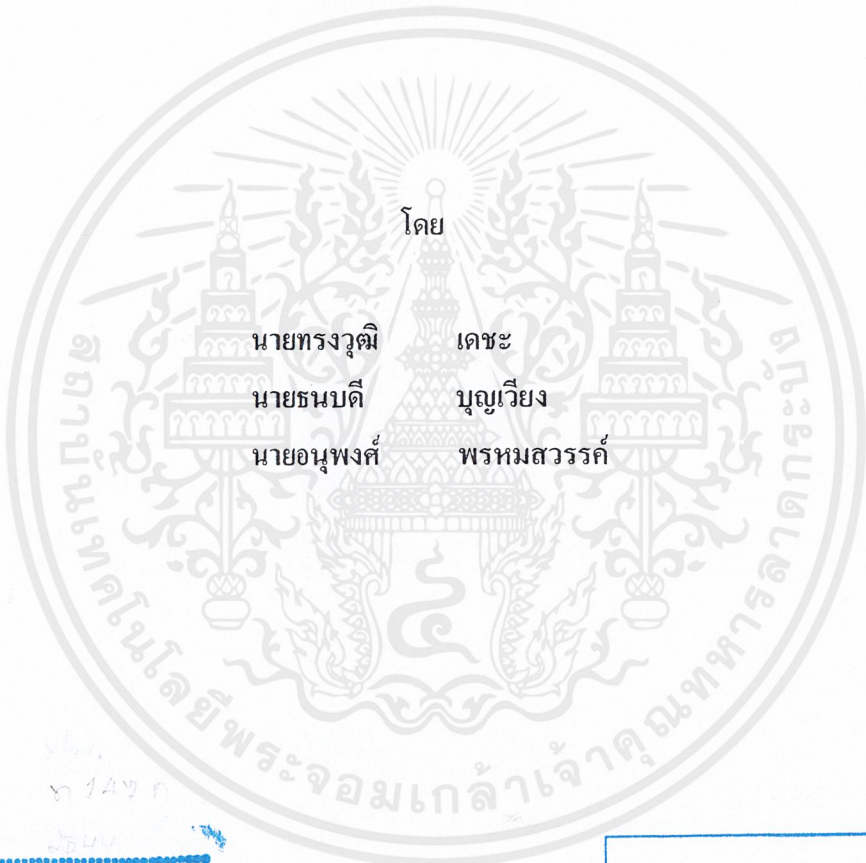


การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SAWDUST COMBUSTION IN A
FLUIDIZED BED COMBUSTOR



โดย

นายทรงวุฒิ

เดชะ

นายธนบดี

บุญเวียง

นายอนุพงศ์

พรหมสวรรค์

ส.พ.
๓ 14๗ ก

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 45680
วัน, เดือน, ปี... 3 ก.พ. 2546

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6/11/02 100

ปริญญานิพนธ์ประจำปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

ผู้จัดทำ

1. นายทรงวุฒิ เดชะ
2. นายธนบดี บุญเวียง
3. นายอนุพงศ์ พรหมสวรรค์



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.วัชระ เพิ่มชาติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

ทรงวุฒิ	เดชะ
ชนบดี	บุญเวียง
อนุพงศ์	พรหมสวรรค์
วัชร	เพิ่มชาติ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2544	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่เข้าร่วมกับหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด ตลอดจนศึกษาถึงปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผา เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ทำการศึกษาร่างจากเหล็กหนา 4.5 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางเตา 0.9 ม. สูง 3 ม. ภายนอกเตาหุ้มด้วยฉนวนเซรามิกสีไฟเบอร์หนา 5 ซม. และใช้ทรายเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 - 0.5 มม. เป็นเบดในการเผาไหม้ ในการทดลองได้ทำการศึกษาลงปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผา ได้แก่ ปริมาณอากาศส่วนเกิน อัตราการป้อนเชื้อเพลิง ความสูงเบด และความชื้นในเชื้อเพลิง

ในขั้นตอนการทดลอง ได้ทำการวัดอุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตาตลอดความสูงตัวเตา และไอเสียที่ปล่อยออกจากเตา ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่ได้จะอยู่ในช่วง 650-900 องศาเซลเซียส สิ่งที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อปริมาณไอเสียที่ปล่อยออกจากเตา คือ ความชื้นในเชื้อเพลิง และปริมาณอากาศส่วนเกิน แต่อย่างไรก็ตามหากมีการควบคุมความชื้นในเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศส่วนเกินให้เหมาะสม จะทำให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปล่อยออกจากเตามีปริมาณต่ำ อันหมายถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีของเตาเผาแบบนี้

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SAWDUST COMBUSTION IN A
FLUIDIZED BED COMBUSTOR**

Mr. Songvut	Dacha	
Mr. Thanabodee	Boonvieng	
Mr. Anupong	Promsawan	
Mr. Watchara	Permchart	Advisor
Year 2001		

ABSTRACT

This project is a part of the development of a biomass fluidized bed combustor connected to an industrial steam boiler. The objectives are to study a characteristics of sawdust combustion in a fluidized bed combustor, FBC and study the parameters that affected to combustion efficiency. The combustor was made of 4.5 mm thick steel (0.9 m in diameter and 3 m high) and insulated with 5 cm thick ceramics fiber. The sand (0.3-0.5 mm diameter) was used as the inert bed material. In the experimental tests, the effects of the excess air, fuel feed rate, sand bed height and moisture content in the fuel combustion characteristics in FBC were investigated.

In the tests, the temperature profiles along over the combustor height and the emissions particularly in CO concentration at the combustor stack were measured. The results showed that the parameters, specifically in excess air ratio and moisture content in the fuel, had the effects on the temperature in FBC. The combustion temperature was in the range of 650-900°C. The moisture content in sawdust and excess air ratio had strongly effects on the CO concentration at the stack. However, the combustion efficiency was in the high range if the excess air ratio as well as moisture content in the fuel were controlled properly.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาของงาน โครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์	
2.1 การนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ประโยชน์	5
2.2 การเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด	11
2.3 ทฤษฎีการเผาไหม้	12
2.3.1 ปฏิกริยาของการเผาไหม้	13
2.3.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการเผาไหม้	14
2.3.3 การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ	14
2.3.4 การติดไฟหรือการลุกไหม้	15
2.3.5 การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง	15
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	
3.1 การจัดเตรียมการทดลอง	21
3.1.1 การจัดเตรียมตัวเตาเผา	21

3.1.2	การจัดเตรียมเครื่องมือวัด	23
3.1.3	การจัดเตรียมขี้เถ้า	25
3.2	ขั้นตอนการทดลอง	27
บทที่ 4 ผลการศึกษา		28
4.1	คุณสมบัติของฉนวนที่ใช้หุ้มเตา	28
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของทรายที่ใช้เป็นเบด	29
4.3	องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าที่ใช้ในการทดลอง	29
4.4	ผลการทดสอบการอุ่นเบด	30
4.5	ผลการศึกษา	31
4.5.1	ผลของปริมาณเบด	31
4.5.2	ผลของอัตราการป้อนขี้เถ้า	32
4.5.3	ผลของความชื้นในเชื้อเพลิง	34
4.5.4	ผลของปริมาณอากาศส่วนเกิน	35
4.5.5	ลักษณะการเผาไหม้ภายในเตา	36
4.5.6	ผลการวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง		39
5.1	สรุปผลการทดลอง	39
5.2	ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	39
ภาคผนวก		41
ก.	การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้	41
ข.	ผลการทดลองหาอุณหภูมิ และปริมาณ CO	47
ค.	บทความการประชุมวิชาการ โครงการงานวิศวกรรมเกษตร ครั้งที่ 8	50
กิตติกรรมประกาศ		57
เอกสารอ้างอิง		58

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ปริมาณการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมการผลิตปี 2539 – 2543	1
1.2 ปริมาณเชื้อเพลิงไม้ ชานอ้อย และแกลบที่เหลือในปี 2539 – 2543	2
2.1 กระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลให้เป็นพลังงาน	5
2.2 การเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นพลังงานโดยใช้กระบวนการทางความร้อน	6
2.3 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยา Carbonization	7
2.4 เตาเผาถ่านแบบดั้งเดิม	8
2.5 ชนิดของเตาเผาผลิตก๊าซชีวมวลแบบต่างๆ	10
2.6 เตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบความดันบรรยากาศ	11
2.7 เตาเผาไหม้ฟลูอิด ไคซ์เบดแบบใช้ความดัน	12
2.8 Circulating fluidized-bed combustor	13
2.9 ลักษณะเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบด	17
2.10 ลักษณะเตาเผาแบบ Fluidized bed และ Spouted bed ที่ผลิตก๊าซจากกะลามะพร้าว	18
2.11 ลักษณะเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบด	19
2.12 ลักษณะเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดในการทดลอง	20
3.1 ภาพเตาเผาก่อน และหลังการหุ้มฉนวน	21
3.2 Orifice manometer	22
3.3 เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย Testo 350	22
3.4 การต่อเครื่องวัดอุณหภูมิ	23
3.5 ตำแหน่งที่ทำการวัดไอเสีย	24
3.6 ตัวอย่างซีลที่ใช้ในการทดลอง	25
3.7 ไลอะแกรมการ Set-up การทดลอง	26
3.8 ภาพถ่ายจริงแสดงการ Set-up การทดลอง	26
4.1 อุณหภูมิทรายที่ใช้เป็นเบดในขณะทำการทดลอง	30
4.2 ปริมาณของ co ที่ความสูงเบดต่าง ๆ	31
4.3 ความสูงเบดที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิ	32
4.4 อิทธิพลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตา	33
4.5 ปริมาณของ CO ที่อัตราการป้อนต่าง ๆ	33
4.6 อิทธิพลของความชื้นซีลต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตา	34

4.7	ผลของความชื้นที่เกี่ยวกับปริมาณ CO	34
4.8	อิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิภายในเตา	35
4.9	การกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้ตามแนวรัศมีเตา	36



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษา	27
4.1 คุณสมบัติของฉนวนที่ใช้ในการหุ้มเตา	28
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของทรายที่ใช้เป็นเบดในการทดลอง	29
4.3 องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์	29
4.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้	37
ข.1 ผลการทดลองที่ความชื้น 15.9 % และที่ความสูงเบด 20 cm.	48
ข.2 ผลการทดลองที่ความชื้น 15.9 % และที่ความสูงเบด 30 cm.	48
ข.3 ผลการทดลองที่ความชื้น 15.9 % และที่ความสูงเบด 40 cm.	48
ข.4 ผลการทดลองที่ความชื้น 33 % และที่ความสูงเบด 20 cm.	49
ข.5 ผลการทดลองที่ความชื้น 33 % และที่ความสูงเบด 30 cm.	49
ข.6 ผลการทดลองที่ความชื้น 33 % และที่ความสูงเบด 40 cm.	49

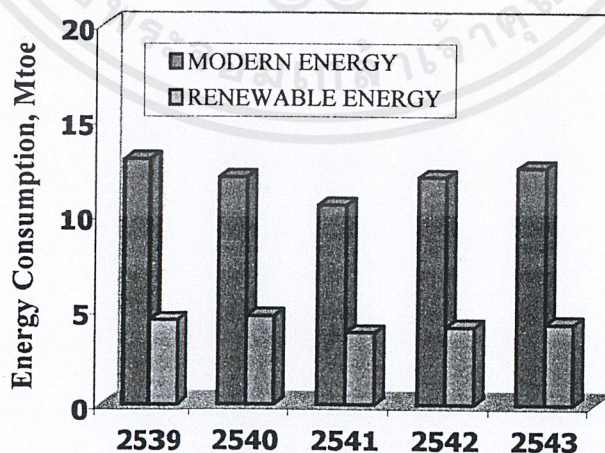
สัญลักษณ์

ϵ_{mf}	=	สัดส่วนช่องว่างของเบคขณะฟลูอิดไดซ์เบค
ϕ_s	=	ความกลมของอนุภาค
ρ_s	=	ความหนาแน่นของแข็ง, กรัม/เซนติเมตร
μ_1	=	ความหนืดของของไหลที่ทางเข้า, กรัม/เซนติเมตร*วินาที
μ_2	=	ความหนืดของของไหลที่ทางออก, กรัม/เซนติเมตร*วินาที
η	=	ประสิทธิภาพการเผาไหม้, เปอร์เซนต์
E	=	ปริมาณอากาศส่วนเกิน, เปอร์เซนต์
d_p	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางเล็กที่สุดของเบค, เซนติเมตร
d_M	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเบค, เซนติเมตร
g	=	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก, เซนติเมตร/วินาที ²
t1	=	อุณหภูมิที่ทางเข้าเตาเผา, องศาเซลเซียส
t2	=	อุณหภูมิที่ทางออกเตาเผา, องศาเซลเซียส
Q1	=	อัตราการไหลของอากาศที่เข้าเตาเผา, เมตร ³ /ชั่วโมง
Q2	=	อัตราการไหลของอากาศที่ออกเตาเผา, เมตร ³ /ชั่วโมง
HVs	=	ค่าพลังงานจำเพาะของซัลเฟอร์, กิโลจูล/กิโลกรัม
Hva	=	ค่าพลังงานจำเพาะของซีดี, กิโลจูล/กิโลกรัม
HVc	=	ค่าพลังงานจำเพาะของคาร์บอน, กิโลจูล/กิโลกรัม
AFt	=	อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง
AFa	=	อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง
Ac	=	ค่าปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในเตา
co	=	ค่าปริมาณ co ที่วัดได้, เศษส่วนล้าน
mc	=	มวลของคาร์บอนมอนอกไซด์, เศษส่วนล้าน
ma	=	มวลของซีดี, เศษส่วนล้าน

1.1 ที่มาของโครงการ

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ ตั้งแต่อดีตได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งปัจจุบันการใช้พลังงานนั้นวันจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ในปี พ.ศ.2543[1] ได้มีการใช้พลังงานทั้งหมดประมาณ 48.34 Mtoe ซึ่งมากกว่าปีก่อนประมาณ 1.3 % ทำให้เชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตพลังงานนั้นเริ่มลดน้อยลง ซึ่งหากยังเป็นอยู่ต่อไปอย่างนี้ เชื้อเพลิงที่มีการใช้จะไม่พอเพียงกับความต้องการ ประเทศไทยนั้นต้องเสียดุลการค้าจากการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นจำนวนมาก เนื่องจากราคาเชื้อเพลิงที่ปรับตัวสูงขึ้น และยังมีปัญหาตามมาอันได้แก่ ปัญหาสิ่งแวดล้อม ปัญหาทางเศรษฐกิจที่ประเทศกำลังประสบอยู่ ทำให้ราคายิ่งสูงขึ้น จากปัญหาต่างๆ เหล่านี้ทำให้ต้องมีการหาพลังงานอื่นที่มาทดแทนพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง

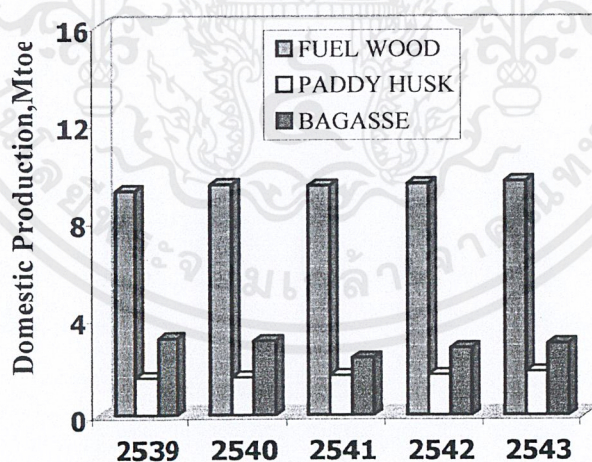
เมื่อเราพิจารณาถึงปริมาณการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมการผลิตซึ่งมีปริมาณการใช้พลังงานรวมทั้งสิ้น 16.74 Mtoe ซึ่งมากเป็นอันดับที่สองรองจากภาคขนส่งโดยแบ่งเป็นพลังงานตามแบบ (Conventional energy) อันประกอบไปด้วยน้ำมันสำเร็จรูป ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหินและไฟฟ้าในปริมาณ 12.48 Mtoe และพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) ในปริมาณ 4.26 Mtoe ปริมาณการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมการผลิตเพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 4.2 และเป็นสัดส่วนร้อยละ 34.6 ของความต้องการใช้พลังงานทั้งหมด ดังรูปที่ 1.1 จะเห็นว่าในปี 2539-2541 ปริมาณการใช้พลังงานมีปริมาณลดลงเนื่องจากปัญหาเศรษฐกิจจนถึงปี 2542 ปริมาณการใช้พลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากเศรษฐกิจเริ่มฟื้นตัว



รูปที่ 1.1 ปริมาณการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมการผลิตปี 2539-2543

แหล่งพลังงานทดแทนที่ใช้ในประเทศประกอบด้วย พลังงานชีวมวล พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม ปัจจุบันอุปทานพลังงานประมาณร้อยละ 33 มาจากชีวมวล ซึ่งประกอบด้วยเชื้อเพลิงไม้ (20%) ชานอ้อย (67%) และแกลบ (13%) [1] แต่ยังมีของเหลือทิ้งจากเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมเกษตรอีกไม่น้อยกว่าปีละ 50 ล้านตัน [2] ที่อาจพัฒนามาใช้เป็นพลังงานได้ แหล่งพลังงานน้ำในประเทศ ได้ถูกนำมาใช้เพียงร้อยละ 3 เนื่องจากประสบปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและการเมือง พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมได้รับการพัฒนาใช้เป็นพลังงานเสริม การวิจัยและพัฒนาพลังงานหมุนเวียนควรได้รับการสนับสนุนเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลังงานหมุนเวียนมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก และมีอยู่ในประเทศตลอดไป

ศักยภาพของการผลิตชีวมวลในประเทศมีแนวโน้มจะเพิ่มมากขึ้นในอนาคต เนื่องจากปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่ก่อให้เกิดชีวมวลมีแนวโน้มจะผลิตได้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะปัจจัยสำคัญหลายประการ เช่น การเพิ่มจำนวนพื้นที่การเพาะปลูก การพัฒนาเทคโนโลยีทางการเกษตร ซึ่งจะส่งผลให้ผลผลิตต่อไร่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น และสถานะการส่งออกผลผลิตการเกษตรดีขึ้น ส่วนความต้องการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอนาคตเช่นกัน เนื่องจากชีวมวลมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงสมัยใหม่เช่น ก๊าซหุงต้ม หรือไฟฟ้า และการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงมีส่วนช่วยรักษาสิ่งแวดล้อม เพราะไม่ก่อให้เกิดมลพิษเมื่อพิจารณาวงจรชีวิตของชีวมวล ดังรูปที่ 1.2 แสดงปริมาณเชื้อเพลิงไม้ ชานอ้อยและแกลบที่เหลือในแต่ละปี จะเห็นว่าปริมาณมาก ถ้าหากสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงาน จะได้มากกว่าร้อยละ 30 ของการบริโภคพลังงานแต่ละปี



รูปที่ 1.2 ปริมาณเชื้อเพลิงไม้ ชานอ้อยและแกลบที่เหลือในปี 2539-2543

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น โครงการนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาการใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวล โดยโครงการนี้เป็นการศึกษาต่อเนื่องจากนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเกษตร ในปี พ.ศ. 2543 ที่ได้ทำการ

