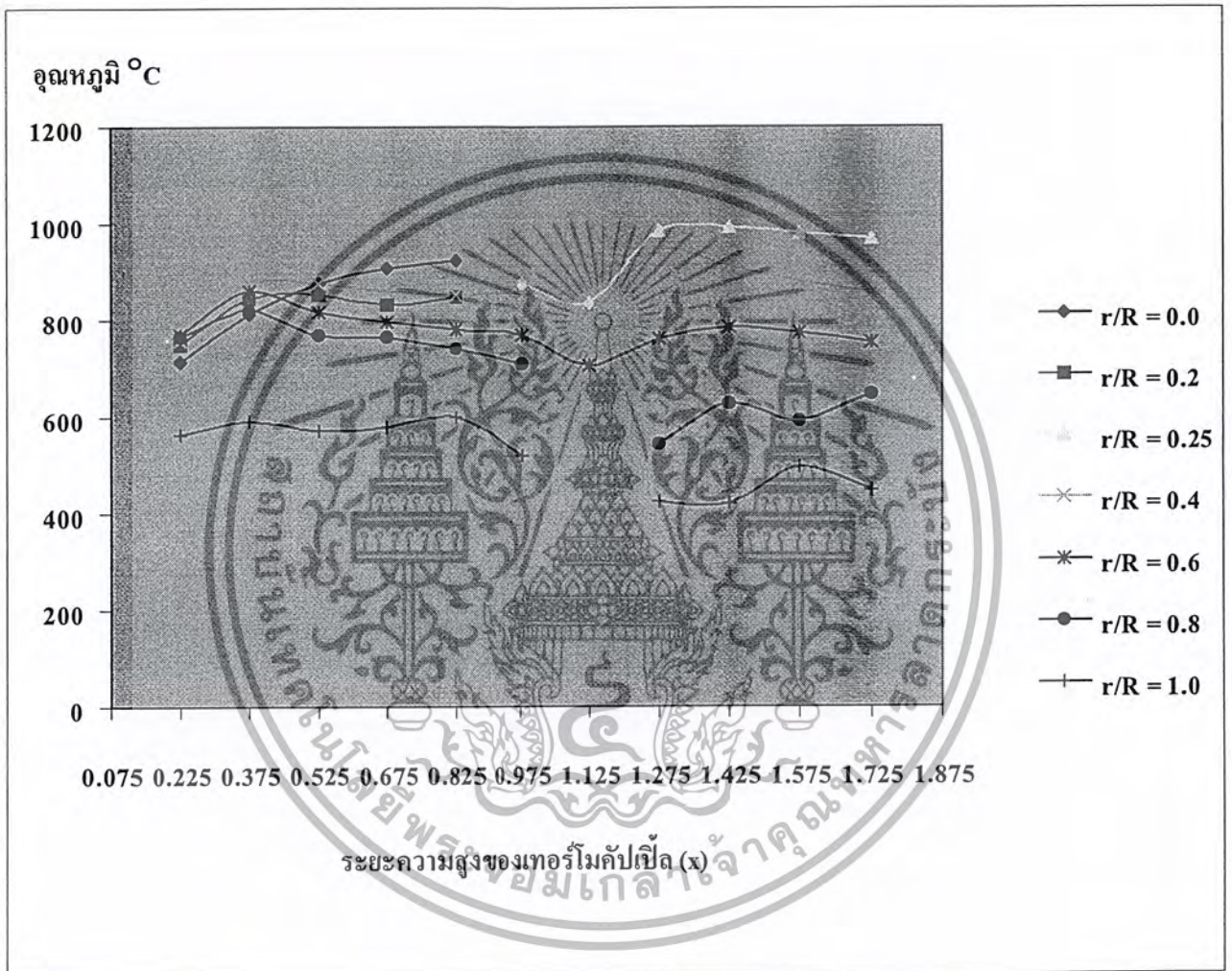
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.6 อากาศปฐมภูมิ 75% และอากาศทุติยภูมิ 25%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



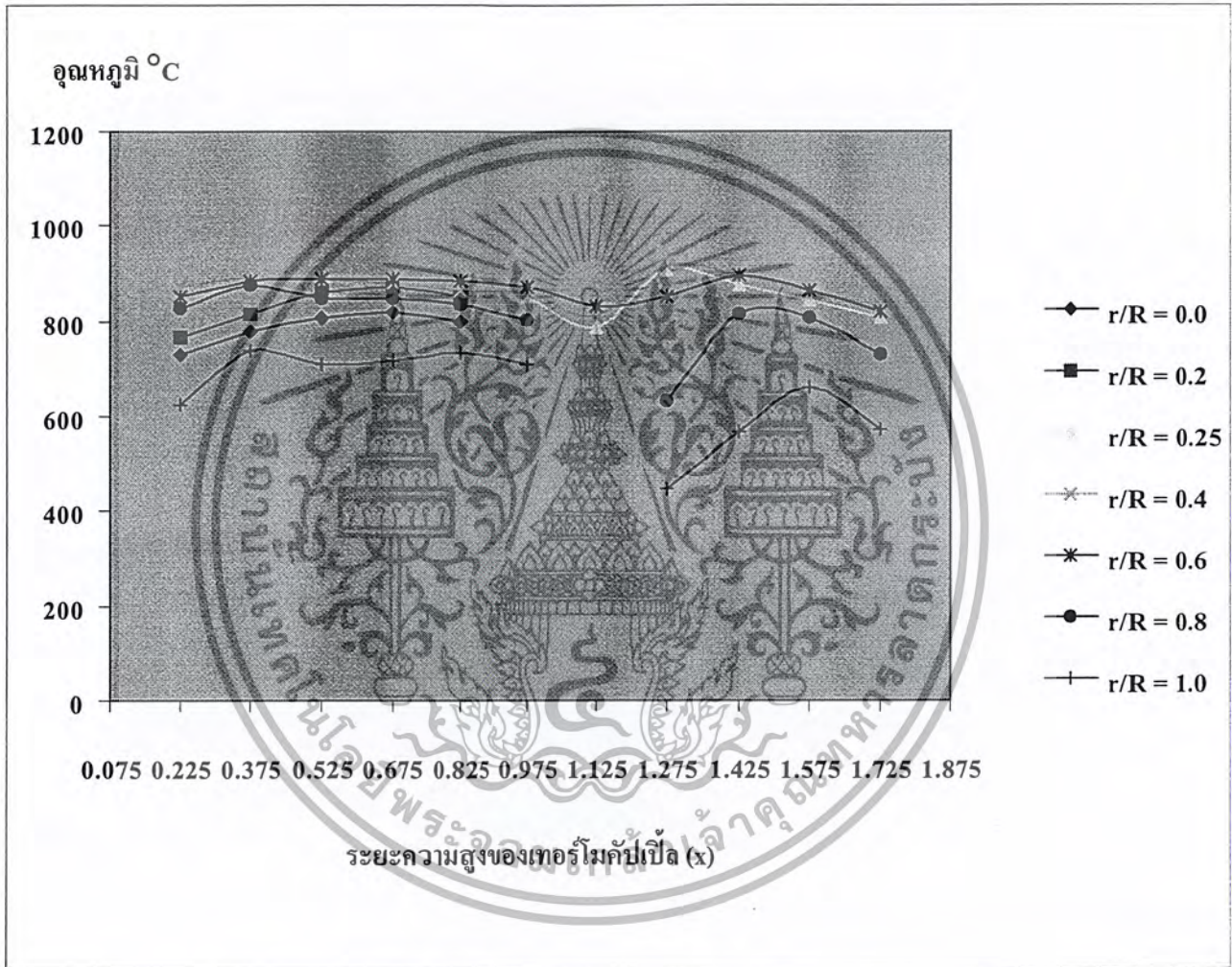
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมุติ 0.7 อากาศปฐมภูมิ 100% และอากาศทุติยภูมิ 0%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



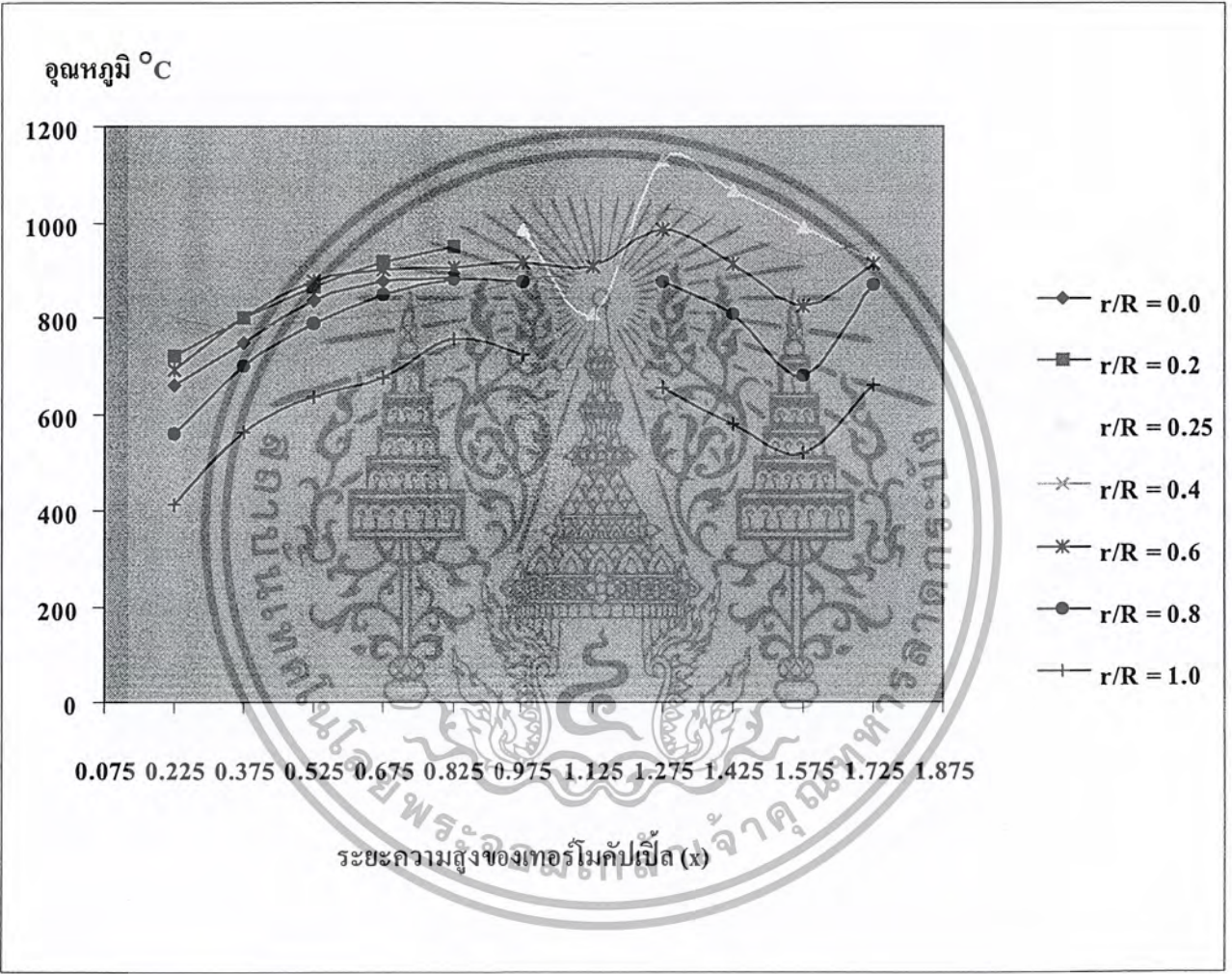
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.7 อากาศปฐมภูมิ 85% และอากาศทุติยภูมิ 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



