

การผลิตไอน้ำจากเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน



นายมาวิน ปูนอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STEAM PRODUCTION FROM A CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTION



Mr. Mavin Punon

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Fuel Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตไอน้ำจากเตาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน

โดย

นายมาวิน ปูนอน

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

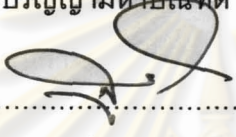
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ นารหนองบัว)

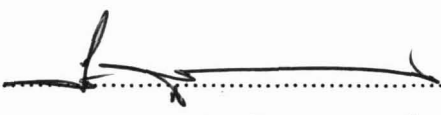
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.โสฬส สุวรรณยืน)

มาวิน ปูนอน : การผลิตไอน้ำจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน. (STEAM PRODUCTION FROM A CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTION)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร.เลอสรวง เมฆสุด, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ. ดร.ประพันธ์ คูชลธารา, จำนวนหน้า 119 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาอุทกศาสตร์การไหลภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนจากการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินและชีวมวล โดยใช้ถ่านหินและชีวมวลคือกะลาปาล์ม และกะลามะพร้าว ซึ่งมีพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงถ่านหิน กะลาปาล์ม และกะลามะพร้าวเท่ากับ 5221.82 แคลอรีต่อกรัม 4875.75 แคลอรีต่อกรัม และ 4470.40 แคลอรีต่อกรัม ตามลำดับ ขณะที่ไรเซอร์หรือห้องเผาไหม้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 3 เมตร ป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราการที่ 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ป้อนอากาศปฐมภูมิอัตราการที่ 330 ลิตรต่อนาที จากนั้นทำการสร้างเครื่องผลิตไอน้ำ ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วนคือ ส่วนอุ่นน้ำ ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน และส่วนเก็บไอน้ำ ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ส่วนผสมของเชื้อเพลิง ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ และประสิทธิภาพของเครื่องผลิตไอน้ำที่สร้างขึ้น

ผลการทดลองพบว่า อุทกศาสตร์ภายในส่วนไรเซอร์ของเตานั้นมีลักษณะเป็นเบดแบบปั่นป่วน เวลาที่เตาเข้าสู่ภาวะคงที่เท่ากับ 20 วินาที ความร้อนที่ได้จากการใช้เชื้อเพลิงผสมอัตราการส่วนของถ่านหินต่อชีวมวลในอัตรา 70:30 ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร ส่งผลให้ความร้อนเฉลี่ยภายในเตาคงที่ และให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด เครื่องผลิตไอน้ำซึ่งได้รับความร้อนจากผนังเตา และฟลูแก๊สร้อนจากการเผาไหม้ ได้อุณหภูมิในช่วง 80-85 องศาเซลเซียสจากส่วนอุ่น และส่วนเก็บไอน้ำสามารถผลิตอุณหภูมิไอน้ำผลิตได้สูงสุดเท่ากับ 165 องศาเซลเซียสและความดันเท่ากับ 2.7 บาร์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินเดี่ยวในการเผาไหม้ ขณะที่อุณหภูมิไอน้ำเท่ากับ 145 องศาเซลเซียสและความดันเท่ากับ 2.3 บาร์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินและกะลาปาล์ม อุณหภูมิไอน้ำเท่ากับ 136 องศาเซลเซียสและความดันเท่ากับ 2.2 บาร์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินและกะลามะพร้าว ที่อัตราการป้อนน้ำจากถังอุ่น 80 ลิตรต่อชั่วโมงประสิทธิภาพที่ได้เท่ากับร้อยละ 24.96, 22.31 และ 13.01 เมื่อใช้เชื้อเพลิง ถ่านหิน เชื้อเพลิงผสมกะลาปาล์ม และกะลามะพร้าว ตามลำดับ

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิติต..... 

สาขาวิชา.....เทคโนโลยีเชื้อเพลิง..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... 

ปีการศึกษา.....2553..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม..... 

5072429923 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS : WATER PRE-HEATING SECTION / HEAT SECTION / STEAM
PRODUCIND SECTION

MAVIN PUNON : STEAM PRODUCTION FROM A CIRCULATING FLUIDIZED
BED COMBUSTION. ADVISOR: ASSOC. PROF. LURSUANG MEKASUT, Ph.D.
CO-ADVISOR : ASST. PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D, 119 pp.

In this work, the fluid hydrodynamics of coal and biomass combusted in the circulated fluidized bed (CFB) system was studied. Coal, palm shell and coconut shell were used in this experiment. For the experiment conditions, the fuel feed rate was controlled at 9 kg./hr. with the primary air feed rate of 330 L/min. at room temperature. The CFB was attached with the steam generator which consists of 3 main parts, the water pre-heat section, the heat section and the steam producing section.

The results show that the fluid hydrodynamics inside the riser is the tubulant fluidize action. Continuous after 20 second from starting state. The highest calorific value was obtained when the ratio of coal and biomass is equivalent to 70:30. With the secondary air feed position of 2.4 meters, the system reaches the highest average temperature inside the riser and stable. The pre - heating section reaches the temperature of 80-85 °C by the combusted flue gas. The system can generate steam and the temperature of 165 °C with the pressure of 2.7 bars when using 100% coal. The system also gathers the steam with the temperature of 145 °C with the pressure of 2.3 bars when using the mixture of coal and palm shell and 136 °C steam with 2.2 bars when using the mixture of coal and coconut shell. The efficiencies of the pre-heat section flow rate of 80 L/hr. are 24.96, 22.31 and 13.01. When using pure coal, mixture of coal and palm shell and mixture of coal and coconut shell respectively.

Department : ... Chemical Technology...

Field of Study :Fuel Technology.....

Academic Year.....2010.....

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

Mavin Punon
Lursuang Mekasut
Prapan Kuchonthara

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จด้วยดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธारा อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านได้คอยให้ความช่วยเหลือเป็นห่วงเป็นใยในทุกๆ ด้าน รวมทั้งให้คำชี้แนะที่มีประโยชน์เกี่ยวกับงานวิจัย

งานวิจัยเรื่อง “การผลิตไอน้ำจากเตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.โสฬส สุวรรณยืน ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณสังข์ ชมชื่น โดยเฉพาะเจ้าหน้าที่ช่างเทคนิคประจำห้องปฏิบัติการฟลูอิดไคซ์เบด ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณนายประสิน ปูนอน บิดา นางสุภาพ ปูนอน มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนเป็นอย่างดีจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ พร้อมทั้งชาวเคมีเทคนิคทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือ ประกอบกับคำแนะนำดี ๆ ที่มอบให้เสมอมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

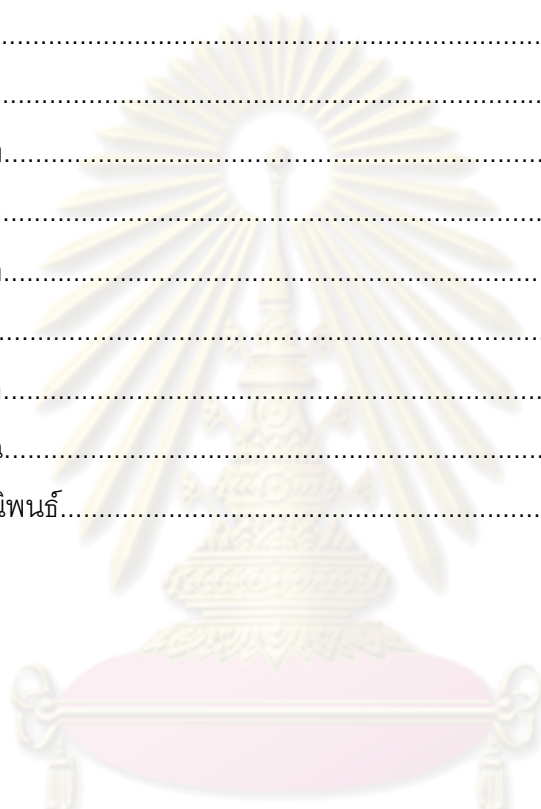
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ด
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	4
บทที่ 2.....	5
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ถ่านหิน.....	5
2.2 ชีวมวล.....	6
2.3 ทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เซชัน.....	9
2.3.1 นิยาม.....	9
2.2.2 ประเภทของฟลูอิดไดซ์เซชัน.....	9
2.2.3 ลักษณะของแก๊สฟลูอิดไดซ์เซชัน.....	10
2.2.4 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด.....	16
2.2.5 ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	18
2.2.6 ข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน.....	20
2.4 การคำนวณเชิงพลวัตของของไหลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม.....	21
2.4.1 สมการควบคุมพื้นฐาน.....	22

2.4.2	เงื่อนไขขอบ.....	22
2.4.2.1	เงื่อนไขขอบที่ผนัง.....	23
2.4.2.2	เงื่อนไขขอบแบบสมมาตร.....	25
2.5	เครื่องกำเนิดไอน้ำ.....	26
2.5.1	บอยเลอร์.....	26
2.5.2	ระบบไอน้ำ.....	26
2.5.3	ประเภทของบอยเลอร์.....	27
2.5.3.1	หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ.....	28
2.5.3.2	หม้อไอน้ำแบบถังท่อไฟ.....	29
2.5.3.3	หม้อไอน้ำชนิด Circulating Fluidized Bed (CFB).....	31
2.6	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3	40
	วิธีดำเนินการวิจัย.....	40
3.1	แบบจำลองการไหลหลายวัฏภาคของแก๊สและของแข็ง.....	40
3.1.1	สมการอนุรักษ์พื้นฐาน.....	41
3.1.1.1	สมการอนุรักษ์มวล.....	41
3.1.1.2	สมการอนุรักษ์โมเมนตัม.....	41
3.1.1.3	สมการอนุรักษ์พลังงาน.....	43
3.2	การสร้างแบบจำลองการไหลโดยโปรแกรม Ansys และ Fluent.....	45
3.2.1	การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Ansys และรายละเอียด ของระบบ.....	46
3.2.2	การจำลองภาวะโดยโปรแกรม Fluent.....	50
3.2.2.1	การกำหนดชนิดของเครื่องมือการแก้สมการ.....	50
3.2.2.2	การกำหนดคุณสมบัติของแต่ละวัฏภาคที่ใช้ในการจำลองภาวะ.....	51
3.2.2.3	การกำหนดค่าขอบเขตและสภาวะที่ใช้ในการจำลองภาวะ.....	53
3.2.2.4	การกำหนดชั้นเวลาและการจำลองภาวะ.....	55
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	56
3.4	การสร้างเครื่องผลิตไอน้ำ.....	68
3.4.1	ส่วนอุ่นน้ำ.....	68

3.4.2 ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน.....	69
3.4.3 ส่วนเก็บไอน้ำ.....	69
3.4.4 แผนผังเครื่องผลิตไอน้ำ.....	69
3.5 วิธีการทดลอง.....	71
3.5.1 การเตรียมเชื้อเพลิงและทราย.....	71
3.5.2 การจุดเตาและดำเนินการทดลอง.....	71
3.5.3 การเดินระบบผลิตไอน้ำ.....	71
3.5.4 การปิดเตาเผา.....	73
บทที่ 4.....	73
ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	74
4.1 ผลการจำลองภาวะในแบบจำลองการไหลของเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบ หมุนเวียนที่ใช้ในการผลิตไอน้ำเพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์.....	74
4.1.1 ความเป็นอิสระของกริด (Grid Independent).....	74
4.1.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	75
4.2 สมบัติของเชื้อเพลิง.....	79
4.2.1 การวิเคราะห์โดยประมาณ.....	79
4.2.2 การวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล.....	80
4.2.3 การวิเคราะห์โดยแยกธาตุ.....	80
4.3 การหาปริมาณอากาศปฐมภูมิต่ำสุดที่ทำให้ทรายในโรเซออร์เกิดการฟลูอิดไดซ์ และหมุนเวียน.....	81
4.4 การหาปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับป้อนเข้าในสกรูพีดเดอร์ สำหรับ ป้อนชีวมวล เพื่อไม่ให้เปลวไฟและความร้อนไหลย้อนในถังเก็บชีวมวล.....	81
4.5 การหาปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศในการเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไดซ์ เบดแบบหมุนเวียน.....	82
4.6 คุณสมบัติที่สามารถสร้างได้จากการป้อนเชื้อเพลิง ที่ตำแหน่งป้อนอากาศทุก ภูมิภาคที่แตกต่างกัน.....	84
90	
4.7 การศึกษาเชื้อเพลิงต่อผลของเครื่องผลิตไอน้ำที่สร้างขึ้น.....	91
4.8 ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตไอน้ำที่สร้างขึ้น.....	93
บทที่ 5.....	93

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	93
5.1 อุตสาหกรรมของเตา.....	93
5.2 คุณสมบัติของเตาเผา.....	93
5.3 เครื่องผลิตไอน้ำ.....	93
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	94
รายการอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก.....	99
ภาคผนวก ก.....	100
ภาคผนวก ข.....	104
ภาคผนวก ค.....	107
ภาคผนวก ง.....	110
ภาคผนวก จ.....	113
ภาคผนวก ฉ.....	117
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	119



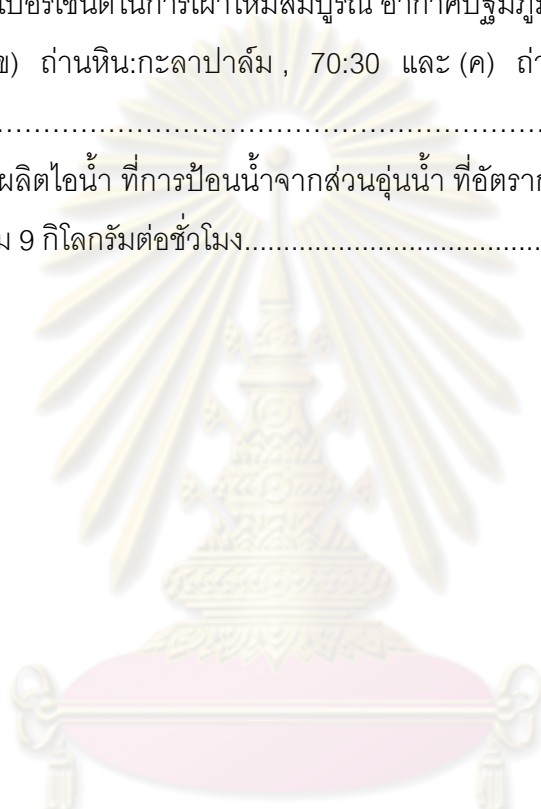
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	การใช้ชีวมวลในประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึง 2552.....	1
2.1	สมบัติของถ่านหิน เปรียบเทียบกับไม้และพีต.....	5
3.1	ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละภูมิภาคที่ใช้ในการจำลองภาวะใช้ในการศึกษา อุทกพลศาสตร์.....	46
4.1	ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของไหลที่ใช้ในการทดลอง.....	77
4.2	ผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) รวมทั้งค่าพลังงานความร้อน และขนาดของอนุภาคที่ใช้ในการทดลอง.....	79
4.3	ค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล.....	80
4.4	ผลการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์แยกธาตุ (ultimate analysis).....	80
4.5(ก)	ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินเดี่ยว และเชื้อเพลิงผสม ระหว่างถ่านหินผสมชีวมวลในอัตราส่วน 70 : 30 , 50 : 50 และ 30 : 70 ที่อัตรา การป้อนเชื้อเพลิงรวม 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยคิดปริมาณอากาศที่การเผาไหม้ สมบูรณ์ ร้อยละ 100.....	82
4.5(ข)	ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินเดี่ยว และเชื้อเพลิงผสม ระหว่างถ่านหินผสมชีวมวลในอัตราส่วน 70 : 30 , 50 : 50 และ 30 : 70 ที่อัตรา การป้อนเชื้อเพลิงรวม 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยคิดปริมาณอากาศที่การเผาไหม้ สมบูรณ์ ร้อยละ 100.....	83
4.5(ค)	ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินเดี่ยว และเชื้อเพลิงผสม ระหว่างถ่านหินผสมชีวมวลในอัตราส่วน 70 : 30 , 50 : 50 และ 30 : 70 ที่อัตรา การป้อนเชื้อเพลิงรวม 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยคิดปริมาณอากาศที่การเผาไหม้ สมบูรณ์ ร้อยละ 100.....	83
ก1	ข้อมูลสัดส่วนปริมาตรของของแข็ง (ϵ_s) ตามแนวแกนตลอดความสูงของโร เตอร์จากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของเตาฟลูอิดไดซ์แบบ หมุนเวียนที่ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนที่เวลา 20 – 60 วินาที.....	100

ตารางที่	หน้า
ก4 (ต่อ) ข้อมูลสัดส่วนปริมาตรของของแข็ง (ϵ_s) ตามแนวแกนตลอดความสูงของไรเซอร์จากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของเตาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนที่เวลา 20 – 60 วินาที.....	101
ก4 (ต่อ) ข้อมูลสัดส่วนปริมาตรของของแข็ง (ϵ_s) ตามแนวแกนตลอดความสูงของไรเซอร์จากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของเตาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนที่เวลา 20 – 60 วินาที.....	102
ก4 (ต่อ) ข้อมูลสัดส่วนปริมาตรของของแข็ง (ϵ_s) ตามแนวแกนตลอดความสูงของไรเซอร์จากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของเตาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนที่เวลา 20 – 60 วินาที.....	103
ก4 (ต่อ) ข้อมูลสัดส่วนปริมาตรของของแข็ง (ϵ_s) ตามแนวแกนตลอดความสูงของไรเซอร์จากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของเตาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนที่เวลา 20 – 60 วินาที.....	104
ค1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนถ่านหินผ่านสกรูพีดเดอร์.....	107
ค2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลาปาล์มผ่านสกรูพีดเดอร์.....	108
ค3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลามะพร้าวผ่านสกรูพีดเดอร์.....	109
ง1 แสดงค่าการวิเคราะห์โดยประมาณ.....	110
ง2 แสดงค่าการวิเคราะห์โดยแยกธาตุ.....	111
จ1 คุณหมุมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่ออนาที ป้อน อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 1 เมตร.....	113
จ2 คุณหมุมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่ออนาที ป้อน อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2 เมตร.....	113
จ3 คุณหมุมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่ออนาที ป้อน อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2.4 เมตร.....	114

ตารางที่	หน้า	
๑4	คุณหมณีไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่ออนาที (ก) ถ่านหิน (ข) ถ่านหิน:กะลาปาล์ม , 70:30 และ (ค) ถ่านหิน:กะลามะพร้าว , 70:30.....	114
๑5	ตาราง ง5 ความดันไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่ออนาที (ก) ถ่านหิน (ข) ถ่านหิน:กะลาปาล์ม , 70:30 และ (ค) ถ่านหิน:กะลามะพร้าว , 70:30.....	115
๑1	อัตราการผลิตไอน้ำ ที่การป้อนน้ำจากส่วนอุ่นน้ำ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ รวม 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง.....	117



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล.....	7
2.2	ลักษณะของเบตนิ่งที่ไม่มีและมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับผนัง.....	11
2.3	ลักษณะการเกิด Wake.....	12
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วในช่วงการเกิดเบตแบบปั่นป่วน	14
2.5	แสดงการเกิดฟลูอิดไอเซชันของเบตที่มีของไหลเป็นของเหลว และแก๊ส.....	17
2.6	เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบต.....	18
2.7	ส่วนประกอบของระบบฟลูอิดไอซ์เบตแบบหมุนเวียน.....	19
2.8	เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบตแบบหมุนเวียน.....	20
2.9	ขอบเขตของปัญหาที่ถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม.....	22
2.10	ปริมาตรควบคุมที่ผนัง.....	23
2.11	การกระจายตัวของความเร็วที่ผนัง.....	24
2.12	ลักษณะของผนังเคลื่อนที่.....	25
2.13(ก)	ช่องการไหลที่สมมาตร.....	25
2.13 (ข)	โดเมนของช่องการไหลที่ใช้เงื่อนไขสมมาตรแล้ว.....	26
2.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอกับจุดเดือดของน้ำ.....	27
2.15	ภาพตัวอย่างของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ.....	28
2.16	ภาพตัวอย่างของหม้อไอน้ำแบบคอร์นิช.....	30
2.17	ภาพตัวอย่างของหม้อไอน้ำแบบแลงแคเชอร์.....	30
2.18	ภาพตัวอย่างของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟชนิดประหยัด.....	31
2.19	การเผาไหม้แบบฟลูอิดไอซ์เบต (a) Collapsed (b) Fluidized State.....	32
2.20	หม้อไอน้ำชนิด Circulating Fluidized Bed (CFB).....	32
2.21	หม้อไอน้ำแบบเผาไหม้เชื้อเพลิงขณะลอยตัวและหมุนเวียน (CFB).....	33
3.1 (ก)	เครื่องจำลองการไหลภายในเตาฟลูอิดไอซ์เบตแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการจริง.....	47

ภาพที่	หน้าที่
3.1 (ข) รูปวาดตัวแทนเครื่องจำลองการไหลเตาฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการจำลองเชิงเรขาคณิต.....	47
3.2 รูปทรงของแบบจำลองการไหลของเครื่องฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ที่สร้างขึ้นภายในโปรแกรม Ansys.....	48
3.3 แบบจำลองเครื่องฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนใน 2 มิติที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ด้วยโปรแกรม Ansys.....	49
3.4 แผนภาพกระบวนการแก้ปัญหาโดยรวมของวิธีแก้ปัญหาแบบ Segregated...	50
3.5 ขอบเขตของแบบจำลองการไหลของเตาฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ และค่าสภาวะที่ใช้ในการจำลองภาวะ.....	53
3.6 โครงร่างเตาฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย.....	56
3.7 เตาเผาฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย.....	57
3.8 เครื่องเป่าอากาศ (Air blower).....	58
3.9 วาล์วไฟฟ้ารูปผีเสื้อและ Orifice.....	58
3.10 หน้าจอแสดงความเร็วอากาศปฐมภูมิแบบดิจิทัล.....	59
3.11 โรเตอร์ (ท่อแนวตั้งด้านซ้าย) และ Probe สำหรับวัดอุณหภูมิและองค์ประกอบของแก๊ส.....	60
3.12 หัวเผาและกระจกมองเปลวไฟ.....	60
3.13 ระบบป้อนเชื้อเพลิง (Fuel feeder system).....	62
3.14 กระจกสำหรับดูภายในห้องเผาไหม้.....	62
3.15 เครื่องอัดอากาศ พร้อมอุปกรณ์ทำความเย็นอากาศและระบบกำจัดน้ำใน.....	63
3.16 ไซโคลน (Cyclone).....	63
3.17 Downcomer (ท่อทาง ด้านขวา) และ แอลวาล์ว (วาล์วปีกผีเสื้อ).....	64
3.18 หอดูดซึมและอุปกรณ์อัดฉีดน้ำ.....	65
3.19 หน้าจอแสดงอุณหภูมิและวาล์วสำหรับดึงแก๊สออกจากระบบ.....	66
3.20 เครื่องบดถ่านหินอย่างหยาบ.....	66
3.21 เครื่องบดชีวมวลอย่างหยาบ.....	67
3.2 ส่วนอุ่นน้ำ (Water Pre-Heat).....	68

ภาพที่		หน้าที่
3.23	ส่วนแลกเปลี่ยน (Heat Section).....	69
3.24	ส่วนเก็บไอน้ำ (Steam Section).....	70
3.25	แผนผังเครื่องผลิตไอน้ำ.....	71
4.1	แสดงจำนวนกริดต่อปริมาณสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดส่วนสูงของโรเตอร์ที่ วินาทีที่ 20 – 60.....	75
4.2	แสดงปริมาณสัดส่วนของแข็งตลอดแนวแกนของโรเตอร์ ณ เวลาต่าง ๆ.....	76
4.3	คอนทัวร์สัดส่วนปริมาตรของของแข็งที่ได้จากการจำลองภาวะในเตาฟลูอิดไดซ์ เบดแบบหมุนเวียนที่เวลาต่าง ๆ.....	76
4.4	แผนภาพขอบเขตฟลูอิดไอเซชัน..... แสดงการหลอมตัวของเบดที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส.....	78
4.5	อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อ ชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ	85
4.6	330 ลิตรต่อนาที ป้อน อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 1 เมตร.....	86
4.7	อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อ ชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ	87
4.8	330 ลิตรต่อนาที ป้อน อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2 เมตร.....	87
4.8	อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อ ชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ	88
4.9	330 ลิตรต่อนาที ป้อน อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2.4 เมตร...	88
4.9	อุณหภูมิไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที.....	90
4.10	ความดันไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที.....	91
ค1	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนถ่านหิน.....	107
ค2	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลาปาล์ม.....	108
ค3	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลามะพร้าว....	109

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่หน้าตัดของหอยทาดลอง (m^2)
d_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (μm)
d_p^*	=	ตัวแปรไร้หน่วยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหอยทาดลอง (m)
F_D	=	แรงลากเนื่องจากการไหล (drag force, kgm/s^2)
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ $9.8 m/s^2$
$G_{s, ch}$	=	อัตราการไหลของของแข็งออกจากเบดต่อพื้นที่หน้าตัดของหอยทาดลอง ณ ที่ ความเร็วแก๊สเท่ากับความเร็วโซคกิง (kg/m^2s)
L	=	ความสูงเบด (m)
L_{mf}	=	ความสูงของเบดขณะเกิดเริ่มเกิดฟลูอิดไลเซชัน (m)
ΔP	=	ความดันตกคร่อม ($mm.H_2O$)
Re_p	=	ตัวแปรไร้หน่วยของ Particle Reynolds Number
U	=	ความเร็วอากาศภายในไรเซอร์
U_{ch}	=	ความเร็วโซคกิง (m/s)
U_c	=	ความเร็วแก๊สขณะเกิดสภาวะ Turbulent
U_{mb}	=	ความเร็วแก๊สที่ทำให้เริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้นในเบด (m/s)
U_{mf}	=	ความเร็วแก๊สที่ทำให้เริ่มเกิดฟลูอิดไลเซชัน (m/s)
U_{ms}	=	ความเร็วแก๊สที่ทำให้ฟองแก๊สเริ่มมีขนาดใหญ่เท่ากับหอยทาดลอง (m/s)
U_t	=	ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง (Terminal Velocity, m/s)
$U_{t, spherical}$	=	ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งที่เป็นทรงกลมในของไหลที่อยู่นิ่ง (m/s)
U_t^*	=	ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง
ϕ	=	ตัวแปรไร้หน่วยของค่าความเป็นทรงกลม
ρ_g	=	ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m^3)
ρ_s	=	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (kg/m^3)
μ	=	สัมประสิทธิ์ความหนืดของแก๊ส ($g/cm.s$)
ε	=	ตัวแปรไร้หน่วยของสัดส่วนของช่องว่าง
ε_{ch}	=	ตัวแปรไร้หน่วยของสัดส่วนของช่องว่าง ขณะที่แก๊สมีความเร็วเท่ากับ U_{ch}
ε_{mf}	=	ตัวแปรไร้หน่วยของสัดส่วนของช่องว่าง ขณะที่แก๊สมีความเร็วเท่ากับ U_{mf}

Q_g	=	อัตราเร็วของแก๊ส
d_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
θ_1	=	(12π) = มุมที่อนุภาคอันในที่สุดจะตกกระทบผนัง
R_2	=	รัศมีของเส้นโค้งการหมุนวนของแก๊สสกปรก (ทรงกระบอกไซโคลน)
R_1	=	รัศมีของเส้นโค้งการหมุนวนของแก๊สสะอาด (ทรงกระบอกท่อทางออก)
N	=	ค่าคงที่ (0.5 - 0.7)
W	=	ความกว้างของช่องทางเข้าของแก๊สสกปรก
η	=	ประสิทธิภาพ (%)
H_{out}	=	เอนทาลปีไอน้ำที่ผลิตได้ (KJ/kg)
H_{in}	=	เอนทาลปีน้ำถึงอุ่น (KJ/kg)
M_s	=	อัตราการผลิตไอน้ำ (kg/hr.)
M_f	=	อัตราการป้อนน้ำอุ่น (kg/hr.)
$Heat_{fluegas}$	=	พลังงานจากฟลูแก๊สร้อน (KJ/hr.)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการเผาในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนเป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยอาศัยการป้อนกลับของเชื้อเพลิงที่ไม่เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์มาเผาไหม้อีกครั้ง ซึ่งเป็นการใช้เชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้เชื้อเพลิงที่ใช้ยังสามารถปรับเปลี่ยนได้หลายชนิด อาทิเช่น ถ่านหิน ขยะหรือเชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) ประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมมีของเหลือใช้ทางการเกษตรประเภทนี้อยู่เป็นจำนวนมาก และมีอัตราการใช้พลังงานในส่วนนี้เพิ่มขึ้นทุกปี ดังแสดงข้อมูลการใช้ชีวมวลในประเทศไทยของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงานในตารางที่ 1.1

ปัจจุบันมีแนวคิดในการใช้เชื้อเพลิงผสมในกระบวนการเผาไหม้ หรือการเผาไหม้ร่วม (Co-combustion) จากผลการศึกษา (ประจักษ์ ทรัพย์อุดมมาก , 2550) พบว่าการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินและเชื้อเพลิงชีวมวลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาและลดการปลดปล่อยแก๊สพิษบางชนิด นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีราคาสูง ส่งผลเสียต่อภาวะทางอากาศอีกทางหนึ่ง

ตารางที่ 1.1 การใช้ชีวมวลในประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึง 2552 (หน่วยพันตันเทียบเท่า น้ำมันดิบ)

ชนิด	2547	2548	2549	2550	2551	2552
ฟืน	3,693	3,452	3,372	3,237	3,300	3,138
ถ่าน	2,608	2,698	2,807	2,932	3,095	2,996
แกลบ	1,073	1,084	998	1,043	1,184	1,234
กากอ้อย	2,949	2,866	2,435	2,636	2,818	2,829
วัสดุเหลือใช้	188	724	1,381	1,797	1,848	2,261
รวม	10,511	10,100	10,993	11,645	12,245	12,455

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน รายงานพลังงานของประเทศไทย 2552

การเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน จะให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาระหว่าง 750 – 1000 องศาเซลเซียส ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตา ส่งความร้อนมายังผนังของเตาในอุณหภูมิสูง จึงมีศักยภาพเพียงพอในการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยปรกติเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อยู่ภายในภาควิชา ถูกใช้ในการศึกษาถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ ในขณะที่ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ การนำเอาความร้อนส่วนนี้มาใช้เพื่อผลิตไอน้ำ จึงเป็นการใช้พลังงานที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้มาใช้เพื่อพัฒนาการใช้ประโยชน์ต่อไป อย่างไรก็ตามการนำเอาความร้อนดังกล่าวไปใช้ในรูปของไอน้ำ จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องกำเนิดไอน้ำที่สามารถทำงานร่วมกับเตาเผาแบบฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน

เครื่องกำเนิดไอน้ำซึ่งติดตั้งบนเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วนคือ

1. ส่วนอุ่นน้ำ (Water Pre-Heater) เป็นส่วนเก็บน้ำร้อนที่ใช้ในระบบการผลิตไอน้ำ โดยน้ำจะได้รับความร้อนจากแก๊สร้อนที่ถูกปล่อยทิ้งจากการเผาเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน

2. ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Section) เป็นส่วนที่ติดตั้งอยู่บริเวณผนังของท่อไรเซอร์ (Riser) ซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับความร้อนสูง โดยทำให้น้ำร้อนเปลี่ยนเป็นไอน้ำ

3. ส่วนเก็บไอน้ำ (Steam Section) เป็นส่วนเก็บไอน้ำที่เกิดจากส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน และช่วยเพิ่มความดันไอน้ำ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการสร้างเครื่องกำเนิดไอน้ำ โดยนำเอาความร้อนที่เกิดจากเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนมาใช้ในการผลิตไอน้ำ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาแบบจำลองเครื่องกำเนิดไอน้ำ ซึ่งได้รับความร้อนจากผนังเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยใช้โปรแกรม Ansys
2. ออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดไอน้ำ ซึ่งได้รับความร้อนจากผนังเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน
3. ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่ได้พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. สร้างแบบจำลองเตาเผาฟลูอิโดซ์เบด 2 มิติในโปรแกรม Ansys 12.1

2. ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไอน้ำ ซึ่งได้รับความร้อนจากผนังเตาฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน
3. ประกอบอุปกรณ์วัดค่าต่างๆ บนเครื่องเผาไหม้ฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน และเครื่องกำเนิดไอน้ำ
4. เผาถ่านหิน ชีวมวลในเครื่องฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน ปรับอัตราการไหลของน้ำ และบันทึกผลการทดลอง
5. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นหาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในของเตาฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยใช้โปรแกรม Ansys 12.1
3. ออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดไอน้ำประกอบเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน
4. จัดหาถ่านหิน กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว และทราย
5. คัดขนาดเชื้อเพลิง
 - ถ่านหิน ในช่วง 500 - 1000 ไมครอน
 - กะลาปาล์ม ในช่วง 500 - 1200 ไมครอน
 - กะลามะพร้าว ในช่วง 500 - 1200 ไมครอน
6. นำถ่านหิน กะลาปาล์ม และกะลามะพร้าวไปวิเคราะห์คุณภาพโดยประมาณ (Proximate analysis) แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating value)
7. ทำการเผาเชื้อเพลิง โดยทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้
 - เชื้อเพลิง (ถ่านหิน กะลาปาล์ม และกะลามะพร้าว)
 - ความเร็วลม
 - ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ
6. หาประสิทธิภาพไอน้ำที่ได้จากเครื่องกำเนิดไอน้ำ โดยทำการวัดค่า อุณหภูมิ และความดันไอน้ำ
7. บันทึกผลการทดลอง
8. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงอุทกพลศาสตร์ภายในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน สำหรับใช้เป็นส่วนให้ความร้อนในการสร้างเครื่องผลิตไอน้ำ และได้เครื่องมือ ผลิตไอน้ำที่ได้รับความร้อนจากผนังเตาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านหิน (สำเริง จักรใจ, 2547)

ถ่านหินเกิดจากไม้และชีวมวลชนิดอื่นๆที่ทับถมกันและอัดแน่นเป็นเวลานานหลายแสนปี จนกระทั่งกลายเป็นหิน โดยเริ่มจากพืชในบริเวณที่ชื้นแฉะและอับอากาศแล้วเกิดการสลายตัวทางเคมีชีวภาพพร้อมกับมีการทับถมกันของพืชชนิดต่างๆเพิ่มเติมเข้ามาจนมีความลึกมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้พืชมีความชื้น ความพรุน ปริมาณสารระเหย พร้อมกับปริมาณของออกซิเจนและไฮโดรเจน ลดลงในขณะที่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น พืชจะเปลี่ยนเป็นถ่านหินที่มีศักดิ์สูงขึ้นตามลำดับ (มีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากขึ้น) คือ ลิกไนต์ บิทูมินัส และแอนทราไซต์ในที่สุด เรียกกระบวนการเปลี่ยนแปลงนี้ว่าการเกิดถ่านหิน ถ่านหินมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และสารอนินทรีย์อื่นๆ (ในปริมาณเล็กน้อย) ที่จะกลายเป็นเถ้าหลังการเผาไหม้ เช่น อลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม แมงกานีส ฟอสฟอรัส และออกไซด์ของซิลิกอน (เช่น แร่ไพไรต์ แร่แคลไซต์ และแร่เคาลีไนต์ เป็นต้น) โดยสมบัติของถ่านหินเปรียบเทียบกับไม้และพืช แสดงดังตารางที่ 2.1

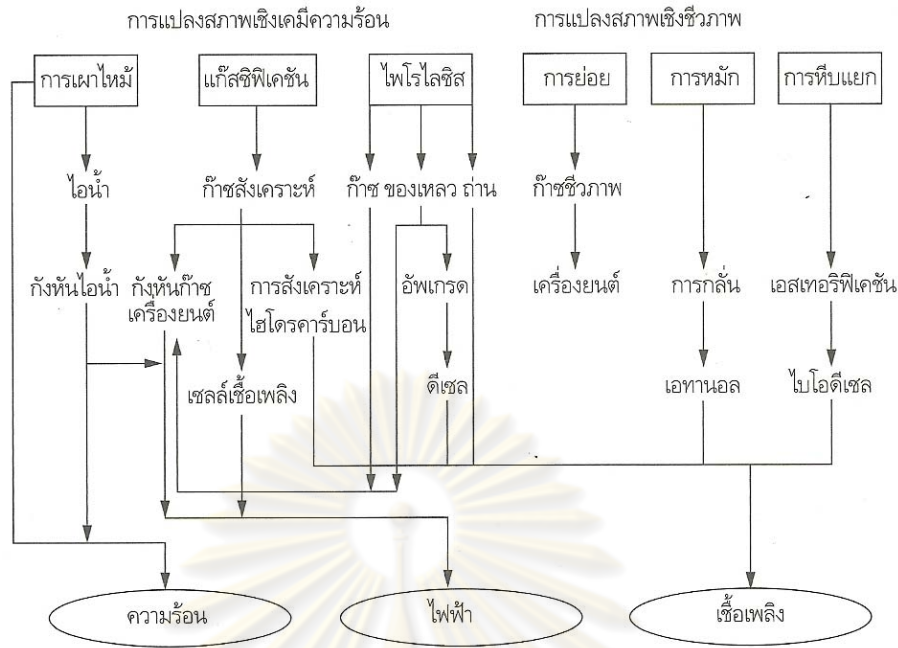
ตารางที่ 2.1 สมบัติของถ่านหิน เปรียบเทียบกับไม้และพืช (กัญญา บุญเกียรติ, 2544)

ชนิด	ร้อยละ ความชื้น (ตามสภาพ)	ร้อยละ ความชื้น (ผึ่งแห้งใน ภาค)	ร้อยละ , แห้งและปราศจากเถ้า		
			คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน
ไม้	30-60	10-15	50	6.0	43
พืช	+90	20-25	55-65	5.5	32
ลิกไนต์	20-40	15-25	65-73	4.5	21
ซับบิทูมินัส	10-20	10-20	73-78	6.0	16
บิทูมินัส	13-1	13-1	78-92	5.3	8
แอนทราไซต์	2-3.5	2-3.5	92-96	2.5	4