ออกแบบและสร้างเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดแล้ว โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเตา 0.9 เมตร แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นทรงกรวยตัด สูง 1 เมตร มุมเอียง 18 องศา และส่วนที่สองเป็นทรงกระบอก จำนวน 4 ท่อน ความสูงท่อนละ 0.5 เมตร ความสูงรวมทั้งหมดของเตาเผา 3.0 เมตร สร้างจากแผ่นเหล็กหนา 4.5 มิลลิเมตร[3] ผู้จัดทำจะทำการศึกษาความเหมาะสมในการทำงานจริง ซึ่งในการศึกษามุ่งหวังให้เกิดประโยชน์ขึ้นในการนำเอาผลการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานกับการผลิตพลังงานจากชีวมวลภายในระบบงานอุตสาหกรรมต่างๆ หรือนำมาเป็นส่วนช่วยผลิตพลังงานเสริมจากน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาลักษณะการเผาไหม้ที่เปลวไฟในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ทรายเป็นเบดในการเผาไหม้ ตลอดจนศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความชื้นของเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศส่วนเกิน ความสูงของเบดในเตา และอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ที่มีต่อการทำงานของเตาเผา ตลอดจนประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Combustion efficiency) และมลพิษ (Emissions) ที่ปล่อยออกจากเตา

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ในการศึกษาจะใช้เชื้อเพลิงจากโรงเลื่อยร่วมเกล้าค้าไม้เป็นเชื้อเพลิงหลักในการเผาไหม้ และใช้ทรายเป็นเบดในเตา

1.3.2 ตัวแปรที่จะทำการศึกษา ได้แก่ ความชื้นในเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศส่วนเกิน ความสูงของเบดในเตา และอัตราการป้อนเชื้อเพลิง

1.3.3 มลพิษที่จะทำการวัด ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้การวิเคราะห์ไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้แบบ Dry basis

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด ตลอดจนการควบคุมการทำงานของเตาเผาดังกล่าว

1.4.2 เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการทดลองที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลประเภทอื่นๆ ต่อไป เช่น แกลบ ปานอ้อย กากปาล์ม ชังข้าวโพด เป็นต้น

1.4.3 ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการสร้างแบบจำลองลักษณะการเผาไหม้ (Kinetics model) ของเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบการเผาไหม้แบบ Combustor – Boiler System ในอนาคตต่อไป

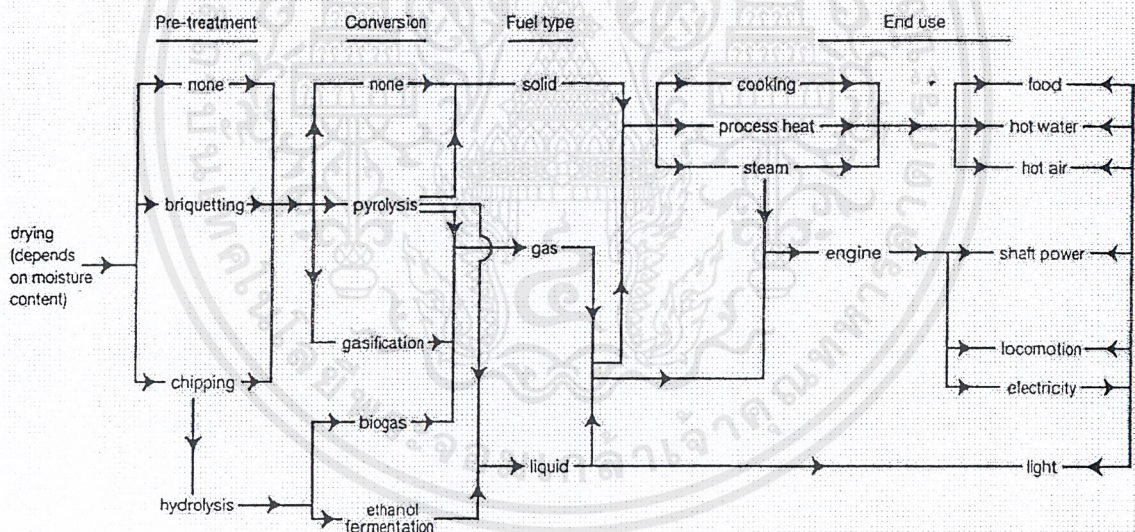


บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

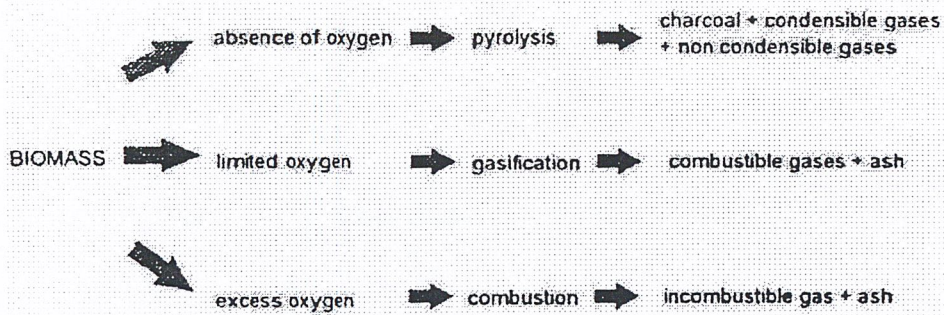
2.1 การนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ประโยชน์

การเปลี่ยนรูปชีวมวลให้เป็นพลังงาน มีอยู่ 2 กระบวนการ ดังรูปที่ 2.1 คือ

- กระบวนการทางชีวภาพ (Bio conversion process) เป็นกระบวนการที่นำชีวมวลมาหมัก(Fermentation) เช่น มูลสัตว์ หรือซากพืช ให้เกิดก๊าซชีวภาพ หรือเอทานอลออกมา แล้วนำสิ่งที่ได้ไปใช้งาน
- กระบวนการทางความร้อน (Thermal conversion process) เป็นการเปลี่ยนรูปโดยใช้ความร้อน มีอยู่ 3 วิธี คือ Pyrolysis, Gasification และ Combustion ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 กระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลให้เป็นพลังงาน [4]

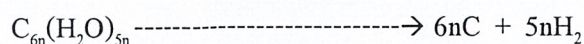


รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นพลังงานโดยใช้กระบวนการทางความร้อน [4]

Pyrolysis คือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน ที่อุณหภูมิสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส ซึ่งผลของกระบวนการ Pyrolysis จะทำให้เกิดผลผลิตออกมา 3 ประเภท คือ ของแข็ง เช่น (Char, Charcoal หรือ ถ่าน) ของเหลว (น้ำมันสารระเหย หรือกรด) และก๊าซต่าง ๆ โดยที่อัตราส่วนของผลผลิตที่ได้ นั้น จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลและสภาพของการเกิดปฏิกิริยา โดยปัญหาหลักของวิธี Pyrolysis คือ สามารถสร้างได้เพียงขนาดเล็ก ๆ เท่านั้น ส่วนก๊าซที่ได้จากปฏิกิริยานั้นมีพลังงานต่ำ โดยตัวอย่างกระบวนการทาง Pyrolysis คือ

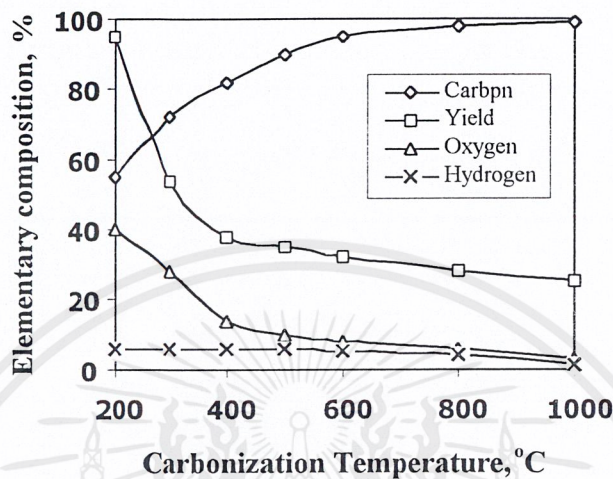
การผลิตถ่านเชื้อเพลิงจากชีวมวลและกระบวนการ Pyrolysis ผลผลิตถ่าน ถ่านถือได้ว่าเป็นเชื้อเพลิงท้องถิ่นที่เกิดจากชีวมวลและหาได้ในเกือบทุกประเทศ ถ่านเกิดจากปฏิกิริยา Carbonization กระบวนการเกิดปฏิกิริยา Carbonization มีขั้นตอน 4 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดความร้อน เพื่อไล่ความชื้นออกจากชีวมวล ในขั้นตอนแรกจะใช้อุณหภูมิจนถึง 200 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนที่ 2 จะเป็นกระบวนการเตรียมการเกิดปฏิกิริยา Carbonization ซึ่งก็เป็นปฏิกิริยาชนิดดูดความร้อนเช่นกัน ในขั้นตอนนี้จะใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 170 – 300 องศาเซลเซียส กระบวนการนี้จะเกิดผลิตภัณฑ์ประเภทก๊าซ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ส่วนในขั้นตอนที่ 3 ของกระบวนการจะเป็นปฏิกิริยา ประเภทคายความร้อน โดยเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 250 – 300 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนนี้จะเกิดสารพวกน้ำมันดินและกรด Pyrolygneous ที่เกิดในปฏิกิริยาขั้นที่ 2 ในขั้นตอนที่ 4 จะเกิดอุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ในช่วงนี้องค์ประกอบที่ระเหยได้ที่ยังคงอยู่ในกระบวนการจะถูกขับออกไปซึ่งจะทำให้ประมาณคาร์บอนของถ่านเพิ่มขึ้น

ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องในกระบวนการ Carbonization ของชีวมวลมีดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อคุณภาพและปริมาณถ่านที่ได้ คือปริมาณความชื้นจากชีวมวลที่ป้อน ชนิดของชีวมวลและองค์ประกอบทางเคมี นอกจากนี้คุณสมบัติของถ่านที่ได้ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอีกด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ในถ่านและอุณหภูมิของปฏิกิริยา Carbonization ดังรูปที่ 2.3



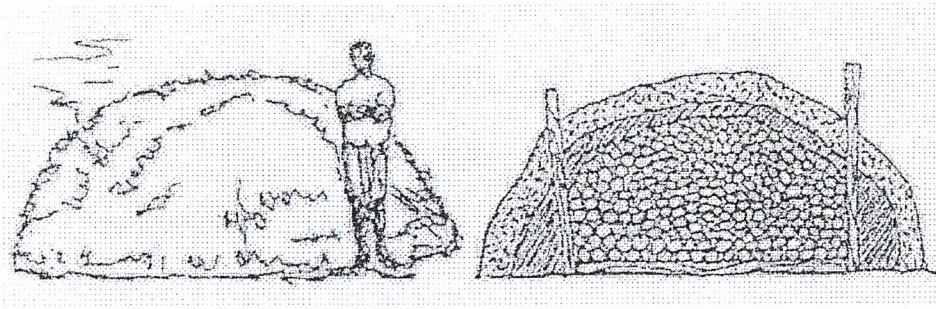
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยา Carbonization [8]

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าในช่วงอุณหภูมิที่ปริมาณผลผลิตที่ได้จะมีปริมาณสูงแต่ปริมาณคาร์บอนในผลผลิตต่ำ ปริมาณก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนจะมีค่าสูงตามลำดับและจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งจะชี้ให้เห็นว่าองค์ประกอบที่ระเหยได้ของถ่านจะขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ถ่านที่ได้

ถ่านที่มีความบริสุทธิ์สูงจะใช้อุณหภูมิเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นในช่วง 400 – 500 องศาเซลเซียส ส่วนของกรด, ทาร์และก๊าซระเหยได้ที่คายออกมากจะมากขึ้นมีผลให้ผลผลิตถ่านมีความบริสุทธิ์สูงขึ้นด้วย คาร์บอนมากกว่า 70 % อย่างไรก็ตาม ถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูงมากก็จะยิ่งเปราะสามารถแตกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยได้ง่าย ซึ่งจะทำให้เกิดการเปราะแตกในระหว่างขนส่ง ถ่านที่มีความบริสุทธิ์สูงจะมีสารระเหยได้ (Volatile matter) ต่ำและการเผาไหม้เป็นแบบสะอาด คือมีควันน้อยมากแต่ไหม้ติดไฟได้ง่าย

เตาที่ใช้เผาถ่าน

เตาเผาดินแบบดั้งเดิม มี 2 ประเภทที่ง่ายที่สุดคือใช้ไม้และฟางกองบนพื้นและคลุมด้วยดิน เรียกว่าเป็นเตาเผาแบบกองดิน (Earth – mound kiln) อีกประเภทหนึ่งจะขุดดินเป็นหลุมใส่เศษไม้ลงไป และเอาดินปิดคลุมเรียกว่าเป็นเตาเผาแบบ Pit kiln ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เตาเผาถ่านแบบดั้งเดิม [5]

ขั้นตอนการเผาไหม้การคิดไฟมักถึงที่ก้นเตาหรือในบางกรณีจุดไฟที่ส่วนบน โดยจะเริ่มเผาไหม้จำนวนเล็กน้อยเพื่อให้เกิดก๊าซร้อนซึ่งช่วยในการเผาไหม้ที่เหลือให้กลายเป็นถ่าน อากาศที่ทำให้เกิดโซนเผาไหม้จะเข้ามาทางรูที่เจาะผ่านชั้นดินและชั้นหญ้า โดยรูที่เจาะไว้ทำหน้าที่เป็นทางออกของควันที่เกิดขึ้นในเตา

เตาเผาประเภท Subri Clay – Metal kiln

ได้ถูกพัฒนาจากเตาเผาแบบหลุมให้ใช้ท่อโลหะและหลังคาคลุมหลุมผนังด้านข้างหลุมทำด้วยดินเหนียวอัดแน่นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง

Gasification คือการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปก๊าซเชื้อเพลิง โดยการเผาไหม้ที่มีอากาศปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ แต่จะเกิดความร้อนเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาประเภทต่างๆมากมาย เช่น ปฏิกิริยารีดักชัน ไพโรไลซิส และการอบแห้งขึ้นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการผลิตก๊าซได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน น้ำ ไนโตรเจน ถ่านและน้ำมันดิบ

การผลิตก๊าซมี 2 แบบคือ การผลิตก๊าซแบบใช้ออกซิเจน และการผลิตก๊าซแบบใช้อากาศ ซึ่งก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จะมีคุณสมบัติในเชิงความร้อนที่แตกต่างกัน โดยก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซแบบใช้ออกซิเจนจะมีค่าความร้อนประมาณ 10-18 MJ/m³ และก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซแบบใช้อากาศมีค่าความร้อนประมาณ 4-7 MJ/m³ ถึงแม้ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากกระบวนการผลิตก๊าซแบบใช้อากาศจะมีค่าความร้อนต่ำ แต่ในทางปฏิบัติเทคโนโลยีดังกล่าวกลับเป็นที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจากราคาถูกและปลอดภัยกว่าการนำออกซิเจนมาใช้ในกระบวนการโดยตรง

ขั้นตอนของกระบวนการผลิตก๊าซ

การผลิตก๊าซชีววมวล โดยอาศัยกระบวนการผลิตก๊าซประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

- กระบวนการอบแห้ง ขั้นตอนนี้เป็นการระเหยความชื้นในเชื้อเพลิงชีววมวล
- กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นขั้นตอนสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิงชีววมวล ทำให้ได้คาร์บอนในรูปถ่าน มีเชน กรดน้ำส้ม น้ำมันดิน (Tar) และ Pyroigneous
- กระบวนการรีดักชัน (Reduction) ขั้นตอนนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้ที่ได้จากกระบวนการออกซิเดชันให้เป็นก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ ก๊าซหลักที่ได้จากกระบวนการนี้คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน
- กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงชีววมวลกับอากาศหรือออกซิเจน โดยจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเป็นกระบวนการคายความร้อน

ชนิดของเตาผลิตก๊าซชีววมวล

สามารถแบ่งออกได้ 3 แบบใหญ่ๆตามชนิดการไหลของ Producer gas และการจัดเรียงตัวของชั้นต่างๆ ภายในเตาผลิตก๊าซคือ

เตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบอากาศไหลขึ้น (Updraft gasifier)

เตาผลิตก๊าซแบบนี้เป็นแบบง่ายที่สุด ชั้นล่างสุดจะเป็นชั้นเผาไหม้ ชั้นรีดักชัน ชั้นกลั่นสลาย และชั้นลดความชื้นเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าสู่ส่วนบนของเตาและอากาศถูกส่งเข้ามาทางด้านล่าง การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นที่จุดแรกของการสัมผัสกับอากาศและคาร์บอนไดออกไซด์ ชั้นเผาไหม้จะผ่านขึ้นไปยังชั้นรีดักชันซึ่งมีคาร์บอนที่ร้อนอยู่มากคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้เป็น คาร์บอนมอนอกไซด์ จุดเด่นของเตาแบบนี้คือสามารถเพิ่มปริมาณ Producer gas ได้โดยใช้ไอน้ำเข้าช่วย นอกจากนั้นยังสามารถใช้กับชีววมวลที่มีความชื้นสูงได้อาจจะสูงได้ถึง 50% อุณหภูมิเฉลี่ยของ Producer gas ที่ออกจากเตาจะค่อนข้างต่ำคือประมาณ 120-150 องศาเซลเซียส แต่ปัญหาที่สำคัญคือสารระเหยที่ออกมาพร้อมกับ Producer gas ซึ่งจะเป็อุปสรรคสำคัญมากในการนำไปเดินเครื่องยนต์สันดาปภายในเพราะจะเกิดการอุดตันและทำความเสียหายให้แก่เครื่องยนต์ได้

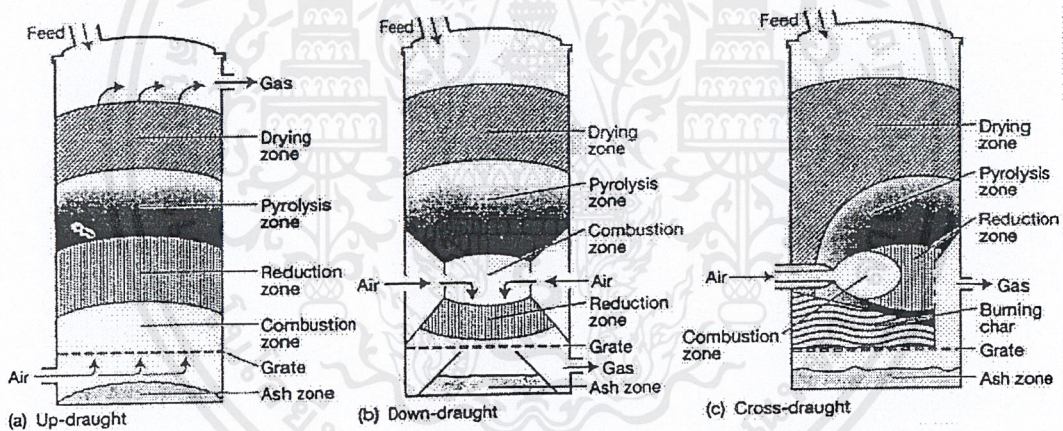
เตาเผาก๊าซชีววมวลแบบอากาศไหลลง (Downdraft gasifier)

เตาแบบนี้จะเป็นแบบที่ใช้ทำการวิจัยและใช้งานจริงกันอย่างแพร่หลายทั่วไปมากที่สุด ชั้นล่างสุดจะเป็นชั้นรีดักชันชั้นเผาไหม้ ชั้นกลั่นสลายและชั้นลดความชื้น อากาศจะถูกส่งให้ไหลผ่านชั้นเผาไหม้

และไหลลงไปสู่ชั้นรีดักชันซึ่งอยู่ชั้นล่าง สารระเหยชั้นก้นสลายที่อยู่เหนือชั้นเผาไหม้ก็จะถูกดูดผ่านชั้นเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิ 900-1200 องศาเซลเซียส สารระเหยต่างๆ จะถูกเผาไปทำให้ Producer gas ที่ผลิตออกมาได้นั้นปราศจากสารระเหยจึงเหมาะที่จะนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ข้อเสียเปรียบของเตาชนิดนี้คือจะเกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงในชั้นเผาไหม้จึงต้องใช้วัสดุที่ทนความร้อนสูง อุณหภูมิเฉลี่ยของ Producer gas ที่ออกมาจากเตาจะค่อนข้างสูงมากคือประมาณ 450-550 องศาเซลเซียส ดังนั้นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่จึงมีความจำเป็น

เตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบอากาศไหลตามขวาง (Crossdraft gasifier)

เตาแบบนี้จะเป็นแบบที่เล็กและเบาที่สุดใน 3 แบบ ทิศทางการไหลของอากาศจะตั้งฉากกับแนวแกนของเตาอากาศจะถูกส่งตรงไปชั้นเผาไหม้ และต่อไปยังชั้นรีดักชันซึ่งทั้ง 2 นี้จะเป็นชั้นเล็กๆ วางเรียงกันตามแนวอนอุณหภูมิเฉลี่ยของ Producer gas ที่ออกมาจากเตาจะไม่สูงมากเหมือนเตาแบบไหลลง ชีวมวลจะถูกป้อนจากทางด้านบนของเตาเช่นเดียวกันกับเตาทั้งสองแบบที่กล่าวมาแล้ว ข้อดีของเตาแบบนี้คือสามารถผลิต Producer gas ได้เร็วกว่าเตาทั้งสองแบบ และอุณหภูมิในเตาจะไม่สูงนัก ดังรูป



รูปที่ 2.5 ชนิดของเตาเผาผลิตก๊าซชีววมวลแบบต่างๆ [4]

Direct combustion การเผาไหม้โดยตรงเป็นปฏิกิริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว พร้อมกับเกิดการลุกไหม้และการคายความร้อน ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วน ๆ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก แต่จะใช้อากาศแทน โดยอากาศจะมีก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนก๊าซอื่นมีปะปนอยู่น้อยมาก (ในอากาศมีก๊าซออกซิเจนประมาณร้อยละ 21 และก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 79 โดยปริมาตร หรือก๊าซออกซิเจนประมาณร้อยละ 23 และก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 77 โดยน้ำหนัก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

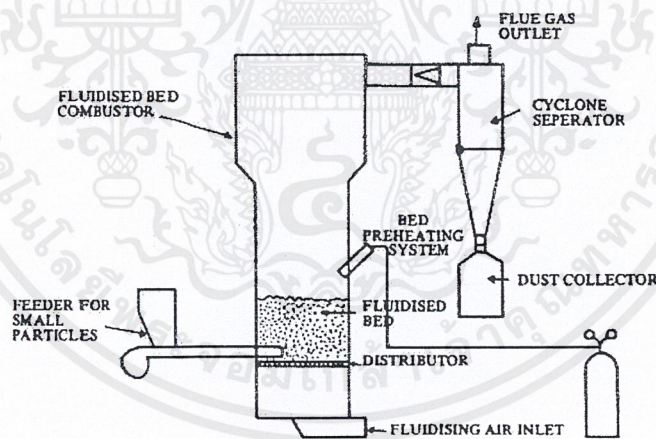
ขั้นตอนของกระบวนการเผาไหม้โดยตรง กระบวนการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งประกอบด้วย 4 ขั้นตอน

1. เริ่มต้นด้วยก๊าซออกซิเจนสัมผัสเชื้อเพลิง
2. เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO)
3. การปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมาที่ผิว
4. การทำปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนนอกไซด์กับออกซิเจนเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

2.2 การเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด

การเผาไหม้แบบความดันบรรยากาศ (Atmospheric fluidized-bed combustion)

เป็นปรากฏการณ์ของแข็งขนาดเล็กหรือเบดสัมผัสกับของไหลหรือก๊าซ ที่ความดันบรรยากาศ ถ้าความเร็วของของไหลค่อนข้างต่ำเบดจะอยู่ในสภานิ่ง(Fixed bed) ดังรูปที่ 2.6 เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดเบดขยับตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระ เรียกสภานี้ว่าจุดต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด โดยความเร็วของไหลที่จุดนี้ เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด (Minimum fluidization velocity, U_{mf}) ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล ของไหลที่ใช้อาจจะเป็นก๊าซหรือของไหลก็ได้

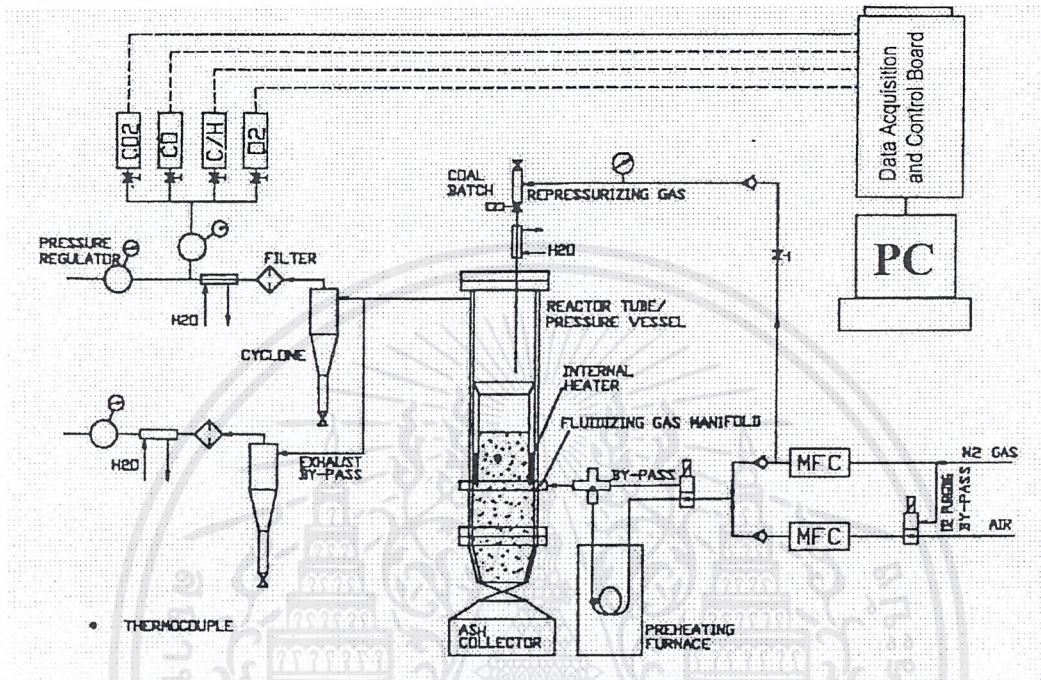


รูปที่ 2.6 เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบความดันบรรยากาศ

การเผาไหม้แบบใช้ความดัน (Pressurized fluidized-bed combustion)

จากการทำงานของระบบการเผาไหม้จะใช้ความดันในการทำงาน โดยการเพิ่มความดันให้กับอากาศที่เข้าภายในระบบทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างรวดเร็วขึ้น เนื่องจากอากาศที่อัดจะมีปริมาณ O_2 มากขึ้นกว่าปกติ จึงทำให้ในการเผาไหม้ในระดับอุณหภูมิเดียวกับแบบ Atmosphere สามารถเผาไหม้

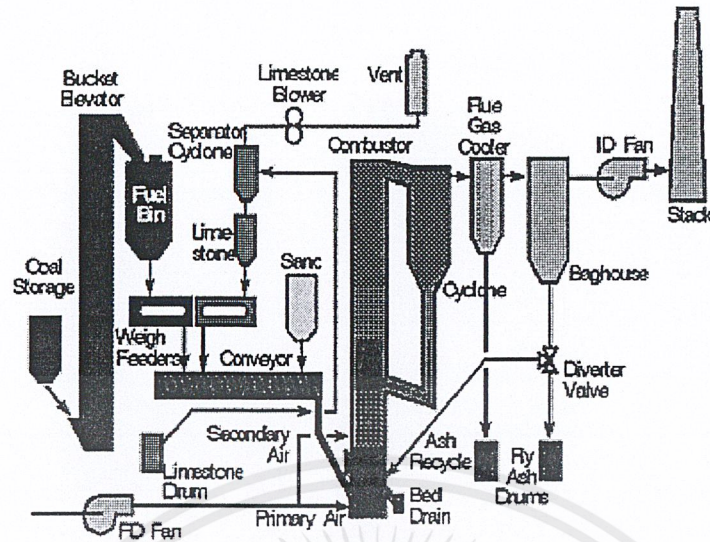
เชื้อเพลิงมากกว่าเดิม ซึ่งผลที่ตามมาจากการเพิ่มความดันจะทำให้ขนาดของเตาเผาเมื่อเทียบกับขนาดเตาเผาของแบบ Atmosphere จะมีขนาดเล็กกว่าทำให้ประหยัดเนื้อที่ในการในการทำงานได้ แต่เตาที่ใช้ในการทำงานตามแบบนี้จะต้องสร้างอย่างแข็งแรงขึ้นด้วย เพื่อป้องกันการเสียหายจากความดันที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เตาเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบดแบบใช้ความดัน [6]

การเผาไหม้แบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed combustion)

เตาเผาแบบ Circulating fluidized bed เป็นเตาที่มีลักษณะการทำงานคือ จะนำคาร์บอนที่ยังเหลือจากการเผาไหม้มากลับมาเผาไหม้ใหม่เพื่อให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีและเหลือคาร์บอนน้อยที่สุด การทำงานคือ อากาศถูกกระจายออกเพื่อทำให้ของแข็งมีการเคลื่อนที่คล้ายของไหลแล้วมีการสะสมความร้อนในเบดเพื่อเผาไหม้เชื้อเพลิง เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่เตาโดย Feeder และลอยตัวขึ้นด้วยแรงยกตัวจากอากาศ เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ขึ้นแรกที่ยังมีคาร์บอนเหลืออยู่จะถูกแยกตัวออกจากก๊าซต่าง ๆ ด้วยไซโคลนตัวที่หนึ่งแล้วนำคาร์บอนที่เหลือนี้กลับมาเผาไหม้ใหม่ ส่วนคาร์บอนที่เหลือที่ผ่านไซโคลนตัวแรกไปจะถูกแยกอีกด้วยไซโคลนตัวที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ดังนั้นการเผาไหม้ด้วยเตาเผาแบบ Circulating fluidized bed นี้จึงเหลือคาร์บอนน้อยมากและประสิทธิภาพการเผาไหม้ดี ดังรูปที่ 2.8



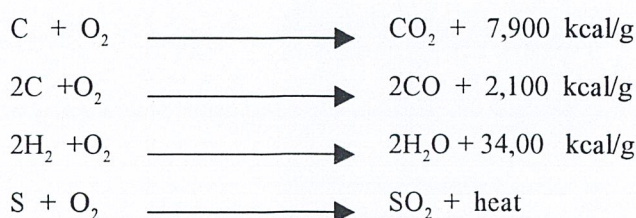
รูปที่ 2.8 Circulating fluidized-bed combustor

2.3 ทฤษฎีการเผาไหม้ (Theory of combustion)

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยารวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว พร้อมกับเกิดการลุกไหม้และคายความร้อน ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วนๆ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากและอันตราย ในทางปฏิบัติจะใช้อากาศซึ่งหาได้ในราคาถูกแทน ในอากาศมีก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนก๊าซอื่น ๆ มีปะปนอยู่น้อยมาก ออกซิเจนมีอยู่ในอากาศร้อยละ 21 และไนโตรเจนร้อยละ 79 โดยปริมาตร หรือประมาณร้อยละ 23 และร้อยละ 77 โดยมวลตามลำดับ

2.3.1 ปฏิกิริยาของการเผาไหม้

เนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และปริมาณธาตุอื่นปะปนอยู่บ้าง เช่น กำมะถัน เมื่อนำไปเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังแสดงด้วยสมการดังต่อไปนี้



2.3.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการเผาไหม้

ขบวนการเผาไหม้ที่ดีควรมีอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณออกซิเจนตามปริมาณข้างต้น ปริมาณของอากาศตามทฤษฎี (Theoretical air) คือ ปริมาณน้อยที่สุดของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์จนคาร์บอน ไฮโดรเจนและกำมะถันเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามลำดับ แต่ในทางปฏิบัติ อากาศที่ต้องการทางทฤษฎีนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการสันดาปที่สมบูรณ์ ปฏิกิริยาที่เห็นชัดเจนอย่างของการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ คือ การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนในไอเสียที่ออกมาเพื่อแก้ปัญหาหนึ่งจึงต้องใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินพอสำหรับการสันดาปที่สมบูรณ์

$$\% \text{ อากาศมากเกินพอ} = 100 * \frac{\text{อากาศที่ใช้จริง} - \text{อากาศที่ต้องการตามทฤษฎี}}{\text{อากาศที่ต้องการทางทฤษฎี}}$$

2.3.3 การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ

การรวมตัวที่ดีระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจน ก็คือการทำให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซ การผสมกันนั้นจะเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าเป็นเชื้อเพลิงแข็งหรือของเหลว การผสมกันนั้นก็ยากขึ้น

ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นของเหลว ส่วนใหญ่ก็จะมีการทำให้เป็นอนุภาคเล็กๆ ก่อน แล้วจึงจะทำการเผาไหม้ จะทำให้รวมตัวได้ง่ายกับอากาศและเกิดการลุกไหม้ที่ดี เหมือนเชื้อเพลิงเป็นก๊าซส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้น แต่ละโมเลกุลของออกซิเจนจะสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จากนั้นออกซิเจนจะเข้าไปผสมกับคาร์บอนทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์คือ เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด ฉะนั้นขบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะประกอบด้วยพฤติกรรม ดังนี้

พฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง

1. เริ่มต้นด้วยออกซิเจนสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงแข็ง
2. มีการทำปฏิกิริยากันระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน
3. มีการปล่อยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ออกมาจากผิว
4. เกิดสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ปกคลุมผิวบนสุดของเชื้อเพลิงแข็ง

ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า อัตราการเผาไหม้นั้นขึ้นอยู่กับสาเหตุที่กล่าวมาแล้ว และสามารถเร่งปฏิกิริยาการเกิดได้โดยการบดเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งให้เป็นผงเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสให้มากขึ้น

2.3.4 การติดไฟหรือการลุกไหม้

การลุกไหม้ของเชื้อเพลิงหรืออัตรารวมตัวกันทางเคมีของเชื้อเพลิงกับอากาศนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเผาไหม้ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในตอนเริ่มต้น และจะเกิดต่อไปเรื่อยๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะไปเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้สูงขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้นด้วย ฉะนั้นสิ่งที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้แบบนี้เกิดขึ้นได้เองต้องมี

- บริเวณที่จำกัดสำหรับสะสมความร้อน
- สารเชื้อเพลิง
- อากาศ

การลุกไหม้ไม่ได้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เอง ส่วนใหญ่จะใช้ปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมามากขึ้น นอกจากนี้สิ่งที่สำคัญสำหรับการเผาไหม้แบบต่อเนื่องก็คือ อุณหภูมิ ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็ทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถลุกไหม้แบบต่อเนื่องได้

2.3.5 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง

ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นของเหลวหรือก๊าซซึ่งทราบส่วนประกอบสามารถนำมาชี้สภาวะการเกิดของปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ แต่เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติมักจะมีส่วนประกอบที่ไม่แน่นอน จึงทำให้เกิดปัญหาดังนี้คือ

1. เป็นการยากที่จะหาค่าต่ำสุด สำหรับใช้เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาของการเผาไหม้และอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด
2. การเผาไหม้ไม่ได้เกิดเป็นแบบผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะมีพื้นผิวของเชื้อเพลิงในการสัมผัสกับอากาศจำกัดคือ จะเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของเชื้อเพลิงเข้าไปเรื่อยๆ ฉะนั้น แม้ว่าจะให้ออกซิเจนมากเกินไป ปริมาณออกซิเจนก็สามารถจะเกิดปฏิกิริยาเฉพาะที่ผิวของเชื้อเพลิงเท่านั้น

จากปัญหาทั้ง 2 ข้อของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งนั้น จะเห็นว่าการออกแบบระบบของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้นควรคำนึงถึงเหตุผลต่างๆ ดังนี้

ก. ควรจะให้พื้นที่ผิวสำหรับปฏิกิริยามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ สามารถทำได้โดย

- บดเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นอนุภาคที่เล็ก

- มีการทำให้ก๊าซในเตาเกิดการเคลื่อนที่อย่างรุนแรง เพื่อที่จะกวาดให้พื้นผิวของเชื้อเพลิงแข็งนั้นปราศจากสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาหรือเถ้า เช่นเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

ข. อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับอัตราเร็วที่พื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงสัมผัสหรือเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจะต้องมีเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เพียงพอเพื่อให้เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้หมด

ค. ระหว่างการเผาไหม้ อุณหภูมิในการเผาไหม้ต้องสูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ต่อเนื่องกันจากเหตุผลทั้ง 3 ข้อนี้ นักวิชาการมักนำมาพิจารณาในรูปของ 3 ตัวดังนี้

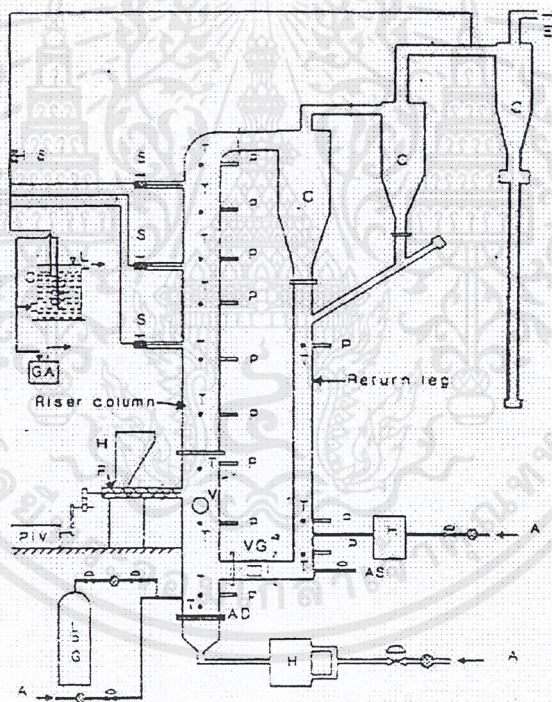
- Temperature หรืออุณหภูมิ ปกติแล้วในการเผาไหม้ย่อมต้องการให้มีอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่การที่จะทำให้มีอุณหภูมิสูงได้นั้นมากน้อยแค่ไหนนั้นมีข้อจำกัด คือ ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิที่แตกต่างกันในกรณีที่มีอุณหภูมิสูงเกินไปก็ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นสารที่ไม่ต้องการได้เช่น สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และอาจทำให้เกิดข้อเสียได้ เช่นทำเถ้ากลายเป็นชีโลหะ (Slag) เกาะติดอยู่ตามผนังที่เป็นเหล็กซึ่งทำหน้าที่ในการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดการกัดกร่อนได้

- Turbulence หรือการปั่นป่วน จุดประสงค์ของการทำให้เกิดการปั่นป่วนขึ้นเพื่อที่จะทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอากาศและพื้นผิวของเชื้อเพลิง ทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดบริเวณของพื้นที่ผิวที่จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นใหม่

- Time เมื่อมีอุณหภูมิและการปั่นป่วนที่เหมาะสมแล้ว สิ่งที่ต้องพิจารณาอีกอย่างก็คือ เวลาที่ให้เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาควรแน่ใจว่าทำเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ได้มากที่สุด แต่การที่ต้องการให้ผลสมบูรณ์คือ เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้จนหมดนั้นย่อมเป็นไปได้ยากเพราะต้องใช้เวลานานมากและทำให้ค่าใช้จ่ายสูงมากด้วย