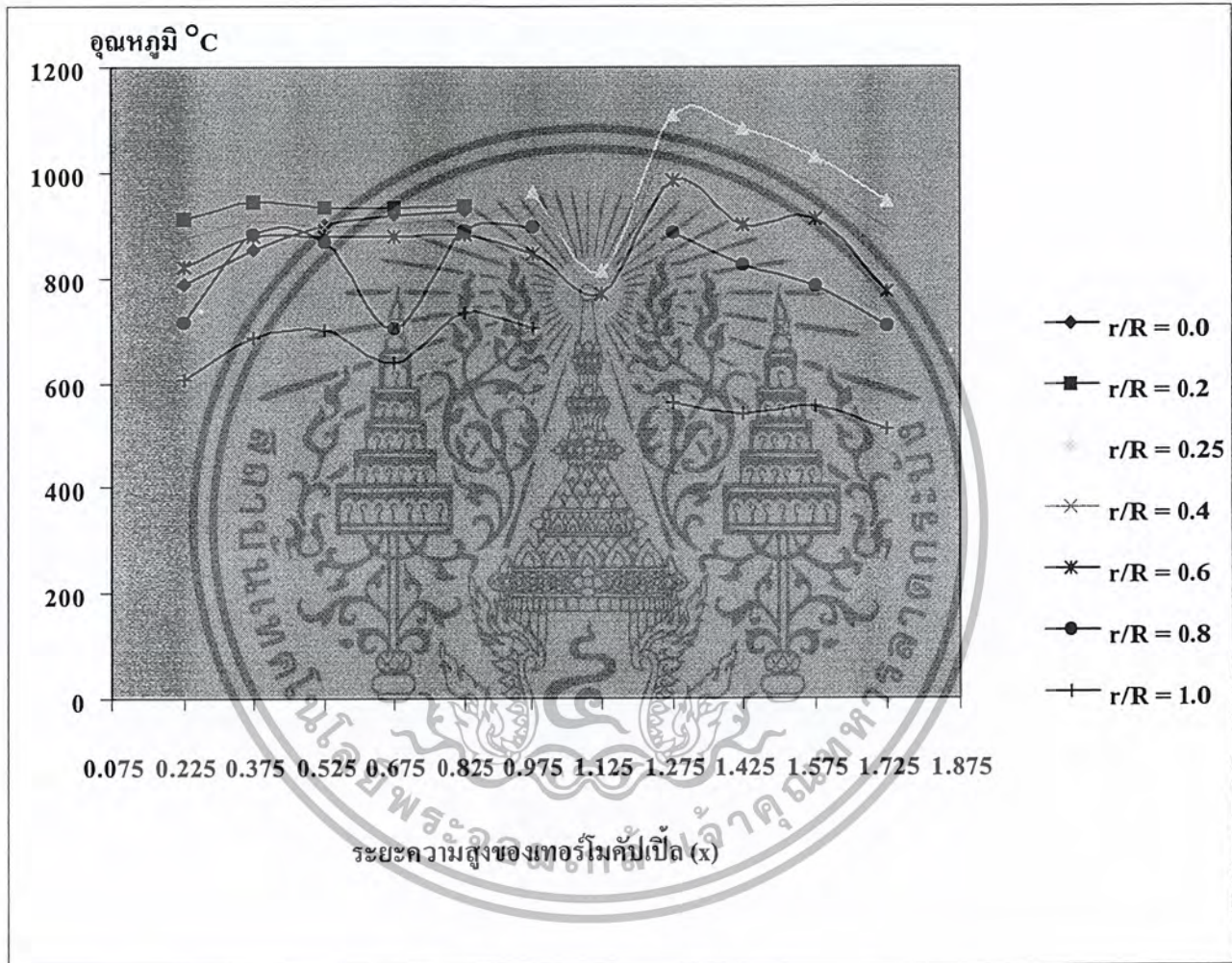
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.7 อากาศปฐมภูมิ 75% และอากาศทุติยภูมิ 25%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



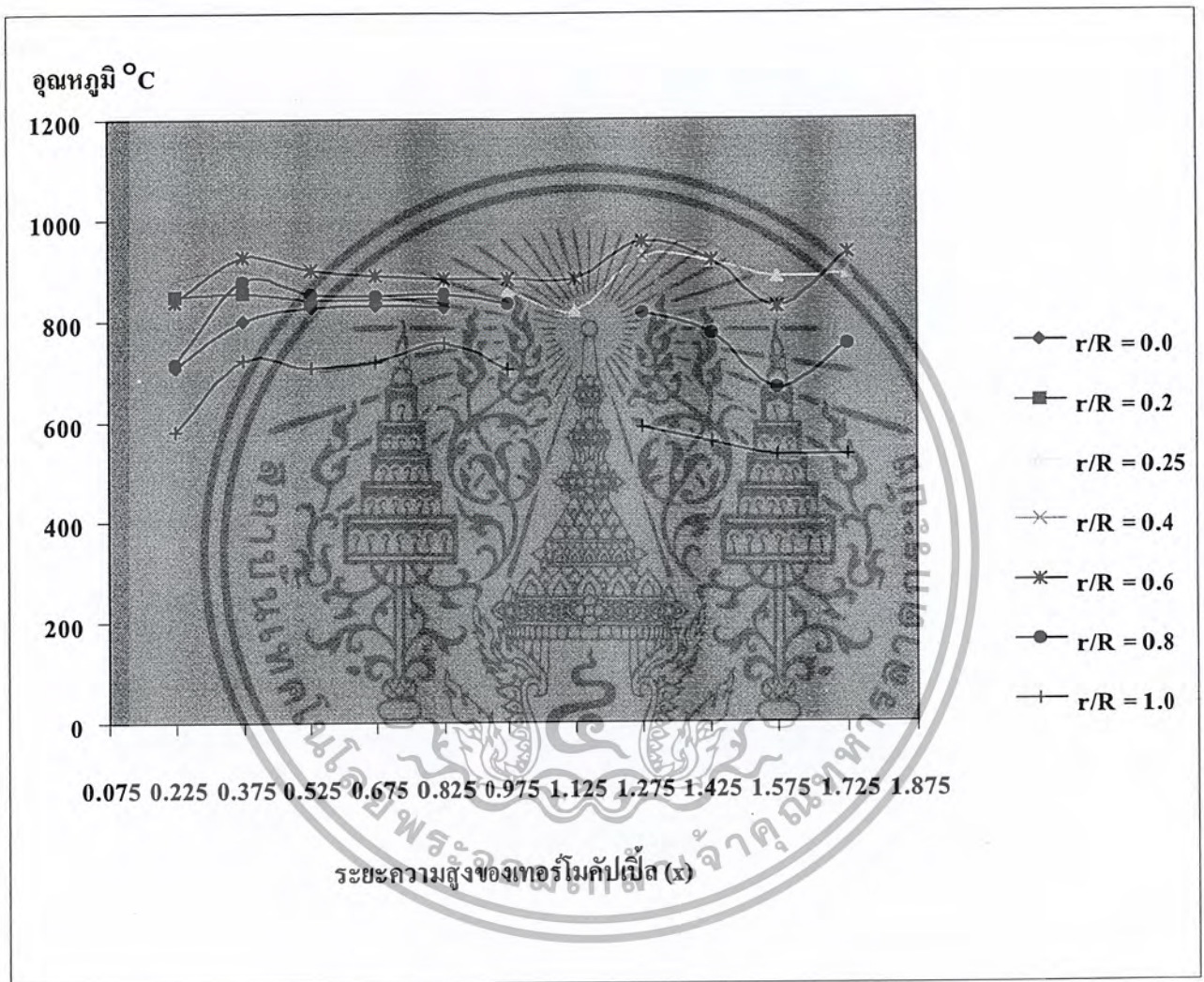
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 100% และอากาศทุติยภูมิ 0%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



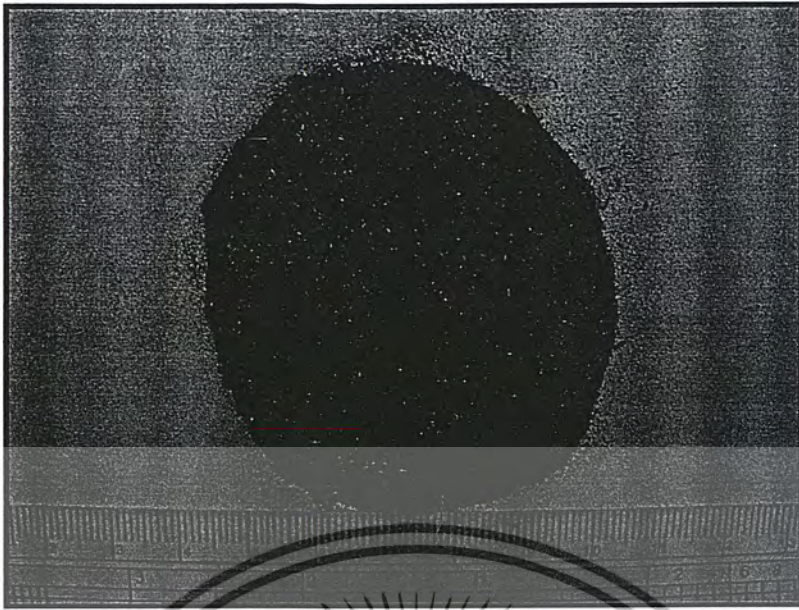
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 85% และอากาศทุติยภูมิ 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงอัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 75% และอากาศทุติยภูมิ 25%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 ลักษณะขี้เถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ที่อัตราส่วนสมมูล 0.5 อากาศปฐมภูมิ 100 % อากาศทุติยภูมิ 0 %