2.2 ชีวมวล

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ซึ่งมาจากการสังเคราะห์ด้วยแสงและเกิดขึ้นหมุนเวียนซ้ำแล้วซ้ำอีกได้ในธรรมชาติ สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลอาจมองว่าเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืช และสัตว์ หรือกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีความหลากหลายของรูปแบบและลักษณะเฉพาะตามความหลากหลายและซับซ้อนทางชีววิทยาและสภาพสิ่งแวดล้อม ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากแหล่งที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี นอกจากนี้ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรจึงมีรายได้เพิ่มเติมจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย ข้อดีต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ คือ การใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าจะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณแก๊สที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเอาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก นั่นหมายถึง การใช้ชีวมวลจะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ซึ่งตรงข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคขนส่งหรือการใช้ถ่านหินในโรงไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม การเก็บรักษาและการขนส่งชีวมวลมีความยาก รวมถึงมีความเสี่ยงสูงในการจัดหาหรือรวบรวมปริมาณชีวมวลที่ต้องการใช้ให้คงที่ตลอดปี เพราะชีวมวลบางประเภท เช่น กากอ้อย จะมีจำกัดเพียงบางเดือน อีกทั้งชีวมวลทุกประเภทต้องการพื้นที่ในการเก็บรักษาขนาดใหญ่กว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น หากต้องการปริมาณความร้อนที่เท่ากัน จะต้องใช้แกลบในปริมาณที่มากกว่าน้ำมันเตา เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาระบบและวิธีการจัดเก็บและขนส่งจึงมีความสำคัญและจำเป็นมาก



รูปที่ 2.1 แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล (ที่มา : นคร ทิพยาวงศ์, 2552)

ชีวมวลประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อยในรูปแบบของคาร์โบไฮเดรตหรือเซลลูโลส ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมาย ทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต และยังรวมไปถึงสิ่งต่างๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักในรูปแบบอื่นๆ โดยทั่วไปชีวมวลอาจจำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ ชีวมวลแบบไม้ (Woody) แบบไม่ใช่ไม้ (non woody) และของเสียจากสัตว์ ซึ่งมาจากแหล่งต่างๆ ดังนี้

- ผลผลิตจากป่า ไร่ นา สวน ต้นไม้ และวัชพืชต่างๆ ทั้งบนบกและในน้ำ เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ไม้โตเร็ว ใบไม้ กิ่งไม้ หญ้า พืชล้มลุก จากส่วนเมล็ด เปลือก ผล และจากมวลสาหร่าย พืชน้ำ เป็นต้น
- ผลผลิตจากพืชเศรษฐกิจ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ปาล์มน้ำมัน แกลบ ฟาง ชานอ้อย เหง้ามัน ชังข้าวโพด ทะลายปาล์ม
- เศษวัสดุและของเสียจากกระบวนการและการประกอบการของภาคอุตสาหกรรม เช่น ขี้เลื่อย กลีเซอริน ส่าเหล้า กากอาหาร รวมไปถึงของเสียจากโรงงานแปรรูป ของเสียประเภทพลาสติก และกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม
- ของเสียจากแหล่งชุมชน เช่น ขยะชุมชน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน
- ผลิตภัณฑ์และของเสียจากสัตว์ เช่น ไขมัน มูลสัตว์ เป็นต้น

แหล่งพลังงานชีวมวลปฐมภูมิที่ชัดเจน ได้แก่ ไม้พื้ ซึ่งมีความสะดวกในการใช้และมีการใช้กันมากอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในชนบท ในเขตเมืองก็มีการใช้ไม้พื้ในอุตสาหกรรมและโรงงานขนาดเล็ก แหล่งที่มาของไม้พื้เหล่านี้หาได้ตามป่าไม้ พื้ที่กร้าง ป่าปลูก และต้นไม้ตามหัวไร่ปลายนา หรือในสวน ซึ่งจะเป็นส่วนลำต้น กิ่ง ก้าน ใบ หรือบางครั้งอาจรวมถึงโคนและรากด้วย ในพื้นที่ที่ค่อนข้างอุดมสมบูรณ์ แหล่งไม้พื้จะหาได้จากการเก็บ ตัด พื้ไม้แห้งๆ ที่ตายแล้ว ในบางพื้นที่ที่มีจำกัดอาจจะได้จากการตัดโค่นไม้สดมาเลย

แหล่งพลังงานชีวมวลทุติยภูมิได้จาก ชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เศษกากจากกระบวนการในโรงงาน ชีวมวลจากสัตว์เลี้ยง หรือชีวมวลที่ผ่านกระบวนการการแปรรูปมาแล้ว เศษกากวัสดุที่ผลิตภายในประเทศจะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป บางชนิดไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้โดยตรงเพื่อผลิตไฟฟ้า เช่น กากมันสำปะหลังและส่าเหล้า เพราะมีความชื้นสูงถึงร้อยละ 80-90 บางชนิดต้องนำมาย่อยก่อนนำไปเผาไหม้ เช่น เศษไม้ยางพารา เป็นต้น

แหล่งผลิตชีวมวลที่สำคัญของประเทศไทยมีดังนี้

- แกลบจากโรงสีข้าว
- กากอ้อยจากโรงงานน้ำตาล
- กากปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ
- เศษไม้จากโรงเลื่อยไม้ยางพารา สวนยางพารา และโรงงานผลิตไม้อัด
- ชังข้าวโพดจากการแยกเมล็ดข้าวโพดออก ซึ่งกระจายอยู่ตามไร่ข้าวโพด
- กาบมะพร้าวจากสวนมะพร้าว ร้านขายส่งลูกมะพร้าว และโรงงานแปรรูปเนื้อมะพร้าว
- ส่าเหล้าจากโรงงานผลิตเอทิลแอลกอฮอล์
- กากมันสำปะหลังจากโครงการแข่งขันมันสำปะหลัง

ข้อจำกัดในการใช้กากชีวมวลเหล่านี้เป็นเชื้อเพลิง

1. ความหนาแน่นต่ำ ปริมาณมาก และขนย้ายได้ยาก ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการขนส่งไปไกลจากสถานที่ผลิต
2. การนำเศษวัสดุทางการเกษตรออกไปจากพื้นที่การเกษตรจำนวนมาก ทำให้สารอาหารในดินลดลง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อผลผลิตทางการเกษตรในพื้นที่นั้นในอนาคต
3. เศษวัสดุที่เหลือจากการเกษตรเหล่านี้จะมีเฉพาะในฤดูกาลที่มีการผลิต ในช่วงเวลาอื่นของปีจะไม่มี หากต้องการมีไว้ใช้ตลอดปีจำเป็นต้องมีสถานที่เก็บรักษาขนาดใหญ่ซึ่งมีราคาแพง และอาจเกิดปัญหาในการจัดการได้

ชีวมวลจากสัตว์ที่สำคัญได้จากของเสียหรือมูลสัตว์ ซึ่งถ้าทำให้แห้งแล้วจะมีค่าความร้อนใกล้เคียงกับไม้พื้ พลังงานนี้อาจได้จากการเผาไหม้โดยตรงหรือนำไปหมักให้เกิดแก๊สชีวภาพ

ตามปกติแล้วมูลสัตว์ไม่ใช่ทางเลือกแรกๆ หรือเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญเท่าไรนัก ผู้คนจะหันมาสนใจใช้มูลสัตว์ก็ต่อเมื่อไม้ฟืนหรือแ่งชีวมวลอื่นๆ หาได้ยาก เช่น ในประเทศอินเดีย

2.3 ทฤษฎีฟลูอิดิเซชัน (Fluidization theory)

2.3.1 นิยาม (สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

ฟลูอิดิเซชัน เป็นคำที่ใช้อธิบายกระบวนการที่ของแข็งซึ่งมีลักษณะรูปร่างเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล ทั้งนี้เม็ดหรือชิ้นของแข็ง ตอนเริ่มแรกถูกวางไว้บนตะแกรงในหอตดลองที่มักจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ของไหลที่ใช้อาจ เป็นแก๊สหรือของเหลว ปล่อยให้ผ่านเข้ามาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลก็จะไหลผ่านชั้นเม็ดของแข็งแล้วไหลออกส่วนบนของหอตดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล คือ มีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในเบดหรือ ภายในหอตดลอง หรือระหว่างเบดต่อบेดก็ได้ จึงเรียกภาวะของของแข็งที่มีพฤติกรรมในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดิเซชัน ฟลูอิดิเซชันเบดนั้นปกติจะเป็นระบบแก๊สหรืออากาศกับของแข็งมากกว่าจะเป็นระบบของเหลวกับของแข็ง

ขณะที่เกิดฟลูอิดิเซชันเม็ดของแข็งที่บรรจุอยู่ในหอตหรือถังจะกระจายตัวในลักษณะ แว่นลอยและมีคุณสมบัติในการไหลคล้ายของไหลเมื่อมองจากภายนอกจะเห็นว่าผิวของ ฟลูอิดิเซชันเบดนั้นจะมีลักษณะคล้ายของเหลวที่กำลังเดือด เนื่องจากการเคลื่อนไหวของเม็ดของแข็ง ที่มีลักษณะคล้ายของเหลวนั่นเอง ถ้าต่อท่อไว้กับถังบรรจุที่ระดับผิวบนของฟลูอิดิเซชันเบด เม็ดของแข็งที่อยู่สูงเกินกว่าระดับนี้จะล้นไหลออกมาได้เช่นเดียวกับของไหล ถ้าหากเพิ่มความเร็ว ปลายหรือการตกอิสระของเม็ดของแข็งเม็ดเดียว เม็ดของแข็งที่บรรจุทั้งหมดก็จะถูกปลิวไปกับแก๊ส จนหมด

2.3.2 ประเภทของฟลูอิดิเซชัน

ฟลูอิดิเซชัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ฟลูอิดิเซชันสองสถานะ (Two-phase fluidization) หมายความว่าในหอตดลอง หรือเบดที่ใช้งานประกอบด้วยสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นแก๊สหรือของเหลวอย่างใดก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดิเซชันสองสถานะจึงแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แก๊สฟลูอิดิเซชัน (Gas fluidization) และฟลูอิดิเซชันของเหลว (Liquid fluidization)

ในระบบ 2 เฟส อนุภาคกับแก๊ส สามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ

- Co-current upward flow เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคและแก๊สจากด้านล่างสู่ด้านบนในทิศทางเดียวกัน
- Co-current downward flow เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคและแก๊สจากด้านบนสู่ด้านล่างในทิศทางเดียวกัน
- Counter-current flow เป็นการเคลื่อนที่สวนทางกันของอนุภาคและแก๊ส

2. ฟลูอิดไอเซชันสามสถานะ (Three-phase fluidization) หมายความว่าภายในหอทดลองหรือเบดจะประกอบด้วยของสามสถานะอยู่พร้อม คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส สำหรับฟลูอิดไอเซชันสามสถานะนี้เป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดไอเซชันสองสถานะ

2.3.3 ลักษณะของแก๊สฟลูอิดไอเซชัน (Gas fluidization) (สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

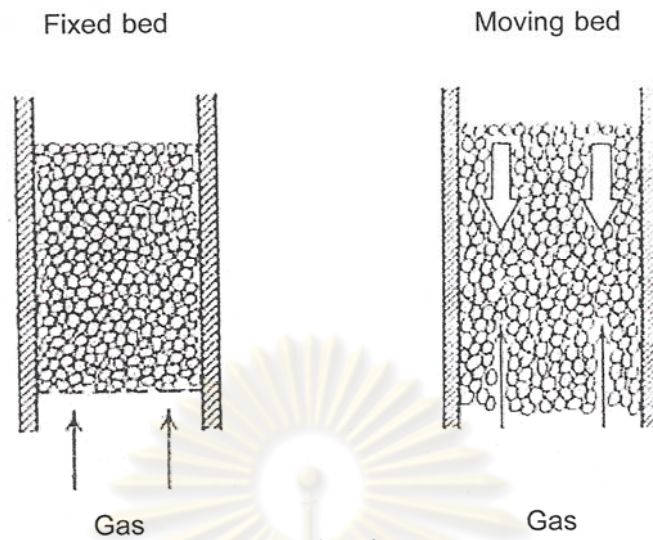
แก๊สฟลูอิดไอเซชันเป็นการเกิดฟลูอิดไอเซชันเบดสองสถานะระหว่างของไหลที่เป็นแก๊สกับของแข็ง เมื่อเบดวางตัวบนตะแกรงหรือตัวกระจายแก๊ส (Gas distributor) และมีแก๊สเคลื่อนที่ผ่านขึ้นมา (Upward flowing) ซึ่งความเร็วที่เพิ่มขึ้น และ Hydrodynamic ที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังนี้

- เบดนิ่ง (Packed bed หรือ Fixed bed)

เมื่อแก๊สไหลผ่านเบดขึ้นมาด้วยความเร็วต่ำ ของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายแก๊สจะวางตัวนิ่งไม่เคลื่อนไหว แก๊สจะไหลคดเคี้ยวไปตามช่องว่างที่มีอยู่ในเบด เรียกลักษณะเบดแบบนี้ว่าเบดนิ่ง หรือเบดอาจมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับผนังแต่อนุภาคของแข็งในเบดไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสต่อกัน กรณีนี้เรียกว่า เบดเคลื่อนที่ (Moving bed) ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เมื่อแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบดนิ่งจะมีแรงเนื่องจากการไหลของของไหล กระทำต่ออนุภาคของแข็งในทิศทางกรไหล เรียกแรงนี้ว่าแรงลากเนื่องจากการไหล (Drag force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันลด (Pressure drop) ตกคร่อมเบด ความดันตกคร่อมเบดตลอดความสูงของเบดนิ่งที่เกิดขึ้น จะเพิ่มตามความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Ergun equation (Ergun, 1952) ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu U}{(\phi d_p)^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{1.75\rho_g U^2}{(\phi d_p)^2} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.2 ลักษณะของเบตนิ่งที่ไม่มีและมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับผนัง (Kunii, D. and Levenspiel, O., 1991)

- เบตแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed)

เมื่อความเร็วแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบตนิ่งเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ความเร็วที่จุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน (Minimum fluidization velocity, U_{mf}) และเรียกเบต ณ จุดนี้ว่า Minimum fluidized bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่อนุภาคของแข็งประพฤติตัวคล้ายของไหล สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบต ณ จุดนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบต ดังนั้น แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag force; F_D) ที่เกิดขึ้น ณ จุดนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$F_D = \Delta P \cdot A = AL(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.2)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ภาวะต่ำสุดของฟลูอิไดเซชัน (Minimum fluidization condition) ดังนี้

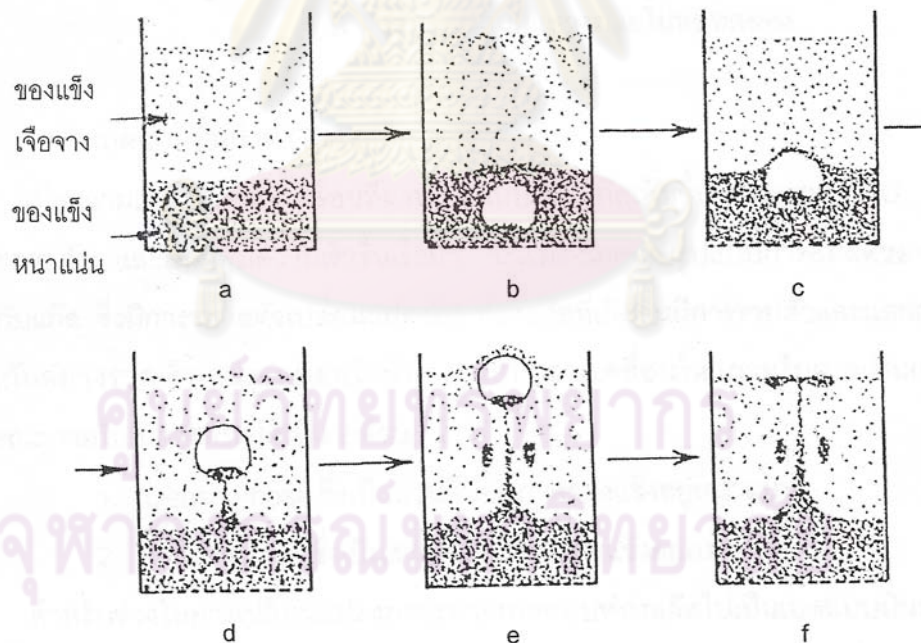
$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.3)$$

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซน สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้ (สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

$$- \text{Re}_p < 20 \quad U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2 \cdot (\rho_s - \rho_g)}{150 \cdot \mu} g \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad (2.4)$$

$$- \text{Re}_p > 1,000 \quad U_{mf} = \frac{\phi d_p \cdot (\rho_s - \rho_g)}{1.75 \cdot \rho_g} g \varepsilon_{mf}^3 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g} \quad (2.5)$$

ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่แทรกขึ้นไป และอาจมีการรวมตัวกันผ่าน Emulsion phase โดยที่อาจจะมีของแข็งบางส่วนติดไปด้านบนของฟองแก๊ส และบางส่วนวิ่งตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย จนกระทั่งถึงผิวบนก็จะเคลื่อนที่หลุดออกไปแล้วแตกกระจายอยู่เหนือผิว อนุภาคของแข็งที่ติดอยู่เกือบทั้งหมดจะตกลงกลับลงมายังเบดใหม่ โดยเรียกปรากฏการณ์ที่ของแข็งเคลื่อนที่ตามฟองแก๊สนี้ว่าการเกิด Wake ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การเกิด Wake เกิดจากความดันที่อยู่ใต้ล่างฟองแก๊สน้อยกว่าความดันบริเวณ Emulsion phase ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่จากบริเวณที่ความดันสูงมาอยู่ในบริเวณที่มีความดันต่ำ



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเกิด Wake (Kunii, D. and Levenspiel, O., 1991)

ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือเบดขึ้นไป ซึ่งฟองแก๊สจะเกิดการแตกตัวและของแข็งที่ติดไปกับฟองแก๊สจะตกลงมายังเบดอีกครั้งด้วยผลของแรงโน้มถ่วง เรียกว่าบริเวณอิสระ (Freeboard) อย่างไรก็ตามอาจจะมีอนุภาคของแข็งบางส่วน (น้อยมาก) ซึ่งมีขนาดเล็กถูกพัดพาเคลื่อนที่ไปกับแก๊สด้วย

(ไม่ตกกลับลงมา) ณ ความสูงค่าหนึ่งใน Freeboard ซึ่งอนุภาคของแข็งเกือบทั้งหมดตกกลับลงมายังเบดจะเรียกความสูงนี้ว่า ความสูงหลุดลอยส่งผ่าน หรือ Transport disengaged height (TDH) เหนือความสูงนี้ไปจะมีของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจหลุดไปกับแก๊สด้วยอัตราที่สม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของของแข็งในช่วงนี้จะเรียกว่า Elutriation rate

- เบดแบบสลัก (Slugging bed)

ขนาดของฟองแก๊สจะมีขนาดเพิ่มตามความเร็วของแก๊ส และความสูงของเบด ถ้าเบดบรรจุอยู่ในหอทดลองซึ่งมีขนาดเล็กหรือแคบและยาว ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นอาจจะมีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบด (หอทดลอง) ในกรณีนี้จะสังเกตเห็นฟองแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบดและแยกอนุภาคของแข็งออกเป็นชั้นๆ เรียกว่าเกิดสลัก และที่ความเร็วของแก๊สที่ทำให้ฟองแก๊สเริ่มมีขนาดใหญ่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเบดหรือหอทดลองก็คือ Minimum slugging velocity (U_{ms}) มีค่าประมาณไว้คือ

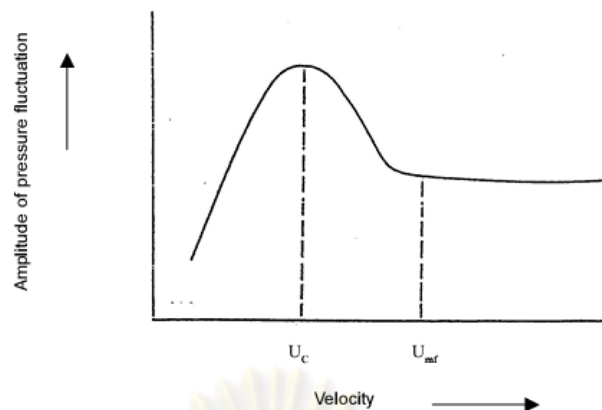
$$U_{ms} = U_{mf} + 0.07\sqrt{gD} \quad (2.6)$$

เมื่อ D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหอทดลอง

- เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent bed)

เมื่อความเร็วของแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบดแบบฟองแก๊สเพิ่มขึ้น จนมากกว่า U_{mf} เบดจะเกิดการขยายตัว และเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ จะเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของอนุภาคของแข็งกับแก๊ส ซึ่งมีการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว (จนดูเหมือนไม่มีฟองแก๊ส) การเคลื่อนไหวภายในเบดเป็นแบบปั่นป่วน ลักษณะภายในเบดจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ Dense phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น และ Dilute phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง

สำหรับช่วงในการเปลี่ยนแปลงภาวะจากเบดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบดแบบปั่นป่วนนั้น ไม่ได้เกิดขึ้นแบบทันทีทันใดที่ความเร็วค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงของความเร็วในการเปลี่ยนภาวะทั้งสองนี้ โดยการเปลี่ยนภาวะจากเบดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบดแบบปั่นป่วนนั้นจะมีช่วงของการเปลี่ยนโดยเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง เบดซึ่งเดิมอยู่ในภาวะเบดแบบฟองแก๊สนั้น ที่บริเวณผิวหน้าของเบดจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเบดแบบปั่นป่วน ซึ่งเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเบดที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนภาวะได้ดังนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วในช่วงการเกิดเบดแบบปั่นป่วน
(ที่มา: ปิยะพันธ์ จะกอบ, 2548)

ความเร็วสุดท้าย (Terminal velocity) คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหล ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอตกลงไป โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามลักษณะของอนุภาคของแข็ง

- กรณีอนุภาคของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลม (สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{0.591}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.7)$$

หรือ

$$U_{t,spherical} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (2.8)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225 \rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.9)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200,000 \quad (2.10)$$

- กรณีที่อนุภาคของแข็งไม่เป็นทรงกลม

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.7 และ 2.11 จะอยู่ในตัวแปร U_t^* และ d_p^* ซึ่งเป็นเทอมของตัวแปรไร้หน่วย โดยที่

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (2.12)$$

และ

$$U_t^* = U_t \left[\frac{\rho_g^2}{\mu (\rho_s - \rho_g) g} \right]^{1/3} \quad (2.13)$$

ดังนั้นจาก U_t^* ที่ได้จากสมการที่ 2.7 และ 2.11 นำมาหา U_t โดยอาศัยสมการที่ 2.14 ได้

$$U_t = U_t^* \left[\frac{\mu (\rho_s - \rho_g) g}{\rho_g^2} \right]^{1/3} \quad (2.14)$$

- ฟลูอิดซ์เบดความเร็วสูง Fast fluidized bed

เมื่อความเร็วของอากาศมากขึ้นจนไม่สามารถระงับพื้นผิวด้านบนของเบดได้ จนกระทั่งอนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ออกทางด้านบนหอตกลงและต้องเติมอนุภาคของแข็งเข้ามาแทนที่โดยการใส่เข้ามาใกล้ๆ ส่วนล่างหอตกลง อนุภาคของแข็งจะรวมกลุ่มและเคลื่อนที่ลงบริเวณใกล้ๆ ผังของหอตกลง ขณะที่แก๊สและอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ด้านบนจะเคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่อัตราการป้อนของแข็งคงที่ที่ความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคของแข็งในหอตกลงเจือจางมากขึ้น ที่ภาวะนี้อัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของเบดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.98

- Dilute-phase transport หรือ Pneumatic conveying

เป็นการขนถ่ายอนุภาคของแข็งด้วยแก๊ส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของแข็งในแนวแกนยกเว้นในส่วนล่างที่อนุภาคของแข็งมีความเร่ง และอนุภาคของแข็งบางส่วนอาจหยุดนิ่งอยู่ใกล้ๆ ผังของหอตกลง ความเร็วแก๊สที่ทำให้เบดในท่อเปลี่ยนจากเบดเจือจางเป็นเบดหนาแน่นเรียกว่า ความเร็วในการเกิดโซคกิง (Choking velocity, U_{ch}) ค่าความเร็วนี้สามารถหาได้จากการทำการทดลอง โดยการปรับลดความเร็วแก๊สในระบบที่เป็นเฟสเจือจางและมีปริมาณอนุภาคของแข็งในระบบคงที่ลงจนกระทั่งเบดเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็วเปลี่ยนจากเฟสเจือจาง

เป็นเฟสหนาแน่น ซึ่งความเร็วแก๊สที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว คือความเร็วในการเกิดโซคกิ้งนั่นเอง ปริมาณของแก๊สที่ไหลออกจากเบตภาวะนี้ คือ

$$G_{s, ch} = \rho_s (1 - \varepsilon_{ch}) (U_{ch} - U_t) \quad (2.15)$$

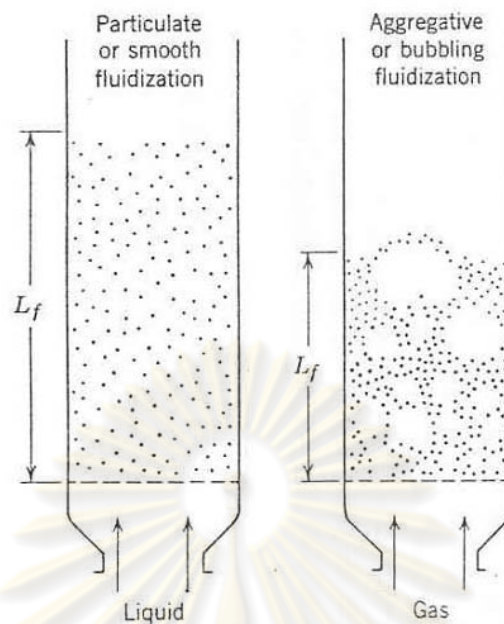
เมื่อ $G_{s, ch}$ คือ อัตราการไหลของของแข็งออกจากเบตต่อพื้นที่หน้าตัดของหอทดลอง
 ε_{ch} คือ อัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของเบตในภาวะ Choking พบว่าค่านี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.943 ถึง 0.987 (พล สาเกทอง, 2526; สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

2.3.4 ลักษณะของฟลูอิไดซ์เบต (Fluidized bed) (สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

เบต (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอการทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทดลอง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายแก๊สจนถึงระดับสูงสุดหรือผิวหน้าของเม็ดเบต

ตัวกระจายแก๊ส (Gas distributor) ทำหน้าที่กระจายให้ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดขวางของทรงกระบอก (พล สาเกทอง, 2526; สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

ฟลูอิไดซ์เบตที่เป็นของเหลวจะมีการขยายตัวของเบตอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกเบตแบบนี้ว่า เบตสม่ำเสมอหรือเบตที่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับฟลูอิไดซ์เบตที่ของไหลเป็นแก๊ส ลักษณะเบตที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากที่เป็นของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของแก๊สสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบตแล้ว แก๊สส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองแก๊สขึ้น ฟองแก๊สก็จะแทรกตัวขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบตและแตกตัวในที่สุด แต่ขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย เม็ดของแข็งภายในเบตจึงมีการเคลื่อนที่เป็นไปอย่างซุกซม ดังแสดงในรูปที่ 2.5

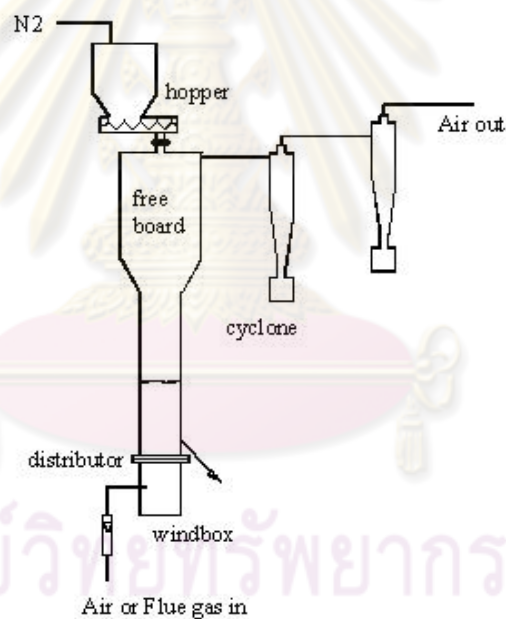


รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดฟลูอิดาเซชันของเบดที่มีของไหลเป็นของเหลว และแก๊ส
(ที่มา: สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

ระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดาเซชันเบดมีข้อดีคือ สามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ ใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด ทั้งแบบเชื้อเพลิงชนิดเดียวหรือแบบผสม อุณหภูมิของเบดและอากาศผสมกันอย่างปั่นป่วนคลุกเคล้ากันเป็นอย่างดี ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ การถ่ายโอนความร้อนจากรอบนอกถ่านหินและการแพร่ของออกซิเจนสู่ผิวถ่านหินดีตลอดจนการถ่ายโอนความร้อนสู่ผิวท่อน้ำมีประสิทธิภาพที่ดีเพราะชั้นขอบเขตโดยรอบของผิวถ่านหินหรือถ่านและผิวท่อน้ำถูกทำลายอยู่ตลอดเวลาอันเนื่องจากการเคลื่อนที่ของชั้นฟลูอิดาเซชันเบด ทำให้ใช้ถ่านหินที่มีเกรดกว้างได้ ที่ความเร็วของอากาศสูงๆ การทำงานของฟลูอิดาเซชันเบดจะเสียพลังงานน้อยกว่าเบดที่อยู่กับที่มาก เพราะแรงเสียดทานและความดันลดมีค่าน้อยกว่า การควบคุมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก็ทำได้ง่ายเพราะสามารถใช้หินปูนหรือโดโลไมต์ใส่ลงในชั้นฟลูอิดาเซชันเบดโดยไม่ต้องติดตั้งระบบกำจัดแก๊สไอเสีย และการปลดปล่อยสารประกอบไนโตรเจน (NO_x) ก็ต่ำเนื่องจากชั้นฟลูอิดาเซชันเบดจะมีอุณหภูมิการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำ (สำเริง จักรใจ, 2547)

ส่วนข้อเสียคือ ใช้เวลาเริ่มจุดเตาหรือหยุดเดินเตานาน การกัดกร่อนของเครื่องปฏิกรณ์และท่อน้ำค่อนข้างสูงเนื่องจากการขัดสีของฟลูอิดาเซชันเบด เกิดการสูญเสียอนุภาคคาร์บอนขนาดเล็กที่ยังไม่เผาไหม้ไปในรูปของเถ้าลอยซึ่งจะถูกหอบลอยขึ้นไปพร้อมกับไอเสียในปริมาณที่สูง อนุภาคคาร์บอนขนาดเล็กเหล่านี้ เป็นผลมาจากการลดลงของขนาดถ่านคาร์บอนในชั้นฟลูอิดาเซชันเบดซึ่งมีสาเหตุมาจากหลายประการเช่น จากการแตกตัวปฏิกิริยาของคาร์บอน (เช่น เกิดจากความ

เค้นทางความร้อนในโครงสร้างที่พูนของคาร์บอนและความเค้นจากความดันที่เพิ่มขึ้นของสารระเหยระหว่างเกิดกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนในโครงสร้างที่พูนของคาร์บอน เป็นต้น) จากการเผาไหม้ของคาร์บอนเอง จากการแตกตัวทุติยภูมิของถ่านคาร์บอนอันเนื่องมาจากการชนในชั้นฟลูอิด์เบดและการขัดถูของถ่านคาร์บอน เนื่องจากว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ของระบบฟลูอิด์เบดค่อนข้างต่ำอยู่แล้ว ทำให้การเผาไหม้โดยรวมของถ่านคาร์บอนถูกควบคุมโดยอัตราการเผาไหม้ที่ผิวและในรูพรุนของถ่านคาร์บอนเป็นหลัก ยิ่งใช้ถ่านหินที่มีความว่องไวต่ำด้วยแล้ว อนุภาคของถ่านคาร์บอนขนาดเล็กๆ เหล่านี้จะยิ่งไม่มีเวลาเพียงพอเพื่อเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่ถูกหอบให้ลอยออกไปจากบริเวณเหนือชั้นฟลูอิด์เบดของเตาแม้ว่าจะมีเวลาอยู่ในเตานานถึง 3 วินาทีที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส ก็ตาม นอกจากนี้ยังมีข้อเสียอีกประการหนึ่งคือ เครื่องปฏิกรณ์ต้องมีความสูงพอสมควร ไม่สามารถขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ได้ง่าย ระบบการเผาไหม้ใหญ่ๆ ต้องมีการป้อนถ่านหินหลายจุด เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแสดงดังรูปที่ 2.6

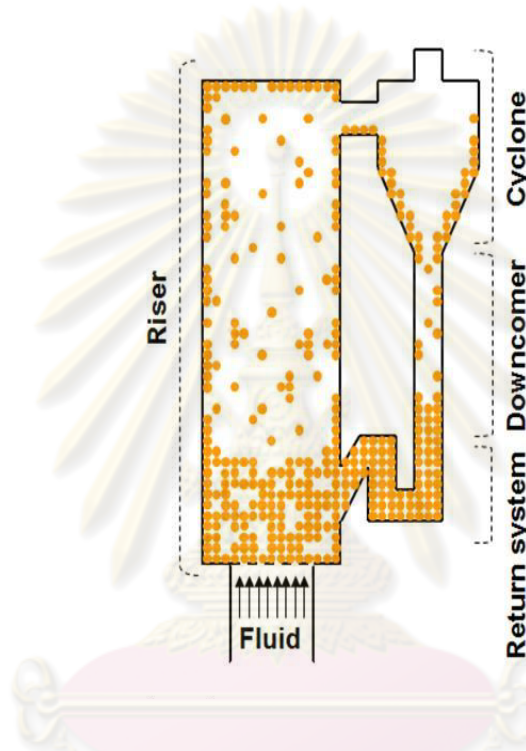


รูปที่ 2.6 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด
(ที่มา: Son Sung Real , 2003: www.fb.kaist.ac.th)

2.3.5 ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed, CFB)

ระบบฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนเป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการสัมผัสระหว่างแก๊สกับเม็ดของแข็ง โดยอาศัยเทคนิคทางฟลูอิด์เบดซึ่งนำมาประยุกต์ใช้งาน ระบบประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ (ดังรูปที่ 2.7)

- 1) ท่อไรเซอร์ เป็นส่วนที่ทำงานภายใต้ภาวะการเกิดฟลูอิดไคซ์เบดที่ความเร็วสูง (Fast fluidized bed)
- 2) Gas-solid separator เช่น Cyclone ทำหน้าที่ดักจับของแข็งที่หลุดออกมาจากท่อไรเซอร์
- 3) ท่อป้อนกลับ (ดาวน์คัมเมอร์ (downcomer) หรือ Return leg) ทำหน้าที่ป้อนเม็ดของแข็งที่ได้จาก Cyclone กลับไปยังด้านล่างของท่อไรเซอร์ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของเม็ดของแข็ง

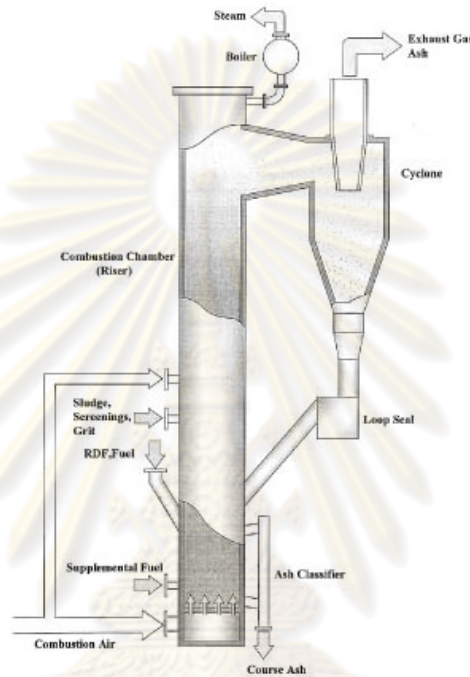


รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน

(ที่มา: www.chulapedia.chula.ac.th)

ระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบด แต่จะมีการปรับปรุงจากระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดให้มีการหมุนเวียนของเบด โดยจะมีเตาปฏิกรณ์ 2 ตัวต่อกัน โดยตัวแรกไรเซอร์ (riser) จะทำหน้าที่เสมือนระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบด ในขณะที่เตาปฏิกรณ์อีกตัวดาวน์คัมเมอร์ (downcomer) จะทำหน้าที่กักเก็บและนำเบดพร้อมทั้งเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์กลับเข้ามาสู่เตาปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ใหม่อีกครั้งเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น มีการป้อนอากาศหรือออกซิเจนมากกว่าระบบการเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดเพื่อให้เกิดฟลูอิดไคซ์เบดอย่างรวดเร็วและหลุดออกจากเตาปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ไป เกิดเป็นชั้นฟลูอิดไคซ์เบดตลอดเตาปฏิกรณ์ตัวที่ 1 อุณหภูมิสูงกระจายตลอดทั้งเตาและไม่สูงมากเกินไป ทั้งนี้

อุณหภูมิจะไม่สูงมากเฉพาะส่วนล่างของเตาเหมือนกับระบบการเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดอันเป็นสาเหตุของปัญหามลพิษ เนื่องจากการปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) นอกจากนี้พื้นที่หน้าตัดของเบดจะเล็กกว่า สามารถขยายขนาดของเครื่องได้ง่ายกว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันยังดีกว่าที่อัตราการใช้หินปูนที่เท่ากันอีกด้วย(สำเร็จ จักรใจ, 2547) เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน
(ที่มา: Kinrakuji , 2007: www.gec.com)

2.3.6 ข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคฟลูอิโดเซชัน

การเปรียบเทียบระหว่างข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคฟลูอิโดเซชันกับเทคนิคอื่นๆ
สรุปได้ดังนี้

ข้อดี

- เนื่องจากเม็ดของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมกันได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอด
- มีการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็ง เม็ดที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน เม็ดที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก

- จากคุณสมบัติที่คล้ายกับของไหล จึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบตและไหลเติมเข้ามาในเบตได้
- การที่เม็ดของแข็งไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบต เม็ดของแข็งนี้สามารถที่จะเป็นตัวนำความร้อนจากผนังแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า เพราะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วของไหลค่าเดียวกัน ฟลูอิดเบตจึงเหมาะสมกับกระบวนการที่มีปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนหรือดูดความร้อนจำนวนมากๆ
- อัตราการถ่ายเทมวลสารและพลังงานสูง เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลมีมากเมื่อเทียบกับเบตนิ่ง
- ที่ความเร็วของของไหลสูงๆ การทำงานของฟลูอิดเบตจะเสียพลังงานน้อยกว่าเบตที่อยู่กับที่มาก เพราะแรงเสียดทานและความดันลดมีค่าน้อยกว่า
- สามารถกำจัดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของเครื่อง
- สามารถใช้ในการขนส่งเม็ดของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