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- J. Talukdar and S.C. Bhattacharya [8] ได้ศึกษาการเผาไหม้ขี้เลื่อย (Sawdust) ในเตาเผาแบบ Circulating fluidized bed โดยเตามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. ทำจาก สแตนเลส และติดอุปกรณ์จ่ายลมส่วนใต้ของเตาเพื่อพาให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบฟลูอิดไดซ์ อนุภาคที่เคลื่อนที่รวมกับก๊าซจะถูกแยกด้วย ไชโคลน แล้วย้อนกลับมายังเตาใหม่ด้วย Return leg เตาหุ้มฉนวนหนา 2.5 ซม. และอากาศที่ถูกนำเข้ามาในเตาจะถูกอุ่นด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก่อนเป็นอันดับแรก โดยการเผาไหม้นี้จะทำการอุ่นเบดจนกระทั่งมีอุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส จึงจะเริ่มมีการป้อนเชื้อเพลิง จากการทดลองพบว่าการเพิ่ม Excess air และ Temperature มีผลต่อประสิทธิภาพของเตาโดยปริมาณ Excess air 30 % จะให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 99 % เชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการนี้คือ ขี้เลื่อยและถิกไนต์ มีอัตราส่วน 25 % ต่อ 75 % ตามลำดับ ทราบที่นำมาเป็น เเบด มีขนาด 200 Micron ดังรูปที่ 2.9

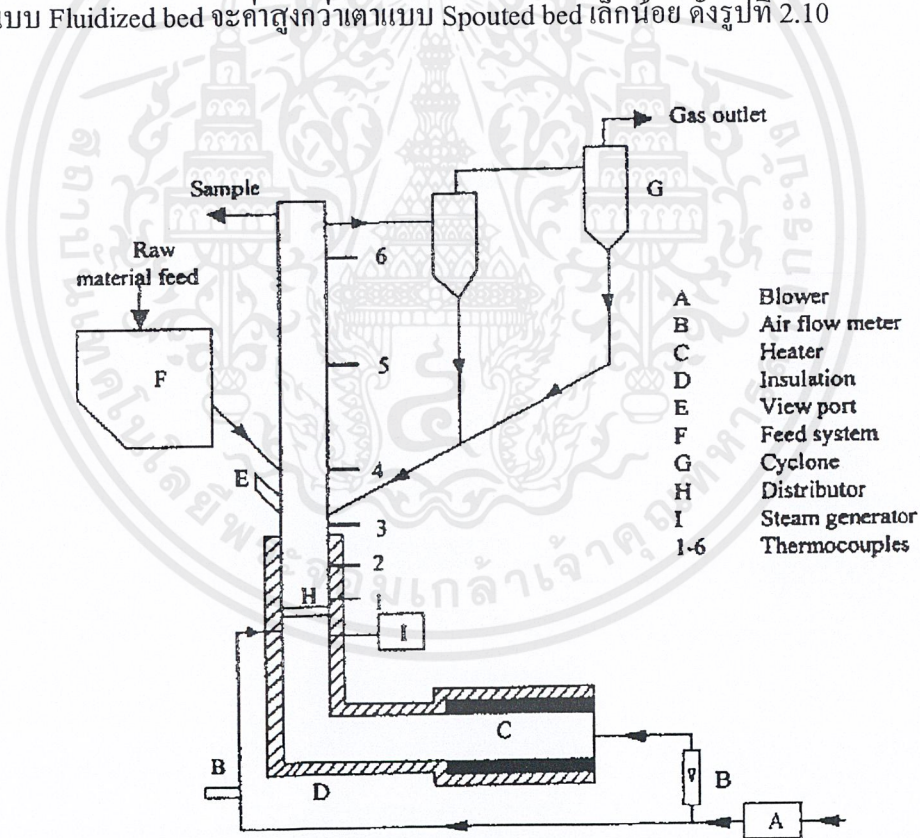


รูปที่ 2.9 Circulating fluidized-bed combustor [8]

- H.M. Shafey and I.S. Taha [9] ได้ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแบบไม่ต่อเนื่องด้วยแบบจำลองขนาดเล็กขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 1.5 ม. พร้อมกับนำชุดอุปกรณ์จ่ายลมแบบ Sandwich Type เพื่อใช้กระจายลมเข้าสู่ภายในเตา น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นบรรจุอยู่ในท่อที่ขดเป็นวงเพื่อควบคุมอุณหภูมิของการเผาไหม้ วัดความดันตกคร่อมและอุณหภูมิเมื่อมีความแตกต่างในแต่ละส่วนของ

เตา เชื้อเพลิงที่นำมาใช้คือ ถ่านหินที่มีส่วนประกอบของซัลเฟอร์ 3.5 % และ ชั่งข้าวโพด เบริด ที่นำมาใช้คือ ทราโยโดยมีทำการศึกษาคัดสอบเป็นเวลา 40 ชม. พร้อมกับศึกษาการเคลื่อนที่ของ คุโหลและกระบวนการเผาไหม้ และยังศึกษาการเริ่ม Start-up แบบต่าง ๆ จะมีผลอย่างไรในการปฏิบัติการ ในการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 650 องศาเซลเซียสสามารถที่จะเผาให้ ถ่านหินและชั่งข้าวโพด เผาไหม้ได้และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนระหว่าง เบริดและท่อมีค่าอยู่ระหว่าง $300-600 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมและอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาที่ เบริด ได้รับมีค่าประมาณ 400-800 องศาเซลเซียส

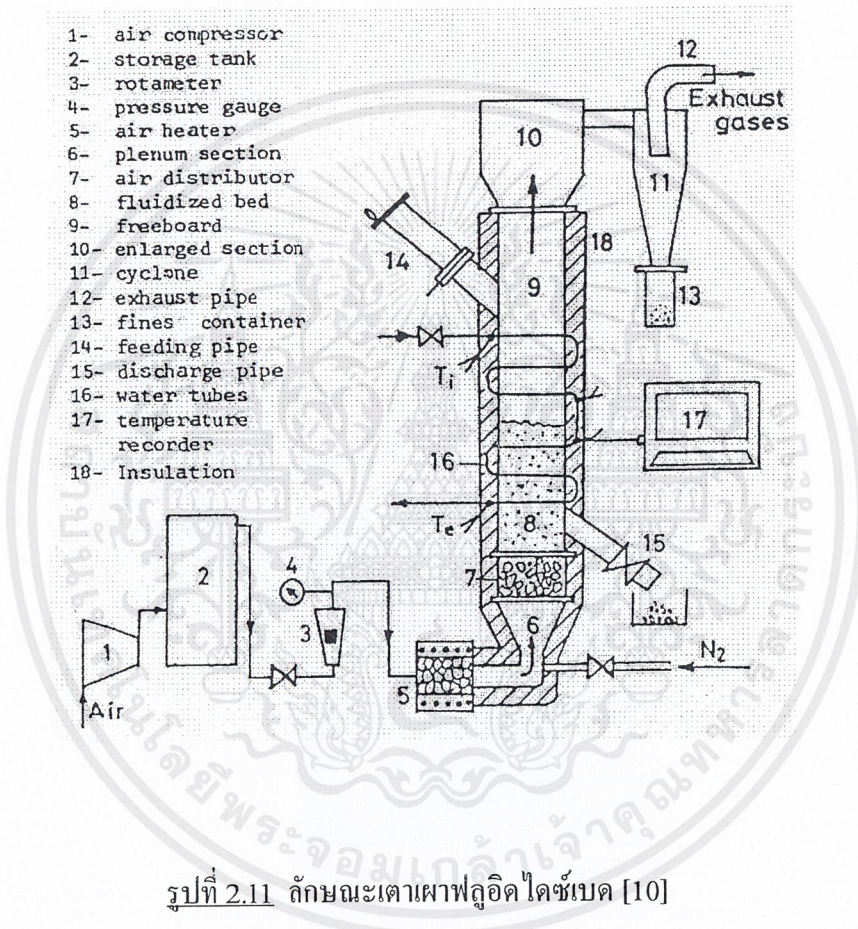
- M.M. Hoque, S.C. Bhattacharya [7] ได้ศึกษาการผลิตก๊าซ Gasification จากกะลามะพร้าวในเตาเผาแบบ Fluidized bed และแบบ Spouted bed ทำการเปรียบเทียบค่าความร้อนและก๊าซที่เกิดขึ้นจากทั้งสองเตา อุณหภูมิที่ทำการศึกษา 527-842 องศาเซลเซียส (เตา Fluidize bed) 607-773 องศาเซลเซียส (เตา Spouted bed) อัตราการป้อน 4.2 kg/hr อัตราอากาศ $5.02 \text{ m}^3/\text{h}$ ตัวเตาจากสแตนเลสหุ้มฉนวน สูง 210 ซม. จากผลการทดลองพบว่าค่าความร้อนและก๊าซที่ได้จากการทดลองคือ CH_4 , CO , CO_2 , H_2 ในเตาเผาแบบ Fluidized bed จะค่าสูงกว่าเตาแบบ Spouted bed เล็กน้อย ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะเตาเผาแบบ Fluidized bed และ Spouted bed ที่ผลิตก๊าซจากกะลามะพร้าว [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

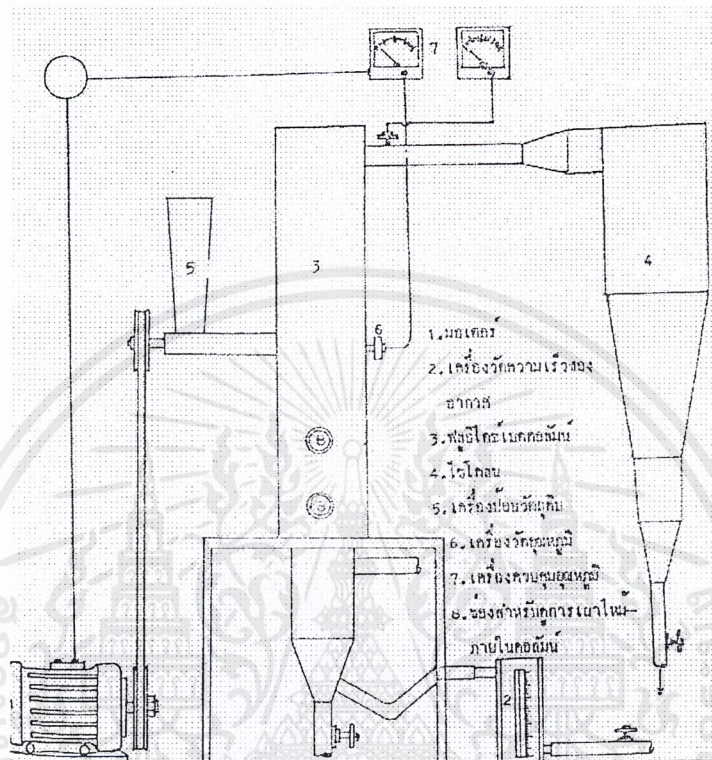
- W. Weizhang [10] ได้มีการศึกษาการใช้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง จากการเผาไหม้ส่วนที่เหลือจากการเผาจะนำมาทำ Pozzolana ซึ่งคือปูนซีเมนต์ชนิดหนึ่ง การพัฒนาครั้งนี้จะศึกษาจากเตา 2 แบบ คือแบบ Lab scale ที่ก่ออิฐทนไฟภายในเตาส่วนภายนอกจะเป็นเหล็ก มีพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 6.4 ตารางเมตร สูง 2 เมตร ใช้ความสูงของเบด 15 เซนติเมตร และปรับปรุงมาเป็นแบบ Pilot scale ที่จะมีประสิทธิภาพสูง และเกิดขึ้นได้น้อย ความร้อนที่ได้ประมาณ 200-300 กิโลวัตต์ เมื่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ 95% การทำงานที่อัตราอากาศส่วนเกินที่ 20% ซึ่งอากาศในส่วนที่สองจะเป็นส่วนจำเป็นต่อการเผาไหม้ให้ได้ผล ดังรูป 2.11



- ศศิวิมล สูงสว่าง (2526) [16] ได้ศึกษาการเผาไหม้แกลบในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยขั้นตอนของการวิจัยเริ่มต้นด้วยการสร้างเครื่องมือ ศึกษาการทำงานและกลไกการทำงานของเครื่องมือ วิจัยเตาเผาไหม้แบบฟลูอิด ไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง แล้วทำการเก็บข้อมูลอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่จะหาความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของความร้อนที่เกิดขึ้นในการทดลองค่าความเร็วอากาศอยู่ในช่วง 20.62-45.67 m/s และอุณหภูมิของการเผาไหม้จาก 500 – 800 องศาเซลเซียส พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเผาไหม้แกลบคือที่ความเร็ว 32.77 m/s และอุณหภูมิของการเผาไหม้ประมาณ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ร้อยละ 96.91 โดยมีอัตราการป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกลบ 3.05 kg/hr นอกจากนั้นได้มีการเปรียบเทียบชี้ให้เห็นแก่กลบที่ได้จากการเผาไหม้ตามวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันกับชี้ให้เห็นแก่กลบที่ได้จากการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด พบว่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้โดยฟลูอิดไดซ์เบดจะสูงกว่าประมาณร้อยละ 47.53 ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

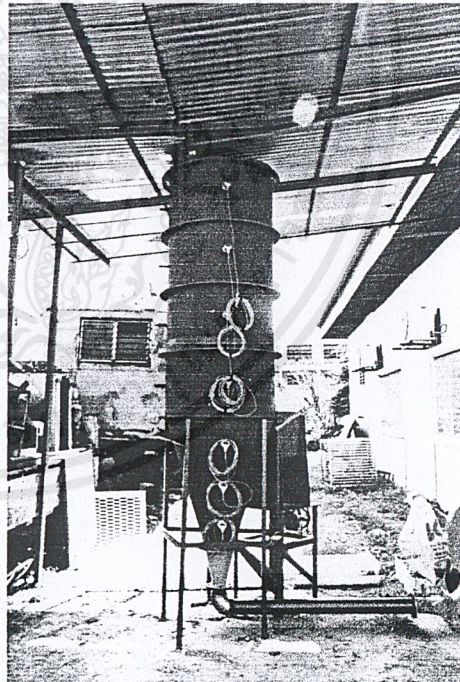
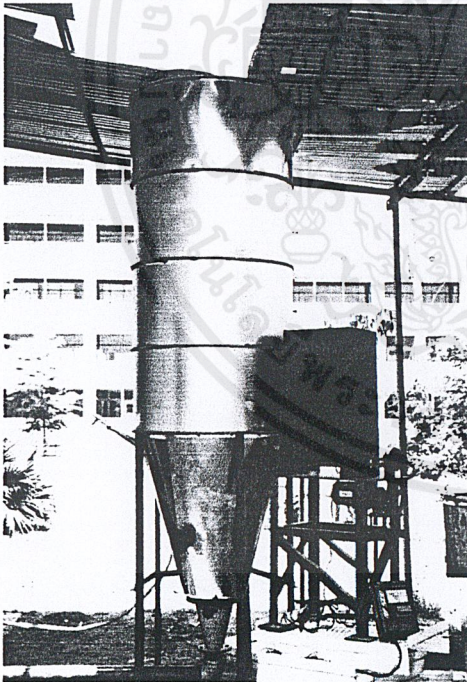
ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การจัดเตรียมการทดลอง

3.1.1 การจัดเตรียมตัวเตาเผา

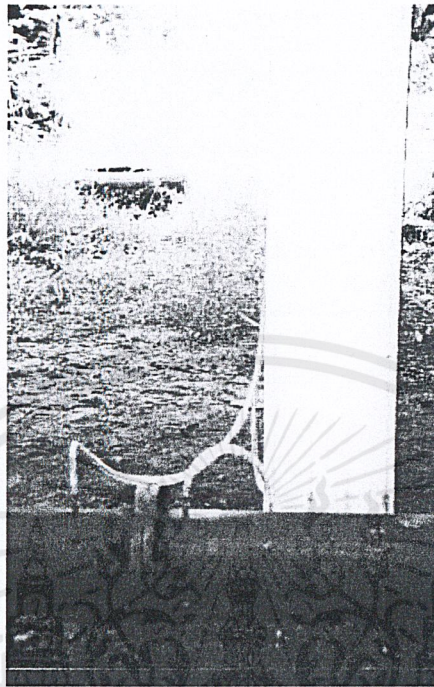
เริ่มแรกในการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่สร้างขึ้นโดยนักศึกษาวิศวกรรมเกษตร ปี 2543 ปรากฏว่าเกิดปัญหาขึ้น จึงได้ทำการปรับปรุงแก้ไขและเพิ่มเติมเครื่องมือทำโครงการบางส่วนให้มีการทำงานดีขึ้น ดังนี้คือ

ก. ตัวเตาเผาเริ่มแรกไม่มีการหุ้มฉนวน พบว่าต้องใช้เวลานานในการอุ่นเบด และอุณหภูมิที่ได้ยังมีค่าสูง ไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้จริงเนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนที่ผนังเตามาก ดังนั้นจึงมีการหุ้มฉนวนโดยใช้ Ceramic fiber ความหนาในการหุ้ม 5 ซม. ได้ทำการหุ้ม 2 ส่วนคือ ตัวเตาเผา และที่ไซโคลน ดังในรูปที่ 3.1

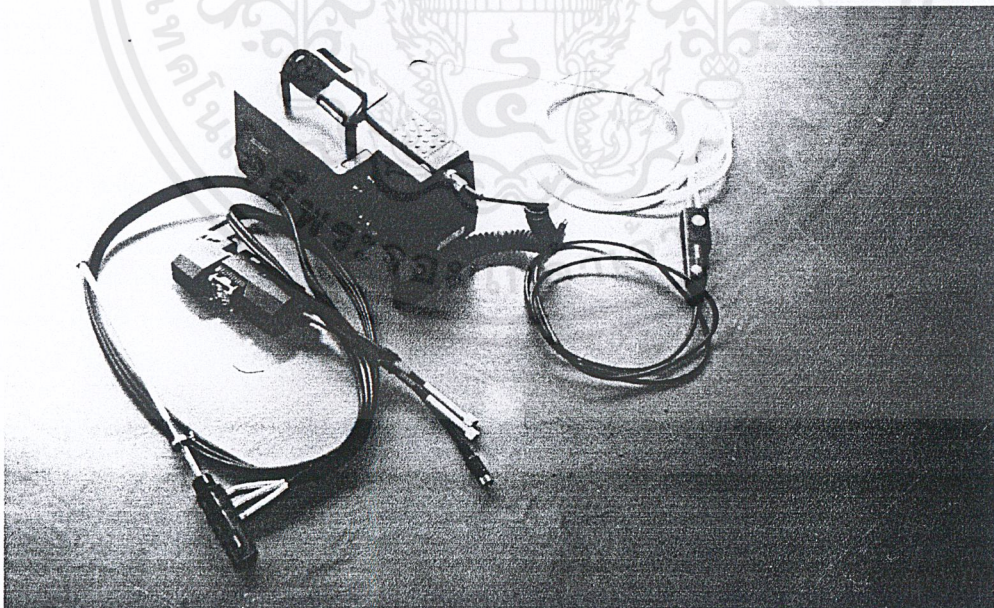


รูปที่ 3.1 ภาพเตาเผา ก่อน และ หลังการหุ้มฉนวน

ข. ติดตั้งเครื่องมือวัดความดัน Orifice manometer ที่ท่อจ่ายอากาศของ Blower โดยใส่แผ่น Orific ขวางทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 Orifice manometer



รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย Testo 350

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การจัดเตรียมเครื่องมือวัด

เครื่องมือที่ใช้วัดในการทำโครงการ ประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

ก. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermocouple and Data logger) ในการนำมาใช้งานของเตาเผา เพื่อใช้วัดอุณหภูมิที่เกิดจากการเผาไหม้ภายในเตาที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิเตาเผาเป็นเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K แบบ Chromel-Alumel วัดที่เบด และเหนือเบดที่ความสูงระยะต่างๆดังรูปที่ 3.4 ทำการวัดอุณหภูมิ 7 จุด โดยจำนวน 2 จุด ใช้วัดอุณหภูมิของเตาในส่วนของทรงกรวย อีก 4 จุดใช้วัดอุณหภูมิในส่วนของทรงกระบอก และอีกจำนวน 1 จุดใช้วัดอุณหภูมิที่ทางออกของเตาเผา โดยตำแหน่งของจุดวัดอุณหภูมิมีดังนี้