รูปที่ 5.21 ลักษณะขี้เถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ที่ อัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 100 % อากาศทุติยภูมิ 0 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.20 ลักษณะซีเฝ้าที่ได้จากการเผาไหม้ที่ อัตราส่วนสมมูล 0.5 อากาศปฐมภูมิ 100% อากาศทุติยภูมิ 0 % จะมีความละเอียดของซีเฝ้ามากกว่ารูปที่ 5.21 และมีสีเป็นสีเทาแสดงว่ามีการเผาไหม้ที่ สมบูรณ์มากกว่าที่ อัตราส่วนสมมูล 0.8 อากาศปฐมภูมิ 100% อากาศทุติยภูมิ 0 % ค่า CO ดูได้จากสี ของซีเฝ้าถ้าซีเฝ้านั้นมีสีดำนากก็แสดงว่ามีค่า CO มาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุป วิจารณ์ และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

ในโครงการนี้ได้ศึกษาออกแบบและสร้างเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนการทดลองนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นของการนำหลักการของฟลูอิดไดซ์เบดและหลักการของวอเตอร์มาสร้างเตาเผาแลกเปลี่ยนและการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาแลกเปลี่ยนฟลูอิดไดซ์เบดอากาศหมุนวนที่ค่าอัตราส่วนสมมูลและค่าอัตราการไหลของอากาศทุกมิติต่ออากาศทั้งหมดที่ค่าต่างๆกัน เพื่อใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้มาจากพืชโดยชีวมวลที่ใช้ในการทดลองคือแกลบ แกลบเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการปลูกข้าวมากพอสมควร และแกลบมีราคาถูกมากเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงอื่นเพื่อนำมาเป็นพลังงานทดแทนซึ่งล้วนแต่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ข้อสังเกตจากการทดลองพบว่า สามารถจุดเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนได้ง่ายและสามารถทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง มีอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงโดยไม่ใช้เชื้อเพลิงอื่นช่วยในการเผาไหม้นอกจากขั้นตอนในการอุ่นเตาและห้องผสมระหว่างเชื้อเพลิงแกลบกับอากาศไม่สูงเกินไป โดยการอุ่นเตาจะใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงในการอุ่นเตาเพื่อช่วยให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้เองและต่อเนื่อง

ในการทดลองนี้ได้กำหนดค่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบคงที่เท่ากับ 0.3 กิโลกรัม / นาที อัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio , Φ) ที่ใช้ทำการศึกษาคือ 0.5 , 0.6 , 0.7 และ 0.8 และอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศปฐมภูมิต่ออากาศทุติยภูมิคือ 100 : 0 , 85 : 15 และ 75 : 25 โดยอากาศทุติยภูมิจะถูกจ่ายในแนวสัมผัสกับผนังด้านในของห้องเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน ซึ่งจะช่วยให้ทำให้เกิดการผสมหรือสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงแกลบกับอากาศมากขึ้น ตลอดจนเป็นการเพิ่มเวลาในการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนมากขึ้น ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า

1. อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 ที่ระยะ $x = 1.275$ m. อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 1130° C ที่ r/R เท่ากับ 0.25 (จากผนังท่อที่กึ่งกลางเตาเผา)
2. อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.5 ค่าการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอื่นซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานของเตาเผาชนิดนี้
3. ค่า λ เพิ่มมากขึ้น ค่าอัตราส่วนสมมูลแต่ละช่วงมีอุณหภูมิภายในเตาเผาเริ่มแตกต่างกันมากขึ้น
4. บริเวณคอคอดช่วยทำให้เกิดการปั่นป่วนมากยิ่งขึ้นทำให้เชื้อเพลิงกับอากาศคลุกเคล้าได้ดีทำให้เผาไหม้ได้ดีขึ้น

6.2 วิจารณ์และข้อเสนอแนะ

เตาเผาฟลูอิดโคจซ์เบคแบบอากาศหมุนวนเป็นโครงการเริ่มต้น ซึ่งได้ทำการศึกษาลักษณะการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ของส่วนที่เป็นฟลูอิดโคจซ์เบคและห้องเผาไหม้ของส่วนที่เป็นวอร์เทคม, อัตราส่วนสมมูล สังกะสีเด้าลอยที่ออกจากเตา ควัน และก๊าซไอเสีย ที่เกิดจากการเผาไหม้ ฉะนั้นแล้วควรจะมีการศึกษาถึงตัวแปรอื่นๆอีก เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเตาเผาฟลูอิดโคจซ์เบคแบบอากาศหมุนวนที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น

- ศึกษาถึงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เมื่อมีการหุ้มฉนวนอย่างดีมาก
- คิดตั้งระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อหาประสิทธิภาพของเตา
- ศึกษาถึงอัตราการไหลของเชื้อเพลิงแกลบ ที่อัตราการไหลต่างๆกันที่มีผลต่อการเผาไหม้
- ควรมีการนำก๊าซไอเสียที่ได้จากเตาเผาไปใช้ประโยชน์
- ที่บริเวณเตาในส่วนที่เป็นคอคอดควรสร้างเตาที่มีลักษณะภายในเป็นกรวยตัดมาต่อที่บริเวณคอคอดให้มีลักษณะเหมือน Venturi



บรรณานุกรม

- [1] นางสาวศศิวิมล สูงสว่าง. 2526 “การเผาไหม้แก๊สในฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] นายอภิชัย เทอดเทียนวงษ์. 2528 “เตาเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [3] นายรัชชัย ท้าววิล และนายสันติ วัชรอภาไพบูลย์. 2534 “เตาเผาเศษวัสดุทางการเกษตรแบบใช้อากาศหมุนวน 2” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [4] นายสุพจน์ น้านาโชค. 2536 “การเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้แบบไซโคลนชนิดอากาศเข้าหลายช่องทาง” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [5] นายอดิศักดิ์ ชูจินดา. 2540 “เตาเผาแก๊สสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีอุณหภาค สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [6] นายบุญเรือง ศรีสวัสดิ์. 2541 “การปรับปรุงสมรรถนะเตาเผาแก๊ส” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [7] นายนิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์. 2544 “การศึกษาเชิงทดลองของเตาเผาแบบวอร์เทกซ์” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] Nich, S. , et al. “Testing of a 0.15 Mbtu/hr Vortex Combustor.” Technical report to Naval Civil Engineering Laboratory. April 1989.
- [9] สมศักดิ์ โพธิ์วิลเกียรติ (2545) “อิทธิพลของขนาดของแก๊สต่อคุณลักษณะการเผาไหม้” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [10] ศุภชัย เลื่อนลอย (2545) “อิทธิพลของความชื้นของแก๊สต่อคุณลักษณะการเผาไหม้” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ (Rice Husk)

แกลบเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ในการสีข้าวเปลือก 1 ตัน จะได้แกลบออกมาทั้งหมดประมาณ 220 กิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 22 สำหรับประเทศไทยประเมินได้ว่าในแต่ละปีจะมีแกลบประมาณ 4.4-4.6 ล้านตัน มีศักยภาพเชิงความร้อนเทียบเท่ากับการใช้น้ำมันดิบ 1.46-1.53 ล้านตัน แต่ตามความเป็นจริงถูกนำมาใช้ในครัวเรือนและอุตสาหกรรมทั่วไปเพียงร้อยละ 12 เท่านั้น ทั้งนี้เพราะวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้อยู่กระจัดกระจาย มีความหนาแน่นไม่มากเป็นผลให้การขนส่งมีราคาแพง ปัจจุบันการใช้แกลบเป็นพลังงานอยู่ในวงจำกัดปริมาณการใช้แกลบน้อย โดยที่แกลบอาจนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้หลายวิธี เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในเตาเผา เพื่อผลิตความร้อนให้หม้อน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า ใช้ผลิตแก๊สเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ ทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งใช้แทนฟืนและใช้อบโดยวิธีไพโรไลซิส(Pyrolysis) เพื่อใช้แทนถ่าน เป็นต้น

คุณสมบัติทางกายภาพ

แกลบมีคุณสมบัติทางการเป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดีพอสมควร แต่จะมีข้อเสียคือเมื่อทำการเผาไหม้ถ้าแกลบจะมีปริมาณสูงถึงประมาณร้อยละ 15.8-24.9 ค่าความร้อนของแกลบจะอยู่ระหว่าง 2,900-4,580 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ค่าความชื้นโดยประมาณ 1.1-9.8% กิโลกรัม

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติของแกลบ

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
	Sulphur	(%)	0.07-0.12

ตารางที่ ก-2 การเปรียบเทียบเชื้อเพลิง

	เชื้อเพลิงแข็ง	เชื้อเพลิงเหลว	แก๊สเชื้อเพลิง
การขนส่ง	- ขนส่งง่ายแต่ลำบากในการขนย้าย	- ขนส่งง่ายและขนย้ายง่าย	- แก๊สธรรมชาติขนส่งและขนย้ายง่าย
การเก็บ	- ต้องใช้พื้นที่กว้าง	- ต้องใช้ถัง	- ต้องบรรจุในภาชนะพิเศษ
คุณสมบัติ	- คุณภาพเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน - ค่าความร้อนต่อหน่วยต่ำ - ชี้อัดมาก - ประสิทธิภาพในการสันดาปต่ำ - ต้องการอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้เป็นจำนวนมาก - มีความยุ่งยากในการใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ	- คุณภาพค่อนข้างคงที่ - ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักสูง - ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง - ต้องการอากาศในการเผาไหม้น้อย - ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้ง่าย	- คุณภาพคงที่ - ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักมีค่าสูง - ไม่มีชี้อัด - ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงสุด - ต้องการอากาศส่วนเกินจำนวนน้อยมาก - ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้ง่าย
อุปกรณ์สันดาป	- ขนาดเล็กไม่ซับซ้อน	- ขนาดเล็ก	- ขนาดค่อนข้างใหญ่
มลภาวะ	- จำเป็นต้องมีการป้องกันกำเริบมลภาวะต่อบรรยากาศ	- จำเป็นต้องมีการป้องกันกำเริบมลภาวะต่อบรรยากาศ	- มีผลกระทบต่อกำเริบมลภาวะของบรรยากาศน้อย
ราคา	- ถูก	- ค่อนข้างแพง	- แพงที่สุดต่อความร้อน 1 หน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ปริมาณชีวมวลในปี 2540 และ 2544

หน่วย :ตัน

ชีวมวล	ปี พ.ศ.	
	2540 [*]	2544 ^{**}
กากอ้อย	15,410,636	19,357,826.64
แกลบ	5,962,548	5,582,426.4
ลำต้นมันสำปะหลัง	1,591,353	1,656,557.81
ซังข้าวโพด	9,066,220	6,905,058.88
กากถั่วเหลือง	141,483	259,574.21
เส้นใย/เปลือกผลปาล์ม	680,029	1,449,985.40

หมายเหตุ * ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ปีเพาะปลูก 2540/44