ข้อเสีย

- เนื่องจากการผสมกันของเม็ดของแข็งอย่างรวดเร็ว อาจทำให้ระยะเวลาที่เม็ดของแข็งสัมผัสและผสมกับของไหลสั้นเกินไป เบตอาจจะไม่ผสมกันเป็นเนื้อเดียวโดยตลอด แต่อาจแก้ไขได้โดยใช้เบตหลายชั้น
- เกิดการขัดสีระหว่างของแข็งและภาชนะทำให้เกิดการสึกกร่อน เม็ดของแข็งมีขนาดเล็กลง

2.4 การคำนวณเชิงพลวัตของของไหลด้วยระเบียบวิธีไฟในตัวเอง (Patankar, S. V., 1980)

การจำลองการไหลด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นการวิเคราะห์ปัญหาการไหลของระบบการไหล การถ่ายเทความร้อนและปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกรไหล เช่น การเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยจำลองปัญหาเหล่านั้นบนคอมพิวเตอร์

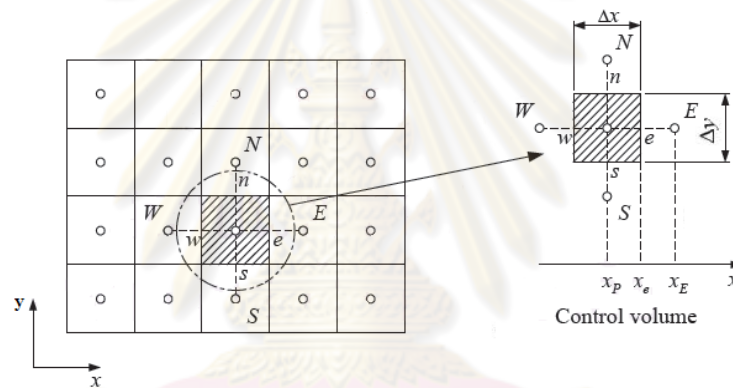
ปรากฏการณ์ทางการไหล การถ่ายเทความร้อน และปฏิกิริยาต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งไม่สามารถแก้ระบบสมการเหล่านี้เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution) ได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ (Analytical analysis) ยกเว้นในกรณีพิเศษบางกรณี ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical analysis) จึงเข้ามามีบทบาทในการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate

solution) โดยอาศัยการกระจายพจน์ต่าง ๆ เพื่อประมาณสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ด้วยระบบสมการพีชคณิต (System of algebraic equations) ซึ่งสามารถหาผลเฉลยของระบบสมการนี้ได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในหัวข้อนี้จะแสดงการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) กับสมการพื้นฐานของการไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยจะทำการอธิบายขั้นตอนต่าง ๆ ของระเบียบวิธีนี้เช่น การประมาณพจน์ของการแพร่กระจาย พจน์ของการพา เป็นต้น

2.4.1 สมการควบคุมพื้นฐาน

ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่อาศัยการอินทิเกรตสมการการอนุรักษ์บนปริมาตรควบคุม (Control volume) โดยแบ่งขอบเขตของปัญหาที่สนใจออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ขอบเขตของปัญหาที่ถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Patankar, S. V., 1980)

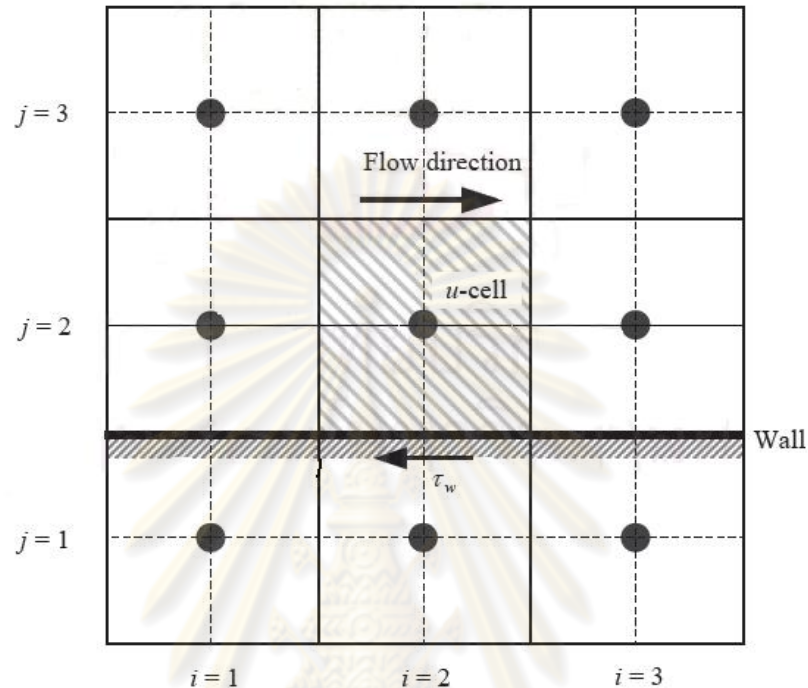
2.4.2 เงื่อนไขขอบ

การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้ปัญหาคำนวณต่าง ๆ นั้น จำเป็นต้องมีการกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary conditions) และเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial conditions) เนื่องจากสภาพทางกายภาพของปัญหาที่จำลองมาจะขึ้นกับการกำหนดเงื่อนไขเหล่านั้น ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเงื่อนไขขอบทั่วไปที่ใช้ในวิธีไฟไนต์วอลุ่มโดยแบ่งเงื่อนไขเป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ

- เงื่อนไขขอบที่ผนัง (Wall boundary condition)
- เงื่อนไขขอบแบบสมมาตร (Symmetric boundary condition)

2.4.2.1 เงื่อนไขขอบที่ผนัง (Wall boundary condition)

ผนังเป็นเงื่อนไขขอบที่พบในปัญหาการไหลทั่วไป โดยอาจแบ่งเงื่อนไขขอบชนิดนี้เป็นเงื่อนไขย่อยหลายประเภท ซึ่งในที่นี้จะใช้ผนังที่ขนานกับแนวแกน x (รูปที่ 2.10) ในการพิจารณา



รูปที่ 2.10 ปริมาตรควบคุมที่ผนัง (Patankar, S. V., 1980)

เงื่อนไขที่ไม่มีการลื่นไถล (No-slip condition; $u = 0, v = 0$) เป็นเงื่อนไขการประมาณของความเร็วที่ผิวของแข็ง โดยความเร็วที่ขอบ ($j = 1$) มีค่าเท่ากับศูนย์ และปริมาตรควบคุมที่อยู่ติดผนังมีค่า $a_s = 0$ เนื่องจากไม่มีการคำนวณ Pressure correction ที่ตำแหน่งนี้

เงื่อนไขขอบที่ผนังสำหรับการไหลแบบราบเรียบ เราจะพบว่าบริเวณผนังมีความเค้นเฉือนในแนว u มีค่าเป็น

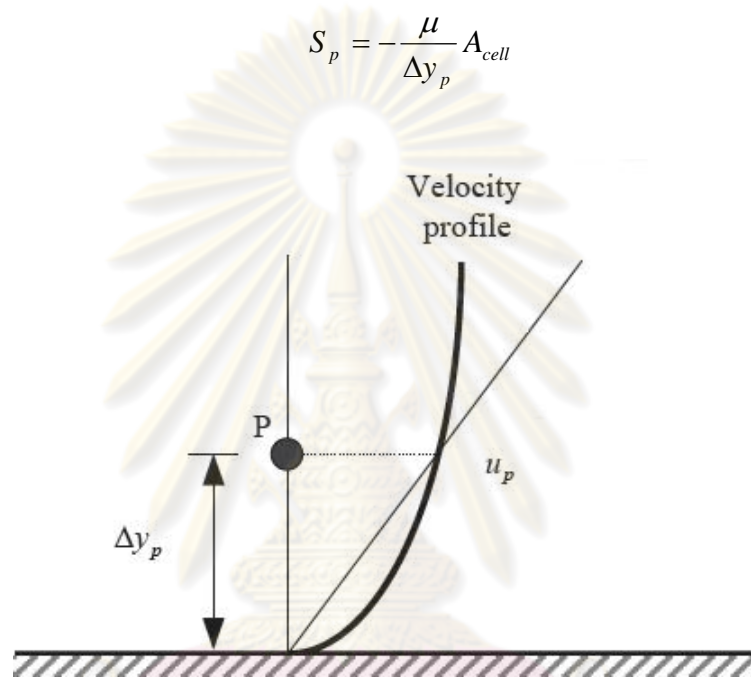
$$\tau_w = \mu \frac{u_p}{\Delta y_p} \quad (2.16)$$

จาก Velocity profile ในรูปที่ 2.11 ถ้าให้ค่า u_p คือค่าความเร็วที่ Node ซึ่งเป็นการประมาณค่าที่พิจารณาบริเวณใกล้ผิว และให้ค่าความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงเป็นความสัมพันธ์เส้นตรงเมื่อเทียบกับระยะทาง จะได้แรงเฉือนมีค่าเป็น

$$\begin{aligned}
 F_S &= -\tau_w A_{cell} \\
 &= -\mu \frac{u_p}{\Delta y_p} A_{cell}
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

โดยที่ A_{cell} คือพื้นที่ผนังของปริมาตรควบคุม ดังนั้นสามารถใส่เทอมของแรงเฉือนนี้เข้าไปใน Source term ของ u และสามารถเขียน Source term นี้ได้เป็น

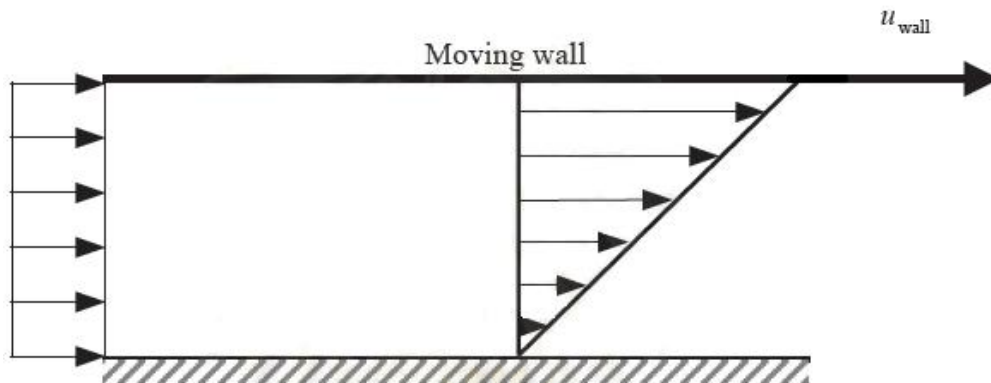
$$S_p = -\frac{\mu}{\Delta y_p} A_{cell} \tag{2.18}$$



รูปที่ 2.11 การกระจายตัวของความเร็วที่ผนัง (Patankar, S. V., 1980)

เงื่อนไขขอบสำหรับผนังที่มีการเคลื่อนที่ ถ้าสมมติให้ผนังที่มีการเคลื่อนที่ (Moving walls) นี้ มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน x (รูปที่ 2.12) จะทำให้ของไหลมีการเคลื่อนที่เนื่องจากความเค้นเฉือนที่ผนัง ซึ่งค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นนั้นมาจากความแตกต่างระหว่างความเร็วที่ Node ในแนวแกน y ก่อนถึงผนัง กับความเร็วของผนังเคลื่อนที่ ดังนี้

$$F_s = -\mu \frac{(u_p - u_{wall})}{\Delta y_p} A_{cell} \tag{2.19}$$



รูปที่ 2.12 ลักษณะของผนังเคลื่อนที่ (Patankar, S. V., 1980)

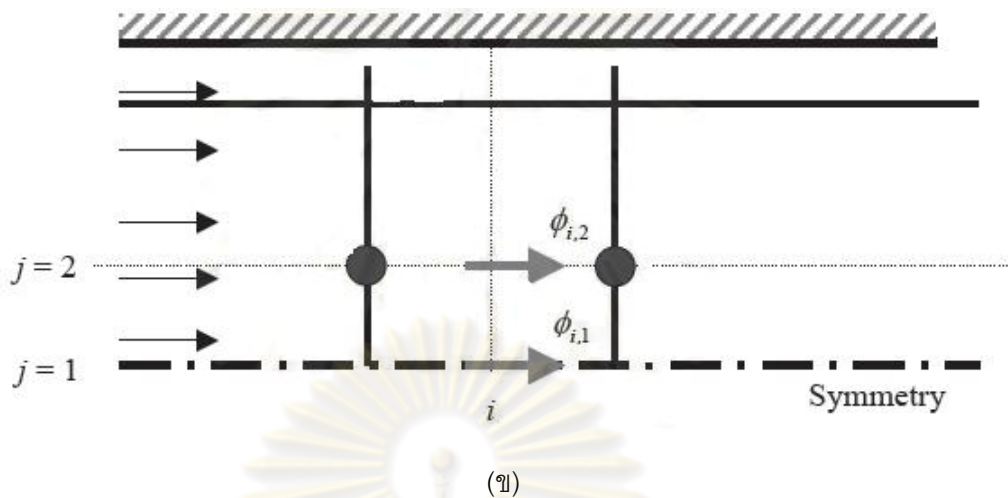
2.4.2.2 เงื่อนไขขอบแบบสมมาตร (Symmetric boundary condition)

ในการแก้ไขปัญหาที่มีลักษณะรูปร่างสมมาตร การคำนวณโดยใช้โดเมนทั้งหมดจะทำให้สิ้นเปลืองหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์โดยใช่เหตุ การกำหนดเงื่อนไขที่สมมาตรจะช่วยให้ทำการคำนวณได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งการกำหนดขอบเขตแบบนี้สามารถทำได้โดยกำหนดเงื่อนไขที่ไม่มี การไหลและไม่มีฟลักซ์ผ่านขอบเขต นั่นคือกำหนดค่าความเร็วในแนวตั้งฉากกับขอบเขตที่ สมมาตรให้มีค่าเป็นศูนย์ ($v = 0$) และให้ค่าของตัวแปรบนขอบผนังมีค่าเท่ากับตัวแปรนั้นบน Cell ที่ติดขึ้นมาจากผนัง ($\phi_{i,1} = \phi_{i,2}$) ดังแสดงในรูปที่ 2.13

ผลเฉลยที่ได้จากการใช้เงื่อนไขสมมาตรจะมีค่าเท่ากับผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณ ทั้งหมด นอกจากนี้การใช้เงื่อนไขสมมาตร ยังทำให้สามารถเพิ่มความละเอียดในการคำนวณ เพิ่มขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เป็นการใช้น้ำหนักหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นนั่นเอง



(ก)



รูปที่ 2.13 ก) ช่องการไหลที่สมมาตร ข) โดเมนของช่องการไหลที่ใช้เงื่อนไขสมมาตรแล้ว
(Patankar, S. V., 1980)

2.5 เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam Production) (จรัส จิรวินุญย์, 2553)

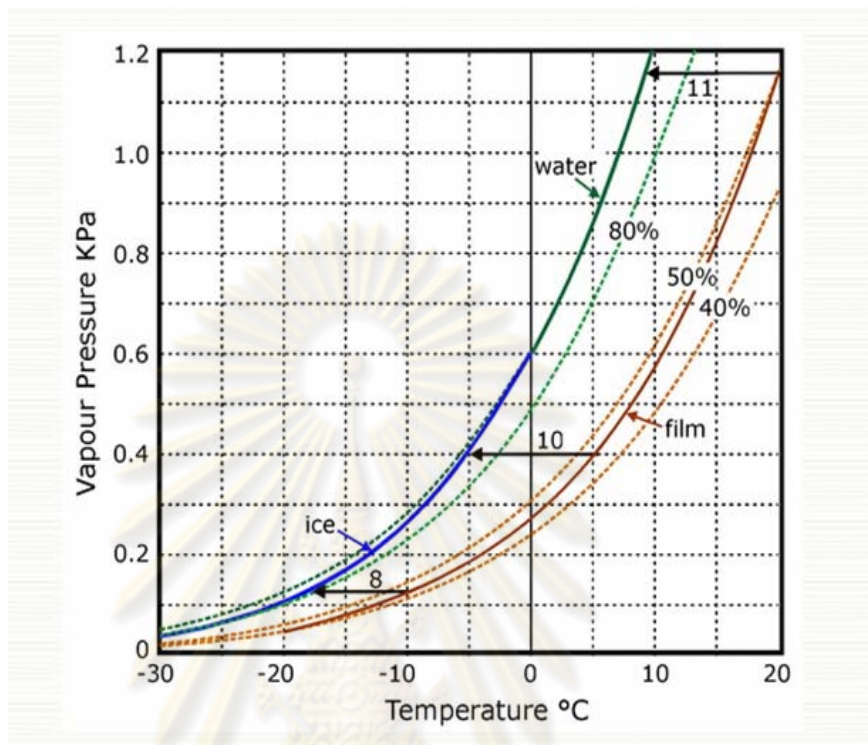
2.5.1 บอยเลอร์ (Boiler) หรือ หม้อไอน้ำ หมายถึง เครื่องกำเนิดไอน้ำชนิดภาชนะปิด ทำด้วยเหล็กกล้าหรือวัสดุอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติคล้ายกัน ซึ่งได้รับการออกแบบและสร้างอย่างแข็งแรงถูกต้องตามหลักเกณฑ์ทางวิศวกรรม ภายในภาชนะบรรจุน้ำและไอน้ำ

2.5.2 ระบบไอน้ำ (Steam System)

การเกิดขึ้นของไอน้ำ (Raising Steam) การเปลี่ยนสถานะของน้ำให้กลายเป็นไอน้ำ อุณหภูมิของน้ำจะต้องเพิ่มขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำ (อุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัว = Saturation Temperature) โดยใช้ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) เมื่อเพิ่มความร้อนต่อไปอุณหภูมิจะคงที่ ในช่วงนี้คือความร้อนแฝง (Latent Heat) น้ำจะเกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำ การต้มน้ำที่ความดันบรรยากาศ ความร้อนสัมผัส 419 กิโลจูล/กิโลกรัม จะใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจากจุดเยือกแข็ง (Freezing Point = 0 องศาเซลเซียส) จนถึงจุดเดือดของน้ำ (100 องศาเซลเซียส) ถ้าต้องการเปลี่ยนน้ำ 1 กิโลกรัม ให้เป็นไอน้ำต้องใช้ความร้อนประมาณ 2,258 กิโลจูล

เมื่อความดันเพิ่มขึ้นน้ำจะไม่เดือดที่ 100 องศาเซลเซียส แต่จะเดือดที่อุณหภูมิที่สูงกว่านี้ ดังรูปที่ 2.14 ปริมาณความร้อนทั้งหมดของไอน้ำเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับความดัน สำหรับ

คุณสมบัติของจุดเดือดที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อความดันเพิ่มขึ้นก็ต้องสัมพันธ์กับกระบวนการผลิต ด้วย ค่าความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของไอน้ำแต่ละความดันที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอกับจุดเดือดของน้ำ
(ที่มา: www.promma.ac.th)

2.5.3 ประเภทของบอยเลอร์ (หม้อไอน้ำ)

การเลือกชนิดของหม้อไอน้ำ อุปกรณ์ทั่วไปของหม้อไอน้ำทุกประเภทประกอบไปด้วยห้องเผาไหม้ (Furnace Chamber) ซึ่งความร้อนจะถูกถ่ายเทโดยตรงจากเปลวไฟโดยการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ส่วนแก๊สไอเสีย (Flue Gas) จะถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection) ไปยังส่วนต่าง ๆ ความร้อน 2 ใน 3 ส่วนจะเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นในห้องเผาไหม้ และส่วนที่เหลือเกิดขึ้นจากการพาความร้อนของแก๊สไอเสีย

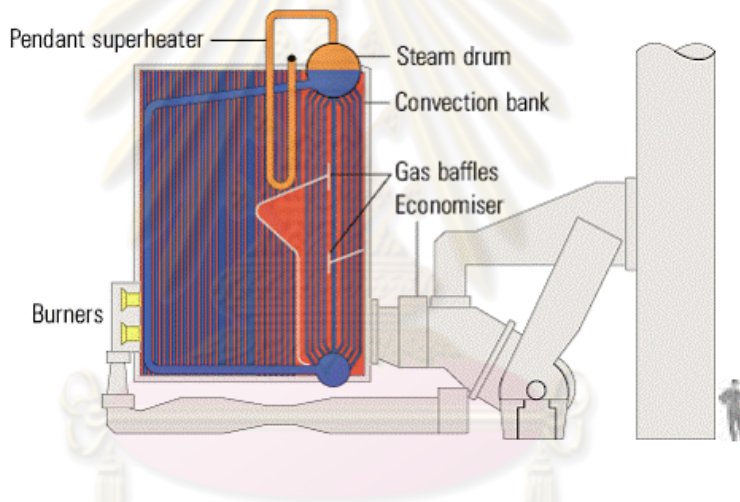
ประเภทของหม้อไอน้ำที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท คือ ประเภทท่อน้ำ (Water Tube Type) ซึ่งจะมีน้ำอยู่ในท่อและที่ใส่แก๊สในการเผาไหม้ให้เกิดความร้อนอยู่รอบ ๆ ท่อเหล่านั้น และอีกประเภทก็คือแบบเปลือกหรือท่อไฟ (Shell or Fire Tube) ซึ่งตรงกันข้ามกับประเภทแรก หม้อไอน้ำรุ่นต่อมา ทั้งหมดได้มีการพัฒนาสืบเนื่องมาจากหม้อไอน้ำทั้ง 2 ชนิดนี้ แต่ออกแบบให้แตกต่างกันออกไปเพื่อให้มีขนาดที่ต่างกันออกไป หรือข้อจำกัดในการใช้งานที่สำคัญมากขึ้น หรือความ

ต้องการในการปฏิบัติการของหม้อไอน้ำแตกต่างกัน หากจะแบ่งรูปแบบของหม้อไอน้ำจะสามารถแบ่งได้ ดังนี้

2.5.3.1 หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (Water Tube Boilers)

หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (Water Tube Boilers) เป็นหม้อไอน้ำที่มีท่อจำนวนมากเชื่อมต่อระหว่างหม้อไอ (Steam Drum) กับ หม้อน้ำล่าง (Mud Drum) โดยใช้หลักการปล่อยน้ำวิ่งอยู่ในท่อ แล้วปล่อยเปลวไฟให้สัมผัสกับท่อ เพื่อถ่ายเทความร้อนไปสู่ให้น้ำกลายเป็นไอ

หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำจะผลิตไอน้ำโดยมีค่าเริ่มต้นที่ประมาณ 8.5 เมกกะวัตต์ และสามารถเพิ่มกำลังผลิตของหม้อไอน้ำได้ถึงขนาดที่โรงไฟฟ้าใช้ ซึ่งมีอัตราการผลิต 2,000 เมกกะวัตต์หรือมากกว่า ภาพตัวอย่างของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำแสดงได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ภาพตัวอย่างของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ

(ที่มา: www.kmutt.ac.th)

หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำในสมัยก่อนจะใช้การหมุนเวียนของน้ำที่เกิดขึ้นจาก เทอร์มอลไซฟอน (Thermal Siphons) คือ น้ำร้อนในหม้อไอน้ำที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าลอยตัวสูงขึ้น ทำให้น้ำที่เย็นที่มีความหนาแน่นมากกว่าที่อยู่ด้านล่างไหลเข้าไปแทนที่ จะปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้การออกแบบหม้อไอน้ำจะใช้ท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก เพื่อให้สามารถสูบน้ำที่ป้อนเข้าไปให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำในหม้อไอน้ำ

ข้อดีของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ คือ กำลังการผลิตอยู่ในช่วง 10-20 เมกกะวัตต์ สามารถที่จะรับการเปลี่ยนแปลงภาระงานอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้เปรียบหม้อไอน้ำแบบท่อ

ไฟ หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำจะมีน้ำบรรจุภายในเป็นส่วนน้อย ดังนั้นความล่าช้าในการให้ความร้อนที่มีต่อระบบก็จะน้อยกว่าในหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ

ข้อเสียของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ คือ บำรุงรักษายากกว่า เนื่องจากหม้อไอน้ำมีท่อจำนวนมากเรียงซ้อนกันเป็นแถวหลายแถว ถ้าท่อน้ำท่อใดท่อหนึ่งของหม้อน้ำเกิดชำรุดและเป็นท่อที่อยู่แถวด้านในการจะเข้าไปเปลี่ยนหรือซ่อมจะต้องตัดท่อน้ำแถวนอกๆ ที่บังออกเสียก่อนจึงจะเข้าไปซ่อมท่อที่อยู่แถวในได้ ซึ่งเป็นการซ่อมแซมที่ไม่คุ้มค่า

หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำสามารถเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงเผาไหม้แบบเก่าได้ หรือสามารถทำงานได้เหมือนกับหม้อไอน้ำรุ่นใหม่ที่ใช้เชื้อเพลิงหลาย ๆ ชนิดได้

2.5.3.2 หม้อไอน้ำแบบถังท่อไฟ (Fire tube Shell Boilers)

หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (Fire tube Shell Boilers) เป็นหม้อไอน้ำรุ่นแรก ๆ ที่สร้างขึ้นใช้ในรถไฟ และเรือ มีขีดจำกัดที่ขนาดใหญ่พอจะเทียบกับการผลิต และความดันไอน้ำที่ผลิตได้ต่ำ แต่มีข้อเด่นที่ปฏิบัติการง่าย ไม่ต้องใช้ความชำนาญการใด ๆ อีกทั้งโอกาสระเบิดน้อยกว่าแบบท่อน้ำ

หลักการ ความร้อนจากปลุกแก๊สที่ไหลอยู่ภายในท่อชั้นใน ถ่ายโอนให้แก่ น้ำที่อยู่ล้อมรอบท่อ น้ำและไอน้ำอยู่ภายในเปลือกของตัวหม้อไอน้ำ เป็นแบบที่สร้างง่ายและแข็งแรงทนทาน มีประสิทธิภาพสูง และราคาถูกกว่าแบบท่อน้ำ

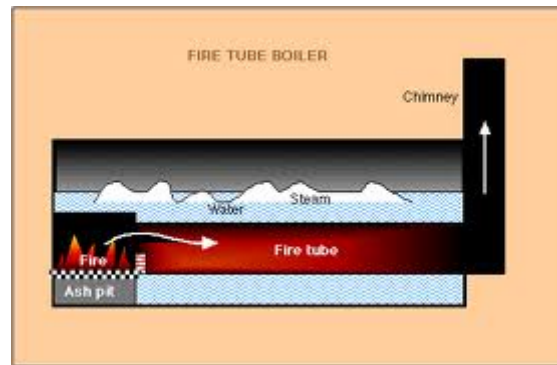
หลักการออกแบบเช่นเดียวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อสวมกันสองชั้น (Shell and tube heat exchanger) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ

1. หม้อไอน้ำแบบคอร์นิช และแลงแคเชอร์ (Cornish and Lancashire boiler)
2. หม้อไอน้ำแบบประหยัด (The economic boiler)
3. หม้อไอน้ำแบบท่อไฟสำเร็จรูป (The package fire –tube boiler)

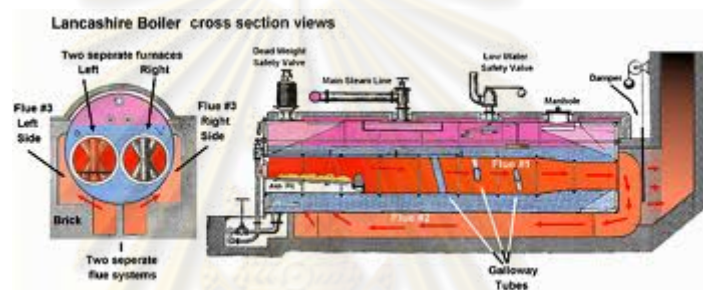
หม้อไอน้ำแบบคอร์นิช และแลงแคเชอร์ (Cornish and Lancashire boiler)

จัดเป็นหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ ซึ่งยังคงมีการใช้งานอยู่จนปัจจุบัน ชนิดคอร์นิชมีท่อไฟเดี่ยว และชนิดแลงแคเชอร์มีท่อไฟคู่ ดังรูปที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ

เดิมออกแบบให้ด้านหน้าติดตั้งเตาเผาถ่านหินชนิดตะกรับ ซึ่งอาจป้อนถ่านหินด้วยแรงคน หรือเครื่องกล และใช้ได้ทั้งกระแสลมเร่งธรรมชาติหรือบังคับ ต่อมาดัดแปลงติดตั้งหัวเผาเชื้อเพลิงเหลวหรือแก๊สด้วย โดยใช้กระแสลมเร่งบังคับ ชนิดแลงแคเชอร์ปรับปรุงจากชนิดคอร์นิช โดยเพิ่มท่อชั้นในเป็นสองท่อ ทำให้พื้นที่ผิวถ่ายโอนความร้อนมากขึ้น การออกแบบทั่วไปกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ตะกรับต่อพื้นที่ถ่ายโอนความร้อน ประมาณ 1:20 ถึง 1:30



รูปที่ 2.16 ภาพตัวอย่างของหม้อไอน้ำแบบคอร์ริท
(ที่มา: www.bathtram.org)



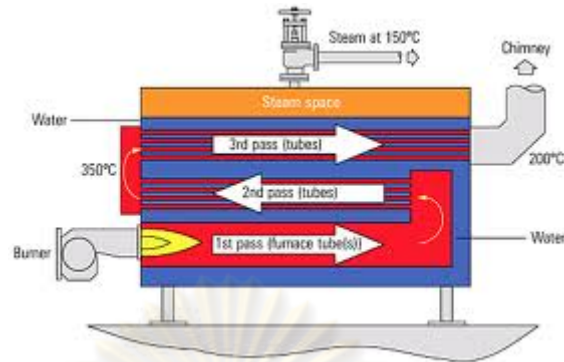
รูปที่ 2.17 ภาพตัวอย่างของหม้อไอน้ำแบบแลงแคเชอร์
(ที่มา: www.twaintimes.net)

ความร้อนถ่ายโอนจากฟลูแก๊สร้อนที่มีโมเมนตัมต่ำ ผ่านผนังท่อซึ่งมีพื้นที่ผิวต่ำ และเป็นการถ่ายโอนความร้อนชนิดแผ่รังสีประมาณร้อยละ 50 - 60 จึงทำให้ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำต่ำ ประมาณร้อยละ 60 และผลิตไอน้ำอึดตัวเท่านั้น เนื่องจากไอน้ำสัมผัสกับน้ำเดือดตลอดเวลา ความดันไอน้ำสูงถึงประมาณ 160 พีเอสไอ แต่ถ้าติดตั้งท่อชุดทำให้ร้อนยวดยิ่ง และชุดอุ่นน้ำป้อน ที่ด้านท้ายหม้อไอน้ำเพิ่มเติมจะผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้ และได้ประสิทธิภาพเพิ่มจนถึงร้อยละ 75

หม้อไอน้ำแบบท่อไฟชนิดประหยัด (The economic boiler)

เนื่องจากหม้อไอน้ำชนิดแลงแคเชอร์ต้องมีสวนโครงสร้างท้ายเตาที่เป็นอิฐก่อ จึงทำให้น้ำหนักมาก และต้องมีการดูแลที่ดี หม้อไอน้ำชนิดประหยัดออกแบบให้ติดตั้งได้โดยไม่ต้องมีส่วนโครงสร้างท้ายเตาดังกล่าว เพราะการเผาไหม้อยู่ภายในเตาเผาทรงกระบอกที่ติดตั้งไว้ภายในท่อไฟ ฟลูแก๊สไหลไปท้ายเตาแล้วไหลกลับมาผ่านท่อเล็ก ๆ

ที่ว่างเรียงอยู่ส่วนบน เรียกว่า ท่อควัน (Smoke tube) แล้วออกทางด้านหน้าเตา ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ภาพตัวอย่างของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟชนิดประหยัด
(ที่มา: www.spiraxsarco.com)

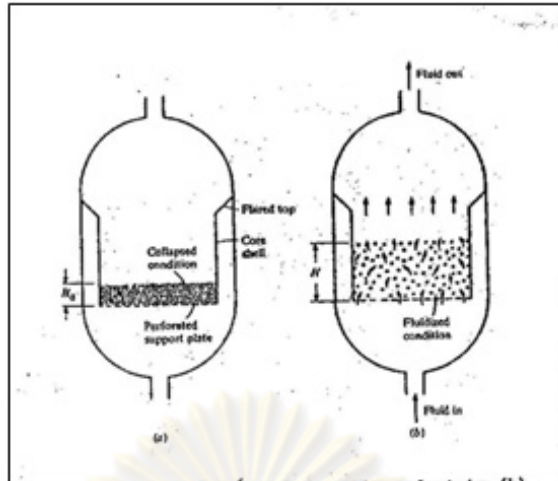
หม้อไอน้ำแบบท่อไฟสำเร็จรูป (The package fire-tube boiler)

คำว่า สำเร็จรูป หมายถึง มีครบทั้งส่วนที่เป็นหม้อไอน้ำและโครงสร้าง ระบบควบคุม ป้อน พัดลม หัวเผา อุปกรณ์จุดไฟนาร่อง และอุปกรณ์วัดและควบคุม ส่วนที่เป็นหม้อไอน้ำ คือหลักการเดียวกับชนิดประหยัดนั่นเอง แต่ไม่มีแบบที่ใช้ถ่านหิน โดยมีให้เลือกทั้งพลุแก๊สผ่านไป – กลับสอง สาม หรือสี่ครั้ง

ประสิทธิภาพสูงกว่าร้อยละ 80 โดยเฉพาะเมื่อใช้น้ำมัน การถ่ายโอนความร้อนเป็นแบบการพาเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอาศัยประสิทธิภาพที่พื้นที่ผิว จึงต้องดูแลคุณภาพน้ำป้อนอย่างดีเพื่อป้องกันการเกิดตะกรัน

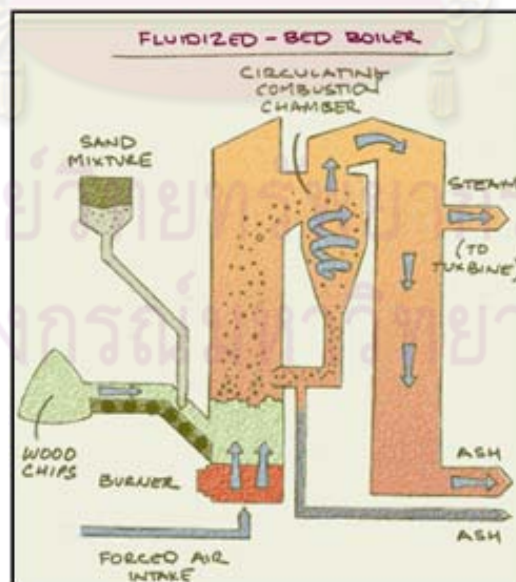
2.5.3.3 หม้อไอน้ำชนิด Circulating Fluidized Bed (CFB)

การเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-Bed Combustion) เป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงขณะลอยตัวและหมุนเวียน โดยมีการแยกเอากำมะถันออกระหว่างการเผาไหม้และการเผาไหม้ ฟลูอิดไดซ์เบดจะประกอบไปด้วยอนุภาคของแข็งอยู่ในสภาวะผสมเข้ากับของไหลที่ไหลผ่านตัวมันด้วยความเร็วสูงพอที่จะทำให้อนุภาคแยกออกจากกันและสามารถลอยตัวอยู่ได้ด้วยของไหลนั้นดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด (a) Collapsed (b) Fluidized State
(ที่มา: www.thailandindustry.com)

ในการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดเชื้อเพลิงขนาดเล็กจะถูกป้อนเข้าสู่เบดเหนือตะแกรง (Air Distribution Grid) อากาศจะถูกเป่าเข้าสู่ด้านล่างตะแกรง ทำให้เชื้อเพลิงลอยขึ้นมาและทำการเผาไหม้ในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้จะมีคาร์บอนส่วนที่ยังเผาไหม้ไม่หมดปนออกไปจะถูกแยกโดยเครื่องแยกแบบไซโคลนและส่งกลับมายังเบดเพื่อเผาไหม้ต่อให้สมบูรณ์ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 หม้อไอน้ำชนิด Circulating Fluidized Bed (CFB)
(ที่มา: www.thailandindustry.com)

ข้อดีที่สำคัญของการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดก็คือ การเผาไหม้จะมีการแยกเอาซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งมักจะเกิดในการเผาไหม้ทั่วไปและเป็นก๊าซพิษออกได้ การลดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำได้โดยการเติมหินปูนเข้าไปกับเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหินโดยตรง หินปูนจะประกอบไปด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และในบางครั้งก็มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ซึ่งจะทำหน้าที่ร่วมกับอากาศส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ดูดซับซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ส่วนหินปูนเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800 - 850 องศาเซลเซียส จะเป็นแคลเซียมมากนั้นจึงทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดเป็นยิปซัม (ที่สัดส่วนที่ใช้ระหว่างแคลเซียม/กำมะถัน เท่ากับ 2 และอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่ 800 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการกำจัดกำมะถันอยู่ที่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์)

ข้อดีอีกอย่างของการเผาไหม้แบบนี้ก็คือเผาไหม้ที่อุณหภูมิไม่สูงมาก ทำให้สามารถใช้โลหะที่มีราคาถูกลงกว่าเป็นอุปกรณ์ได้และมีสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่เกิดจากการเผาไหม้น้อย

ส่วนใหญ่หม้อไอน้ำที่ใช้ในการปฏิบัติกรกับการเผาไหม้ประเภทนี้ จะเป็นประเภทที่มีการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ความดันบรรยากาศ หรือหม้อไอน้ำแบบเผาไหม้เชื้อเพลิงขณะลอยตัวและหมุนเวียน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.21 เหตุผลดังกล่าวนี้ มีความต้องการไม่มากนักก็นำเอาการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดเข้าไปร่วมกับการใช้หม้อไอน้ำแบบถังท่อไฟ ระบบเช่นนี้จะคล้ายกับระบบที่มีการติดตั้งมากับหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ



รูปที่ 2.21 หม้อไอน้ำแบบเผาไหม้เชื้อเพลิงขณะลอยตัวและหมุนเวียน (CFB)

(ที่มา: www.thailandindustry.com)

การติดตั้งระบบในปัจจุบันจะเป็นประเภทของการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบใช้ความดัน ซึ่งจะรวมการใช้แก๊สไอเสียที่ร้อนเพื่อเป็นแรงขับเคลื่อนให้กังหันแก๊สไอน้ำที่ผลิตออกมาจากท่อที่พ่วงกัน 2 ท่อ ท่อหนึ่งอยู่ในเบด อีกท่ออยู่บนเบด การเพิ่มหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนตพร้อมกับการป้อนถ่านหินด้วย ก็จะเป็นการช่วยกำจัดกำมะถัน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นที่กังหันแก๊สด้วย ทว่าไปแล้วระบบประเภทนี้ที่เกิดขึ้นใหม่ ๆ สามารถนำไปใช้ได้ในการผลิตที่มีขนาดใหญ่ ใช้ได้ทั้งการผลิตกระแสไฟฟ้าและการผลิตไอน้ำเพื่อที่จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงที่สุด

2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์ (2548) ได้ทดลองเผาไหม้ถ่านหินผสมแกลบโดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน พบว่า อุณหภูมิการเผาไหม้ในโรเตอร์ของฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนจะค่อนข้างคงที่ตลอดโรเตอร์อยู่ในช่วงประมาณ 800 – 1,000 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการป้อนอากาศรวมเท่ากัน (อากาศปฐมภูมิรวมกับอากาศทุติยภูมิ) อุณหภูมิในโรเตอร์จะสูงกว่าเมื่อมีการแบ่งอากาศไปป้อนในตำแหน่งอากาศทุติยภูมิที่สูงกว่า ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะสูงมากบริเวณส่วนล่างของโรเตอร์ซึ่งมีการ devolatilize ของเชื้อเพลิงและจะลดลงอย่างรวดเร็วบริเวณตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิซึ่งจะช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น ปริมาณแก๊สออกซิเจนจะลดลงตลอดความสูงโรเตอร์ ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นตลอดความสูงโรเตอร์ ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นตลอดความสูงโรเตอร์อยู่ในช่วงไม่เกิน 400 – 600 ส่วนในล้านส่วน ปริมาณแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (ไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์) ค่อนข้างจะคงที่ตลอดโรเตอร์อยู่ในช่วงไม่เกิน 100 และ 10 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ อุณหภูมิตลอดโร

ปิยะพันธ์ จะกอ (2548) ได้ทดลองเผาไหม้ถ่านหินผสมแกลบโดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน พบว่า สามารถผสมแกลบกับถ่านหินได้มากที่สุดที่ร้อยละ 13.11 โดยน้ำหนักเนื่องจากข้อจำกัดของระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง จากการทดลองที่อัตราส่วนผสมของแกลบที่ 23.19 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก จะเกิดการไหม้ของเชื้อเพลิงย้อนเข้าไปในถังบรรจุเชื้อเพลิง ปริมาณแกลบที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิส่วนล่างของท่อโรเตอร์สูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณแกลบมีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (ไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์) เพิ่มขึ้น ในขณะที่แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง เนื่องจากแกลบมีปริมาณไนโตรเจนมากกว่าถ่านหิน และแกลบมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและซัลเฟอร์น้อยกว่าถ่านหิน

เซอร์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณแกลบที่เพิ่มขึ้น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงเมื่ออัตราส่วนของแกลบที่ป้อนมีมากขึ้น

คัสตินีย์ กำธนาทรัพย์ (2548) ได้ศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยมีตัวแปรที่ใช้ศึกษา คือ ความเร็วอากาศ ตำแหน่งตามแนวรัศมีและตามความสูงของโรเตอร์และชีวมวลที่นำมาผสม โดยใช้ความเร็วของอากาศ 7 , 8 และ 9 เมตรต่อวินาที ใช้เม็ดแก้วเป็นเบดและผสมแกลบในสัดส่วนร้อยละ 20 จากการศึกษาเบดที่เป็นเม็ดแก้วอย่างเดียว พบว่าที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที มีปริมาณของแข็งสะสมอยู่ภายในโรเตอร์เป็นจำนวนมากตลอดช่วงความสูงของโรเตอร์ และที่ส่วนบนของโรเตอร์ใกล้กับทางออกของของแข็ง ค่าสัดส่วนช่องว่างมีค่าน้อยลง เป็นผลจากบริเวณทางออกของโรเตอร์ทำมุมกับทางเข้าของไซโคลนแบบ 90 องศา จึงทำให้เม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นกระทบกับส่วนปลายของโรเตอร์ซึ่งเป็นท่อตันแล้วตกกลับมาที่ส่วนล่างอีกครั้ง ที่ความเร็วอากาศ 8 และ 9 เมตรต่อวินาที ส่วนของเบดหนาแน่นทางด้านล่างของโรเตอร์ลดลง และสัดส่วนช่องว่างมีค่าใกล้เคียงกันตลอดความสูงของโรเตอร์ ประมาณ 0.99 และผลกระทบของทางออกต่อสัดส่วนช่องว่างจะมีน้อยมากเมื่อความเร็วอากาศที่ใช้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณของเม็ดแก้วในโรเตอร์มีน้อยลง ที่ความเร็วอากาศต่างๆ พบว่าเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น ร้อยละของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลงมีน้อยลง แต่ร้อยละของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นมีมากขึ้น โดยที่ความเร็วอากาศ 7 และ 8 เมตรต่อวินาที เกิดรูปแบบการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้ว เป็นแบบคอร์-แอนนูลัส คือของแข็งส่วนใหญ่ที่บริเวณกึ่งกลางคอลัมน์มีความเร็วสูงและเคลื่อนที่ขึ้น เรียกส่วนนี้ว่า คอร์ ในขณะที่บริเวณผนังของแข็งส่วนใหญ่เคลื่อนที่ลง เรียกส่วนนี้ว่า แอนนูลัส และเมื่อศึกษาเบดผสม พบว่าที่บริเวณด้านบนสัดส่วนช่องว่างมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 0.99 ที่ทุกความเร็วอากาศและไม่มีผลกระทบจากลักษณะทางออกของโรเตอร์ อาจเนื่องมาจาก ในระบบที่วัสดุเบดเป็นของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบมีอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งน้อยกว่าเมื่อใช้วัสดุเบดเป็นเม็ดแก้วอย่างเดียว จึงทำให้ภายในโรเตอร์มีปริมาณของของแข็งน้อยลง และมีแกลบที่เบาเคลื่อนที่ได้ง่ายมาช่วยในการพาเม็ดแก้วออกไปจากโรเตอร์ได้ง่ายขึ้น และพบว่าความหนาแน่นของของแข็งมีผลต่อความเร็วของเบดน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของขนาดของของแข็ง โดยความเร็วของเม็ดแก้วที่อยู่ในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบน้อยกว่าความเร็วของระบบที่มีเม็ดแก้วเป็นวัสดุเบดเพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะที่บริเวณส่วนล่างของโรเตอร์มีความแตกต่างของความเร็วของเม็ดแก้วค่อนข้างมาก

Benyahia, S. และคณะ (2000) ได้สร้างแบบจำลองการไหลของอนุภาคของแข็งและแก๊สของฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยใช้ทฤษฎีจลน์สำหรับวิภาคของแข็ง โดยใช้โปรแกรม Fluent อนุภาคของแข็งที่ใช้ FCC (Fluid catalytic cracking) ส่วนแก๊สที่ใช้คือ อากาศ แบบจำลองที่ใช้เป็นการไหลแบบ 2 มิติ ภาวะไม่คงตัว และอุณหภูมิคงที่ สมการอนุรักษมวลและโมเมนตัมของแต่

ละวัฏภาคแก้โดยเทคนิค Finite Volume ซึ่งจะแก้สมการของแต่ละวัฏภาคแยกกันแต่วัฏภาคของแข็งกับวัฏภาคแก๊สจะมีความสัมพันธ์กันโดยใช้สมการของแรงต้านการเคลื่อนที่ ในการทดลองได้ทำการศึกษารูปแบบความเร็ว พลั๊กซ์ของแข็ง ความดัน และพารามิเตอร์ของความปั่นป่วนของแต่ละวัฏภาค ผลการคำนวณพบว่า พลั๊กซ์ของแข็ง และความดันลดภายในโรเตอร์สอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ผลการคำนวณให้ค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (Solid Density) บริเวณผนังเบี่ยงเบนไปมากเมื่อเทียบกับการทดลอง

Eskin, N. และคณะ (2009) ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อประสิทธิภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ของโรงไฟฟ้าไอน้ำ (FBCC) ที่มีกำลังผลิตเท่ากับ 7.7 เมกะวัตต์ โดยตัวแปรที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองได้แก่ ปริมาณอากาศเกินพอ ชนิดของถ่านหิน และความดันไอน้ำ ซึ่งจะใช้กฎข้อที่หนึ่ง และข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ในการอ้างอิง โดยโรงไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย FBCC ความร้อนที่สูญเสียจากเตา (WHB) และระบบสนับสนุนต่างๆ เช่น ระบบท่อ พัดลม ไซโคลน และปล่องควัน จากการศึกษาพบว่าผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลการทำงาน of โรงไฟฟ้า นอกจากนี้พบว่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่ง และข้อที่สองของระบบมีค่าลดลงเท่ากับร้อยละ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ เมื่อปริมาณอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 เป็น 70 ในขณะที่เมื่อเพิ่มความดันไอน้ำจาก 4 บาร์ เป็น 12 บาร์ พบว่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลงร้อยละ 2.1 แต่ประสิทธิภาพเชิงเอ็กเซอร์จีของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 19.9 และจากการคำนวณค่าความสามารถในการผันกลับไม่ได้ที่เกิดขึ้นในบริเวณต่างๆ ของระบบโดยใช้แบบจำลอง พบว่าในส่วนของ FBCC จะมีค่าดังกล่าวมากที่สุดหรือมีค่าเท่ากับร้อยละ 80.4 ของค่าความสามารถในการผันกลับไม่ได้ทั้งหมดภายในโรงไฟฟ้า ซึ่งส่วนมากจะเกิดจากกระบวนการเผาที่ผันกลับไม่ได้ อีกทั้งพบว่าชนิดของถ่านหินไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สอง

Fang, M และ คณะ (2004) ศึกษาการนำกลับมาเผาไหม้ในเตาฟลูอิดไธด์แบบหมุนเวียน จากการทดลองใช้แก๊สในระบบ cold model ของฟลูอิดไธด์แบบหมุนเวียนพบว่า การทำให้แก๊สเกิดการฟลูอิดไธด์ทำได้ยากแต่สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ทรายและถ่านหินเป็นตัวช่วยให้เกิดการฟลูอิดไธด์ ดังนั้นในการเผาไหม้จริงสำหรับการทดลองนี้จึงศึกษาผลของขนาดทราย ความเร็วของอากาศ โดยขนาดของทรายที่เหมาะสมที่ทำให้การผสมได้ดีอยู่ในช่วง 0.3 – 0.8 มิลลิเมตร (เฉลี่ย 0.55 มม.) ความเร็วของอากาศ 0.8 – 2 เมตรต่อวินาที อัตราการป้อนแก๊ส 20-40 กิโลกรัม/ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิในการเผาไหม้ 750-850 องศาเซลเซียส โดยเริ่มเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส (ignition temperature) เนื่องจากแก๊สมีสารระเหยง่ายอยู่มาก ดังนั้นการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะเกิดในบริเวณ Freeboard และการแบ่งอากาศเป็นสองส่วนจะช่วย

เพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยความเร็วอากาศที่เหมาะสม 1.2 เมตรต่อวินาทีโดยแบ่งเป็นร้อยละ 70 สำหรับอากาศปฐมภูมิและร้อยละ 30 สำหรับอากาศทุติยภูมิ

Ghaini, W.A.W.A.K. และคณะ (2009) ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อพลังงานที่ผลิตได้จากเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์ที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินเดี่ยวและการเผาพร้อมกับวัสดุทางการเกษตรเหลือใช้ (แกลบ และกะลาปาล์ม) โดยทำการศึกษาถึงปริมาณอากาศเกินพอ ประสิทธิภาพการเผา การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และความเร็วที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์ พบว่าปริมาณอากาศเกินพอที่เหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาพร้อมคือร้อยละ 50 โดยปกติการเผาเดี่ยวของแกลบ และกะลาปาล์มจะให้ประสิทธิภาพร้อยละ 60 – 80 ในขณะที่เมื่อทำการเผาพร้อมกับถ่านหินพบว่าจะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 20 นอกจากนี้ยังสามารถลดปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมาในระดับที่ต่ำกว่า 2500 ppm และความเร็วที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์มีผลโดยตรงต่อการเผาไหม้ เนื่องจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรมีความหนาแน่นน้อยกว่าถ่านหินจึงทำให้เกิดการเผาในบริเวณเตาเผาที่ตำแหน่งสูงส่งผลให้อุณหภูมิเตาเผาสม่ำเสมอว่าการเผาเดี่ยว

Gomez, L. C. และ Milioli, F. E. (2003) ทำการศึกษาตัวแปรเชิงตัวเลขที่มีอิทธิพลทางกายภาพต่ออุทกพลศาสตร์ของสองวัฏภาคคือ แก๊สและของแข็งในโรเตอร์ของฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียน การจำลองภาวะในงานวิจัยนี้ใช้ MICEFLOW code สำหรับการจำลองภาวะของระบบการไหล เพื่อศึกษาผลตัวแปรต่างๆ อันได้แก่ ความเร็วของแก๊ส และของแข็งที่ความหนืดคงที่ สัดส่วนปริมาตรของอนุภาคของแข็ง โดยใช้แบบจำลองอุทกพลศาสตร์แบบ B ของสถาบันเทคโนโลยีอิลลินอยด์ (IIT) จากผลการจำลองพบว่า ความหนืดมีผลต่อความเร็วของทั้งวัฏภาคแก๊สและของแข็ง ซึ่งที่ความหนืดของแข็งมาก บริเวณกึ่งกลางของโรเตอร์จะมีความเร็วแก๊สและของแข็งต่ำกว่าที่ความหนืดของแข็งน้อย และจะมีค่าลดลงไปตามแนวรัศมี ซึ่งผลการคำนวณที่ได้เป็นไปในแนวทางเดียวกับผลการทดลอง

Gungor, A. (2008) ศึกษาการวิเคราะห์ ออกแบบและศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผา ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ปลดปล่อยและอุณหภูมิของเบดในเตาเผาฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง (CFB coal combustors) พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนอากาศเกินพอ (Excess air ratio) จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาในสองทาง ทางแรกคือการเพิ่มอากาศมากเกินไปจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาการเผา ทำให้อุณหภูมิเบดลดลง ทางที่สองคือเมื่ออุณหภูมิเบดลดลงจะทำให้การเผาของคาร์บอนลดลงซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาลดลง ในขณะที่การเพิ่มความเร็วเบดจะส่งผลต่อเวลาที่ถ่านหินอยู่ในเตาเผาที่ลดลงซึ่งส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์เพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิเบดลดลง และประสิทธิภาพการเผาสูงขึ้น นอกจากนี้ในการศึกษานาอดอนุภาคพบว่าอนุภาคนาอดใหญ่จะมีเวลาในเตานานขึ้นส่งผลให้

ประสิทธิภาพการเผาสูง และเมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนถ่านหินให้สูงขึ้นพบว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง อุณหภูมิเบตสูงขึ้นและประสิทธิภาพการเผาลดลง เมื่อทำการศึกษถึงการออกแบบเตาโดยไม่ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรพบว่าความสูงและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมีผลต่อประสิทธิภาพการเผา โดยความสูงมีผลต่อเวลาของถ่านหินในเตา ขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีผลต่อการไหลเวียนของเบตในเตาเผา

Gungor, A. (2009) ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนจากเบตไปยังผนังภายในเตาเผาฟลูอิดไอเซชันแบบหมุนเวียน (CFB) โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาคที่ลอยตัวอยู่ในระบบ และอัตราการไหลเวียนของอนุภาคของแข็ง ในการศึกษาจะใช้แบบจำลองที่ผ่านการปรับปรุงกลุ่มของอนุภาคโดยใช้แบบจำลองสองมิติของ CFB ที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นแบบจำลองพื้นฐานในการคำนวณ โดยแบบจำลองจะใช้วิธีการคำนวณแบบอ้างอิงจากอนุภาค และใช้ลักษณะทางไฮโดรไดนามิกส์ร่วมกับการเผา จากนั้นนำผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง จากผลการทดลองพบว่า ค่าคงที่การถ่ายโอนความร้อนจากเบตไปยังผนังมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค และปริมาณของอนุภาคของแข็งที่บริเวณผนังของโรเตอร์อย่างเห็นได้ชัด โดยการใช้อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะให้ค่าคงที่การถ่ายโอนความร้อนที่สูงกว่าการใช้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ค่าคงที่การถ่ายโอนความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของอนุภาคที่ลอยตัวอยู่ในระบบเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่ค่าความหนาแน่นของอนุภาคที่ลอยตัวอยู่ในระบบใดๆ ความเร็วที่บริเวณพื้นผิวจะส่งผลต่อค่าคงที่การถ่ายโอนความร้อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สำหรับแบบจำลองที่ใช้วิธีการคำนวณแบบอ้างอิงจากอนุภาคนั้นสามารถใช้อธิบายกลไกการถ่ายโอนความร้อน โดยเฉพาะในช่วงบนของโรเตอร์ได้เป็นอย่างดี

Purbolaksono, J และคณะ (2009) ศึกษาวิธีการใหม่สำหรับติดตามการทำงานของหม้อไอน้ำชนิดท่อ (Water-tube boiler) ได้แก่ เครื่องสร้างไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheater) ด้วยการคำนวณซ้ำ (Iterative technique) และการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element simulation) เพื่อใช้ในการเตือนภาวะของการล้มเหลวของหม้อไอน้ำชนิดท่อ โดยทำการศึกษารายละเอียดของระดับความหนาของพื้นที่ผิวภายในของท่อต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของท่อ โดยปัจจัยของการถ่ายโอนความร้อนที่ทำการศึกษา ได้แก่ ลักษณะของท่อ อัตราการไหลโดยมวลของไอน้ำ อุณหภูมิของไอน้ำ อุณหภูมิของแก๊สขาออก (Flue gas) และสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient) พบว่าการเพิ่มเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ ความหนาของท่อ อุณหภูมิของแก๊สขาออก และสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จะทำให้อุณหภูมิของท่อ

เพิ่มขึ้น ในขณะที่การลดอัตราการไหลโดยมวลของไอน้ำจะทำให้อุณหภูมิของท่อเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การที่อุณหภูมิของท่อเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดภาวะของการล้นเหลวของท่อมากขึ้น

Velden, M.V.D. และคณะ (2007) ศึกษาการเผาถ่านหินในเตาเผาฟลูอิดไคด์แบบหมุนเวียน โดยเตาเผาสามารถผลิตพลังงานได้สูงสุด 58 เมกกะวัตต์ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอข้อมูลการออกแบบเตาเผา และระบบการเผา รวมถึงการทดสอบในส่วนปฏิบัติการ เพื่อให้สามารถประเมินค่าของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพผู้ทดลองได้เสนอปัจจัยสำคัญสำหรับการออกแบบเตาเผาฟลูอิดไคด์แบบหมุนเวียน ได้แก่ หลักการของการถ่ายโอนความร้อน อัตราการไหลภายในระบบ ความเร็วในการถ่ายโอนมวล ค่าการเปลี่ยนของสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ รวมถึงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาในไรเซอร์และไซโคลนด้วย ซึ่งเวลาในการเกิดปฏิกิริยาในอุปกรณ์ทั้งสองจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการเผาของเชื้อเพลิงได้ นอกจากนี้มีการนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์มาใช้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเผาอีกด้วย จากผลการทดลองพบว่า ร้อยละ 50 ของโลหะนิกเกิลออกไซด์ ถูกปล่อยออกมาหลังจากผ่านไรเซอร์ในครั้งแรก ในส่วนการแยกด้วยไซโคลนพบว่า ไซโคลนมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 90 มิลลิเมตร นอกจากนี้พบว่าเมื่อมีการใช้นิกเกิลออกไซด์จะทำให้อนุภาคขนาดเล็กถูกหมุนเวียนในระบบประมาณ 10 ครั้งหรือมากกว่า ซึ่งจะทำให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของสารตั้งต้นเป็นแก๊สที่สูงขึ้นถึงร้อยละ 93 นอกจากนี้การลดความชื้นในชีวมวลจะเป็นแนวทางในการพัฒนาให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนเพิ่มขึ้น

Werther, J. และ คณะ (2000) ศึกษาวิธีการลดปริมาณของ emission ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาในเตาเผาฟลูอิดไคด์แบบหมุนเวียน โดยเป็นการเผาไหม้ของกากของเสียผสมกับถ่านหินหรือไม้ โดยดูถึงอิทธิพลของลักษณะของการป้อนอากาศเข้าไปยังเตาเผาไหม้ โดยวิธีการป้อนอากาศดังกล่าวคือการแบ่งอากาศเป็น 2 ส่วนคือ primary air และ secondary air โดยให้ primary air เข้าสู่เตาเผาไหม้ทางด้านล่างของเตา (bottom) ส่วน secondary air จะให้เข้าตรงทางด้านขวาออกจาก ไซโคลน เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อีกครั้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าพบว่าวิธีนี้ทำให้ปริมาณ NO_x และ N_2O ลดลงอย่างได้ผล แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังมีประสิทธิภาพไม่มากนักเมื่อใช้กับเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหยสูง ส่วน แก๊ส SO_2 นั้นมีกรรมวิธีอื่นที่เหมาะสมได้ผลดีกว่านั้นคือการเติมหินปูน (lime stone)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แบบจำลองการไหลหลายภาคของแก๊สและของแข็ง

การสร้างแบบจำลองการไหลหลายภาค (Multiphase Flow Model) เช่น ระบบของเหลว-ของเหลว ของเหลว-แก๊ส และแก๊ส-ของแข็ง ในงานวิจัยนี้ใช้แนวคิดแบบออยเลอร์เลียน (Eulerian Approach) ซึ่งสนใจการไหลแบบต่อเนื่อง ไม่ได้ทำการติดตามการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค สำหรับระบบแก๊ส-ของแข็งนั้น จะนำแนวคิดแบบออยเลอร์เลียนมาใช้ได้เมื่อวัฏภาคของแข็งมีสมบัติคล้ายของไหล ดังนั้นจึงได้มีการนำแบบจำลองทฤษฎีจลน์การไหลของแข็ง (Kinetic Theory of Granular Flow: KTGF) มาใช้เพื่อกำหนดค่าความดันและความหนืดใน วัฏภาคของแข็งโดยมีสมมติฐานว่า อนุภาคของแข็งมีพฤติกรรมคล้ายโมเลกุลแก๊ส จากทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (Kinetic Theory of Gas) โดยปกติแต่ละโมเลกุลของแก๊สมีการเคลื่อนที่อย่างไม่มีระเบียบ (Random Motion) ด้วยความเร็วไม่เท่ากันและไม่คงที่ เนื่องจากโมเลกุลอาจจะกระทบผนังปะทะหรือชนกัน ความเร็วจึงเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทุกครั้งที่มีการชนกัน และยังมีการถ่ายโอนโมเมนตัมและเปลี่ยนทิศทาง การเปลี่ยนทิศทางขึ้นอยู่กับลักษณะการชนของโมเลกุล ในสภาพที่แท้จริงนั้นแก๊สย่อมมีโอกาสชนกันหลายลักษณะ และไม่เป็นระเบียบแล้วแต่ทิศทางและความเร็วของการชน แต่ความเร็วเฉลี่ยและพลังงานจลน์ของโมเลกุลทั้งหมดในแก๊สจำนวนหนึ่งนั้นมีความคงที่ตลอดเวลาที่อุดมคติ การชนในลักษณะที่ความเร็วเฉลี่ยและพลังงานจลน์เฉลี่ยคงที่นี้เรียกว่า การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic Collision) แต่สำหรับอนุภาคของแข็งถือว่าการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Collision) เพราะขณะที่ชนนอกจากมีการถ่ายโอนโมเมนตัมให้กันและกันแล้ว ยังมีการสูญเสียทั้งความเร็วและพลังงานจลน์โดยพลังงานจลน์ที่เสียไปจะกลายเป็นความร้อน

การคำนวณลักษณะการไหลโดยทั่วไป จำเป็นต้องแก้สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม พลังงานและสปีชีส์ของระบบแก๊สและของแข็ง เนื่องจากความซับซ้อนของสมการทำให้หาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ได้ยาก เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) จึงถูกนำมาใช้เพื่อเปลี่ยนระบบสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปของระบบสมการพีชคณิต เพื่อหาผลเฉลยเชิงตัวเลข (Numerical Solution) สมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม พลังงาน และสปีชีส์ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้แนวคิดของออยเลอร์เลียน (Gidaspow, D., 1994) ซึ่งทำการแก้ปัญหาในแต่ละวัฏภาคไปพร้อมๆ กันแต่ทำการเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่าง วัฏภาคผ่านทางสมการของแรงต้าน ในสมการอนุรักษ์โมเมนตัม

3.1.1 สมการอนุรักษ์พื้นฐาน (Fluent 6.2.16; User's Guide)

3.1.1.1 สมการอนุรักษ์มวล

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g v_g) = 0 \quad (3.1)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial(\varepsilon_s \rho_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s v_s) = 0 \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_g + \varepsilon_s = 1 \quad (3.3)$$

เมื่อ

ε_s	คือ สัดส่วนของปริมาตรในวัฏภาคของแข็ง
ε_g	คือ สัดส่วนของปริมาตรในวัฏภาคแก๊ส
ρ_s	คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
ρ_g	คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
v_s	คือ ความเร็วของวัฏภาคของแข็ง (เมตรต่อวินาที)
v_g	คือ ความเร็วของวัฏภาคของแก๊ส (เมตรต่อวินาที)
t	คือ เวลา (วินาที)

3.1.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g v_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g v_g v_g) = \nabla \cdot \tau_g - \varepsilon_g \nabla P + \varepsilon_g \rho_g g + \beta(v_g - v_s) \quad (3.4)$$

วิฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial(\varepsilon_s \rho_s v_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s v_s v_s) = \nabla \cdot \tau_s - \varepsilon_s \nabla P_s + \varepsilon_s \rho_s g - \beta(v_g - v_s) \quad (3.5)$$

- เมื่อ τ คือ ความเค้นเทนเซอร์ (Tensor Stress)
 β คือ สัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวิฏภาค (Interphase Drag Coefficient)
 P คือ ความดัน (พาสคัล)
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

สมการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากการแกว่งจากความปั่นป่วน (Turbulent Fluctuating Energy, θ_s)

วิฏภาคของแข็ง

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s \theta_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s v_s \theta_s) \right] = T_s : \nabla v_s + \nabla \cdot (\kappa_s \nabla \theta_s) - \gamma_s - 3\beta \theta_s \quad (3.6)$$

- เมื่อ พจน์ทางซ้ายมือของสมการคืออัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานแกว่งสุทธิ
 พจน์แรกทางขวามือของสมการคือพลังงานแกว่งเนื่องจากความเค้น
 พจน์ที่สองทางขวามือของสมการคือพลังงานแกว่งเนื่องจากการนำ
 พจน์ที่สามทางขวามือของสมการคือพลังงานแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่
 ยึดหยุ่น
 พจน์ที่สี่ทางขวามือของสมการคือพลังงานแกว่งเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่าง
 ของแข็งกับแก๊ส

$$\theta_s = \frac{1}{3} \langle v_s'^2 \rangle \quad (3.7)$$

v_s' คือ ความเร็วที่แปรผันไปจากความเร็วเฉลี่ย (Fluctuating Velocity)

3.1.1.3 สมการอนุรักษ์การไหลและสปีชีส์

แบบจำลองที่ทำการแก้สมการอนุรักษ์การไหลและสปีชีส์นี้จะถูกคำนวณในภูมิภาคแก๊สเท่านั้นดังสมการที่ (3.10)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon Y_i) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon Y_i v) = -\nabla \cdot \varepsilon J_i + \varepsilon R_{i,ho} + R_{i,het} \quad (3.10)$$

เมื่อ $R_{i,ho}$ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีรวมของสมการปฏิกิริยาเคมีแบบเอกพันธ์ของสปีชีส์ i

$R_{i,het}$ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีรวมของสมการปฏิกิริยาเคมีแบบวิวิธพันธุ์ของสปีชีส์ i

Y_i คือ สัดส่วนโดยมวลของแต่ละสปีชีส์ i

J_i คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของสปีชีส์ i

โดยที่ J_i เป็นฟลักซ์ของการแพร่ของสปีชีส์ i ในการไหลแบบราบเรียบคำนวณได้ดังสมการที่ (3.11)

$$J_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i \quad (3.11)$$

เมื่อ $D_{i,m}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับสปีชีส์ i ในของผสม

สมการเสริมที่จะนำไปใช้ในสมการหลักมีดังนี้

ความเค้นเทนเซอร์ของภูมิภาคของแก๊ส

$$T_g = 2\varepsilon_g \mu_g \left[\frac{1}{2} [\nabla \cdot v_g + (\nabla \cdot v_g)^T] - \frac{1}{3} (\nabla \cdot v_g) \mathbf{I} \right] \quad (3.12)$$

เมื่อ \mathbf{I} คือ เทนเซอร์เอกลักษณ์

ความเค้นเทนเซอร์ของภูมิภาคของแข็ง

$$T_s = (\varepsilon_s \mu_b \nabla \cdot v_s - P_s) \mathbf{I} + 2\varepsilon_s \mu_s \left[\frac{1}{2} [\nabla \cdot v_s + (\nabla \cdot v_s)^T] - \frac{1}{3} (\nabla \cdot v_s) \mathbf{I} \right] \quad (3.13)$$

เมื่อ P_s คือ ความดันในภูมิภาคของแข็ง

μ_b คือ ความหนืดรวม (Bulk viscosity)

μ_s คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้น
 ในความเค้นเทนเซอร์ของวัสดุของแข็งจะมีพจน์ของ P_s , μ_b และ μ_s เพิ่มเข้ามาซึ่งใน
 ความเค้นเทนเซอร์ในวัสดุแก๊สไม่มี ตัวแปร P_s , μ_b และ μ_s เป็นฟังก์ชันกับ θ_s

$$P_s = \varepsilon_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s (1+e)\varepsilon_s^2 g_o \theta_s \quad (3.14)$$

$$g_o = \frac{3}{5} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,\max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (3.15)$$

เมื่อ e คือ สัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาคของแข็ง (Restitution Coefficient)

$e = 1$ คือ การชนแบบยืดหยุ่นไม่มีการสูญเสียพลังงาน

$e = 0$ คือ การชนซึ่งจะสูญเสียพลังงานทั้งหมดระหว่างการชน

$0 < e < 1$ คือ การชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งจะสูญเสียพลังงานระหว่างการชน

g_o คือ ฟังก์ชันการกระจายของอนุภาคในแนวรัศมีซึ่งจะมีค่ามาก เมื่อสัดส่วนปริมาตร
 ของแข็ง มีค่าเข้าใกล้สัดส่วนปริมาตรของแข็งขณะที่อัดตัวแน่น ($\varepsilon_{s,\max} = 0.64$)

ความหนืดเนื่องจากความเค้น μ_s

$$\mu_s = \frac{2\mu_{s,dil}}{(1+e)g_o} \left[1 + \frac{4}{5} g_o \varepsilon_s (1+e) \right]^2 + \frac{4}{5} \varepsilon_s \rho_s d_p (1+e) g_o \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.16)$$

$$\mu_{s,dil} = \frac{5\rho_s d_p \sqrt{\theta\pi}}{96} \quad (3.17)$$

ความหนืดรวม (μ_b) เป็นตัววัดความต้านทานต่อการอัดและการขยายตัวของอนุภาค

$$\mu_b = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_p (1+e) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.18)$$

พลังงานกว้างเนื่องจากการนำ (κ_s)

$$\kappa_s = \frac{150\rho_s d_p \sqrt{\theta_s T_s}}{384(1+e)g_o} \left[1 + \frac{6}{5} g_o \varepsilon_s (1+e) \right]^2 + 2\varepsilon_s^2 \rho_s d_p g_o (1+e) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.19)$$

พลังงานแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (γ_s)

$$\gamma_s = 3\varepsilon_s^2 \rho_s g_o \theta_s (1 - e^2) \left[\frac{4}{d_p} \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \right] \quad (3.20)$$

อันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคของแรงต้านการเคลื่อนที่ (Interphase Drag Coefficient)

Wen and Yu;

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g |v_s - v_g|}{d_p} \varepsilon_g^{-2.65} \quad (3.21)$$

โดยที่

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_s} (1 + 0.15 \text{Re}_s^{0.687}); \text{Re}_s = \frac{\rho_g \varepsilon_g |v_g - v_s| d_p}{\mu_g}$$

3.2 การสร้างแบบจำลองการไหลโดยโปรแกรม Ansys และ Fluent

การจำลองการไหลหลายวัฏภาคของแก๊สและของแข็งในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองภาวะการไหลภายในเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB) ที่มีขนาดเดียวกันกับเครื่องในห้องปฏิบัติการจริง โดยจะทำการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตเพื่อจำลองการไหลภายในเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนการสร้างแบบจำลองเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดเป็นการสร้างแบบจำลองกราฟิก เพื่อเป็นตัวแทนเครื่องปฏิกรณ์ตามรูปทรงจริงทางเรขาคณิต โปรแกรม Ansys ทำหน้าที่เดียวกับโปรแกรม Computer Aided Design (CAD) ทั่วไป เพื่อให้ผู้ใช้สามารถสร้างแบบจำลองกราฟิกของอุปกรณ์ที่ต้องการศึกษา เพื่อเป็นตัวกำหนดพื้นที่ที่เกิดกิจกรรมต่างๆ โดยผู้ใช้จะต้องกำหนดค่าขอบเขตต่างๆ เพื่อเป็นค่าตั้งต้นสำหรับการแก้ปัญหาเพื่อหาผลเฉลยต่อไป เมื่อสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตเสร็จแล้ว จากนั้นจะทำการแบ่งปริมาตรของอุปกรณ์เหล่านี้ออกเป็นหน่วยปริมาตรเล็กๆ จำนวนมากที่เชื่อมต่อกันเป็นอุปกรณ์ที่จะศึกษา จากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะถูกส่งเข้าโปรแกรม Fluent เพื่อทำการคำนวณโดยใช้วิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) ในการจำลองสภาวะการไหลต่อไป ดังนั้นเราสามารถแบ่งขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการไหลและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลองเป็น 3 ขั้นตอนคือ

1. การสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่กำหนดพื้นที่และขอบเขตการไหลด้วยโปรแกรม Ansys ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิต (Pre-processing)
2. การส่งแบบจำลองที่ได้จากโปรแกรม Ansys ไปทำการคำนวณภายในโปรแกรม Fluent (Solver Execution)
3. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณแก่สมการสำหรับแบบจำลองการไหล (Post-processing)

โดยในส่วนของการใช้โปรแกรม Ansys นั้นจะมีขั้นตอน 4 ขั้นตอนดังนี้

1. การสร้างรูปทรงแบบจำลอง (Geometry)
2. กำหนดความละเอียดในการคำนวณ (Mesh)
3. กำหนดชนิดของขอบเขต (Boundary types)
4. กำหนดช่วงของขอบเขต (Continuum types)

และในส่วนของโปรแกรม Fluent นั้นแบ่งได้เป็น 6 ขั้นตอนดังนี้

1. เลือกสมการการคำนวณสำหรับแบบจำลอง (Models)
2. เลือกสารที่ใช้ในแบบจำลอง (Materials)
3. กำหนดสมการสมบัติทางการขนส่ง (Transport)
4. กำหนดเงื่อนไขสำหรับขอบเขตที่จะใช้กับแบบจำลอง (Boundary conditions)
5. กำหนดค่าเริ่มต้น (Initialize values)
6. กำหนดจำนวนรอบในการคำนวณซ้ำ (Iterations)

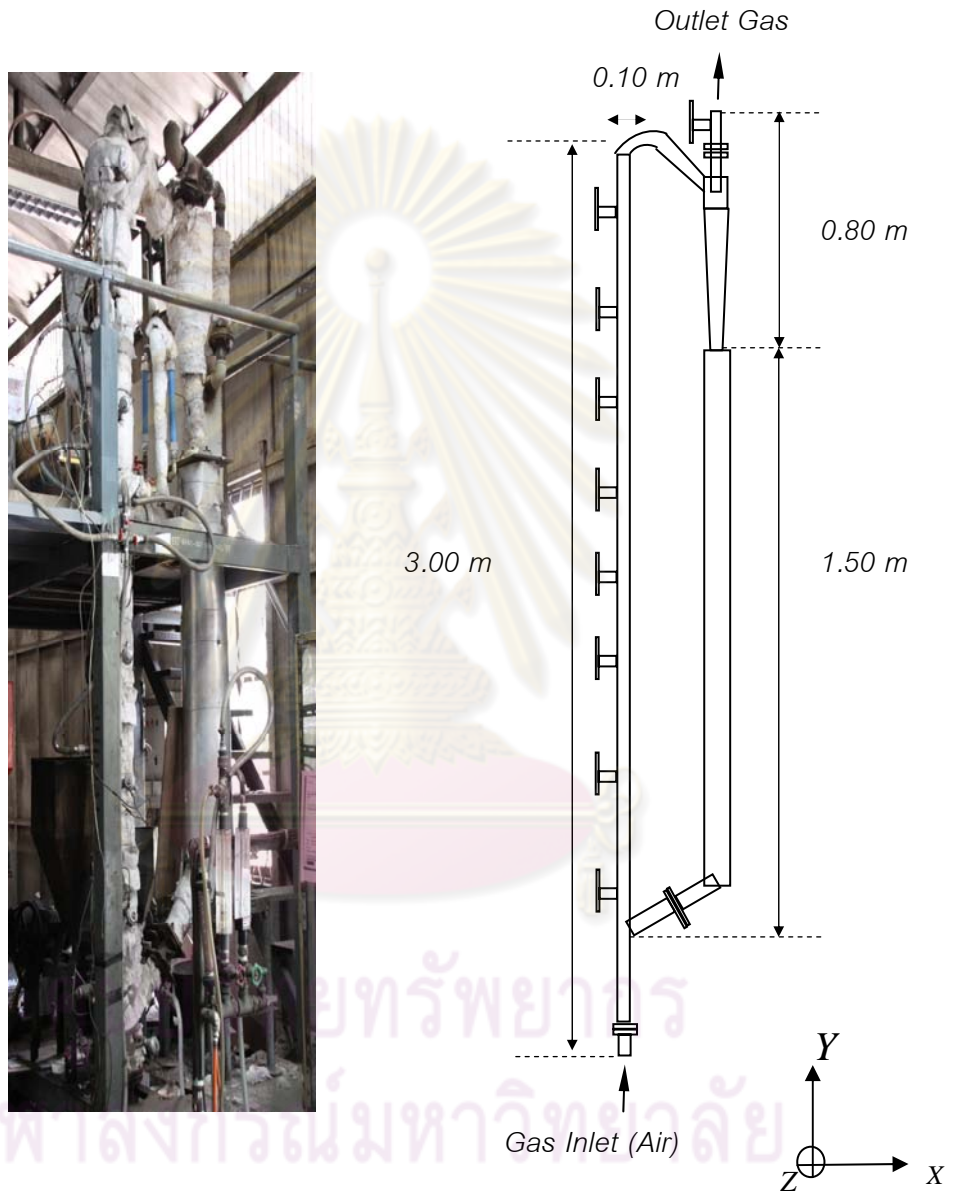
3.2.1 การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Ansys และรายละเอียดของระบบ