จุดที่ 1 วัดอุณหภูมิในเบดที่ระยะ 20 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม

จุดที่ 2 วัดอุณหภูมิเหนือเบดที่ระยะ 80 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม

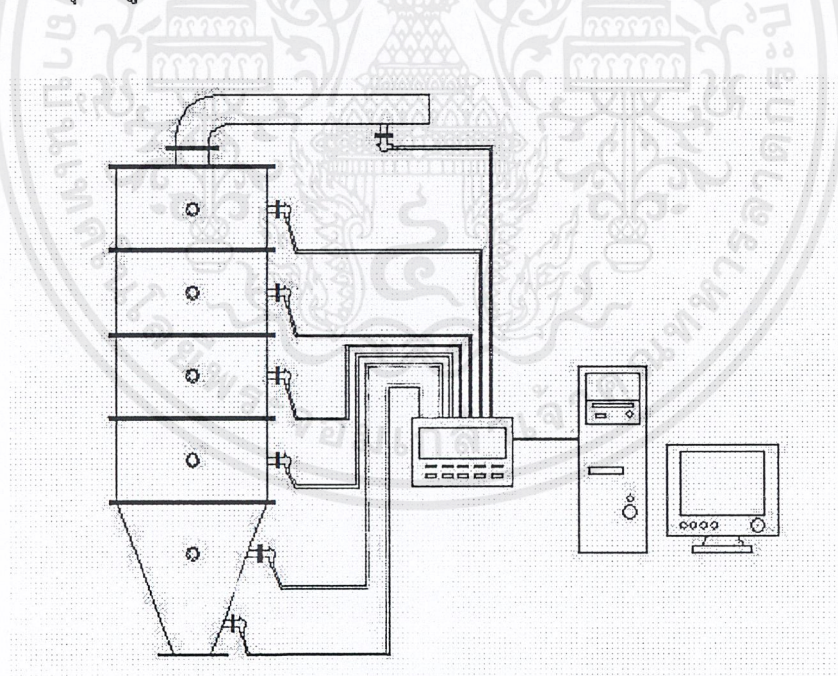
จุดที่ 3 วัดอุณหภูมิเหนือเบดที่ระยะ 125 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม

จุดที่ 4 วัดอุณหภูมิเหนือเบดที่ระยะ 175 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม

จุดที่ 5 วัดอุณหภูมิเหนือเบดที่ระยะ 225 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม

จุดที่ 6 วัดอุณหภูมิเหนือเบดที่ระยะ 275 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม

จุดที่ 7 วัดอุณหภูมิที่ทางออกของเตาเผา



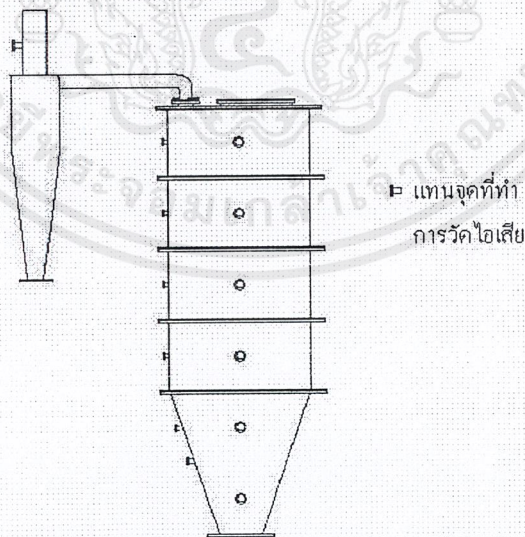
รูปที่ 3.4 การต่อเครื่องวัดอุณหภูมิ

ข. เครื่องวิเคราะห์ไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ (Flue gas analyzer) เป็นเครื่องที่ใช้วัดค่าไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ และปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess air) ก๊าซที่จะทำการศึกษาคือ CO , CO_2 , O_2 , NO_x เนื่องจากก๊าซเหล่านี้และปริมาณอากาศส่วนเกินมีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ และไอเสียที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ เครื่องวิเคราะห์ไอเสียที่ใช้คือ เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย Testo รุ่น 350 มีส่วนประกอบ 2 ส่วน ดังนี้แสดงดังรูปที่ 3.3

1. ส่วนที่ขึ้นเข้าไปวัดในเตาเผา เรียกว่า Probe
2. ส่วนแสดงผล และบันทึกข้อมูล

ตำแหน่งในการวัดไอเสียมีการกำหนด ดังนี้คือ

- จุดที่ 1 วัดไอเสียเหนือเบดที่ระยะ 50 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม
- จุดที่ 2 วัดไอเสียเหนือเบดที่ระยะ 80 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม
- จุดที่ 3 วัดไอเสียเหนือเบดที่ระยะ 125 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม
- จุดที่ 4 วัดไอเสียเหนือเบดที่ระยะ 175 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม
- จุดที่ 5 วัดไอเสียเหนือเบดที่ระยะ 225 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม
- จุดที่ 6 วัดไอเสียเหนือเบดที่ระยะ 275 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม
- จุดที่ 7 วัดที่ทางออกไอเสียของเตาเผา



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งที่ทำการวัดไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การจัดเตรียมขี้เถ้า

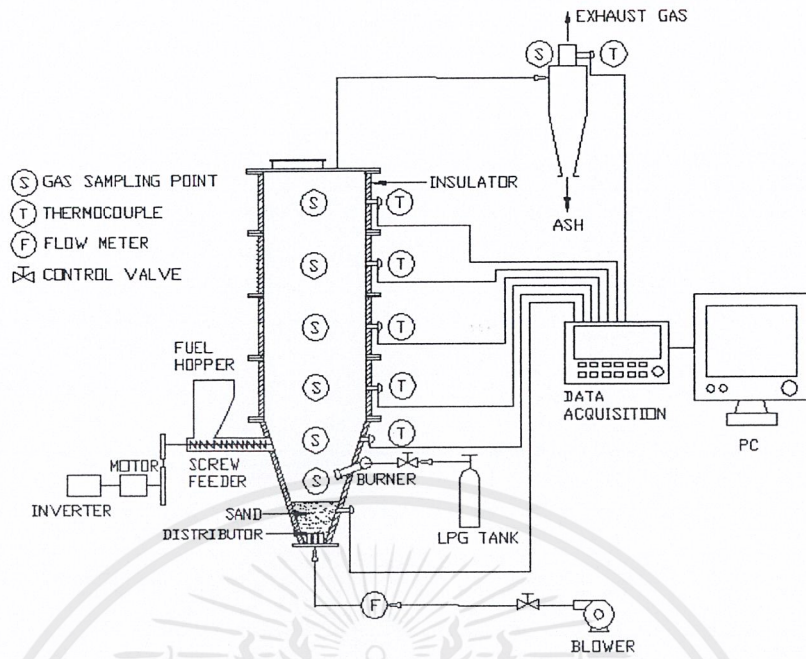
โดยการศึกษาใช้ขี้เถ้าเป็นเชื้อเพลิงและตัวแปรหนึ่ง ที่จะศึกษา คือความชื้นในขี้เถ้า ดังนั้น จึงต้องมีการเตรียมขี้เถ้าก่อนการใช้งานดังนี้

- ขี้เถ้านี้จะนำมาจากโรงเลื่อยจะนั้นขี้เถ้าที่ได้จะมีไม้หลายชนิดผสมกัน และมีเศษไม้ที่ชื้นใหญ่ผสมอยู่ด้วย จึงต้องทำการคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงในการร่อนแยกเอาพวกเศษไม้ที่ชื้นใหญ่ ออกเพื่อจะได้ไม่เกิดปัญหาในการป้อนขณะเตาทำงาน

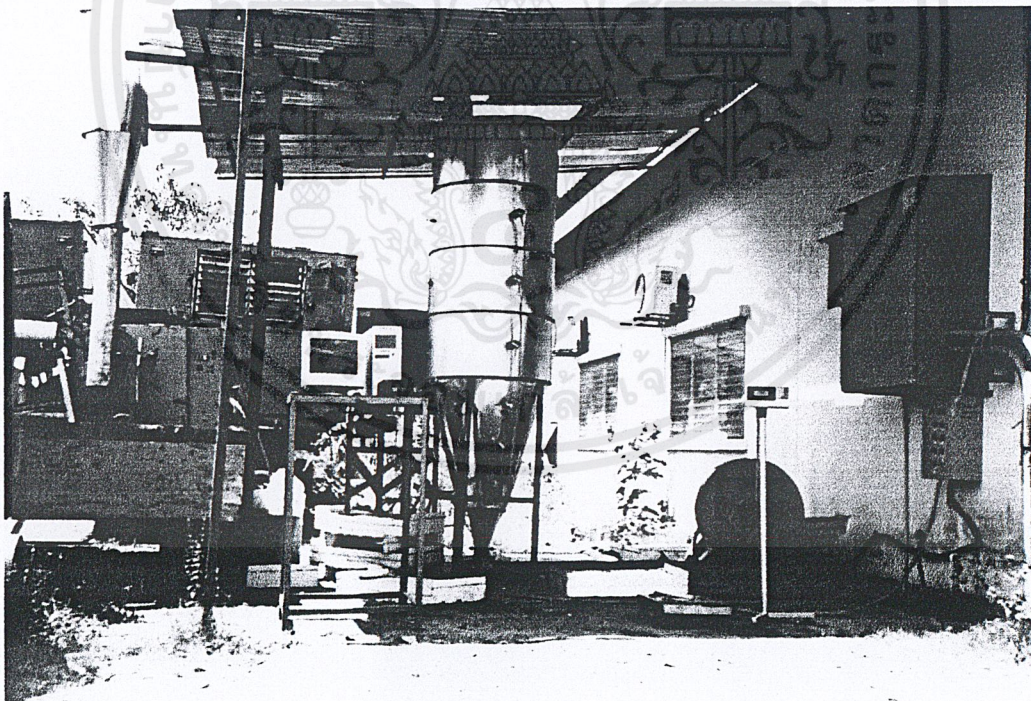
- นำตัวอย่างขี้เถ้าไปหาความชื้น โดยการนำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักแล้วไปเข้าเตาอบ ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส อบใช้เวลาประมาณ 2 วันแล้วจึงนำตัวอย่างออกมาวัดน้ำหนัก คำนวณค่าความชื้น และถือว่าขี้เถ้าชุดนี้เป็นขี้เถ้าปกติ (ตัวอย่างที่ 1) สำหรับขี้เถ้าชื้น (ตัวอย่างที่ 2) นั้นจัดเตรียมโดยการสเปรย์น้ำลงบนขี้เถ้า และคลุกเคล้าให้ทั่ว ค่าความชื้นที่ต้องการจะศึกษาให้อยู่ระหว่าง 30 – 40 % มาตรฐานเปียก



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างขี้เถ้าที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมการ set-up การทดลอง



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายจริงแสดงการ set-up การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการติดตั้งอุปกรณ์การวัดและตรวจสอบสภาพความพร้อมในการทำงาน ดังรูปที่ 3.8
2. การทดลองมีตัวแปรที่ศึกษา 4 ตัว คือ ความสูงเบด ความชื้นขี้เถ้า อัตราการป้อนขี้เถ้า และปริมาณอากาศส่วนเกิน เริ่มต้นจะให้ตัวแปรมีค่าดังนี้

ความสูงเบด	20 cm
ความชื้นขี้เถ้า	10-20 %
อัตราการป้อนขี้เถ้า	35 kg/hr
ปริมาณอากาศส่วนเกิน	20 %
3. ทำการวัดค่า CO, CO₂ และ O₂ ที่จุดต่างๆ เริ่มจากที่ปล่องปล่อยไอเสีย และวัดแต่ละจุดต่อมาเรื่อยๆ ดังที่ได้กำหนดไว้ตามรูป 3.5 การวัดจะนำ Probe ยื่นเข้าไปที่จุดกึ่งกลางเตา อ่านและบันทึกค่าที่ได้ตลอด 5 นาทีต่อหนึ่งจุด
4. การเปลี่ยนตัวแปรครั้งแรก จะเริ่มที่ปริมาณอากาศส่วนเกินโดยการปรับ วาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศ ให้ปริมาณอากาศส่วนเกินเป็น 40 % และทำการวัดค่าแต่ละจุดเหมือนในข้อ ที่ 3
5. ทำการทดลองเหมือนในข้อ 4 แต่เปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินเป็น 60, 80 และ 100 ตามลำดับ
6. การเปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 2 จะเปลี่ยนอัตราการป้อนขี้เถ้าในข้อ 2 เป็น 58 และ 81 ตามลำดับ แล้วทำการทดลองเหมือนในข้อ 3,4,5
7. การเปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 3 จะเปลี่ยนความสูงเบดในข้อ 2 เป็น 30 และ 40 cm ตามลำดับ แล้วทำการทดลองเหมือนข้อ 3,4,5,6
8. การเปลี่ยนตัวแปรครั้งที่ 4 จะเปลี่ยนความชื้นขี้เถ้าในข้อ 2 เป็น 30-40 % แล้วทำการทดลองเหมือนในข้อ 3,4,5,6,7 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปรที่ศึกษา	ค่าของตัวแปรที่ศึกษา
ปริมาณอากาศส่วนเกิน (%)	20, 40, 60, 80, 100
อัตราการป้อนขี้เถ้า (กก./ชม.)	35, 58, 81
ความชื้นของขี้เถ้า (% wb)	15.9, 33
ความสูงเบด (ชม.)	20, 30, 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติของฉนวนที่ใช้หุ้มเตา

ในการทดลองช่วงแรกจะพบปัญหาในการทดลองเช่น บริเวณเตาเผามีอุณหภูมิสูงอันทำให้ไม่สามารถทำการทดลองได้สะดวกนัก เพราะเกิดการสูญเสียความร้อนที่ผนังเตาเป็นจำนวนมาก หลังจากนั้นจึงได้มีการแก้ไขโดยนำฉนวนมาหุ้มรอบตัวเตาเผาเพื่อป้องกันความร้อนที่สูญเสีย และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้ภายในเตาได้ด้วย ซึ่งฉนวนที่ได้นำมาหุ้มนั้นเป็นฉนวนแบบเซรามิกส์ไฟเบอร์ที่มีส่วนประกอบสำคัญคืออลูมินาและซิลิกา โดยมีคุณสมบัติทนความร้อนได้ถึง 1480 องศาเซลเซียส หรือ (2700 องศาฟาเรนไฮน์)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของฉนวนที่ใช้หุ้มเตา

Physical Properties	Cerablanket	
Classification Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	1480	
Specific Heat	kcal/kg $^{\circ}\text{C}$	kJ/kgK
540 $^{\circ}\text{C}$	0.25	1.05
1090 $^{\circ}\text{C}$	0.27	1.13
Typical Chemical Analysis (%)		
Al ₂ O ₃	46.50	
SiO ₂	53.00	
ZrO ₃	-	
Fe ₂ O ₃	0.10	
MgO	0.02	
CaO	0.04	
Na ₂ O + K ₂ O	0.30	

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของทรายที่ใช้เป็นเบด

การทดลองนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ตัวเก็บความร้อนในระหว่างการทดลองหรือที่เรียกว่า “เบด” ดังนั้นจากความเหมาะสมจึงได้ใช้ทรายเป็นเบดในการทดลอง โดยในทรายมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของทรายที่ใช้เป็นเบดในการทดลอง

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%)
SiO ₂	79.9
Al ₂ O ₂	10.8
Fe ₂ O ₃	1.2
ออกไซด์ของโลหะอื่นๆ	8.1

ขนาดของทรายที่ได้นำมาใช้ทดลองนั้นอยู่ในช่วงเมช (mesh) 10-100 ที่ความหนาแน่น 2520 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.3 - 0.5 มิลลิเมตร

4.3 องค์ประกอบทางเคมีของขี้เลื่อยที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษาจะนำขี้เลื่อยมาจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ จึงทำให้มีเนื้อไม้หลายชนิดผสมกัน โดยขี้เลื่อยที่ใช้มีความหนาแน่น 1,189 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และองค์ประกอบทางเคมีของขี้เลื่อยแสดงดังตารางที่ 4.3

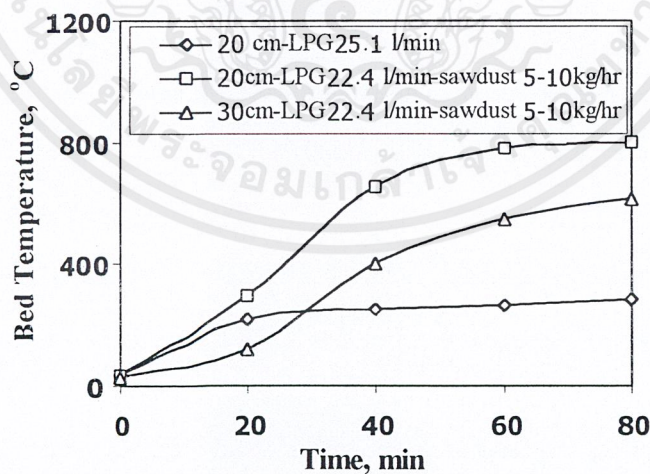
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของขี้เลื่อย

ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)						
	C	H	O	N	S	Ash	Calorific value, kJ/kg
1	38.2	7.4	53.7	0.11	0.01	0.55	15,309
2	37.9	7.4	54.2	0.10	0.01	0.38	15,290

4.4 ผลการทดสอบการอุ่นเบด

การอุ่นเบดนี้ถือเป็นส่วนสำคัญในการศึกษา เพราะการอุ่นเบดเป็นการทำอุณหภูมิให้ถึงค่าที่เหมาะสมแก่การทดลองเพื่อวัดค่าต่างๆที่จะทำการศึกษา จากกราฟที่ได้นำมาเสนอนี้มีการทดสอบหลายครั้งโดยนำข้อมูลการทดสอบเหล่านี้มาเปรียบเทียบให้เห็นเวลาและอุณหภูมิที่ต่าง ๆ กันในแต่ละวิธีการอุ่นเบด โดยพบว่าช่วงเริ่มต้นจะเกิดปัญหาต่างๆ เช่น ความร้อนสูงเกินไปมากในระหว่างการอุ่นเบด, ระหว่างการอุ่นเบดใช้เวลานานเพื่อทำให้อุณหภูมิถึงค่าที่เหมาะสมแก่การทดลอง เป็นต้น จากปัญหาที่เกิดขึ้นนี้จึงทำให้มีการปรับปรุงการอุ่นเบดเรื่อยมาจนได้วิธีการอุ่นเบดที่เหมาะสมดังต่อไปนี้

1. จุดหัวเผาใหม่โดยใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงทำการอุ่นเตาโดยไม่เปิด Blower ประมาณ 5 นาที เพื่อให้อุ่นตัวเตาให้ร้อน
2. เปิด Blower ให้เบดภายในเตาเกิดการฟลูอิดไดซ์ เพื่อให้ความร้อนกระจายให้ทั่วเตาได้รวดเร็วยิ่งขึ้น
3. ทำการป้อนขี้เลื่อยเข้าภายในเตาในปริมาณ 5 – 10 kg/hr และปรับปริมาณลมให้พอเหมาะเพื่อเร่งให้เตาร้อนเร็วยิ่งขึ้น
4. เมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่ขี้เลื่อยสามารถจะติดไฟได้เองแล้ว (450 – 500 องศาเซลเซียส) จึงทำการหยุดจ่ายแก๊ส LPG จากนั้นจึงทำการปรับอัตราการป้อนขี้เลื่อยและปริมาณอากาศส่วนเกินให้ได้ตามแผนการทดลองที่วางไว้