** ประมาณการ

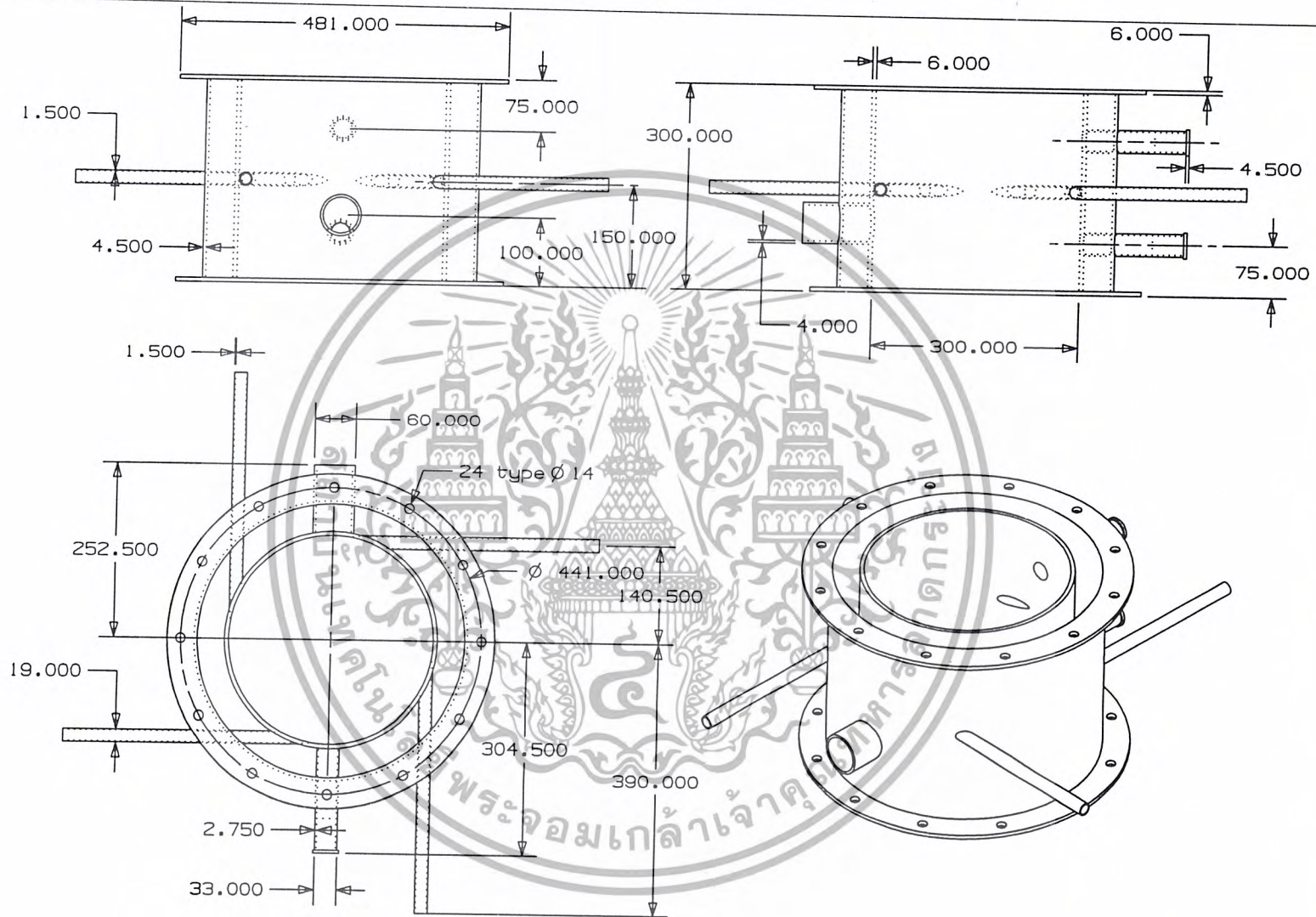
ตารางที่ ก-4 ปริมาณการใช้ชีวมวลโดยเฉลี่ยต่อโรง

ชีวมวล	ปี พ.ศ.			
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	เหนือ	กลาง	ใต้
ไม้ฟืน	279.71	528.29	342.16	541.39
ซังข้าวโพด	1,008	178.23	1,250	-
ถ่านไม้	0.48	0.174	0.021	0.041
ต้นข้าวโพดเหลือทิ้ง	-	-	90	-
แกลบ	185.30	383.65	3,729.64	4.14
เส้นใย/เปลือกผลปาล์ม	-	-	70	14,390
ฟางข้าว	700	17	50	-
เส้นใย/เปลือกผลมะพร้าว	-	66	21	101
กากอ้อย	352,805.83	525,984	174,594	-
ลำต้นมันสำปะหลัง	-	-	80	-
ต้นอ้อยเหลือทิ้งในไร่	-	-	70	-
กากถั่วเหลือง	-	-	90	-

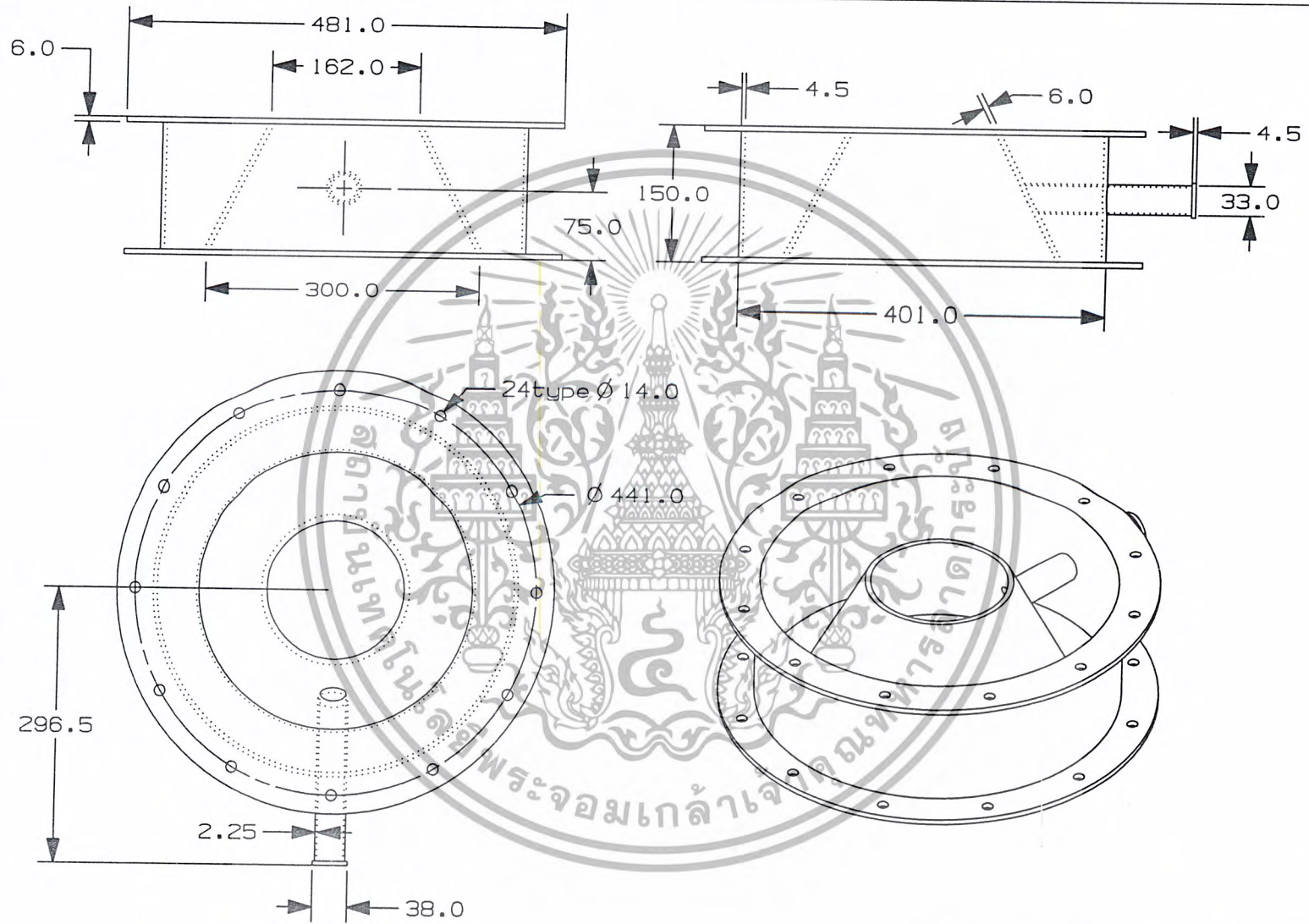
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



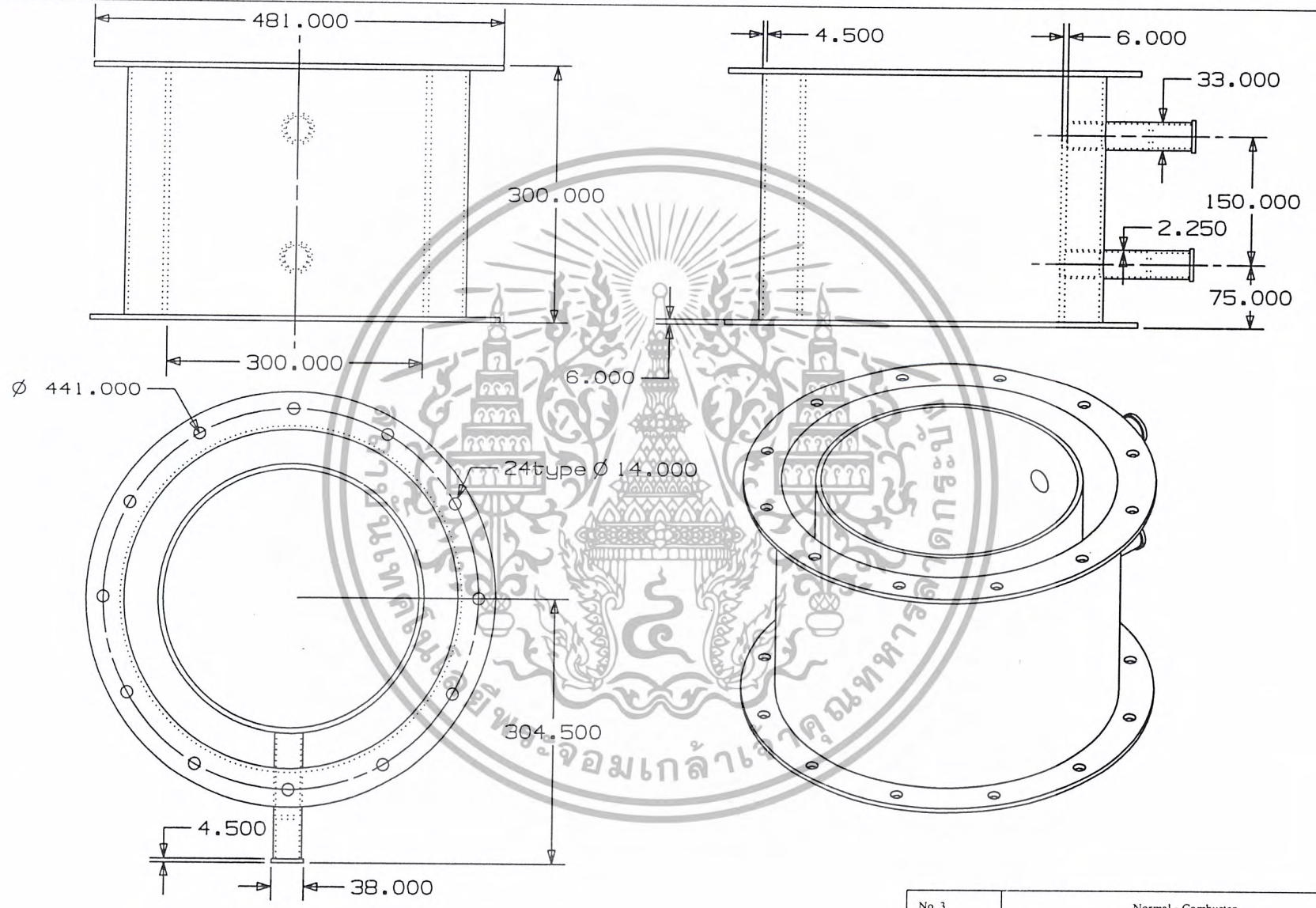
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