งานวิจัยมุ่งเน้น การสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตด้วยโปรแกรม Ansys สำหรับใช้จำลองการไหลที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์

การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Ansys สำหรับแบบจำลองการไหลที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์

รูปที่ 3.1 (ก) แสดงเครื่องจำลองการไหลภายในเตาฟลูอิดิกส์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการจริง เครื่องจำลองนี้ประกอบด้วย โรเตอร์ความสูง 3.00 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 เมตร ไฮโคลนความสูง 0.80 เมตร ขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางที่กว้างที่สุด 0.20 เมตร และดาวนั้คัมเมอร์ความสูง 1.50 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างที่สุด 0.20 เมตร สำหรับรูปที่ 3.1 (ข) เป็นรูปวาดตัวแทนเครื่องจำลองการไหลฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียนที่จะนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตโดยโปรแกรม Ansys ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.2

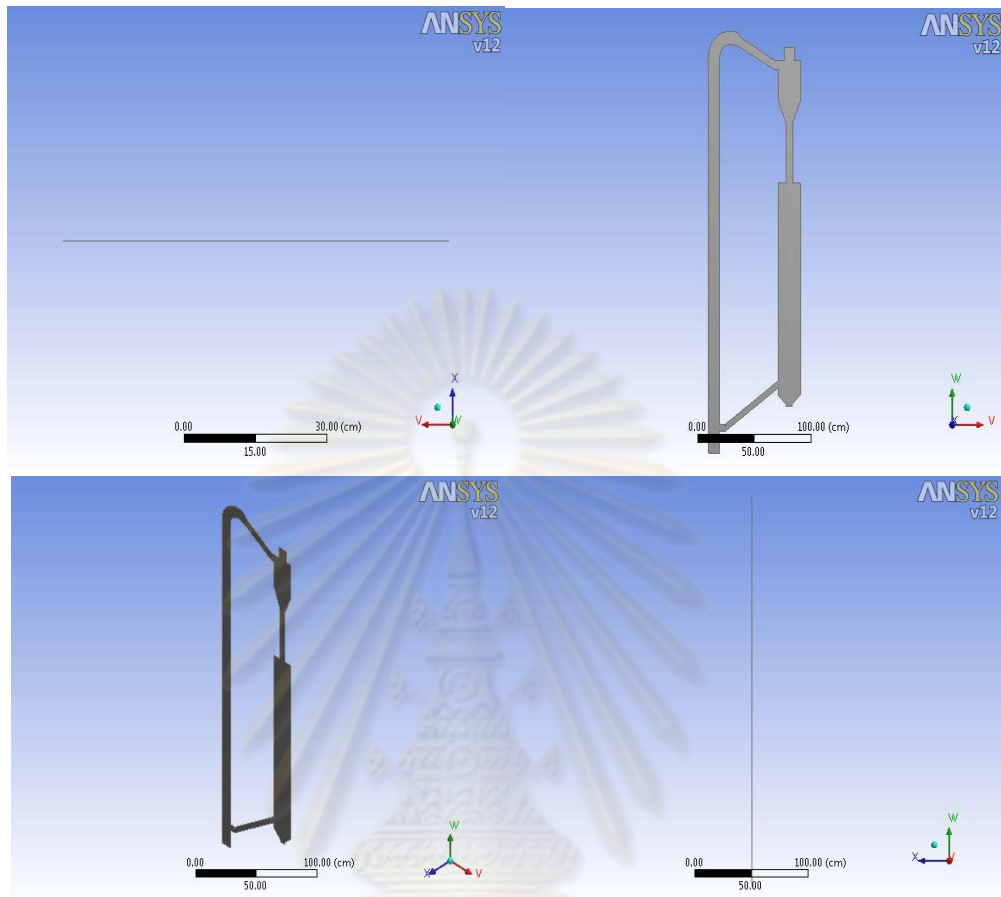


รูปที่ 3.1 (ก) เครื่องจำลองการไหลภายในเตาฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ใน

การศึกษากุทกพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการจริง

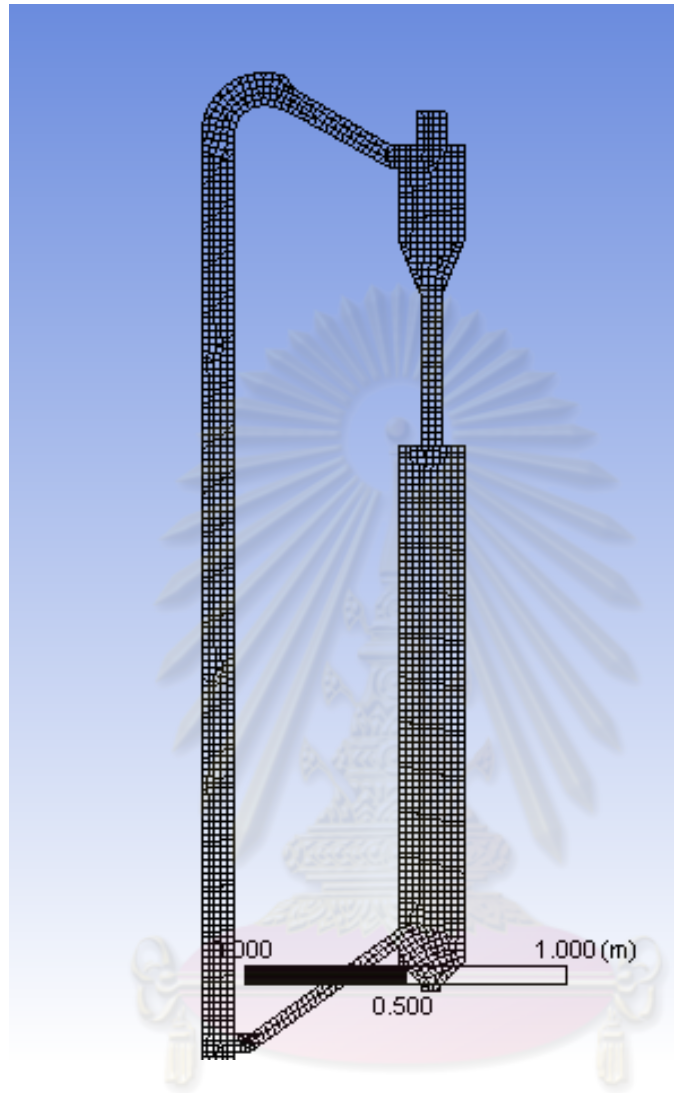
(ข) รูปวาดตัวแทนเครื่องจำลองการไหลเตาฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ใน

การจำลองเชิงเรขาคณิต



รูปที่ 3.2 รูปทรงของแบบจำลองการไหลของเตาฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการศึกษา
อุทกพลศาสตร์ที่สร้างขึ้นภายในโปรแกรม Ansys

โดยที่แบบจำลองการไหลที่สร้างขึ้นใน 2 มิติ เมื่อทำการ mesh โดยใช้รูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า
และสามหน้า (Quadrilateral and Trilateral) เป็นตัวแทนปริมาตรเล็กๆ ของระบบจะมีจำนวน
เซลล์ทั้งหมดในขอบเขตการไหลที่ทำการศึกษาเท่ากับ 3947 และ 4127 เซลล์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

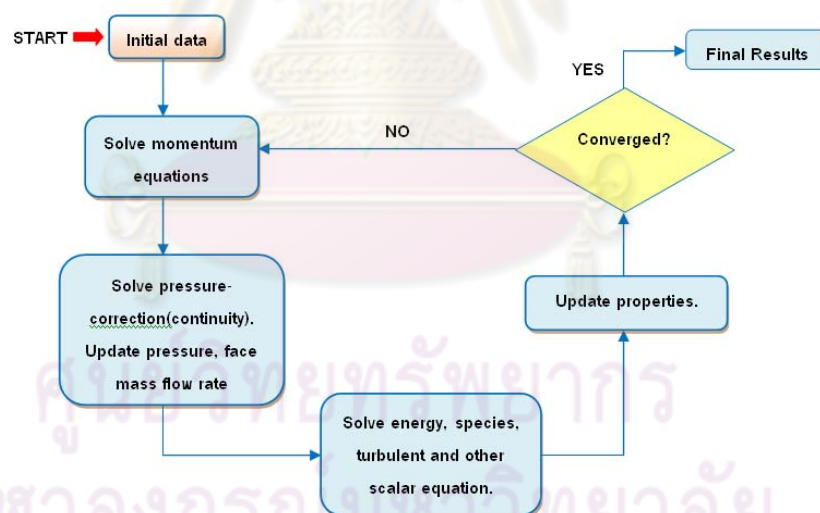
รูปที่ 3.3 แบบจำลองเตาฟลูอิโดซิสเบดแบบหมุนเวียนใน 2 มิติที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์
ด้วยโปรแกรม Ansys

3.2.2 การจำลองภาวะการไหลโดยโปรแกรม Fluent

การจำลองภาวะการไหลของแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Fluent เริ่มต้นด้วยการนำข้อมูลขอบเขตการไหลจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรม Ansys เข้าสู่โปรแกรม Fluent หลังจากนั้นทำการกำหนดรูปแบบของการคำนวณ และทำการเลือกแบบจำลองการไหลที่จะใช้คำนวณในการจำลองภาวะ และทำการกำหนดค่าขอบเขต และค่าเริ่มต้นในการจำลองภาวะโดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.2.1 การกำหนดชนิดของเครื่องมือการแก้สมการ (Solver)

ในขั้นตอนแรกของการจำลองภาวะการไหลของแบบจำลองเครื่องฟลูอิดิกส์แบบหมุนเวียน ต้องทำการกำหนดเครื่องมือการแก้สมการ โดยทำการเลือกจากเมนู Solver ภายในโปรแกรม Fluent โดยในการวิจัยครั้งนี้เลือกตัวแก้ปัญหาแบบ Segregated มาใช้โดยวิธีการแก้ปัญหาแบบ Segregated นี้จะทำการแก้ปัญหสมการหลัก (Governing Equation) ไปเป็นลำดับทีละสมการ ดังแสดงรูปที่ 3.4 เป็นแผนภาพแสดงกระบวนการแก้ปัญหาโดยรวมของวิธีการแก้ปัญหาแบบ Segregated



รูปที่ 3.4 แผนภาพกระบวนการแก้ปัญหาโดยรวมของวิธีแก้ปัญหาแบบ Segregated

(Fluent 6.2.16 User's Guide, 2003)

จากรูปที่ 3.4 กระบวนการแก้ปัญหาจะเริ่มที่โปรแกรมทำการรับค่าคุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละภูมิภาคที่ต้องใช้ในการคำนวณ โดยในขั้นตอนนี้ถ้าเป็นขั้นแรกของการคำนวณจะเป็นการรับค่าตั้งต้นที่ผู้ใช้งานกำหนดเข้ามาเพื่อที่จะใช้เป็นค่าตั้งต้นของการคำนวณ แต่ถ้าเป็นระหว่างขั้นตอนการคำนวณจะเป็นการรับค่าจากการคำนวณรอบก่อนหน้าที่ยังไม่ลู่เข้า เมื่อโปรแกรมรับค่า

เข้ามาแล้วจะทำการแก้สมการโมเมนต์เพื่อที่จะหาค่าความเร็ว หลังจากนั้นจะนำค่าความเร็วที่ได้ไปทำการตรวจสอบและปรับค่าความดัน (Pressure-correction) เมื่อทำการปรับปรุงและแก้ไขเสร็จแล้วจะทำการปรับปรุงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณด้วยค่าที่คำนวณได้ใหม่และทำการแก้ปัญหสมการพลังงาน สมการรูปแบบการไหล และสมการเชิงสเกลาร์ (Scalar Equation) และในขั้นตอนสุดท้ายของการคำนวณจะทำการตรวจสอบค่าที่ได้จากการคำนวณว่าลู่เข้าหรือไม่ โดยตรวจสอบกับค่าตกค้าง (Residual) ถ้าผลลัพธ์การคำนวณที่ได้ในรอบนั้นยังไม่ลู่เข้าจะทำการนำค่าที่ได้กลับไปเป็นค่าตั้งต้นสำหรับการคำนวณในรอบต่อไป (Iteration) จนกว่าค่าที่ได้จะลู่เข้าหรือเกินจำนวนรอบมากที่สุด (Max Iteration) ที่กำหนดไว้ โดยค่าที่ลู่เข้าแล้วจะนำไปทำการปรับปรุงค่าสมบัติต่างๆต่อไปเพื่อที่จะใช้ในการคำนวณตามขั้นเวลา (Time Step) ต่อไป โดยในงานวิจัยนี้จะทำการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบ Segregated ของแบบจำลอง 2 มิติ สำหรับกรณีที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์

สำหรับการแก้ปัญหาหลายวัฏภาคใช้แบบจำลองหลายวัฏภาคแบบออยเลอร์เลียน (Eulerian Multiphase Model) เนื่องจากเป็นแบบจำลองในการคำนวณที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการภายในฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน เพราะสามารถกำหนดให้วัฏภาคของแข็งมีลักษณะเป็นเม็ด (Granular) และไม่จำเป็นต้องติดตามการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค ในส่วนของสมการการคำนวณเกี่ยวกับรูปแบบการไหล ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การไหลแบบราบเรียบในการจำลองภาวะ

3.2.2.2 การกำหนดคุณสมบัติของแต่ละวัฏภาคที่ใช้ในการจำลองภาวะ

หลังจากทำการออกแบบแบบจำลองการไหลของเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนด้วยโปรแกรม Ansys แล้ว นำแบบจำลองที่ได้มาทำการคำนวณในโปรแกรม Fluent เพื่อทำการศึกษามูลศาสตร์ งานวิจัยนี้จะใช้คุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละวัฏภาคเช่นเดียวกันกับที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจริง

รายละเอียดของคุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละวัฏภาคที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 จากนั้นทำการกำหนดให้ วัฏภาคแก๊สเป็นวัฏภาคหลัก (Primary Phase) และวัฏภาคของแข็งเป็นวัฏภาครอง (Secondary Phase) โดยแบบจำลองการไหลที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ วัฏภาคของแก๊สคือ อากาศ วัฏภาคของแข็งคือ ทราย (Silica Sand)

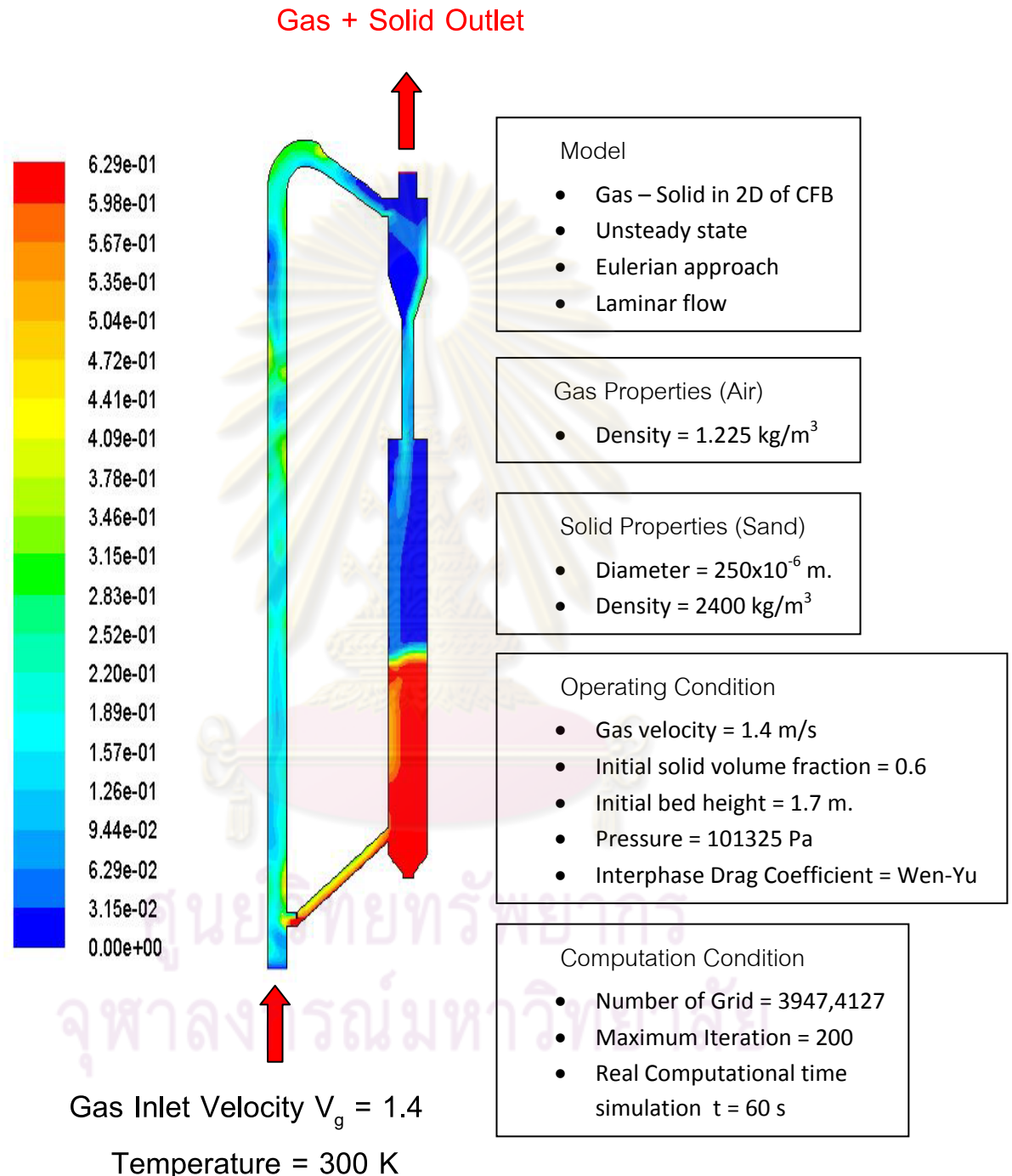
ตารางที่ 3.1 ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละวัสดุภาคที่ใช้ในการจำลองภาวะใช้ในการศึกษา
อุทกพลศาสตร์

Properties	Gas (Air)	Solid (Sand)
Density $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	1.225	2400
Viscosity $\left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$	1.7894×10^{-5}	-
Diameter (m)	-	250×10^{-6}
Packing Limit	-	0.64

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.2.3 การกำหนดค่าขอบเขตและสภาวะที่ใช้ในการจำลองภาวะ

- แบบจำลองฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์



รูปที่ 3.5 ขอบเขตของแบบจำลองการไหลของเตาฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ และค่าสภาวะที่ใช้ในการจำลองภาวะ

งานวิจัยนี้ทำการจำลองภาวะภายในเตาฟลูอิโดซเบดแบบหมุนเวียนโดยโปรแกรม Fluent ผู้ใช้งานจะต้องทำการกำหนดค่าสภาวะขอบเขตที่ใช้ในการจำลองโดยในงานวิจัยนี้ทำการกำหนดให้มีค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสองในทิศทางติดลบของแกน Y (กำหนดให้แกน Y ทำมุมตั้งฉากกับพื้นโลก) และค่าความดันแวดล้อมเท่ากับ 101325 ปาสคาล โดยค่าขอบเขตของแต่ละขอบเขตของแบบจำลองการไหลจะถูกกำหนดโดยผู้ใช้งานเพื่อที่เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองภาวะ ดังในรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงรายละเอียดของแบบจำลองการไหลของเครื่องฟลูอิโดซเบดแบบหมุนเวียน และขอบเขตของแบบจำลองการไหล

- สมมติฐานที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง (แสดงดังรูปที่ 3.5)
 1. แบบจำลองการไหลในส่วนแรกเป็นการไหลของแก๊ส-ของแข็งใน 2 มิติ
 2. ใช้แนวคิดออยเลอร์เลียน (Eulerian approach) และทำการจำลองภาวะแบบราบเรียบ (Laminar Model)
 3. ของแข็งที่ใช้ในการจำลองภาวะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและสมบัติต่างๆทางกายภาพเท่ากัน
 4. บริเวณทางเข้าอากาศจะถูกป้อนเข้ามาทางด้านล่างของท่อโรเตอร์ด้วยความเร็ว 1.4 เมตรต่อวินาที ส่วนของแข็งจะถูกอัดแน่นในดาร์นคัมเมอร์ จากรูปที่ 3.5 ได้แสดงคอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งเริ่มต้นโดยมีสัดส่วนปริมาตรของแข็งเริ่มต้น 0.64 มีความสูงของเบด 1.7 เมตร โดยที่สีแดงแทนสัดส่วนปริมาตรของแข็งมาก และสีน้ำเงินแทนสัดส่วนปริมาตรของแข็งน้อย ป้อนมาจากท่อป้อนกลับและบริเวณทางออกกำหนดค่าความดันให้เท่ากับบรรยากาศ
 5. บริเวณผนังความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวปกติของแก๊สและของแข็งถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ คือเป็นสภาวะที่ไม่มีกรไถล (Non-slip condition) สำหรับความเร็วของอนุภาคของแข็งใช้เงื่อนไขขอบเขตของ Johnson and Jackson (1987) ค่าสัมประสิทธิ์การชนกันระหว่างอนุภาคของแข็ง (Restitution Coefficient) เท่ากับ 0.9999 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การชนกันระหว่างผนังกับอนุภาคของแข็ง (Wall Restitution Coefficient) เท่ากับ 0.95 โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สเปคูลาริตี (Specularity Coefficient) เท่ากับ 0.01
 6. กำหนดให้ใช้สมการของ Wen-Yu ในการคำนวณอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคของแข็งด้านการเคลื่อนที่ (Interphase Drag Coefficient)
 - อันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคของแข็งด้านการเคลื่อนที่ (Interphase Drag Coefficient)

Wen and Yu;

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g |v_s - v_g|}{d_p} \varepsilon_g^{-2.65}$$

โดยที่

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_s} (1 + 0.15 \text{Re}_s^{0.687}) ; \text{Re}_s = \frac{\rho_g \varepsilon_g |v_g - v_s| d_p}{\mu_g}$$

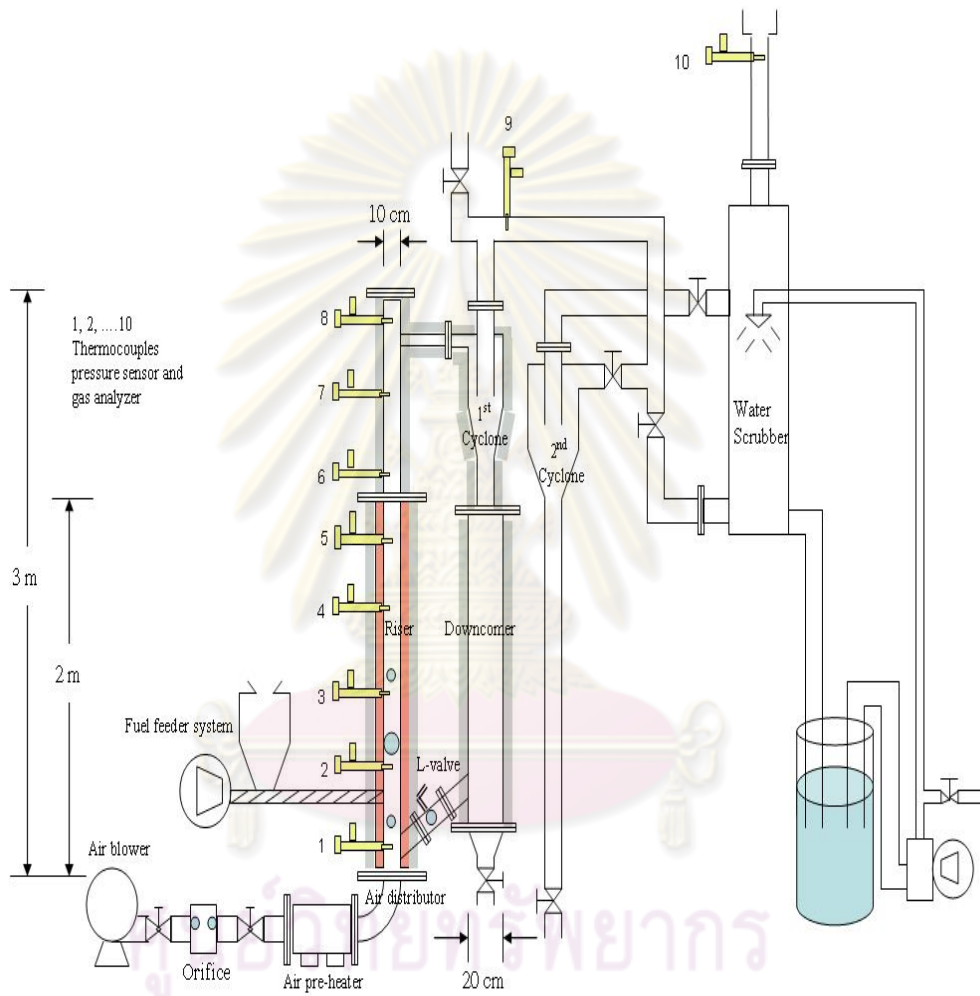
โดยมีจำนวนเซลล์ทั้งหมดในขอบเขตการไหลที่ทำการศึกษา 1 กรณี เท่ากับ 3947 และ 4127 เซลล์

3.3.2.4 การกำหนดขั้นเวลาและการจำลองภาวะ

ก่อนที่จะเริ่มทำการคำนวณผู้ใช้งานจะต้องไปทำการกำหนดค่าเริ่มต้น (Initialize) ที่ใช้สำหรับการคำนวณก่อนเสมอ และต้องทำการกำหนดค่า Under-Relaxation ที่ใช้ในการคำนวณแต่ละรอบของการคำนวณ (Iteration) โดยทั่วไปจะใช้ค่าตามปกติที่ Fluent กำหนด และทำการคำนวณ ถ้าผลจากการคำนวณไม่ลู่เข้า (diverged) จึงทำการปรับค่า Under-Relaxation จนกว่าคำตอบจะลู่เข้า (converged) สำหรับการจำลองภาวะในงานวิจัยนี้สำหรับแบบจำลองที่ไม่มี การถ่ายโอนความร้อน และแบบจำลองที่มีการถ่ายโอนความร้อน จะใช้ขั้นเวลา (Time Step) เท่ากับ 0.001 วินาที เช่น การจำลองภาวะให้ได้เวลาการไหล (Flow Time) เท่ากับ 80 วินาที ต้องกำหนดให้โปรแกรมทำการคำนวณเท่ากับ 80,000 ขั้นเวลา โดยกำหนดให้ทำการคำนวณไม่เกิน 100 รอบต่อหนึ่งขั้นเวลา ในงานวิจัยนี้แบบจำลองที่ใช้เพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลางรุ่น Core 2 Duo ที่มีสัญญาณนาฬิกาเท่ากับ 2.00 กิกะเฮิรตซ์ มีหน่วยความจำแรม เท่ากับ 2 กิกะไบต์ ใช้เวลาคำนวณประมาณ 5 วัน สำหรับเวลา 60 วินาทีในการจำลองสภาวะการถ

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เตาเผาฟลูอิดไวด์แบบหมุนเวียน



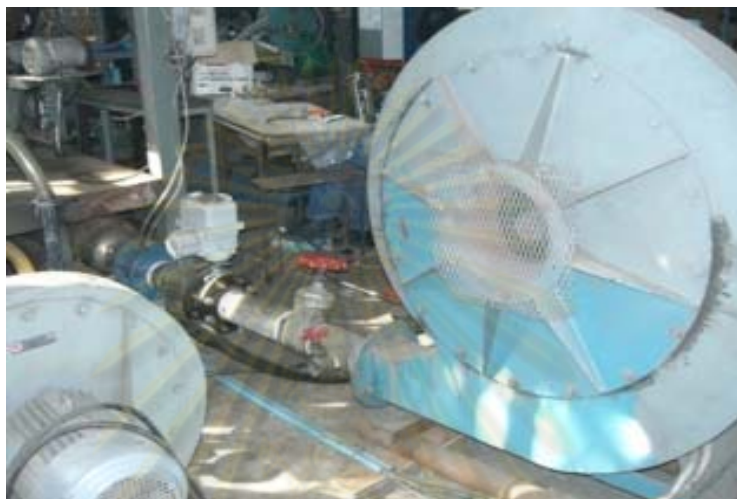
รูปที่ 3.6 โครงร่างเตาเผาฟลูอิดไวด์แบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.7 เตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน และสกริปเปอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

เตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. เครื่องเป่าอากาศ (Air blower) สำหรับให้อากาศปฐมภูมิ (Primary air) ใช้มอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 5 แรงม้า ขนาดกำลังผลิตสูงสุด 20 ลบ.ม/นาที ความดันสูงสุด 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



รูปที่ 3.8 เครื่องเป่าอากาศ (air blower)

2. วาล์วไฟฟ้ารูปผีเสื้อเพื่อใช้ปรับปริมาณอากาศจากเครื่องเป่าอากาศ (อากาศปฐมภูมิ) และ Orifice สำหรับวัดค่าความแตกต่างของความดันอากาศแล้วนำไปแสดงผลเป็นอัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิที่หน้าจอดีจิตอลและบันทึกผลลงคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.9 วาล์วไฟฟ้ารูปผีเสื้อและ Orifice

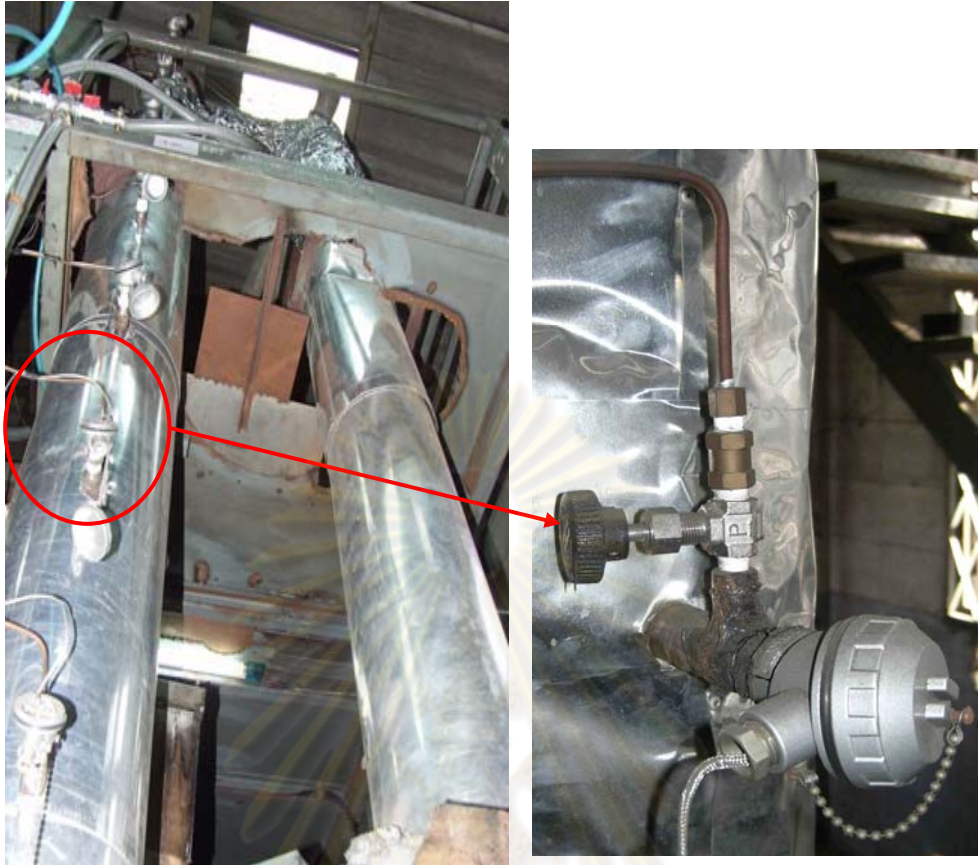
3. หน้าจอแสดงอัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิแบบดิจิทัล



รูปที่ 3.10 หน้าจอแสดงความเร็วอากาศปฐมภูมิแบบดิจิทัล

4. แผ่นกระจายอากาศ (Distributor) เป็นแบบแผ่นตะแกรง ความละเอียด 60 mesh ซ้อนอยู่กับแผ่นตะแกรงชนิดหยาบ เพื่อให้อากาศกระจายตัวสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด และป้องกันไม่ให้ทรายรวมทั้งเชื้อเพลิงและเถ้าหล่นลงสู่ด้านล่างไรเซอร์

5. ท่อไรเซอร์ (Riser) แบ่งออกเป็น ส่วนล่างและส่วนบนโดยส่วนล่างหล่อด้วยซีเมนต์ ทนไฟหนา 5 เซนติเมตร สูง 2 เมตร ส่วนบนทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 3 มิลลิเมตร สูง 1 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร มีช่องสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิลและสำหรับดึงแก๊ส 8 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งแรกสูงจากแผ่นกระจายอากาศ 10 เซนติเมตร และตำแหน่งต่อไปห่างกัน 40 เซนติเมตรขึ้นมาทางด้านบนของท่อไรเซอร์



รูปที่ 3.11 ไรเซอร์ (ท่อแนวตั้งด้านซ้าย) และ Probe สำหรับวัดอุณหภูมิและองค์ประกอบของแก๊ส

6. หัวเผา (Burner) อยู่ที่ตำแหน่ง 0.25 เมตร จากแผ่นกระจายอากาศ ใช้สำหรับอุ่นเตาเผาในช่วงเริ่มต้น โดยใช้แก๊สหุงต้ม (LPG) เป็นเชื้อเพลิง และใช้อากาศจากเครื่องอัดอากาศ ด้านข้างของหัวเผาดัดตั้งกระจกสำหรับดูเปลวไฟจากหัวเผาเพื่อความปลอดภัย



รูปที่ 3.12 หัวเผาและกระจกมองเปลวไฟ

7. อุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิง เป็นเครื่องป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรูฟีดเดอร์ทั้งหมด 2 ตัว

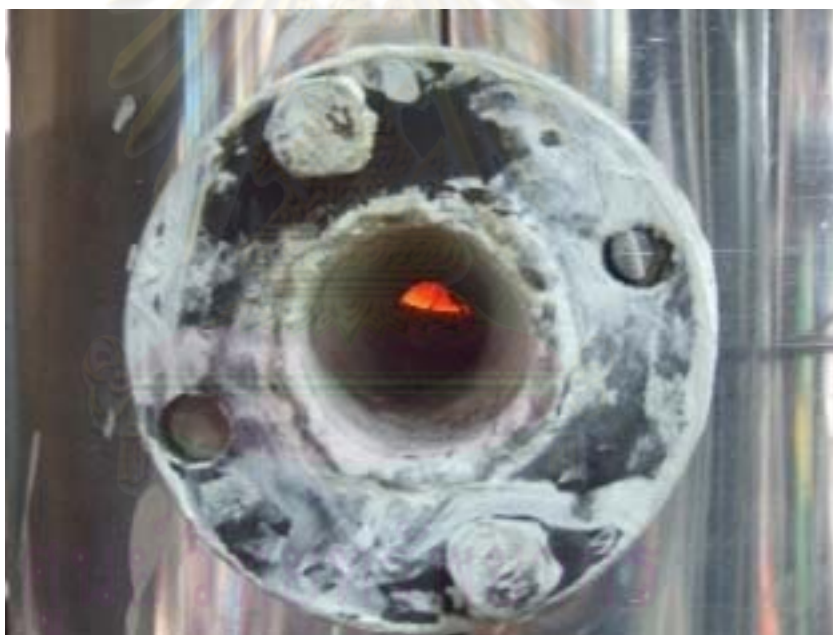
แต่ละตัวประกอบด้วยถังบรรจุเชื้อเพลิงและระบบลำเลียงเชื้อเพลิงรูปเกลียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางเกลียวป้อน 4.8 เซนติเมตร ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า ใช้ไฟฟ้า 3 เฟส อัตราการหมุน 1400 รอบต่อนาที ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยเครื่องควบคุมความเร็วของมอเตอร์ (inverter) ที่ตำแหน่งปลายของระบบลำเลียงเชื้อเพลิงและตำแหน่งบนของถังบรรจุเชื้อเพลิงตัวหนึ่ง (สำหรับป้อนเชื้อเพลิงประเภทชีวมวล) จะติดตั้งระบบป้อนอากาศเพื่อป้องกันการไหม้ย้อนกลับเข้าสู่ถังเก็บเชื้อเพลิง โดยตำแหน่งที่ป้อนเชื้อเพลิงอยู่ที่ระดับสูงจากแผ่นกระจายอากาศ 0.35 เมตร





รูปที่ 3.13 ระบบป้อนเชื้อเพลิง (Fuel feeder system)