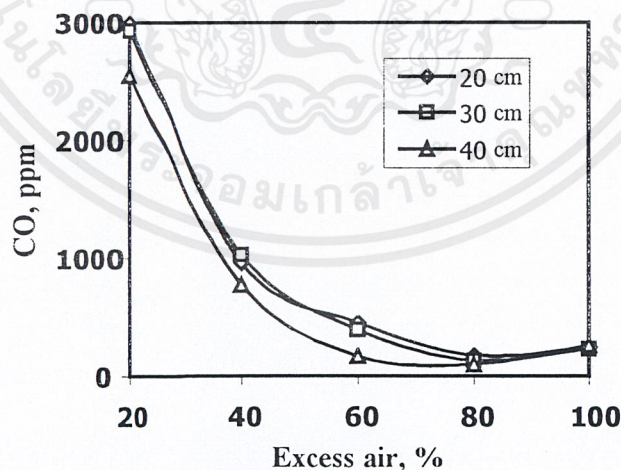
รูปที่ 4.1 อุณหภูมิทรายที่ใช้เป็นเบด ในขณะที่ทำการทดลอง

4.5 ผลการทดลอง

ในการศึกษาการเผาไหม้ของชี้เถื่อยในเตาเผาแบบฟลูอิดซ์ไคซ์เบดจะศึกษาถึง ปริมาณอากาศส่วนเกิน อัตราการป้อนชี้เถื่อย ความชื้นของชี้เถื่อย และความสูงของเบดที่มีผลต่ออุณหภูมิและปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในเตา และที่ปล่อยไอเสียจากเตา โดยในขณะที่ทำการทดลองจะทำการเก็บชี้เถื่อที่ออกจากไซโคลนด้วย เพื่อใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Combustion efficiency) ของเตาต่อไป

4.5.1 ผลของปริมาณเบด

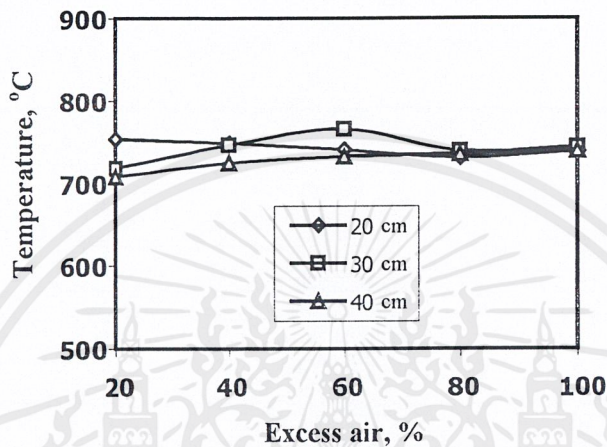
เบดที่ใช้ในการทดลองจะเป็นตัวเก็บความร้อนเพื่อใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณของเบดให้มากขึ้นนั้น ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ และอุณหภูมิต่อการเผาไหม้แต่อย่างใด แต่จะทำให้อุณหภูมิในเตามีความสม่ำเสมอมากขึ้นเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามในเตาฟลูอิดซ์ไคซ์เบดขนาดใหญ่ปริมาณเบดย่อมจะมีผลต่อการเผาไหม้ภายในเตามากกว่าเนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอยู่ในอัตราที่สูง ดังนั้นในการทดลองในระดับต้นจึงยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าปริมาณเบดจะไม่มีผลต่อการเผาไหม้ภายในเตานี้ เนื่องจากเบดเป็นสารตัวกลางที่มีคุณสมบัติคงที่ในการเก็บความร้อนในตัวมันเอง



รูปที่ 4.2 ปริมาณของ CO ที่ความสูงเบดต่าง ๆ (ความชื้น 15.9% และอัตราการป้อน 58 kg/hr)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 กำหนดตัวแปรที่ใช้คงที่คือ อัตราการป้อน 58 kg/hr และความชื้นจี้อย 15.9% โดยเมื่อทำการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินที่ระดับความสูงเบด 20cm แล้ววัดค่าปริมาณ CO ที่ออกจากร่องทางออกจะพบว่ามีค่าลดลงตาม และเมื่อนำความสูงเบดที่ต่างระดับกันมาเปรียบเทียบที่ค่าปริมาณอากาศส่วนเกินค่าเดียวกัน จะสังเกตได้ว่าค่า CO ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้ไม่สามารถบอกแนวโน้มปริมาณ CO ที่ได้ ในระดับความสูงของเบดที่แตกต่างกัน

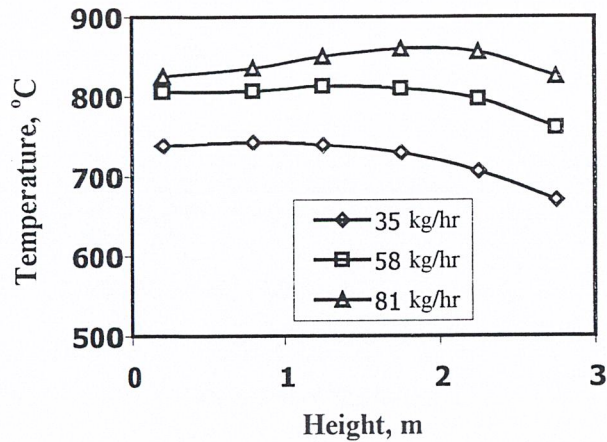


รูปที่ 4.3 ความสูงเบดที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิ (ความชื้น 15.9% และอัตราการป้อน 58 kg/hr)

รูปที่ 4.3 แสดงถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความสูงของเบดที่ระดับต่าง ๆ จะเห็นว่าช่วงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ มีค่าแตกต่างกันน้อยมากหรือแทบไม่มีความแตกต่างเลยโดยสังเกตว่าความสูงเบดที่ 20 cm และ 40 cm แนวโน้มการเพิ่มของอุณหภูมิจะไปในทางเดียวกัน ซึ่งสามารถที่จะบอกได้ว่าปริมาณเบดไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

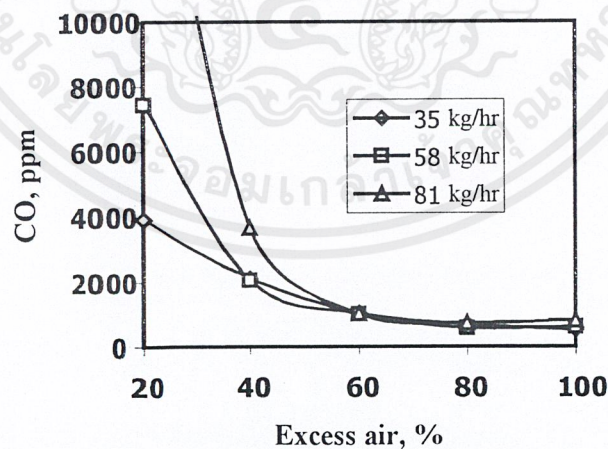
4.5.2 ผลของอัตราการป้อนจี้อย

อัตราการป้อนเชื้อเพลิงมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตา ที่สภาวะเดียวกัน (ปริมาณอากาศส่วนเกิน ความชื้นในจี้อยและความสูงเบดเดียวกัน) เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิง อุณหภูมิภายในเตาจะสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.4 ที่สภาวะเบดสูง 30 cm ปริมาณอากาศส่วนเกิน 80% ความชื้นจี้อย 15.9% เมื่อเปลี่ยนอัตราการป้อนเป็น 35, 58 และ 81 kg/hr ตามลำดับ อุณหภูมิภายในเตาจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดมากขึ้น เพราะสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยามีมากขึ้นในที่นี้คือปริมาณคาร์บอนในจี้อย ดังนั้นความร้อนที่ได้รับออกมาจะมีมากขึ้นและกระจายไปทั่วเตามากขึ้น



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตา
(ความสูงเบด 30 cm ปริมาณอากาศส่วนเกิน 80% ความชื้นขี้เถ้า 15.9%)

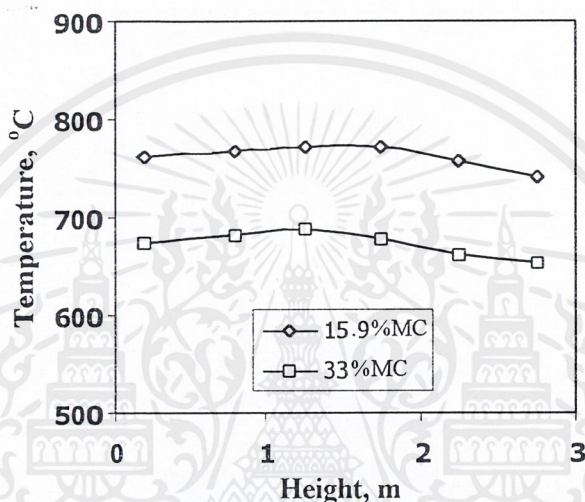
จากรูปที่ 4.5 กำหนดตัวแปรคงที่คือความสูงเบด 40cm ความชื้นขี้เถ้า 33% โดยที่อัตราการป้อน 35 kg/hr เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินให้ภายในเตาเผาแล้ว ค่าปริมาณ CO ที่ออกมาจากทางปล่องทางออกจะมีปริมาณที่ลดลง ซึ่งในในอัตราการป้อนที่ 58 และ 81 kg/hr ก็จะมีแนวโน้มเดียวกัน โดยเมื่อเทียบกับในอัตราการป้อนที่มากขึ้นนั้น ในช่วงที่อากาศส่วนเกินน้อยนั้นจะมีค่า CO ที่มากกว่าเมื่อเทียบกับที่อัตราการป้อนต่ำกว่า และเริ่มมีค่า CO ที่ออกใกล้เคียงกันที่อากาศส่วนเกินประมาณ 40%



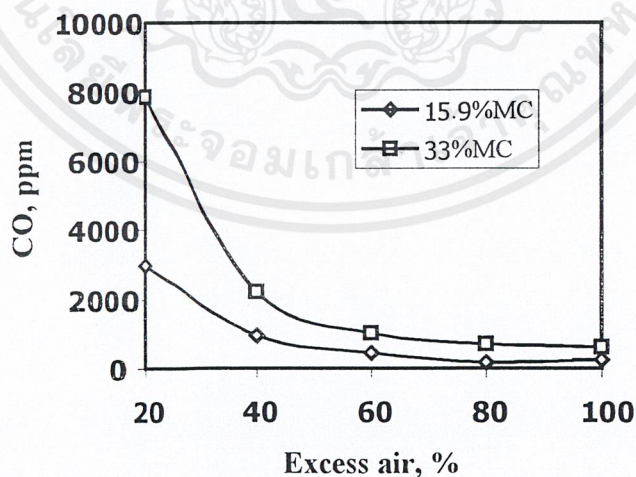
รูปที่ 4.5 ปริมาณของ CO ที่อัตราการป้อนต่าง ๆ
(ความสูงเบด 40cm ความชื้นขี้เถ้า 33%)

4.5.3 ผลของความชื้นในเชื้อเพลิง

ในการทดลองจะนำขี้เถ้าที่มีความชื้นแตกต่างกันมาทดสอบคือ 15.9% และ 33% จากผลการทดลองพบว่า เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่มีความชื้นมากกว่า อุณหภูมิภายในเตาจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด จากรูปที่ 4.6 เป็นการทดลองที่ความสูงเบด 40 cm อัตราการป้อน 58 kg/hr ปริมาณอากาศส่วนเกิน 60 % ที่ความชื้นในขี้เถ้า 15.9% และ 33% ตามลำดับ จะเห็นว่าอุณหภูมิภายในเตาจะมีค่าลดลง เนื่องมาจากมีการสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนหนึ่งไปกับการทำให้น้ำกลายเป็นไอ อันเนื่องมาจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นในขี้เถ้า



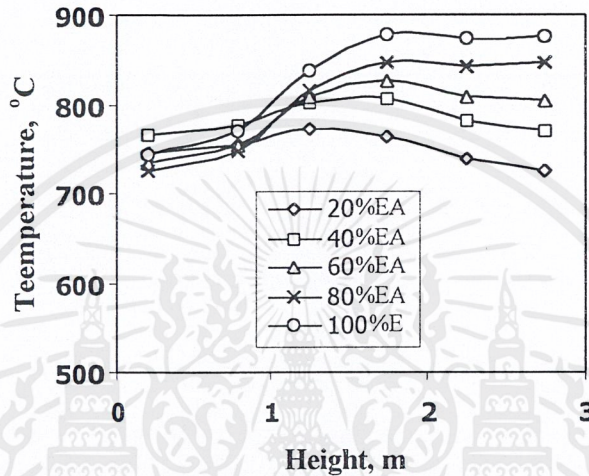
รูปที่ 4.6 อิทธิพลของความชื้นในขี้เถ้าต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตา (ที่ความสูงเบด 40 cm อัตราการป้อน 58 kg/hr ปริมาณอากาศส่วนเกิน 60 %)



รูปที่ 4.7 ผลของความชื้นขี้เถ้าต่อปริมาณ CO (ที่ความสูงเบด 40 cm อัตราการป้อน 58 kg/hr ปริมาณอากาศส่วนเกิน 60 %)

จากผลของกราฟที่ความชื้นที่เฉลี่ย 15.9 % เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเข้าภายในเตาเผา ค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ออกจากปล่องทางออกที่วัดได้จะมีค่าน้อยลงถึงที่ค่าอากาศส่วนเกิน 80% จนเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินถึงประมาณ 100% ค่า CO จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกในความชื้นที่เฉลี่ย 15.9 % ส่วนในค่าความชื้นที่ 33 % ค่า CO ยังลดลงอยู่

4.5.4 ผลของปริมาณอากาศส่วนเกิน



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของอากาศส่วนเกินที่มีต่อค่าอุณหภูมิภายในเตา (ที่สภาวะเบดสูง 20 cm อัตราการป้อน 58 kg/hr)

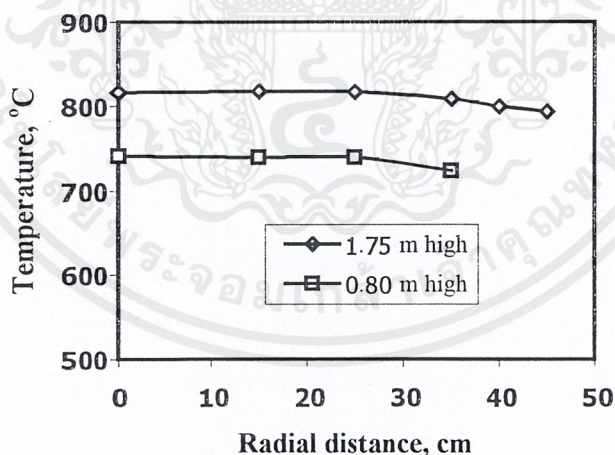
จากผลการทดลองความสัมพันธ์ของการเกิดคาร์บอนกับการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน ได้วิเคราะห์ไว้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน ค่าคาร์บอนที่วัดได้จากปล่องจะลดลง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น เช่นเดียวกับอุณหภูมิภายในเตา คือ เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน อุณหภูมิภายในเตาก็จะสูงขึ้นจากรูปที่ 4.8 ที่สภาวะเบดสูง 20 cm อัตราการป้อน 58 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 20% 60% 80% และ 100% ตามลำดับ จะเห็นว่าที่ความสูงเตา 2.75 m ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 20% และ 100% อุณหภูมิที่แตกต่างกันถึง 115°C ที่ความสูง 2.75 m เป็นจุดที่ใกล้กับทางออกของไอดีและมีการสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านบนของเตาจากการพาความร้อนมากที่สุดจุดหนึ่งของเตา เมื่อปรับให้มีปริมาณอากาศส่วนเกิน 100% การเคลื่อนที่ของอากาศภายในเตาจะเกิดสูงสุด ทำให้เกิดการพาความร้อนจากโซนที่เกิดการเผาไหม้ (Combustion zone) สูงมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิภายในเตามีค่าใกล้เคียงกันทุกระดับความสูง แต่การเพิ่มปริมาณอากาศมากเกินไปทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านบนของเตาจากการพาความร้อนมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินสำหรับการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มถึงระดับหนึ่ง คือ 80% ถึง 100%

อุณหภูมิภายในเตาจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของประสิทธิภาพการเผาไหม้กับการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน

ในด้านความสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์กับการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน พบว่าในสภาวะเริ่มต้นที่ค่า ปริมาณอากาศส่วนเกินต่ำอยู่นั้น ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จะอยู่ในปริมาณที่สูงมากแต่เมื่อมีการปรับให้อากาศส่วนเกินมากขึ้น คาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลงอย่างรวดเร็ว จนในระดับหนึ่งคือที่ ปริมาณอากาศส่วนเกิน 80% คาร์บอนมอนอกไซด์จะมีช่วงของการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากจนใกล้ที่จะอยู่ในระดับที่คงที่ดังนั้นเราจึงสามารถที่จะบอกได้ว่าปริมาณค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ จะมีการแปรผกผันกับปริมาณอากาศส่วนเกินในช่วง 20 – 80 % แต่เมื่อเลยช่วงดังกล่าวไปแล้ว ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ จะอยู่ในระดับที่ค่อนข้างคงที่หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย โดยดูได้จากรูปที่ 4.2 และ 4.5

4.5.5 ลักษณะการเผาไหม้ภายในเตา

จากการวัดอุณหภูมิที่หน้าตัดเตาตามแนวรัศมี (Cross sectional area) พบว่า อุณหภูมิมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอใกล้เคียงกันตั้งแต่กึ่งกลางเตาจนถึงผนังเตาทั้งสองระดับความสูงดังรูปที่ 4.9 เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้ค่าที่จุดกึ่งกลางเตาเป็นตัวแทนการวัดค่าตลอดการทดลอง



รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้ตามแนวรัศมีเตา

4.5.6 ผลการวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้

ในการศึกษาได้นำเชื้อเพลิงที่ได้จากปล่องทางออกไปทดสอบหาองค์ประกอบ โดยการนำตัวอย่างเชื้อเพลิงที่ได้ส่งไปตรวจสอบที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ ผลที่ส่งกลับมาได้แสดงในตาราง และในการศึกษาได้ทำการคำนวณค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ ดังในสมการที่ 1

$$\eta_c = \frac{(M_{\text{FUEL}} * HV_{\text{FUEL}}) - (M_{\text{CO}} * HV_{\text{CO}}) - (M_{\text{ASH}} * HV_{\text{ASH}})}{(M_{\text{FUEL}} * HV_{\text{FUEL}})} \quad (1)$$

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

การทดลอง	Unburnt carbon (% wt)	CO (ppm)	η_c (%)
MC 15.9%, BH 30 cm, FR 58 kg/hr, EA 20 %	0.71	2,995	88.71
MC 15.9%, BH 30 cm, FR 58 kg/hr, EA 40 %	0.77	1,040	95.54
MC 15.9%, BH 30 cm, FR 81 kg/hr, EA 80 %	3.60	2,995	98.56
MC 15.9%, BH 40 cm, FR 81 kg/hr, EA 80 %	1.90	179	99.00
MC 33%, BH 40 cm, FR 58 kg/hr, EA 20 %	-	7,287	60.23
MC 33%, BH 40 cm, FR 58 kg/hr, EA 100 %	2.20	612	96.28
เตาเผาแบบ Pile burn	70	10,000	45

จากตารางตัวแปรแรกที่ศึกษาคือ ปริมาณอากาศส่วนเกิน โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่น ๆ คงที่ แล้วเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้ (Unburnt carbon) กับ CO ที่วัดจากปล่องปล่อยควัน จะพบว่าเมื่อปริมาณอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้น CO จะลดลงดังนั้นเมื่อนำมาคิดประสิทธิภาพการเผาไหม้จะมีค่ามากขึ้น โดยดูจากตารางที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 40 % และ 20 % ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นจาก 88.71 % และ 95.54 %