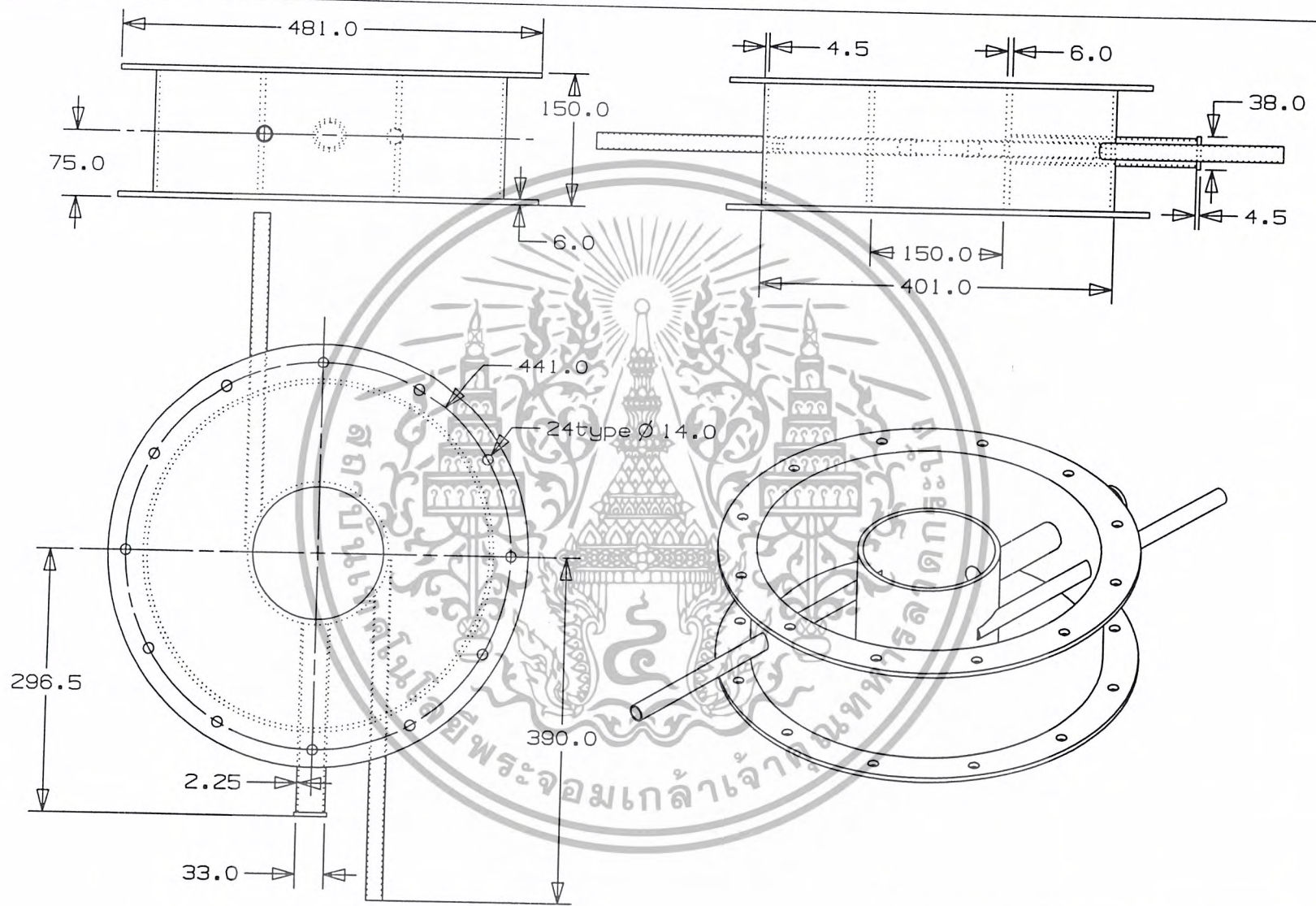
No. 1	Burner - Combustor	
Material	st 37	Vortexing Fluidized-bed Combustor for Burning Rice Husk
Designed By	Amornchai Tunvatanaseree	September 2002
Drawn By	Amornchai Tunvatanaseree	December 2002
Scale 1.5 : 10	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	



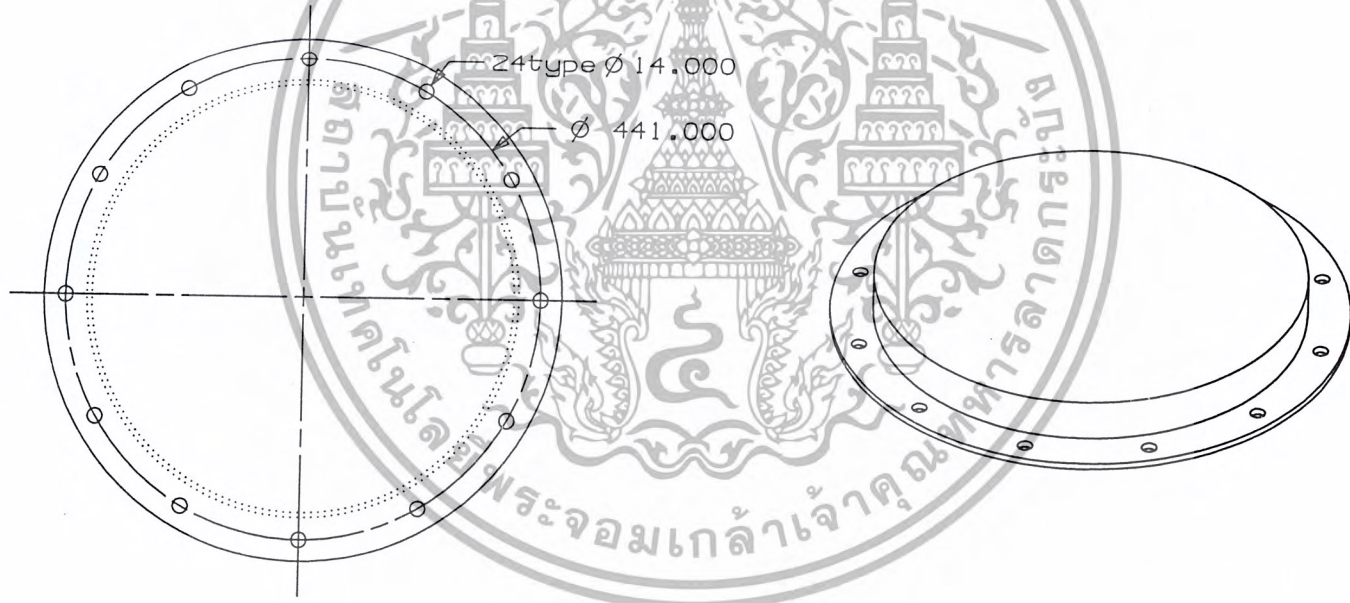
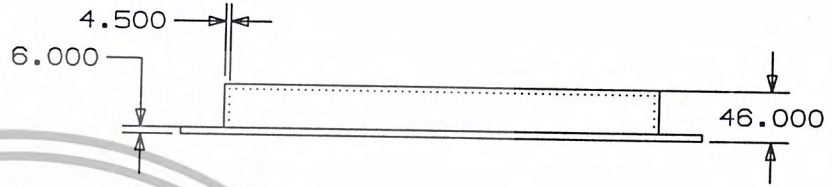
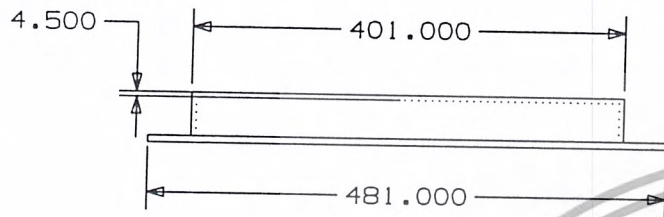
No. 2	Cone - Combustor	
Material	st 37	Vortexing Fluidized-bed Combustor for Burning Rice Husk
Designed By	Amornchai Tunvatanaseree	September 2002
Drawn By	Amornchai Tunvatanaseree	December 2002
Scale 2 : 10	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	



No. 3	Normal - Combustor	
Material	st 37	Vortexing Fluidized-bed Combustor for Burning RiceHusk
Designed By	Amornchai Tunvatanaseree	September 2002
Drawn By	Amornchai Tunvatanaseree	December 2002
Scale 2 : 10	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	



No. 4	Throat - Combustor	
Material	st 37	Vortexing Fluidized-bed Combustor for Burning Rice Husk
Designed By	Amornchai Tunvatanaseree	September 2002
Drawn By	Amornchai Tunvatanaseree	December 2002
Scale 2 : 10	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	



No. 5	Top- Combustor	
Material	st 37	Vortexing Fluidized-bed Combustor for Burning Rice Husk
Designed By	Amornchai Tunvatanaseree	September 2002
Drawn By	Amornchai Tunvatanaseree	December 2002
Scale 2 : 10	King Mongku's Institute of Technology Ladkrabang	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.5 อากาศปฐภูมิ 100% อากาศทุติยภูมิ 0%