8. กระจกสำหรับดูภายในห้องเผาไหม้อยู่ที่ตำแหน่ง 0.60 เมตร จากแผ่นกระจายอากาศ



รูปที่ 3.14 กระจกสำหรับดูภายในห้องเผาไหม้

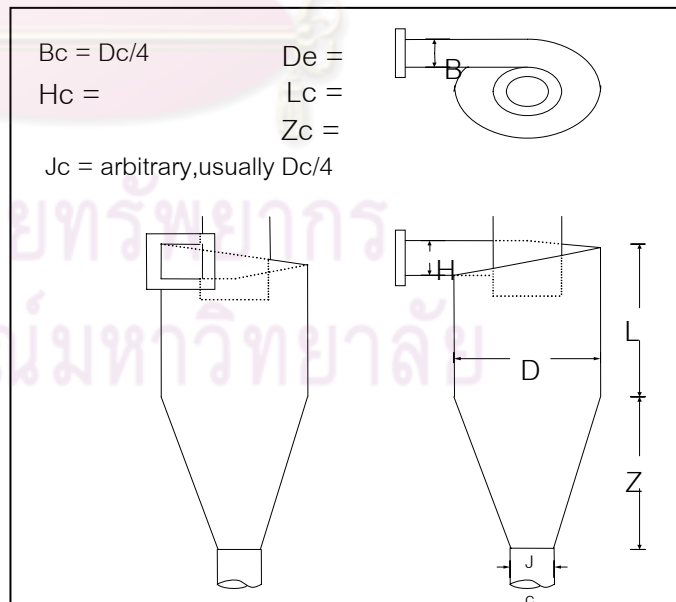
9. เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) สำหรับป้อนอากาศให้หัวเผา ระบบป้อนเชื้อเพลิงซีวมวล และ ตำแหน่งป้อนอากาศทุติยภูมิ โดยใช้มอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 15 แรงม้า หรือ 11.2 กิโลวัตต์ ลูกสูบมี Bore 120 มิลลิเมตร และ Stroke 80 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 860 รอบต่อนาทีที่ความถี่ 50 Hz ขนาดถังเส้นผ่านศูนย์กลางความยาวเป็น 485x1770 มิลลิเมตร ความจุถัง 304 ลิตร ความดันที่ใช้งาน 12 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และความ

ตันสูงสุด 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พร้อมอุปกรณ์ทำความเย็นอากาศและระบบกำจัดน้ำในอากาศ



รูปที่ 3.15 เครื่องอัดอากาศ พร้อมอุปกรณ์ทำความเย็นอากาศและระบบกำจัดน้ำในอากาศ

10. ไซโคลน (Cyclone) เพื่อแยกอนุภาคของแข็ง (ทราย เศ็อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมด และเถ้าบางส่วน) ออกจากแก๊ส



รูปที่ 3.16 ไซโคลน (Cyclone) (ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์, 2548)

ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม

เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกไซโคลน (Dc) = 20 เซนติเมตร

ทางเข้าของแก๊สและอนุภาค (Bc x Hc) = 5x10 เซนติเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส (De) = 10 เซนติเมตร

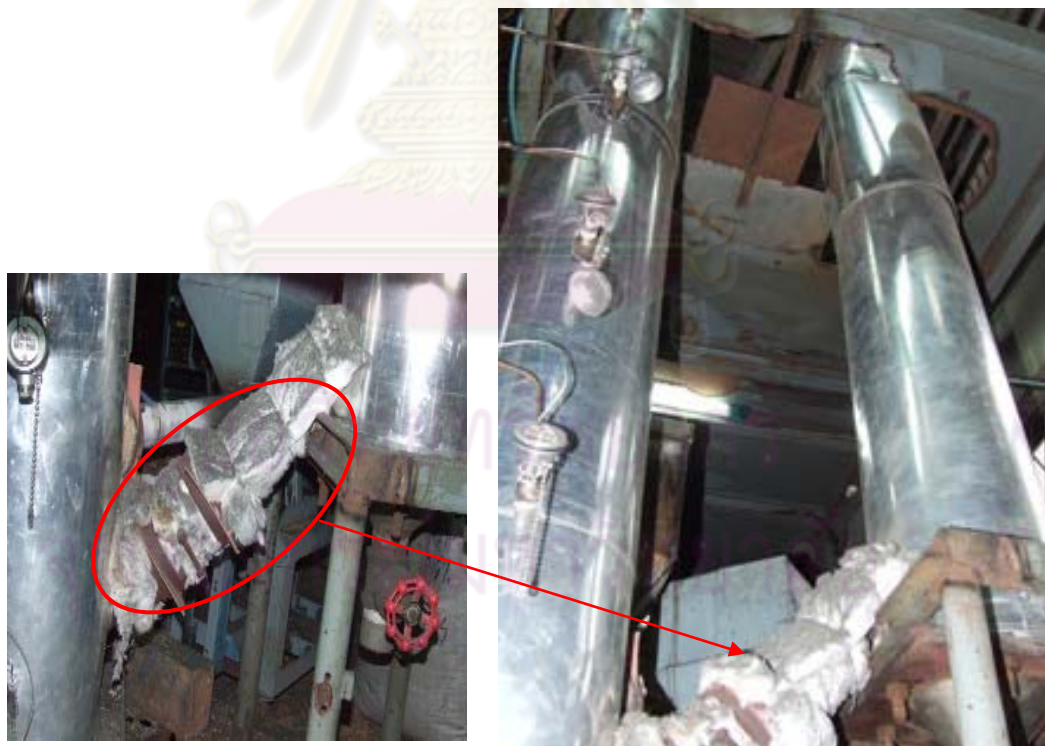
ความสูงของกระบอกไซโคลน (Lc) = 40 เซนติเมตร

ความสูงของกรวยไซโคลน (Zc) = 40 เซนติเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของอนุภาค (Jc) = 5 เซนติเมตร

11. ระบบป้อนกลับของแข็ง ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญได้แก่

- ท่อ ดาวน์คัมเมอร์ (downcomer) ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 2 มิลลิเมตร สูง 1.6 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 เซนติเมตร เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างไซโคลนกับแอลวาล์ว ด้านล่างของ ดาวน์คัมเมอร์ (downcomer) มีวาล์วสำหรับปล่อยแก๊สออกจากระบบ
- แอลวาล์ว ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ใช้วาล์วเป็นลักษณะของวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly valve)



รูปที่ 3.17 ดาวน์คัมเมอร์ (downcomer) (ท่อทาง ด้านขวา) และ แอลวาล์ว (วาล์วปีกผีเสื้อ)

12. หอดูดซึม (water scrubber) คอลัมน์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ตัวคอลัมน์สูง 160 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมี 2 ส่วน ส่วนบนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร ส่วนล่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ภายในบรรจุตะแกรงสแตนเลส เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 32 เซนติเมตร ขนาดช่องของตะแกรง 0.3 เซนติเมตร ภายในบรรจุตัวกลางในการดูดซับ ทำจากท่อสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร บรรจุเหนือตะแกรง ความสูงเบด 15 เซนติเมตร ส่วนบนของหอดูดซึมสำหรับสเปรย์น้ำสวนทางกับทิศทางเดินทางของแก๊สที่ออกจากไซโคลอน ด้านล่างมีท่อทางเดินแก๊สจากไซโคลอนเข้าสู่คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 เซนติเมตร หอดูดซึมทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของแก๊สและดูดซับควันและเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ ดังเก็บน้ำจะมีตะแกรงกรองอนุภาคของแข็งออกจากรูน้ำก่อนที่จะนำไปฉีดสเปรย์ในหอดูดซึมเพื่อป้องกันอุปกรณ์ฉีดสเปรย์อุดตัน



รูปที่ 3.18 หอดูดซึมและอุปกรณ์อัดฉีดน้ำ

13. หน้าจอแสดงอุณหภูมิและวาล์วสำหรับดึงแก๊สออกจากระบบเพื่อนำไปวัดความดันภายในระบบและนำไปวัดองค์ประกอบของแก๊ส



รูปที่ 3.19 หน้าจอแสดงอุณหภูมิและวาล์วสำหรับดึงแก๊สออกจากระบบ

14. เครื่องบดถ่านหินอย่างหยาบ ใช้มอเตอร์ขนาด 3.8 กิโลวัตต์ 3 เฟส บดผ่านช่องตะแกรงแยกขนาด 1.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.20 เครื่องบดถ่านหินอย่างหยาบ

15. เครื่องบดชีวมวลอย่างหยาบ ใช้มอเตอร์ขนาด 3.8 กิโลวัตต์ 3 เฟส บดผ่านช่องตะแกรงแยกขนาด 1.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.21 เครื่องบดชีวมวลอย่างหยาบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 การสร้างเครื่องผลิตไอน้ำ

การสร้างเครื่องผลิตไอน้ำที่ได้รับพลังงานความร้อนจากส่วนผนังเตาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนนั้นจำเป็นต้องสร้างส่วนสำคัญ 3 ส่วน ดังนี้

3.4.1 **ส่วนอุ่นน้ำ (Water Pre-Heater)** คือ บริเวณเก็บอุปกรณ์ส่วนหลักที่ใช้ในการเดินเครื่องผลิตไอน้ำน้ำหมุนเวียนในส่วนนี้มาจาก 2 ส่วน คือ จากน้ำภายนอกระบบและน้ำภายในระบบ น้ำภายนอกระบบเป็นน้ำสะอาดธรรมดาที่ใช้เติมหล่อเลี้ยงให้ระบบ น้ำภายในระบบ คือ น้ำที่เกิดจากการกลั่นตัวจากส่วนเก็บไอ (Steam Section) ส่วนเก็บน้ำนี้มีขนาดกว้าง 0.30 เมตร ยาว 0.80 เมตร และสูง 0.80 เมตร ขนาดความจุ 0.192 ลูกบาศก์เมตร ส่วนเก็บน้ำนี้สร้างจากเหล็กดำ น้ำมันแผ่น ความหนา 0.003 เมตร ภายในมีท่อเหล็กดำซึ่งใช้สำหรับการนำเอาแก๊สร้อนและของแข็งบางส่วนจากเตาไปยังส่วนของหอดูดซึม ขนาด 2 นิ้วขดอยู่



รูปที่ 3.22 ส่วนอุ่นน้ำ (Water Pre-Heater)

- 3.4.2 **ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Section)** คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำภายในท่อและความร้อนจากผนังเตา ลักษณะเป็นท่อแนวตั้งวิ่งขึ้น ลงตามแนวของส่วนโรเตอร์ อุปกรณ์นี้สร้างจากท่อเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว ความจุ 0.002 ลูกบาศก์เมตร



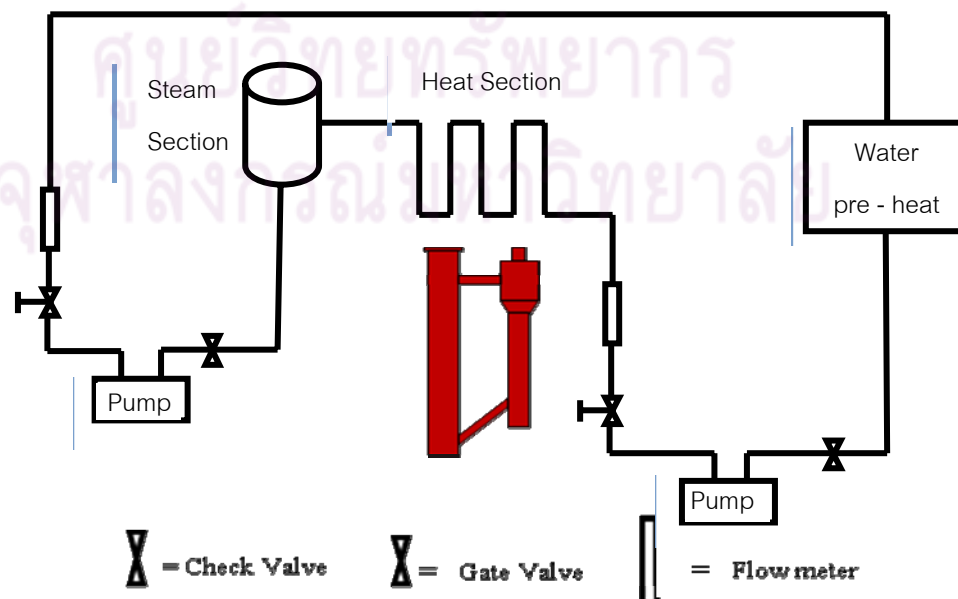
รูปที่ 3.23 ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Section)

- 3.4.3 **ส่วนเก็บไอน้ำ (Steam Section)** คือ อุปกรณ์ที่ใช้กักไอน้ำร้อน และน้ำร้อนที่เกิดจากการกลั่นตัวของไอน้ำบางส่วน รวมไปถึงน้ำร้อนที่ไม่เกิดเป็นไอ จากส่วนแลกเปลี่ยน สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิมรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.20 เมตร สูง 0.30 เมตร ความจุ 0.09 ลูกบาศก์เมตร ส่วนล่างของอุปกรณ์มีช่องระบายน้ำขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว ส่วนบนติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน อุณหภูมิ และวาล์วระบายไอน้ำ



รูปที่ 3.24 ส่วนเก็บไอน้ำ (Steam Section)

3.4.4 แผนผังเครื่องผลิตไอน้ำ หลังสร้างอุปกรณ์หลักข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้วทำการประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ทำการสร้างขึ้นโดยใช้ ปั๊ม (Pump) วาล์ว (Value) และอุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow meter) ดังแผนผังในรูปที่ 3.25





รูปที่ 3.25 แผนผังระบบผลิตไอน้ำ

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การเตรียมเชื้อเพลิงและทราย

3.5.1.1 เตรียมทรายให้ได้ขนาดระหว่าง 200 ไมโครเมตร ถึง 300 ไมโครเมตร

3.5.1.2 บดถ่านหินและคัดขนาดให้ต่ำกว่า 1.2 มิลลิเมตร

3.5.1.3 บดชีวมวล(กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม)และคัดขนาดให้ต่ำกว่า 1.2 มิลลิเมตร

3.5.1.4 นำถ่านหินกะลามะพร้าว และกะลาปาล์มไปวิเคราะห์โดยประมาณและวิเคราะห์โดยแยกธาตุ พร้อมทั้งหาค่าปริมาณความร้อน

3.5.2 การจุดเตาและดำเนินการทดลอง

3.5.2.1 ปิดแอสวาล์ว และปิดวาล์วด้านล่างของ ดาวน์คัมเมอร์ (downcomer) แล้วป้อนทรายเข้าดาวน์คัมเมอร์ (downcomer) ปริมาณ 25 กิโลกรัม

3.5.2.2 จุดเตาเผา (ไรเซอร์) ด้วยแก๊ส LPG โดยป้อนอากาศที่หัวจุดเตาจากเครื่องอัดอากาศ 200 ลิตรต่อนาที สังเกตกระจกดูเปลวไฟที่หัวจุดเตาว่ายังคงมีเปลวไฟสีฟ้าติดอยู่ หากไฟดับให้หยุดป้อนแก๊ส LPG ทันทีแล้วเริ่ม

จุดเตาใหม่ จนกระทั่งอุณหภูมิตำแหน่งเบอร์ 2 (0.5 เมตร) ได้ 600 องศาเซลเซียส

3.5.2.3 ป้อนถ่านหินที่อัตรา 3.00 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (2.00 Hz) และ ชีวมวลที่อัตรา 3.00 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (12.26 Hz) โดยป้อนอากาศ 100 ลิตรต่อนาทีที่สกรูพีดเดอร์ของชีวมวลด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนและเปลวไฟในโรเตอร์ย้อนเข้าสู่ถังเก็บชีวมวลซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการไหม้ย้อนของไฟเข้าสู่ถังเก็บแก๊สได้ จนกระทั่งอุณหภูมิตำแหน่งเบอร์ 2 (0.5 เมตร) ได้ 900 องศาเซลเซียส

3.5.2.4 ป้อนอากาศปฐมภูมิจากเครื่องเป่าอากาศ (blower) 330 ลิตรต่อนาที เข้าทางด้านล่างของโรเตอร์ผ่านแผ่นกระจายอากาศ พร้อมทั้งเปิดแวลวาล์วเพื่อให้ทรายใน ดาร์คัมเมอร์ (downcomer) ไหลเข้าสู่ส่วนล่างโรเตอร์

3.5.2.5 หยุดป้อนแก๊ส LPG และอากาศที่หัวจุดเตา

3.5.2.6 ป้อนอากาศและเชื้อเพลิงตามสภาวะที่ต้องการ เติมเชื้อเพลิงเข้าถังเก็บอยู่เสมอ จนกระทั่งอุณหภูมิในโรเตอร์คงที่ บันทึกผลการทดลอง (อัตราการป้อนเชื้อเพลิง อัตราการป้อนอากาศ อุณหภูมิ)

- อัตราการป้อนเชื้อเพลิง อ่านค่าด้วย อินเวอร์เตอร์ (ตัวปรับความเร็วของสกรูพีดเดอร์) หน้าจอแสดงค่าแบบดิจิตอล และบันทึกผล
- อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ อ่านค่าด้วย orifice หน้าจอแสดงค่าแบบดิจิตอล และบันทึก
- อัตราการป้อนอากาศทุติยภูมิ อ่านค่าด้วย โรตารีเตอร์
- อุณหภูมิ วัดโดย เทอร์โมคัปเปิล หน้าจอแสดงค่าแบบดิจิตอล และบันทึกผล

3.5.2.7 เปลี่ยนสภาวะการทดลองใหม่ จนกระทั่งอุณหภูมิในโรเตอร์คงที่อีกครั้ง บันทึกผลการทดลอง

3.5.2.8 ทำซ้ำข้อที่ 7 จนกระทั่งเสร็จสิ้นการทดลอง

3.5.3 การเดินระบบผลิตไอน้ำ

- 3.5.3.1 วัดอุณหภูมิจากส่วนอุ่นน้ำได้ 80 - 85 องศาเซลเซียส
- 3.5.3.2 ทำการเปิดปั้มน้ำที่ปั้มจากส่วนอุ่นน้ำไปยังส่วนแลกเปลี่ยน
- 3.5.3.3 ปรับอัตราการไหลที่อัตรา 60, 80, 100, 120 และ 140 ลิตรต่อชั่วโมง
- 3.5.3.4 เปิดวาล์วปล่อยไอน้ำทำการบันทึกผล อุณหภูมิและความดัน
- 3.5.3.5 นำน้ำแข็งมาใส่ยังส่วนควบแน่น ทำการวัดอัตราการควบแน่นและบันทึกผล

3.5.4 การปิดเตาเผา

- 3.5.4.1 ปิดแอสวาล์ว หยุดการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหิน และลดการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลลงเหลือ 2.00 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (8.17 Hz) เพื่อป้องกันไฟไหม้ย้อนเข้าถังเก็บชีวมวล
- 3.5.4.2 เมื่ออุณหภูมิในโรเตอร์เหลือประมาณ 600 องศาเซลเซียส หยุดการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล
- 3.5.4.3 เมื่ออุณหภูมิในโรเตอร์เหลือประมาณ 400 องศาเซลเซียส ปิดอากาศปฐมภูมิ
- 3.5.4.4 เมื่ออุณหภูมิในโรเตอร์เหลือประมาณ 200 องศาเซลเซียส หยุดการป้อนอากาศทั้งหมด
- 3.5.4.5 ถ่ายทรายใน ดาร์คัมเมอร์ (downcomer) ออกมาทางวาล์วด้านล่างของ ดาร์คัมเมอร์ (downcomer)

บทที่ 4

ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล

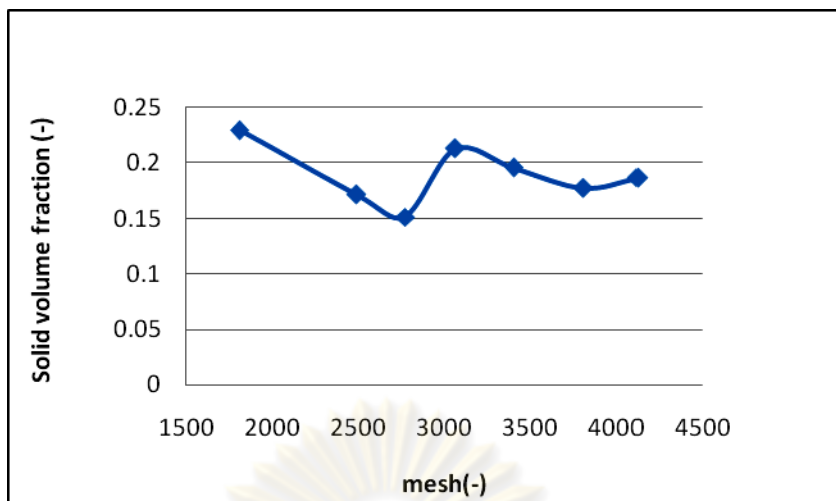
ผลการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแบบจำลองการไหลของแก๊สและของแข็งภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน ซึ่งเป็นส่วนให้ความร้อนแก่เครื่องผลิตไอน้ำ สามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นภายในเตาได้ในระดับหนึ่ง ผลจากการจำลองภาวะอุทกพลศาสตร์ภายในเตานั้น ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบสภาวะการเคลื่อนที่ของของไหลภายในเตา โดยในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการจำลองภาวะ การไหลภายในเตาด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นที่ โดยใช้ภาวะดำเนินการเดียวกันกับการทดลองจริง ส่วนที่สองเป็นการสร้างเครื่องมือประกอบติดตั้งกับผนังของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดในส่วนของโรเตอร์เพื่อทำการผลิตไอน้ำ และทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพที่ได้จากเครื่องมือที่สร้างขึ้น

4.1 ผลการจำลองภาวะในแบบจำลองการไหลของเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการผลิตไอน้ำเพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์

การจำลองภาวะในส่วนนี้จะทำการจำลองภาวะอุทกพลศาสตร์ของการไหลภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยใช้แนวคิดแบบออยเลอร์เลียน และแบบจำลองการไหลเป็นแบบราบเรียบในการจำลองภาวะ การไหล เพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการไหลที่พัฒนาขึ้น ผลที่ได้จากการจำลองภาวะจะถูกใช้ในการทำนายภาวะ การไหลภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน

4.1.1 ความเป็นอิสระของกริด (Grid Independent)

ขั้นตอนการสร้างกริดจะต้องมีการตรวจสอบความเป็นอิสระของกริด (Grids Independent) ก่อนนำแบบจำลองไปใช้ทำนายถึงภาวะภายในของเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งการตรวจสอบความเป็นอิสระของกริด โดยการเพิ่มจำนวนกริดจากการแบ่งขนาดของกริด จากนั้นทำการเก็บข้อมูลสัดส่วนของแข็งที่ได้ ที่วินาทีที่ 20 – 60 ตลอดส่วนของโรเตอร์มาทำการเฉลี่ย ดังรูปที่ 4.1

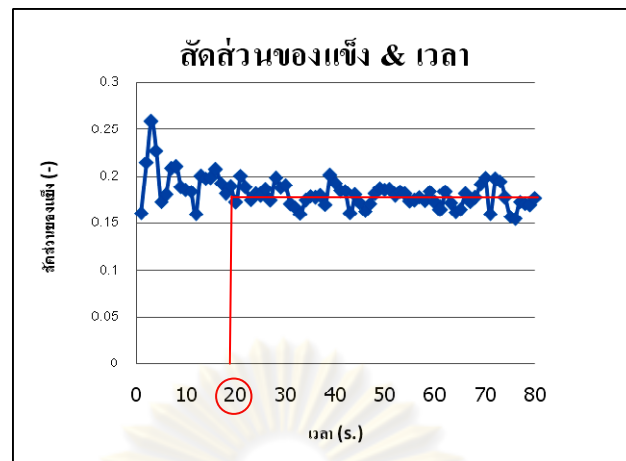


รูปที่ 4.1 แสดงจำนวนกริดต่อปริมาณสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดส่วนสูงของไรเซอร์
ที่วินาทีที่ 20 - 60

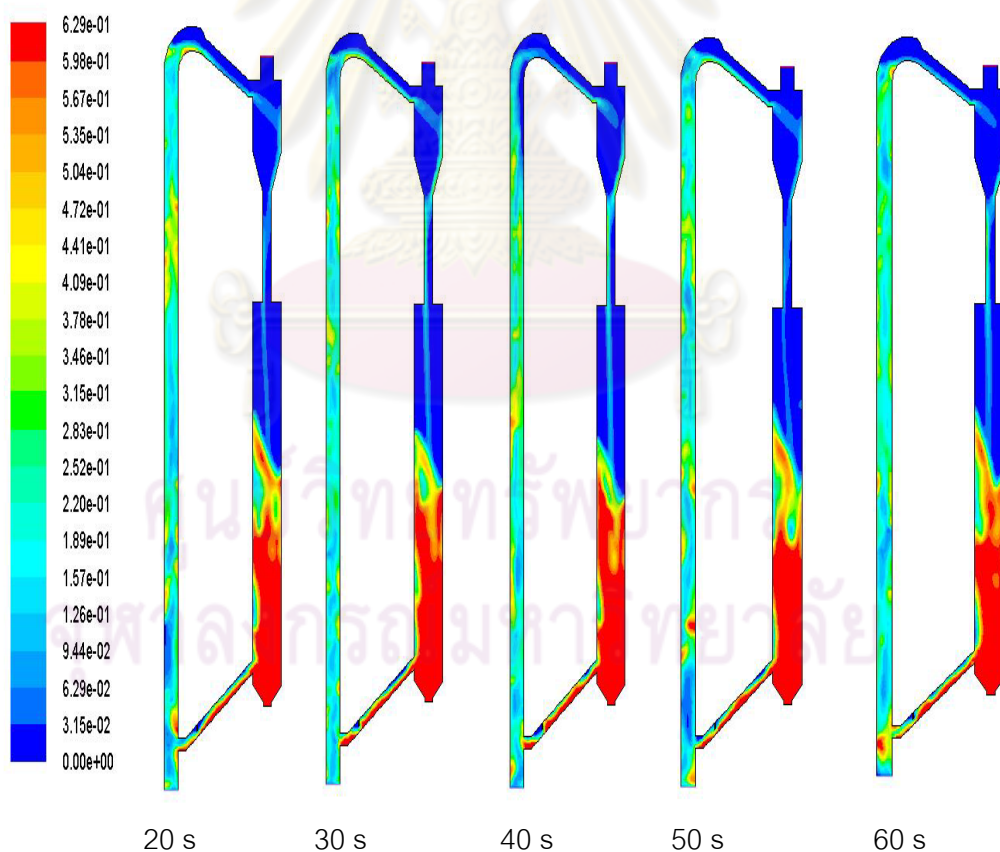
พบว่าสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยจะเริ่มลู่ออกค่าค่าหนึ่ง ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยจำนวนกริดเซลล์ของแบบจำลองเตาฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ทำการตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดอยู่ในช่วง 1,807 – 4,127 เซลล์ ที่ขนาดของกริดที่ใช้แบ่งในช่วง 0.145×10^{-2} – 0.185×10^{-2} เมตร ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้กริดที่ 3,947 และ 4,127 ในการทดลอง

4.1.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในเตาฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียน

การศึกษาดูการไหลของของแข็งภายในเตาฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียนที่เวลาตั้งแต่ 20 ถึง 60 วินาที เนื่องจากระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 20 วินาที เมื่อพิจารณาจากสัดส่วนของแข็งตลอดแนวแกนของไรเซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เพื่อที่จะทำความเข้าใจภาวะที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองได้อย่างชัดเจน ผลจากการจำลองภาวะในงานวิจัยนี้จึงถูกนำเสนอในรูปแบบของคอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของของแข็ง (Contours of Solid Volume Fraction) แสดงดังรูปที่ 4.3 สีแดงแทนสัดส่วนปริมาตรของแข็งมาก และสีน้ำเงินแทนสัดส่วนปริมาตรของแข็งน้อย (สัดส่วนของแข็งที่แสดงเป็นปริมาตรไร้หน่วย) พบว่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งจะมีการกระจายตัวของของแข็ง และแก๊สภายในส่วนของไรเซอร์อย่างไม่สม่ำเสมอ สังเกตได้จากคอนทัวร์ที่แสดง ทำให้เห็นถึงรูปแบบการไหลภายในเตาฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียนเป็นรูปแบบฟลูอิดิซ์เบดความเร็วสูง (Fast fluidized bed) ดังการจำแนกรูปแบบการไหลสำหรับระบบฟลูอิดิซ์เบด ของแก๊สและของแข็ง (Grace J. R., 1997)



รูปที่ 4.2 แสดงปริมาณสัดส่วนของแข็งตลอดแนวแกนของโรเตอร์ ณ เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.3 คอนทัวร์สัดส่วนปริมาตรของของแข็งที่ได้จากการจำลองภาวะในเตาฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียนที่เวลาต่างๆ

จากการพิจารณาพบว่ารูปแบบฟลูอิไดซ์เบดความเร็วสูง (Fast fluidized bed) ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับแผนภาพขอบเขตฟลูอิไดเซชัน (Grace J. R., 1977) แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยอาศัยค่าขนาดอนุภาคของแข็งไร้หน่วย (Dimensionless particle size : d^*) และความเร็วของแก๊สไร้หน่วย (a dimensionless gas velocity : u^*) ทำการคำนวณดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

ขนาดอนุภาคของแข็งไร้หน่วย

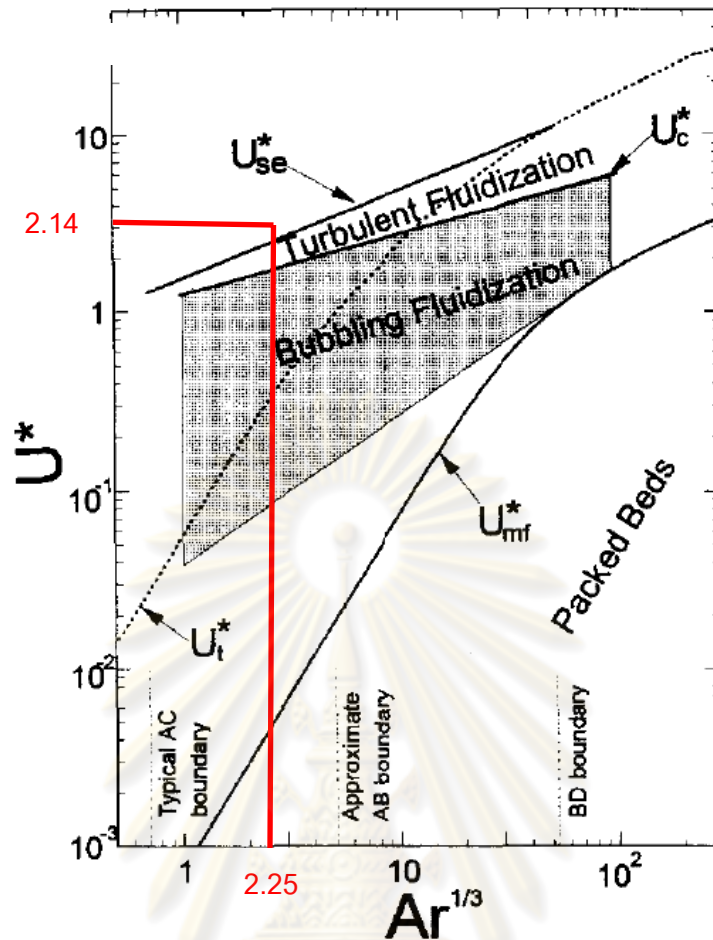
$$Ar^{1/3} = d^* = d_p \left[\frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (4.1)$$

ความเร็วของแก๊สไร้หน่วย

$$u^* = u \left[\frac{\rho_g^2}{\mu (\rho_s - \rho_g) g} \right]^{1/3} \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของไหลที่ใช้ในการทดลอง

Properties	Gas (Air)	Solid (Sand)
Density $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$	1.225	2400
Viscosity $\left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)$	1.7894×10^{-5}	-
Diameter (m)	-	250×10^{-6}
Packing Limit	-	0.64



รูปที่ 4.4 แผนภาพขอบเขตฟลูอิดเซชัน (General flow regime diagram; Grace, J. R., 1977)

แผนภาพรูปที่ 4.4 แสดงขอบเขตฟลูอิดเซชันแบบ Turbulent Fast fluidized beds แบบ Bubbling fluidized beds และแบบ Packed beds พบว่าสถานะดำเนินการภายในเครื่องปฏิกรณ์ จะตกในช่วงเหนือส่วนของเบดแบบปั่นป่วน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากภาพคอนทัวร์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Fluent พบว่าภายในส่วนของไรเซอรัททุกพลศาสตร์ภายในจะแสดงรูปแบบ แบบฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน เมื่อพิจารณาภาพคอนทัวร์ให้ดีแล้วจะพบว่าเบดมีความหนาแน่นเป็นส่วน ๆ เคลื่อนที่ภายในส่วนของไรเซอรัทเป็นช่วง ๆ ตลอดส่วนของไรเซอรัท

จากนั้นทำการพิจารณาสัดส่วนปริมาตรของของแข็งตามแนวแกนของท่อไรเซอรัทของเตาฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียนที่เวลา 20 ถึง 60 วินาที (ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว) แสดงดังรูปที่ 4.2 ขณะที่การทดลองจริงระบบใช้เวลานานกว่ามากก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่ เนื่องจากระบบจริงที่ใช้ในการทดลองไม่สามารถควบคุมให้ได้ดังเช่นในระบบคอมพิวเตอร์ ตัวอย่างเช่น ขนาดของเบดที่ใช้จริงในการทดลองซึ่งเป็นขนาดโดยประมาณ การป้อนอากาศผ่านเครื่องมือที่ควบคุมด้วยมือ รวมไปถึงภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองต่าง ๆ อีกทั้งจากรูปที่ 4.2 หลังจากเข้าสู่วินาทีที่ 20 ที่ไปแล้วยังพบการกวัดแกว่งของปริมาณสัดส่วนของแข็งเล็กน้อย จึงเป็นสิ่งยืนยันได้ว่าการทดลอง

เครื่องมือจริงอาจจะควบคุมให้เข้าสู่ระบบคงที่ยากลำบากกว่า ขณะที่บริเวณที่มีสัดส่วนปริมาตรของแข็งหนาแน่นมาก เกิดขึ้นที่บริเวณส่วนของรีเทิร์น ซึ่งเป็นส่วนต่อระหว่างท่อไรเซอร์ และดาร์นคัมเมอร์ เป็นทางเข้าของของแข็งจากดาร์นคัมเมอร์สู่ไรเซอร์ อาจเกิดการสะสมของของแข็งตรงบริเวณนี้ได้ ทำให้ตรงบริเวณทางเข้ามีสัดส่วนปริมาตรของของแข็งหนาแน่น แต่ในขณะเดียวกันยังพบว่ามีการเคลื่อนที่ไหลเข้าไปยังส่วนของดาร์นคัมเมอร์ ส่งผลให้ทรายในส่วนนี้เกิดการเคลื่อนที่ไม่เกิดการอัดตัวมากจนเกินไป ส่งผลให้ทรายเคลื่อนที่มายังส่วนของไรเซอร์ได้ เนื่องจากเบดเป็นส่วนนำความร้อนหลักในระบบ การกระจุกตัวของเบดจึง ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณนี้มีอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ ดังแสดงได้จากรูปแสดงอุณหภูมิในการทดลอง ซึ่งพบว่าอุณหภูมิในช่วงต้น ๆ ของส่วนไรเซอร์ค่อนข้างสม่ำเสมอ

4.2 สมบัติของเชื้อเพลิง

4.2.1 การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis)

องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านหินและแกลบที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ค่าพลังงานความร้อน ความหนาแน่น และขนาดของอนุภาคที่ใช้ในการทดลอง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) รวมทั้งค่าพลังงานความร้อน และขนาดของอนุภาคที่ใช้ในการทดลอง

Proximate Analysis	% By Mass		
	Coal	Palm Shell	Coconut Shell
Fixed Carbon	43.29	18.51	23.32
Volatile Matter	38.99	72.24	68.83
Moisture	12.38	5.43	6.79
Ash	5.34	3.82	1.07
Total	100	100	100

4.2.2 การวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล

การวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล ด้วยเครื่อง Bomb calories meter ค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวลแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าพลังงานความร้อนของถ่านหินและชีวมวล

	Coal	Palm Shell	Coconut Shell	Silica Sand
Gross heat (cal/g)	5,221.82	4,875.75	4,470.40	-
Size (µm)	< 1,200	< 1,200	< 1,200	200 - 300

การวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของถ่านหิน กะลาปาล์มและกะลามะพร้าว รวมถึงค่าความหนาแน่น และขนาดของเชื้อเพลิง แสดงผลเป็นค่าพลังในหน่วยแคลอรีต่อกรัม พบว่ากะลาปาล์มให้ค่าพลังงานความร้อน 4,875.75 แคลอรีต่อกรัม ซึ่งเมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนที่ได้รับจากถ่านหินซึ่งให้ค่าพลังงานความร้อน 5,221.82 แคลอรีต่อกรัม ในขณะที่กะลามะพร้าวให้พลังงาน 4,470.40 แคลอรีต่อกรัม

4.2.3 การวิเคราะห์โดยแยกธาตุ (ultimate analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยแยกธาตุเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจนและซัลเฟอร์ ผลการวิเคราะห์เป็นร้อยละองค์ประกอบของธาตุในเชื้อเพลิงแสดงดังในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์โดยแยกธาตุ (ultimate analysis)

Ultimate Analysis	% By Mass (daf)		
	Coal	Palm Shell	Coconut Shell
C	55.64	49.84	47.32
H	5.17	6.76	5.72
N	0.73	0.63	0.05
O	38.44	42.77	46.91
S	0.02	0.00	0.00
Total	100.00	100.00	100.00

4.3 การหาปริมาณอากาศปฐมภูมิต่ำสุดที่ทำให้ทรายในโรเซอ์เกิดการฟลูอิไดซ์และหมุนเวียน

ปริมาณอากาศปฐมภูมิที่น้อยที่สุดที่ทำให้ทรายซึ่งเป็นอนุภาคส่วนใหญ่ภายในระบบเกิดการฟลูอิไดซ์และหมุนเวียน โดยโรเซอ์หรือห้องเผาไหม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นท่อรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร สูง 3 เมตร การไหลของทรายจากคาร์แคมเมอร์ มาสู่บริเวณล่างของโรเซอ์ไหลผ่านแอลวาล์ว จากการสังเกตลักษณะการไหลของเบด โดยการปรับความเร็วอากาศที่ใช้ในการทดลอง เมื่อทำการปิดสวอนบนของท่อโรเซอ์ด้วยหน้าแปลนพลาสติกใสเพื่อหาความเร็วอากาศที่เหมาะสมจากการป้อน ณ ตำแหน่งส่วนล่างของโรเซอ์พบว่าอัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที เป็นปริมาณอากาศต่ำสุดที่ทำให้ทรายเกิดการฟลูอิไดซ์และหมุนเวียน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงป้อนอากาศปฐมภูมิคงที่ทุกการทดลองที่ 330 ลิตรต่อนาที