พิจารณาความสูงเบดที่ 30 และ 40 cm โดยให้ตัวแปรอื่นคงที่ค่าประสิทธิภาพที่วัดได้ 98.56 - 99.00% จะเห็นว่าประสิทธิภาพมีค่าในช่วงที่ไม่แตกต่างกันและความสูงเบดเมื่อพิจารณาที่ปริมาณคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้ (Unburnt carbon) พบว่า เบดปริมาณมากจะทำให้การเผาไหม้ดีขึ้นคือมีเศษคาร์บอนที่ยังไม่ได้เผาไหม้น้อยกว่า

ความชื้นของซีเมนต์จากการสังเกตที่ 15.9% และ 33% เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้จะได้ที่ 88.71% และ 60.23% จะเห็นว่าความชื้นของซีเมนต์มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ของซีเมนต์โดยชนิดของซีเมนต์ที่มีความชื้นสูงกว่า จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาแบบปกติ กับการเผาไหม้ภายในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะพบว่า การเผาไหม้แบบปกติประสิทธิภาพจะมีค่าประมาณ 45% แต่เมื่อนำมาเผาในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด ประสิทธิภาพจะมีค่าสูงมากกว่า 90% ด้วยเหตุนี้จึงสามารถบอกได้ว่าเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีกว่าการเผาไหม้แบบปกติ



สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

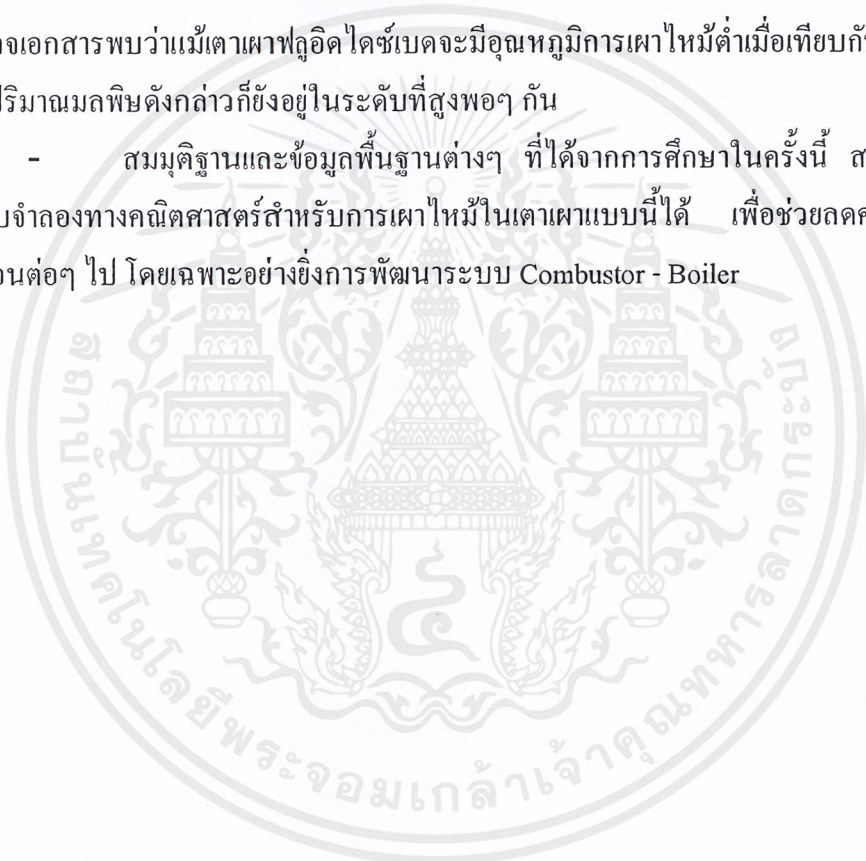
เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ทำการทดลองจะเห็นว่า เกิดการเผาไหม้ที่เชื้อเพลิงแห้งและเชื้อเพลิงชื้นได้อย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิของเตาจะสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระดับหนึ่งที่อุณหภูมิภายในเตาและไอเสียที่ปล่อยออกจากเตามีอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อยลง สถานะนี้จะเป็นสถานะที่ทำการศึกษา สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การกระจายตัวของอุณหภูมิเผาไหม้ภายในเตาสามารถพิจารณาให้เป็นแบบทิศทางเดียว (One dimension) คือมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะตามความสูงเตา โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดหน้าตัดเตาตามแนวรัศมีของเตาน้อยมาก
2. อุณหภูมิการเผาไหม้ตลอดความสูงเตามีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก เพราะมีเบดเป็นตัวรักษาระดับของอุณหภูมิภายในเตาให้มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิมากขึ้น
3. เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงได้อย่างหมดจดเหลือปริมาณเชื้อเพลิงในคาร์บอนน้อยมากเมื่อเทียบกับการเผาไหม้แบบปกติ ทำให้ได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงมากยิ่งขึ้น
4. ปริมาณไอเสียที่ปล่อยออกจากเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (CO) สามารถควบคุมให้อยู่ในระดับต่ำได้ ดังนั้นแล้ว ผลพลอยได้จากการศึกษาในครั้งนี้จึงเป็นหนทางหนึ่งของการลดปัญหามลพิษ
5. สิ่งที่มีอิทธิพลสูงต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ คือ ปริมาณอากาศส่วนเกินและปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิง ซึ่งปัจจัยทั้งสองประการนี้ต้องควบคุมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ปริมาณอากาศส่วนเกินต้องควบคุมไม่ให้มากหรือน้อยจนเกินไป ส่วนความชื้นในเชื้อเพลิงที่มีระดับต่ำ จะได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามถ้าหากว่าเชื้อเพลิงที่ต้องการนำมาเป็นเชื้อเพลิงมีปริมาณความชื้นสูง ควรจะนำมอลดปริมาณความชื้นก่อนนำมาใช้งาน ก็จะทำได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

- ในการศึกษานี้ ได้ทำการพิจารณาเฉพาะประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Combustion efficiency) เพียงอย่างเดียว แต่เนื่องจากในความเป็นจริงยังมีการสูญเสียความร้อนที่ผนังเตาด้วย ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงประสิทธิภาพโดยรวม (Overall efficiency) ด้วย เพื่อให้สามารถทราบถึงความร้อนที่จะนำมาใช้งานได้จริงว่ามีปริมาณมากน้อยเพียงใด

- จี๊เลื่อยเป็นเพียงตัวเดียวของเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาศึกษา แต่ยังมีเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นๆ อีกที่มีศักยภาพพอที่จะนำมาใช้งาน เช่น แกลบ ชานอ้อย กากปาล์ม เป็นต้น โดยเฉพาะแกลบที่มีปริมาณเหลือทิ้งต่อปีเป็นปริมาณมาก ดังนั้นการขยายขอบเขตการศึกษากับชีวมวลอื่นๆ ดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่น่าจะดำเนินการศึกษาต่อไป
- กระบวนการทางความร้อนแบบหนึ่ง ที่มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการ Combustion คือ กระบวนการ Gasification ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงในรูปแก๊สได้ การศึกษาโดยเปลี่ยนจากกระบวนการ Combustion แบบฟลูอิดไคซ์เบด มาเป็นแบบ Fluidized bed gasification จึงเป็นสิ่งที่น่าศึกษาด้วยเช่นเดียวกัน เนื่องจากใช้อุปกรณ์ในการศึกษาแบบเดียวกัน ผลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้อีกตัวหนึ่งที่ควรจะทำการศึกษาเพิ่มเติม คือ ออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งจากการตรวจเอกสารพบว่าแม้เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดจะมีอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำเมื่อเทียบกับเตาเผาแบบปกติ แต่ปริมาณมลพิษดังกล่าวก็ยังคงอยู่ในระดับที่สูงพอๆ กัน
- สมมุติฐานและข้อมูลพื้นฐานต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ สามารถนำมาพัฒนาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้ในเตาเผาแบบนี้ได้ เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายการศึกษาในขั้นตอนต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาระบบ Combustor - Boiler





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้

ก.1 การคำนวณอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมของเตาเผา

การคำนวณหาอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการคำนวณเป็นขั้นๆ ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

$$\text{คาร์บอน (C)} = 45.10 \text{ \% wt}$$

$$\text{ไฮโดรเจน (H)} = 6.7 \text{ \% wt}$$

$$\text{ออกซิเจน (O)} = 4.73 \text{ \% wt}$$

$$\text{ซัลเฟอร์ (S)} = 0.02 \text{ \% wt}$$

จากสมการการคำนวณอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี, AF_t, โดยไม่มีปริมาณอากาศส่วนเกิน

$$AF_t = 11.466C + 34.224H + 4.302S - 4.31O$$

แทนค่า
$$= 11.466(0.45) + 34.224(0.067) + 4.302(0.0002) - 4.31(0.0473)$$

$$AF_t = 7.25 \text{ kg air / kg fuel}$$

ใช้ อากาศส่วนเกิน, E, 100%

ดังนั้น อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง, AF_a

$$AF_a = (1 + E) AF_t$$

แทนค่า
$$= (1 + 1) * 7.25$$

$$AF_a = 15 \text{ kg air / kg fuel}$$

ขนาดของทรายที่ใช้ ที่อยู่ในช่วง mesh 10-100

$$\text{สัดส่วนช่องว่าง} \quad \epsilon_{mf} = 0.39$$

$$\text{ค่าความกลม} \quad \phi_s = 0.93$$

$$\text{ความหนาแน่น} \quad \rho_s = 2.62 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{ขนาดเฉลี่ยของทราย} \quad dp = 0.05 \text{ cm}$$

$$\text{ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก} \quad g = 980 \text{ (cm*s}^{-1}\text{)}$$

อากาศที่ทางเข้าอุณหภูมิ 25 °C มีสมบัติดังนี้

$$\rho_{g_{25 \text{ องศาเซลเซียส}}} = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-3}\text{)}$$

$$\mu_{25 \text{ องศาเซลเซียส}} = 1.884 \cdot 10^{-4} \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

อากาศที่ทางออกอุณหภูมิ 900 °C มีคุณสมบัติดังนี้

$$\rho_{g_{900 \text{ องศาเซลเซียส}}} = 0.29 \cdot 10^{-3} \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-3}\text{)}$$

$$\mu_{900 \text{ องศาเซลเซียส}} = 4.746 \cdot 10^{-4} \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

ก.2 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของเตาเผา

อัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า, Q_1 (อุณหภูมิ 25 °C)

$$\text{อัตราการป้อน, FFR} = 58.3 \text{ kg/hr}$$

$$\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง, AFa} = 15 \text{ kg air / kg fuel}$$

จะได้ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 58.3 kg ต้องการอากาศ = 58.3(15) = 874.5 kg/hr

$$Q_1 = \frac{\text{FFR} \cdot \text{AFa}}{\rho_s}$$

$$= \frac{58.3(15)}{10^3 (1.2 \cdot 10^{-3})}$$

ดังนั้น อัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า $Q_1 = 728.75 \text{ m}^3/\text{hr}$

อัตราการไหลของอากาศที่ทางออก, Q_2 (อุณหภูมิ 666 °C)

จาก กฎของก๊าซ ที่ปริมาตรคงที่

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{T_2}{T_1}$$

$$= 728.75 \cdot \frac{273 + 666}{273 + 25}$$

ดังนั้น อัตราการไหลของอากาศที่ทางออก $Q_2 = 2296.30 \text{ m}^3/\text{hr}$

ก.3 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้

จากค่าเฉพาะตัวแปรที่ได้ของเชื้อเพลิง

ปริมาณพลังงานจำเพาะของซัลเฟอร์ (HV _s)	= 17000	kg/hr
ปริมาณพลังงานจำเพาะของฮีไธ้า (HV _a)	= 967.15	kg/hr
ปริมาณพลังงานจำเพาะของคาร์บอน (HV _c)	= 10110.69	kg/hr

จากการเก็บผลที่ได้จากการเผาไหม้ที่ปล่องทางออกได้

ค่าปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในเตา (A _c)	= 0.019	
ค่าปริมาณ CO ที่วัดได้ (C _o)	= 101	ppm

จากสมการหาค่าตัวแปรได้

สมการหาค่ามวลคาร์บอนมอนอกไซด์ (mc)

$$mc = C_o * 28.01 * Q_2 * \frac{1000}{(24.5 * 1000000000)} \frac{(t_2 + 273)}{(t_1 + 273)}$$

$$= 101 * 28.01 * 2296.3$$

$$= 5.494623 * 10^{-3} \text{ ppm}$$

สมการหาค่ามวลฮีไธ้า (ma)

$$ma = A_c * FFR * A_c$$

$$= 0.0073 * 58.3 * 0.019$$

$$= 7.890813 * 10^{-6} \text{ ppm}$$

สมการหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η)

$$\eta = \frac{(FFR * HV_s - mc * HV_c - ma * HV_a)}{(FFR * HV_s)}$$

$$= \frac{(58.3 * 17000 - 5.494623 * 10^{-3} * 101110.69 - 7.890813 * 10^{-6} * 967.15)}{(58.3 * 17000)}$$

$$= 0.9945 = 99.45\%$$

โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณดังกล่าวข้างต้นนั้น แสดงโดยใช้โปรแกรม MathCAD 2000 ดังนี้

FLUIDIZED BED COMBUSTOR EFFICIENCY PROGRAM

1. Air/Fuel Ratio , Afa , kg air/kg fuel

Insert chemical composition of fuel (%by weight), decimal

$$C := 0.451 \quad O := 0.473 \quad H := 0.067 \quad S := 0.0002 \quad A := 0.0073$$

$$E := 0.782 \text{ (Excess air, decimal)}$$

$$A_{ft} := 11.466C + 34.224H + 4.302S - 4.31O$$

$$A_{fa} := (1 + E) * A_{ft}$$

Insert properties of sand

$$\varepsilon := 0.39$$

$$\phi := 4.9242\varepsilon^4 - 16.288\varepsilon^3 + 20.208\varepsilon^2 - 12.265\varepsilon + 3.4893$$

$$\rho := 2.62 \quad (\text{g*cm}^{-3})$$

$$d := 0.05 \quad (\text{cm})$$

$$d_m := 0.01 \quad (\text{cm})$$

$$g := 980 \quad (\text{cm*s}^{-1})$$

Insert properties of air

At combustor inlet :-

$$t_1 := 25 \quad (\text{celcius})$$

$$\rho_{g_1} := 1.2 * 10^{-3} \quad (\text{g*cm}^{-3})$$

$$\mu_1 := 1.884 * 10^{-4} \quad (\text{g*cm}^{-1} * \text{s}^{-1})$$

At combustor outlet :-

$$t_2 := 666 \quad (\text{celcius})$$

$$\rho_{g_2} := 0.29 * 10^{-3} \quad (\text{g*cm}^{-3})$$

$$\mu_2 := 4.746 * 10^{-4} \quad (\text{g*cm}^{-1} * \text{s}^{-1})$$

4. Air Flow Rate at Inlet (Q_1) and Outlet (Q_2) of Combustor, m³/hr

Insert Fuel Feed Rate, FFR

$$\text{FFR} := 58.3 \quad (\text{kg*hr}^{-1})$$

$$Q_1 := \frac{\text{FFR} * A_{fa}}{(\rho_{g_1} * 10^3)}$$

$$Q_2 := Q_1 * \frac{(t_2 + 273)}{(t_1 + 273)}$$

$$\text{HV}_s := 17000 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \quad \text{Hva} := 967.15 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{HVc} := 10110.69 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Ac} := 0.019$$

$$\text{Co} := 101 \text{ ppm}$$

$$\text{mc} := \text{co} * 28.01 * Q_2 * \frac{1000}{(24.5 * 1000000000) (t_1 + 273)} (t_2 + 273)$$

$$\text{ma} := A * \text{FFR} * \text{Ac}$$

$$\eta := \frac{(\text{FFR} * \text{HV}_s - \text{mc} * \text{HVc} - \text{ma} * \text{HVa})}{(\text{FFR} * \text{HV}_s)} \quad \eta = 0.9945$$

$$\frac{\text{mc} * \text{HVc}}{(\text{FFR} * \text{HV}_s)} = 5.49462 \times 10^{-3}$$

$$\frac{\text{ma} * \text{HVa}}{(\text{FFR} * \text{HV}_s)} = 7.89081 \times 10^{-6}$$

Results :-

$$\eta = 0.9945 \text{ or } 99.45 \quad (\text{Efficiency value , \%})$$

$$\text{mc} = 5.49462 \times 10^{-3} \quad (\text{Mass of carbon monoxide , ppm})$$

$$\text{ma} = 7.89081 \times 10^{-6} \quad (\text{Mass of ash , ppm})$$

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการวัดอุณหภูมิการเผาไหม้ และปริมาณ CO ที่ปล่อยออกจากเตา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการวัดอุณหภูมิการเผาไหม้ และปริมาณ CO ที่ปล่อยออกจากเตา

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองที่ความชื้น 15.9% และที่ความสูงเบด 20 cm.

อัตราการป้อน (Hz)	ปริมาณอากาศส่วนเกิน (%)									
	20		40		60		80		100	
	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)
15	1400	753	963	748.6	372	741	94	730.6	123	738.6
25	3400	743.7	996	750.4	464	719	173	735	245	738.87
35	9200	743	1550	764	765	732	190	724	250	743.3

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองที่ความชื้น 15.9% และที่ความสูง 30 cm.

อัตราการป้อน (Hz)	ปริมาณอากาศส่วนเกิน (%)									
	20		40		60		80		100	
	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)
15	1341	717.4	967	746	327	766	105	738.9	173.7	743.9
25	3020	751	1000	740	400	801	130	806	230	821
35	9800	740	806	764	450	792	260	825	300	839

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองที่ความชื้น 15.9% และที่ความสูง 40 cm.

อัตราการป้อน (Hz)	ปริมาณอากาศส่วนเกิน (%)									
	20		40		60		80		100	
	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)
15	1632	707.5	868	724.37	250	732	100	735	201	739
25	2995	768.1	845	773.5	159	762.8	101	768.7	253	771.8
35	10980	870.7	490	896.6	388	886.1	179	863.1	240	882.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองที่ความชื้น 33.6% และที่ความสูง 20 cm.

อัตราการป้อน (Hz)	ปริมาณอากาศส่วนเกิน (%)									
	20		40		60		80		100	
	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)
15	4108	615	2049	616	945	620	585	622	461	622.3
25	7853	685.3	2233	682	1019	711	696.7	722.3	619	726.3
35	NA	NA	537	710.8	1123.7	720	795.3	724	801.3	725.6

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองที่ความชื้น 33.6% และที่ความสูง 30 cm.

อัตราการป้อน (Hz)	ปริมาณอากาศส่วนเกิน (%)									
	20		40		60		80		100	
	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)
15	4635	544	2110	543	995	546.3	630	551.5	498	551.9
25	7427	698.1	2125	711.5	903	720.8	678	723.9	600	0
35	NA	NA	2930	708.3	1160	725.8	818.7	733.4	771	737.8

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองที่ความชื้น 33.6% และที่ความสูง 40 cm.

อัตราการป้อน (Hz)	ปริมาณอากาศส่วนเกิน (%)									
	20		40		60		80		100	
	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)	CO (ppm)	อุณหภูมิ (°C)
15	4121	561.7	2083	568.3	1044	571.7	680	572	515	572.7
25	7287	668.7	2047	678.2	994.7	673.9	581	669.8	612.3	673.3
35	19599	655.3	3688	689.3	1036.7	719.7	753.7	724.3	798.3	736.7

NA หมายถึง ไม่สามารถวัดได้เนื่องจากการเผาไหม้ไม่คงที่

ภาคผนวก ค

“ การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด ”

การประชุมวิชาการโครงการวิศวกรรมเกษตร ครั้งที่ 8

วันที่ 26 มกราคม 2545

มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัด ขอนแก่น

การศึกษาการเผาไหม้ชี้เลื่อยในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SAWDUST COMBUSTION IN
A FLUIDIZED BED COMBUSTOR

ทรงวุฒิ เดชะ ชนบดี บุญเวียง และ อนุพงศ์ พรหมสวรรค์

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Department of Agricultural engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้ชี้เลื่อยในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ทำจากเหล็กหนา 4.5 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางเตา 0.9 ม. สูง 3 ม. [2] หุ้มด้วยฉนวนเซรามิกส์ไฟเบอร์หนา 5 ซม. และกรวยโดยใช้ทรายเป็นเบดในการเผาไหม้ ซึ่งเตาเผาได้ทำการสร้างให้เหมาะกับชีวมวล(โดยใช้ชี้เลื่อยเป็นอย่างแรก) ที่อัตราการป้อน 35 58 และ 81 กก./ชม. โดยความร้อนที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์จะใช้ทรายเป็นตัวเก็บอุณหภูมิ(เส้นผ่าศูนย์กลางของทราย 0.3-0.5 มม.) โดยมีความสูงของทรายที่ 30 และ 40 ซม. ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยของชี้เลื่อย (ความชื้นชี้เลื่อย) และ ปริมาณอากาศส่วนเกินมีผลต่อองค์ประกอบภายในการเผาไหม้จากการศึกษาผลที่ได้ในทดลอง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สิ่งที่ได้จากปล่องทางออกพบว่า ประสิทธิภาพการเผาไหม้ชี้เลื่อยภายในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดได้สูงมากกว่า 95 %

ABSTRACT

In this project, a cylindrical combustor (0.9 m in diameter, 3 m high and 5 cm thick in insulation with ceramics fiber)[2] with the cone-shaped fluidized bed using sand as the bed material is presented. This combustor was made of steel (4.5 mm thick) and designed for firing various kinds of biomass (first of all, sawdust) with feed rate at 35, 58 and 81 kg/hr delivered into the fluidized bed of persistently heated sand (0.3–0.5 mm in diameter) which sand bed height of 20, 30 and 40 cm. The effects of the fuel properties (moisture content) as well as the excess air ratio on combustion characteristics in the combustor were studied in the experimental tests. Based on the flue gas analysis at the combustor stack, the combustion efficiency was determined. For the above operating conditions, the combustion efficiency was higher than 95 %.
Keyword : combustion, fluidized bed, sawdust.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนำ

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ในปี พ.ศ. 2542 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจากปีก่อน 4.4 % อันประกอบด้วยพลังงานหลัก ได้แก่ น้ำมันสำเร็จรูป ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหินและถ่านหิน และไฟฟ้า ซึ่งเพิ่มขึ้น 4.3 % และพลังงานหมุนเวียนซึ่งเพิ่มขึ้น 5.1 % ประเทศไทยนำเข้าน้ำมันดิบทั้งสิ้น 34,860 ktoe เพิ่มขึ้นจากปีก่อน 2.8 % คิดเป็นมูลค่านำเข้าทั้งสิ้น 168,983.6 ล้านบาท [1] ส่งผลให้ประเทศไทยขาดดุลการค้าจากการนำเข้าน้ำมันดิบเป็นจำนวนมาก ทำให้ทางรัฐบาลต้องแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น คือ มาตรการให้ประหยัดการใช้พลังงาน ทั้งในภาครัฐและเอกชน โดยมาตรการหนึ่ง คือ การส่งเสริมการใช้พลังงานรูปแบบอื่นทดแทนการใช้น้ำมัน พลังงานชีวมวลนับเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งที่ประเทศไทยมีศักยภาพที่จะนำมาใช้ เนื่องจากภายในประเทศไทยมีพื้นฐานทางด้านเกษตรกรรมเป็นหลัก จึงมีวัสดุที่เหลือใช้จากการเกษตร เช่น แกลบ ไม้ฟืน ชานอ้อย เป็นต้น ถือว่าเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทนการใช้น้ำมันได้

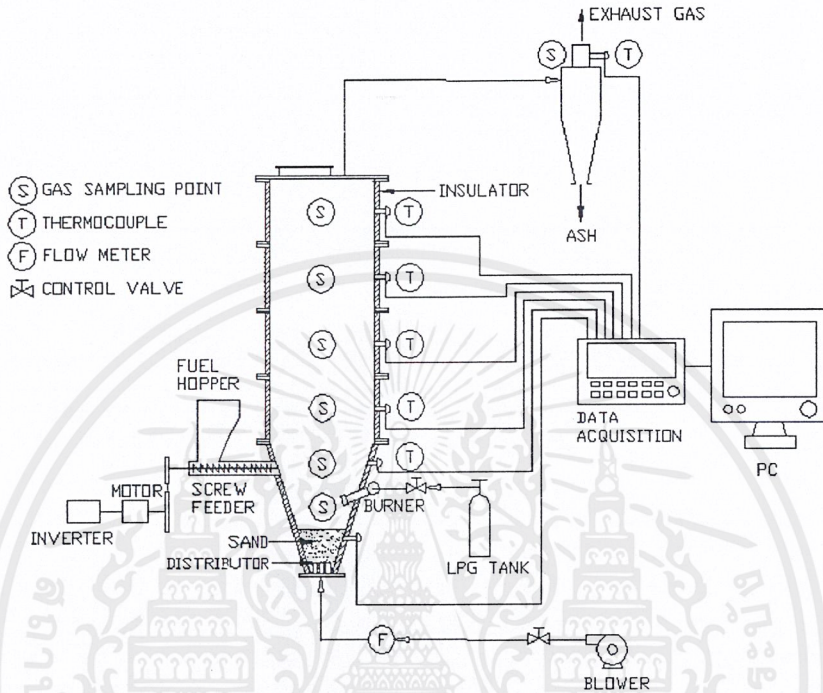
เทคโนโลยีการเปลี่ยนรูปพลังงานชีวมวลเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ นับเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้การใช้ประโยชน์จากชีวมวลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีการศึกษา แต่ส่วนใหญ่จะทำการศึกษากันในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นในการศึกษากับเตาที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยศึกษาถึงผลกระทบของความชื้นในขี้เลื่อย ปริมาณอากาศส่วนเกิน อัตราการป้อนขี้เลื่อย และความสูงเบด ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผา เพื่อเป็นแนวทางหนึ่งในการนำไปประยุกต์ในการใช้งานจริงต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล Type K ขนาดความยาว Probe 50 ซม. เข้าไปที่จุดกึ่งกลางหน้าตัดของเตาที่ระยะความสูง 0.20, 0.80, 1.25, 1.75, 2.25 และ 2.75 ม. เหนือแผ่นกระจายลม และที่ปล่องไอเสียเพื่อใช้วัดอุณหภูมิภายในเตาขณะทำการเผาไหม้ และอุณหภูมิไอเสียที่ปล่อยออกจากเตา ตามลำดับ
2. ติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย (Flue gas analyzer) ที่ปล่องทางออกไอเสีย โดยใช้เครื่อง TESTO 350 ขนาดความยาวของส่วนที่ใช้ในการวัด (Probe) 70 ซม.
3. ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 4 ตัว คือ ความชื้นขี้เลื่อย ความสูงเบด อัตราการป้อนขี้เลื่อย และปริมาณอากาศส่วนเกิน
4. ในการจุดเตาครั้งแรกใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงในการอุ่นเบดให้ได้อุณหภูมิที่ขี้เลื่อยสามารถติดไฟได้เอง (ประมาณ 450 องศาเซลเซียส) โดยใช้เวลาประมาณ 30-45 นาที แล้วจึงตัดแก๊ส

LPG ออก จากนั้นทำการป้อนเชื้อเพลิง และปรับปริมาณอากาศส่วนเกินในอัตราที่จะทำการศึกษาคือต่อไป

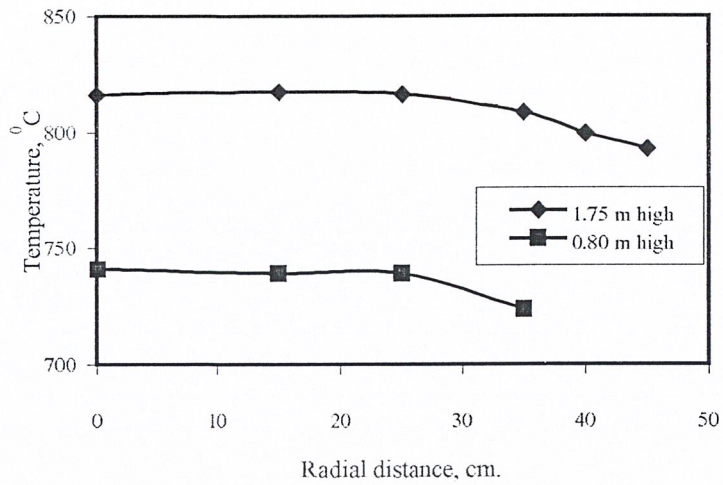
- ทำการวัดค่าไอเสียที่ปล่อยออกทางปล่องไอเสีย และอุณหภูมิในการเผาไหม้ตลอดความสูงเตา แล้วบันทึกค่าที่ได้ทุกๆ 5 นาทีในแต่ละจุด



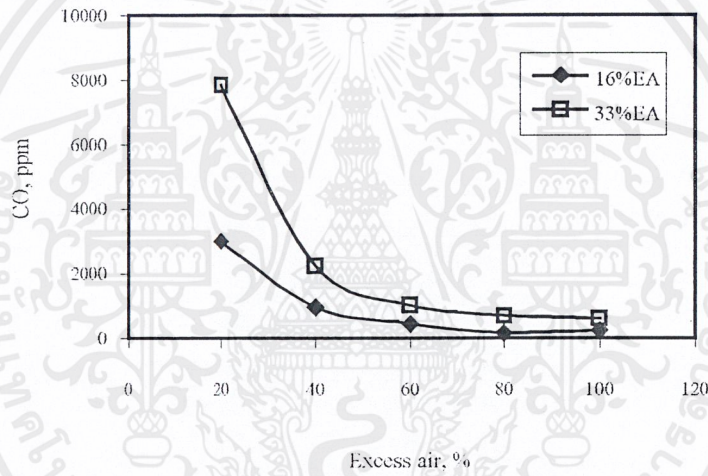
รูปที่ 1 โดอะแกรม Set-Up การทดลอง

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

- จากการวัดอุณหภูมิที่หน้าตัดเตาตามแนวรัศมี (Cross-sectional area) พบว่า อุณหภูมิมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอใกล้เคียงกันตั้งแต่กึ่งกลางเตาจนถึงผนังเตาทั้งสองระดับความสูงดังรูปที่ 2 โดยที่ผนังเตามีอุณหภูมิลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการสูญเสียความร้อนที่ผนังเตา เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้ค่าที่จุดกึ่งกลางเตาเป็นตัวแทนการวัดค่าตลอดการทดลอง
- ปริมาณอากาศส่วนเกินและความชื้นในเชื้อเพลิงมีผลต่อปริมาณ CO ที่ปล่อยออกจากเตา โดยเมื่ออากาศส่วนเกินมากขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง จะทำให้ปริมาณ CO ลดลง และเมื่อเพิ่มความชื้นในเชื้อเพลิงมากขึ้นจะทำให้ปริมาณ CO เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ลดลง ดังรูปที่ 3

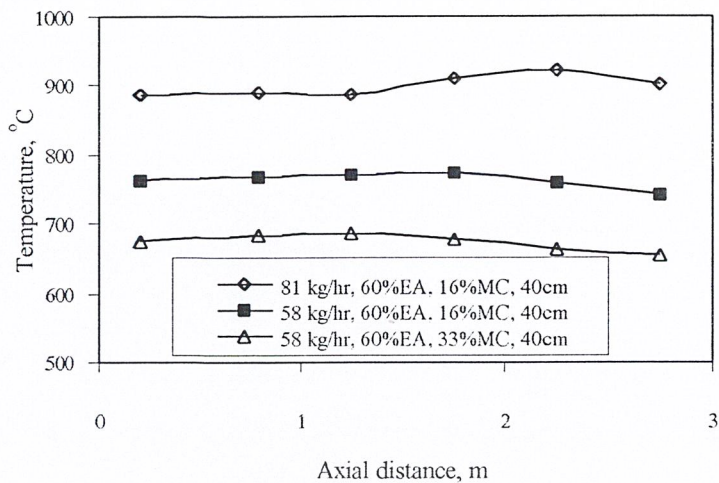


รูปที่ 2 การกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้ตามแนวรัศมีเตา



รูปที่ 3 ผลของความชื้นในชี้เลี้ยง และปริมาณอากาศส่วนเกิน ต่อปริมาณ CO
(MC = Moisture content)

3. อัตราการป้อนชี้เลี้ยงและความชื้นในชี้เลี้ยงมีผลต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตา จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนชี้เลี้ยง อุณหภูมิภายในเตาจะมีค่าสูงขึ้น แต่ถ้าหากความชื้นเพิ่มขึ้น อุณหภูมิภายในเตาจะลดลง ซึ่งจะมีผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลของความชื้นและอัตราการป้อนขี้เลื่อยที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตา (EA=Excess air, MC=Moisture content)

4. ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้นั้น พบว่ามี 2 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตา ได้แก่ปริมาณ CO ที่ปล่อยออกจากเตาและปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่ในขี้เถ้า (Unburnt carbon) จากการทดลองพบว่าสามารถเผาไหม้ขี้เลื่อยได้หมดจด มีปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่ในขี้เถ้าน้อยมากและสามารถควบคุมปริมาณ CO ให้อยู่ในระดับต่ำได้เช่นกัน โดยประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาแบบฟลูอิด ไคซ์เบดอยู่ในเกณฑ์ที่สูงมากกว่า 95% ดัง ตารางผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้

การทดลอง	Unburnt carbon (% wt)	CO (ppm)	η_c (%)
MC 15.9%, BH 30 cm, FR 58 kg/hr, EA 40%	0.77	1,040	95.54
MC 15.9%, BH 30 cm, FR 58 kg/hr, EA 20 %	0.71	2,995	88.71
MC 15.9%, BH 30 cm, FR 81 kg/hr, EA 80 %	3.60	260	98.56
MC 15.9%, BH 40 cm, FR 81 kg/hr, EA 80 %	1.90	179	99.00
MC 33%, BH 40 cm, FR 58 kg/hr, EA 20.0 %	-	7,287	60.23
MC 33%, BH 40 cm, FR 58 kg/hr, EA 98.9 %	2.20	612	96.28

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการเผาเชื้อเพลิงภายในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด พบว่าค่าปริมาณอากาศส่วนเกินและความชื้นที่เชื้อเพลิง มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตา เพราะฉะนั้นถ้าหากสามารถควบคุมความชื้นที่เชื้อเพลิงที่จะนำมาใช้ ตลอดจนปริมาณอากาศส่วนเกินให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องมาจากในเชื้อเพลิงมีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบในปริมาณน้อยมาก ซึ่งสารตัวนี้จะก่อให้เกิด SO₂ อันเป็นมลพิษทางอากาศ

คำขอขอบคุณ

ในการนำเสนอโครงการในครั้งนี้ ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้โอกาสทำการนำเสนอโครงการในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. สถานการณ์พลังงานของประเทศไทยปี 2542, กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.
2. จักรวราช แผนประดิษฐ์, ดุสิต โอภากร, อิทธิ ประกายหงษ์มณี, 2543, “การออกแบบและสร้างเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด” , ปริชญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร, คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 83 หน้า.
3. พล สาเกทอง, 2526, “ความรู้เกี่ยวกับฟลูอิดไดซ์เซชัน”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 146 หน้า.
4. D. Kunii, and O. Levenspiel., 1997, “Fluidization Engineer”, John Wiley and Sons, New York, 519p.
5. ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย, 2541, “วารสารประสิทธิภาพพลังงาน ฉบับเชื้อเพลิงชีวมวล”, ปีที่ 9, ฉบับที่ 43, หน้า 16-18.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ วัชรระ เพิ่มชาติ อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ได้ให้แนวคิด พร้อมทั้งคำแนะนำในการทำปริญญาานิพนธ์ ตลอดจนการแก้ปัญหาต่าง ๆ และความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง อันเป็นประโยชน์แก่ปริญญาานิพนธ์ ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร และคณะวิทยาศาสตร์ที่ได้ให้ความเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทำปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จ ขอกราบขอบพระคุณกรรมการควบคุมการสอบปริญญาานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาคำแนะนำต่าง ๆ รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรทุกท่าน

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณจิตรพร กังสวัสดิ์ คุณพัชรา เอ็มอำไพวงศ์ และคุณน้อย ประทีป ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านธุรการ ตลอดจนนายอภิย์ คำทัง และนายเข้ม สมรูป เจ้าหน้าที่อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ

อีกทั้งคณะผู้จัดทำ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และผู้ที่เกี่ยวข้องในการทำปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ ที่เป็นทั้งที่ปรึกษา ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจจนปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ทางคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ที่เป็นกำลังใจในการทำปริญญาานิพนธ์นี้จนสำเร็จ ทางคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งเป็นที่สุด จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

คณะผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์

เอกสารอ้างอิง

1. กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, “รายงานพลังงานของประเทศไทยปี 2543”, หน้า 5-11, 2543.
2. ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย, “วารสารพลังงาน ฉบับเชื้อเพลิงชีวมวล”, ปีที่ 11, ฉบับที่ 52, หน้า 42-48, 2544.
3. จักรวาท แผนประดิษฐ์, คุณิต โอภากรและ อิทธิ ประกายหงษ์มณี, “การออกแบบและสร้างเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด”, ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 83 หน้า, 2543.
4. Asian Institute of Technology, “EC-ASEAN COGEN Programme Report”, <http://www.cogen.ait.ac.th>.
5. ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย, “วารสารพลังงาน ฉบับเชื้อเพลิงชีวมวล”, ปีที่ 9, ฉบับที่ 43, หน้า 16-18, 2541.
6. J. F. Stubrington and A. L. T. Wang, “Australian Black Coal’s Behaviour in Pressurised Fluidized Bed Combustion”, CHEMECA 1999, Newcastle, September, pp.29-37, 1999.
7. M.M. Hoque, S.C. Bhattacharya, “Fuel Characteristics of Gasified Coconut Shell in a Fluidized and a Spouted Bed Reactor”, Energy, Vol. 26, pp. 101-110, 2001.
8. J. Talukdar and S.C. Bhattacharya, “Circulating Fluidized Bed Combustion Of Sawdust”, The 3rd Asean S&T Week, Mandarin, September, 1992.
9. H.M. Shafey and I.S Taha, 1993, “ Experimental Study on a Bench Scale Batch Type Fluidized Bed Combustor for Energy Production From Waste Derived Fuels”, 2nd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 1-5 April, Villamoura, Algarve, Portugal.
10. W. Weizhang, “Fluidized Bed Combustion of Rice Husk for Energy and Pozzolana”, Master of engineering dissertation, Energy technology program, Asian Institute of technology, 61 p., 1987.
11. D. Kunii, and O. Levenspiel, “Fluidization Engineering”, John Wiley and Sons, New York, 519 p., 1997.
12. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, “ฟลูอิดไดซ์ชัน”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 225 หน้า, 2528.

13. กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, “การจัดทำแผน
หลักการส่งเสริมการผลิตและการใช้เตาเผาชีวมวลประสิทธิภาพสูงในอุตสาหกรรม
ชนบทขนาดเล็ก”, 243 หน้า, 2541.
14. ปรีดา วิบูลย์สวัสดิ์, “วิสัยทัศน์พลังงาน : เพื่อการพัฒนาและคุณภาพชีวิต”, สถาบันเทคโนโลยีนานา
ชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
15. พล สาททอง, “ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฟลูอิดไดเซชัน”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
146 หน้า, 2526.
16. ศศิวิมล สูงสว่าง, “การเผาไหม้แก๊สในฟลูอิดไดเซชัน”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค, คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 94 หน้า, 2526.
17. M.A. Cuenca and E. J. Anthony, “Pressurized Fluidized Bed Combustion”, Blackie Academic &
Professional, London, 38 p., 1995.