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	463.5	513.1	531.5	502.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	571.4	577	579.5	576.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	661.9	664	674.7	666.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	708.5	708.1	720.1	712.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	728	728.6	742.3	733.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	738.1	738	747.4	741.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	742.9	742.6	756.6	747.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	26.9	26.9	27	26.9
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	42.5	42.5	42.5	42.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	453.6	450	466.8	456.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	577	572.5	581.1	576.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	657.9	645.5	648	650.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	704.7	688.9	690.5	694.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	717.3	705.5	706.5	709.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	725.4	714.7	716.2	718.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	725.7	714.8	721.2	720.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	27.1	27.1	27.1	27.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 0.5 อากาศปฐมภูมิ 100% อากาศหุติยภูมิ 0% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	528.2	525.3	510.8	521.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	616.2	634	608	619.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	651.7	676.8	644.7	657.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	687.9	702.8	676.9	689.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	709.8	708.1	692.3	703.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	710	711.6	699.3	707.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	711.1	714.5	698.4	708.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	748	749.6	736.9	744.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	847.5	849.2	825.4	840.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	818.9	822.8	808.2	816.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	802.1	807.1	799.5	802.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	801.8	807.7	801.3	803.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	26.9	26.9	27.1	27.0
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	658.9	652.9	616.9	642.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	684.1	660.4	635.5	660.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	712.2	683.9	665.7	687.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	722.8	690.5	682.1	698.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	724.4	705.4	694.3	708.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	723.9	702.1	695	707.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	834.1	825.9	803	821.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	854.2	861.2	842	852.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	816.3	819.8	812.2	816.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	800	798.1	786.4	794.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	27	27	26.7	26.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 0.5 อากาศปฐภูมิ 100% อากาศหุติยภูมิ 0% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	542.2	637.6	716.9	632.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	568	618.6	687.4	624.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	592.1	630	668.4	630.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	606.6	656.3	685.7	649.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	627.3	653.5	677.6	652.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	619.3	638.9	656.1	638.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	641.2	621.1	605.6	622.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	742.9	748.2	745.8	745.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	741.8	751.6	755.9	749.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	717.2	720.7	720	719.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	27.3	27.3	27.4	27.3
0	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	506.6	481.5	582	523.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	513.7	515.7	533.5	521.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	556.7	551.3	558.8	555.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	593.5	587.9	597.4	592.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	615.7	614.2	620.6	616.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	587.6	587.9	592.2	589.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	607	606.5	608.6	607.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	609.5	610.3	611.2	610.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	608.4	609.3	610.2	609.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	584.9	585.6	586.3	585.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	27.4	27.4	27.4	27.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 0.5 อากาศปฐภูมิ 85% อากาศหุติยภูมิ 15%

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิ้ล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
150	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	458.2	442.9	432.7	444.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	625.1	638.9	658.5	640.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	734.3	761	780.8	758.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	771	793.7	791.2	785.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	800.4	814.6	803.7	806.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	821.4	827.8	822.3	823.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	835.4	834.3	831.2	833.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	26.5	26.5	26.4	26.5
120	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	42.2	42.2	42.2	42.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	390.9	427.8	438.2	419.0
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	690.8	682.2	709.1	694.0
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	736.9	727	758.1	740.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	786.8	765.3	793.9	782.0
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	813.8	774.6	819.7	802.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	836.7	798.1	831	821.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	841.8	782.1	831.5	818.5
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	26.7	26.8	26.4	26.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.5 อากาศปฐมภูมิ 85% อากาศทุติยภูมิ 15% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	466	436.9	422.7	441.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	745.7	755.2	749	750.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	737.3	730.8	749.1	739.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	755.9	766.8	796.9	773.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	741.6	778.5	798.1	772.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	790.9	802.9	831.2	808.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	811.8	835.9	853.5	833.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	777.2	809.8	813.6	800.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	888.7	914.3	923.2	908.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	865.9	889.9	894.5	883.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	831.5	849.1	857	845.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	810	837.4	823.6	823.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	27	27	26.9	27.0
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	734.9	742.9	711	729.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	696.6	743.8	685.7	708.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	720.5	761.2	720.3	734.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	751.1	768.8	753.2	757.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	768.2	780.5	777.1	775.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	776.2	773.5	785.6	778.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	696.1	723.4	732	717.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	767.8	791	809.2	789.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	755.9	773.7	784	771.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	746.2	754.5	767.9	756.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	27.1	26.7	26.7	26.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.5 อากาศปฐภูมิ 85% อากาศหุคยภูมิ 15% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิ้ล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
30	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	693.6	737.9	706.2	712.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	667.9	674	638.2	660.0
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	718.4	700.4	659.1	692.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	760.9	728	671.4	720.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	769.3	748.7	703.2	740.4
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	752.5	741.7	690.2	728.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	472.7	487.1	491.4	483.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	730.5	725.2	664.5	706.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	723.2	721.3	670.7	705.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	687.8	683.4	636.4	669.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	27	27.3	27.1	27.1
0	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	576.8	585.8	550	570.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	544.1	542.5	535.7	540.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	590.8	586.2	583.7	586.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	625.3	621.3	620	622.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	644.5	641.1	642.2	642.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	586.3	589.8	591.7	589.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	385.2	383.8	381.8	383.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	554.7	551.1	552.4	552.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	587.3	585.8	585.7	586.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	582.1	579.7	580.3	580.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	27.2	27.1	27	27.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.5 อากาศปฐภูมิ 75% อากาศหุคยภูมิ 25%

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	126.9	118	112.2	119.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	657.9	654.8	639.7	650.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	800.7	796.2	748.7	781.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	846.4	842.8	788	825.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	838.1	836.2	802.8	825.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	817.4	819.8	804.1	813.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	792.9	788.4	796.3	792.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	28.6	28.8	28.9	28.8
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	38.4	38.5	38.6	38.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	468.8	459.3	439.3	455.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	598.1	611.9	627.5	612.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	719.5	714.6	720.6	718.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	794.1	787.5	797.3	793.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	811.5	812.5	814.3	812.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	797.1	797.1	797.9	797.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	789.8	788.2	788.6	788.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	28.4	28.2	28.1	28.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.5 อากาศปฐมภูมิ 75% อากาศหุติยภูมิ 25% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิ้ล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
90	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	352.3	297	257.4	302.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	751.4	760.2	697.2	736.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	772.6	840.8	848.3	820.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	831.9	836.1	856.6	841.5
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	840.9	836.2	855.8	844.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	819.7	821	833.2	824.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	811.1	814.6	823.4	816.4
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	674.6	682.6	688.6	681.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	826.8	837.7	851	838.5
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	786.3	795.6	798.8	793.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	765.9	774.5	779.1	773.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	756.6	765.2	770.5	764.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	28	28	27.8	27.9
60	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	778.6	782.6	745.3	768.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	754.7	797.3	812.5	788.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	846.9	846.9	828.9	840.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	857.5	857.6	857.7	857.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	828.1	831.7	835.2	831.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	801.1	806.2	809.9	805.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	750.2	765.5	758.1	757.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	768.1	758.5	781.2	769.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	749.5	763.7	762.8	758.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	735	749.2	748.8	744.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	28.3	28.4	28.3	28.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสมมวล 0.5 อากาศปฐภูมิ 75% อากาศหุติภูมิ 25% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	737.6	763.9	792.9	764.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	700.2	741.8	772.5	738.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	764.4	782.5	799.3	782.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	801.1	799.3	813	804.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	778.2	777.6	782.8	779.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	740.7	746.4	752.4	746.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	589.9	574.2	564.1	576.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	708.1	718.5	723.6	716.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	703.1	709.3	711.9	708.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	680.7	687	687.6	685.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	27.5	27.4	27.7	27.5
0	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	564.7	551.9	536.6	551.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	651.9	650	631	644.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	668.7	668.5	663	666.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	674.3	668.1	666.4	669.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	711.1	705	704.4	706.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	647.5	650.1	651.5	649.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	448.4	435.2	427.1	436.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	594.1	584.2	580	586.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	611.7	603.3	601	605.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	604.8	597.7	569.9	590.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	27.4	27.3	27.2	27.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 0.6 อากาศปฐภูมิ 100% อากาศหุติยภูมิ 0%

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิ้ล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
150	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	243.2	246	243.2	244.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	669.2	631.8	621.2	640.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	717.6	712.2	715	714.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	789.2	789	791.1	789.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	819.9	818.3	829.5	822.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	841.8	840.3	815.5	832.5
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	873.7	869.3	882.3	875.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	24.9	25.5	25.5	25.3
120	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	41.7	41.7	41.7	41.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	280.9	297.3	309.4	295.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	641.2	667.2	678	662.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	709.4	702.5	700.8	704.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	780.8	769.2	764.1	771.4
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	807.6	792.8	789.9	796.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	834.6	830.7	832.7	832.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	874.8	891.3	907.4	891.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	24.8	24.8	25.2	24.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.6 อากาศปฐมภูมิ 100% อากาศหุติภูมิ 0% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิ้ล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
90	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	358.9	363.3	359.1	360.4
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	701.3	747.3	735	727.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	762.2	779.5	753.7	765.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	806.8	811.6	794.5	804.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	834.3	839.6	827.7	833.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	839.4	849.2	849.3	846.0
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	871.7	872.1	882.2	875.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	770.9	769.1	761.6	767.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	895.9	888.8	891.7	892.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	906.5	901.5	905.4	904.5
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	841.1	833.2	829.5	834.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	842.7	833.6	828.7	835.0
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	24.4	24.5	25.1	24.7
60	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	688.2	701.4	729.9	706.5
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	711.6	709.2	706.1	709.0
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	770.3	771	759.4	766.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	814.9	796.4	777.2	796.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	818.9	813.2	801.4	811.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	821.1	817.4	812.7	817.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	861.2	855.1	857.4	857.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	866.4	856	844.4	855.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	838.5	840.8	843.9	841.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	829.6	815.7	819	821.4
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	25.4	25.2	25.1	25.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.6 อากาศปฐภูมิ 100% อากาศหุติขภูมิ 0% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	795.8	766.2	710.8	757.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	716.5	729.6	709.2	718.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	728.9	726.9	725	726.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	750.5	751.7	746.6	749.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	776.8	773.7	772.9	774.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	772	783.8	790.1	782.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	807.7	777	759.7	781.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	823.2	832.9	848.1	834.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	812	823.8	829.2	821.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	775.2	788.5	795.2	786.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	25.3	26.1	26.2	25.9
0	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	641.9	623	589.1	618.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	631.2	632.3	640.5	634.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	633	628.2	626.7	629.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	675.4	669.6	663.7	669.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	715.8	707.4	701.4	708.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	668.4	658.8	650	659.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	574.1	556.5	542.2	557.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	672.8	658.1	642.5	657.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	709.3	702.7	696.3	702.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	600.3	596.1	591.8	596.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	25.7	24.9	26	25.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.6 อากาศปฐภูมิ 85% อากาศขุติภูมิ 15%

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	256	256.1	248.8	253.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	616.8	597.9	601	605.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	831.4	804.7	771.2	802.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	909.6	900.6	953.4	921.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	939.4	920.2	987	948.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	908	911	960.5	926.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	919.1	929.1	996.1	948.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	23.4	23.5	23.2	23.4
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	42.1	41.8	41.8	41.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	322.1	307.1	294.2	307.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	754.5	77.6	741.7	524.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	801.2	829.1	882.2	837.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	872.2	875.4	899.6	882.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	892.8	908.3	902.7	901.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	895.7	911.1	909.3	905.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	920.2	939.6	926.9	928.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	23.4	23.5	23.7	23.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.6 อากาศปฐภูมิ 85% อากาศหุติภูมิ 15% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	369.1	361	350.1	360.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	896.3	881	863.5	880.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	813.5	844	831.9	829.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	845.4	882.5	885.7	871.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	856.6	895.6	913.4	888.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	855.8	886.1	900	880.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	895.6	913.8	923.1	910.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	775.2	769	777	773.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	925.4	870.1	891	895.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	867	850.3	859.1	858.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	797.9	804.6	816.7	806.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	801.7	802.5	805.3	803.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	23.5	23.4	23.8	23.6
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	824.5	831.5	831.9	829.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	874.5	865.5	861.3	867.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	882.2	881.5	887.1	883.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	908.8	914.5	918.2	913.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	906.8	913.4	920	913.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	900.8	908.3	913.3	907.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	828.2	835.5	847.5	837.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	803.3	813.5	824.3	813.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	744.8	756.4	765	755.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	774.1	778	783.9	778.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	23.6	23.7	23.9	23.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.5 อากาศปฐมภูมิ 85% อากาศหุติยภูมิ 15% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเบิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
30	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 3	821.7	847.9	808.9	826.2
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 4	827	867.6	839	844.5
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 5	846.3	847.4	845	846.2
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 6	862.7	862.2	851.9	858.9
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 7	846.9	844.5	839.1	843.5
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 8	825	815.9	807.9	816.3
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 10	683.1	676.2	670.5	676.6
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 11	492.7	503.2	519	505.0
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 12	522.5	528.7	534	528.4
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 13	696.2	693.2	689	692.8
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 14	23.9	24.9	23.5	24.1
0	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 3	689.1	713	655.2	685.8
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 4	684.1	697.4	710.4	697.3
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 5	675.6	678.8	683	679.1
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 6	688.2	689.3	694.2	690.6
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 7	710.5	710.1	714.1	711.6
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 8	664	666.1	671.9	667.3
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 10	444.8	451	458.4	451.4
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 11	377.3	374.2	372.6	374.7
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 12	467.1	464.2	462.2	464.5
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 13	513.1	514.1	515.7	514.3
	เทอร์โมคัปเบิลตัวที่ 14	23.6	23.4	23.4	23.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.6 อากาศปฐภูมิ 75% อากาศขุติภูมิ 25%

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	662.3	623.5	530.5	605.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	807.2	804.9	886.3	832.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	766.7	761.7	751.6	760.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	832.1	821.6	827.1	826.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	857.9	851.3	858.8	856.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	888.2	885.2	872.7	882.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	900.9	903.5	888.5	897.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	24.9	25	25.1	25.0
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	41.3	41.3	41.3	41.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	495.7	476.8	393.4	455.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	684.7	675	657.8	672.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	842.1	813.1	828.8	828.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	905.5	891	919.7	905.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	913.8	895.5	925.2	911.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	901.1	892.5	912.2	901.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	895.1	878.2	909.7	894.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	24.6	24.3	24.1	24.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.6 อากาศปฐมภูมิ 75% อากาศหุติยภูมิ 25% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	317.9	274.9	242.9	278.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	733.9	894.1	880.4	836.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	822.5	886.5	908.9	872.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	901.3	905.6	927.1	911.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	920.3	905.1	907.8	911.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	910	894.5	886	896.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	896	878	875.3	883.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	763	759.2	745.7	756.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	826.3	814.3	792.5	811.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	763.4	751.8	742.1	752.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	779.5	774.9	773.1	775.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	789.9	798.6	813.1	800.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	24.3	24.4	24.2	24.3
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	851.7	884.3	904.8	880.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	870.6	868.7	874.1	871.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	893.6	899.3	906.3	899.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	901.7	914.5	915.6	910.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	881.1	890.6	886	885.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	865.7	875.1	875.1	872.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	790.7	814.3	821.7	808.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	674.5	667.8	664.7	669.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	711.4	699.7	694.7	701.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	780.7	795	791.7	789.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	24.5	24.6	24.1	24.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.6 อากาศปฐมภูมิ 75% อากาศหุติยภูมิ 25% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	768.8	833.5	869.5	823.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	826.3	843.9	843.2	837.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	843	865.9	863	857.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	882.8	880.9	885	882.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	861.7	856.7	859.7	859.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	835.7	831.1	833.5	833.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	682	677.3	682.2	680.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	582.4	559.1	544.7	562.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	616.7	614.9	618	616.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	706.4	706.1	710.6	707.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	23.6	23.4	23.8	23.6
0	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	644	659.2	675.1	659.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	678.7	679.2	679.9	679.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	701.3	699.9	698.2	699.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	713.3	713.4	709.6	712.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	728.9	713	700.1	714.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	684.2	686.3	688.1	686.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	464.1	450.5	442.3	452.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	412.8	404.1	398	405.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	506.9	498.6	492.6	499.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	534.5	530.5	527.9	531.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	23.7	23.6	24.1	23.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.7 อากาศปฐมภูมิ 100% อากาศหุติภูมิ 0%

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	697.8	706.1	702.6	702.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	632.3	624.4	604.6	620.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	713.3	712.8	706.8	711.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	744.7	745.1	751.6	747.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	741.8	750	760.3	750.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	733.6	738.8	751	741.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	737.2	742.1	753.1	744.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	29.1	29.1	28.8	29.0
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	38.1	38.3	38.6	38.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	649	669.3	677.8	665.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	662.7	661.6	656.9	660.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	699.9	705.3	74.9	493.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	739.9	747.6	751.9	746.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	752.8	762.8	768.5	761.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	754.4	762.5	770.2	762.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	754.8	762.3	769.1	762.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	28.6	28.4	28.4	28.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.7 อากาศปฐภูมิ 100% อากาศหุติยภูมิ 0% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	443.1	449.4	534.8	475.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	773.4	775.2	811.9	786.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	735	775.2	790.3	766.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	736.3	763.2	775.3	758.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	729.9	746.7	750.6	742.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	738.7	748.9	775.4	754.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	734.3	750.7	788.3	757.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	78.2	722.5	761.2	520.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	862	881.2	929.3	890.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	869.2	899.2	953.2	907.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	814.2	843.7	908.3	855.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	802.9	831.1	862.9	832.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	28.6	28.5	28.5	28.5
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	895.5	855.6	828.4	859.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	857.6	837.2	815.2	836.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	865.9	867.1	860.9	864.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	868.8	864.9	858.3	864.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	847.5	855	857.2	853.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	844.2	849	854.5	849.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	980	986.9	982.3	983.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	1031.3	1028.9	997.2	1019.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	991.8	950.8	918.2	953.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	910.5	931.7	951.7	931.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	28.3	28.2	28.2	28.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.7 อากาศปฐภูมิ 100% อากาศหุติภูมิ 0% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิ้ล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
30	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	696.4	675.5	650.6	674.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	781.3	785.3	790.9	785.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	778.1	779.1	815.1	790.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	768.1	805.4	829.4	801.0
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	771	787	813.4	790.5
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	742.1	768	793.3	767.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	653.1	647.2	661.8	654.0
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	607.5	595.7	600.2	601.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	652.3	690.1	641.2	661.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	759.5	804.4	832.6	798.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	27	27.2	27.3	27.2
0	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	515	518.4	505	512.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	601.9	597.2	623	607.4
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	626.3	617.1	623.4	622.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	661.1	648.9	656.7	655.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	680.6	670.1	669.1	673.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	649.5	641.6	641.6	644.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	513.7	500.3	491.5	501.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	435.5	441.2	431.9	436.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	523.9	516	511.1	517.0
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	631.3	627.4	632.1	630.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	27.3	27.6	27.7	27.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.8 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.7 อากาศปฐมภูมิ 85% อากาศทุติยภูมิ 15%

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	580.5	556.7	532.9	556.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	685.6	675.1	685.6	682.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	820.4	807	812.4	813.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	879.4	878	872.6	876.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	901.8	918	908.4	909.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	916.4	931.4	931.5	926.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	934.9	940.5	947.6	941.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	24.6	24.5	24.6	24.6
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	42.9	43	43	43.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	211.2	201.6	188	200.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	734.7	760.2	754.4	749.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	784.3	786.9	781.1	784.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	813.9	797.6	787.2	799.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	841	811	801	817.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	868.7	847	836.3	850.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	891.1	871.3	867.3	876.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	26.4	26.9	26	26.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.8 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.7 อากาศปฐภูมิ 85% อากาศหุติยภูมิ 15% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	213.2	200.4	186.4	200.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	810.7	758.6	706.5	758.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	887.9	879.3	859.8	875.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	875.9	883.6	877.6	879.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	860.9	861.8	866.9	863.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	844.4	851.9	860.9	852.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	846.3	853.8	868.7	856.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	802.6	815.4	832.5	816.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	932	940.7	960.2	944.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	908.8	907.7	926.2	914.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	873.7	875	891.8	880.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	848	849.6	873.5	857.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	26.4	26.2	26.3	26.3
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	856.2	888.8	932.1	892.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	841.3	857.5	879.7	859.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	803.8	822.2	824.7	816.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	784.9	810.8	795.3	797.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	773.5	786.9	779.8	780.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	763.5	773.5	767	768.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	755.5	761.2	773.6	763.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	776.3	777.6	797.8	783.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	765.4	761.6	789	772.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	746.2	740.8	769.7	752.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	26.6	26.6	26.6	26.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.8 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.7 อากาศปฐมภูมิ 85% อากาศทุติยภูมิ 15% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	724.6	792	776.2	764.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	782.6	822.9	862.3	822.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	758.6	765.3	781.5	768.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	759.3	760	777.9	765.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	731.7	737	751.8	740.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	700.8	705.8	719.6	708.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	534.4	542.2	548.7	541.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	611.7	626.7	636.6	625.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	568.3	591.6	608.1	589.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	630.8	644.8	656	643.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	26.6	26.7	26.7	26.7
0	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	474.5	463.5	456.8	464.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	607.6	586.9	573.8	589.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	566.2	570.8	570.2	569.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	573	578.2	578.6	576.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	569.4	656.6	567.8	597.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	515.8	517.8	526.4	520.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	436	421	413.8	423.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	437.5	418.2	405.6	420.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	735	372.1	372.5	493.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	440.6	445.6	448	444.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	26.6	26.5	26.4	26.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 0.7 อากาศปฐภูมิ 75% อากาศหุติภูมิ 25%

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิ้ล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
150	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	247.7	234.7	223.8	235.4
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	711.6	720.6	754.5	728.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	759.1	757.9	819.9	779.0
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	791.9	791.8	835.4	806.4
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	812.6	810.3	828.3	817.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	796.6	798.1	800.4	798.4
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	811	805.2	809.2	808.5
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	24.8	24.4	24.2	24.5
120	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	41.9	41.8	41.8	41.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	585	570.8	569.8	575.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	722.2	710.7	747.5	726.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	794	813.4	831.3	812.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	835.8	860.6	876.3	857.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	842.7	870.5	896.3	869.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	829.3	849.9	872.9	850.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	834.1	852.4	867	851.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	25	24.9	24.4	24.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.9 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.7 อากาศปฐภูมิ 75% อากาศหุติภูมิ 25% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	325.1	303.1	295	307.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	897.9	870.3	843.9	870.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	876.5	919.8	877.3	891.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	867.5	907.8	881.3	885.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	869.5	890.8	880.5	880.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	853.6	868.4	872	864.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	850.2	860	867.8	859.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	805.2	812.4	818.2	811.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	904.3	922.8	923.9	917.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	880.2	901.2	904.4	895.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	848.6	867.8	872.6	863.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	819.4	834.7	838.6	830.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	24.6	25.2	25.4	25.1
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	797.6	806.1	829	810.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	884.4	892.7	878.5	885.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	892.4	887.2	886.5	888.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	882.3	872	906	886.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	872.7	887.2	894.5	884.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	858.3	875.5	875	869.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	837.2	847.6	869.5	851.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	880.2	909	894.8	894.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	855.6	881	859.4	865.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	812.4	832	815	819.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	24.5	24.6	24.3	24.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.7 อากาศปฐภูมิ 75% อากาศหุติยภูมิ 25% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (°C)	
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	888.2	860	732.4	826.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	875.4	876.4	871.5	874.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	840.7	852.4	849.7	847.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	845.2	843.4	849.5	846.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	833.4	830.5	838.2	834.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	798.9	799.7	805	801.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	662.1	628.4	604.2	631.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	812.4	822.4	809.4	814.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	802.3	806.2	805.4	804.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	733	728.5	729.2	730.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	24.7	24.4	23.9	24.3
0	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	675.1	614.4	579.1	622.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	736.7	742.5	735.8	738.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	702.3	708.9	711.7	707.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	714	715.4	722	717.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	733.5	730.9	733.3	732.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	767.7	679.6	679.8	709.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	460.6	445.6	435.5	447.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	609.6	562.5	533.1	568.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	658.8	658	668.1	661.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	569.3	565.2	574.3	569.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	24.7	24.5	24	24.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปฐภูมิ 100% อากาศหุคยภูมิ 0%

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	354.6	334.4	315	334.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	653.4	660.4	666	659.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	789	755.8	702.9	749.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	876.1	835.9	802.7	838.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	890.3	866.5	877.6	878.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	878.8	882.1	893	884.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	910	909.1	924.7	914.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	24.4	24.4	24.6	24.5
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	45	45	45	45.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	288	279.4	268.2	278.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	639.3	752.2	768.4	720.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	735.2	804.9	855.1	798.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	817.7	853.9	924.7	865.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	886.6	907.3	958.2	917.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	924.8	948.7	971.2	948.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	968.7	995.2	1004.2	989.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	24.2	24.2	24.1	24.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปฐมภูมิ 100% อากาศหุติยภูมิ 0% (ต่อ

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	180.9	166.8	162	169.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	773	811.3	821.8	802.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	778	769.7	780.1	775.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	794.7	786.4	800.1	793.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	806.7	802	820	809.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	837.1	839.3	849.9	842.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	881.1	874.3	884.9	880.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	899.6	903.1	910.1	904.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	1016.1	1022.9	1040.2	1026.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	963.7	979.7	994.5	979.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	909.6	930.4	942.7	927.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	945.5	966.3	975.8	962.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	23.7	24	24.1	23.9
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	720.8	685	670.5	692.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	793.2	810.7	799.9	801.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	867.9	880.5	876	874.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	891.1	907.5	904.8	901.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	894.4	905.3	911	903.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	902.6	919	926.3	916.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	970.2	988.5	1001.7	986.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	912.9	910.7	920.7	914.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	827.6	821.6	829.4	826.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	892.9	914.4	932.9	913.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	23.8	24.1	24	24.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปฐภูมิ 100% อากาศหุติภูมิ 0% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิ้ล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
30	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	594	550.6	524.6	556.4
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	705.9	698.8	692.1	698.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	795.3	790.8	779.9	788.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	851.8	853.4	840.8	848.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	878.3	882	880.7	880.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	867.5	878.5	881	875.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	878.4	875.8	879.3	877.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	817.6	805.6	805.8	809.7
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	683.7	674.4	673.1	677.1
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	851.1	871.7	886.8	869.9
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	24.2	24.1	24.1	24.1
0	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3	430.8	409.6	398	412.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 4	577.5	566.1	543	562.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5	642.8	631.1	630.4	634.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 6	682	670	668.5	673.5
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 7	762.5	754.1	752.8	756.5
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 8	725.5	723.4	722.4	723.8
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 10	659.7	651.9	657.3	656.3
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 11	589.3	575.9	570.6	578.6
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 12	528	516.4	510.8	518.4
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 13	660.2	661.4	659.1	660.2
	เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 14	24.3	24.4	24.1	24.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปฐภูมิ 85% อากาศหุติยภูมิ 15%

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	444.7	438.3	396.2	426.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	761.5	781.3	821.8	788.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	847.2	839.5	874.8	853.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	895.9	892.9	914.1	901.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	901.3	924.6	931	919.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	915.7	926.7	936.5	926.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	928.9	944.9	962.3	945.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	24.5	24.9	24.7	24.7
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	45.6	45.4	45.4	45.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	359	329.8	313.3	334.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	919.6	916.3	903.1	913.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	928.5	953.9	949.8	944.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	919.7	937.9	938.1	931.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	923.7	935.3	936.2	931.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	932.1	939.5	942.9	938.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	955.2	964.1	965.7	961.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	25.3	25	24.8	25.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปฐมภูมิ 85% อากาศหุติยภูมิ 15% (ต่อ

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	439.5	385.8	355.8	393.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	883.7	877.8	862.2	874.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	889.1	908.3	926.2	907.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	879	896.3	913.4	896.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	890.9	905.3	917.1	904.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	905.4	913.2	919.1	912.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	925.4	930.8	933.7	930.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	780	782.6	784.8	782.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	1040.6	1051.1	1089.1	1060.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	1022.1	1029	1052.5	1034.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	969.9	975.4	990.9	978.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	865.1	894.3	924.6	894.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	25.2	25.3	25.4	25.3
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	850.7	795.3	812	819.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	861.5	893	885.3	879.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	862.4	879.3	898	879.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	872.2	874.7	893.3	880.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	878.1	876.9	895.2	883.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	761.8	879.4	899	846.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	934.8	979.8	1033.5	982.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	906.1	831.7	964.2	900.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	903.4	906.7	925.8	912.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	709.4	707.2	712.3	709.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	25.6	26	26.6	26.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.11 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปฐภูมิ 85% อากาศหุติยภูมิ 15% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	640	623	613	625.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	878.5	874.4	893.1	882.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	851.9	865.9	888.1	868.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	623.9	648.5	647.1	639.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	872.3	889.8	907.6	889.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	876.6	900	911.5	896.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	862.2	891.3	905.7	886.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	802.2	823.2	846.9	824.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	768.5	783.6	806.3	786.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	703.9	710.6	711.4	708.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	26.3	26.1	25.8	26.1
0	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	650	601.5	563.5	605.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	689	687.5	684.6	687.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	694.3	700.5	703.2	699.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	699.7	704.1	708.5	704.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	710.9	742.6	748.5	734.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	699.2	70.3	708.6	492.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	563.4	558.3	558.6	560.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	537.6	538	542.3	539.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	545.9	558.5	563.1	555.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	511.4	509.2	512	510.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	26.3	26.2	26.1	26.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.12 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปฐมภูมิ 75% อากาศหุคยภูมิ 25%

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
150	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	428	390	367.8	395.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	706.5	704.5	711.21	707.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	802	811.2	768.2	793.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	818.3	832.6	818.4	823.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	815.9	833.7	837.9	829.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	806.9	821.7	845.7	824.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	826.6	847.8	69.2	581.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	25.7	25.8	25.8	25.8
120	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	46.4	46.4	46.4	46.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	409.5	387.1	371.1	389.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	815.7	839.4	866.1	840.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	839.7	854.8	871.3	855.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	829.5	838	851.5	839.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	830.5	838.8	850.4	839.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	833.7	839.9	852.4	842.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	849.3	860	871.6	860.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	25.7	25.8	25.9	25.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.12 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปฐภูมิ 75% อากาศหุติภูมิ 25% (ต่อ

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ใช้ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
90	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	399	373.2	360	377.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	852.2	886.2	906.3	881.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	868.4	889.9	934.5	897.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	842.5	855.3	864.7	854.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	846.5	856	852.3	851.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	850	855	857.1	854.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	862.8	866.9	876.4	868.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	837.7	840.4	846.6	841.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	913.2	927.9	929.8	923.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	950.7	951.1	953.4	951.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	933.3	940.1	931.7	935.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	916.3	922.2	928.2	922.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	26	26.1	26.3	26.1
60	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	872.3	827.5	807.1	835.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	938.2	915	922	925.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	889.6	897	911.9	899.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	878.5	881.5	900.5	886.8
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	884	877.5	881.5	881.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	888.4	876	877.4	880.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	943.8	944.2	973.1	953.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	920	915.5	917.5	917.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	840.1	819.4	808.6	822.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	915.9	933.2	943.6	930.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	26.2	26.4	26.4	26.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.12 ผลการทดลองที่อัตราส่วนผสม 0.8 อากาศปฐมภูมิ 75% อากาศหุติยภูมิ 25% (ต่อ)

X (mm.)	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล	เวลาที่ในการทดลอง			อุณหภูมิเฉลี่ย (°c)
		3 นาที	6 นาที	9 นาที	
		อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	อุณหภูมิ (°c)	
30	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	763.5	707.1	674	714.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	872.7	878	881.4	877.4
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	840.3	848.9	857.8	849.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	837.1	844.1	864.2	848.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	853.4	844.3	856.3	851.3
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	838	828.5	833.9	833.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	802	813.7	829.5	815.1
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	778.8	769	767.1	771.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	699.5	683	673.2	685.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	767.7	748	735.9	750.5
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	26.7	26.6	26.8	26.7
0	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3	630	569.7	543.2	581.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 4	713.6	713.1	714.2	713.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 5	705.9	704.2	710.7	706.9
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 6	721.7	714.5	716.6	717.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 7	758.2	752.6	751.2	754.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 8	702.8	699.6	701.1	701.2
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9	—	—	—	—
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 10	597.6	583.6	582.8	588.0
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 11	567.4	556	549.3	557.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 12	540.5	530.8	523.6	531.6
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 13	540.2	530.4	521.5	530.7
	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 14	26.9	26.7	26.5	26.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้