4.4 การหาปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับป้อนเข้าในสกรูพีดเดอร์ สำหรับป้อนชีวมวลเพื่อไม่ให้เปลวไฟและความร้อนไหลย้อนในถังเก็บชีวมวล

การป้อนชีวมวลจากถังเชื้อเพลิงชีวมวลจะใช้สกรูพีดเดอร์ที่ใช้ inverter ควบคุมอัตราเร็วในการป้อนเชื้อเพลิง พบว่ามักจะเกิดปัญหาในการป้อนเชื้อเพลิงที่เป็นชีวมวล เนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งได้แก่ กะลาปาล์ม และกะลามะพร้าวเบาว่ามีปริมาณสารระเหยสูง และสามารถติดไฟได้ง่ายกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหินซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักในการทดลอง และยิ่งทำการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลในระดับต่ำยิ่งส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ย้อนในถังเก็บ ซึ่งเกิดจากการที่เปลวไฟในส่วนของโรเซอ์ถูกดันเข้าไปในส่วนของสกรูพีดเดอร์ เพราะแรงดันภายในท่อโรเซอ์สูงกว่าแรงดันภายในถังเก็บชีวมวล เกิดการลุกไหม้ภายในถังเก็บ

การแก้ปัญหาในส่วนนี้นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ได้แก่

1. การป้อนปริมาณอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของถังเก็บชีวมวล 100 ลิตรต่อนาที
2. การบดย่อยชีวมวลผ่านตระแกรงแยกขนาด 1200 ไมโครเมตร
3. การใช้เหล็กกระทงชีวมวลในถังเก็บ

โดยทั้ง 3 ส่วนเป็นการทำให้ความดันภายในส่วนของถังเก็บเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าภายในส่วนของโรเซอ์ และเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของชีวมวลเพิ่มอัตราการป้อนให้มากขึ้นในแต่ละรอบการป้อน อีกทั้งยังลดปริมาณช่องอากาศภายในชีวมวลที่เกิดจากการสั่นไหวภายในตัวของชีวมวลเอง ส่งผลให้ไม่มีอากาศเกินในการเผาไหม้ได้ ส่งผลให้ลดการเกิดการเผาไหม้ย้อนกลับภายในถังเก็บชีวมวลได้

4.5 การหาปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศในการเผาไหม้ในระบบฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน

จากการทดลองพบว่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเดี่ยว และเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักกับชีวมวลที่อัตราส่วน 70 : 30 , 50 : 50 และ 30 : 70 ตามลำดับ เมื่อป้อนอัตราเชื้อเพลิงรวมที่ 7 , 8 และ 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่อัตราการป้อนอากาศร้อยละ 100 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 เพื่อทดสอบคุณสมบัติภายในโรเตอร์ที่วัสดุที่ใช้ในการสร้างท่อโรเตอร์ และเบด (ทราย) ที่ใช้สามารถทำงานได้ ไม่เกิดเถ้าหลอมเกาะติดในภายในเตาได้ โดยถ้าหลอมจะเกิดขึ้นได้ง่ายหากคุณสมบัติในเตาเผาสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.5 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินเดี่ยว และเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินผสมชีวมวลในอัตราส่วน 70 : 30 , 50 : 50 และ 30 : 70 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงรวม 7 (ก), 8 (ข) และ 9 (ค) กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยคิดปริมาณอากาศที่การเผาไหม้สมบูรณ์ ร้อยละ 100

Fuel	Air Required (L/min)
Feed 7.0 kg/hr	100% combustion
Coal 100 %	537.29
Palm shell 100 %	564.87
Coal : Palm shell 70 : 30	545.56
Coal : Palm shell 50 : 50	551.08
Coal : Palm shell 30 : 70	556.60
Coconut shell 100 %	497.19
Coal : Coconut shell 70 : 30	525.26
Coal : Coconut shell 50 : 50	517.24
Coal : Coconut shell 30 : 70	509.22

(ก)

Fuel	Air Required (L/min)
Feed 8.0 kg/hr	100% combustion
Coal 100 %	614.05
Palm shell 100 %	645.57
Coal : Palm shell 70 : 30	623.50
Coal : Palm shell 50 : 50	629.81
Coal : Palm shell 30 : 70	636.11
Coconut shell 100 %	568.22
Coal : Coconut shell 70 : 30	600.30
Coal : Coconut shell 50 : 50	591.13
Coal : Coconut shell 30 : 70	581.97

(๑)

Fuel	Air Required (L/min)
Feed 9.0 kg/hr	100% combustion
Coal 100%	690.80
Palm shell 100 %	726.26
Coal : Palm shell 70 : 30	701.44
Coal : Palm shell 50 : 50	708.53
Coal : Palm shell 30 : 70	715.62
Coconut shell 100 %	639.24
Coal : Coconut shell 70 : 30	675.33
Coal : Coconut shell 50 : 50	665.02
Coal : Coconut shell 30 : 70	654.71

(๒)

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเหตุที่ถ่านหินใช้อากาศในการเผาไหม้ต่ำกว่าชีวมวล โดยจาก ตารางที่ 4.2 และ 4.4 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์โดยประมาณ และผลการวิเคราะห์โดยการแยกธาตุ พบว่าปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิงแต่ละชนิดใกล้เคียงกัน ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิงถ่านหินสูงกว่าชีวมวลมาก เหตุผลคือปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีค่าสูง (ตารางที่ 4.2) ประกอบไปด้วยสารประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจนสูง เมื่อวิเคราะห์ผลโดยการแยกธาตุ สารประกอบในสารระเหยจึงรวมตัวกับปริมาณคาร์บอนคงตัวเดิมส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิงมีค่าใกล้เคียงกัน และจากตารางที่ 4.8 เป็นการคำนวณอากาศเผาไหม้สมบูรณ์ที่เชื้อเพลิงต้องการทั้งหมด โดยคำนวณจากผลการวิเคราะห์โดยการแยกธาตุ ดังแสดงในภาคผนวก ง ขณะที่เมื่อทำการจริง อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะถูกป้อนเพิ่มจากปริมาณอากาศที่เชื้อเพลิงต้องการจริงอีกร้อยละ 20 (ประจักษ์ ทรัพย์อุดมมาก, 2550) เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้ทดลองเป็นเชื้อเพลิงของแข็ง ต้องการอากาศพอสุงมาก (ระหว่างร้อยละ 15 – 60) โดยสามารถแบ่งอากาศที่ใช้ออกเป็น 2 ส่วน อากาศส่วนแรกเพื่อทำปฏิกิริยากับสารระเหยที่ถูกไล่ออกจากพื้นผิวเชื้อเพลิงแข็งอย่างรวดเร็ว และอากาศส่วนที่สองเพื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในกากของแข็ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบและอุปกรณ์ด้วย (กัญจนา บุญเกียรติ, 2544)

4.6 อุณหภูมิที่สามารถดำเนินการได้จากการป้อนเชื้อเพลิง ที่ตำแหน่งป้อนอากาศทุติยภูมิที่แตกต่างกัน

ความร้อนที่เกิดจากการทดลองได้จากกระบวนการเผาไหม้แบบให้อากาศสมบูรณ์ ซึ่งเกิดจากการผสมระหว่างอัตราเชื้อเพลิงและอากาศ (ดังตารางที่ (4.5 (ก), (ข) และ (ค)) ที่ใช้ในเตาฟลูอิดไอดีแบบหมุนเวียน

จากการศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในส่วนของโรเตอร์ที่ได้กล่าวผ่านมาแล้ว พบว่าอุทกพลศาสตร์ภายในส่วนนี้เกิดการไหลเวียนแบบความเร็วสูง (Fast fluidized bed) ทำให้พบว่าถึงแม้จะให้อากาศในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์แต่เวลาที่อนุภาคของเชื้อเพลิงอยู่ภายในส่วนของโรเตอร์นั้นสั้นมาก หากใช้ระบบดักจับและคัดแยกอนุภาคของแข็งและแก๊สที่มีประสิทธิภาพต่ำย่อมมีโอกาสที่เชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หลุดลอดออกไปจากระบบได้มากยิ่งขึ้น

โดยปริมาณอากาศที่ให้นั้นจะให้ผ่านสองส่วนหลัก ส่วนแรกนั้นจะเป็นส่วนของอากาศปฐมภูมิซึ่งให้ผ่านแผ่นกระจายอากาศคงที่ที่ 330 ลิตรต่ออนาที ส่วนที่สองจะป้อนอากาศทุติยภูมิในตำแหน่ง แตกต่างกันว่าที่ 1 , 2 และ 2.4 เมตร เมื่อวัดจากแผ่นกระจายอากาศที่อัตราการป้อนอากาศเกินพอ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามที่ปริมาณของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดต้องการ ซึ่งความเร็วของอนุภาคจากแผ่นกระจายอากาศนั้นจะมีความเร็ว 0.7 เมตรต่อวินาที และยิ่งเมื่ออนุภาคผ่านเหนือจุดป้อนอากาศส่วนที่สองไปอนุภาคยิ่งจะมีความเร็วสูงขึ้นอีก ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีไซโคลนซึ่งอยู่สูง 2.80

เมตร จากแผ่นกระจายอากาศคอยด์กักจับและคัดแยกอนุภาคของแข็งออกจากแก๊ส และนำเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดเข้าสู่โรเตอร์มาเผาไหม้ต่อไป เพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ที่สุด

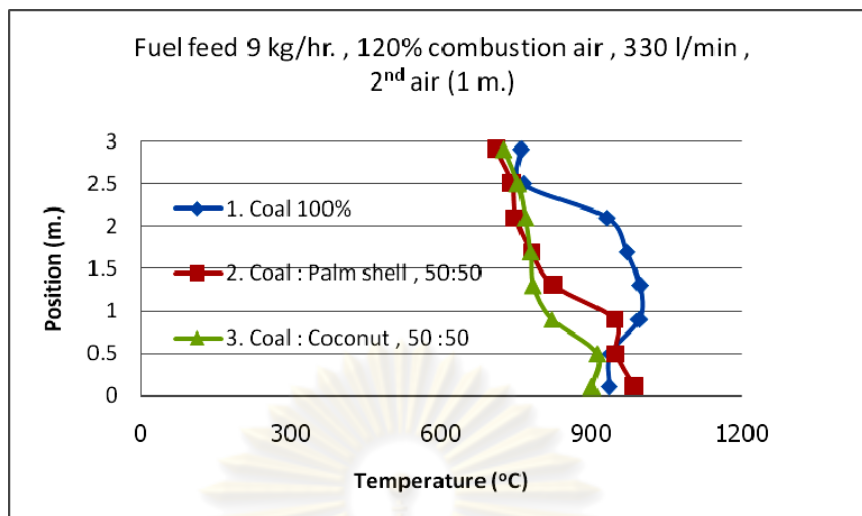
ขนาดของถ่านหินและชีวมวลที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1200 มิลลิเมตร หากความเร็วของอากาศในโรเตอร์เท่ากันโดยที่ไม่คำนึงถึงการสลายตัวหรือการเปลี่ยนรูปของเชื้อเพลิง เมื่อเกิดการเผาไหม้ ชีวมวลย่อยมเคลื่อนที่เร็วกว่าถ่านหิน หรือมีเวลาอยู่ในโรเตอร์น้อยกว่าถ่านหิน เกิดการเผาไหม้ในโรเตอร์ได้น้อยกว่าถ่านหิน

หากคำนึงถึงการสลายตัวทางความร้อนหรือการเปลี่ยนรูปไปเมื่อเกิดการเผาไหม้ พบว่าเมื่อเชื้อเพลิงผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ความชื้นที่อยู่ในเชื้อเพลิงจะระเหยเป็นไอน้ำ และความร้อนที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 - 600 องศาเซลเซียส สารระเหยง่ายก็จะถูกเผาไหม้ ออกไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งอุณหภูมิของทรายที่ใช้เป็นเบด หรืออุณหภูมิในโรเตอร์ สูงมากกว่า 600 องศาเซลเซียส ดังนั้น เมื่อเชื้อเพลิงเข้าสู่โรเตอร์ ความชื้นและสารระเหยง่ายก็จะสลายตัวออกไปอย่างรวดเร็วจาก บริเวณส่วนต้น ๆ ของโรเตอร์ ทำให้เชื้อเพลิงในส่วนตอนปลายอยู่ในสภาพที่เปลี่ยนไปคือ มีความเป็นรูพรุนสูง ความหนาแน่นลดลง และลอยตัวหลุดออกไปจากโรเตอร์ได้ง่ายขึ้น เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ในบริเวณสูงจากแผ่นกระจายอากาศเป็นถ่านชาร์มีขนาดเล็กกว่าปกติและไหลออกจากโรเตอร์ด้วยความเร็วสูง ซึ่งอาจมีขนาดเล็กและมีความเร็วมากจนกระทั่งไหลออกไปพร้อมกับฟลูแก๊สโดยที่ไซโคลนดักจับไม่ได้

ในการทดลองป้อนเชื้อเพลิงในอัตราที่เท่ากันที่ 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เพื่อไม่ให้อุณหภูมิภายในเตาสูงเกินไป ส่งผลให้ทรายเกิดการหลอมตัวเป็นก้อนแข็งใหญ่ ดังรูปที่ 4.5 ติดอยู่ในเตาทำให้ประสิทธิภาพของเตาลดลง แตกต่างกันเพื่อดูผลความร้อนที่ได้รับ ณ ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิต่าง ๆ เมื่อทำการเผาไหม้ที่อากาศเกินพอร้อยละ 20

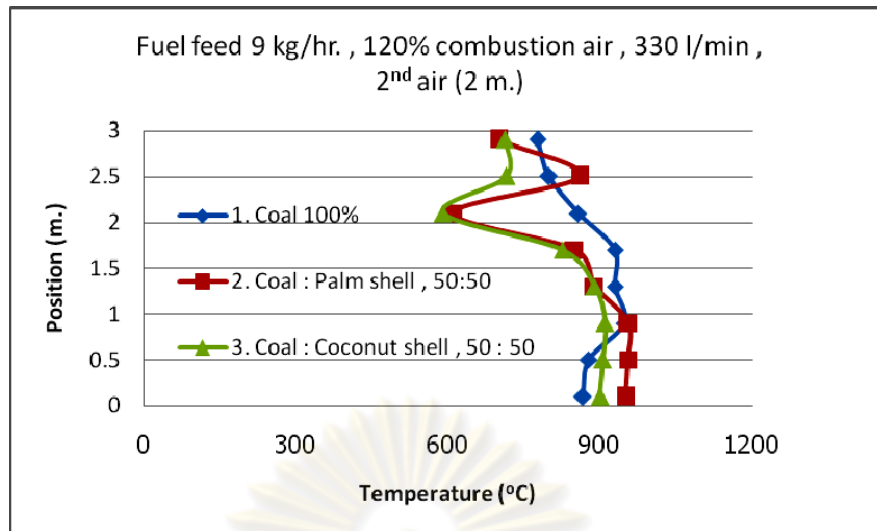


รูปที่ 4.5 แสดงการหลอมตัวของเบดที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส



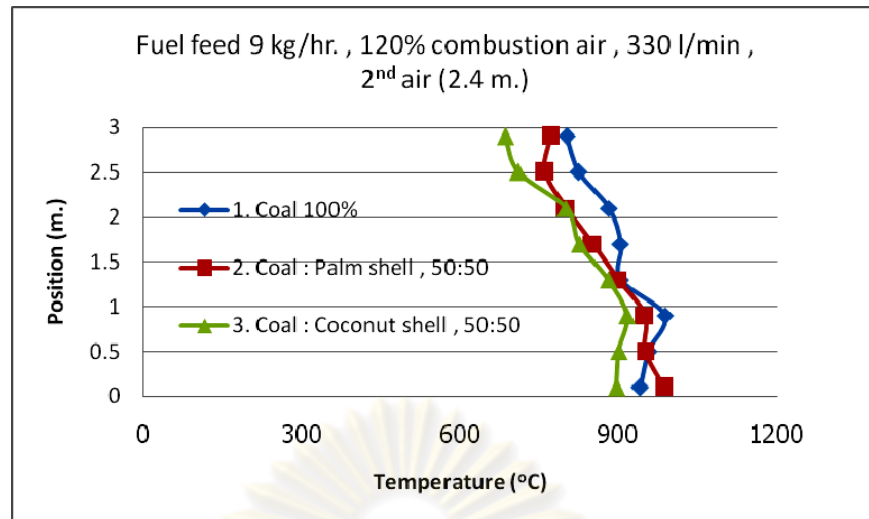
รูปที่ 4.6 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที ป้อน อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 1 เมตร

1. ถ่านหินร้อยละ 100 ป้อน 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม (690.80 ลิตรต่อนาที) คิดเป็นร้อยละ 120 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 1 เมตร อัตราการป้อนอากาศ 360.80 ลิตรต่อนาที
2. ถ่านหิน:กะลาปาล์ม , 50:50 ป้อน 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม (708.53 ลิตรต่อนาที) คิดเป็นร้อยละ 120 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที อากาศที่สกัดตัวไฟเตอร์ของกะลาปาล์ม 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 1 เมตร อัตราการป้อนอากาศ 278.53 ลิตรต่อนาที
3. ถ่านหิน:กะลามะพร้าว , 50:50 ป้อน 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม (665.02 ลิตรต่อนาที) คิดเป็นร้อยละ 120 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที อากาศที่สกัดตัวไฟเตอร์ของกะลามะพร้าว 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 1 เมตร อัตราการป้อนอากาศ 235.02 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.7 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 120 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที ป้อน อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2 เมตร

1. ถ่านหินร้อยละ 100 อัตราการป้อน 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม (690.80 ลิตรต่อนาที) คิดเป็นร้อยละ 120 ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อ นาที อากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2 เมตร 360.80 ลิตรต่อนาที
2. ถ่านหิน:กะลาปาล์ม , 50:50 ป้อน 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการป้อนอากาศรวม (708.53 ลิตรต่อนาที) คิดเป็นร้อยละ 120 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที อัตราการป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของกะลาปาล์ม 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2 เมตร 278.53 ลิตรต่อนาที
3. ถ่านหิน:กะลามะพร้าว , 50:50 ป้อน 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม (665.02 ลิตรต่อ นาที) คิดเป็นร้อยละ 120 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที อัตราการป้อนอากาศที่สกรูพีดเดอร์ของกะลามะพร้าว 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิ ตำแหน่ง 2 เมตร 235.02 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.8 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโรเซออร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 120 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที ป้อน อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2.4 เมตร

1. ถ่านหินร้อยละ 100 อัตราการป้อน 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม (690.80 ลิตรต่อนาที) คิดเป็นร้อยละ 120 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อ นาที อากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2.4 เมตร 360.80 ลิตรต่อนาที
2. ถ่านหิน:กะลาปาล์ม , 50:50 อัตราการป้อน 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการป้อนอากาศ รวม (708.53 ลิตรต่อนาที) คิดเป็น 120 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อ นาที อัตราการป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของกะลาปาล์ม 100 ลิตรต่อนาที อัตรา การป้อนอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2.4 เมตร 278.53 ลิตรต่อนาที
3. ถ่านหิน:กะลามะพร้าว , 50:50 ป้อน 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการป้อนอากาศรวม (665.02 ลิตรต่อนาที) คิดเป็นร้อยละ 120 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อ นาที อัตราการป้อนอากาศที่สกรูฟีดเดอร์ของกะลามะพร้าว 100 ลิตรต่อนาที อากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2.4 เมตร 235.02 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิขึ้นไปใน ตำแหน่งที่สูงขึ้นมีผลต่ออุณหภูมิภายในโรเซออร์ กล่าวคืออุณหภูมิภายในโรเซออร์ที่ได้รับอากาศทุติย ภูมิป้อน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ กันนั้นจะส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรเซออร์มีความสม่ำเสมอโดย ช่วง 1 เมตร จากแผ่นกระจายอากาศความร้อนของทราเยจะมีอุณหภูมิประมาณ 600 องศา เซลเซียส ซึ่งจะทำให้สารระเหย และความชื้นในเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้เป็นอิทธิพลให้ปริมาณ ความร้อนในช่วงนี้ จากนั้นความร้อนที่ได้จะเกิดจากอิทธิพลของคาร์บอนคงตัวของเชื้อเพลิง ซึ่ง

การเผาไหม้ในส่วนนี้จำเป็นต้องใช้อากาศปริมาณหนึ่งที่เหมาะสมในการเผาไหม้ในโรเตอร์แนวโน้ม ทำให้อุณหภูมิสูงมากขึ้นตลอดโรเตอร์ เนื่องจากด้านล่างของโรเตอร์เป็นตำแหน่งที่มีปริมาณอากาศหรือออกซิเจนมาก และมีความเร็วของอากาศค่อนข้างสูงอยู่แล้ว การเผาไหม้ที่ไม่เต็มอากาศทุกติตยภูมิ จะส่งผลให้ความร้อนสูงในบริเวณส่วนต้นของโรเตอร์สูงและจะต่ำลงไปเรื่อย ๆ ตลอดความสูงของโรเตอร์ เนื่องจากการความต้องการใช้ออกซิเจนในการเผาไหม้คาร์บอนคงตัว ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนแข็งเป็นเหตุให้เกิดการเผาไหม้ที่ตำแหน่งสูง ๆ ของส่วนโรเตอร์ ฉะนั้น ตำแหน่งการป้อนอากาศทุกติตยภูมิจึงมีผลต่ออุณหภูมิภายในโรเตอร์

โดยเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.6 ที่ตำแหน่งการป้อนอากาศทุกติตยภูมิตำแหน่ง 1 เมตร เป็นตำแหน่งการป้อนที่สูงห่างจากจุดป้อนอากาศปฐมภูมิ (อากาศจากโบว์เวอร์ (Bower)) และอากาศที่ป้อนจากสกรูพีดเดอร์ ทำให้ตำแหน่งนี้มีปริมาณอากาศมาก และความเร็วอากาศภายในโรเตอร์สูง ปริมาณอากาศที่มากเกินไปส่งผลให้การเผาไหม้ไม่ดี เนื่องจากอากาศที่มากเกินไปจะดูดความร้อนและพาความร้อนออกไปจากตำแหน่งนี้ด้วย อีกทั้งความเร็วอากาศที่สูงยังทำให้เวลาในการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงภายในโรเตอร์น้อย ส่งผลให้บริเวณเหนือจากตำแหน่งป้อนที่ 1 เมตร ความร้อนที่ได้จะลดลงเรื่อย

จากรูป 4.7 ที่ตำแหน่งการป้อนอากาศทุกติตยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตรพบว่าอุณหภูมิจะตกลงในตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศ เนื่องจากอากาศที่ป้อนเข้าไปเป็นอากาศเย็นจากภายนอกกระบวนการ อีกทั้งยังป้อนเข้าไปในอัตราความเร็วสูง จึงส่งผลให้ความร้อน ณ ตำแหน่งนี้มีอุณหภูมิลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะเชื้อเพลิงที่เป็นเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินและชีวมวล จากที่กล่าวข้างต้นพบว่าอุณหภูมิที่ได้รับจากบริเวณตำแหน่งสูงของโรเตอร์ ได้รับอิทธิพลจากการเผาไหม้ของคาร์บอนคงตัว การที่อุณหภูมิเชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ในขณะที่เชื้อเพลิงถ่านหินเพียงอย่างเดียวนั้นลดลงเพียงเล็กน้อยแสดงว่าการเผาไหม้ที่บริเวณความสูงนี้น่าจะมาจากอิทธิพลของเชื้อเพลิงถ่านหิน ในขณะที่ชีวมวลที่ความสูงนี้จะมีขนาดเล็ก และเบา ทางการป้อนอากาศในตำแหน่งนี้จึงส่งผลให้ชีวมวลมีโอกาสหลุดไปพร้อมฟลูแก๊สได้มากขึ้น ส่งผลให้มีเวลาในเผาไหม้น้อย

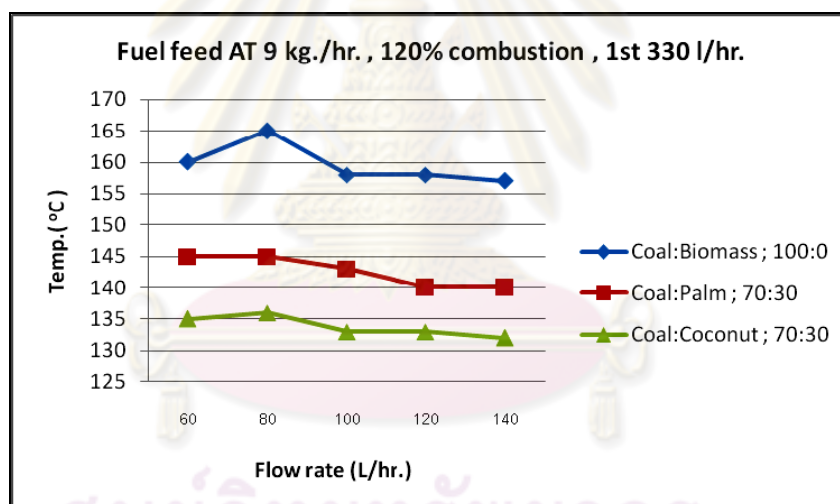
ขณะที่ตำแหน่งการป้อนอากาศทุกติตยภูมิที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร จากรูป 4.8 มีลักษณะของอุณหภูมิลดลงคล้ายคลึงกับการป้อนอากาศทุกติตยภูมิ ณ ตำแหน่ง 2 เมตร คือมีอุณหภูมิลดลงที่ตำแหน่งของการป้อนอากาศ และจะสูงขึ้นเมื่ออยู่เหนือส่วนของตำแหน่งการป้อนอากาศ

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งส่วนของโรเตอร์ ที่ตำแหน่ง 2.4 เมตร ทำให้อุณหภูมิลดลงสูงที่สุด อันเนื่องจากการป้อนอากาศ ณ ตำแหน่งนี้เป็นการป้อนอากาศส่วนปลายของโรเตอร์ ทำให้ความเร็วของอากาศภายในส่วนของโรเตอร์ที่ต่ำกว่าความสูงนี้มีความเร็วที่เหมาะสม อนุภาคของเชื้อเพลิงภายในมีเวลาเพียงพอในการเผาไหม้ การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องผลิต

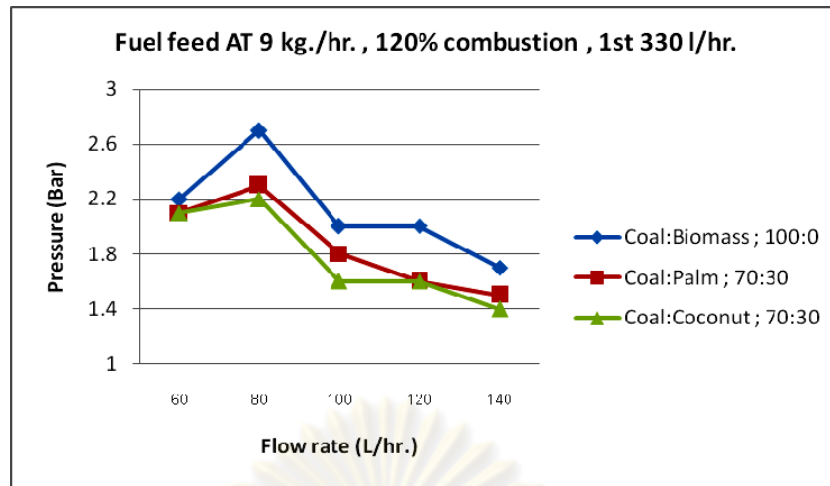
ไอน้ำที่สร้างขึ้น จะทำการทดลองที่ภาวะการป้อนเชื้อเพลิงอัตรา 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และการป้อนอากาศทุกติงที่มีตำแหน่ง 2.4 เมตร

4.7 การศึกษาเชื้อเพลิงต่อผลของเครื่องผลิตไอน้ำที่สร้างขึ้น

การทดลองที่ภาวะ การป้อนอากาศเท่ากัน เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของถ่านหินมากกว่าจะให้ความร้อนได้มากกว่า (ถ่านหิน : ชีวมวล เท่ากับ 70 : 30) เนื่องจากค่าความร้อนของถ่านหินสูงกว่าชีวมวล ประกอบกับการที่ถ่านหินน่าจะมีเวลาในการเผาไหม้อยู่ในโรเตอร์นานกว่า เนื่องจากมีขนาดใหญ่ แข็ง และความหนาแน่นสูงกว่าทำให้มีโอกาสหลุดออกจากไซโคลนไปพร้อมกับฟลูแก๊สได้น้อยกว่า รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดง อุณหภูมิ และความดัน จากเครื่องผลิตไอน้ำที่สร้างขึ้นที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงรวมที่ 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง. ที่อัตราการป้อนน้ำจากส่วนเก็บน้ำ (Water Pre-Heater) ต่าง ๆ ขณะที่น้ำจากส่วนเก็บมีอุณหภูมิ 80 – 85 °C



รูปที่ 4.9 อุณหภูมิไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 120 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่ออนาที



รูปที่ 4.10 ความดันไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวมร้อยละ 120 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าการป้อนน้ำจากส่วนอุ่นน้ำที่อัตรา 80 ลิตรต่อชั่วโมงส่งผลให้ได้รับอุณหภูมิไอน้ำ และความดันไอน้ำที่สูงที่สุด โดยอุณหภูมิไอน้ำเมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านเดียวเท่ากับ 165 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำที่ 2.7 บาร์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลาปาล์ม อุณหภูมิไอน้ำที่ผลิตได้เท่ากับ 145 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำเท่ากับ 2.3 บาร์ และเมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลามะพร้าว อุณหภูมิไอน้ำที่ผลิตได้เท่ากับ 136 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำเท่ากับ 2.2 บาร์

4.8 ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตไอน้ำที่สร้างขึ้น

อุณหภูมิ ความดันของเครื่องผลิตไอน้ำที่ได้รับความร้อนจากผนังเตาฟลูอิดไอดีซ์เบดแบบหมุนเวียน สามารถคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สร้างขึ้นได้ ดังสมการที่ 4.3

$$\eta = \frac{(H_{out} - H_{in}) \times M_s}{(HHV \times M_f) - Heat_{fluegas}} \times 100\% \quad (4.3)$$

เมื่อ

- η = ประสิทธิภาพ (%)
- H_{out} = เอนทาลปีไอน้ำที่ผลิตได้ (KJ/kg.)
- H_{in} = เอนทาลปีน้ำถึงอุ่น (KJ/kg)
- M_s = อัตราการผลิตไอน้ำ (kg/hr.)

$$M_f = \text{อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/hr.)}$$

$$HHV. = \text{ค่าพลังงานความร้อนเชื้อเพลิง (KJ/kg.)}$$

$$Heat_{fluegas} = \text{พลังงานที่จากฟลูแก๊สร้อน (KJ/hr.)}$$

เชื้อเพลิงป้อนรวม 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ป้อนน้ำจากถังอุ่นเมื่ออุณหภูมิ 80 – 85 องศาเซลเซียส พลังงานที่ได้จากน้ำจากถังอุ่น (H_{in}) เท่ากับ 355.9 กิโลจูลต่อกิโลกรัม อัตราการป้อนเท่ากับ 80 ลิตรต่อชั่วโมง ทำการผลิตไอน้ำที่ภาวะสูงสุด และทำการวัดปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้โดยวิธีกลั่นตัวของไอน้ำ (Condense) พลังความร้อนที่ได้จากฟลูแก๊สร้อน ($Heat_{fluegas}$) เท่ากับ 403.09 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เมื่อฟลูแก๊สร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส ที่ 0.58 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พลังความร้อนของถ่านหินเท่ากับ 21,931.64 กิโลจูลต่อกิโลกรัม พลังความร้อนของกะลาปาล์มเท่ากับ 20,478.15 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และพลังงานความร้อนของกะลามะพร้าวเท่ากับ 18,775.68 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

พบว่าเมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินเตี้ยวป้อน สามารถผลิตไอน้ำได้ที่ 20.08 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันไอน้ำ 2.7 บาร์ อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพที่ได้รับร้อยละ 24.96

พบว่าเมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลาปาล์มที่อัตราส่วน 70:30 ป้อน สามารถผลิตไอน้ำได้ที่ 17.96 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันไอน้ำ 2.3 บาร์ อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพที่ได้รับร้อยละ 22.32

และพบว่าเมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลามะพร้าวที่อัตราส่วน 70:30 ป้อน สามารถผลิตไอน้ำได้ที่ 10.29 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันไอน้ำ 2.2 บาร์ อุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพที่ได้รับร้อยละ 13.01

ขณะที่น้ำป้อนเท่ากับ 80 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถผลิตไอน้ำได้ในช่วง 10 – 20 ลิตรต่อชั่วโมง น้ำส่วนที่ยังไม่กลายเป็นไอน้ำจะถูกป้อนกลับจากด้านล่างของส่วนเก็บไอน้ำไปยังส่วนอุ่นน้ำเพื่อเวียนในระบบอีกครั้ง

ประสิทธิภาพที่ได้จากเครื่องผลิตไอน้ำที่สร้างขึ้นมีค่าน้อย ด้วยเหตุผลจากพื้นที่ผิวของการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างจากท่อสแตนเลสขนาด 1/2 นิ้วที่ใช้สัมผัสกับส่วนของผนังโรเตอร์มีเพียง 996.95 ตารางเซนติเมตร ทำให้เวลาของน้ำที่ใช้ในการป้อนมีระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนเร็ว ส่งผลให้น้ำส่วนหนึ่งกลายเป็นไอน้ำได้ไม่ทั้งหมด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 อุทกพลศาสตร์ของเตา

- 1) แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ 2 มิติ เตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน สร้างจากโปรแกรม Ansys มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 3 เมตร
- 2) แบบจำลองนำมาคำนวณในโปรแกรม Fluent พบว่ามีลักษณะเป็นเบดแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed)
- 3) เบดมีการกระจุกตัวบริเวณส่วนบนของรีเทิร์น ส่งผลให้ความร้อนส่วนต้นของโรเตอร์มีความคงที่
- 4) เตาฟลูอิดไคซ์เบดเข้าสู่ภาวะคงที่ในเวลา 20 วินาที

5.2 คุณหมุมิของเตาเผา

- 1) คุณหมุมิเฉลี่ยตลอดโรเตอร์เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของการป้อนถ่านหินที่เพิ่มขึ้น ที่อัตราการป้อนอากาศเท่ากัน
- 2) ที่ภาวะการทดลองเดียวกัน คุณหมุมิเฉลี่ยตลอดโรเตอร์เพิ่มมากขึ้นหากมีป้อนอากาศหุติยภูมิที่ตำแหน่งสูงขึ้น แต่ตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศหุติยภูมิ คุณหมุมิจะลดต่ำลง
- 3) คุณหมุมิเฉลี่ยตลอดโรเตอร์อยู่ที่ 650 ถึง 1000 องศาเซลเซียสที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยไม่ทำให้เกิดการหลอมตัวของทรายที่ใช้เป็นเบดในการทดลอง
- 4) คุณหมุมิเฉลี่ยตลอดโรเตอร์สูงสุด ที่ตำแหน่งการป้อนอากาศหุติยภูมิ 2.4 เมตร

5.3 เครื่องผลิตไอน้ำ

- 1) คุณหมุมิน้ำป้อนเครื่องผลิตไอน้ำ ที่สร้างได้จากส่วนอุ่นน้ำ (Heat Section) เท่ากับ 80 ถึง 85 องศาเซลเซียส พลังงานที่ได้จากน้ำจากถังอุ่น (H_{in}) เท่ากับ 355.9 กิโลจูลต่อ กิโลกรัม
- 2) คุณหมุมิไอน้ำผลิตได้สูงสุดเท่ากับ 165 องศาเซลเซียสและความดันเท่ากับ 2.7 บาร์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินเดียวในการเผาไหม้ สามารถผลิตไอน้ำได้เท่ากับ 20.08 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อทำการป้อนน้ำจากถังอุ่นน้ำที่ 80 ลิตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพที่ได้รับร้อยละ 24.96
- 3) คุณหมุมิไอน้ำผลิตได้สูงสุดเท่ากับ 145 องศาเซลเซียสและความดันเท่ากับ 2.3 บาร์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินต่อกะลาปาล์ม ที่อัตรา 70:30 ในการเผาไหม้ สามารถผลิตไอน้ำได้

เท่ากับ 17.96 ลิตรต่อชั่วโมงเมื่อทำการป้อนน้ำจากถังอุณหภูมิตั้งที่ 80 ลิตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพที่ได้รับร้อยละ 22.32

- 4) อุณหภูมิไอน้ำผลิตได้สูงสุดเท่ากับ 136 องศาเซลเซียสและความดันเท่ากับ 2.2 บาร์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินต่อกะลามาะพร้าว 70:30 ในการเผาไหม้ สามารถผลิตไอน้ำได้เท่ากับ 10.29 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อทำการป้อนน้ำจากถังอุณหภูมิตั้งที่ 80 ลิตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพที่ได้รับร้อยละ 13.01
- 5) พลังความร้อนที่ได้จากฟลูแก๊สร้อน ($Heat_{fluegas}$) เท่ากับ 403.09 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เมื่อฟลูแก๊สร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส ที่ 0.58 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

5.4 ข้อเสนอแนะ

- 1) ระบบเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนในงานวิจัยนี้ ใช้ความเร็วลมค่อนข้างมาก จึงไม่เหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงที่มีน้ำหนักเบาหรือมีความหนาแน่นน้อย เนื่องจากจะลอยออกจากโรเตอร์อย่างรวดเร็ว เผาไหม้ไม่สมบูรณ์
- 2) ควรปรับโรเตอร์ให้สูงขึ้นเพื่อทำให้เชื้อเพลิงได้มีเวลาเผาไหม้ในโรเตอร์ได้นานมากขึ้น ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้ให้สูงขึ้นได้
- 3) ควบคุมอุณหภูมิในโรเตอร์ไม่ให้สูงเกิน 1000 องศาเซลเซียส เนื่องจากจะทำให้เกิดเถ้าหลอมอุดตันเครื่อง ส่งผลให้เตาดับ และทำให้เทอร์โมคัปเปิลเสื่อมสภาพเร็ว
- 4) ประสิทธิภาพจากเครื่องผลิตไอน้ำที่สร้างขึ้นยังสามารถพัฒนาให้สูงขึ้นได้ โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างส่วนของผนังโรเตอร์ และส่วนแลกเปลี่ยน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กัญจนา บุญยเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- จรัล จิรวินบูลย์. หม้อไอน้ำ ฉบับใช้งานในโรงงาน. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2553.
- ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์. การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- ดวงเพ็ญ ศรีบัวงาม และ คณะ. การใช้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบด. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- นคร ทิพยาวงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพมหานคร. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น) , 2552.
- นพพล มังกรานนท์ชัย. การจำลองการถ่ายโอนความร้อนในไรเซอร์ของเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- ประจักษ์ ทรัพย์อุดมมาก. การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- ปิยะพันธ์ จะกอ. การควบคุมการปล่อยแก๊สของการเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- พรเทพ จิตวุฒิกโร, ภัทรารุช พฤกษ์อมรพันธ์, แสง แซ่เล้า. การศึกษาการเผาไหม้ชีวมวลในเตาฟลูอิโดซ์เบด. ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2538.
- พล สาเททอง. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฟลูอิโดซ์เบด. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
- พล สาเททอง และ คณะ. ระบบการใช้ถ่านหินลิกไนท์โดยการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบด. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.

ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ. เทอร์โมไดนามิกสรีวิศวกรรมเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ยศกร ประทุมวัลย์. ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มเพื่อการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ศันสนีย์ กำธนาทรัพย์. ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ในฟลูอิดไดซ์เบด
แบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

สมบัติ กীরติพรานนท์. การจำลองอุทกพลวัตของอนุภาคในโรเตอร์ของกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด
แบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. ฟลูอิดไดซ์เซชัน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2528.

ลำเจียร จักรใจ. การเผาไหม้. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ภาษาอังกฤษ

Available from : [http:// www.boilerthailand.com](http://www.boilerthailand.com)

Available from : [http:// www.fb.kaist.ac.th](http://www.fb.kaist.ac.th)

Available from : [http:// www.gec.com](http://www.gec.com)

Available from : [http:// www.kmutt.ac.th](http://www.kmutt.ac.th)

Available from : [http:// www.promma.ac.th](http://www.promma.ac.th)

Available from : [http:// www. thailandindustry.com](http://www.thailandindustry.com)

Akira, N.; Toshihiko, I.; Hisanao, H.; Nobuyuki, S.; and Masahiro H. Application of CFB
(Circulating Fluidized Bed) to Sewage Sludge Incinerator. NKK Technical
Review 86 (2002): 30-35
Fluent Inc. Fluent 6.2.16 User's Guide [Electronic
Documentation], Fluent, 2003.

Amand, L. E.; and Leckner, B. Co-Combustion of Sewage Sludge with Wood/Coal in a
Circulating Fluidized Boiler-A study of gaseous Emissions. Presented at the First
Biennial Meeting of the Scandinavian-Nordic Section of the Combustion Institute

- at Charmer University of Technology. Goteborg (April 18-20 2001).
- Basu, P., and Fraser, S. A., Circulating Fluidized Bed Boilers: Design and Operations, Reed Publishing (USA), 1991.
- Benyahia, S., Simulation of Particles and Gas Flow Behavior in The Riser Section of a Circulating Fluidized Bed Using The Kinetic Theory Approach for the Particulate Phase, Powder Technology, 112 (2000): 24 – 33.
- Chalermssinsuwan, B., Kuchonthara, P., and Piumsomboon, P., Effect of circulating fluidized bed reactor riser geometries on chemical reaction rates by using CFD simulations, Chemical Engineering and Processing, 48 (2009): 165 – 177.
- Cruz, E., Steward, F. R., and Pugsley, T., New closure models for CFD modeling of high – density circulating fluidized beds, Powder Technology, 169 (2006): 115 – 122.
- ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progress 48 (1952):89-94
- Eskin N., Gungor A., Ozdemir K. Effects of operational parameters on the thermodynamic performance of FBCC steam power plant, Fuel, 88, (2009), 54-66.
- Fang, M.; Yang, L.; Chen, G.; Shi, Z.; Luo, Z.; and Cen, K. Experimental Study on Rice Husk Combustion in a Circulating Fluidized Bed. Fuel Processing Technology 85 (2004): 1273-1282.
- Ghani W.A.W.A.K., Alias A.B., Savory R.M., Cliffe K.R. Co-combustion of agricultural residues with coal in fluidized bed combustor, Waste Management, 29, (2009), 767-773.
- Gidaspow, D., Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Description, New York: Academic Press, 1994.
- Gomez, L. C., and Milioli, F. E., Numerical study on the influence of various physical parameters over the gas – solid two – phase flow in the 2D riser of a circulating fluidized bed, Powder Technology, 132 (2003): 216 – 225.
- Grace, J. R., Avidan, A. A., and Knowlton, T. M., Circulating Fluidized Beds. London; New York: Blackie Academic & Professional, 1997.
- Grace, J. R.; Avedan, A. A.; and Knowlton, T. M. Circulating Fluidized Beds. London: Chapman & Hall, 1977.

- Gungor A. A study on the effects of operational parameters on bed-to-wall heat transfer, Applied Thermal Engineering, 29, (2009), 2280–2288.
- Gungor A. Analysis of combustion efficiency in CFB coal combustors, Fuel, 87, (2008), 1083-1095.
- Kunii, D., and Levenspiel, O., Fluidization Engineering 2nd Edition. Butterworth-Heinemann, Stoneham, 1991.
- Kunii, D.; and Levenspiel, O. Fluidization engineering. New York: John Wiley and Sons Inc, 1969.
- Mastellone, M. L., and Arena, U., The effect of particle size and density on solids distribution along the riser of a circulating fluidized bed, Chemical Engineering Science, 54 (1999): 5383 – 5391.
- Noymer, P. D., Hyre, M. R., and Glicksman, L. R., The effect of bed diameter on near-wall hydrodynamics in scale-model circulating fluidized beds, International Journal of Heat and Mass Transfer, 43 (2000): 3641 – 3649.
- Patankar, S.V. Numerical Heat Transfer and fluid flow. Hardcover (1980)
- Purbolaksono J., Khinani A., Ali A.A., Rashid A.Z., Nordin N.F. Iterative technique and finite element simulation for supplemental condition monitoring of water, Simulation Modelling Practice and Theory, 17, (2009), 897-910.
- Rogmuae, T.; Jabouille, F.; and Torero, J.L. Effect of excess air on grate combustion of solid wastes and on gaseous products. International Journal of Thermal Sciences (2008).
- Topal, H.; Atimtay, A. T.; and Durmaz, A. Olive Cake Combustion in a Circulating Fluidized Bed. Fuel 82 (2003): 1049-1056.
- Velden M.V.D., Baeyens J., Dougan B., Mcmurdo A. Investigation of operational parameters for an industrial CFB, China Particuology, 5, (2007), 247-254.
- Werther, J.; Hartge, E. U.; Lucke, K.; Fehr, M.; Amand, L. E; and Leckner, B. New Air-Staging Techniques for Co-Combustion in Fluidized Bed Combustors. Conference Research for Power Plant Technology (October 10-12 2000).



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ข้อมูลที่ได้จากการจำลองภาวะ

ตารางที่ ก1 ข้อมูลสัดส่วนปริมาตรของของแข็ง (ϵ_s) ตามแนวแกนตลอดความสูงของโรเตอร์จากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนที่เวลา 20 – 60 วินาที

Riser Height (m)	Solid volume fraction (-) at time (s)											
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0.2	0.21433	0.21088	0.14057	0.22979	0.22477	0.16873	0.20194	0.12494	0.17229	0.17689	0.13161	0.12137
0.4	0.08102	0.47209	0.20149	0.20874	0.06393	0.11951	0.07689	0.14446	0.03753	0.04223	0.14166	0.13310
0.6	0.11956	0.12104	0.05689	0.09618	0.26288	0.07001	0.19199	0.07661	0.47051	0.23683	0.05134	0.13965
0.8	0.06187	0.07812	0.16990	0.05865	0.08189	0.10440	0.22562	0.27037	0.21481	0.17818	0.10177	0.06721
1	0.19660	0.11544	0.12753	0.10974	0.07502	0.19753	0.49360	0.17299	0.17775	0.09724	0.25290	0.14461
1.2	0.07977	0.34889	0.34004	0.24979	0.08168	0.25513	0.22903	0.15791	0.30003	0.15776	0.17858	0.14085
1.4	0.24290	0.36084	0.19709	0.28036	0.12063	0.12343	0.30379	0.30279	0.11697	0.22309	0.29143	0.13677
1.6	0.09588	0.20146	0.14791	0.14899	0.12587	0.13051	0.13921	0.29985	0.15166	0.26361	0.32329	0.17524
1.8	0.13760	0.22797	0.17020	0.07592	0.14148	0.14032	0.25583	0.18806	0.23612	0.34019	0.14795	0.07199
2	0.13002	0.24932	0.19062	0.10211	0.32502	0.22479	0.09700	0.13915	0.21606	0.48353	0.14874	0.08524
2.2	0.19482	0.10542	0.13162	0.19569	0.09868	0.27182	0.18305	0.24240	0.35814	0.24164	0.24684	0.16262
2.4	0.29024	0.22285	0.18901	0.20156	0.24197	0.09268	0.20712	0.18174	0.22202	0.31731	0.14259	0.34599
2.6	0.31902	0.24157	0.26942	0.17456	0.27947	0.19659	0.37410	0.35100	0.25093	0.08198	0.29076	0.17928
2.8	0.14038	0.15853	0.29625	0.28342	0.30108	0.25486	0.14190	0.12678	0.42562	0.06100	0.20701	0.17325
3	0.16218	0.21266	0.28758	0.10077	0.16364	0.12798	0.14498	0.08102	5.09E-06	5.33E-06	0.26637	0.23903

ตารางที่ ก4 (ต่อ) ข้อมูลสัดส่วนปริมาตรของของแข็ง (ϵ_s) ตามแนวแกนตลอดความสูงของไรเซอร์จากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของเตาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนที่เวลา 20 – 60 วินาที

Riser Height (m)	Solid volume fraction (-) at time (s)										
	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
0.2	0.10961	0.08516	0.08248	0.09722	0.11974	0.13513	0.32726	0.35545	0.05883	0.08188	0.02867
0.4	0.17522	0.20829	0.12385	0.10115	0.12684	0.10168	0.04278	0.23842	0.27174	0.05769	0.21265
0.6	0.13121	0.14055	0.11488	0.13306	0.18501	0.15823	0.27117	0.37367	0.19478	0.32036	0.12979
0.8	0.12365	0.10308	0.17135	0.08913	0.22978	0.21087	0.14720	0.16736	0.25869	0.21141	0.26816
1	0.12740	0.10101	0.08474	0.43945	0.41379	0.17886	0.38872	0.13769	0.47708	0.38125	0.13664
1.2	0.22525	0.15929	0.17920	0.13453	0.11016	0.16197	0.05440	0.21721	0.20960	0.35678	0.11840
1.4	0.21339	0.16315	0.16328	0.20784	0.20166	0.11233	0.10826	0.18300	0.16928	0.14211	0.13537
1.6	0.13393	0.12518	0.25259	0.12285	0.13118	0.41271	0.08643	0.19189	0.22202	0.17158	0.29027
1.8	0.23986	0.18679	0.12441	0.16985	0.12086	0.13778	0.10896	0.17215	0.20073	0.38337	0.26598
2	0.12745	0.24262	0.14392	0.21613	0.18899	0.10108	0.10345	0.23911	0.31200	0.05763	0.27954
2.2	0.13398	0.10319	0.26399	0.22490	0.26354	0.21038	0.17790	0.10633	0.10000	0.27005	0.31681
2.4	0.13998	0.18418	0.06990	0.17584	0.18910	0.11834	0.15908	0.08830	0.25425	0.13802	0.23383
2.6	0.24112	0.25136	0.15639	0.20176	0.22482	0.29089	0.24991	0.21745	0.22276	2.35E-05	0.21574
2.8	0.21001	0.19564	0.18625	0.18753	0.18219	0.11258	0.25970	0.17970	2.76E-05	1.09E-05	1.29E-05
3	0.06867	0.15835	0.22752	0.10654	0.20180	0.13326	0.12184	0.10519	1.23E-05	1.15E-05	1.12E-05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก4 (ต่อ) ข้อมูลสัดส่วนปริมาตรของของแข็ง (ϵ_s) ตามแนวแกนตลอดความสูงของไรเซอร์จากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนที่เวลา 20 – 60 วินาที

Riser Height (m)	Solid volume fraction (-) at time (s)										
	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
0.2	0.04289	0.06258	0.09784	0.07088	0.25234	0.17863	0.28268	0.12633	0.19769	0.14919	0.10940
0.4	0.21056	0.17178	0.18818	0.18216	0.02111	0.13047	0.17746	0.34490	0.10757	0.15485	0.11748
0.6	0.12405	0.13523	0.08854	0.11224	0.07998	0.31074	0.07840	0.18747	0.24657	0.18596	0.18743
0.8	0.24964	0.15301	0.27934	0.15039	0.28695	0.15868	0.13935	0.16943	0.25522	0.11932	0.10216
1	0.36275	0.21026	0.12367	0.05134	0.11897	0.13684	0.20021	0.26168	0.32908	0.20368	0.36275
1.2	0.12742	0.12433	0.20906	0.14431	0.11324	0.25039	0.49706	0.14783	0.26491	0.23452	0.12742
1.4	0.24257	0.13010	0.09130	0.23714	0.23633	0.10379	0.28404	0.21104	0.21432	0.08287	0.24257
1.6	0.04852	0.18515	0.07634	0.22101	0.14972	0.28562	0.17571	0.30905	0.32181	0.14162	0.04852
1.8	0.16901	0.14965	0.18707	0.20505	0.23058	0.25561	0.09731	0.06334	0.15110	0.17907	0.16901
2	0.32254	0.33902	0.25356	0.17870	0.15404	0.14073	0.22131	0.26085	0.29601	0.29091	0.32254
2.2	0.17233	0.26756	0.15325	0.18028	0.10199	0.14293	0.23418	0.20410	0.39040	0.22033	0.17233
2.4	0.20308	0.25105	0.19933	0.20206	0.19174	0.17383	0.20052	0.33596	0.14603	0.20187	0.20308
2.6	0.05938	0.28434	0.22722	0.08490	0.20067	0.26140	0.11466	0.00272	8.53E-06	0.34325	0.05938
2.8	0.12151	0.20399	0.17213	0.14169	0.14693	0.13050	0.04703	1.03E-05	9.90E-06	0.04485	0.12151
3	0.14379	0.07063	0.24660	0.05445	0.12629	0.21336	1.53E-05	9.83E-06	1.02E-05	1.16E-05	0.14379

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก4 (ต่อ) ข้อมูลสัดส่วนปริมาตรของของแข็ง (ϵ_s) ตามแนวแกนตลอดความสูงของไรเซอร์จากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนที่เวลา 20 – 60 วินาที

Riser Height (m)	Solid volume fraction (-) at time (s)							Average			
	54	55	56	57	58	59	60	20-30 s	20-40 s	20-50 s	20-60s
0.2	0.07858	0.05204	0.13978	0.04002	0.13936	0.08703	0.11062	0.14451	0.14732	0.13930	0.13225
0.4	0.03784	0.16379	0.10697	0.17222	0.16928	0.23774	0.11393	0.15944	0.15636	0.16066	0.15518
0.6	0.34070	0.11510	0.13850	0.10949	0.08442	0.23803	0.09738	0.14051	0.15788	0.15749	0.16161
0.8	0.15524	0.48364	0.23266	0.09567	0.15412	0.30530	0.18229	0.18331	0.17439	0.18479	0.19059
1	0.20112	0.22966	0.18606	0.17007	0.24169	0.11344	0.09506	0.21623	0.23182	0.22103	0.21692
1.2	0.10895	0.06828	0.20442	0.24414	0.16532	0.14864	0.19552	0.23303	0.19770	0.20131	0.19593
1.4	0.33047	0.08180	0.09809	0.36319	0.10950	0.22499	0.16432	0.18439	0.17742	0.17870	0.18029
1.6	0.15636	0.16415	0.15932	0.15431	0.15762	0.15970	0.26527	0.18743	0.18154	0.18469	0.18503
1.8	0.13818	0.16298	0.20052	0.16021	0.26482	0.15198	0.18144	0.20967	0.18348	0.18903	0.18395
2	0.13528	0.17185	0.27415	0.23032	0.11476	0.15618	0.14451	0.20638	0.19559	0.20373	0.20258
2.2	0.15985	0.32621	0.21663	0.26672	0.15978	0.19622	0.24526	0.20992	0.20187	0.20267	0.21338
2.4	0.29587	0.20042	0.17576	0.27511	0.15433	0.30428	0.11086	0.25722	0.20893	0.21023	0.20911
2.6	0.15599	0.13397	0.15842	0.14647	0.32671	0.31674	0.14185	0.21789	0.22031	0.19606	0.19706
2.8	0.31788	0.23604	0.12360	0.13329	0.17369	0.07405	0.27711	0.14065	0.15713	0.13754	0.14404
3	0.16793	0.13994	0.14683	0.26162	0.18943	0.23997	0.12248	0.07797	0.10761	0.10049	0.10845

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis): ASTM D3172

1.1 ความชื้น (Moisture): ASTM D3173

วิธีการทดลอง

- 1) อบครุชชีเบลในเตาอบ (Furnace) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบล
- 2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครุชชีเบล ประมาณ 1 กรัม
- 3) อบครุชชีเบลพร้อมตัวอย่างในเตาอบโดยไม่ต้องปิดฝา ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมตัวอย่าง

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = 100 - 100(W_1 - W_2) / W$$

- เมื่อ
- M = ร้อยละของความชื้น
 - W_2 = น้ำหนักของครุชชีเบล (กรัม)
 - W_1 = น้ำหนักของครุชชีเบลที่มีตัวอย่างผ่านการอบที่ 105 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง (กรัม)
 - W = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

1.2 ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter): ASTM D3175

วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝา บันทึกผล
- 2) ชั่งตัวอย่างแห้งใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
- 3) นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (Tubular Furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 4) หย่อนครุชชีเบลให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

5) หย่อนครุชีเบิลให้ยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที

6) นำครุชีเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = [100(W_5 - W_6) / W] - M$$

เมื่อ	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	W_5	=	น้ำหนักของครุชีเบิลพร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)
	W_6	=	น้ำหนักของครุชีเบิลพร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)
	M	=	ร้อยละของความชื้น

1.3 เถ้า (Ash): ASTM D3174

วิธีการทดลอง

1) เผาครุชีเบิล (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชีเบิล

2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้งใส่ครุชีเบิล ประมาณ 1 กรัม

3) นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซนจนควันระเหยหมด

4) ใส่ครุชีเบิลในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่

5) นำครุชีเบิลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = 100(W_3 - W_4) / W$$

เมื่อ	A	=	ร้อยละของเก่า
	W_3	=	น้ำหนักของครุฑีเบลที่มีเก่า (กรัม)
	W_4	=	น้ำหนักของครุฑีเบล (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - A - V - M$$

เมื่อ	A	=	ร้อยละของเก่า
	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	M	=	ร้อยละของความชื้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

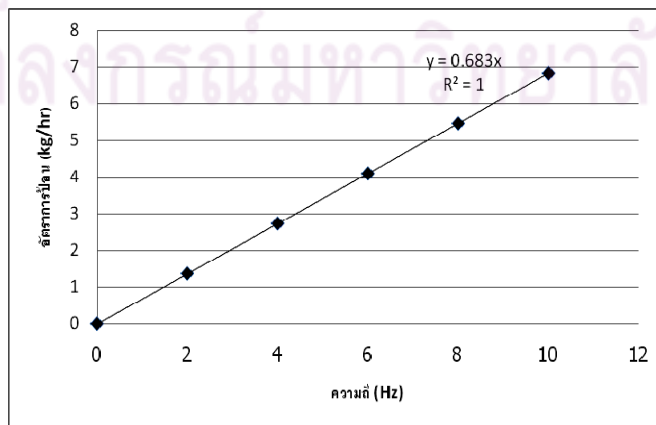
ภาคผนวก ค

การเปรียบเทียบสกรูฟีดเดอร์ และ inverter

การป้อนเชื้อเพลิงจากถังป้อนจะใช้ inverter เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนสกรูฟีดเดอร์ หน่วยวัดความเร็วรอบของมอเตอร์คือ เฮิร์ต (Hz) ขณะที่หน่วยของการป้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการป้อนเป็น กิโลกรัมของเชื้อเพลิงต่อชั่วโมง ดังนั้นจึงต้องมีการเปรียบเทียบสกรูฟีดเดอร์ และ inverter เพื่อให้ได้ค่าเปรียบเทียบระหว่าง เฮิร์ต (Hz) และกิโลกรัมต่อชั่วโมง ของเชื้อเพลิง ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยสกรูฟีดเดอร์ 2 ชุด เพื่อแยกป้อนเชื้อเพลิงระหว่างถ่านหินและชีวมวล ดังนั้นจึงต้องมีการเปรียบเทียบสกรูฟีดเดอร์ และ inverter ของทั้ง 2 ชุด ดังแสดงในตารางที่ ค1, ค2 และ ค3 และ รูปที่ ค1 , ค2 และ ค3

ตารางที่ ค1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนถ่านหินผ่านสกรูฟีดเดอร์

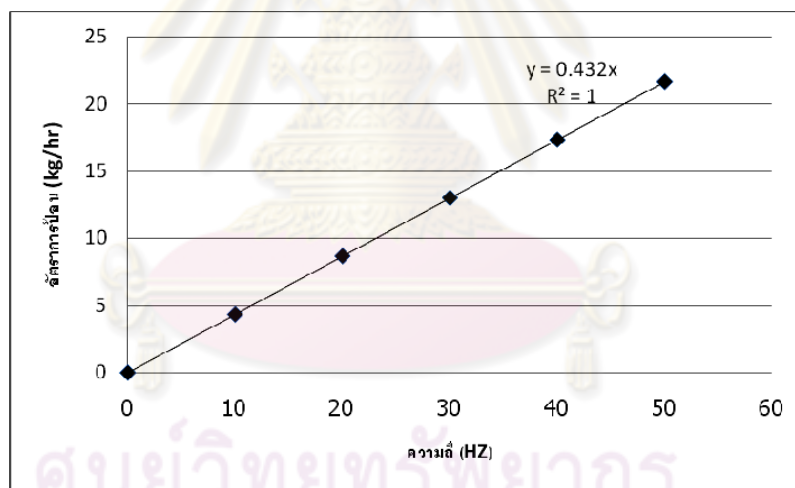
Screw feeder (Coal)	
Hz	Kg/hr
0	0
2	1.37
4	2.73
6	4.10
8	5.46
10	6.83



รูปที่ ค1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนถ่านหินผ่านสกรูฟีดเดอร์

ตารางที่ ค2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลาปาล์มผ่านสกรู
ฟีดเดอร์

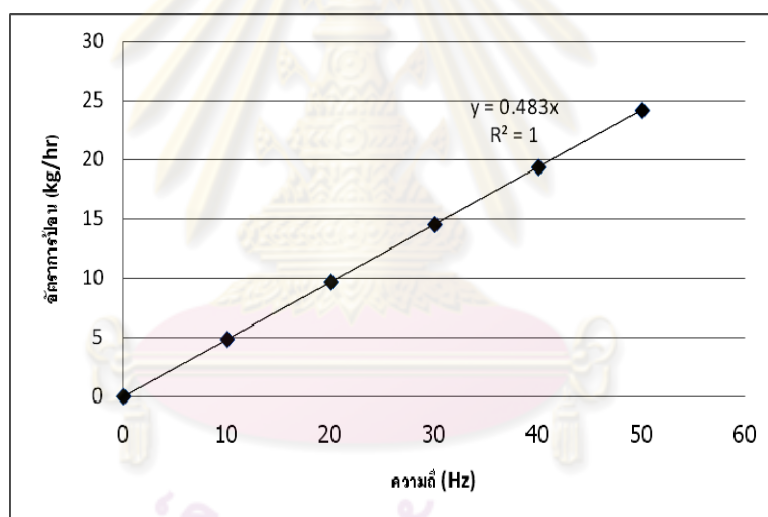
Screw feeder (Palm shell)	
Hz	Kg/hr
0	0
10	4.33
20	8.66
30	12.99
40	17.32
50	21.65



รูปที่ ค2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลาปาล์มผ่านสกรู
ฟีดเดอร์

ตารางที่ ค3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลามะพร้าวผ่านสกรูพีดเดอร์

Screw feeder (Coconut Shell)	
Hz	Kg/hr
0	0
10	4.83
20	9.66
30	14.49
40	19.32
50	24.15



รูปที่ ค3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ inverter กับอัตราการป้อนกะลามะพร้าวผ่านสกรูพีดเดอร์

จากตารางที่ ค1 ถึง ค3 และ รูปที่ ค1 ถึง ค3 แสดงการปรับเทียบสกรูพีดเดอร์ และ inverter ของถ่านหินและชีวมวล พบว่าถ่านหินและชีวมวลทั้ง 2 ชนิด มีน้ำหนักของแต่ละเชื้อเพลิงที่ไม่เท่ากัน ทำให้ต้องมีการปรับความถี่ของ inverter จากถังป้อนเพื่อให้อัตราการป้อนที่เท่ากันในเวลาที่เท่ากัน โดยงานวิจัยจะทำการป้อนเชื้อเพลิงเดี่ยวและผสม ในอัตรา 70 : 30 , 50 : 50 และ 30 : 50 (ถ่าน : ชีวมวล) ที่อัตราป้อนรวม 7,8 และ 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ส่วนที่สองจะทำการป้อนเชื้อเพลิงรวมที่อัตรา 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เพื่อทดสอบเครื่องผลิตไอน้ำที่สร้างขึ้น

ภาคผนวก ง

วิธีการคำนวณ

- การคำนวณหาปริมาณอากาศที่จำเป็นในการเผาไหม้สมบูรณ์ 100 เปอร์เซ็นต์ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ตาราง ง1 แสดงค่าการวิเคราะห์โดยประมาณ

Proximate Analysis	% By Mass		
	Coal	Palm Shell	Coconut Shell
Fixed Carbon	43.29	18.51	23.32
Volatile Matter	38.99	72.24	68.83
Moisture	12.38	5.43	6.79
Ash	5.34	3.82	1.07
Total	5221.82	4875.74	4470.40

ตาราง ง2 แสดงค่าการวิเคราะห์โดยแยกธาตุ

Ultimate Analysis	% By Mass (daf)		
	Coal	Palm Shell	Coconut Shell
C	55.64	49.84	47.32
H	5.17	6.77	5.72
N	0.72	0.63	0.04
O	38.44	42.78	46.91
S	0.02	0.00	0.00
Total	100.00	100.00	100.00

คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ

ความหนาแน่น	1.165438	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
มวลโมเลกุล	28.97	
สัดส่วนของออกซิเจน	21	เปอร์เซ็นต์
สัดส่วนของไนโตรเจน	79	เปอร์เซ็นต์

มวลโมเลกุลของ C H O และ S เนื่องจากไนโตรเจนส่วนใหญ่แล้วจะเฉื่อย ไม่ค่อยเกิดปฏิกิริยา จึงไม่นำไนโตรเจนมาคิด

C	=	12
H	=	1
O	=	16
S	=	32

ถ่านหิน 100 เปอร์เซ็นต์ 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็นน้ำหนักแห้งและปราศจากเถ้าได้เป็น

$$9(100 - 12.38 - 5.34)/100 = 7.405 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง}$$

มีปริมาณ C H N O และ S คิดเป็นน้ำหนักแห้งและปราศจากเถ้าได้เป็น

ปริมาณ C ;	$7.405(55.64)/100$	=	4.1203 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
	$4.1203/12$	=	0.3434 กิโลโมลต่อชั่วโมง
ปริมาณ H ;	$7.405(5.17)/100$	=	0.3828 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
	$0.3828/1$	=	0.3828 กิโลโมลต่อชั่วโมง
ปริมาณ O ;	$7.405(38.44)/100$	=	2.8466 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
	$2.8466/16$	=	0.1779 กิโลโมลต่อชั่วโมง
ปริมาณ S ;	$7.405(0.02)/100$	=	0.0015 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
	$0.0015/32$	=	0.0000 กิโลโมลต่อชั่วโมง

ต้องใช้ O₂ ในการเผาไหม้สมบูรณ์

ปริมาณ C ;	$0.3434 * 1$	=	0.3434 กิโลโมล O ₂ ต่อชั่วโมง
ปริมาณ H ;	$0.3828/4$	=	0.0957 กิโลโมล O ₂ ต่อชั่วโมง
ปริมาณ O ;	$-0.1779/2$	=	-0.089 กิโลโมล O ₂ ต่อชั่วโมง
ปริมาณ S ;	$0.0000 * 1$	=	0.0000 กิโลโมล O ₂ ต่อชั่วโมง
รวมต้องใช้แก๊สออกซิเจน		=	0.3502 กิโลโมล O ₂ ต่อชั่วโมง

ต้องใช้อากาศในการเผาไหม้สมบูรณ์

$$\begin{aligned}
 0.3502 * 100/21 &= 1.6674 \text{ กิโลโมลอากาศต่อชั่วโมง} \\
 1.6674 * 28.97 &= 48.3051 \text{ กิโลกรัมอากาศต่อชั่วโมง} \\
 48.3051 / 1.165438 &= 41.4480 \text{ ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อ} \\
 &\quad \text{ชั่วโมง} \\
 41.4480 * 1000 &= 41448 \text{ ลิตรต่อชั่วโมง} \\
 41448 / 60 &= 690.8 \text{ ลิตรต่อนาที}
 \end{aligned}$$

2. การคำนวณหาความเร็วอากาศปฐุมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที ในไรเซอร์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร

$$\begin{aligned}
 330 \text{ ลิตรต่อนาที} &= 330/1000 = 0.33 \text{ ลูกบาศก์เมตรอากาศ} \\
 &\quad \text{ต่อนาที} \\
 0.33 / 60 &= 0.0055 \text{ ลูกบาศก์เมตรอากาศ} \\
 &\quad \text{ต่อนาที} \\
 0.0055 * 7/22 / (0.05^2) &= 0.7 \text{ เมตรต่อวินาที}
 \end{aligned}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตาราง จ1 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่ออนาที ป้อน อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 1 เมตร

ตำแหน่ง	อุณหภูมิ (°C) อากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 1 เมตร		
	ถ่านหิน 100%	กะลาปาล์ม 30%	กะลามะพร้าว 30%
0.1	933.5	985	900
0.5	936.5	948	910
0.9	995	945	820
1.3	996	824	782
1.7	970	779	777
2.1	929.5	748	767
2.5	762.5	741	752
2.9	757.5	710	724

ตาราง จ2 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่ออนาที ป้อน อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2 เมตร

ตำแหน่ง	อุณหภูมิ (°C) อากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2 เมตร		
	ถ่านหิน 100%	กะลาปาล์ม 30%	กะลามะพร้าว 30%
0.1	865.5	950	900
0.5	878	955	905
0.9	948.5	956	910
1.3	929.5	889	889
1.7	929	850	825
2.1	856.5	610	590
2.5	798.5	860	715
2.9	777	700	713

ตาราง ๑3 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในไรเซอร์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที ป้อน อากาศที่เหลือเป็นอากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2.4 เมตร

ตำแหน่ง	อุณหภูมิ (°C) อากาศทุติยภูมิตำแหน่ง 2.4 เมตร		
	ถ่านหิน 100%	กะลาปาล์ม 30%	กะลามะพร้าว 30%
0.1	940	985	895
0.5	957	950	900
0.9	987	949	915
1.3	902.5	899	880
1.7	903.5	850	825
2.1	881.5	800	800
2.5	824.5	760	710
2.9	801	770	685

ตาราง ๑4 อุณหภูมิไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที (ก) ถ่านหิน (ข) ถ่านหิน:กะลาปาล์ม , 70:30 และ (ค) ถ่านหิน:กะลามะพร้าว , 70:30

อัตราป้อน (L/hr.)	อุณหภูมิ (°C)	
	ก่อนปล่อยไอ	หลังปล่อยไอ
60	160	155
80	160	155
100	158	150
120	155	150
140	153	147

(ก)

อัตราการป้อน (L/hr.)	อุณหภูมิ (°C)	
	ก่อนปล่อยไอ	หลังปล่อยไอ
60	145	141
80	145	145
100	143	138
120	140	137
140	140	135

(ข)

อัตราการป้อน (L/hr.)	อุณหภูมิ (°C)	
	ก่อนปล่อยไอ	หลังปล่อยไอ
60	138	135
80	140	136
100	140	133
120	135	133
140	135	132

(ค)

ตาราง ๑5 ความดันไอน้ำที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศรวม 120 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศปฐมภูมิ 330 ลิตรต่อนาที (ก) ถ่านหิน (ข) ถ่านหิน:กะลาปาล์ม , 70:30 และ (ค) ถ่านหิน:กะลามะพร้าว , 70:30

อัตราการป้อน (L/hr.)	อุณหภูมิ (°C)	
	ก่อนปล่อยไอ	หลังปล่อยไอ
60	4.5	2.4
80	5	2.3
100	4.5	2.6
120	4.5	2.3
140	4.4	2.3

(ก)

อัตราการป้อน (L/hr.)	อุณหภูมิ (°C)	
	ก่อนปล่อยไอ	หลังปล่อยไอ
60	4.9	2.1
80	5	2.3
100	5	2.2
120	4.9	2.1
140	4.7	2.1

(ข)

อัตราการป้อน (L/hr.)	อุณหภูมิ (°C)	
	ก่อนปล่อยไอ	หลังปล่อยไอ
60	4.5	2.1
80	4.6	2.2
100	4.6	2
120	4.5	1.9
140	4.4	1.9

(ค)

ตาราง ๑6 อัตราการผลิตไอน้ำ ที่การป้อนน้ำจากส่วนอุ่นน้ำ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ รวม 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

อัตราการป้อนน้ำ (L/hr.)	ไอน้ำที่ผลิตได้ (L/hr.)		
	ถ่านหิน 100%	กะลาปาล์ม 30%	กะลามะพร้าว 30%
60	14.40	12.38	11.85
80	20.08	17.96	10.29
100	11.41	10.39	10.29
120	10.30	9.22	9.03
140	8.87	8.61	8.58

ภาคผนวก จ

ประสิทธิภาพ

สมการคำนวณประสิทธิภาพเครื่องผลิตไอน้ำ

$$\eta = \frac{(H_{out} - H_{in}) \times M_s}{(HHV. \times M_f) - Heat_{fluegas}} \times 100\%$$

เมื่อ

η	=	ประสิทธิภาพ (%)
H_{out}	=	เอนทาลปีไอน้ำที่ผลิตได้ (KJ/kg.)
H_{in}	=	เอนทาลปีน้ำถึงจุด (KJ/kg)
M_s	=	อัตราการผลิตไอน้ำ (kg/hr.)
M_f	=	อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/hr.)
$HHV.$	=	ค่าพลังงานความร้อนเชื้อเพลิง (KJ/kg.)
$Heat_{fluegas}$	=	พลังงานที่จากปลุกแก๊สร้อน (KJ/hr.)

พลังงานความร้อนจากปลุกแก๊สร้อน ($Heat_{fluegas}$) เท่ากับ 403.09 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เมื่อปลุกแก๊สร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส ที่ 0.58 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ตาราง จ1 อัตราการผลิตไอน้ำ ที่การป้อนน้ำจากส่วนอุ่นน้ำ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ รวม 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

อัตราการป้อนน้ำ (L/hr.)	ไอน้ำที่ผลิตได้ (L/hr.)		
	ถ่านหิน 100%	กะลาปาล์ม 30%	กะลามะพร้าว 30%
60	14.40	12.38	11.85
80	20.08	17.96	10.29
100	11.41	10.39	10.29
120	10.30	9.22	9.03
140	8.87	8.61	8.58

1. เชื้อเพลิงถ่านหินเดี่ยว 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่อัตราการป้อนน้ำจากถังอุ่น (Water Pre-Heat) 80 ลิตรต่อชั่วโมง

- พลังงานเชื้อเพลิงถ่านหินที่ 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เท่ากับ 197,384.8 กิโลจูลต่อกิโลกรัม
- ไอน้ำที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิเท่ากับ 165 องศาเซลเซียส
- ไอน้ำที่ผลิตได้ที่ความดันเท่ากับ 2.7 บาร์
- อัตราการผลิตไอน้ำเท่ากับ 20.08 ลิตรต่อชั่วโมง
- พลังงานความร้อนที่รับจากไอน้ำเท่ากับ 2,804.28 กิโลจูลต่อกิโลกรัม
- ประสิทธิภาพเท่ากับ 24.96

2. เชื้อเพลิงถ่านหินเดี่ยว 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่อัตราการป้อนน้ำจากถังอุ่น (Water Pre-Heat) 80 ลิตรต่อชั่วโมง

- พลังงานเชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลาปาล์มที่อัตราส่วน 70:30 ที่ 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เท่ากับ 193,460.4 กิโลจูลต่อกิโลกรัม
- ไอน้ำที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิเท่ากับ 145 องศาเซลเซียส
- ไอน้ำที่ผลิตได้ที่ความดันเท่ากับ 2.3 บาร์
- อัตราการผลิตไอน้ำเท่ากับ 17.96 ลิตรต่อชั่วโมง
- พลังงานความร้อนที่รับจากไอน้ำเท่ากับ 2,755.06 กิโลจูลต่อกิโลกรัม
- ประสิทธิภาพเท่ากับ 22.32

3. เชื้อเพลิงถ่านหินเดี่ยว 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่อัตราการป้อนน้ำจากถังอุ่น (Water Pre-Heat) 80 ลิตรต่อชั่วโมง

- พลังงานเชื้อเพลิงถ่านหินผสมกะลามะพร้าวที่อัตราส่วน 70:30 ที่ 9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เท่ากับ 188,863.7 กิโลจูลต่อกิโลกรัม
- ไอน้ำที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิเท่ากับ 136 องศาเซลเซียส
- ไอน้ำที่ผลิตได้ที่ความดันเท่ากับ 2.2 บาร์
- อัตราการผลิตไอน้ำเท่ากับ 10.29 ลิตรต่อชั่วโมง
- พลังงานความร้อนที่รับจากไอน้ำเท่ากับ 2,740.34 กิโลจูลต่อกิโลกรัม
- ประสิทธิภาพเท่ากับ 13.01

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายมาวิน ปูนอน เกิดเมื่อวันที่ 27 มีนาคม พุทธศักราช 2527 จบการศึกษาปริญญาตรี
วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษา
ต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค ในปี 2550
จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2553



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย