

การศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากแกลบและถ่านแกลบ



นายภูติภูมิ อิศระญาณพงศ์

สถาบันวิทยบริการ  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0654-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF PRODUCTION OF FUEL GAS FROM RICE HUSKS AND SEMICOKES

Mr. PUSIT ITSARAYANPHONG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0654-7



ปฏิญญา อิศระญาณพงศ์ : การศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากแกลบและถ่านแกลบ.

(A STUDY OF PRODUCTION OF FUEL GAS FROM RICE HUSKS AND

SEMICOKES) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์.ดร.กฤษร ศิลปบรรเลง, 149 หน้า.

ISBN 974-13-0654-7.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการใช้แกลบในรูปพลังงานทดแทนผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่ง แหล่งความร้อนที่ให้แก่กระบวนการไพโรไลซิสได้จากการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไอดีส์เบดแล้วให้ความร้อนถ่ายเทผ่านผนังห้องเผาไหม้ออกสู่ห้องไพโรไลซิส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสในการทดลองนี้คือถ่านแกลบและก๊าซเชื้อเพลิง ถ่านแกลบที่ได้จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไอดีส์เบด

เตาเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสมีลักษณะเป็นทรงกระบอกหน้าตัดวงแหวน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 40 เซนติเมตร ความสูง 2 เมตร พื้นที่ของทรงกระบอกในคือห้องเผาไหม้และพื้นที่ส่วนวงแหวนคือห้องไพโรไลซิส สภาวะในการทดลองการเผาไหม้คือ อัตราการป้อนแกลบ 3.2 , 4.7 และ 6.4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อากาศส่วนเกิน 100 , 150 และ 200% สภาวะในการทดลองการไพโรไลซิสคือ ปริมาณแกลบต่อแบทช์การทดลอง 18.0 กิโลกรัม เวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิส 30 , 60 และ 90 นาที ถ่านแกลบที่ได้มีค่าความร้อนสูงสุด 16.68 เมกะจูลต่อกิโลกรัมที่สภาวะเวลา 60 นาที ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนสูงสุด 4.80 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (ที่ความดัน 1 บรรยากาศและอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) ที่สภาวะเวลา 30 นาที การใช้ถ่านแกลบเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไอดีส์เบดจำเป็นต้องผสมกับแกลบเพื่อให้การเผาไหม้ดำเนินต่อไปได้ อัตราส่วนผสมระหว่างถ่านแกลบกับแกลบสูงสุดที่เตาเผาฟลูอิดไอดีส์เบดยังสามารถทำงานได้อย่างปกติคือที่ 50% โดยน้ำหนัก

ภาควิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมเครื่องกล \_\_\_\_\_

สาขาวิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมเครื่องกล \_\_\_\_\_

ปีการศึกษา \_\_\_\_\_ 2543 \_\_\_\_\_

ลายมือชื่อนิสิต \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

# # 4070376621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: RICE HUSKS / PYROLYSIS / FLUIDIZED BED / SEMICOKES / FUEL GAS

PUSIT ITSARAYANPHONG : A STUDY OF PRODUCTION OF FUEL GAS  
FROM RICE HUSKS AND SEMICOKES. THESIS ADVISER : ASSOC.PROF.  
KULTHORN SILAPABANLENG,Ph.D., 149 pp. ISBN 974-13-0654-7.

A study on the use of rice husks as alternative fuel by fixed bed pyrolysis is presented. Heat source for the pyrolysis reaction is obtained from combustion of rice husks in a fluidized bed combustor and transferred to the pyrolyser through its vessel. Products from the pyrolysis in this experiment are semicokes and fuel gas. Semicokes is used as fuel in the fluidized bed combustor.

The combustor and pyrolyser are made from steel in cylindrical-annular shape. The inner diameter is 20 cm and the outer diameter is 40 cm. The total height is 2 m. The inner core is an area of combustor and the annular core is an area of pyrolyser. Conditions for the combustion of rice husks are 3.2 , 4.7 and 6.4 kg/hr of rice husks feed rate and 100 ,150 and 200% excess air. Conditions of the pyrolysis are 18.0 kg of rice husks in 1 batch and 30 , 60 and 90 minutes of pyrolysis time. The maximum heating value of semicokes yield is 16.68 MJ/kg at 60 minutes of pyrolysis time. The maximum heating value of fuel gas yield is 4.80 MJ/Nm<sup>3</sup> at 30 minutes of pyrolysis time. The use of semicokes in the fluidized bed combustor must be in the form of mixed fuel with rice husks. The maximum ratio of semicokes per rice husks that can be started up and sustained combustion in the combustor is 50% by weight.

Department  Mechanical Engineering  Student's signature \_\_\_\_\_  
Field of study  Mechanical Engineering  Adviser's signature \_\_\_\_\_  
Academic Year  2000  Co-adviser's signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.กุลธร ศิลปบรรเลง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่อบรมสั่งสอนผู้วิจัย ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในทุกด้าน จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี กราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ รศ.ดร.สมศรี จรุงเรือง รศ.ดร.พงษ์ธร จริญญาภรณ์ ซึ่งเป็นคณะกรรมการที่ให้คำแนะนำในหลายๆด้าน กราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อติ บุญจิตราดุลย์ ที่อนุเคราะห์อุปกรณ์บางส่วนในงานวิจัย กราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อิชา ฉายสุวรรณ ที่ให้คำแนะนำและอนุเคราะห์ก๊าซตัวอย่างในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ และทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณหน่วยงานทั้งสองมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ คุณธีระยุทธ หลีวิจิตร ฟีนิสิตปริญญาโท คุณธนวัช ศรีเจริญชัย น้องนิสิตปริญญาโทที่ช่วยทำการทดลอง คุณเบญจรัตน์ วงทิพย์รักษ์ ที่ให้กำลังใจและให้คำปรึกษาที่ดีเสมอ เพื่อนๆนิสิตปริญญาโทและปริญญาเอกทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือต่างๆ เสมอมา

ขอขอบคุณช่างเทคนิคและนักการภารโรงของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่อำนวยความสะดวกและช่วยเหลือระหว่างการสร้างอุปกรณ์การทดลอง

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และพี่น้องทุกคนที่เข้าใจและสนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆ เรื่องเสมอมาจนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์.....	4
2.1 งานวิจัยด้านการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไอดีส์เบด.....	4
2.2 งานวิจัยด้านการไพโรไลซิสแกลบ.....	7
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งการเผาไหม้และการไพโรไลซิสแกลบ.....	10
บทที่ 3 การไพโรไลซิสและการเผาไหม้.....	12
3.1 อธิบายศัพท์ที่เกี่ยวข้อง.....	12
3.2 กระบวนการไพโรไลซิส.....	13
3.2.1 การเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์และเคมีในกระบวนการไพโรไลซิส.....	13
3.2.2 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส.....	14
3.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส.....	15
3.2.4 กลไกการเกิดถ่านในกระบวนการไพโรไลซิส.....	17
3.3 การเผาไหม้.....	20
3.3.1 ทฤษฎีการเผาไหม้.....	20
3.3.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการเผาไหม้.....	26
3.3.3 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง.....	27

บทที่ 4	ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับฟลูอิดเซชัน.....	30
4.1	อธิบายศัพท์ที่เกี่ยวข้อง.....	30
4.2	ลักษณะของปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชัน.....	30
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบดกับความเร็วในการฟลูอิดเซชัน.....	32
4.4	คุณสมบัติของอนุภาคของแข็งที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชัน.....	33
4.4.1	ขนาดอนุภาค (Particle size).....	33
4.4.2	ค่าสัดส่วนช่องว่างของเบดนิ่ง (Voidage of fixed bed).....	36
4.5	การสูญเสียพลังงานการไหลผ่านเบดนิ่ง.....	37
4.6	ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน.....	37
4.7	ความเร็วสุดท้ายของอนุภาค.....	40
4.8	สภาวะการทำงานของฟลูอิดเซชันเบด.....	41
บทที่ 5	อุปกรณ์การทดลอง.....	45
5.1	เตาเผาฟลูอิดเซชันเบดและห้องไฟโรไลซิสแบบเบดนิ่ง.....	45
5.2	แผ่นกระจายลม (Distributor).....	45
5.3	ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรู (Screw feeder).....	46
5.4	ระบบป้อนอากาศ.....	46
5.5	ระบบอุ่นเบด (Preheat burner).....	46
5.6	ไซโคลน (Cyclone).....	47
5.7	ระบบวัดอุณหภูมิ.....	47
5.8	ระบบวัดอัตราการไหลอากาศ.....	47
บทที่ 6	การทดลอง.....	57
6.1	การทดลองเบื้องต้น (Preliminary test).....	57
6.1.1	Cold test ของปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชันในเตาเผา.....	57
6.1.2	การสอบเทียบอุปกรณ์ป้อนแบบสกรู.....	59
6.1.3	การจุดเตาเริ่มต้น (Start up).....	60
6.2	การทดลองเต็มรูปแบบ (Full test).....	62
6.2.1	การเผาไหม้กลับในเตาเผาฟลูอิดเซชันเบด.....	62
6.2.2	การไฟโรไลซิสกลับในห้องไฟโรไลซิสแบบเบดนิ่ง.....	75
6.2.3	การใช้ถ่านกลับเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดเซชันเบด.....	88



สารบัญ (ต่อ)

ญ

หน้า

บทที่ 7 อภิปรายผลการทดลอง.....	95
7.1 ผลการทดลองการเผาไหม้แก๊สในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด.....	95
7.1.1 อัตราการป้อนแก๊ส.....	95
7.1.2 ปริมาณอากาศส่วนเกิน.....	96
7.1.3 ความเร็วของการฟลูอิดไคซ์.....	97
7.2 ผลการทดลองการไพโรไลซิสแก๊สในห้องไพโรไลซิสแบบเบตหนึ่ง.....	98
7.2.1 อุณหภูมิของห้องเผาไหม้.....	98
7.2.2 เวลาที่แก๊สอยู่ในห้องไพโรไลซิส.....	100
7.3 ผลการทดลองการใช้ถ่านแก๊สเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด.....	101
7.4 ปัญหาที่เกิดขึ้นในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่สร้างขึ้น.....	103
7.4.1 เปรียบเทียบผลการออกแบบกับสภาวะการทำงานจริง ของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด.....	104
7.4.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำงานของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด.....	104
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	106
8.1 บทสรุป.....	106
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	107
รายการอ้างอิง.....	109
ภาคผนวก.....	111
ภาคผนวก ก. การหาคุณสมบัติของเบตและแก๊ส.....	112
ก.1 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของเบต.....	112
ก.2 การหาคุณสมบัติทางเคมีของแก๊ส.....	113
ภาคผนวก ข. การออกแบบเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบตและห้องไพโรไลซิส แบบเบตหนึ่ง.....	115
ข.1 การออกแบบเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบต.....	115
ข.1.1 คุณสมบัติทราย อากาศ และแก๊ส.....	115
ข.1.2 ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี.....	116
ข.1.3 ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคซ์ชั้น.....	116
ข.1.4 พื้นที่หน้าตัดของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบต.....	118

สารบัญ (ต่อ)

ญ

หน้า

ข.1.5	ความสูงของเตาเผาฟลูอิด์เบด.....	119
ข.1.6	ระบบบ้อนอากาศสำหรับเตาเผาฟลูอิด์เบด.....	120
ข.2	ห้องไพโรไลซิสแบบเบดหนึ่ง.....	122
ภาคผนวก ค.	ข้อมูลติบการทดลอง.....	127
ค.1	การเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิด์เบด.....	127
ค.2	การไพโรไลซิสแกลบในห้องไพโรไลซิสแบบเบดหนึ่ง.....	137
ค.3	การใช้ถ่านแกลบเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิด์เบด.....	143
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		149



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 3.1	องค์ประกอบของอากาศ.....	22
ตารางที่ 4.1	ตะแกรงตามมาตรฐานของ Tyler.....	35
ตารางที่ 4.2	ค่า $K_1$ และ $K_2$ จากคณะวิจัยต่างๆ.....	40
ตารางที่ 6.1	สภาวะการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดที่ทำการทดลอง.....	63
ตารางที่ 6.2	ผลการทดลองการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด ที่สภาวะต่างๆ.....	65
ตารางที่ 6.3	สภาวะควบคุมในการไพโรไลซิสแกลบในห้องไพโรไลซิส แบบเบดนิ่ง.....	76
ตารางที่ 6.4	แสดงอุณหภูมิทั้งหมดที่ทำการวัดในการทดลองไพโรไลซิส.....	78
ตารางที่ 6.5	แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแกลบในห้องไพโรไลซิส แบบเบดนิ่ง.....	78
ตารางที่ 6.6	สภาวะควบคุมในการทดลองการใช้ถ่านแกลบเป็นเชื้อเพลิง ในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด.....	89
ตารางที่ 6.7	แสดงผลการ Start up และอุณหภูมิภายในเตาเผาทุกสภาวะ ของการทดลองการใช้ถ่านแกลบเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด.....	90

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1	อุปกรณ์ในงานวิจัยของ Wu Weizhang..... 5
รูปที่ 2.2	อุปกรณ์ในงานวิจัยของ อติพันธ์ เหล่าวงศ์สิน..... 6
รูปที่ 2.3	อุปกรณ์ในงานวิจัยของ อภิชัย เทอดเทียนวงษ์..... 7
รูปที่ 2.4	อุปกรณ์ในงานวิจัยของ สิทธิศักดิ์ อุปริวงศ์..... 8
รูปที่ 2.5	อุปกรณ์ในงานวิจัยของ สุกิจ วชิรชูเดช..... 9
รูปที่ 2.6	อุปกรณ์ในงานวิจัยของ Atul Sharma , T.Rajeswara Rao..... 11
รูปที่ 2.7	อุปกรณ์ในงานวิจัยของ Mengxiang Fang และคณะ..... 11
รูปที่ 3.1	กลไกปฏิกิริยาไพโรไลซิสของอนุภาคชีวมวล..... 14
รูปที่ 3.2	ลักษณะการเกิดถ่านในกระบวนการไพโรไลซิส..... 18
รูปที่ 3.3	Carbon concentration profile ของการเกิดถ่าน..... 19
รูปที่ 3.4	Gas concentration profile ของการเกิดถ่าน..... 20
รูปที่ 4.1	แสดงลักษณะเขตชนิดต่างๆ ในปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชัน..... 31
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ของความดันลดคร่อมเบตกับความเร็วในการ ฟลูอิดเซชันของเบตที่มีขนาดอนุภาคในช่วงขนาดเดียว..... 32
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ของความดันลดคร่อมเบตกับความเร็วในการ ฟลูอิดเซชันของเบตที่มีขนาดอนุภาคกระจายในช่วงกว้าง..... 33
รูปที่ 4.4	แสดงความหมายของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า แบบต่างๆ ด้วยรูปภาพ..... 34
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกลมและค่าสัดส่วนช่องว่างของเบตหนึ่ง..... 36
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับค่าความเร็วสุดท้ายของไหล..... 41
รูปที่ 4.7	แสดงการเกิดฟองอากาศที่ขึ้นอยู่กับจำนวนรูที่เจาะบนแผ่นกระจายก๊าซ..... 42
รูปที่ 4.8	แสดงตัวกระจายก๊าซแบบต่างๆ..... 43
รูปที่ 5.1	Schematic diagram ของอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้..... 48
รูปที่ 5.2	แสดงจุดวัดค่าอุณหภูมิ ความดัน และองค์ประกอบก๊าซในการทดลอง..... 49
รูปที่ 5.3	แสดง Drawing แผ่นกระจายลมแบบ Nozzle stand pipe..... 50
รูปที่ 5.4	แสดง Drawing ของชุดป้อนแกลบแบบสกรู..... 51
รูปที่ 5.5	แสดงภาพถ่ายเตาเผาฟลูอิดเซชันเบตและห้องไพโรไลซิสแบบเบตหนึ่ง..... 51
รูปที่ 5.6	แสดงการติดตั้งแผ่นกระจายลมแบบ Nozzle stand pipe..... 52
รูปที่ 5.7	แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ป้อนแกลบแบบสกรู..... 52
รูปที่ 5.8	แสดงภาพถ่าย Blower และท่อลมในระบบป้อนอากาศ..... 53
รูปที่ 5.9	แสดงภาพถ่าย Preheat burner ในระบบอุ่นเบต..... 54

รูปที่ 5.10	แสดงภาพถ่ายไซโคลน.....	54
รูปที่ 5.11	แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลและ Display สำหรับระบบวัดอุณหภูมิ.....	55
รูปที่ 5.12	แสดงการติดตั้งออริฟิสในระบบท่อลม.....	56
รูปที่ 6.1	ผลการทดลอง Cold Test.....	58
รูปที่ 6.2	ค่าความดันตกคร่อมแผ่นกระจายลมที่ความเร็วฟลูอิดไคส์เบดค่าต่างๆ.....	59
รูปที่ 6.3	กราฟแสดงการสอบเทียบอุปกรณ์บ่อนเชื้อเพลิงแบบสกรู.....	60
รูปที่ 6.4	แสดงอุณหภูมิเบดเทียบกับเวลาในการจุดเตาเริ่มต้นที่ ประสบความสำเร็จ.....	62
รูปที่ 6.5	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิ ก๊าซไอเสีย ที่อัตราการบ่อนเชื้อเพลิงแกลบ 3.2 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 100%.....	66
รูปที่ 6.6	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิ ก๊าซไอเสีย ที่อัตราการบ่อนเชื้อเพลิงแกลบ 3.2 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 150%.....	66
รูปที่ 6.7	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิ ก๊าซไอเสีย ที่อัตราการบ่อนเชื้อเพลิงแกลบ 3.2 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 200%.....	67
รูปที่ 6.8	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิ ก๊าซไอเสีย ที่อัตราการบ่อนเชื้อเพลิงแกลบ 4.7 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 100%.....	67
รูปที่ 6.9	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิ ก๊าซไอเสีย ที่อัตราการบ่อนเชื้อเพลิงแกลบ 4.7 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 150%.....	68
รูปที่ 6.10	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิ ก๊าซไอเสีย ที่อัตราการบ่อนเชื้อเพลิงแกลบ 4.7 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 200%.....	68
รูปที่ 6.11	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิ ก๊าซไอเสีย ที่อัตราการบ่อนเชื้อเพลิงแกลบ 6.4 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 100%.....	69
รูปที่ 6.12	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิ ก๊าซไอเสีย ที่อัตราการบ่อนเชื้อเพลิงแกลบ 6.4 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 150%.....	69

รูปที่ 6.13	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิ ก๊าซไอเสีย ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ 6.4 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 200%.....	70
รูปที่ 6.14	แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยที่ความสูง 25 cm ที่สภาวะการเผาไหม้ต่างๆ.....	71
รูปที่ 6.15	แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยที่ความสูง 75 cm ที่สภาวะการเผาไหม้ต่างๆ.....	71
รูปที่ 6.16	แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยที่ความสูง 125 cm ที่สภาวะการเผาไหม้ต่างๆ.....	72
รูปที่ 6.17	แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยที่ความสูง 125 cm ที่สภาวะการเผาไหม้ต่างๆ.....	72
รูปที่ 6.18	การกระจายของอุณหภูมิตลอดความสูงของเตาเผาที่อัตรา การป้อนแกลบ 3.2 kg/hr.....	73
รูปที่ 6.19	การกระจายของอุณหภูมิตลอดความสูงของเตาเผาที่อัตรา การป้อนแกลบ 4.7 kg/hr.....	73
รูปที่ 6.20	การกระจายของอุณหภูมิตลอดความสูงของเตาเผาที่อัตรา การป้อนแกลบ 6.4 kg/hr.....	74
รูปที่ 6.21	แสดงองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่สภาวะการเผาไหม้ต่างๆ.....	74
รูปที่ 6.22	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสที่ความสูงต่างๆ ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 150% และ pyrolysis time 30 นาที.....	79
รูปที่ 6.23	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสที่ความสูงต่างๆ ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 150% และ pyrolysis time 60 นาที.....	80
รูปที่ 6.24	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสที่ความสูงต่างๆ ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 150% และ pyrolysis time 90 นาที.....	81
รูปที่ 6.25	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสที่ความสูงต่างๆ ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 200% และ pyrolysis time 60 นาที.....	82
รูปที่ 6.26	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสที่ความสูงต่างๆ ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 100% และ pyrolysis time 60 นาที.....	83
รูปที่ 6.27	แสดงองค์ประกอบของ Semicokes เมื่อค่า Pyrolysis time เปลี่ยนไป.....	84
รูปที่ 6.28	แสดงองค์ประกอบของ Semicokes เมื่ออุณหภูมิเบด ของห้องเผาไหม้เปลี่ยนไป.....	84
รูปที่ 6.29	แสดงค่าความร้อนของ Semicokes เมื่อค่า Pyrolysis time เปลี่ยนไป.....	85
รูปที่ 6.30	แสดงองค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงเมื่อค่า Pyrolysis time เปลี่ยนไป.....	86
รูปที่ 6.31	แสดงองค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิเบด ของห้องเผาไหม้เปลี่ยนไป.....	86
รูปที่ 6.32	แสดงค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงเมื่อค่า Pyrolysis time เปลี่ยนไป.....	87

รูปที่ 6.33	แสดงค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิเบดของห้องเผาไหม้เปลี่ยนไป.....	87
รูปที่ 6.34	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย เมื่ออัตราส่วนผสมของถ่านแกลบต่อแกลบ 0% โดยน้ำหนัก (แกลบอย่างเดียว).....	91
รูปที่ 6.35	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย เมื่ออัตราส่วนผสมของถ่านแกลบต่อแกลบ 10% โดยน้ำหนัก.....	91
รูปที่ 6.36	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย เมื่ออัตราส่วนผสมของถ่านแกลบต่อแกลบ 20% โดยน้ำหนัก.....	92
รูปที่ 6.37	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย เมื่ออัตราส่วนผสมของถ่านแกลบต่อแกลบ 30% โดยน้ำหนัก.....	92
รูปที่ 6.38	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย เมื่ออัตราส่วนผสมของถ่านแกลบต่อแกลบ 40% โดยน้ำหนัก.....	93
รูปที่ 6.39	แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย เมื่ออัตราส่วนผสมของถ่านแกลบต่อแกลบ 50% โดยน้ำหนัก.....	93
รูปที่ 6.40	แสดงอุณหภูมิเบดเทียบกับเวลาเมื่อที่อัตราส่วนผสมถ่านแกลบต่อแกลบเปลี่ยนไป.....	94
รูปที่ ก.1	แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแกลบที่ใช้ในการทดลองนี้แบบ Proximate และ Ultimate.....	114

## คำอธิบายสัญลักษณ์

A	ปริมาณอากาศจริงที่ต้องใช้ในการเผาไหม้
Ar	ตัวเลขอาคิมิติส
A <sub>o</sub>	ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีที่ต้องใช้ในการเผาไหม้
A <sub>t</sub>	พื้นที่หน้าตัดของเตาเผา
C <sub>D</sub>	สัมประสิทธิ์ของการไหล
C <sub>Pa</sub>	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ
C <sub>PRH</sub>	ความจุความร้อนจำเพาะของแก๊ส
d <sub>m</sub>	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค
d <sub>p</sub>	เส้นผ่านศูนย์กลางตะแกรง
d <sub>s</sub>	เส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ผิว
d <sub>sv</sub>	เส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ผิว-ปริมาตร
d <sub>v</sub>	เส้นผ่านศูนย์กลางปริมาตร
ERR	Error
%EA	เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน
G	ปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจริง
G <sub>o</sub>	ปริมาณก๊าซไอเสียเชิงทฤษฎี
HHV	ค่าความร้อนสูง
h <sub>fg</sub>	ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ
LHV	ค่าความร้อนต่ำ
L <sub>f</sub>	ความสูงเบดในการฟลูอิดไรซ์
L <sub>m</sub>	ความสูงเบดหนึ่ง
L <sub>mf</sub>	ความสูงเบดที่สภาวะการเกิดฟลูอิดไรซ์แบบพอดิ
m	อัตราส่วนอากาศ
m <sub>H<sub>2</sub></sub>	มวลของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม
m <sub>w</sub>	มวลของไอน้ำที่ได้จากการเผาไหม้ต่อ 1 หน่วยมวลเชื้อเพลิง
n/a	Unknown data
Q	ปริมาณความร้อน
Re	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์



## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

S	พื้นที่ผิว
TCH	ความสูงของการเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิดไอดีซ์เบด
TDH	ความสูงหลุดลอยส่งผ่านของเตาเผาฟลูอิดไอดีซ์เบด
T <sub>a</sub>	อุณหภูมิอากาศ
T <sub>c1</sub>	อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ความสูง 25 cm
T <sub>c2</sub>	อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ความสูง 75 cm
T <sub>c3</sub>	อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ความสูง 125 cm
T <sub>c4</sub>	อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ความสูง 175 cm
T <sub>p1</sub>	อุณหภูมิภายในห้องไพโรไลซิสที่ความสูง 25 cm
T <sub>p2</sub>	อุณหภูมิภายในห้องไพโรไลซิสที่ความสูง 75 cm
T <sub>p3</sub>	อุณหภูมิภายในห้องไพโรไลซิสที่ความสูง 125 cm
T <sub>p4</sub>	อุณหภูมิภายในห้องไพโรไลซิสที่ความสูง 175 cm
T <sub>g</sub>	อุณหภูมิก๊าซไอเสีย
T <sub>∞</sub>	อุณหภูมิบรรยากาศ
U <sub>f</sub>	ความเร็วในการฟลูอิดไอดีซ์
U <sub>mf</sub>	ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอดีซ์ชั้น
U <sub>t</sub>	ความเร็วสุดท้ายของอนุภาค
U <sub>0</sub>	ความเร็วของของไหลเมื่อนำตัดเบดวางเปล่า
V	ปริมาตร
ε <sub>f</sub>	สัดส่วนช่องว่างของเบดในการฟลูอิดไอดีซ์
ε <sub>m</sub>	สัดส่วนช่องว่างของเบดหนึ่ง
ε <sub>mf</sub>	สัดส่วนช่องว่างของเบดที่สภาวะการเกิดฟลูอิดไอดีซ์ชั้นพอดี
ρ <sub>g</sub>	ความหนาแน่นของก๊าซ
ρ <sub>s</sub>	ความหนาแน่นของอนุภาค
ΔP <sub>b</sub>	ความดันลดคร่อมเบด
ΔP <sub>d</sub>	ความดันลดคร่อมตัวกระจายก๊าซ
ΔP <sub>t</sub>	ความดันลดทั้งหมด

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

- $\phi_s$  ค่าความกลมของอนุภาค  
 $\mu$  ค่าความหนืดของของไหล



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งของประเทศไทย คือการที่ประเทศต้องพึ่งแหล่งพลังงานจากประเทศอื่น ทำให้เศรษฐกิจของประเทศผูกติดอยู่กับราคาของแหล่งพลังงานที่ผันผวนอยู่ตลอดเวลา

แนวทางการแก้ไขปัญหาโดยพยายามลดการพึ่งพาแหล่งพลังงานจากภายนอก แล้วหันมาเพิ่มความสามารถในการผลิตพลังงานภายในประเทศจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ตัวอย่างเช่น การสำรวจแหล่งน้ำมันดิบ แหล่งก๊าซธรรมชาติ และแหล่งถ่านหินภายในประเทศเพิ่มเติม การรณรงค์ให้ประชาชนประหยัดพลังงาน รวมถึงการใช้ประโยชน์แหล่งพลังงานทดแทนรูปแบบต่างๆ ที่มีอยู่ภายในประเทศ

สำหรับประเทศไทยแล้ว ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจอย่างยิ่ง จะพบว่าชีวมวลที่ผลิตได้ในแต่ละปีมีปริมาณมาก หากนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ชีวมวลเหล่านี้จะเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนได้

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่แหล่งพลังงานจากชีวมวล โดยใช้แกลบซึ่งเป็นชีวมวลทางการเกษตร ปริมาณแกลบที่ผลิตได้ภายในประเทศมีประมาณ 3-5 ล้านตันต่อปีแต่การใช้งานแกลบเหล่านี้ในรูปแบบพลังงานทดแทนยังมีสัดส่วนน้อยมาก กล่าวคือ ในโรงสีขนาดเล็กและขนาดกลางยังคงใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงหลัก ส่วนในโรงสีขนาดใหญ่ (กำลังของเครื่องจักรตั้งแต่ 60 แรงม้าขึ้นไป) จะใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงหลัก จำนวนโรงสีขนาดใหญ่คิดเป็น 3% (โดยประมาณ) ของโรงสีทั้งหมดภายในประเทศ

รูปแบบการนำแกลบมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีการศึกษาวิจัยกันมากคือ การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงผ่านกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) และกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ทั้งสองกระบวนการแตกต่างกันตรงที่ปริมาณอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยา กระบวนการก๊าซซิฟิเคชันจะใช้ปริมาณอากาศอยู่ในช่วง 25-50% (โดยประมาณ) ของอากาศตามทฤษฎี (Theoretical air) ผลิตภัณฑ์หลักคือก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (อยู่ในช่วง 3.3-5.6 MJ/m<sup>3</sup> หรือ 90-150 Btu/SCF) ส่วนกระบวนการไพโรไลซิสจะใช้ปริมาณอากาศไม่เกิน 10% (โดยประมาณ) ของอากาศตามทฤษฎี หรืออยู่ในสภาวะอับอากาศ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีทั้งก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (อยู่ในช่วง 9.3-20.5 MJ/m<sup>3</sup> หรือ 250-550 Btu/SCF) ของเหลวทาร์ (Tar) และถ่าน (Semicokes) ผลิตภัณฑ์ชนิดใดจะมากหรือน้อยขึ้นกับสภาวะการทำปฏิกิริยา

สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาการใช้พลังงานจากแกลบโดยกระบวนการไพโรไลซิสแหล่งความร้อนที่ป้อนให้กับกระบวนการไพโรไลซิสได้มาจากการเผาไหม้แกลบในห้องเผาไหม้ (Combustor) แล้วอาศัยการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังห้องเผาไหม้ออกมายังห้องไพโรไลซิส (Pyrolyser) การเผาไหม้แกลบภายในห้องเผาไหม้จะเป็นการเผาไหม้แบบฟลูอิดิซ์เบด (Fluidized bed combustion) เนื่องจากเป็นการเผาไหม้ที่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำเช่นแกลบ ส่วนแกลบที่อยู่ภายในห้องไพโรไลซิสจะเป็นแบบเบดนิ่ง (Fixed bed)

การวิจัยจะมุ่งเน้นถึงตัวแปรที่มีผลต่อการเผาไหม้แบบฟลูอิดิซ์เบดของแกลบ ตัวแปรที่มีผลต่อการไพโรไลซิสแกลบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสอันได้แก่ ถ่านซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลัก กับก๊าซเชื้อเพลิงที่เป็นผลิตภัณฑ์รอง รวมทั้งศึกษาการนำถ่านที่ผลิตได้มาเป็นเชื้อเพลิงป้อนกลับสำหรับห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดิซ์เบด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษากระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดิซ์เบดของแกลบ เพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของการเผาไหม้
2. ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งของแกลบ เพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อลักษณะและปริมาณผลิตภัณฑ์อันได้แก่ ถ่านแกลบ และก๊าซเชื้อเพลิง
3. ศึกษาการนำถ่านแกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดิซ์เบด ในรูปของเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านแกลบกับแกลบ

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้และการไพโรไลซิสแกลบ
2. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์การทดลองสำหรับการไพโรไลซิสแกลบแบบเบดนิ่งขนาดของอุปกรณ์อยู่ในระดับการทดลอง (Laboratory scale)
3. ทำการทดลองที่สภาวะต่างๆ เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้แบบฟลูอิดิซ์เบดและการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่ง ตัวแปรสำหรับการเผาไหม้ที่ศึกษาคือ ปริมาณอากาศส่วนเกินและอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ตัวแปรสำหรับการไพโรไลซิส

ที่ศึกษาคือ อุณหภูมิของปฏิกิริยาและเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิส (Pyrolysis time)

- นำถ่านแกลบที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักของกระบวนการไพโรไลซิสมาป้อนกลับเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ศึกษาการเผาไหม้ของถ่านแกลบเมื่อผสมกับแกลบที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักค่าต่างๆ

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

- ทราบถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้แบบฟลูอิดไอดีซ์เบดของแกลบ
- ทราบถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ของกระบวนการไพโรไลซิสแกลบแบบเบดนิ่ง
- ทราบถึงลักษณะการเผาไหม้ของถ่านแกลบซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของกระบวนการไพโรไลซิส



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

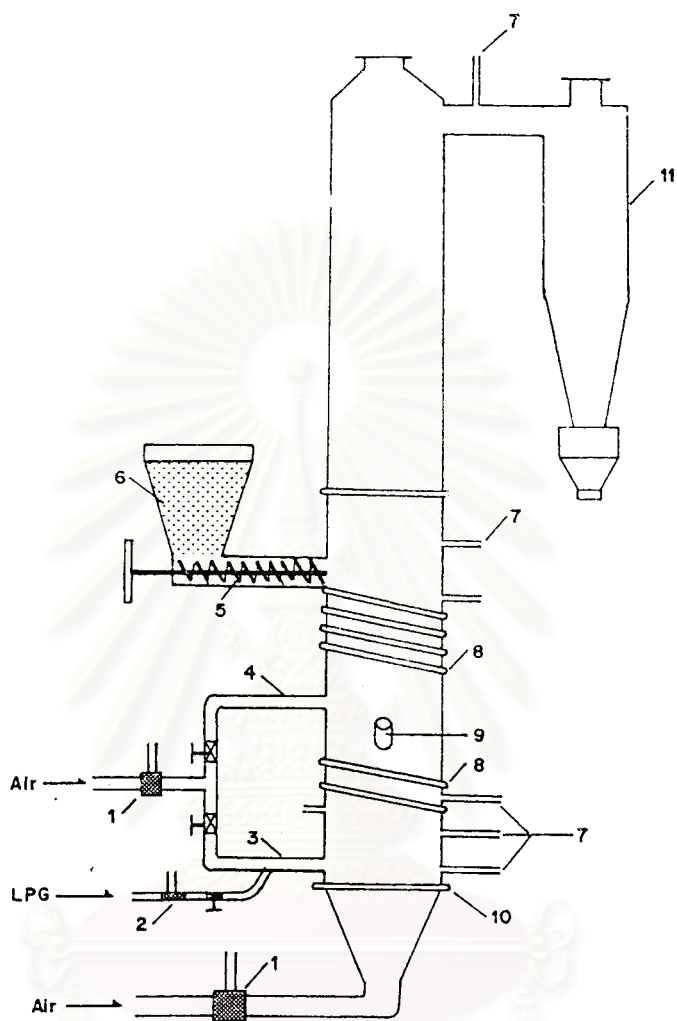
ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อใหญ่ๆ ได้แก่ งานวิจัยด้านการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด งานวิจัยด้านการไพโรไลซิสแบบ และท้ายสุดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งการเผาไหม้และการไพโรไลซิสแบบซึ่งเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์นี้ด้วย

#### 2.1 งานวิจัยด้านการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด

Wu Weizhang [1] ได้สร้างเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง ขนาดของเตาเผาที่สร้างมีทั้งขนาดสำหรับการทดลอง (Laboratory scale) และขนาดต้นแบบใช้งาน (Pilot scale) ความร้อนที่ผลิตได้อยู่ที่ 200-300 kW ศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้ ได้แก่ อัตราส่วนอากาศปฐมภูมิต่ออากาศทุติยภูมิ (Primary to secondary air ratio) ปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess air) และความเร็วของอากาศที่ใช้ในการฟลูอิดไคซ์ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ได้ประมาณ 95% งานวิจัยนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.1

อดิพันธ์ เหล่าวงศ์สิน [2] ออกแบบและสร้างเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง ขนาดของเตาเผาเป็นขนาดต้นแบบใช้งาน (Pilot scale) ที่มีอัตราการป้อนแกลบในช่วง 117-203 kg/hr ความเร็วในการฟลูอิดไคซ์ในช่วง 0.13-0.20 m/s ปริมาณอากาศส่วนเกินในช่วง 7-20% ผลการทดลองพบว่าเตาเผาไหม้มีอุณหภูมิเบดอยู่ในช่วง 550-700°C และมีประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ 23-25% งานวิจัยนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.2

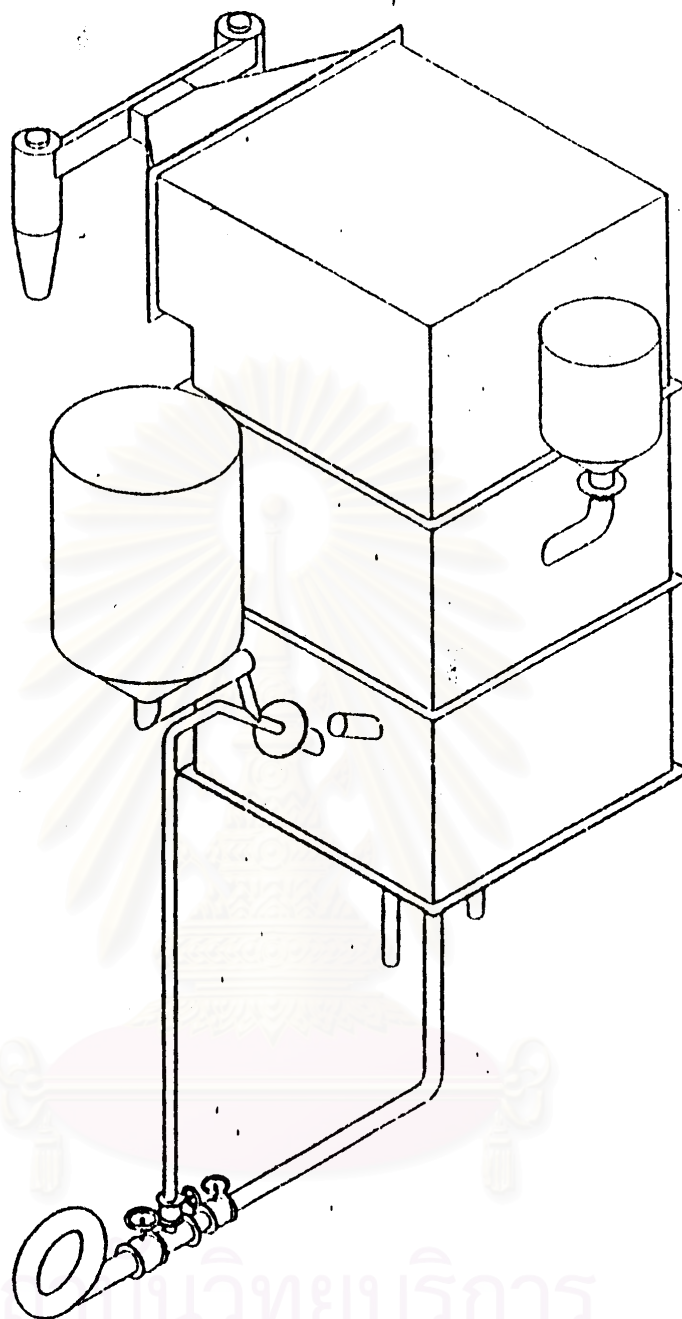
อภิชัย เทอดเทียนวงษ์ [3] ศึกษาและออกแบบสร้างเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้ขี้เลื่อยและแกลบเป็นเชื้อเพลิง ภายในเตาเผาติดตั้งท่อน้ำสำหรับศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาด้วย ศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้ ได้แก่ ปริมาณอากาศส่วนเกิน ความเร็วของอากาศที่ใช้ในการฟลูอิดไคซ์ ขนาดของทรายที่ใช้เป็นวัสดุเบด ได้สภาวะที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้คือ ปริมาณอากาศส่วนเกินในช่วง 50-80% ความเร็วอากาศที่ใช้ในการฟลูอิดไคซ์ประมาณ 2-4 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการฟลูอิดไคซ์ ขนาดทรายที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 40-50 เมช (Mesh) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้กับท่อน้ำในเบดมีค่าอยู่ในช่วง 190-260 W/m<sup>2</sup> k งานวิจัยนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.3



- |                       |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| 1. Air flowmeter      | 6. Hopper                 |
| 2. LPG flowmeter      | 7. Thermocouple           |
| 3. Gas burner         | 8. Cooling water tube     |
| 4. Secondary air tube | 9. Taking sample tube     |
| 5. Screw feeder       | 10. air distributor place |
|                       | 11. cyclone               |

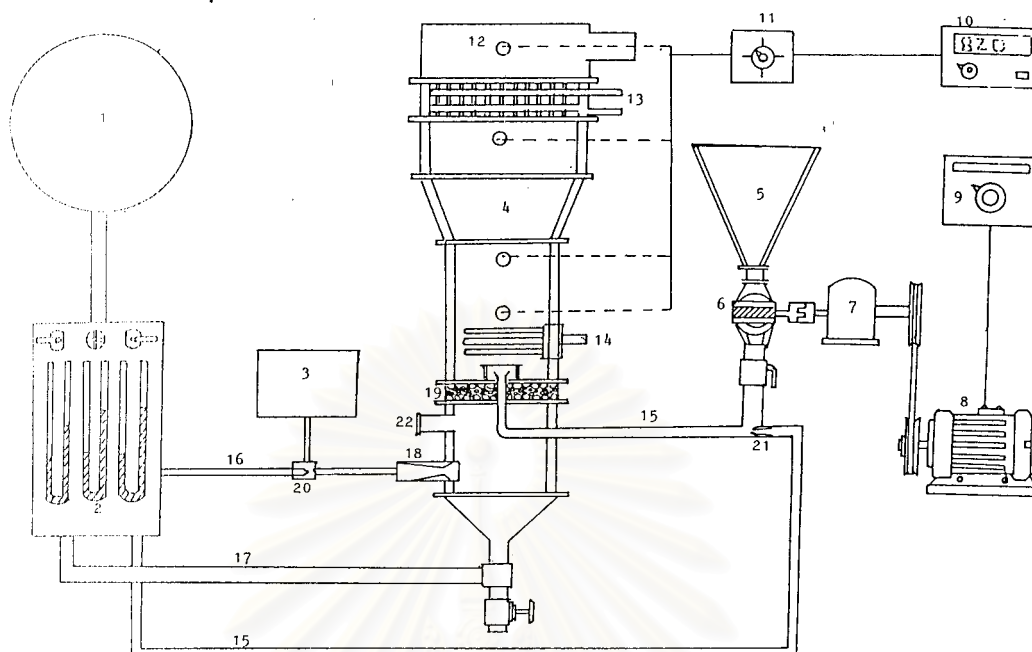
สถาบันวิจัยและพัฒนา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ในงานวิจัยของ Wu Weizhang



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ในงานวิจัยของอดิษฐ์ เหล่าวงศ์สิน



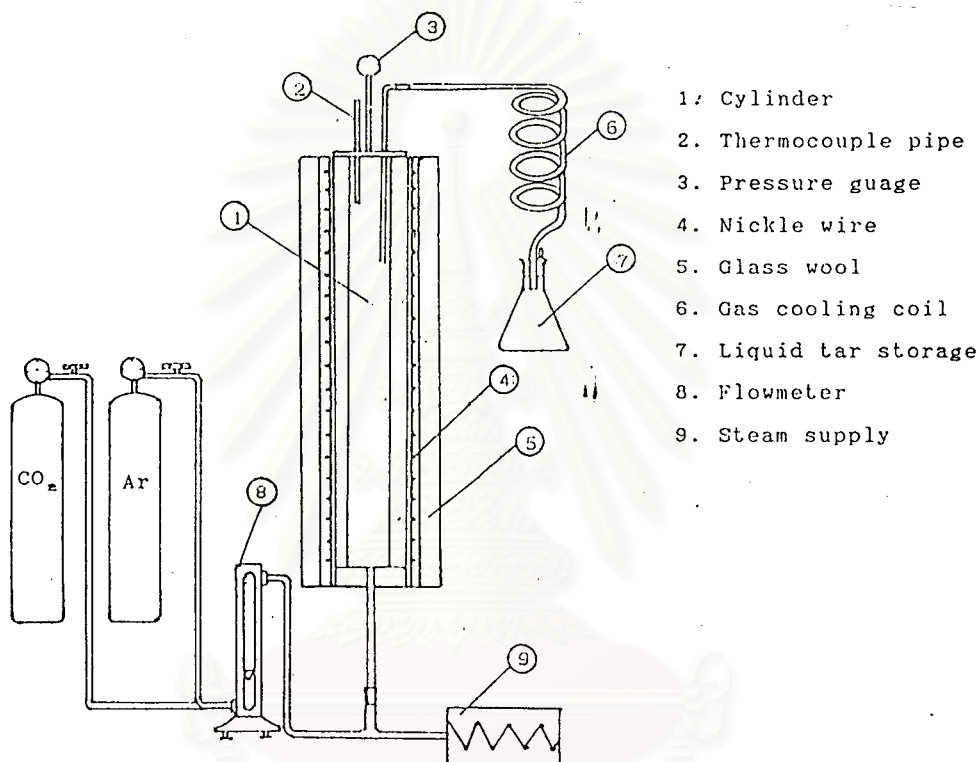


รูปที่ 2.3 อุปกรณ์ในงานวิจัยของอภิชัย เทอดเทียนวงษ์

## 2.2 งานวิจัยด้านการไฟโรไลซิสแกลบ

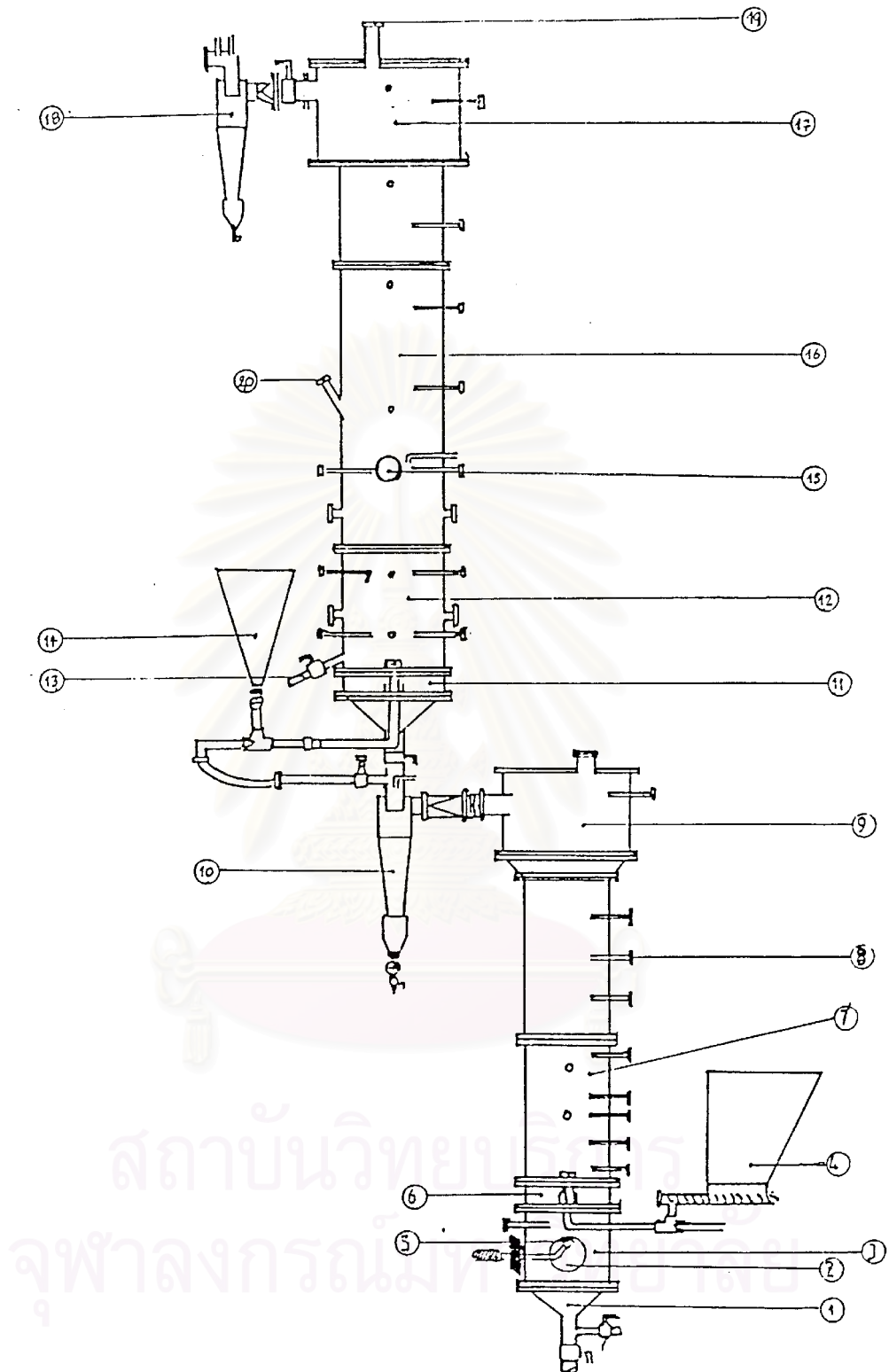
สิทธิศักดิ์ อุปริวงศ์ [4] ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ของเตาไฟโรไลซิสแบบไหลขึ้น เตาที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ใช้ขดลวดไฟฟ้าให้ความร้อนแก่ชีวมวลแทนการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อไม่ให้รบกวนการศึกษาในชั้นปฏิกิริยาไฟโรไลซิสและชั้นปฏิกิริยารีดักชัน ภายในเตามีสภาพอับอากาศ (ไร้ออกซิเจน) โดยการให้ก๊าซอาร์กอนเข้าแทนที่ชีวมวลที่ใช้ได้แก่ แกลบและขี้เลื่อยอัด ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิของเตาเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นแต่ของเหลวทาร์และถ่านลดลง อีกทั้งค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงก็จะเพิ่มขึ้นด้วย การให้อุณหภูมิกับชีวมวลภายในเตาในอัตราที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มปริมาณและค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงได้ และปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นถ้าความหนาของชั้นชีวมวลเพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่ารูปทรงของเตาไฟโรไลซิสแบบผอมสูงน่าจะให้ผลดีกว่ารูปทรงเตาแบบอ้วนเตี้ย รูปของงานวิจัยนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.4

สุกิจ วชิรชูเดช [5] ทำการทดลองผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีเอทิลีนเป็นองค์ประกอบจากกระบวนการไพโรไลซิสแกสซิฟิเคชันแบบลำดับ ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิสได้มาจากก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ชี้เสื่อยในเตาเผาฟลูอิดซ์เบด ชีวมวลที่ใช้ในการไพโรไลซิสคือ ไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง 5 ชนิด ผลที่ได้พบว่าชนิดของไม้ให้ก๊าซที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อองค์ประกอบก๊าซที่สำคัญคือ อุณหภูมิการไพโรไลซิส ก๊าซที่ได้มีค่าความร้อนสูงสุด 2,840 cal/g อุปกรณ์ในงานวิจัยนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ในงานวิจัยของสิทธิศักดิ์ อุปริวงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

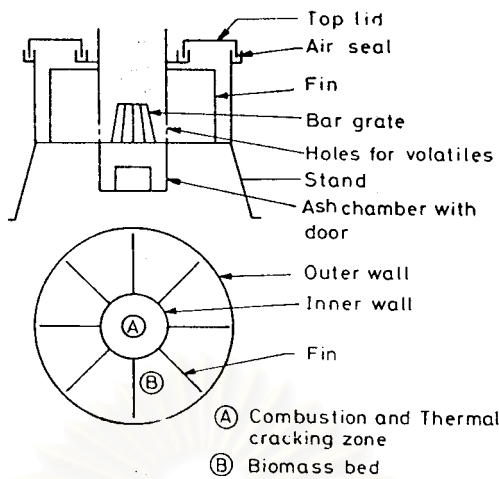


รูปที่ 2.5 อุปกรณ์ในงานวิจัยของสุกิจ วชิรชูเดช

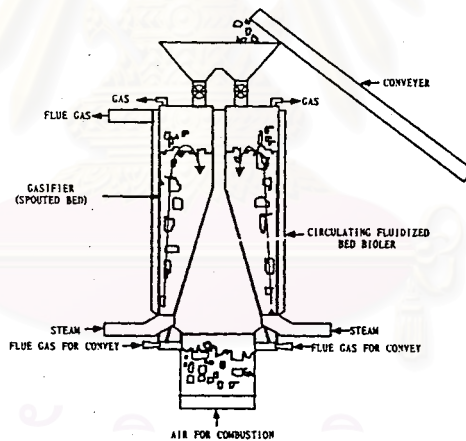
## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งการเผาไหม้และการไพโรไลซิสแกลบ

Atul Sharma , T.Rajeswara Rao [6] ออกแบบและสร้างห้องไพโรไลซิสแบบวงแหวนที่มีแผ่นครีป (Annular finned pyrolyser) ที่ด้านใน (Inner core) ของวงแหวนเป็นส่วนของห้องเผาไหม้สำหรับให้ความร้อนแก่กระบวนการไพโรไลซิส แผ่นครีประหว่างวงแหวนทำหน้าที่ช่วยถ่ายเทความร้อนจากห้องเผาไหม้สู่ห้องไพโรไลซิส นอกจากนี้ยังได้เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับทำนายอุณหภูมิในแนวรัศมีของวงแหวนที่เวลาต่างๆ และทำนายอัตราการเปลี่ยนจากแกลบไปเป็นถ่านที่เวลาต่างๆ อีกด้วย งานวิจัยนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.6

Mengxiang Fang, Chunjiang Yu, Zhongyang Luo, Guangyi Cheng และ Kefa Cen [7] ได้เสนอเทคนิคในการแปลงชีวมวลหลายชนิด ได้แก่ ฟางข้าว (Rice Straw) แกลบ (Rice Husks) และขี้เลื่อย (Saw Dust) ไปเป็นเชื้อเพลิงคุณภาพสูง ในที่นี้ได้แก่ ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium-energy Gas) เรียกกระบวนนี้ว่า “ระบบผลิตร่วมก๊าซ-ไอน้ำ” (Gas Steam Cogeneration System) ระบบนี้เป็นการรวมเทคนิคไพโรไลซิส ก๊าซซิฟิเคชัน และการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลไว้ด้วยกัน ระบบประกอบไปด้วยฟลูอิดไคซ์เบด 2 ชุด ชุดแรกทำหน้าที่เป็นก๊าซซิฟิเคชัน ชุดที่สองทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ ตัวก๊าซซิฟิเคชันถูกฟลูอิดไคซ์ด้วยไอน้ำและก๊าซหมุนเวียน (Recycle Gas) เชื้อเพลิงเข้าสู่ก๊าซซิฟิเคชันจะได้รับความร้อนแล้วกลั่นสลาย (Pyrolysed) ถ่าน(Semicokes) ที่เหลืออยู่จะทำปฏิกิริยากับไอน้ำ ความร้อนที่ต้องให้กับปฏิกิริยาในก๊าซซิฟิเคชันจะได้จากความร้อนของห้องเผาไหม้ ห้องเผาไหม้ถูกฟลูอิดไคซ์ด้วยอากาศและมีอุณหภูมิของการทำงานประมาณ 900-950 องศาเซลเซียส ถ่านที่ได้จากก๊าซซิฟิเคชันจะถูกส่งเข้าไปเป็นเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ ก๊าซร้อนที่ได้จากห้องเผาไหม้และจากก๊าซซิฟิเคชันจะผ่านเครื่องกำเนิดไอน้ำและผลิตไอน้ำออกมาใช้ในการฟลูอิดไคซ์ตัวก๊าซซิฟิเคชัน คุณสมบัติพิเศษของระบบคือ การที่ห้องเผาไหม้และก๊าซซิฟิเคชันทำงานควบคู่กันไป ซึ่งจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง การศึกษาจะมุ่งเน้นไปที่ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำงานในแต่ละกระบวนการ เช่น ในการศึกษากระบวนการไพโรไลซิส พบว่าอุณหภูมิในเบดมีผลอย่างมากต่ออัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงและการผลิตถ่าน ในการศึกษากระบวนการก๊าซซิฟิเคชันด้วยไอน้ำจะพบอิทธิพลของอุณหภูมิในเบดต่ออัตราการผลิตก๊าซ ต่อส่วนประกอบของก๊าซ และต่อค่าความร้อนของก๊าซ ในการศึกษากระบวนการเผาไหม้จะได้คุณสมบัติในการจุดติดไฟ (Ignition) ของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิด ได้การกระจายของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความเร็วอากาศค่าต่างๆ และได้ทราบอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) ต่อประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ท้ายสุดในการศึกษาการขนส่งอนุภาคด้วยอากาศจะทำให้ทราบถึงอิทธิพลของความเร็วของอากาศต่ออัตราการไหลของอนุภาค และทราบรูปแบบที่เหมาะสมในระบบขนส่งด้วยอากาศ งานวิจัยนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์ในงานวิจัยของ Atul Sharma , T.Rajeswara Rao



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์ในงานวิจัยของ Mengxiang Fang และคณะ

## บทที่ 3

### การไพโรไลซิสและการเผาไหม้

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี 2 ส่วนหลักของงานวิจัยนี้ ส่วนแรกอธิบายความรู้พื้นฐานของกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส กลไกการเกิดกระบวนการไพโรไลซิส และตัวแปรที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิส ส่วนที่สองกล่าวถึงความรู้พื้นฐานของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งซึ่งใช้อธิบายการเผาไหม้แกลบได้

#### 3.1 อธิบายศัพท์ที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะมีคำศัพท์ทางเทคนิคที่เกี่ยวข้องอยู่หลายคำ จึงอธิบายรวมเอาไว้ ณ ที่นี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ถูกต้องในเนื้อหาที่จะกล่าวถึงต่อไป

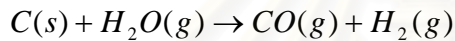
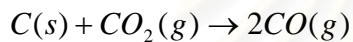
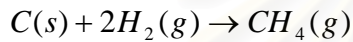
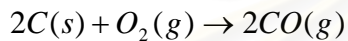
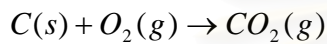
ไพโรไลซิส (Pyrolysis)	กระบวนการกลั่นสลายสารประกอบอินทรีย์ของชีวมวล โดยการให้ความร้อนในที่อับอากาศ (หรือมีอากาศไม่เกิน 10% ของอากาศทางทฤษฎีโดยประมาณ) หรือจะทำในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปของแข็ง (ถ่าน) ของเหลว (น้ำมัน) และก๊าซเชื้อเพลิง
คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)	กระบวนการกลั่นสลายทางความร้อนเช่นเดียวกับไพโรไลซิส แต่มักใช้คำนี้เมื่อผลิตภัณฑ์หลักของกระบวนการคือถ่าน
ถ่านโค้ก (Coke)	ของแข็งที่ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ (มากกว่า 80% โดยมวล) เกิดจากการกลั่นสลายทางความร้อนของวัสดุ (ในที่นี้คือชีวมวล) โดยผ่านการเปลี่ยนรูปในสถานะพลาสติก (Plastic)
ถ่านเซมิโค้ก (Semicokes)	ของแข็งที่เกิดระหว่างการกลั่นสลายทางความร้อนที่ยังไม่สมบูรณ์ ถ้าปล่อยให้เกิดการกลั่นสลายทางความร้อนต่อไป ถ่านเซมิโค้กจะกลายเป็นถ่านโค้ก ปริมาณคาร์บอนในถ่านเซมิโค้กจะน้อยกว่าในถ่านโค้ก

## 3.2 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

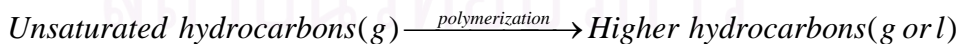
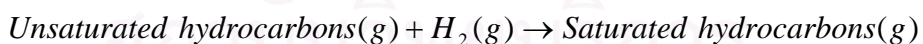
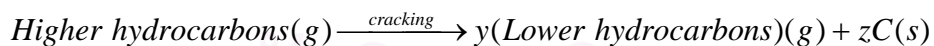
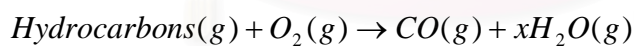
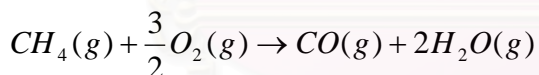
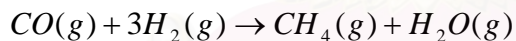
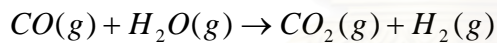
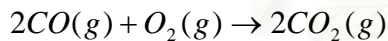
### 3.2.1 การเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์และเคมีในกระบวนการไพโรไลซิส [8]

กระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วยปฏิกิริยาเคมีชุดหนึ่ง มีทั้งที่เกิดควบคู่กันไปและเกิดเรียงตามลำดับ ชุดของปฏิกิริยาเหล่านี้แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ

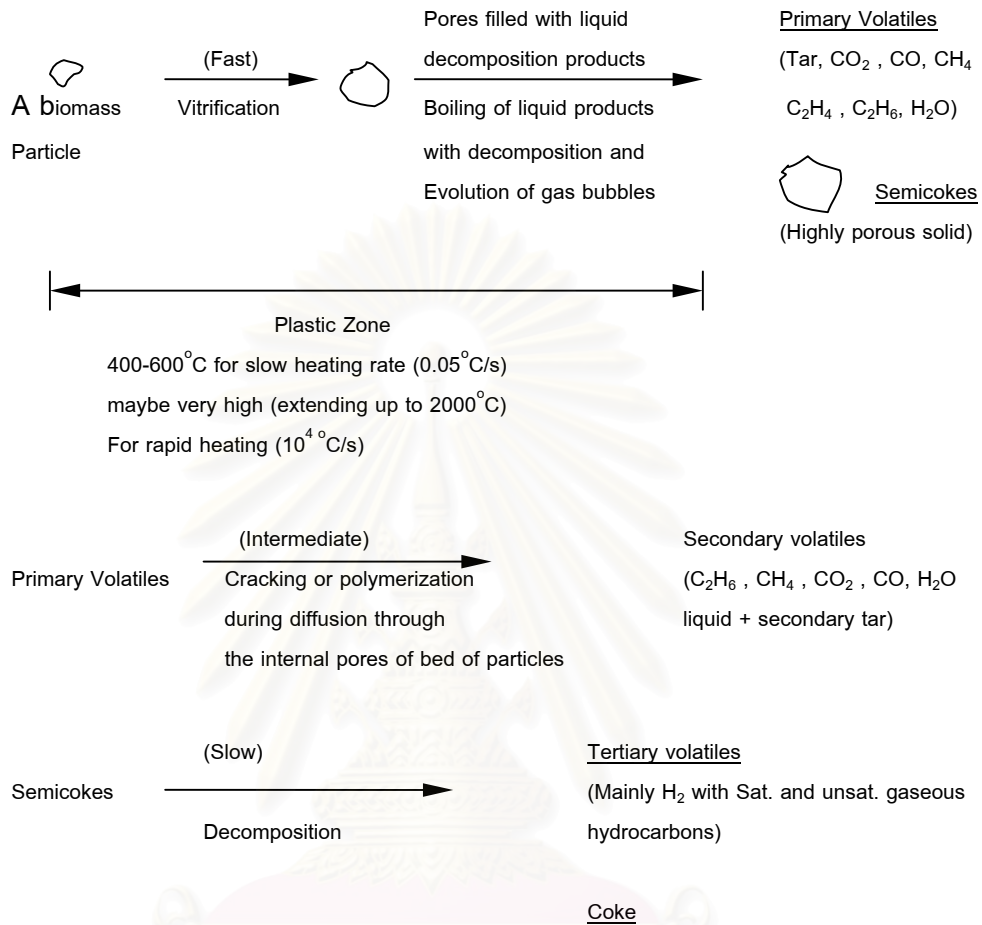
ปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง-ก๊าซ



ปฏิกิริยาระหว่างก๊าซ-ก๊าซ



อัตราการเกิดของปฏิกิริยาเหล่านี้ขึ้นอยู่กับสถานะของกระบวนการ อุณหภูมิเริ่มต้นของกระบวนการ ความดัน และสถานะของก๊าซบรรยากาศ กลไกการเกิดของปฏิกิริยาเหล่านี้ระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสยังไม่ทราบแน่ชัด ตัวอย่างหนึ่งที่แสดงถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสแบบคร่าวๆ แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กลไกปฏิกิริยาไพโรไลซิสของอนุภาคชีวมวล

### 3.2.2 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส [8]

ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิสสามารถจำแนกอย่างคร่าวๆ ได้ตามลักษณะของอัตราการให้ความร้อนแก่กระบวนการ และอุณหภูมิของกระบวนการ

ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิสจำแนกตามอัตราการให้ความร้อนแก่กระบวนการ แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่



1. Slow heating อัตราการให้ความร้อนไม่เกิน  $1^{\circ}\text{C/s}$  และใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง  $1,000^{\circ}\text{C}$  ประมาณ 20 min
2. Intermediate heating อัตราการให้ความร้อนอยู่ในช่วง  $5-100^{\circ}\text{C/s}$  และใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง  $1,000^{\circ}\text{C}$  อยู่ในช่วง 10 s - 4 min
3. Rapid heating อัตราการให้ความร้อนอยู่ในช่วง  $500-100,000^{\circ}\text{C/s}$  และใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง  $1,000^{\circ}\text{C}$  อยู่ในช่วง 10 ms – 2s
4. Flash heating อัตราการให้ความร้อนมากกว่า  $10^6^{\circ}\text{C/s}$  และใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง  $1000^{\circ}\text{C}$  น้อยกว่า 1 ms

ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิสจำแนกตามอุณหภูมิของปฏิกิริยา แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

1. Low temperature pyrolysis อุณหภูมิของปฏิกิริยาประมาณ  $500^{\circ}\text{C}$
2. Intermediate temperature pyrolysis อุณหภูมิของปฏิกิริยาประมาณ  $750^{\circ}\text{C}$
3. High temperature pyrolysis อุณหภูมิของปฏิกิริยาประมาณ  $1,000^{\circ}\text{C}$
4. Very high temperature pyrolysis อุณหภูมิของปฏิกิริยามากกว่า  $1,200^{\circ}\text{C}$

### 3.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส [9]

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส พอจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือปัจจัยทางเคมีอันได้แก่ องค์ประกอบต่างๆ ของวัตถุดิบ และก๊าซที่อยู่ในบรรยากาศที่มีการเกิดไพโรไลซิส อีกประเภทคือปัจจัยทางกายภาพ ได้แก่ อุณหภูมิสุดท้ายของการทำไพโรไลซิส เวลา และอัตราการให้ความร้อน อิทธิพลของแต่ละปัจจัยต่อการเกิดไพโรไลซิสเป็นดังนี้

1. องค์ประกอบของวัตถุดิบ องค์ประกอบของวัตถุดิบมีส่วนสำคัญต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหย (ก๊าซเชื้อเพลิง ไอน้ำ และของเหลวทาร์) ที่ได้จากการไพโรไลซิส กล่าวคือ วัตถุดิบที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (Hydrogen to Carbon Ratio) สูงจะให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยสูง

2. อุณหภูมิของปฏิกิริยาไพโรไลซิส (Pyrolysis Temperature) อุณหภูมิของปฏิกิริยาไพโรไลซิสมีส่วนสำคัญต่อทั้งปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหย ยกตัวอย่างเช่น ถ่านหินเมื่อเกิดการไพโรไลซิสอย่างช้า ช่วงอุณหภูมิที่สารระเหยจะถูกปลดปล่อยเริ่มตั้งแต่  $350-$

400 องศาเซลเซียส จนมาสูงสุดที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และลดลงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส หากแบ่งช่วงการไพโรไลซิสตามอัตราการปลดปล่อยสารระเหยก็พอจะแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ช่วงแรกอุณหภูมิระหว่าง 100-300 องศาเซลเซียส การปล่อยสารระเหยยังมีไม่มากและส่วนใหญ่เป็นสารที่เผาไหม้ไม่ได้ (Noncombustible) จำพวกคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ช่วงที่สองประมาณสามในสี่ส่วนของสารระเหยจะปลดปล่อยในช่วงนี้ องค์ประกอบของสารระเหยได้แก่ ก๊าซที่เผาไหม้ได้ (Combustible) จำพวกคาร์บอนมอนนอกไซด์ มีเทน รวมทั้งของเหลวทาร์ ช่วงสุดท้ายสารระเหยส่วนที่เหลืออยู่จะถูกปลดปล่อย และของแข็งที่เหลืออยู่จะกลายเป็นถ่าน แต่ถ้าให้ความร้อนต่อไปจะเป็นการลดปริมาณสารระเหยและเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) ของถ่าน

3. อัตราการให้ความร้อน (Heating Rate) ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรสำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส การให้อัตราความร้อนอย่างช้าๆ ปฏิริยาที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงมีโอกาเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เนื่องจากเวลาในการให้ความร้อนมีระยะเวลานานเพียงพอ ดังนั้นประเภทและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจึงขึ้นกับลักษณะการเกิดของปฏิริยาเหล่านั้น ส่วนการให้อัตราความร้อนอย่างรวดเร็ว ปฏิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างการให้ความร้อนสามารถตัดทิ้งได้ และอาจกล่าวได้ว่าปฏิริยาที่เกิดขึ้นที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ (Isothermal) ที่อุณหภูมิต่ำสุดท้าย

4. ขนาดของอนุภาค (Particle size) ขนาดของอนุภาคมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ เนื่องจากขนาดของอนุภาคมีความสัมพันธ์กับอัตราการให้ความร้อน กล่าวคือ การให้ความร้อนแก่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะเป็นไปได้ช้าในขณะที่การให้ความร้อนแก่อนุภาคขนาดเล็กจะเป็นไปได้เร็วกว่า ดังนั้นอุณหภูมิเฉลี่ยของอนุภาคขนาดใหญ่จะต่ำกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งจะทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์สารระเหยที่ได้จากอนุภาคขนาดใหญ่น้อยกว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอนุภาคขนาดเล็ก เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กได้รับความร้อนกระจายทั่วถึงและสม่ำเสมอกว่านั่นเอง

5. ความดัน (Pressure) ความดันเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์สารระเหยได้ กล่าวคือ เมื่อให้ความดันเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์สารระเหยที่ได้มีปริมาณลดลง ในทางกลับกันถ้าให้ความดันต่ำจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สารระเหยเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสำหรับปฏิริยาการแตกตัว (Cracking) จะเกิดขึ้นได้ดีที่ความดันสูง ซึ่งจะมีผลให้เกิดก๊าซที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่ถ้าให้ความดันต่ำปฏิริยาการแตกตัวเป็นก๊าซจะลดลง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จำพวกของเหลวทาร์และถ่านเพิ่มมากขึ้น

6. สภาวะบรรยากาศ (Atmosphere) สภาวะบรรยากาศของปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาไพโรไลซิสในบรรยากาศที่มีไฮโดรเจนหรือที่เรียกว่า ไฮโดรไพโรไลซิส (Hydropyrolysis) สามารถทำให้เพิ่มผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยได้ และช่วยเพิ่มปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

7. เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องไพโรไลซิส (Pyrolysis time) เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องไพโรไลซิสต้องนานเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ หากเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องไพโรไลซิสน้อยเกินไป การเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบเริ่มต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ก็จะทำได้ไม่สมบูรณ์ แต่หากเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องไพโรไลซิสมากเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านมีแนวโน้มค่า %C ลดลง และผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยมีปริมาณน้อยลง

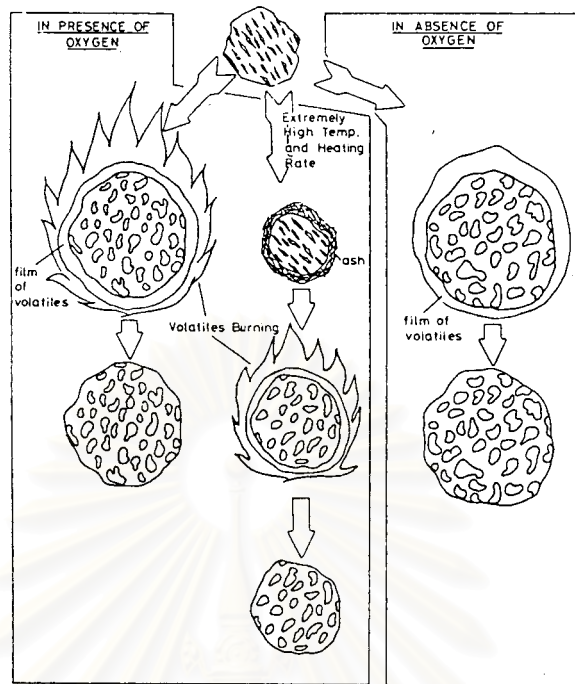
โดยสรุปแล้ว ในบรรดาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดไพโรไลซิสที่กล่าวมานั้น อัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิสุดท้ายของปฏิกิริยาไพโรไลซิสมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมากที่สุด

### 3.2.4 กลไกการเกิดถ่านในกระบวนการไพโรไลซิส [8]

กลไกการเกิดถ่านในกระบวนการไพโรไลซิสแบ่งออกได้เป็น 2 ระยะ คือระยะเริ่มต้นของกระบวนการในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิ และระยะถัดจากระยะเริ่มต้น

ลักษณะการเกิดถ่านอันเนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิในระยะเริ่มต้นของกระบวนการไพโรไลซิสแสดงอยู่ในรูปที่ 3.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 ลักษณะการเกิดถ่านในกระบวนการไพโรไลซิส

จากรูปที่ 3.2 ในกรณีที่มีออกซิเจน การปลดปล่อยสารระเหยจะเกิดขึ้นก่อน แล้วตามด้วยการเผาไหม้สารระเหยเหล่านั้น เว้นแต่ในกรณีที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงมากและอัตราการให้ความร้อนสูงมาก อนุภาคชีวมวลสามารถเผาไหม้ได้โดยตรงจากผิวด้านนอกของอนุภาคก่อนที่การปลดปล่อยสารระเหยจะเกิดขึ้น ถ่านที่เกิดขึ้นในระยะนี้จะแตกต่างจากอนุภาคชีวมวลเดิมทั้งขนาด รูปร่าง และความพรุน

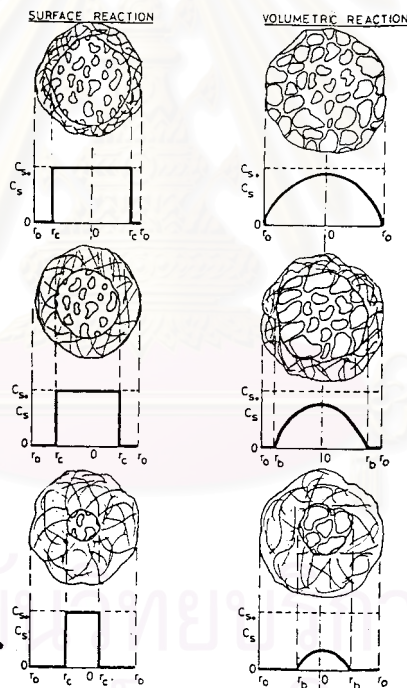
กระบวนการเกิดถ่านในระยะต่อมาของปฏิกิริยาไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ปฏิกิริยาเชิงปริมาตร (Volumetric reactions) และปฏิกิริยาเชิงพื้นผิว (Surface reactions) ปฏิกิริยาทั้งสองแบบเกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกอนุภาคถ่านโดยอาศัยการแพร่ความร้อน (Diffusion) เป็นหลัก

ในปฏิกิริยาเชิงปริมาตร ก๊าซที่ทำปฏิกิริยา (Reacting gas) จะแพร่เข้าไปภายในของอนุภาคแล้วทำให้บริเวณที่เกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) ขยายจนทั่วทั้งอนุภาค เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปจะเกิดชั้นของถ่านที่ผิวนอกของอนุภาคแล้วทำให้บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาค่อยๆ เล็กลง

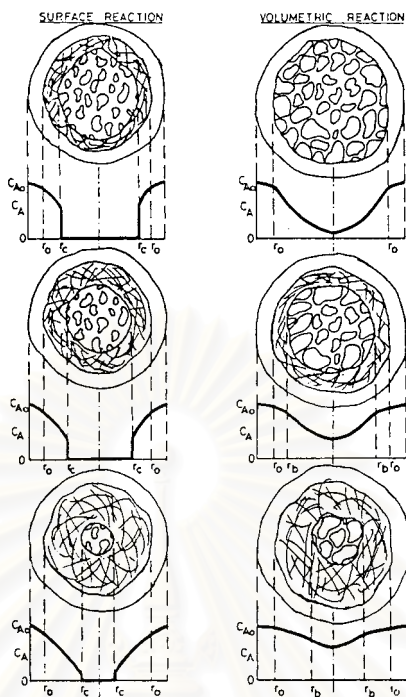
ส่วนในปฏิกิริยาเชิงพื้นผิว ก๊าซที่ทำปฏิกิริยาไม่สามารถทะลุเข้าไปภายในอนุภาค การเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดจากพื้นผิวด้านนอกเข้าไปสู่ภายในอนุภาค พื้นผิวที่เกิดปฏิกิริยาจะถูกขนาบด้วยแกนกลางซึ่งเป็นส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับชั้นเถ้าด้านนอก

รูปที่ 3.3 และ 3.4 แสดง Carbon concentration profile และ Reacting gas concentration profile เทียบกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของถ่าน

โดยสรุป ปฏิกิริยาเชิงพื้นผิวเกิดขึ้นเมื่อปฏิกิริยาเคมีดำเนินไปอย่างรวดเร็ว เช่น การเผาไหม้ชีวมวล ในขณะที่ปฏิกิริยาเชิงปริมาตรเกิดขึ้นเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างช้าๆ เช่น การไพโรไลซิสแบบช้าของชีวมวล



รูปที่ 3.3 Carbon concentration profile ของการเกิดถ่าน



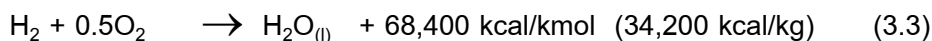
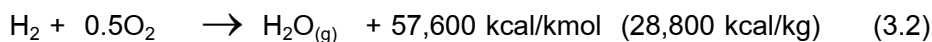
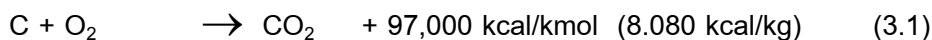
รูปที่ 3.4 Gas concentration profile ของการเกิดถ่าน

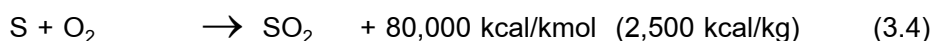
### 3.3 การเผาไหม้ (Combustion)

#### 3.3.1 ทฤษฎีการเผาไหม้ (Combustion theory) [10]

การเผาไหม้ หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับส่วนประกอบที่เผาไหม้ได้ (combustion element) ของเชื้อเพลิง ส่วนประกอบที่เผาไหม้ได้คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และสารที่เหลือจากการเผาไหม้ ได้แก่ ขี้เถ้า ออกซิเจน และไนโตรเจน

การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ คือ การเผาไหม้ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วให้ปริมาณความร้อนเท่ากับค่าความร้อน (heating value) ของเชื้อเพลิง สมการพื้นฐานของการเผาไหม้มีดังต่อไปนี้





ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแบ่งออกเป็น ค่าความร้อนสูง (High Heating Value:HHV) และ ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value:LHV) กรณีวิเคราะห์โดยไอน้ำในสารที่ได้จากการเผาไหม้ ควบแน่นนั้นจะได้ค่าความร้อนสูง และถ้าไอน้ำในสารที่ได้จากการเผาไหม้ระเหยตัวจะได้ค่าความร้อนต่ำ ความสัมพันธ์ระหว่างสองเทอมคือ

$$LHV = HHV - m_w h_{fg} \quad (3.5)$$

$$LHV = HHV - 9m_{H_2} h_{fg} \quad (3.6)$$

โดยที่  $m_w$  คือ มวลของไอน้ำในสารที่ได้จากการเผาไหม้ต่อ 1 หน่วยมวลของเชื้อเพลิงเนื่องจากการเผาไหม้ของ H ในเชื้อเพลิง,  $m_{H_2}$  คือ มวลของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง 1 kg ซึ่งวิเคราะห์จาก Ultimate analysis และ  $h_{fg}$  คือ ความร้อนแฝงของการระเหยหรือควบแน่นของไอน้ำที่ความดันย่อยของสารที่ได้จากการเผาไหม้

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง นอกจากจะสามารถหาได้โดยใช้คาลอริมิเตอร์ (calorimeter) แล้ว ยังสามารถหาค่าโดยประมาณได้จากการคำนวณที่อาศัยส่วนประกอบโดยมวลของเชื้อเพลิงตามสมการ

$$HHV = 8080 \times c + 34200 \times \left( h - \frac{o}{8} \right) + 2500 \times s \quad (3.7)$$

เมื่อเทอม  $8080c$  เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของธาตุคาร์บอนในเชื้อเพลิง 1 kg เทอม  $34200h$  เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาของธาตุไฮโดรเจนแล้วได้น้ำ แต่เนื่องจากในเชื้อเพลิงอาจมีธาตุออกซิเจนประกอบอยู่ด้วย ซึ่งออกซิเจนในส่วนนี้จะรวมกับไฮโดรเจนเป็นความชื้นที่แฝงอยู่ในเชื้อเพลิงนอกเหนือจากความชื้นทั่วไป ปฏิกิริยาเคมีในส่วนนี้จะไม่ให้ความร้อน ออกซิเจน 8 kg จะรวมตัวกับไฮโดรเจน 1 kg ได้น้ำ 9 kg ดังนั้นจึงต้องนำเทอม  $o/8$  มาหักออกจาก  $h$  เพื่อที่จะได้ปริมาณของไฮโดรเจนที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและให้ความร้อนออกมาจริง เทอม  $2500s$  เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาของกำมะถันกับออกซิเจน

ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงคำนวณได้จากสมการ

$$\text{LHV} = 8080 \times c + 28800 \times \left( h - \frac{o}{8} \right) + 2500 \times s - 540 \times \left( \frac{9}{8} \times o + w \right) \quad (3.8)$$

เมื่อเทอม  $28800h$  เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาของธาตุไฮโดรเจนแล้วได้น้ำเทอม  $9(o/8)$  เป็นน้ำหนักของน้ำที่แฝงอยู่ในเชื้อเพลิงเนื่องจากองค์ประกอบของธาตุในเชื้อเพลิง ส่วนเทอม  $540$  นั้นเป็นค่าความร้อนแฝงของการควบแน่นของไอน้ำ และ  $w$  เป็นปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิง

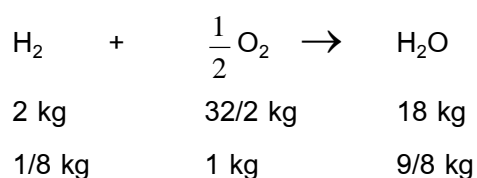
ก๊าซที่จำเป็นต่อกระบวนการเผาไหม้คือ ออกซิเจน โดยใช้ก๊าซออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศ ค่าโดยประมาณขององค์ประกอบของอากาศแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์องค์ประกอบ	
	โดยปริมาตร	โดยมวล
ออกซิเจน	21	23
ไนโตรเจน	79	77

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของอากาศ

ถ้าเราทราบอัตราส่วนขององค์ประกอบในเชื้อเพลิง ก็สามารถคำนวณหาปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักเชื้อเพลิงได้โดยการรวมปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีขององค์ประกอบแต่ละตัว

ถ้าในเชื้อเพลิงมีออกซิเจน ก็ให้ถือว่าออกซิเจนรวมตัวกับไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงอยู่ในสภาพ  $\text{H}_2\text{O}$  เนื่องจาก





ฉะนั้น  $H_2O$  เกิดจากออกซิเจน 1 (kg) รวมตัวกับไฮโดรเจนในอัตราส่วน 1/8 (kg) นั่นคือ ในจำนวนไฮโดรเจน  $h$  (kg/kg เชื้อเพลิง) ส่วนที่รวมตัวกับออกซิเจนในเชื้อเพลิงเป็น  $H_2O$  ไปแล้ว คือ  $O/8$  (kg/kg เชื้อเพลิง) ดังนั้นไฮโดรเจนที่เหลือสำหรับการเผาไหม้คือ  $h-O/8$  (kg/kg เชื้อเพลิง) จากตารางที่ 3.1 ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของ C 1 (kg) เท่ากับ

$$\begin{aligned} & 1/12 \times 22.4 = 1.867 \text{ (Nm}^3\text{/kg เชื้อเพลิง)} \\ \text{หรือ} & 1/12 \times 32 = 2.67 \text{ (kg/kg เชื้อเพลิง)} \end{aligned}$$

เนื่องจากในเชื้อเพลิง 1 (kg) มี C เท่ากับ  $c$  (kg/kg เชื้อเพลิง) ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นคือ

$$\begin{aligned} & 1/12 \times 22.4 \times c \text{ (Nm}^3\text{/kg เชื้อเพลิง)} \\ \text{หรือ} & 1/12 \times 32 \times c \text{ (kg/kg เชื้อเพลิง)} \end{aligned}$$

ในกรณีของ H ในเชื้อเพลิง ปริมาณออกซิเจนในอากาศที่จำเป็นคือ

$$\begin{aligned} & 1/2 \times 22.4/2 \times (h - o/8) \text{ (Nm}^3\text{/kg เชื้อเพลิง)} \\ \text{หรือ} & 1/2 \times 32/2 \times (h - o/8) \text{ (kg/kg เชื้อเพลิง)} \end{aligned}$$

ในกรณีของ S ในเชื้อเพลิง ปริมาณออกซิเจนในอากาศที่จำเป็นคือ

$$\begin{aligned} & 1/32 \times 22.4 \times s \text{ (Nm}^3\text{/kg เชื้อเพลิง)} \\ \text{หรือ} & 1/32 \times 32 \times s \text{ (kg/kg เชื้อเพลิง)} \end{aligned}$$

ผลรวมนี้ทั้งหมดก็คือ ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง 1 (kg) เนื่องจากอัตราส่วนของออกซิเจนในอากาศเท่ากับ 0.21 โดยปริมาตรหรือ 0.232 โดยน้ำหนัก ดังนั้นถ้าให้  $A_0$  เป็นปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีที่ต้องการใช้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$A_0 = \frac{1}{0.232} \left[ \frac{1}{12} \times 32 \times c + \frac{1}{2} \times \frac{32}{2} \times \left( h - \frac{o}{8} \right) + \frac{1}{32} \times 32 \times s \right]$$

(kgอากาศ/kgเชื้อเพลิง) (3.9)

เมื่อต้องการคำนวณหาปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีในหน่วยปริมาตรของอากาศก็จะได้สมการเป็น

$$A_0 = \frac{1}{0.21} \left[ \frac{1}{12} \times 22.4 \times c + \frac{1}{2} \times \frac{22.4}{2} \times \left( h - \frac{o}{8} \right) + \frac{1}{32} \times 22.4 \times s \right]$$

(Nm<sup>3</sup> อากาศ/kg เชื้อเพลิง) (3.10)

ในกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงนั้น การที่จะผสมอากาศและเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอโดยสมบูรณ์นั้นเป็นไปได้ยาก นั่นคือเพียงแต่ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีเท่านั้นจะก่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้ยาก จึงจำเป็นต้องป้อนปริมาณอากาศเข้าห้องเผาไหม้ในปริมาณที่มากกว่าปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี อัตราส่วนของปริมาณอากาศที่ใช้จริงต่อปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี เรียกว่า อัตราส่วนอากาศ

ถ้าให้  $m$  แทนอัตราส่วนอากาศ  $A_0$  แทนปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีและ  $A$  แทนปริมาณอากาศที่ใช้จริง จะได้ว่า

$$m = \frac{A}{A_0} \quad \text{หรือ} \quad A = mA_0$$

ปริมาณอากาศส่วนเกินคือ  $(m-1)A_0$  และอัตราส่วนอากาศส่วนเกินคือ  $(m-1)$  หรือเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินคือ  $(m-1) \times 100\%$

ก๊าซไอเสียประกอบด้วย  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$  จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง และ  $\text{O}_2$  ในอากาศส่วนเกินที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ และ  $\text{N}_2$  ในอากาศที่ป้อน

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ } \text{CO}_2 \text{ ที่เกิดขึ้นเท่ากับ } & \frac{1}{12} \times 22.4 \times c \quad (\text{Nm}^3/\text{kg} \text{ เชื้อเพลิง}) \\ \text{หรือ} & \frac{1}{12} \times 44 \times c \quad (\text{kg/kg} \text{ เชื้อเพลิง}) \end{aligned}$$

ปริมาณ  $H_2O$  ที่เกิดขึ้นเท่ากับ  $1/2 \times 22.4 \times h$  ( $Nm^3/kg$  เชื้อเพลิง)

หรือ  $1/2 \times 18 \times h$  ( $kg/kg$  เชื้อเพลิง)

ปริมาณ  $SO_2$  ที่เกิดขึ้นเท่ากับ  $1/32 \times 22.4 \times s$  ( $Nm^3/kg$  เชื้อเพลิง)

หรือ  $1/32 \times 64 \times s$  ( $kg/kg$  เชื้อเพลิง)

สำหรับความชื้นในเชื้อเพลิงนั้นเมื่อเกิดการเผาไหม้จะกลายเป็นไอน้ำ ดังนั้น

ความชื้นที่เกิดขึ้นเท่ากับ  $1/18 \times 22.4 \times w$  ( $Nm^3/kg$  เชื้อเพลิง)

หรือ  $w$  ( $kg/kg$  เชื้อเพลิง)

ธาตุไนโตรเจนในเชื้อเพลิงจะกลายเป็นแก๊สไนโตรเจน ดังนั้น

ปริมาณ  $N_2$  ที่เกิดขึ้นเท่ากับ  $1/28 \times 22.4 \times n$  ( $Nm^3/kg$  เชื้อเพลิง)

หรือ  $n$  ( $kg/kg$  เชื้อเพลิง)

ด้วยเหตุที่การเผาไหม้เชื้อเพลิงเราต้องใช้ปริมาณอากาศเกินพอ ปริมาณอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้เท่ากับ  $mA_0$  ( $Nm^3/kg$  เชื้อเพลิง) หรือ  $mA_0$  ( $kg/kg$  เชื้อเพลิง) และเนื่องจากปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ  $(m-1)A_0$  ดังนั้น

ปริมาณ  $O_2$  ส่วนเกินเท่ากับ  $0.21 \times (m-1)A_0$  ( $Nm^3/kg$  เชื้อเพลิง)

หรือ  $0.232 \times (m-1)A_0$  ( $kg/kg$  เชื้อเพลิง)

เนื่องจากไนโตรเจนในอากาศที่ป้อนเข้าไปย่อมเหลือออกมากับแก๊สไอเสียทั้งหมด จะได้

ปริมาณ  $N_2$  ที่ออกมาเท่ากับ  $(1-0.21) \times mA_0$  ( $Nm^3/kg$  เชื้อเพลิง)

หรือ  $(1-0.232) \times mA_0$  ( $kg/kg$  เชื้อเพลิง)

เมื่อรวมแก๊สทั้งหมดที่เกิดจากการเผาไหม้ ผลรวมทั้งหมดย่อมเป็นปริมาณแก๊สไอเสียอันเกิดจากการเผาไหม้  $G$  ในหน่วยปริมาตรอากาศจะได้

$$G = 0.21 \times (m-1)A_0 + (1-0.21)mA_0 + \frac{22.4}{12} \times c + \frac{22.4}{2} \times h + \frac{22.4}{32} \times s + \frac{22.4}{18} \times w + \frac{22.4}{28} \times n$$

( $Nm^3/kg$  เชื้อเพลิง) (3.11)

ถ้าใช้หน่วยของน้ำหนักจะได้

$$G = 0.232 \times (m-1)A_0 + (1-0.232)mA_0 + \frac{44}{12} \times c + \frac{18}{2} \times h + \frac{64}{32} \times s + w + n$$

( $kg/kg$  เชื้อเพลิง) (3.12)

เมื่อเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ด้วยปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี ปริมาณก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ที่ได้นี้เรียกว่า ปริมาณก๊าซไอเสียเชิงทฤษฎี แทนด้วย  $G_0$  เพียงแต่แทนค่า  $m = 1$  ลงในสมการก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ จะได้

$$G_0 = (1 - 0.21)A_0 + \frac{22.4}{12} \times c + \frac{22.4}{2} \times h + \frac{22.4}{32} \times s + \frac{22.4}{18} \times w + \frac{22.4}{28} \times n$$

(Nm<sup>3</sup>/kg เชื้อเพลิง) (3.13)

ถ้าใช้หน่วยน้ำหนักจะได้

$$G_0 = (1 - 0.232)A_0 + \frac{44}{12} \times c + \frac{18}{2} \times h + \frac{64}{32} \times s + w + n$$

(kg/kg เชื้อเพลิง) (3.14)

### 3.3.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการเผาไหม้ [3]

การเผาไหม้ที่ดีควรประกอบด้วย

1. อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนหรืออากาศ ในการเผาไหม้เพื่อให้ได้ผลอย่างสมบูรณ์นั้นจะต้องมีสัดส่วนที่พอดีกันระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงกับปริมาณออกซิเจนตามสมการการเผาไหม้ ปริมาณอากาศตามทฤษฎี (Theoretical air) คือปริมาณอากาศที่น้อยที่สุดที่ต้องใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์จน C H และ S เปลี่ยนเป็น CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O และ SO<sub>2</sub> ตามลำดับ แต่ในทางปฏิบัติจริง อากาศที่ต้องการตามทฤษฎีนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการสันดาปที่สมบูรณ์ สังเกตได้จากการเกิดก๊าซ CO ดังนั้นจึงต้องใช้ปริมาณอากาศมากเกินไปสำหรับการสันดาปที่สมบูรณ์

2. การผสมหรือการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนหรืออากาศ การรวมตัวที่ดีระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนคือการที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลออกซิเจนอย่างทั่วถึง ในกรณีเชื้อเพลิงเป็นก๊าซการผสมกันจะเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าเชื้อเพลิงเป็นของแข็งหรือของเหลวการผสมกันจะยุ่งยากมากขึ้น ในกรณีของเหลวส่วนใหญ่จะทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงเล็กลงแล้วพ่นเพื่อผสมกับอากาศ ส่วนกรณีของแข็งอาจมีการบดเชื้อเพลิงให้เล็กลงเพื่อให้การสัมผัสกับออกซิเจนได้ดีขึ้น

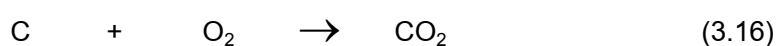
3. อุณหภูมิที่สูงพอต่อการเผาไหม้ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหรืออัตราการรวมกันทางเคมีของเชื้อเพลิงกับอากาศจะขึ้นกับอุณหภูมิเป็นอย่างมาก การเผาไหม้จะเกิดขึ้นในตอนแรกๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะไปเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้สูงขึ้นทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้นด้วย สิ่งที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้แบบเกิดขึ้นได้เองและต่อเนื่อง (Spontaneous combustion) จะต้องมีความร้อนจากภายนอกช่วยเริ่มปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมามากขึ้นจนมีอุณหภูมิสูงพอต่อการเผาไหม้ได้เอง โดยปกติแล้วการเผาไหม้นั้นต้องการให้มีอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้เร็ว แต่การที่จะให้มีอุณหภูมิสูงได้มากน้อยแค่ไหนมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ในกรณีที่อุณหภูมิสูงเกินไปก็จะทำให้เกิดข้อเสียคือ ทำให้เกิดการหลอมรวมของสารที่ไม่ต้องการได้ เช่นการหลอมของเถ้า (Slag) และการเกิด  $\text{NO}_x$

4. เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาควรจะนานเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้มากที่สุด

### 3.3.3 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง [10]

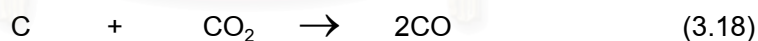
กระบวนการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

1. เริ่มด้วยออกซิเจนจะสัมผัสกับผิวคาร์บอน
  2. เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมา
  3. มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมาที่ผิว
  4. เกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนนอกไซด์กับออกซิเจนเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์
- ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะถูกร่งได้โดยการบดเชื้อเพลิงแข็งให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นการทำให้สารระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิง (volatile matter) ระเหยออกมาได้เร็วและช่วยให้เกิดการผสมกับอากาศดีขึ้น ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้



เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะเกิดการผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ซึ่งจะทำให้มีพื้นผิวของเชื้อเพลิงในการสัมผัสกับออกซิเจนจำกัด คือ จะเกิดปฏิกิริยาเฉพาะที่ผิวของเชื้อเพลิงเข้าไปเรื่อยๆ ดังนั้นจะเห็นว่า การออกแบบระบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง ควรให้มีพื้นผิวสำหรับปฏิกิริยามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยการบดเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากขึ้น

เชื้อเพลิงแข็งมีสารประกอบที่เกิดการเผาไหม้แบ่งออกได้สองชนิดคือ ชนิดที่เป็นสารระเหย (volatile matter) เช่น น้ำ ไฮโดรคาร์บอน และชนิดที่ไม่เป็นสารระเหย เช่น คาร์บอน สำหรับสารประกอบที่ไม่เกิดการเผาไหม้ ได้แก่ ความชื้น และสารประกอบอนินทรีย์ ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลวและก๊าซ หลังจากเกิดปฏิกิริยาจะให้ผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องทำปฏิกิริยาต่อไปอีก มีสองสถานะคือ ก๊าซและของแข็ง สถานะก๊าซประกอบด้วย  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  เมื่อปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิว (surface flux to volatile) ของอนุภาคน้อย ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซดังกล่าว เกิดการเผาไหม้แบบผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันของก๊าซแต่ละชนิด ในทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวมากจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซ เป็นผลให้ปฏิกิริยาเกิดน้อยหรือไม่เกิด ฉะนั้นจึงต้องใช้เวลาเพื่อให้ปริมาณของสารระเหยเจือจางลงจึงจะเกิดปฏิกิริยา ในส่วนที่เป็นของแข็งจำพวกถ่าน จะไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเวลานั้น เนื่องจากก๊าซที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิยังไม่สูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ หลังจากก๊าซต่างๆเกิดปฏิกิริยา จะถ่ายเทความร้อนให้กับคาร์บอนให้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดเกิดปฏิกิริยา และมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังสมการ(3.15) และสมการ



อัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอน เมื่อรวมตัวกับออกซิเจน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของคาร์บอนมากที่สุด การแผ่รังสีเป็นกลไกสำคัญที่สุด ถ้า  $T_w$ ,  $T_s$  คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและที่ผิวตามลำดับ จะได้ฟลักซ์การแผ่รังสี  $q''_{\text{rad}}$  คือ

$$q''_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_s^4) \quad (3.19)$$

ซึ่ง  $\sigma$  เป็นค่าคงที่ Stefan Boltzmann มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$  และ  $\varepsilon$  คือค่าการแผ่รังสี ส่วนการถ่ายเทความร้อนโดยการนำจะมีบทบาทมากเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็ก ฟลักซ์ของการนำความร้อน  $q''_{\text{cond}}$  หาได้จากสมการ

$$q''_{\text{cond}} = -k \frac{dT}{dr} \quad (3.20)$$

ในกรณีที่มีการป้อนเชื้อเพลิงด้วยความเร็วที่สูง ทำให้ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ (Re) มีค่าสูงด้วย จะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพา  $q''_v$  คือ

$$q''_v = h(T_a - T_s) \quad (3.21)$$

โดยที่  $T_a$  คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

รวมสมการทั้งสามจะสามารถจัดอยู่ในรูปของสมดุลพลังงานของเชื้อเพลิงแข็งได้ว่า

$$\sigma \varepsilon (T_w^4 - T_s^4) - k \frac{dT}{dr} + h(T_a - T_s) = 0 \quad (3.22)$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับฟลูอิดเซชัน

#### 4.1 อธิบายศัพท์ที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้มีคำศัพท์ทางเทคนิคที่เกี่ยวข้องอยู่หลายคำ จึงอธิบายรวมเอาไว้ ณ ที่นี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ถูกต้องในเนื้อหาที่จะกล่าวถึงต่อไป

เบด (Bed)	ตำแหน่งที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้น
วัสดุเบด (Bed materials)	อนุภาคที่อยู่ภายในเบด ทำหน้าที่เป็น Heat capacity ให้กับปฏิกิริยา และส่วนใหญ่วัสดุเบดจะไม่ทำปฏิกิริยา (Inert)
ฟลูอิดเซชัน (Fluidization)	สภาวะที่อนุภาคของแข็งลอยตัวอยู่ในก๊าซ อนุภาคจะประพุดติตัวคล้ายเป็นของไหล
ฟลูอิดIZED เบด (Fluidized bed)	อนุภาคของแข็งลอยตัวอยู่ในกระแสก๊าซ แรงหนืดที่กระทำจากก๊าซที่ไหลขึ้นจะเท่ากับน้ำหนักของอนุภาค
Resident time	เวลาที่อนุภาคหนึ่ง ๆ อยู่ภายในบริเวณใดบริเวณหนึ่งที่เราสนใจ เช่น เวลาที่อนุภาคอยู่ภายในเบด

#### 4.2 ลักษณะของปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชัน (Phenomenon of Fluidization) [11]

ฟลูอิดเซชันเป็นสภาวะที่เม็ดของแข็งขนาดเล็กที่สัมผัสอยู่กับก๊าซหรือของเหลวประพุดติตัวทางกายภาพคล้ายของไหล ลักษณะของปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชันสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 4.1 พิจารณากลุ่มอนุภาคภายในเบดเมื่อความเร็วของของไหลมีค่าน้อย ของไหลจะสามารถไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคที่อยู่หนึ่งภายในเบดได้ ความสูงของเบดจะไม่เปลี่ยนแปลง เรียกสภาวะนี้ว่า “เบดนิ่ง” (Fixed Bed)

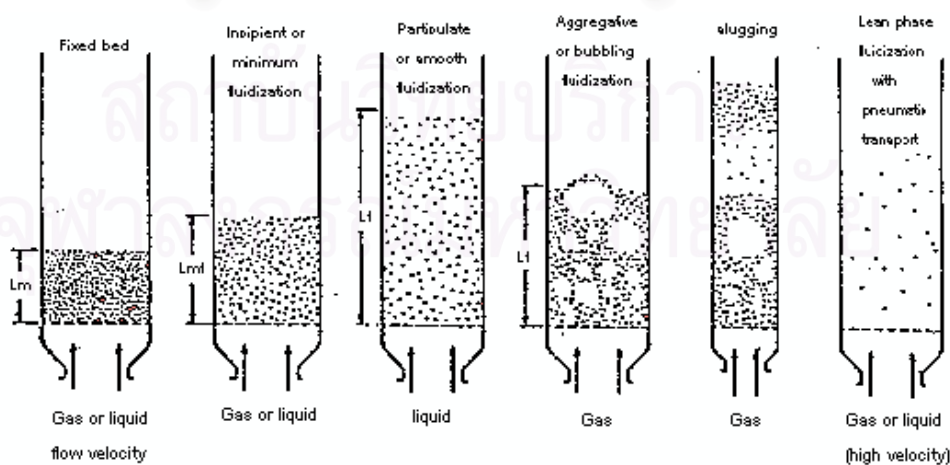


เมื่อความเร็วของของไหลมากขึ้น แรงเนื่องจากความหนืดที่กระทำต่ออนุภาคเพิ่มขึ้น อนุภาคจะเคลื่อนที่ออกจากกัน บางส่วนจะเกิดการสั่นและเคลื่อนที่อยู่ภายในขอบเขตหนึ่ง เรียกสภาวะนี้ว่า “เบดขยาย” (Expanded Bed)

เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลต่อไป การขยายตัวของเบดมีมากขึ้นจนกระทั่งแรงเนื่องจากความหนืดที่กระทำต่ออนุภาคมีค่ามากเพียงพอที่จะรองรับน้ำหนักของอนุภาคภายในเบด ณ จุดนี้แรงกกระทำระหว่างอนุภาคด้วยกันจะหายไป และความดันลดที่หน้าตัดใดๆ ภายในเบดจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและอนุภาคในหน้าตัดนั้น เบดจะประพฤติตัวคล้ายของไหล เรียกสภาวะนี้ว่า “จุดเริ่มต้นของฟลูอิดิซเบด” (Incipiently Fluidized Bed) และความเร็วของของไหลที่ก่อให้เกิดสภาวะเบดเช่นนี้ เรียกว่า “ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดิซชัน” (Minimum Fluidization Velocity)

ในระบบก๊าซกับของแข็ง เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิซชันแล้ว จะเกิดความไม่เสถียรภาพ (Instabilities) ที่อยู่ในรูปฟองอากาศ (Bubbling) การสั่นจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและอนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว เรียกสภาวะนี้ว่า “ฟลูอิดิซเบดแบบฟองก๊าซ” (Bubbling Fluidized Bed)

เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มมากขึ้นอีก อนุภาคภายในเบดจะถูกพัดพาออกจากเบด ขอบเขตด้านบนของเบดจะหายไป เรียกสภาวะนี้ว่า “ฟลูอิดิซเบดเจือจาง” (Disperse-, Dilute- or Lean-phase Fluidized Bed) หลักการนี้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการขนส่งอนุภาค โดยของไหล ถ้าของไหลเป็นอากาศจะเรียกว่า การขนส่งอนุภาคด้วยอากาศ (Pneumatic Transport)

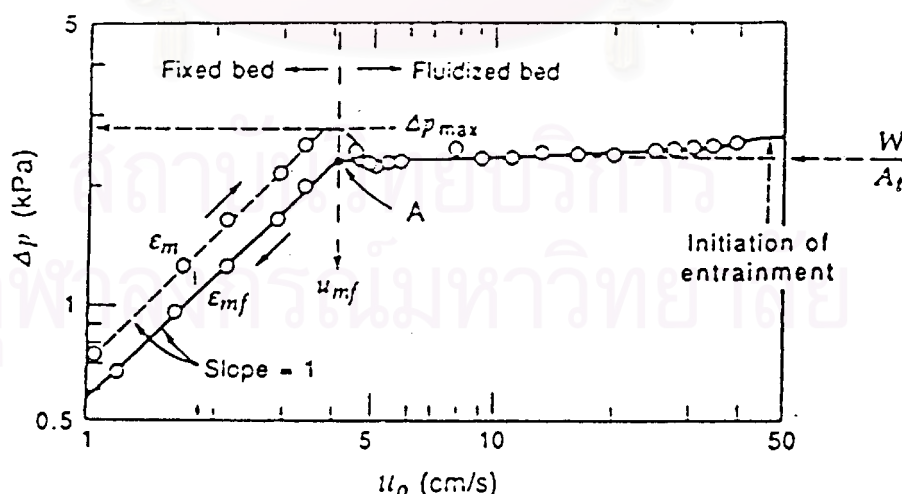


รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะเบดชนิดต่างๆ ในปรากฏการณ์ฟลูอิดิซชัน

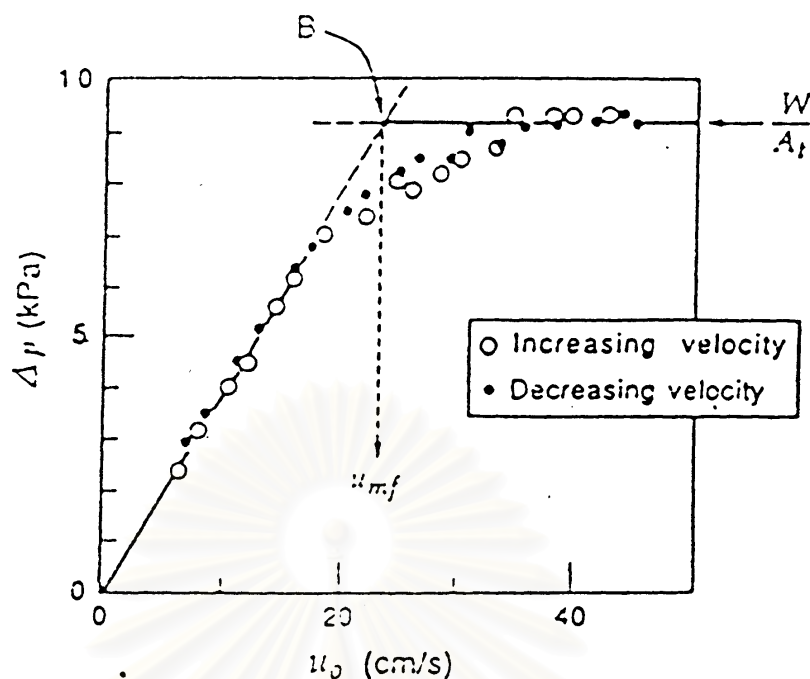
### 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบตกับความเร็วในการฟลูอิดไรซ์ [11]

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของความดันคร่อมเบตกับความเร็วในการฟลูอิดไรซ์แสดงอยู่ในรูปที่ 4.2 และ 4.3 จากกราฟอธิบายได้ดังนี้ ที่ความเร็วต่ำๆ เบตจะมีลักษณะอยู่หนึ่งที่เรียกว่า “เบตนิ่ง” การลดลงของความดันคร่อมเบตจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วในการฟลูอิดไรซ์ เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะถึงจุดที่เบตเปลี่ยนจากสภาพที่อนุภาคอยู่นิ่งมาเป็นสภาพที่อนุภาคแขวนลอยอยู่ ที่จุดนี้เบตจะเกิดการขยายตัวขึ้นและเริ่มเกิดฟลูอิดไรซ์ขึ้น ความเร็วที่เป็นจุดเริ่มเกิดฟลูอิดไรซ์เรียกว่า “ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไรซ์” (Minimum fluidization velocity) ความชันของกราฟจะลดลงหลังจากถึงจุดความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไรซ์ และเมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซขึ้นไปอีก จะไปถึงจุดที่อนุภาคถูกพัดพาออกไปกับก๊าซ ความเร็วของของไหลที่จุดนี้เรียกว่า “ความเร็วสุดท้ายของอนุภาค” (Terminal velocity)

กราฟรูปที่ 4.2 เป็นกราฟของเบตที่มีขนาดอนุภาคในช่วงขนาดเดียว ส่วนกราฟรูปที่ 4.3 เป็นเบตที่มีขนาดอนุภาคกระจายในช่วงกว้าง ความแตกต่างของกราฟทั้งสองอยู่ที่ความชัดเจนในการเปลี่ยนจากเบตนิ่งไปเป็นฟลูอิดไรซ์เบต เบตที่มีอนุภาคในช่วงขนาดเดียวจะมีจุดเปลี่ยนที่ค่อนข้างชัดเจน (จุด A ในกราฟรูปที่ 4.2) ในขณะที่เบตที่มีขนาดอนุภาคกระจายในช่วงกว้างจะมีจุดเปลี่ยนที่เป็นช่วงกว้าง การหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไรซ์ในเบตแบบนี้ทำได้โดยการลากเส้นของเบตนิ่งตัดกับเส้นของฟลูอิดไรซ์เบต จุดตัดที่ได้คือความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไรซ์เบต (จุด B ในกราฟรูปที่ 4.3)



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของความดันลดคร่อมเบตกับความเร็วในการฟลูอิดไรซ์ของเบตที่มีขนาดอนุภาคในช่วงขนาดเดียว



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของความดันลดคร่อมเบดกับความเร็วในการฟลูอิดไชน์ของเบดที่มีขนาดอนุภาคกระจายในช่วงกว้าง

#### 4.4 คุณสมบัติของอนุภาคของแข็งที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟลูอิดไชน์

##### 4.4.1 ขนาดอนุภาค (Particle size) [12]

อนุภาคของแข็งมีรูปร่างที่แน่นอน โดยปกติมักจะกำหนดให้อนุภาคเป็นรูปทรงกลมเพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณ แต่ในความเป็นจริงอนุภาคไม่ได้เป็นรูปทรงกลม ดังนั้นการบอกรูปร่างของอนุภาคจึงบอกอยู่ในรูประดับของการเบี่ยงเบนออกจากรูปทรงกลม (Deviation from spherical shape) อันได้แก่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (Equivalent diameter) และค่าความกลม (Sphericity)

พิจารณาอนุภาคที่รูปทรงไม่เป็นทรงกลม มีค่าพื้นที่ผิว  $S$  และปริมาตร  $V$  ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าที่นิยมใช้กันมี 4 ประเภท (แสดงในรูปที่ 3.4) ได้แก่

ก) เส้นผ่านศูนย์กลางปริมาตร ( $d_v$ ) คือเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่ทำให้ทรงกลมนั้นมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของอนุภาคจริง

$$d_v = \left( \frac{6V}{\pi} \right)^{1/3}$$

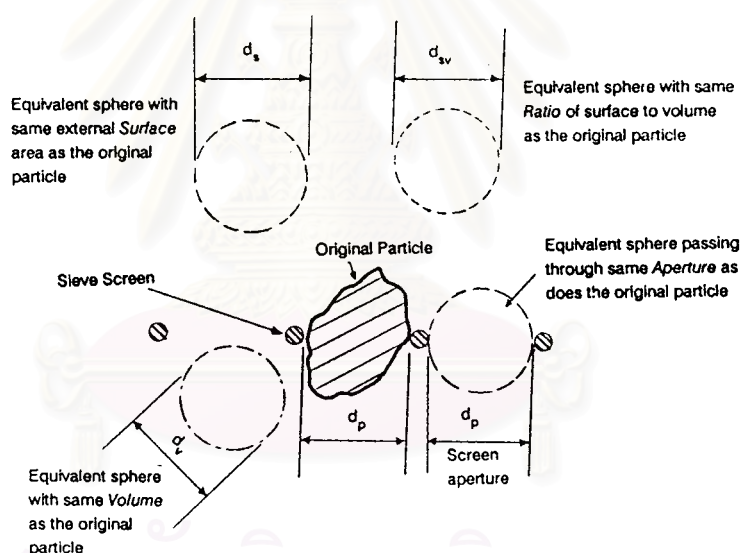
ข) เส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ผิว ( $d_s$ ) คือเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่ทำให้ทรงกลมนั้นมีพื้นที่ผิวเท่ากับพื้นที่ผิวของอนุภาคจริง

$$d_s = \left( \frac{S}{\pi} \right)^{1/2}$$

ค) เส้นผ่านศูนย์กลางตะแกรง ( $d_p$ ) คือขนาดของรูตะแกรง (Sieve) ที่อนุภาคจริงสามารถลอดผ่านได้

ง) เส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ผิว-ปริมาตร ( $d_{sv}$ ) คือเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่ทำให้ทรงกลมนั้นมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเท่ากับอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอนุภาคจริง

$$d_{sv} = \frac{6V}{S}$$



รูปที่ 4.4 แสดงความหมายของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าแบบต่างๆ ด้วยรูปภาพ

ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าที่ใช้ในการทดลองนี้คือค่าเส้นผ่านศูนย์กลางตะแกรง เหตุผลเพราะสามารถทำการทดลองหาค่าได้ง่ายเมื่อเทียบกับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าแบบอื่นๆ

ตะแกรงร่อนมาตรฐานที่ใช้สำหรับคัดแยกขนาดอนุภาคของแข็งนั้น จะบอกขนาดอยู่ในรูปค่าเมช (Mesh) ค่าเมชหมายถึงจำนวนลวดต่อความยาวหนึ่งนิ้วของตะแกรง ตัวอย่างตะแกรงมาตรฐานในระบบ Tyler Mesh แสดงในตารางที่ 4.1

Mesh Number*	Aperture**		Mesh Number*	Aperture**	
	(in)	( $\mu\text{m}$ )		(in)	( $\mu\text{m}$ )
3	0.263	6680	40	0.0167	425
4	0.185	4699	50	0.0118	300
6	0.131	3327	65	0.0082	208
8	0.093	2362	100	0.0058	147
10	0.065	1651	150	0.0041	104
14	0.046	1168	200	0.0029	74
20	0.0328	833	270	0.0021	53
30	0.0236	600	400	0.0015	38

\*จำนวนของลวดต่อนิ้ว

\*\* ช่องกว้างระหว่างเส้นลวด

ตารางที่ 4.1 ตะแกรงตามมาตรฐานของ Tyler

ในกรณีที่อนุภาคมีการกระจายของขนาด ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยจะเป็นตัวแทนของอนุภาคได้ดีที่สุด การหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่นิยมใช้กันคือการนำอนุภาคของแข็งไปร่อนผ่านชุดตะแกรงที่มีรูสี่เหลี่ยมจัตุรัส ชุดตะแกรงประกอบด้วยเครื่องสั่น (Vibrator) อยู่พื้นฐานด้านล่าง ด้านบนจะเป็นแท่นสำหรับวางตะแกรงซ้อนกัน ตะแกรงที่มีขนาดรูเปิดใหญ่จะวางอยู่ด้านบนตะแกรงที่มีขนาดรูเปิดเล็ก หลังจากการสั่นประมาณ 20-30 นาที อนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วงใดก็จะตกค้างอยู่ที่ตะแกรงในช่วงนั้น ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคหาได้จาก

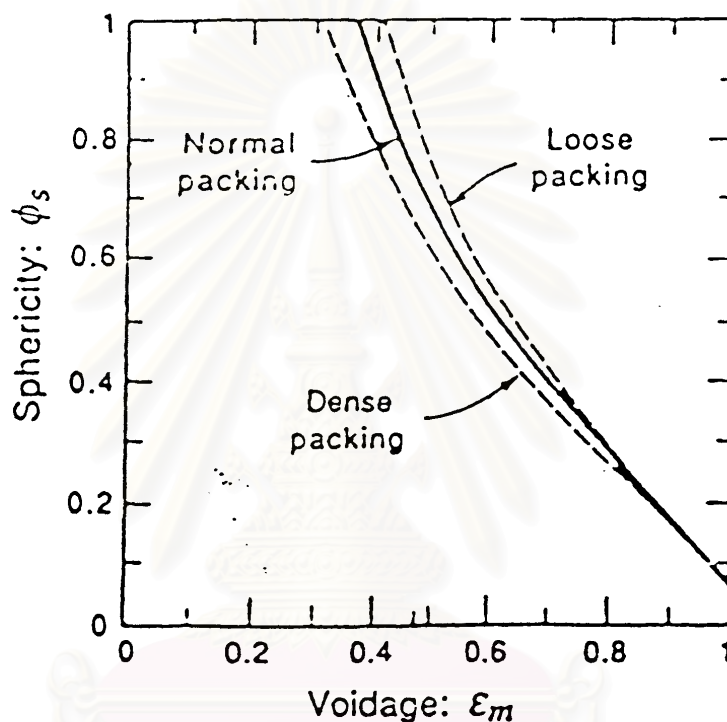
$$d_m = \frac{1}{\sum \left( \frac{x_i}{d_i} \right)}$$

โดยที่  $x_i$  คือค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวอย่างที่ค้างอยู่ระหว่างตะแกรงชั้นที่ติดกัน และ  $d_i$  คือค่าเฉลี่ยของขนาดรูเปิดของตะแกรงชั้นที่ติดกัน

ค่าความกลมของอนุภาค ( $\phi_s$ ) เป็นค่าที่อธิบายว่ารูปทรงของอนุภาคเบี่ยงเบนจากทรงกลมมากน้อยเพียงใด นิยามโดย

$$\phi_s = \frac{\text{surface area of a sphere with the volume same as the particle}}{\text{Actual surface area of the particle}} = \frac{\pi d_v^2}{S}$$

การหาค่าความกลมของอนุภาคเป็นเรื่องยาก ในการทดลองนี้จะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนช่องว่างกับค่าความกลมซึ่งเสนอไว้โดย Brown et al. ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ในกราฟรูปนี้ค่าสัดส่วนช่องว่าง ( $\epsilon_m$ ) ควรเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกลมและค่าสัดส่วนช่องว่างของเบตหนึ่ง

#### 4.4.2 ค่าสัดส่วนช่องว่างของเบตหนึ่ง (Voidage of fixed bed, $\epsilon_m$ )

ในเบตหนึ่ง อนุภาคมีการวางตัวซ้อนกันตามแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นระหว่างอนุภาค ช่องว่างนี้เรียกว่า ปริมาตรช่องว่าง (Void volume) และนิยมบอกค่านี้ในรูปของสัดส่วนช่องว่าง (Voidage)

$$\epsilon_m = \frac{\text{void volume}}{\text{volume of (particle + voids)}}$$

การหาค่าสัดส่วนช่องว่างที่นิยมทำกันคือ การแทนที่ช่องว่างด้วยของเหลว โดยการบรรจุอนุภาคอย่างไว้ระเบียบ วัดปริมาตรก่อนและหลังจากการแทนที่ด้วยของเหลว แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณตามสมการข้างบน

#### 4.5 การสูญเสียพลังงานการไหลผ่านเบตหนึ่ง

การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานเมื่อของไหลไหลผ่านกลุ่มของแข็งในสภาวะอยู่นิ่ง Ergun, 1952 [11] ได้เสนอสมการคำนวณหาความดันลดสำหรับอนุภาคเดี่ยวที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับ  $d_p$  ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L_m} g_c = \frac{150(1-\epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \cdot \frac{\mu U_0}{(\phi_s d_p)^2} + \frac{1.75(1-\epsilon_m)}{\epsilon_m^3} \cdot \frac{U_0^2 \rho_g}{\phi_s d_p} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $U_0$  คือความเร็วของของไหลเมื่อหน้าตัดเบตว่างเปล่า คัดจากอัตราการไหลของของไหลต่อพื้นที่หน้าตัดของเบต

$\Delta P$  คือความดันลดคร่อมเบตหนึ่ง

$L_m$  คือความสูงของเบตหนึ่ง

$\epsilon_m$  คือสัดส่วนช่องว่างของเบตหนึ่ง

$\mu$  คือความหนืดของของไหล

$\phi_s$  คือค่าความกลมของอนุภาค

$d_p$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

$\rho_g$  คือความหนาแน่นของของไหล

#### 4.6 ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum Fluidizing Velocity, $U_{mf}$ ) [13]

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันคือ ความเร็วที่ทำให้แรงต้านการไหลของอนุภาค (Drag Force) มีค่าเท่ากับน้ำหนักตัวของมัน

$$(\text{แรงต้าน}) = (\text{น้ำหนัก}) \quad (4.2)$$

หรือ

$$(\text{ความดันตกคร่อม}) \times (\text{พื้นที่หน้าตัดเตา}) = (\text{ปริมาตรของเบต}) \times (\text{เศษส่วนปริมาตรของของแข็งภายในเบต}) \times (\text{น้ำหนักจำเพาะของเบต})$$

$$(4.3)$$

ในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์

$$\Delta P_b \cdot A_t = W = (A_t \cdot L_{mf})(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (4.4)$$

เมื่อ	$A_t$	=	พื้นที่หน้าตัดของเบด
	$\Delta P_b$	=	ความดันลดของเบด
	$\rho_s$	=	ความหนาแน่นของอนุภาค
	$\rho_g$	=	ความหนาแน่นของของไหล
	$g$	=	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก
	$g_c$	=	ค่าคงที่ขึ้นกับระบบหน่วยที่ใช้ เช่น $g_c = 32.2$ ในระบบหน่วย lb., lbm, ft, sec

จัดเทอมในสมการที่ (4.4) จะได้

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (4.5)$$

ค่า  $\varepsilon_{mf}$  โดยปกติจะมีค่าสูงกว่าความพรุนของเบดหนึ่ง ( $\varepsilon_m$ ) เล็กน้อย ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ( $U_{mf}$ ) หาได้จากการแก้สมการ (4.1) และ (4.5)

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (4.6)$$

หรืออยู่ในรูปกลุ่มไร้มิติ

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \text{Re}_{p,mf}^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \text{Re}_{p,mf} = \text{Ar} \quad (4.7)$$

โดยที่

$$\text{Re}_{p,mf} = \text{ตัวเลขเรย์โนลด์} = \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu}$$

$$\text{Ar} = \text{ตัวเลขอาคิมิติส} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2}$$



ก) ถ้านุภาคมีขนาดเล็ก ( $Re_{p,mf} < 20$ )

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g \varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2}{150 \mu (1 - \varepsilon_{mf})}, \quad Re_{p,mf} < 20 \quad (4.8)$$

ข) ถ้านุภาคมีขนาดใหญ่ ( $Re_{p,mf} > 1000$ )

$$U_{mf} = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{1.75 \rho_g} \varepsilon_{mf}^3 \phi_s, \quad Re_{p,mf} > 1000 \quad (4.9)$$

ในกรณีที่ไม่ทราบค่า  $\varepsilon_{mf}$  และ  $\phi_s$  เราสามารถประมาณค่า  $U_{mf}$  ได้โดยพิจารณาสมการ (4.7) ซึ่งเขียนใหม่ได้เป็น

$$K_1 Re_{p,mf}^2 + K_2 Re_{p,mf} = Ar \quad (4.10)$$

เมื่อ

$$K_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \quad \text{และ} \quad K_2 = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2}$$

จากการศึกษาพบว่าค่า  $K_1$  และ  $K_2$  มีค่าค่อนข้างคงที่สำหรับอนุภาคชนิดต่างๆ ในช่วง  $Re_p$  ตั้งแต่ 0.001-4000 ตารางที่ 3.2 สรุปค่า  $K_1$  และค่า  $K_2$  จากคณะวิจัยต่างๆ

ก) สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่

$$Re_{p,mf} = [28.7^2 + 0.0494 Ar]^{\frac{1}{2}} - 28.7 \quad (4.11)$$

ข) สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก

$$Re_{p,mf} = [33.7^2 + 0.0408 Ar]^{\frac{1}{2}} - 33.7 \quad (4.12)$$

Investigators	First, $K_2 / 2K_1$	Second, $1/K_1$
Wen and Yu (1966) 284 data points from the literature	33.7	0.0408
Richardson (1971)	25.7	0.0365
Sexena and Vogel (1977) Dolomite at high temperature and pressure	25.3	0.0571
Babu et al. (1978) Correlation of reported data until 1977	25.3	0.0651
Grace (1982)	27.2	0.0408
Chiterster al. (1984) Coal, char, Ballotini; up to 64 bar	28.7	0.0494

ตารางที่ 4.2 ค่า  $K_1$  และ  $K_2$  จากคณะวิจัยต่างๆ

#### 4.7 ความเร็วสุดท้ายของอนุภาค (Terminal velocity, $U_t$ ) [13]

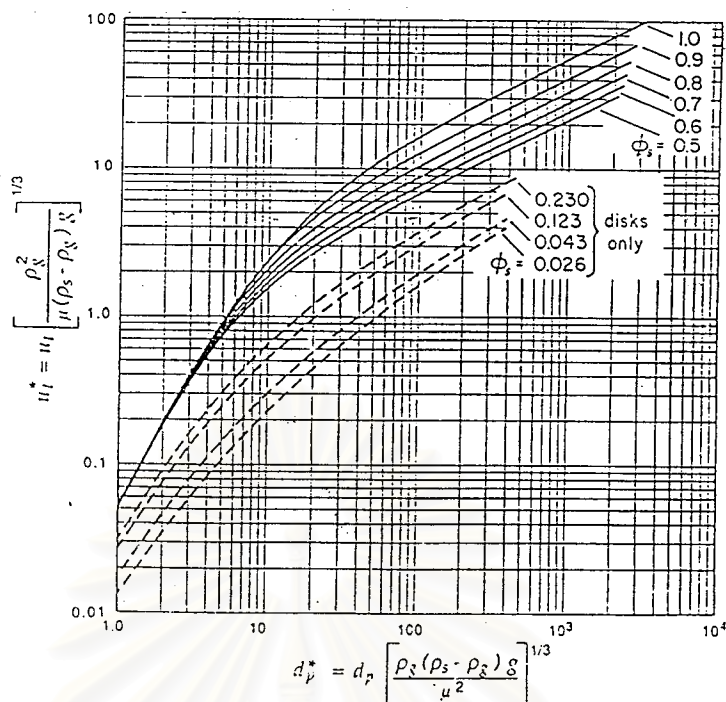
ค่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาคคือ ค่าความเร็วของของไหลที่สภาวะสมดุลของแรง 3 แรง ได้แก่ น้ำหนักอนุภาค แรงต้าน (Drag force) และแรงลอยตัว (Buoyant force) หรือพูดอีกนัยหนึ่ง ความเร็วสุดท้ายของอนุภาคก็คือความเร็วตกอิสระของอนุภาคนั้นเอง

สมการที่ใช้หาค่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาคที่มีขนาดอนุภาค  $d_p$  ความหนาแน่น  $\rho_s$  วิ่งผ่านของไหลที่มีความหนาแน่น  $\rho_g$  คือ

$$U_t = \left[ \frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)g}{3\rho_g C_D} \right]^{1/2} \quad (4.13)$$

เมื่อ  $C_D$  คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งขึ้นกับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re) และค่าความกลมของอนุภาค ( $\phi_s$ )

การหาค่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาคในการทดลองครั้งนี้ จะอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับค่าความเร็วสุดท้ายของของไหล ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับค่าความเร็วสุดท้ายของของไหล

#### 4.8 สภาวะการทำงานของฟลูอิด์เบด [14]

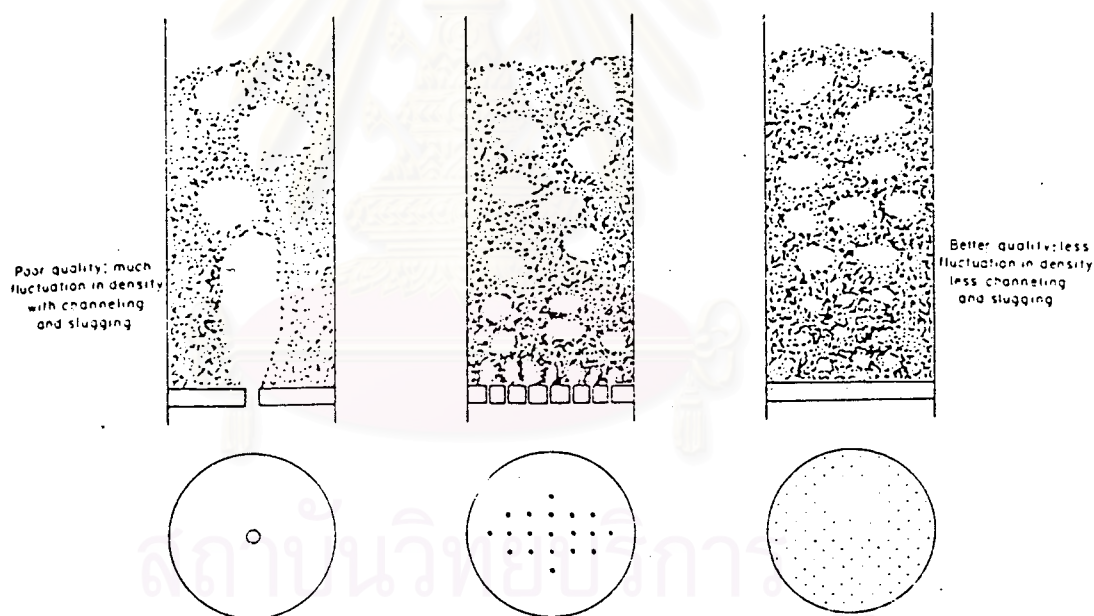
เงื่อนไขการทำงานในทางปฏิบัติของฟลูอิด์เบดระบบก๊าซ-ของแข็งจะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในเบด ดังนั้นจึงมีความยุ่งยากในการออกแบบฟลูอิด์เบด สภาวะการทำงานของฟลูอิด์เบดมีดังนี้

ก) ความเร็วในการฟลูอิด์ (Superficial velocity,  $U_f$ ) โดยทั่วไป ขอบเขตต่ำสุดของการฟลูอิด์คือ  $U_{mf}$  ส่วนขอบเขตบนของการฟลูอิด์คือ  $U_f$  ค่าความเร็วในการฟลูอิด์ที่ใช้กันโดยทั่วไปจะมีค่าเป็น 2-5 เท่าของค่าความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิด์ ( $U_f = 2-5 U_{mf}$ ) ที่ความเร็วในช่วงนี้จะทำให้เบดเกิดการผสมกันแบบปั่นป่วน (Turbulent bed)

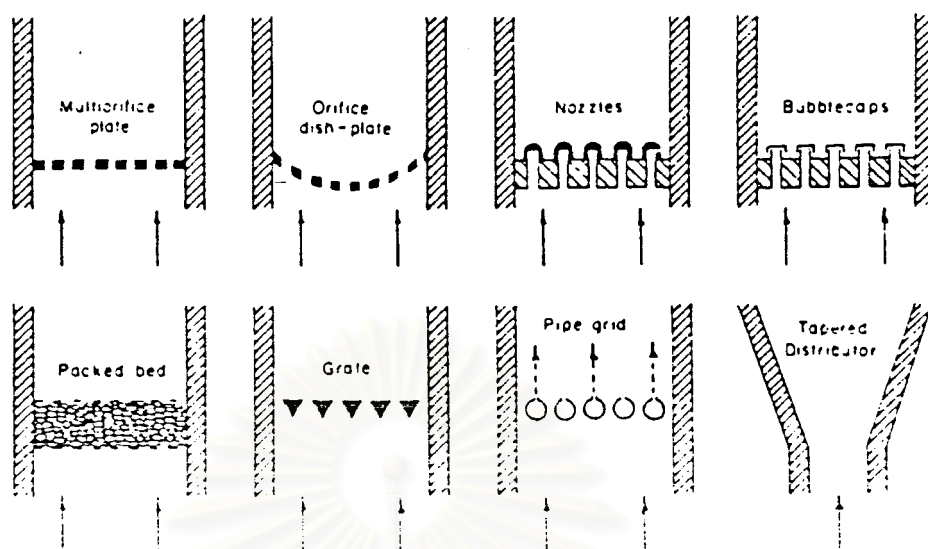
ข) คุณภาพของฟลูอิด์เบด ระบบฟลูอิด์เบดระหว่างก๊าซกับของแข็ง จะเกิดการฟลูอิด์ได้รุนแรงกว่าการฟลูอิด์ในของเหลวกับของแข็ง เพราะมีค่าความหนาแน่นแตกต่างกันมากกว่า ในกรณีของเหลวจะเกิดการแขวนลอยอย่างดี มีการผสมของเบดเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ แต่ถ้าของไหลเป็นก๊าซจะเกิดเป็นฟองอากาศทำให้เกิดฟลูอิด์แบบไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอตลอดทั้งเบด สำหรับระบบฟลูอิด์ของก๊าซกับของแข็งจะให้มีการแขวนลอยของอนุภาคสม่ำเสมอตลอดทั้งเบดได้นั้น จะต้องมีความหนาของฟองอากาศเล็ก ตัวแปรที่มีผลต่อการควบคุมคุณภาพของฟลูอิด์เบดคือ ขนาดอนุภาคและการกระจายของอนุภาครวมถึงชนิดตัวกระจายก๊าซที่ใช้

ค) ตัวกระจายก๊าซ (Gas distribution) ในขณะที่เบดเกิดฟลูอิดซ์ด้วยความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดซ์ ลักษณะของเบดยังเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอตลอดทั้งเบด แต่เมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซให้มากขึ้น ความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะก่อตัวเป็นฟองก๊าซ ลักษณะของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกระจายก๊าซที่รองรับเบดอยู่ว่าเป็นชนิดไหน ตัวอย่างเช่น ตัวกระจายก๊าซที่ทำด้วยแผ่นโลหะเจาะรู (Perforated plate) ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่กว่าตัวกระจายก๊าซที่เป็นรูพรุน (Sintered plate) ดังแสดงในรูปที่ 4.7

นอกจากตัวกระจายก๊าซสองแบบที่กล่าวมาแล้ว ได้มีผู้คิดค้นสร้างตัวกระจายก๊าซแบบต่างๆ ขึ้นเพื่อให้เหมาะกับงานที่ใช้ และมีการกระจายก๊าซที่ดีขึ้น ตัวกระจายก๊าซแบบต่างๆ พอสรุปได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 แสดงการเกิดฟองอากาศที่ขึ้นอยู่กับจำนวนรูที่เจาะบนแผ่นกระจายก๊าซ



รูปที่ 4.8 แสดงตัวกระจายก๊าซแบบต่างๆ

การออกแบบตัวกระจายก๊าซที่ดีตามคำแนะนำของ Kunii และ Levenspiel [17] คือ ความดันลดคร่อมตัวกระจายก๊าซที่สม่ำเสมอจะมีค่ามากกว่าความดันลดคร่อมตัวกระจายก๊าซที่ไม่สม่ำเสมอ และได้แนะนำไว้ว่าค่าความดันลดคร่อมตัวกระจายก๊าซควรมีขนาดอย่างน้อย 10% ของความดันลดคร่อมเบตหรือมีค่าน้อย 35 เซนติเมตรน้ำ

ง) สัดส่วนช่องว่างของเบต (Void fraction) ความสูงของเบต (Bed height) และขนาดพื้นที่หน้าตัดของเบต (Bed area) เมื่อชั้นของแข็งถูกฟลูอิดไคซ์ เบตจะเกิดการขยายตัว เมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซขึ้น ช่องว่างของเบตก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อความเร็วของก๊าซมีค่าเท่ากับ  $U_t$  ค่าช่องว่างของเบตจะเท่ากับ 1 นั่นคือเกิดการพัดพาเบตออกไป การที่เบตมีช่องว่างภายในมากขึ้น ปริมาตรของฟลูอิดไคซ์เบตจะมีค่าเพิ่มขึ้น และถ้าพื้นที่หน้าตัดของเบตไม่เปลี่ยนแปลงตามความสูงแล้ว ค่าความพรุนของเบตจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสูงของเบตตามสมการ

$$\varepsilon_f = \frac{L_f - L_o}{L_f} = 1 - \frac{L_o}{L_f} \quad (4.14)$$

หรืออาจแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างในเบตกับความสูงของเบตที่ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคซ์ได้ดังนี้

$$\frac{L_f}{L_{mf}} = \frac{1 - \varepsilon_f}{1 - \varepsilon_{mf}} \quad (4.15)$$

พื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมของเบต จะสามารถคำนวณได้จากความเร็วของการฟลูอิดไอซ์ (U<sub>f</sub>) และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซที่ใช้ ตามสมการ

$$A = \frac{Q}{U_o} \quad (4.16)$$

จ) พลังงานที่ต้องใช้ในการฟลูอิดไอซ์ชั้น พลังงานที่ต้องการในการทำงานของฟลูอิดไอซ์เบตมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานที่ต้องการทางฟิสิกส์ และทางเคมีในกระบวนการ บวกกับพลังงานที่ต้องการในการเอาชนะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับของไหลเมื่อไหลผ่านเบต การคำนวณหาค่ากำลังของพัดลมอัดอากาศที่ใช้ในระบบฟลูอิดไอซ์เบต ทำได้ดังนี้

ประมาณค่าความดันลดคร่อมเบต	$\Delta P_b = \frac{W}{A}$
ประมาณค่าความดันลดคร่อมตัวกระจายก๊าซ	$\Delta P_d = 0.1 \Delta P_b$
ปริมาณความดันลดทั้งหมด	$\Delta P_t = \Delta P_b + \Delta P_d$
กำลังของพัดลมอัดอากาศที่ต้องการโดยประมาณ	$E = U_f A \Delta P_t$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### อุปกรณ์การทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ขนาดของอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้เป็นขนาดทดลอง (Laboratory scale) ประกอบด้วยระบบหลักๆ 8 ระบบ ได้แก่ เตาเผาฟลูอิดเบดและห้องไพโรไลซิสแบบเบตหนึ่ง แผ่นกระจายลม ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรู ระบบป้อนอากาศ ระบบอุ่นเบต โซโคลอน ระบบวัดอุณหภูมิ และระบบวัดอัตราการไหลอากาศ

รูปที่ 5.1 แสดงระบบรวมของอุปกรณ์ในการทดลองนี้ (Schematic diagram) รูปที่ 5.2 แสดงจุดวัดค่าอุณหภูมิ ความดัน และจุดเก็บก๊าซตัวอย่าง รูปที่ 5.3 และ 5.4 แสดง Detail drawing ของแผ่นกระจายลม และชุดป้อนแก๊สแบบสกรูตามลำดับ รายละเอียดในแต่ละส่วนจะอธิบายในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

#### 5.1 เตาเผาฟลูอิดเบดและห้องไพโรไลซิสแบบเบตหนึ่ง

เตาเผาฟลูอิดเบดและห้องไพโรไลซิสแบบเบตหนึ่งทำจากเหล็กแผ่นขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกซ้อนกัน พื้นที่ภายในทรงกระบอกตัวในคือห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดเบด ส่วนพื้นที่บริเวณวงแหวนคือห้องไพโรไลซิสแบบเบตหนึ่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ของห้องเผาไหม้) 20 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (ของห้องไพโรไลซิส) 40 เซนติเมตร ยึดทรงกระบอกตัวในกับตัวนอกด้วยแท่งเหล็กจำนวน 8 จุด เตาเผาประกอบด้วยท่อนทรงกระบอก 4 ท่อน แต่ละท่อนสูง 50 เซนติเมตร รวมความสูงของเตาเผาทั้งหมด 2 เมตร ที่ภายนอกของห้องไพโรไลซิสหุ้มฉนวนชนิด Ceramic fiber หนา 1 นิ้วตลอดความสูงของเตาเผา (การคำนวณขนาดของเตาเผาฟลูอิดเบดและห้องไพโรไลซิสแบบเบตหนึ่งแสดงอยู่ในภาคผนวก ข) เตาเผาฟลูอิดเบดและห้องไพโรไลซิสแบบเบตหนึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 5.5

#### 5.2 แผ่นกระจายลม (Distributor)

แผ่นกระจายลมเป็นชนิดท่อฉีดแนวตั้ง (Nozzle stand pipe) ทำจากแผ่นเหล็กหนา 19 มิลลิเมตร ตัว Stand pipe ทำจากเหล็กกล้าเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ตรงกลางทรงกระบอกเจาะรูขนาด 14 มิลลิเมตร ด้านข้างเจาะรูเป็นทางออกของอากาศขนาด 3 มิลลิเมตรเฉียงทำมุม 15° กับแนวระดับจำนวน 8 รู Stand pipe จำนวนทั้งหมด 9 อันเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กด้วยระยะพิตช์ 4x4 เซนติเมตร แผ่นกระจายลมชนิด Nozzle stand pipe แสดงอยู่ในรูปที่ 5.6

### 5.3 ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรู (Screw feeder)

ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรูประกอบด้วย Hopper หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 40x40 ตารางเซนติเมตร บริเวณด้านล่างหน้าตัดลดขนาดลงเหลือ 10x20 ตารางเซนติเมตร ด้านล่างมีลักษณะเป็นโค้งรูปครึ่งวงกลมเพื่อรับกับไบสกรู ไบสกรูเป็นแบบเกลียวเต็มใบยาว 40 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว แกนสกรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $1\frac{1}{4}$  นิ้ว ความยาวเพลารวมสกรูทั้งหมด 120 เซนติเมตร รองรับเพลาด้วยแบร์ริง 2 ตัวที่ตำแหน่งความยาวเพลา 10 และ 70 เซนติเมตรวัดจากทางด้านชุดขับ ชุดขับประกอบด้วยมอเตอร์สามเฟสขนาด 1 แรงม้า ทดรอบด้วย Gearbox 2 ตัว อัตราทดรวม 1:200 ปรับความเร็วของมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อให้ได้ความเร็วรอบสกรูที่ต้องการ ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรูแสดงอยู่ในรูปที่ 5.7

### 5.4 ระบบป้อนอากาศ

ผลจากการออกแบบ (ในภาคผนวก ข) พบว่าต้องใช้อากาศสำหรับฟลูอิดไอซ์ที่อัตราการไหล  $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$  ความดันลดรวมของระบบประมาณ 46 เซนติเมตรน้ำ ในที่นี้ใช้ Blower ที่มีอัตราการไหลสูงสุด  $1200 \text{ m}^3/\text{hr}$  และความดันสูงสุด (ที่อัตราการไหลต่ำสุด) 210 เซนติเมตรน้ำ มอเตอร์ขับพัดลมชนิดสามเฟสขนาด 10 แรงม้า ควบคุมอัตราการไหลของอากาศด้วยวาล์วบริเวณปลายทางก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ติดตั้งวาล์วแยก (bypass valve) สำหรับแยกอากาศส่วนหนึ่งไปใช้ในระบบอุ่นเบด (สาเหตุที่ใช้ Blower ที่มีขนาดใหญ่เกินขนาดออกแบบเนื่องจากใช้ Blower ที่มีอยู่แล้วที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล) ระบบป้อนอากาศแสดงอยู่ในรูปที่ 5.8

### 5.5 ระบบอุ่นเบด (Preheat burner)

ระบบอุ่นเบดประกอบด้วยหัวเผาแก๊ส LPG ตำแหน่งของหัวเผาอยู่เหนือแผ่นกระจายลม 25 เซนติเมตร (เหนือผิวด้านบนของเบดทรายหนึ่ง 5 เซนติเมตร) อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้แก๊ส LPG มาจากท่อแยกของระบบป้อนอากาศ

หัวเผาประกอบด้วยท่ออากาศและท่อแก๊ส LPG ท่ออากาศสร้างจากท่อทนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $3/4$  นิ้ว ยาว 250 มิลลิเมตร ต่อกับข้อต่อพร้อมติดตั้งวาล์วปรับอากาศ ส่วนท่อแก๊ส LPG ทำจากท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $3/8$  นิ้ว ยาว 200 มิลลิเมตร พร้อมติดตั้งวาล์วปรับแก๊ส ท่อแก๊สเชื่อมต่อกับท่ออากาศบริเวณข้อต่อและทะลุเข้าไปในท่ออากาศเพื่อให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศกับแก๊สก่อนการเผาไหม้ ระบบอุ่นเบดแสดงอยู่ในรูปที่ 5.9



## 5.6 ไชโคลน (Cyclone)

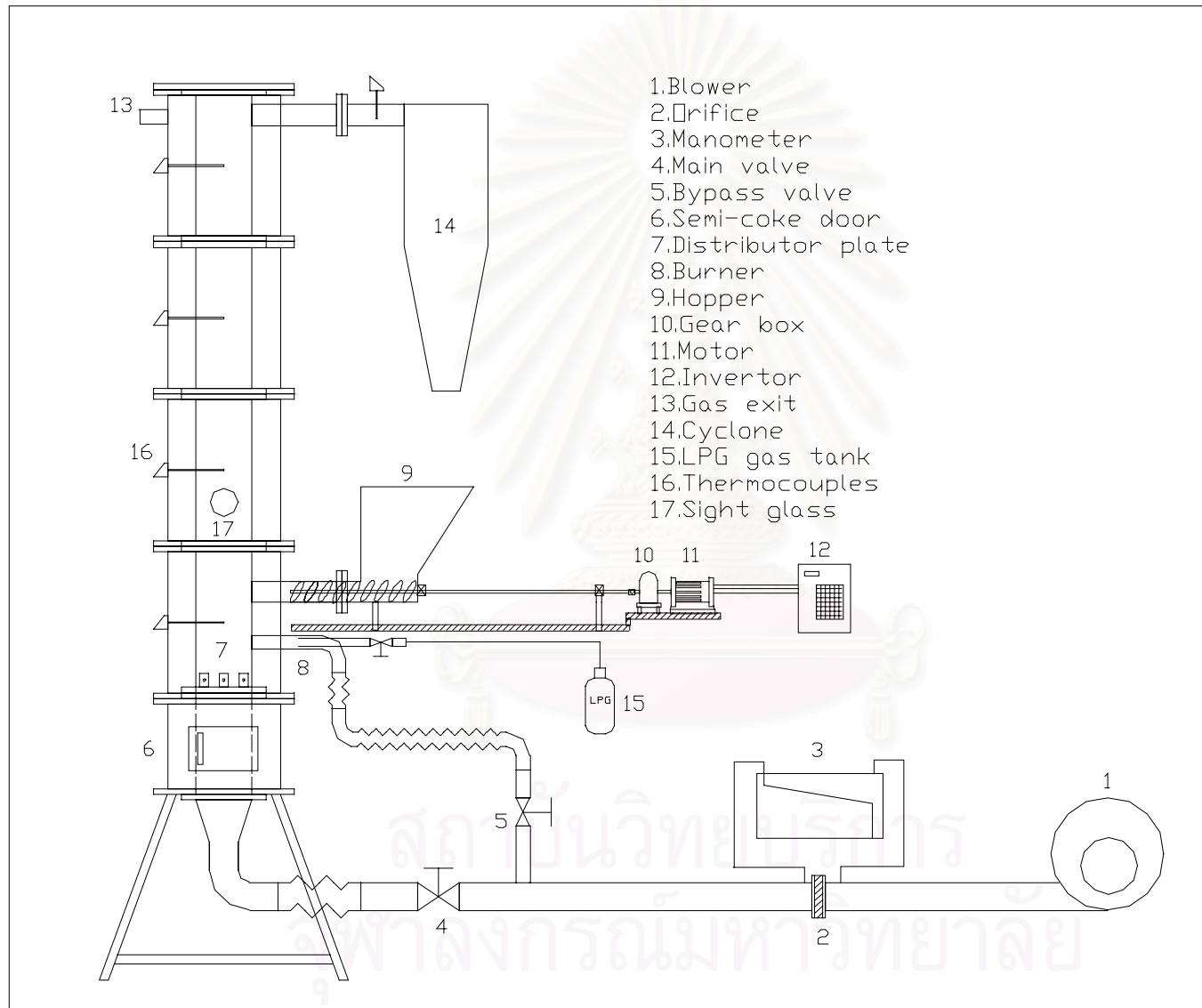
ไชโคลนใช้สำหรับแยกเก้าที่มากับก๊าซไอเสีย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไชโคลนเท่ากับ 30 เซนติเมตร ความสูงไชโคลน 100 เซนติเมตร ท่อทางเข้าของไชโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ไชโคลนแสดงอยู่ในรูปที่ 5.10

## 5.7 ระบบวัดอุณหภูมิ

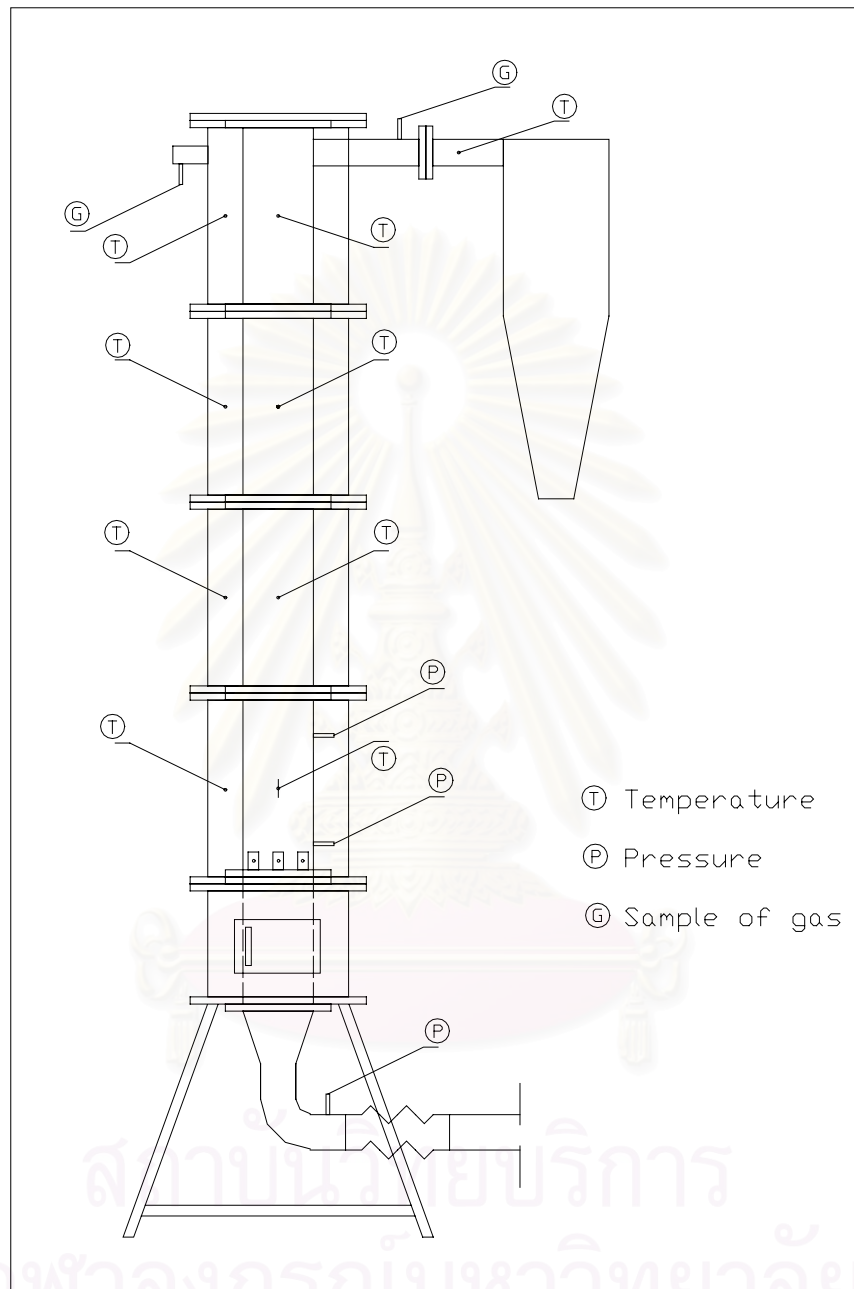
ระบบวัดอุณหภูมิสำหรับเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดและห้องไพโรไลซิสแบบเบดหนึ่งเป็นเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K (Chromel-Alumel) ที่มีช่วงการวัด 0-1200°C ต่อเข้ากับเครื่องอ่านอุณหภูมิแบบดิจิทัลที่อ่านได้ละเอียด 0.1°C จุดวัดอุณหภูมิของเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดและห้องไพโรไลซิสแบบเบดหนึ่งอยู่ที่ความสูง 25 , 75 , 125 และ 175 เซนติเมตร และจุดวัดอุณหภูมิก๊าซไอเสียอยู่ที่ท่อทางเข้าไชโคลน ระบบวัดอุณหภูมิแสดงอยู่ในรูปที่ 5.11

## 5.8 ระบบวัดอัตราการไหลอากาศ

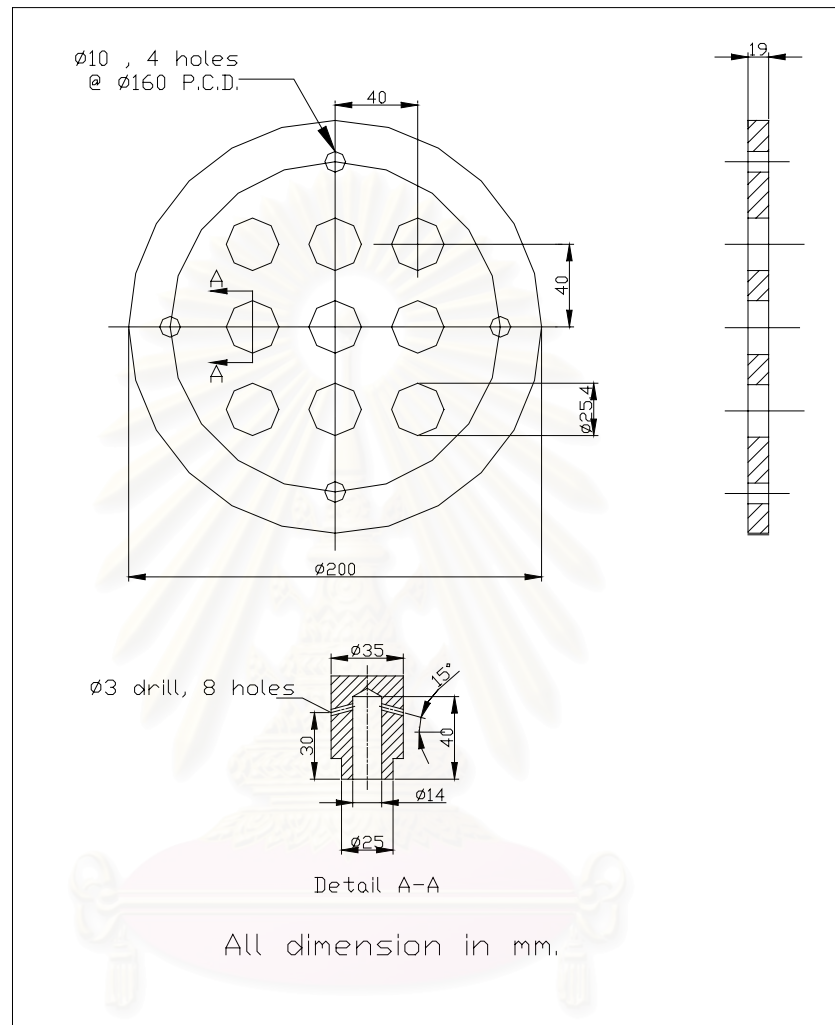
ระบบวัดอัตราการไหลอากาศที่ออกจาก Blower เป็นออริฟิส (Orifice) ทำจากแผ่น Stainless steel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว หน้า 3 หุน อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter ratio,  $\beta$ ) เท่ากับ 0.5 รูแท่งสำหรับวัดความดันใช้ระบบ 1D-1/2D ต่อเข้ากับมาโนมิเตอร์แบบเอียง (Inclined manometer) ที่วัดได้ในช่วง 0-250 มิลลิเมตรน้ำ ในช่วงความดันที่ใช้งานมาโนมิเตอร์นี้สามารถวัดได้ละเอียด 0.2 มิลลิเมตรน้ำ ระบบวัดอัตราการไหลอากาศแสดงอยู่ในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.1 Schematic diagram ของอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้

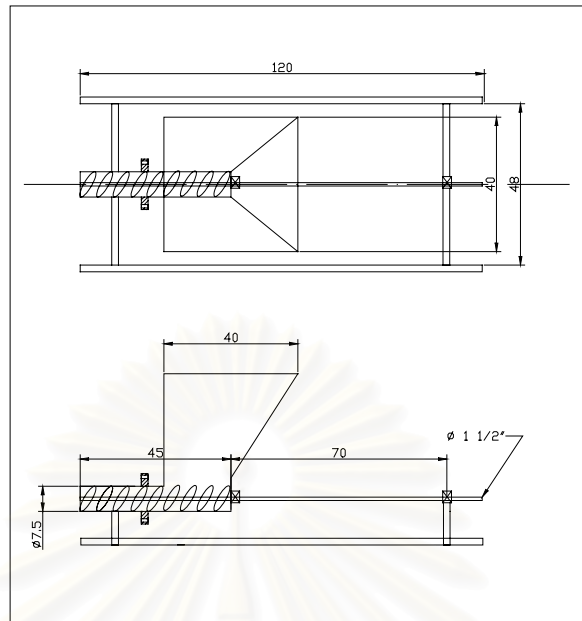


รูปที่ 5.2 แสดงจุดวัดค่าอุณหภูมิ ความดัน และองค์ประกอบก๊าซในการทดลอง



สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

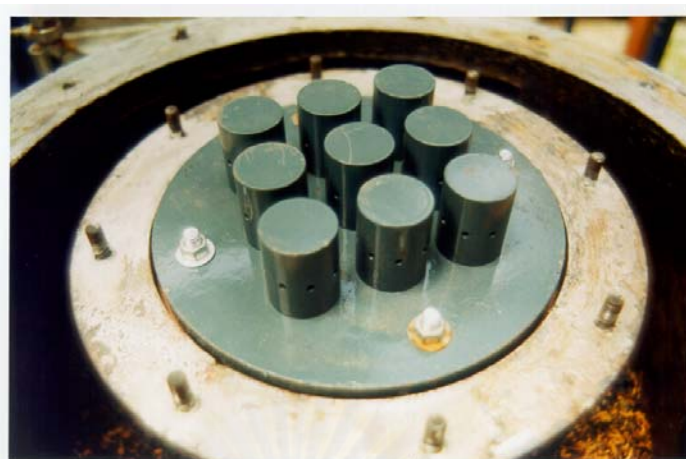
รูปที่ 5.3 แสดง Drawing แผ่นกระจายลมแบบ Nozzle stand pipe



รูปที่ 5.4 แสดง Drawing ของชุดป้อนเกลบแบบสกรู



รูปที่ 5.5 แสดงภาพถ่ายเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดและห้องไฟโรไลซิสแบบเบดนิ่ง



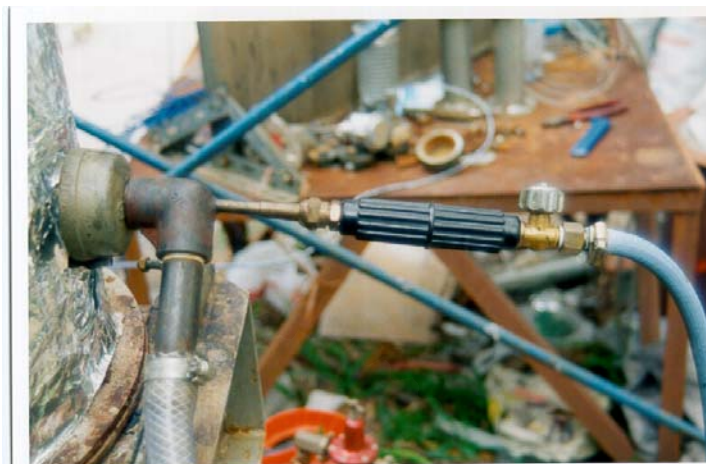
รูปที่ 5.6 แสดงการติดตั้งแผ่นกระจายลมแบบ Nozzle stand pipe



รูปที่ 5.7 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ปั๊มแบบสกรู



รูปที่ 5.8 แสดงภาพถ่าย Blower และท่อลมในระบบปรับอากาศ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.9 แสดงภาพถ่าย Preheat burner ในระบบอุ่นเบด

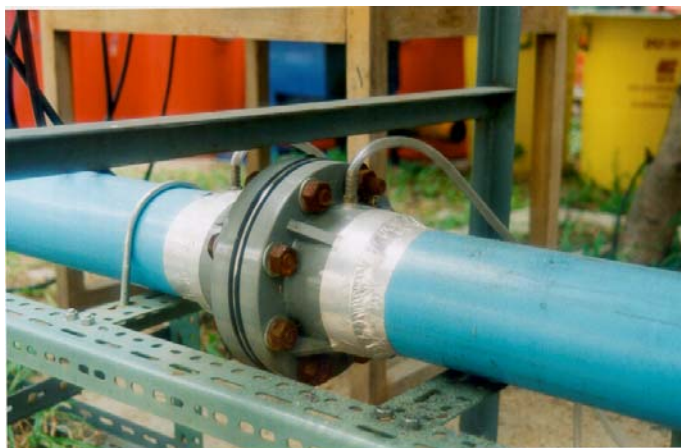


รูปที่ 5.10 แสดงภาพถ่ายไซโคลน

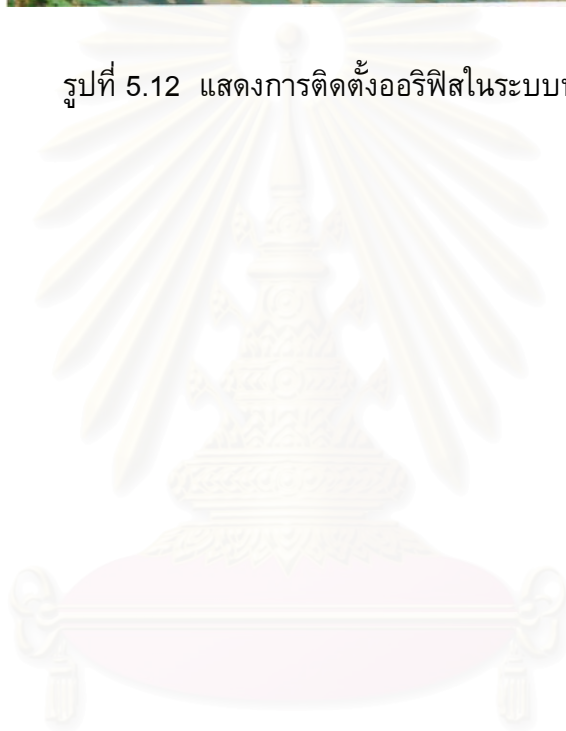




รูปที่ 5.11 แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลและ Display สำหรับระบบวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 5.12 แสดงการติดตั้งออริฟิสในระบบท่อลม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### การทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ส่วนแรกคือการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองจริง การทดลองที่อยู่ในส่วนนี้ได้แก่ การทำ Cold test ของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด การสอบเทียบ (Calibration) อุปกรณ์ป้อนแกลบแบบสกรู และการหารูปแบบการ Start up เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด ในส่วนที่สองจะเป็นการทดลองเต็มรูปแบบตามสภาวะที่กำหนดมาจากการทดลองในส่วนแรก แบ่งเป็น 3 ส่วนย่อย ได้แก่ ส่วนการเผาไหม้แกลบ การไฟโรไลซิสแกลบ และการเผาไหม้เมื่อใช้ถ่านแกลบ (Semicokes) มาเป็นเชื้อเพลิงผสมร่วมกับแกลบ

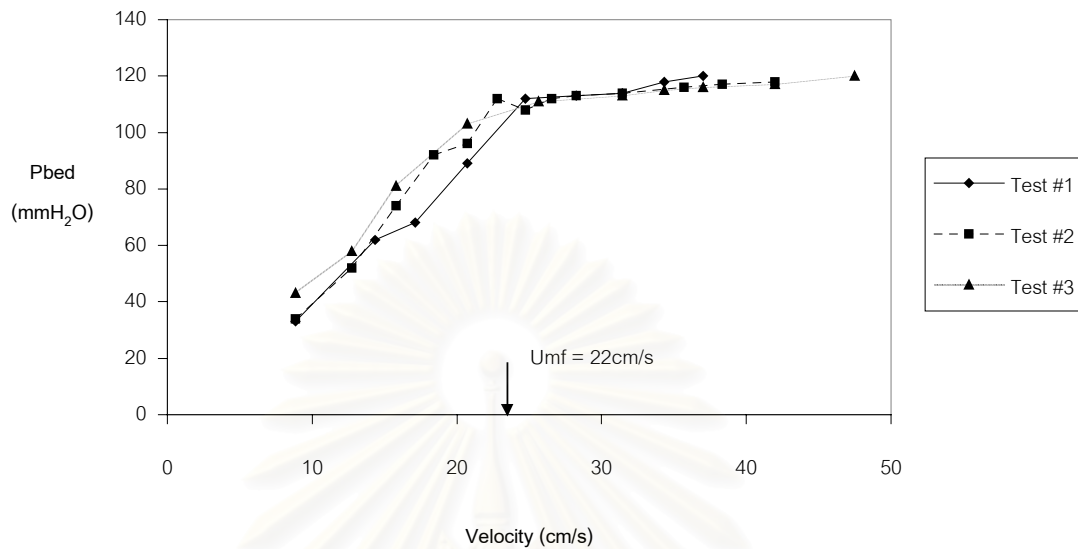
#### 6.1 การทดลองเบื้องต้น (Preliminary test)

##### 6.1.1 Cold Test ของปรากฏการณ์ฟลูอิดไคเซชันในเตาเผา

การทำ Cold test คือการศึกษาปรากฏการณ์ฟลูอิดไคเซชันในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดโดยที่ไม่มีการเผาไหม้ วัตถุประสงค์ของการทำ Cold test คือการหาค่าตัวแปรที่สำคัญต่อการทำงานของเตาเผาก่อนเริ่มการทำงานจริงของเตาเผา ตัวแปรที่สำคัญได้แก่ ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคซ์ ซึ่งหาได้จากกราฟความดันลดคร่อมเบดกับความเร็วของอากาศในการฟลูอิดไคซ์ ข้อมูลนี้จะใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการกำหนดสภาวะการทำงานของเตาเผาต่อไป

ผลการทดลองเพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไคซ์ในเตาเผาแสดงอยู่ในรูปที่ 6.1 ทราบที่ใช้เป็นเบดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 450 ไมครอน ความสูงเบดหนึ่ง 20 เซนติเมตร ทำการทดลอง 3 ครั้ง ค่าความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไคซ์ที่เฉลี่ยจากการทดลองทั้งสามคือ 22 cm/s เทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการของ Wen & Yu (ในภาคผนวก ข.1.3) คือ 15 cm/s ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจมาจากสาเหตุหลักคือ ความไม่สม่ำเสมอของการกระจายลมที่เกิดขึ้นจริงในอุปกรณ์การทดลอง

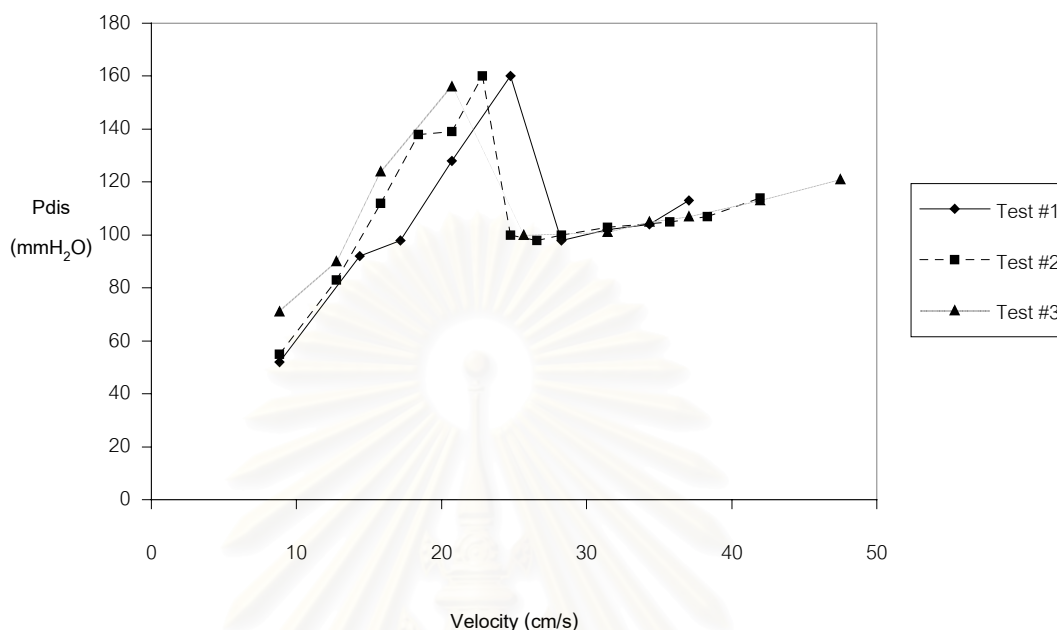
### Cold Test (Fluidized air velocity with Pbed)



รูปที่ 6.1 ผลการทดลอง Cold Test

ตัวแปรสำคัญอีกตัวหนึ่งในการทำ Cold Test คือ ค่าความดันตกคร่อมแผ่นกระจายลม ซึ่งขึ้นกับการออกแบบแผ่นกระจายลม ค่าความดันตกคร่อมแผ่นกระจายลมที่วัดได้จะเป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบแผ่นกระจายลมสำหรับเตาเผาฟลูอิดไอดีซ์เบดต่อไป รูปที่ 6.2 แสดงค่าความดันตกคร่อมแผ่นกระจายลมที่ค่าความเร็วในการฟลูอิดไอดีซ์ต่างๆ

### Pressure drop across distribute plate with fluidizing velocity

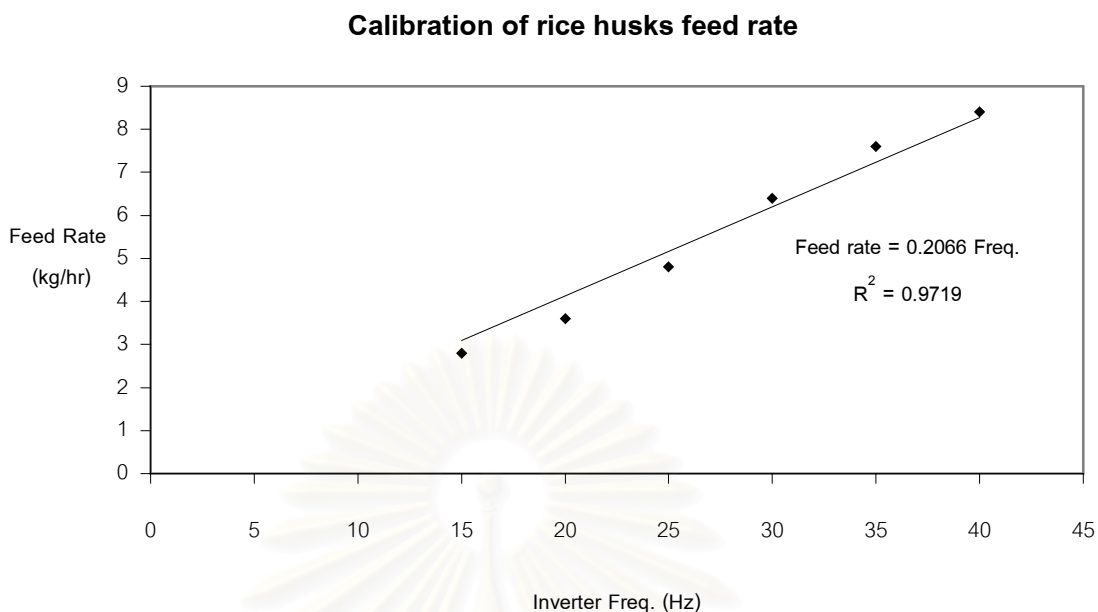


รูปที่ 6.2 ค่าความดันตกคร่อมแผ่นกระจายลมที่ความเร็วฟลูอิด์เบดค่าต่างๆ

ค่าความดันตกคร่อมแผ่นกระจายลมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการฟลูอิด์เบดยังไม่ถึงค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิด์เบด แต่เมื่อเบดขยายตัวกลายเป็นฟลูอิด์เบด ค่าความดันตกคร่อมแผ่นกระจายลมมีค่าตกลง (เกิดจากการเปลี่ยนสถานะจากการไหลแบบ Laminar ไปเป็น Turbulent) และหลังจากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการฟลูอิด์เบดเพิ่มขึ้น

#### 6.1.2 การสอบเทียบอุปกรณ์ป้อนเกลบแบบสกรู (Calibration of screw feeder)

วัตถุประสงค์ของการสอบเทียบอุปกรณ์ป้อนเกลบแบบสกรูคือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใช้งานที่ Inverter กับอัตราการป้อนเกลบที่ทำได้จริง เนื่องจากการทดลองการปรับค่าอัตราการป้อนเกลบทำได้โดยการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (คือการปรับความถี่ที่ Inverter) จึงจำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์ของตัวแปรสองตัวนี้ ผลการสอบเทียบอุปกรณ์ป้อนเกลบแบบสกรูแสดงในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 กราฟแสดงการสอบเทียบอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรู

### 6.1.3 การจุดเตาเริ่มต้น (Start up)

ก่อนที่แกลบจะเผาไหม้ได้ในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่วัสดุเบดให้ถึงจุดติดไฟของแกลบ (ประมาณ  $550^{\circ}\text{C}$ ) โดยระบบอุ่นจุดเบด เป็นที่มาของการจุดเตาเริ่มต้น

ระบบอุ่นจุดเบดในการทดลองนี้ใช้หัวเผาแก๊ส LPG เผาไหม้แก๊ส LPG กับอากาศที่แยกมาจากระบบป้อนอากาศ ตำแหน่งของหัวเผาอยู่เหนือผิวหน้าเบดหนึ่งเล็กน้อย (ประมาณ 5 เซนติเมตร)

ในขั้นต้นได้ทดลองจุดเตาเริ่มต้นโดยใช้หัวเผาแก๊ส LPG เพียงอย่างเดียว พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเบดช้ามาก ทั้งนี้เพราะตำแหน่งหัวเผาแก๊สอยู่เหนือผิวหน้าเบด ให้ความร้อนส่วนใหญ่ออกไปกับก๊าซไอเสียมากกว่าที่จะถ่ายเทสู่เบด อุณหภูมิเบดไม่สามารถเพิ่มถึงอุณหภูมิจุดติดไฟของแกลบได้ จำเป็นต้องหาแหล่งความร้อนเพิ่มเติมเพื่อช่วยในการให้ความร้อนแก่เบด

ได้ทดลองใช้ถ่านไม้เป็นแหล่งความร้อนเพิ่มเติมแก่เบด ข้อดีของการใช้ถ่านไม้คือ ถ่านไม้ไม่มีการสัมผัสกับวัสดุเบดโดยตรง ให้ความร้อนส่วนใหญ่ถ่ายเทสู่เบด ในช่วงที่อุณหภูมิเบด

ยังไม่สูงนัก (ไม่เกิน  $400^{\circ}\text{C}$ ) การเพิ่มของอุณหภูมิเบตเป็นไปอย่างช้าๆ หลังจากนั้นเมื่อเริ่มป้อนแกลบลช่วยเร่งอุณหภูมิเบต อุณหภูมิเบตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอันเป็นผลมาจากการเผาไหม้ทั้งแกลบลและถ่านไม้ที่สะสมในเบต อุณหภูมิเบตอาจขึ้นสูงถึง  $800^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพียงพอสำหรับการเผาไหม้แกลบลต่อไป

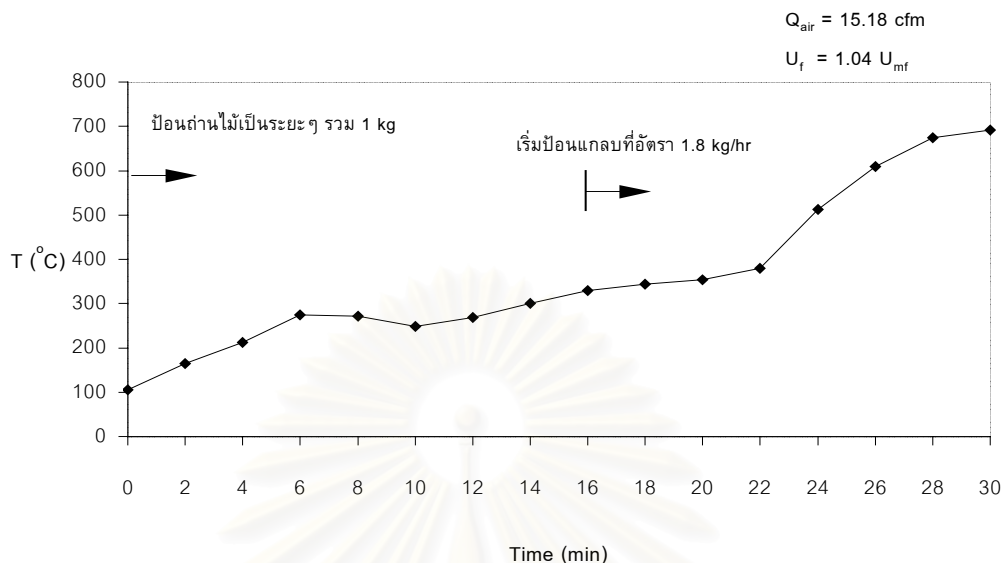
การจุดเริ่มต้นเตาเผาที่ประสบความสำเร็จมีขั้นตอนดังนี้ ความเร็วที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์จะมีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เพียงเล็กน้อย เพื่อจำกัดความร้อนสูญเสียที่จะออกไปกับก๊าซไอเสีย เมื่อปรับค่าความเร็วในการฟลูอิดไดซ์ได้แล้ว จุดหัวเผาแก๊ส LPG ให้ความร้อนแก่เบต พร้อมกันนี้ค่อยๆป้อนถ่านไม้ทางด้านบนของเตาเผาเป็นระยะๆ สังเกตการเพิ่มของอุณหภูมิเบตเทียบกับเวลา เมื่ออุณหภูมิเบตมีค่าประมาณ  $400^{\circ}\text{C}$  ทำการป้อนแกลบลในปริมาณน้อยๆ เพื่อช่วยเร่งให้อุณหภูมิเบตเพิ่มเร็วขึ้น เมื่ออุณหภูมิเบตถึงอุณหภูมิจุดติดไฟของแกลบล (ประมาณ  $550^{\circ}\text{C}$ ) จึงปรับอัตราการป้อนแกลบลตามที่ต้องการ พร้อมกับปรับอัตราการไหลของอากาศตามต้องการ รอให้อุณหภูมิเบตมีค่าคงที่สักระยะหนึ่งจึงหยุดระบบอุ่นจุดเบตเป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอนการจุดเตาเริ่มต้น

สภาวะโดยประมาณในการจุดเตาเผาเริ่มต้นเป็นดังนี้

อัตราการไหลของอากาศในการฟลูอิดไดซ์	=	15.18	CFM
ความเร็วในการฟลูอิดไดซ์	=	22.82	cm/s = $1.04 \times U_{mf}$
น้ำหนักถ่านไม้	=	1.0	kg
อัตราการป้อนแกลบลช่วยเสริม	=	1.8	kg/hr
เวลาในการจุดเตาเผาเริ่มต้น	=	30	min

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### Start up : Bed temperature with time



รูปที่ 6.4 แสดงอุณหภูมิเบดเทียบกับเวลาในการจุดเตาเริ่มต้นที่ประสบความสำเร็จ

## 6.2 การทดลองเต็มรูปแบบ (Full test)

### 6.2.1 การเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed combustion of rice husks)

วัตถุประสงค์ของการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไรซ์เบดคือ การศึกษาอิทธิพลของสภาวะการเผาไหม้อื่นได้แก่ อัตราการป้อนแกลบ และปริมาณอากาศส่วนเกิน ว่าส่งผลต่ออุณหภูมิการเผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้อย่างไร และยังเพื่อหาสภาวะการเผาไหม้ที่เหมาะสมเพื่อนำสภาวะนั้นไปใช้ในการทดลองในส่วนการไพโรไลซิสและการเผาไหม้ถ่านแกลบ (Semicokes) ต่อไป

สภาวะในการทดลองทั้งหมด แสดงอยู่ในตารางที่ 6.1



Test No.	Rice husks feed rate (kg/hr) (Intensity (kg/hr m <sup>2</sup> ) )	% Excess air
1	3.2 (100)	100
2	3.2 (100)	150
3	3.2 (100)	200
4	4.7 (150)	100
5	4.7 (150)	150
6	4.7 (150)	200
7	6.4 (200)	100
8	6.4 (200)	150
9	6.4 (200)	200

ตารางที่ 6.1 สภาวะการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่ทำการทดลอง

ขั้นตอนในการทดลองเริ่มจากการจุดเตาเริ่มต้น (ตามวิธีการที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 6.1.3) จนกระทั่งอุณหภูมิเบดสูงเพียงพอต่อการเผาไหม้ของแกลบแล้ว จึงปรับอัตราการป้อนแกลบและอากาศตามสภาวะที่กำหนด รอให้อุณหภูมิภายในเตาเผาเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 15 นาที จากนั้นเริ่มเก็บค่าอุณหภูมิภายในเตาเผาทุกตำแหน่ง และเก็บตัวอย่างก๊าซไอเสียเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบ ใช้เวลาทดลอง 1 ชั่วโมงจึงหยุดการทดลอง หลังจากนั้นทำการวัดปริมาณแกลบและเก็บตัวอย่างแกลบเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบ

ข้อมูลดิบของการทดลองแสดงอยู่ในภาคผนวก ค.1 ในที่นี้จะแสดงตารางและกราฟโดยสรุปของการเผาไหม้ ดังนี้

ตารางที่ 6.2 สรุปผลการทดลองทั้งหมดของการเผาไหม้แกลบ อุณหภูมิที่แสดงในตารางนี้เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดช่วงเวลาในการทดลอง

กราฟรูปที่ 6.5 ถึง 6.13 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ระยะความสูงต่างๆ เทียบกับเวลาในสภาวะการเผาไหม้คงตัว (Steady state) วัตถุประสงค์ของกราฟชุดนี้ คือการแสดงให้เห็นเสถียรภาพของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดที่สภาวะการเผาไหม้คงตัว

กราฟรูปที่ 6.14 ถึง 6.17 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ตำแหน่งเดียวกันเมื่อสภาวะควบคุมของการเผาไหม้เปลี่ยนไป อุณหภูมิในกราฟรูปนี้เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดช่วงเวลาทำการทดลอง วัตถุประสงค์ของกราฟชุดนี้ คือการแสดงให้เห็นอิทธิพลของอัตราการ

ป้อนเชื้อเพลิงแกลบ และ ปริมาณอากาศส่วนเกิน ต่ออุณหภูมิภายในเตาเผาและอุณหภูมิก๊าซไอเสีย

กราฟรูปที่ 6.18 ถึง 6.20 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดความสูงของเตาเผาฟลูอิดไต์เบด วัตถุประสงค์ของกราฟชุดนี้เพื่อแสดงให้เห็นการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาเมื่ออัตราการป้อนแกลบและปริมาณอากาศส่วนเกินเปลี่ยนไป

กราฟรูปที่ 6.21 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ CO , CO<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> ในก๊าซไอเสียเมื่อสภาวะควบคุมของการเผาไหม้เปลี่ยนไป วัตถุประสงค์ของกราฟรูปนี้คือ การแสดงให้เห็นอิทธิพลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ และ ปริมาณอากาศส่วนเกิน ต่อองค์ประกอบของก๊าซไอเสีย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

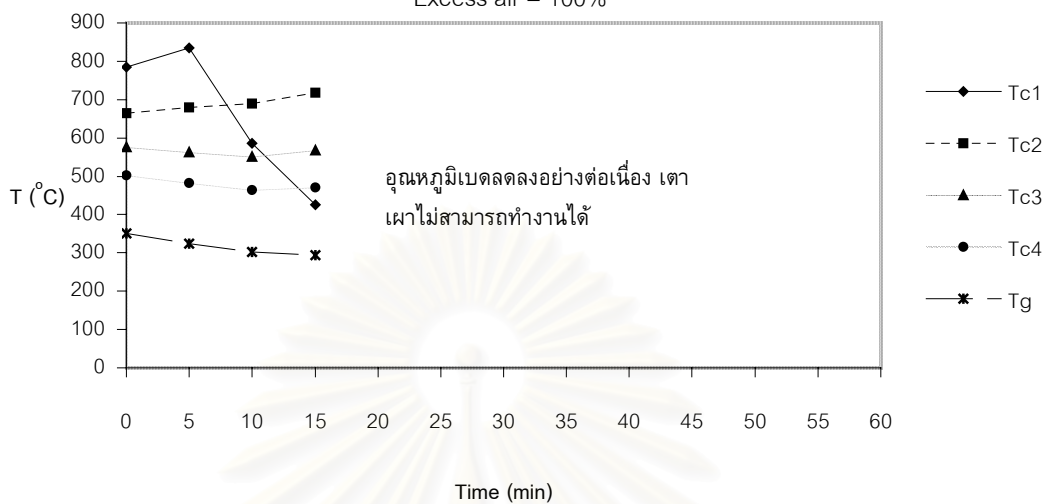
ครั้งที่	อัตราการ ป้อนแกลบ (kg/hr)	อัตราการ ไหลของ อากาศ (m <sup>3</sup> /min)	% อากาศ ส่วนเกิน	U <sub>f</sub> (cm/s)  (x U <sub>mf</sub> )	อุณหภูมิภายในเตาเผา (°C)				อุณหภูมิ ก๊าซไอ เสีย (°C) (T <sub>g</sub> )	องค์ประกอบก๊าซไอเสีย (% โดยปริมาตร)				ปริมาณ เถ้า (kg)	% Carbon ในเถ้า (% โดย นน.)
					x = 25 cm (T <sub>c1</sub> )	x = 75 cm (T <sub>c2</sub> )	x = 125 cm (T <sub>c3</sub> )	x = 175 cm (T <sub>c4</sub> )		O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO		
1	3.2	0.347	100	19.21 (0.87)	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	15.03	77.14	6.89	0.94	n/a	4.838
2	3.2	0.449	150	24.05 (1.09)	663.2	680.9	614.6	529.5	319.8	15.26	78.03	6.71	-	0.3	3.385
3	3.2	0.548	200	28.76 (1.31)	606.2	682.8	591.4	519.8	328.6	16.29	78.62	5.09	-	0.3	3.507
4	4.7	0.533	100	28.40 (1.29)	680.5	741.3	681.4	591.9	325.2	14.25	76.88	8.15	0.72	0.5	2.020
5	4.7	0.673	150	35.32 (1.61)	657.7	674.3	619.6	535.9	293.3	16.20	78.51	5.29	-	0.5	1.085
6	4.7	0.802	200	42.25 (1.92)	601.9	666.4	651.3	602.9	433.2	16.47	78.82	4.52	0.19	0.6	1.648
7	6.4	0.723	100	38.67 (1.76)	672.6	744.3	738.4	684.8	482.8	14.21	76.38	8.82	0.60	0.7	1.786
8	6.4	0.905	150	48.10 (2.19)	631.8	699.8	698.7	663.0	492.4	15.90	77.61	6.16	0.33	0.8	1.852
9	6.4	1.085	200	57.53 (2.62)	609.5	684.6	694.5	661.0	509.9	16.87	78.02	5.11	-	0.9	1.907

ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่สภาวะต่างๆ

### Temperature of combustor with time

Feed rate = 3.2 kg/hr

Excess air = 100%

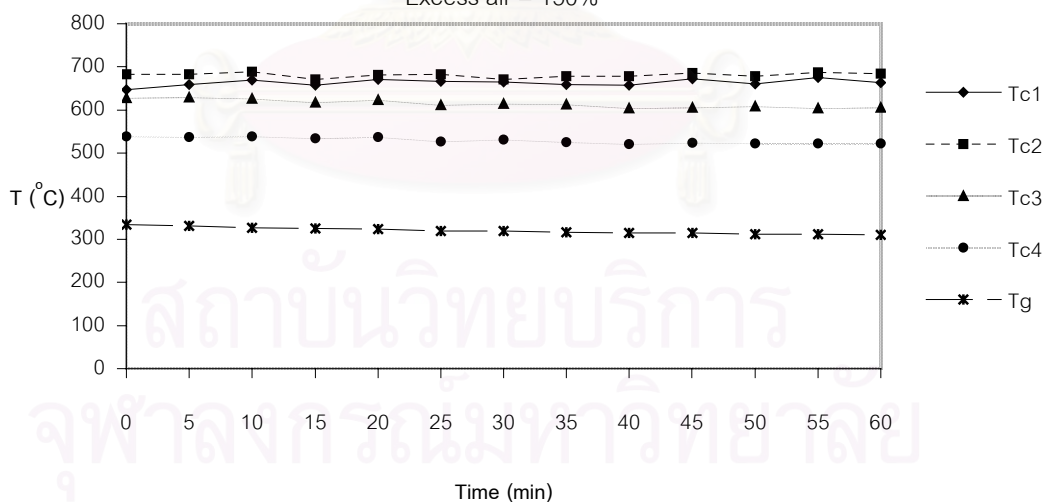


รูปที่ 6.5 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ 3.2 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 100%

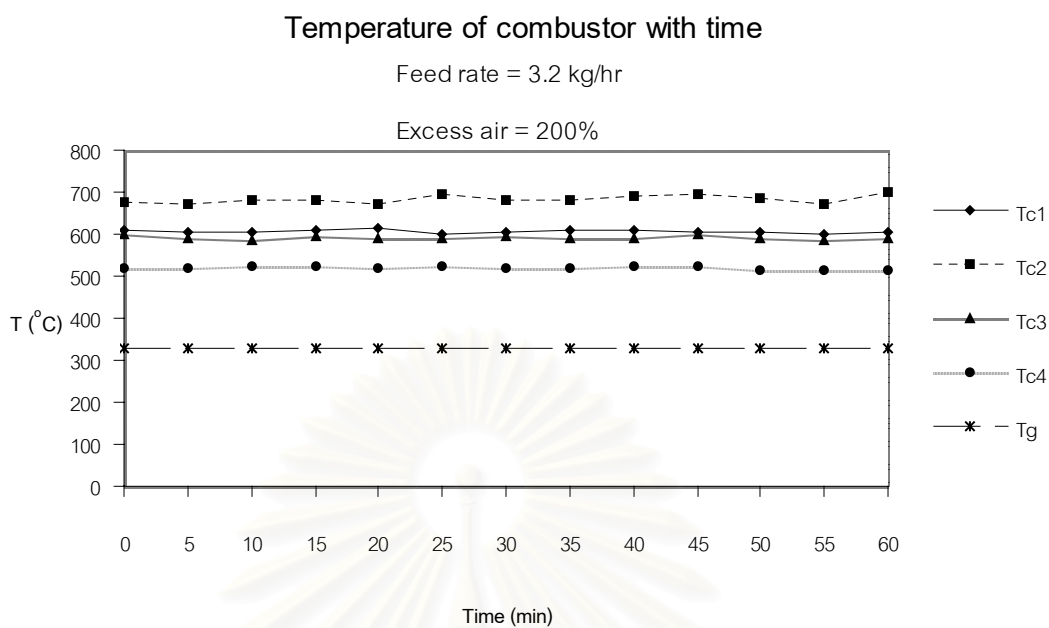
### Temperature of combustor with time

Feed rate = 3.2 kg/hr

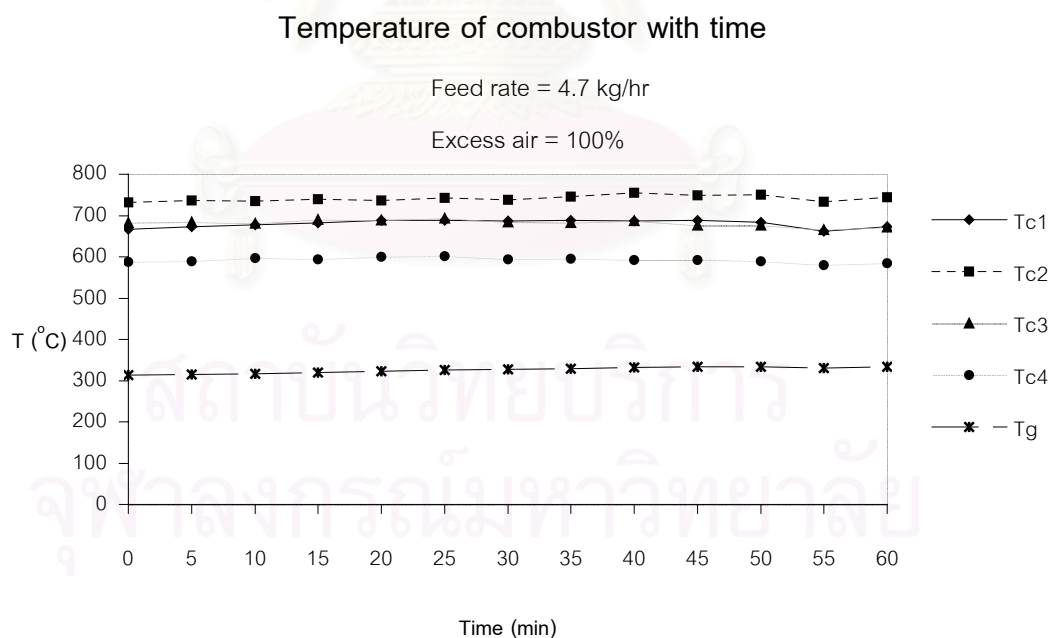
Excess air = 150%



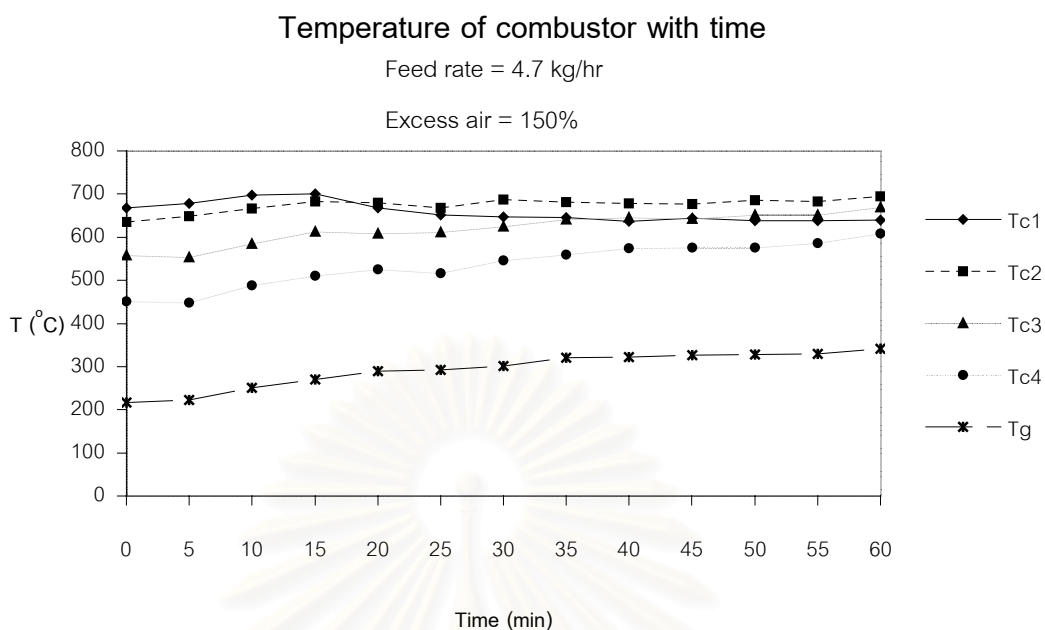
รูปที่ 6.6 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ 3.2 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 150%



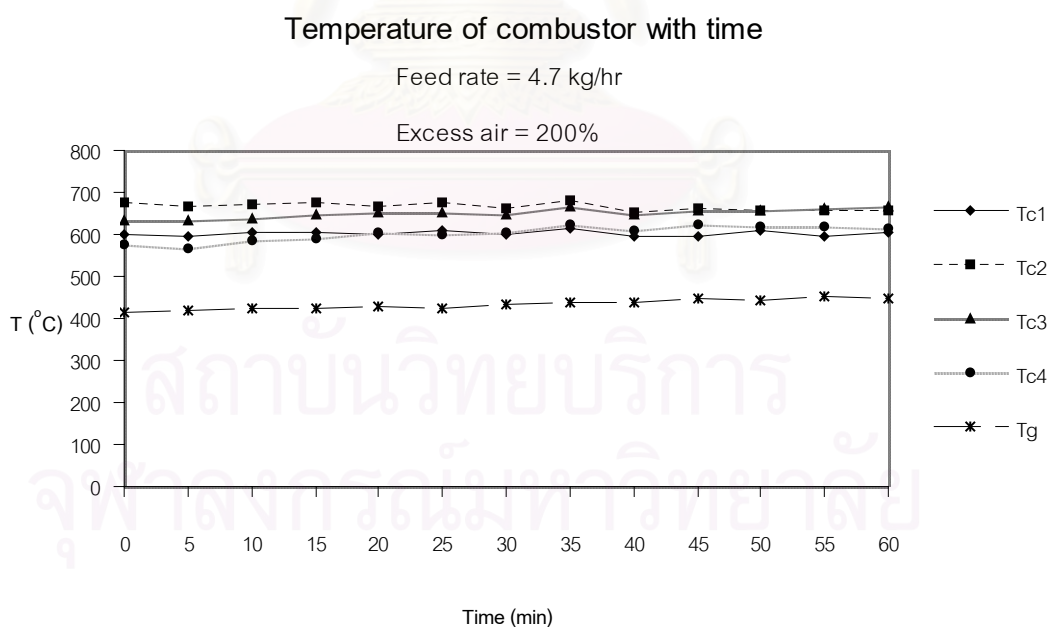
รูปที่ 6.7 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ 3.2 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 200%



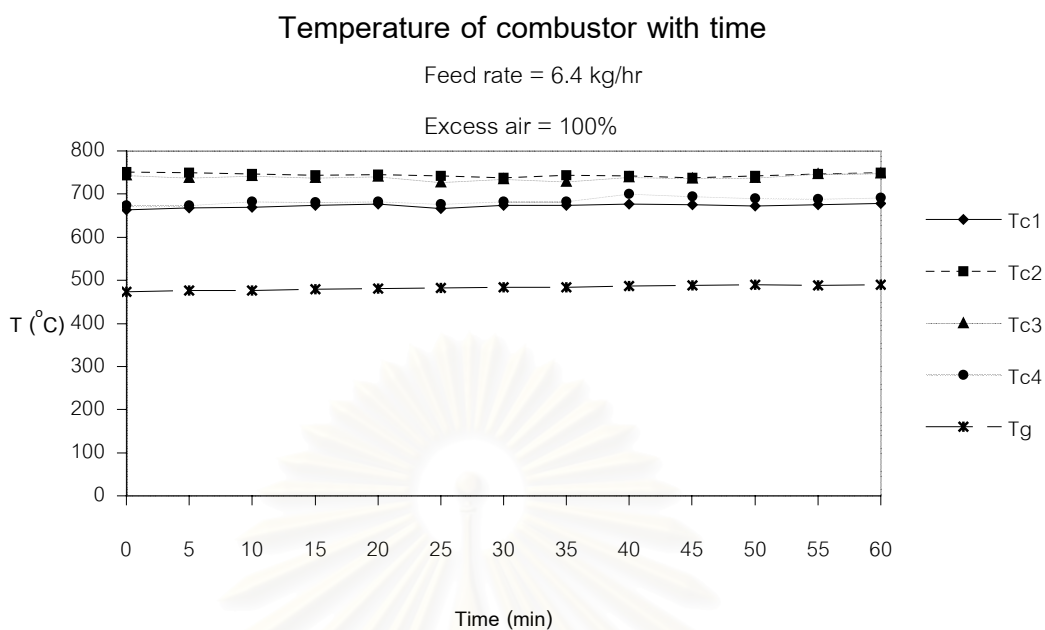
รูปที่ 6.8 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ 4.7 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 100%



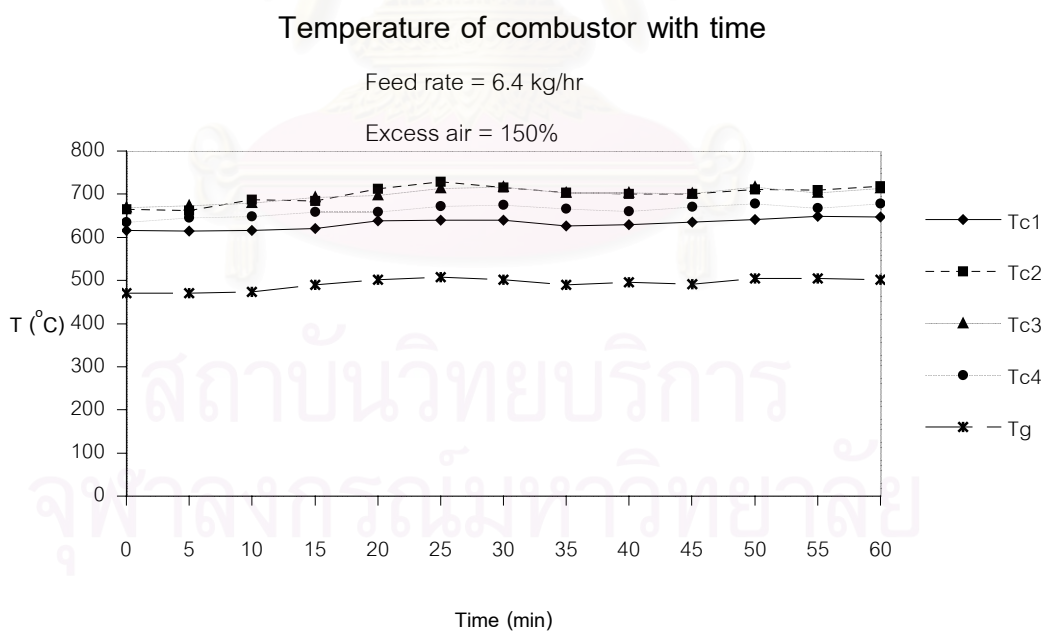
รูปที่ 6.9 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ 4.7 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 150%



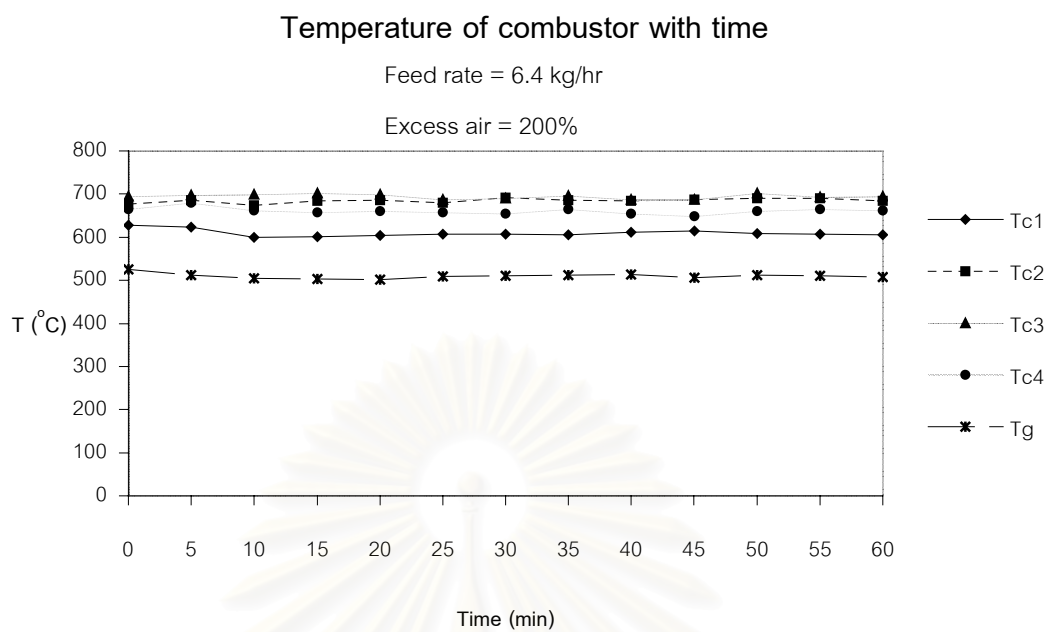
รูปที่ 6.10 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ 4.7 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 200%



รูปที่ 6.11 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ 6.4 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 100%



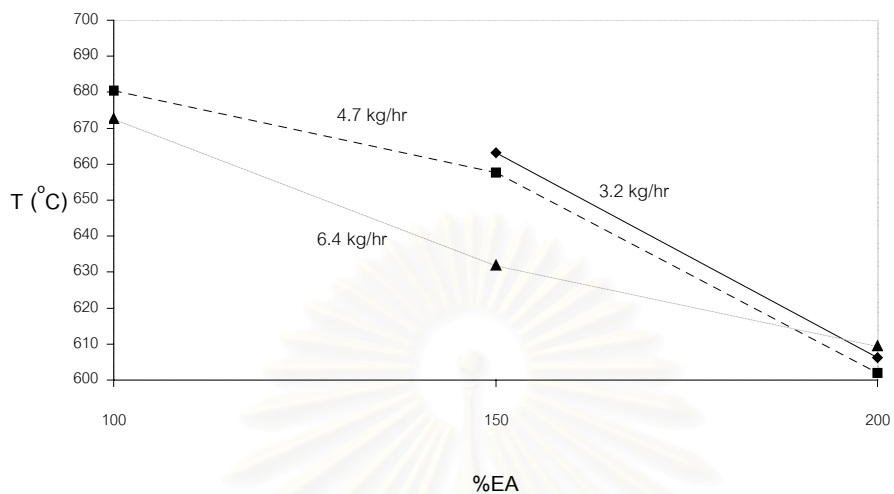
รูปที่ 6.12 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ 6.4 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 150%



รูปที่ 6.13 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแก๊ส 6.4 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 200%

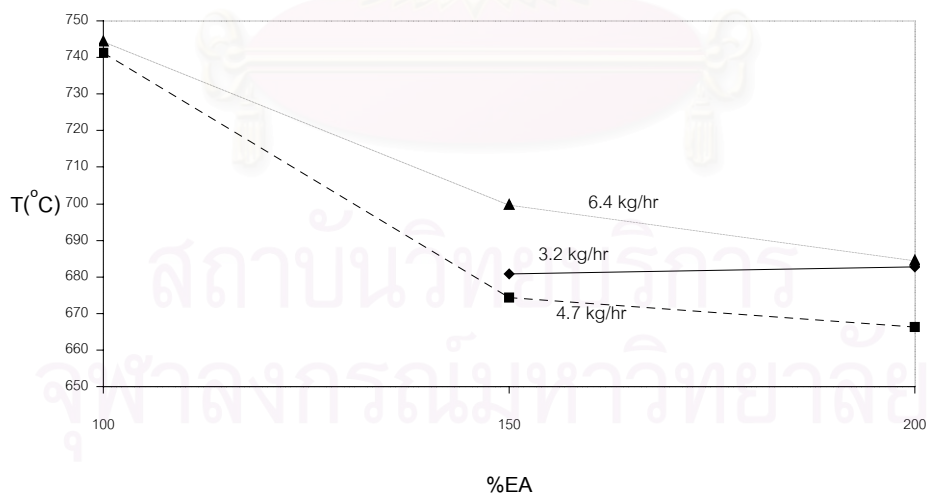


Tc1 average (x=25cm) versus %EA



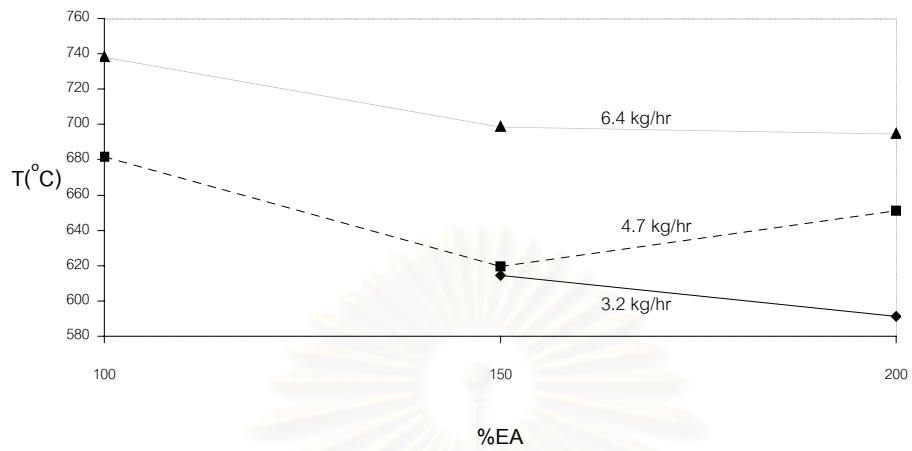
รูปที่ 6.14 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยที่ความสูง 25 cm ที่สภาวะการเผาไหม้ต่างๆ

Tc2 average (x=75 cm) versus %EA



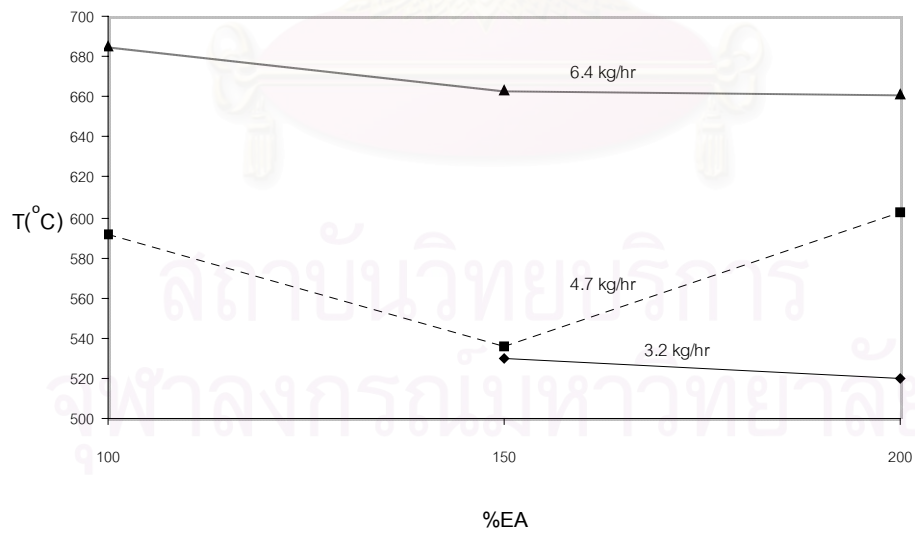
รูปที่ 6.15 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยที่ความสูง 75 cm ที่สภาวะการเผาไหม้ต่างๆ

Tc3 average (x=125cm) versus %EA

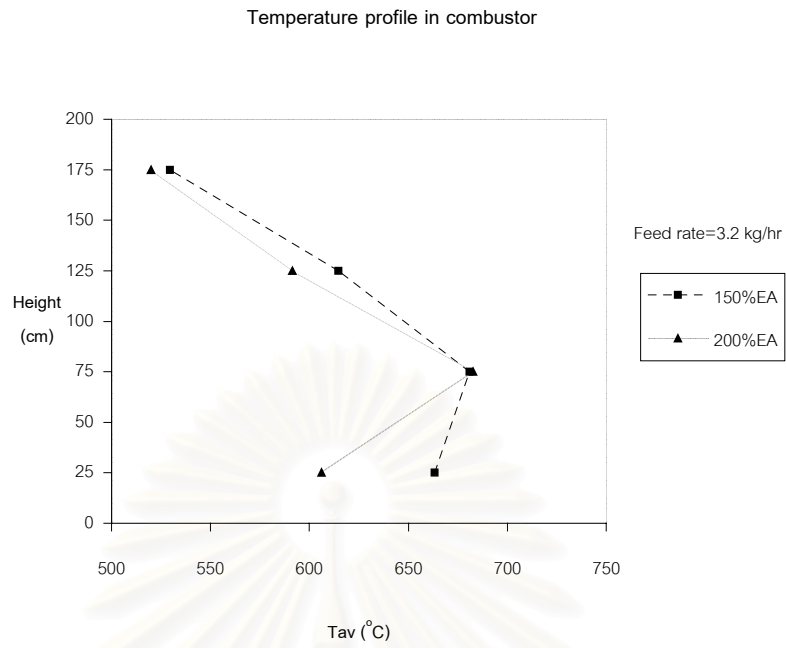


รูปที่ 6.16 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยที่ความสูง 125 cm ที่สภาวะการเผาไหม้ต่างๆ

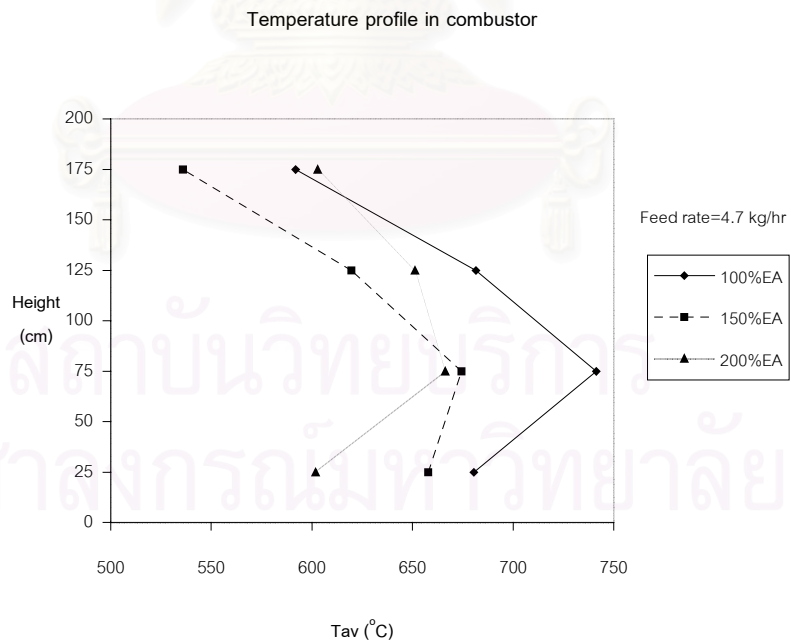
Tc4 average (x=175cm) versus %EA



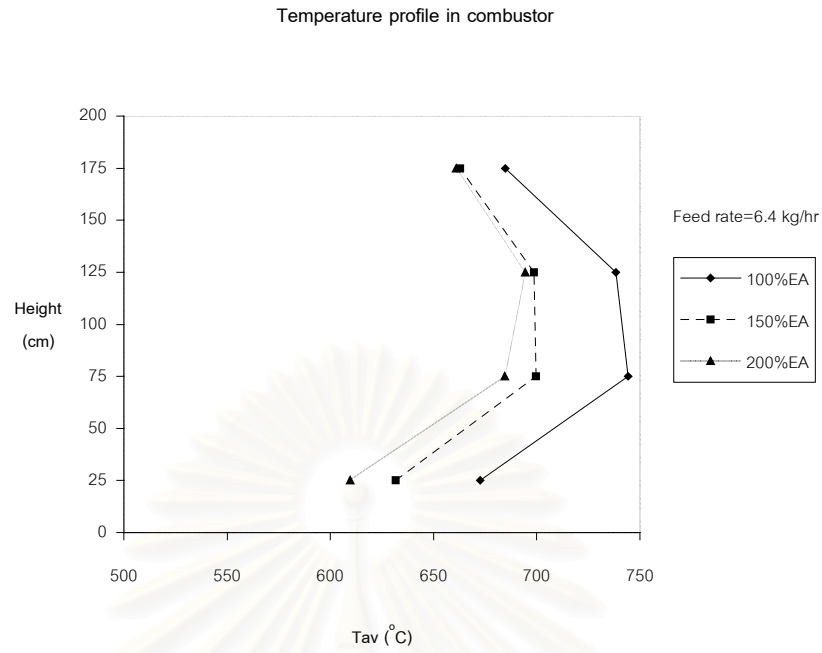
รูปที่ 6.17 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยที่ความสูง 175 cm ที่สภาวะการเผาไหม้ต่างๆ



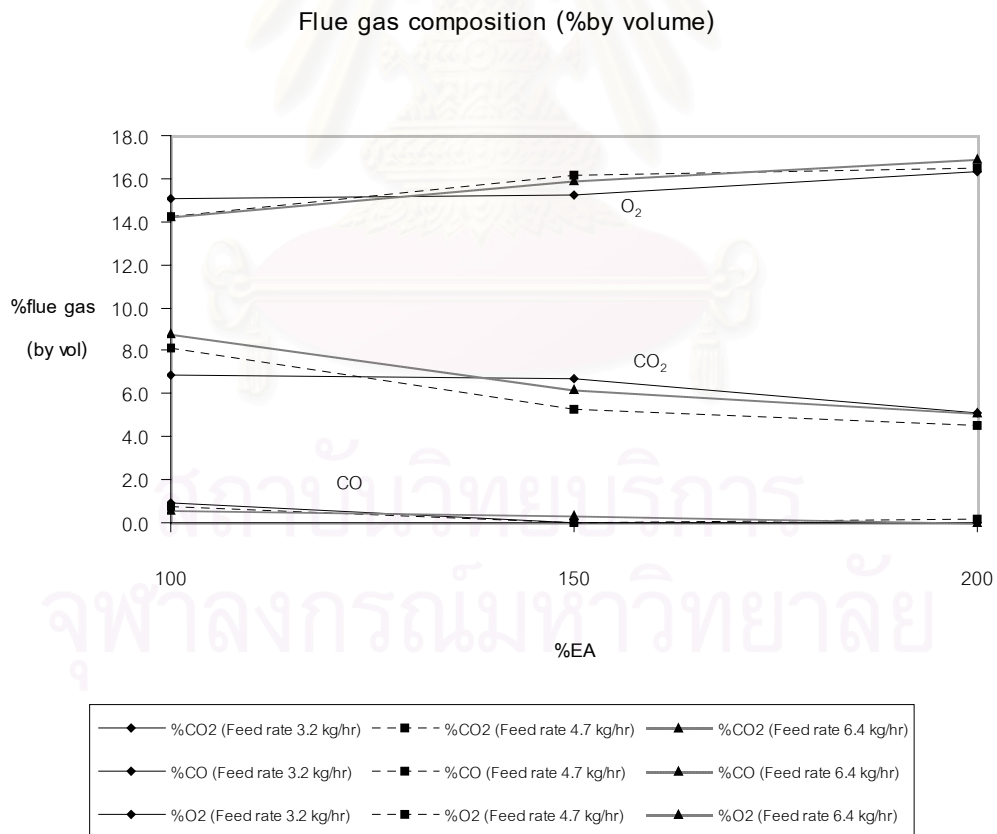
รูปที่ 6.18 การกระจายของอุณหภูมิตลอดความสูงของเตาเผาที่อัตราการป้อนแกลบ 3.2 kg/hr



รูปที่ 6.19 การกระจายของอุณหภูมิตลอดความสูงของเตาเผาที่อัตราการป้อนแกลบ 4.7 kg/hr



รูปที่ 6.20 การกระจายของอุณหภูมิตลอดความสูงของเตาเผาที่อัตราการป้อนแกลบ 6.4 kg/hr



รูปที่ 6.21 แสดงองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่สภาวะการเผาไหม้ต่างๆ

## 6.2.2 การไฟโรไลซิสแกลบในห้องไฟโรไลซิสแบบเบตหนึ่ง

วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการไฟโรไลซิสในการทดลองนี้คือ การผลิตถ่านแกลบ เพื่อนำไปศึกษาการเผาไหม้ของถ่านแกลบในห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบด และศึกษาอิทธิพลของสภาวะควบคุมของปฏิกิริยาไฟโรไลซิสที่มีต่อปริมาณและองค์ประกอบของถ่านแกลบที่ผลิตได้

ในส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงซึ่งเป็นอีกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฟโรไลซิส ในการทดลองนี้พบข้อจำกัดในการวัดปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ เนื่องจากความดันของก๊าซมีค่าน้อยมาก การตรวจสอบผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นก๊าซเชื้อเพลิงทำได้เพียงการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่สภาวะควบคุมต่างๆ ของปฏิกิริยาไฟโรไลซิสเท่านั้น

สภาวะควบคุมของปฏิกิริยาไฟโรไลซิสที่ศึกษาได้แก่ อัตราการให้ความร้อนแก่กระบวนการไฟโรไลซิส และเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไฟโรไลซิส

ความร้อนสำหรับปฏิกิริยาไฟโรไลซิสได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในห้องเผาไหม้ โดยความร้อนถ่ายเทผ่านผนังห้องเผาไหม้มาสู่ห้องไฟโรไลซิส เรียกลักษณะการให้ความร้อนเช่นนี้ว่า การให้ความร้อนทางอ้อม (Indirect method) ด้วยลักษณะการให้ความร้อนเช่นนี้ อัตราการให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยาซึ่งเป็นสภาวะควบคุมตัวหนึ่งนั้นจะทำการปรับเปลี่ยนโดยตรงได้ยาก ในการทดลองนี้จึงปรับเปลี่ยนอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้แทน ซึ่งทำโดยการปรับสภาวะควบคุมของการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไธด์เบด

จากหัวข้อที่แล้ว อุณหภูมิภายในเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดขึ้นอยู่กับทั้งอัตราการป้อนแกลบและปริมาณอากาศส่วนเกิน พิจารณาจากกราฟรูปที่ 6.18 ถึง 6.20 พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนแกลบ 6.4 kg/hr มีความสม่ำเสมอตลอดช่วงความสูงของเตาเผามากที่สุด ซึ่งเป็นสภาวะที่ดีเพราะทำให้การถ่ายเทความร้อนจากห้องเผาไหม้สู่ห้องไฟโรไลซิสมีความสม่ำเสมอตลอดช่วงความสูงของเตาเช่นกัน แต่ปัญหาที่พบเมื่อให้อัตราการป้อนแกลบ 6.4 kg/hr คือ มีควันย้อนออกจากห้องเผาไหม้มาทางชุดป้อนแกลบแบบสกรูเป็นจำนวนมาก และผนังเตาแดงจัดอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ ในการทดลองนี้จึงใช้อัตราการป้อนแกลบในห้องเผาไหม้ 4.7 kg/hr ซึ่งมีปัญหาน้อยกว่าแทน

สภาวะควบคุมอีกตัวหนึ่งคือ เวลาที่แกลบอยู่ในห้องไฟโรไลซิส กำหนดโดยพิจารณาจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเป็นหลัก ในการทดลองนี้ต้องการถ่านแกลบเป็นหลัก เวลาที่ใช้ในการไฟโรไลซิสต้องนานเพื่อให้อัตราการเกิดถ่านสูง (ดูรายละเอียดในบทที่ 3)

## สรุปสภาวะควบคุมในการทดลองไพโรไลซิสแกลบไว้ในตารางที่ 6.3

ครั้งที่	สภาวะในห้องเผาไหม้		สภาวะในห้องไพโรไลซิส	
	อัตราการป้อน แกลบ (kg/hr)	อากาศส่วนเกิน (%)	น้ำหนักแกลบใน 1 แบทช์ (kg)	Pyrolysis time (min)
1	4.7	150	18	30
2	4.7	150	18	60
3	4.7	150	18	90
4	4.7	200	18	60
5	4.7	100	18	60

ตารางที่ 6.3 สภาวะควบคุมในการไพโรไลซิสแกลบในห้องไพโรไลซิสแบบเบตหนึ่ง

ขั้นตอนในการทดลองเริ่มจากบรรจุแกลบลงในห้องไพโรไลซิส จากนั้นเริ่ม Start up เตาเผาฟลูอิดไบนด์ตามขั้นตอนเดียวกับในหัวข้อที่แล้ว เมื่ออุณหภูมิเบตสูงเพียงพอต่อการเผาไหม้แล้วจึงหยุดระบบอุ่นเบตแล้วปรับสภาวะควบคุมในการเผาไหม้ตามที่ต้องการ เริ่มเก็บค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ทั้งในห้องเผาไหม้และในห้องไพโรไลซิส เก็บตัวอย่างก๊าซเชื้อเพลิงเพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบ เมื่อ Pyrolysis time ถึงค่าที่ต้องการ หยุดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ วัดปริมาณถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้ วัดปริมาณถ่านแกลบที่ผลิตได้ และเก็บตัวอย่างถ่านแกลบเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบ

ผลการทดลองของกระบวนการไพโรไลซิส ข้อมูลดิบแสดงอยู่ในภาคผนวก ค.2 ในที่นี้จะแสดงตารางและกราฟโดยสรุปของกระบวนการไพโรไลซิส ดังนี้

ตารางที่ 6.4 สรุปอุณหภูมิทั้งหมดที่ทำการวัดในการทดลอง อุณหภูมิในตารางนี้เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดช่วงเวลาในการทดลอง

ตารางที่ 6.5 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแกลบแบบเบตหนึ่ง

กราฟรูปที่ 6.22 ถึง 6.26 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสที่ระยะความสูงต่างๆ เทียบกับเวลา วัตถุประสงค์ของกราฟชุดนี้ คือการแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นทั้งภายในห้องเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสเมื่อเวลาดำเนินไป

กราฟรูปที่ 6.27 และ 6.28 แสดงองค์ประกอบของถ่านแกลบ เมื่อ Pyrolysis time และ อุณหภูมิเบดของห้องเผาไหม้เปลี่ยนไป กราฟรูปที่ 6.29 แสดงค่าความร้อนของถ่านแกลบเมื่อ Pyrolysis time เปลี่ยนไป ในส่วนของผลจากอุณหภูมิเบดของห้องเผาไหม้ที่มีต่อค่าความร้อนของถ่านแกลบนั้นแนวโน้มไม่ชัดเจน ในที่นี้จึงไม่แสดงผลในส่วนดังกล่าวนี้

กราฟรูปที่ 6.30 ถึง 6.33 แสดงองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง และค่าความร้อนของ ก๊าซเชื้อเพลิง เมื่อ Pyrolysis time และอุณหภูมิเบดของห้องเผาไหม้เปลี่ยนไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ครั้งที่	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C) (T <sub>g</sub> )	อุณหภูมิในห้องไฟโรไลซิส			
	x=25cm	x=75cm	x=125cm	x=175cm		x=25cm	x=75cm	x=125cm	x=175cm
	(T <sub>c1</sub> )	(T <sub>c2</sub> )	(T <sub>c3</sub> )	(T <sub>c4</sub> )		(T <sub>p1</sub> )	(T <sub>p2</sub> )	(T <sub>p3</sub> )	(T <sub>p4</sub> )
1	716.7	791.4	750.8	598.8	370.9	162.1	371.3	316.4	361.2
2	774.1	813.9	797.9	708.5	469.3	265.6	543.6	477.0	414.5
3	739.3	813.5	819.3	731.5	550.7	388.3	621.1	593.8	571.4
4	740.6	810.7	808.4	699.3	489.1	219.9	419.7	412.7	428.5
5	786.7	845.3	770.3	597.9	349.5	223.4	528.4	434.0	415.9

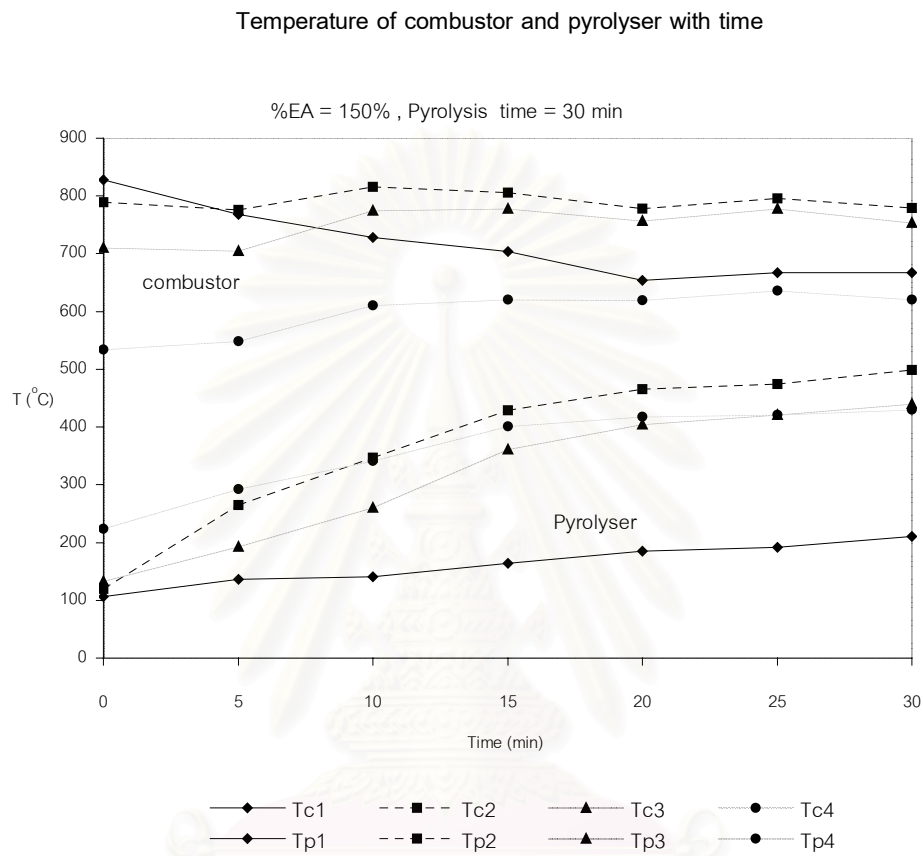
ตารางที่ 6.4 แสดงอุณหภูมิทั้งหมดที่ทำการวัดในการทดลองไฟโรไลซิส

ครั้งที่	ปริมาณถ่าน แกลบ (kg) (% of residue) *	ปริมาณแกลบไม่ เกิดปฏิกิริยา (kg) (% of residue) *	องค์ประกอบของถ่านแกลบ (% โดยน้ำหนัก)					LHV ของถ่าน แกลบ (MJ/kg)	องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง (% โดยปริมาตร)						LHV ของ ก๊าซเชื้อ เพลิง (MJ/Nm <sup>3</sup> )
			C	H	O	N	Ash		O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
			1	4.9 (67.12)	2.4 (32.88)	49.382	0.933		10.522	0.163	39.0	15.95	9.97	19.55	
2	4.7 (78.33)	1.3 (21.67)	48.533	1.023	5.389	0.155	44.9	16.68	9.71	21.92	20.82	6.79	-	40.76	4.66
3	3.5 (76.09)	1.1 (23.91)	46.225	0.839	9.384	0.152	43.4	14.98	10.70	19.69	13.83	6.85	1.11	47.82	3.98
4	5.0 (70.42)	2.1 (29.58)	49.840	0.978	7.789	0.293	41.1	16.65	10.05	21.21	13.33	6.49	0.91	48.01	3.78
5	5.1 (68.92)	2.3 (31.08)	49.520	0.768	9.453	0.159	40.1	15.99	9.89	20.45	14.88	7.49	1.16	46.12	4.32

\* การคัดแยกถ่านแกลบและแกลบที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกจากกันอาศัยการสังเกตด้วยตา (by visualization)

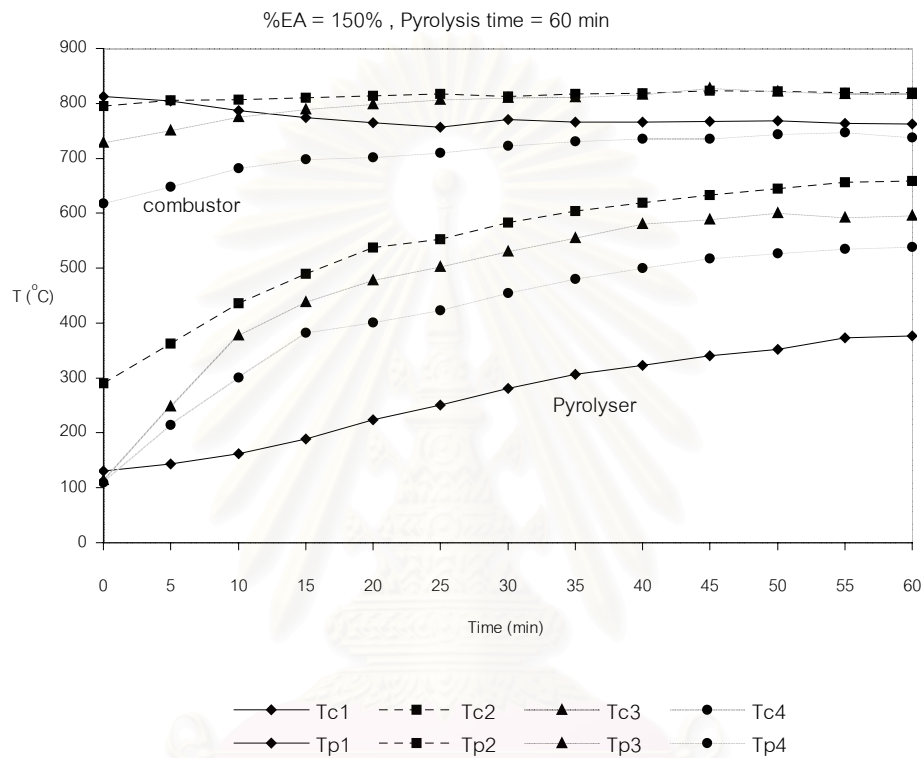
ตารางที่ 6.5 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฟโรไลซิสแกลบในห้องไฟโรไลซิสแบบเบดนิ่ง





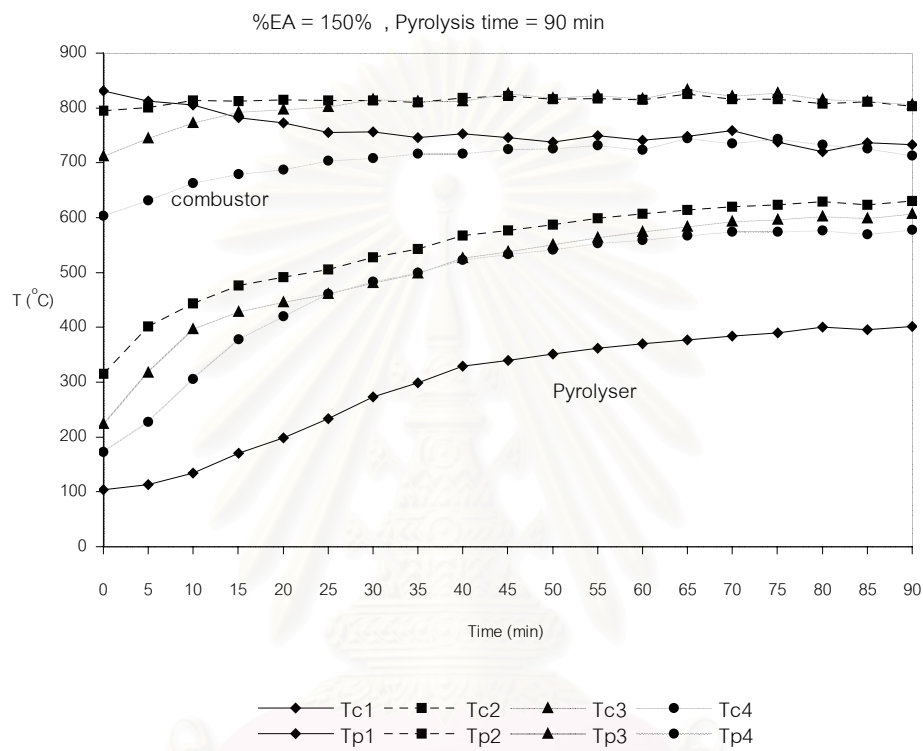
กราฟรูปที่ 6.22 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสที่ความสูงต่างๆ ที่ ปริมาณอากาศส่วนเกิน 150% และ Pyrolysis time 30 นาที

Temperature of combustor and pyrolyser with time



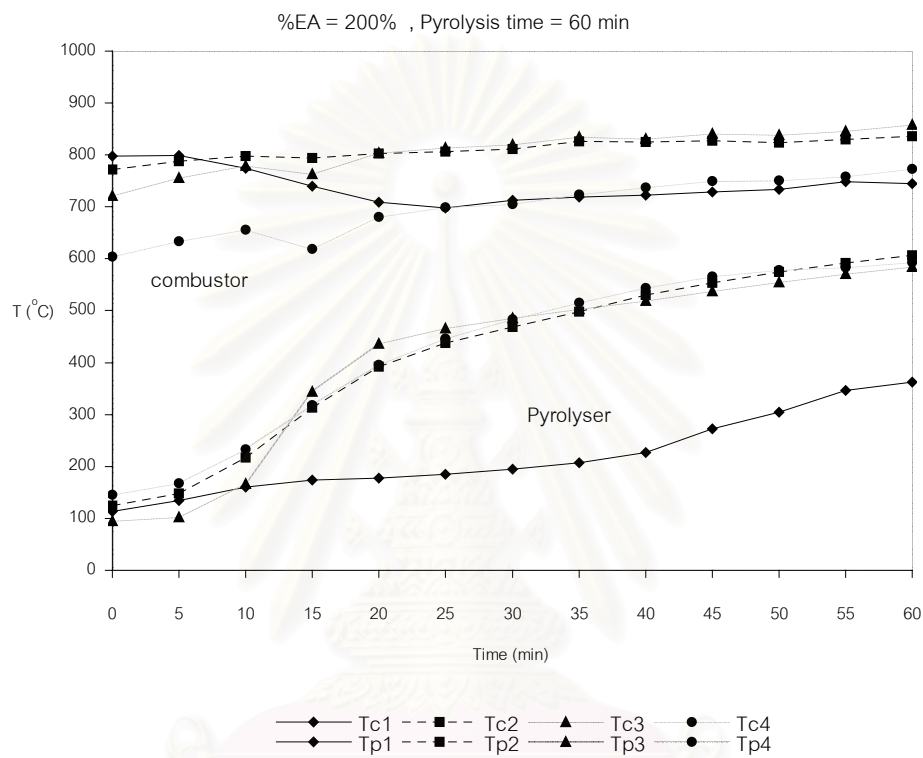
กราฟรูปที่ 6.23 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสที่ความสูงต่างๆ ที่ ปริมาณอากาศส่วนเกิน 150% และ Pyrolysis time 60 นาที

Temperature of combustor and pyrolyser with time



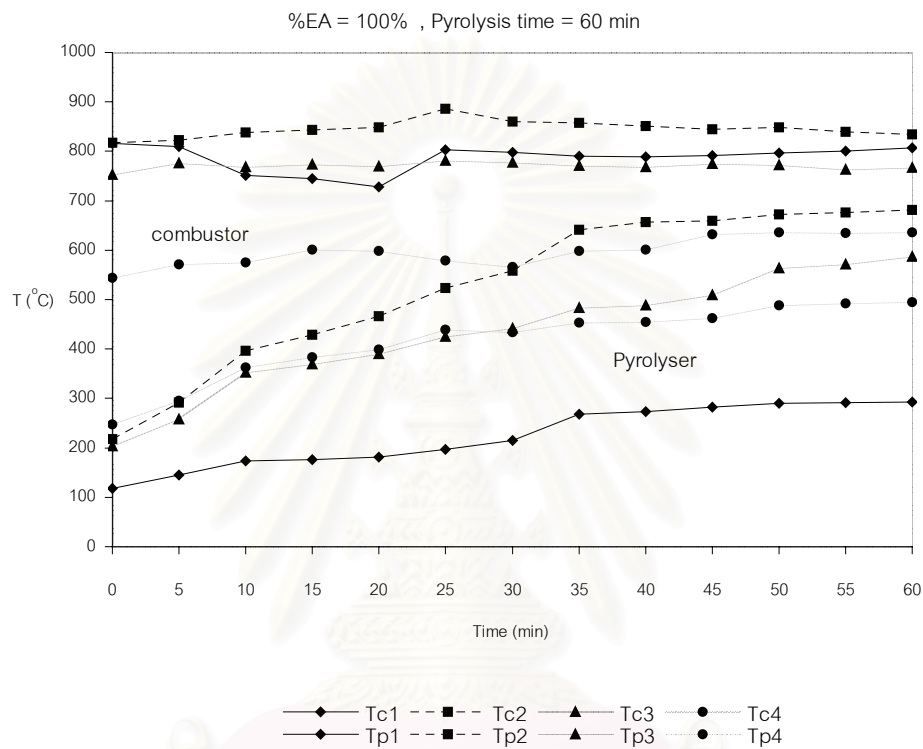
กราฟรูปที่ 6.24 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสที่ความสูงต่างๆ ที่ ปริมาณอากาศส่วนเกิน 150% และ Pyrolysis time 90 นาที

Temperature of combustor and pyrolyser with time

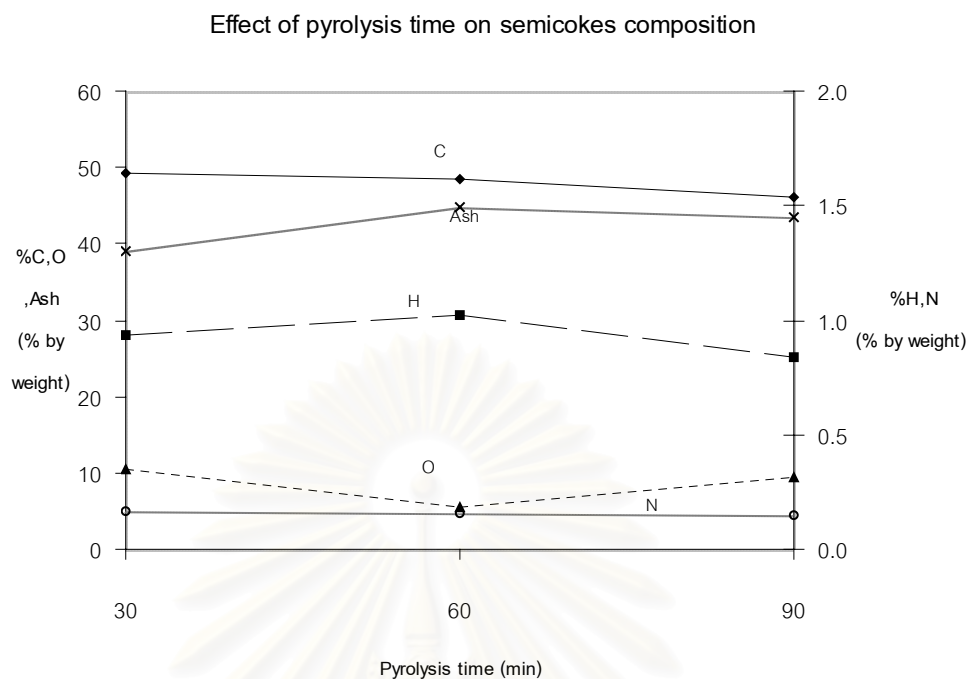


กราฟรูปที่ 6.25 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสที่ความสูงต่างๆ ที่ ปริมาณอากาศส่วนเกิน 200% และ Pyrolysis time 60 นาที

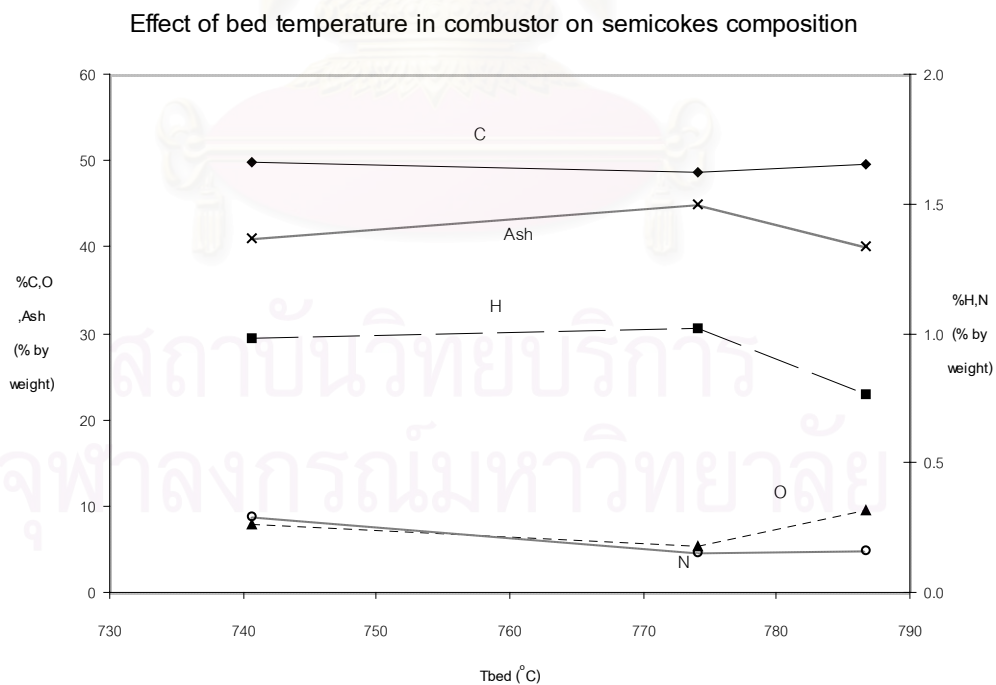
Temperature of combustor and pyrolyser with time



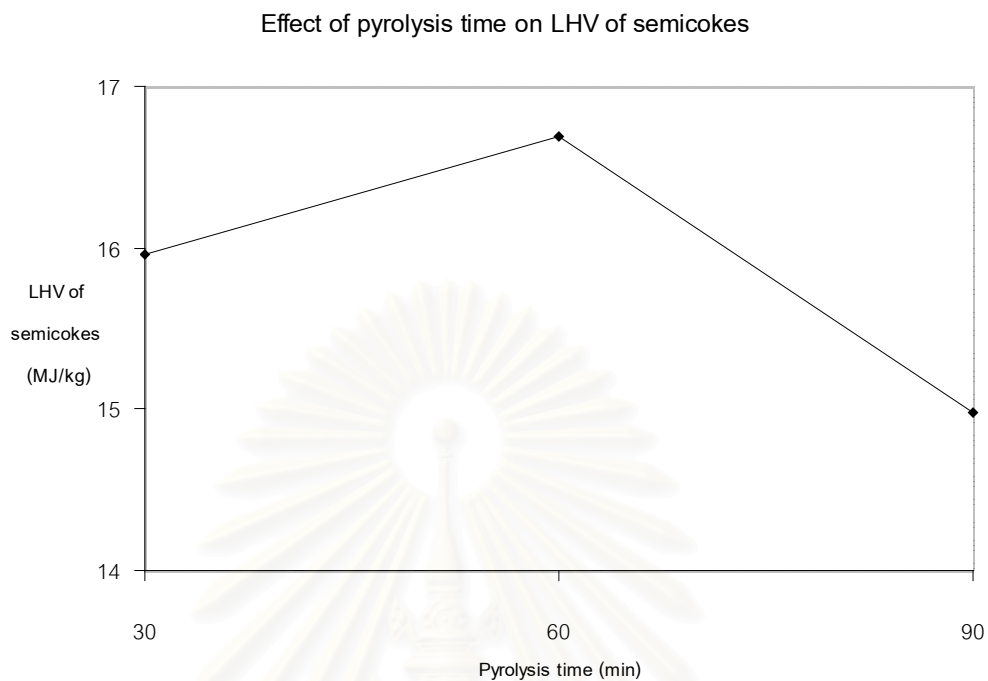
กราฟรูปที่ 6.26 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสที่ความสูงต่างๆ ที่ ปริมาณอากาศส่วนเกิน 100% และ Pyrolysis time 60 นาที



กราฟรูปที่ 6.27 แสดงองค์ประกอบของ Semicokes เมื่อค่า Pyrolysis time เปลี่ยนไป



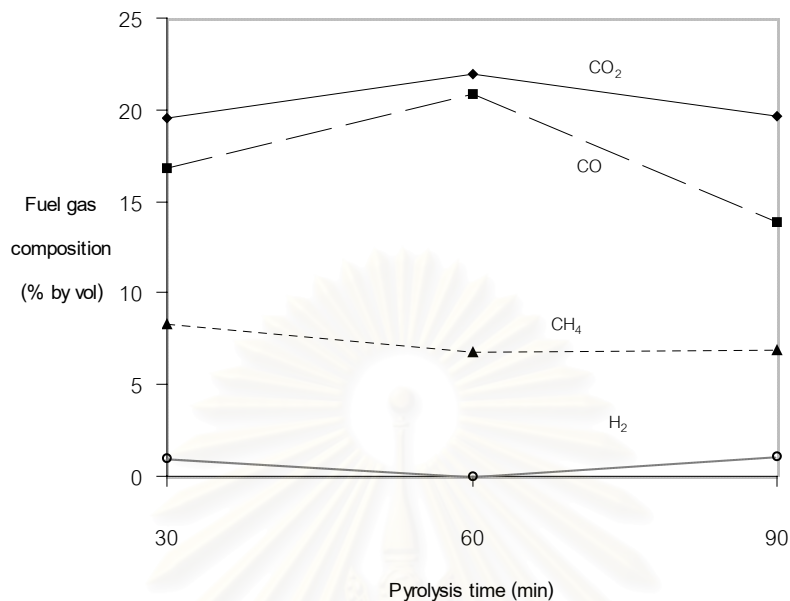
กราฟรูปที่ 6.28 แสดงองค์ประกอบของ Semicokes เมื่ออุณหภูมิเบดของห้องเผาไหม้เปลี่ยนไป



กราฟรูปที่ 6.29 แสดงค่าความร้อนของ Semicokes เมื่อค่า Pyrolysis time เปลี่ยนไป

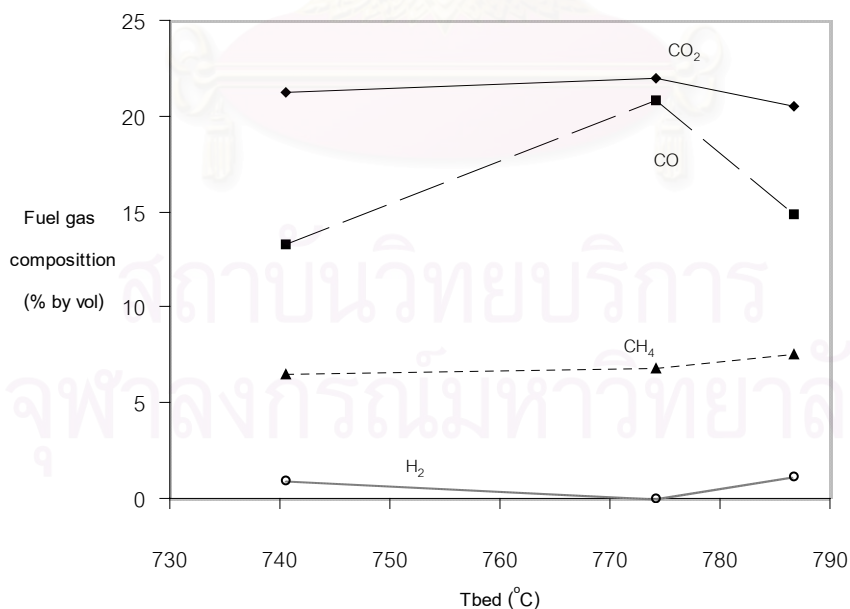
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effect of pyrolysis time on fuel gas composition



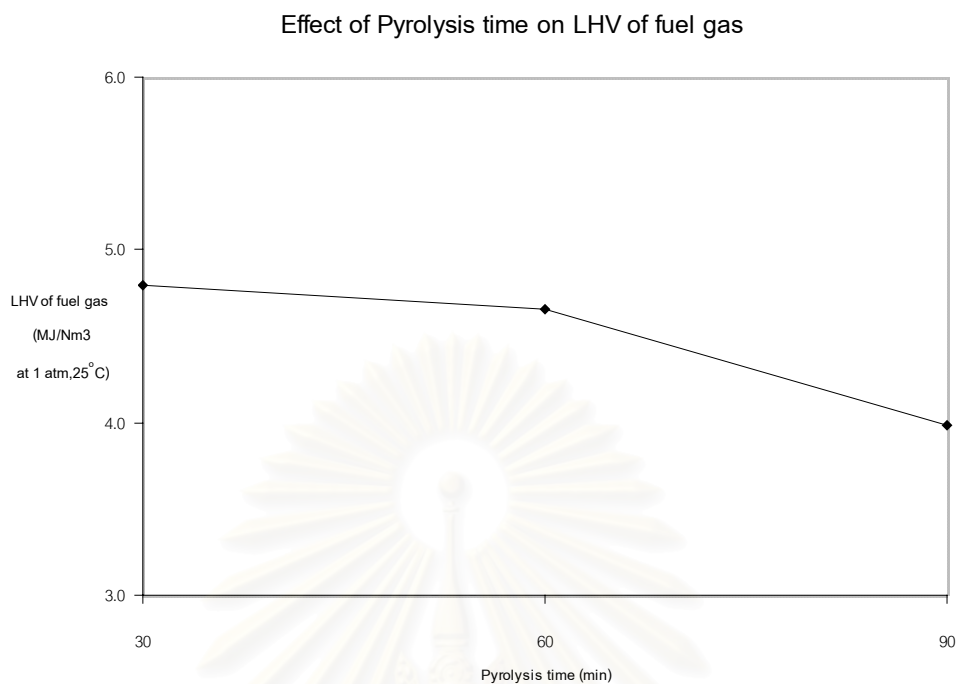
กราฟรูปที่ 6.30 แสดงองค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงเมื่อค่า Pyrolysis time เปลี่ยนไป

Effect of bed temperature in combustor on composition of fuel gas

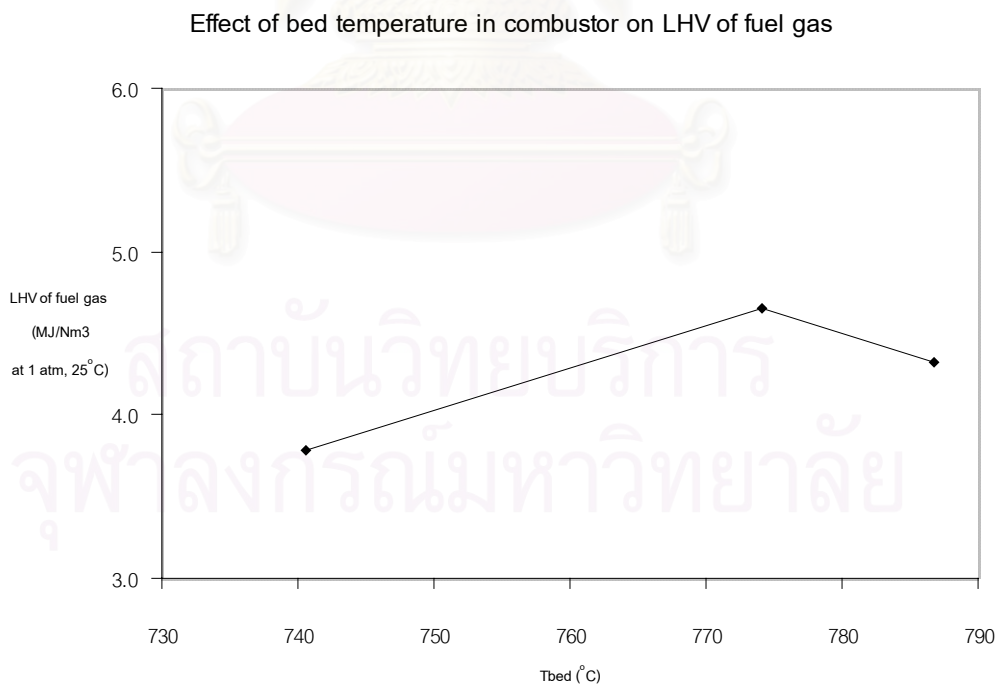


กราฟรูปที่ 6.31 แสดงองค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิเบดของห้องเผาไหม้เปลี่ยนไป





กราฟรูปที่ 6.32 แสดงค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงเมื่อค่า Pyrolysis time เปลี่ยนไป



กราฟรูปที่ 6.33 แสดงค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิเบดของห้องเผาไหม้เปลี่ยนไป

### 6.2.3 การใช้ถ่านแกลบเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด

จากหัวข้อที่แล้ว ถ่านแกลบที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 14.98-16.68 MJ/kg สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ได้ ในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาศักยภาพการใช้งานถ่านแกลบภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของถ่านแกลบพบว่า องค์ประกอบหลักคือคาร์บอนและถ้าปริมาณถ่านในถ่านแกลบมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับแกลบ ปริมาณถ่านที่สูงนี้ทำให้การเผาไหม้ของถ่านแกลบทำได้ยากมากขึ้น การใช้งานถ่านแกลบจึงจำเป็นต้องผสมถ่านแกลบกับแกลบเข้าด้วยกันก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด และจะเรียกเชื้อเพลิงนี้ว่าเชื้อเพลิงผสม

วัตถุประสงค์หลักของการทดลองนี้คือการศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด มุ่งเน้นที่การ Start up เตาเผาและอุณหภูมิภายในเตาเผาที่สภาวะคงตัวเมื่ออัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงผสมเปลี่ยนไป และหาอัตราส่วนผสมที่มากที่สุดที่ยังคงทำให้การเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดดำเนินไปได้

สภาวะควบคุมที่ใช้ในการทดลองนี้คือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงผสม 4.7 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน 150% คงที่ทุกการทดลอง ตัวแปรที่ปรับค่าคืออัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงผสม สรุปสภาวะควบคุมในการทดลองนี้ไว้ในตารางที่ 6.6

ครั้งที่	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงผสม (kg/hr)	อากาศส่วนเกิน (%)	อัตราส่วนระหว่างถ่านแกลบต่อแกลบ (%โดยน้ำหนัก)
1	4.7	150	0 (แกลบอย่างเดียว)
2	4.7	150	10
3	4.7	150	20
4	4.7	150	30
5	4.7	150	40
6	4.7	150	50
7	4.7	150	60
8	4.7	150	70
9	4.7	150	80
10	4.7	150	90
11	4.7	150	100 (ถ่านแกลบอย่างเดียว)

ตารางที่ 6.6 สภาวะควบคุมในการทดลองการใช้ถ่านแกลบเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด

ขั้นตอนในการทดลองเริ่มจากการ Start up เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดด้วยเชื้อเพลิงผสม อุณหภูมิเบดก่อนป้อนเชื้อเพลิงผสมจะควบคุมไว้ที่ประมาณ  $550^{\circ}\text{C}$  ในทุกการทดลอง เมื่ออุณหภูมิเบดถึงค่าดังกล่าวแล้ว หยุดระบบอุ่นเบด เริ่มป้อนเชื้อเพลิงผสมพร้อมทั้งปรับสภาวะควบคุมในการเผาไหม้ตามที่ต้องการ สังเกตเปลวไฟระหว่างการ Start up ทางช่องดูไฟระหว่างปล่อยให้เตาเผาทำงานประมาณ 15 นาทีเพื่อดูว่าเตาเผาสามารถเผาไหม้ที่อัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงนี้ได้จริง ถ้าเตาเผาสามารถเผาไหม้ได้จึงเริ่มเก็บค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ตามที่ต้องการ เวลาที่ใช้ในการทดลองแต่ละสภาวะ 30 นาที

ผลการทดลองการใช้ถ่านแกลบเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด ข้อมูลดิบแสดงอยู่ในภาคผนวก ค.3 ในที่นี้จะแสดงตารางและกราฟโดยสรุปของการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 6.7 แสดงผลการ Start up และอุณหภูมิภายในเตาเผาทุกสภาวะของการทดลอง อุณหภูมิในตารางนี้เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดช่วงระยะเวลาการทดลอง

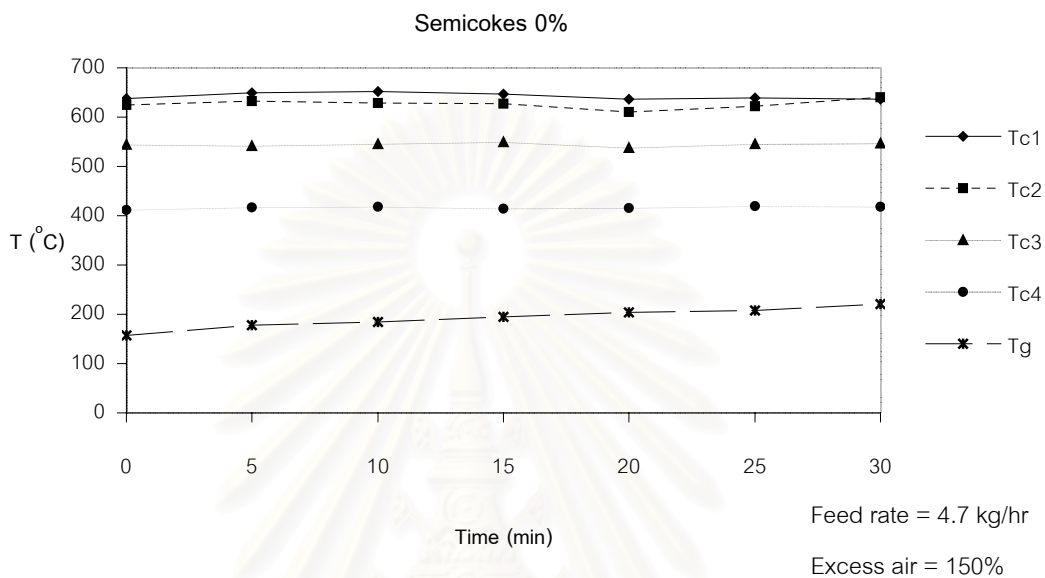
กราฟรูปที่ 6.34 ถึง 6.39 แสดงอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ระยะความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสียเทียบกับเวลา วัตถุประสงค์ของกราฟชุดนี้ คือการแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นทั้งภายในเตาเผาที่สภาวะคงตัว

กราฟรูปที่ 6.40 เปรียบเทียบอุณหภูมิเบดเมื่ออัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงผสมเปลี่ยนไป อุณหภูมิเบดในกราฟรูปนี้เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดลอง วัตถุประสงค์ของกราฟรูปนี้ คือการแสดงให้เห็นอิทธิพลของอัตราส่วนปริมาณ Semicokes ต่อแกลบที่มีต่ออุณหภูมิเบด

ครั้งที่	อัตราส่วนระหว่างถ่านแกลบต่อแกลบ (% โดยน้ำหนัก)	ผลการ Start up	อุณหภูมิภายในเตาเผา (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C) T <sub>g</sub>
			x=25cm T <sub>c1</sub>	X=75cm T <sub>c2</sub>	X=125cm T <sub>c3</sub>	X=175cm T <sub>c4</sub>	
1	0 (แกลบ)	ได้	642.6	626.3	544.4	416.4	192.4
2	10	ได้	637.3	645.6	546.1	415.0	186.7
3	20	ได้	631.0	649.9	539.7	411.6	175.0
4	30	ได้	625.0	635.7	563.3	434.8	172.6
5	40	ได้	624.6	610.6	539.7	402.1	153.4
6	50	เริ่มมีปัญหา	594.5	538.6	481.9	375.4	129.7
7	60	ไม่ได้	-	-	-	-	-
8	70	ไม่ได้	-	-	-	-	-
9	80	ไม่ได้	-	-	-	-	-
10	90	ไม่ได้	-	-	-	-	-
11	100 (ถ่านแกลบ)	ไม่ได้	-	-	-	-	-

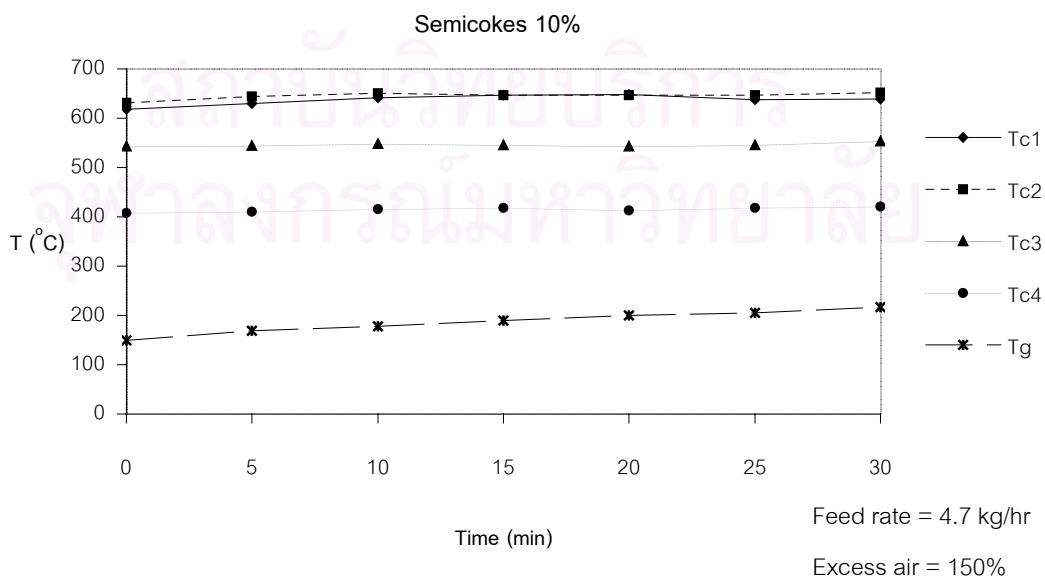
ตารางที่ 6.7 แสดงผลการ Start up และอุณหภูมิภายในเตาเผาทุกสภาวะของการทดลองการใช้ถ่านแกลบเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบด

## Temperature of combustor with time

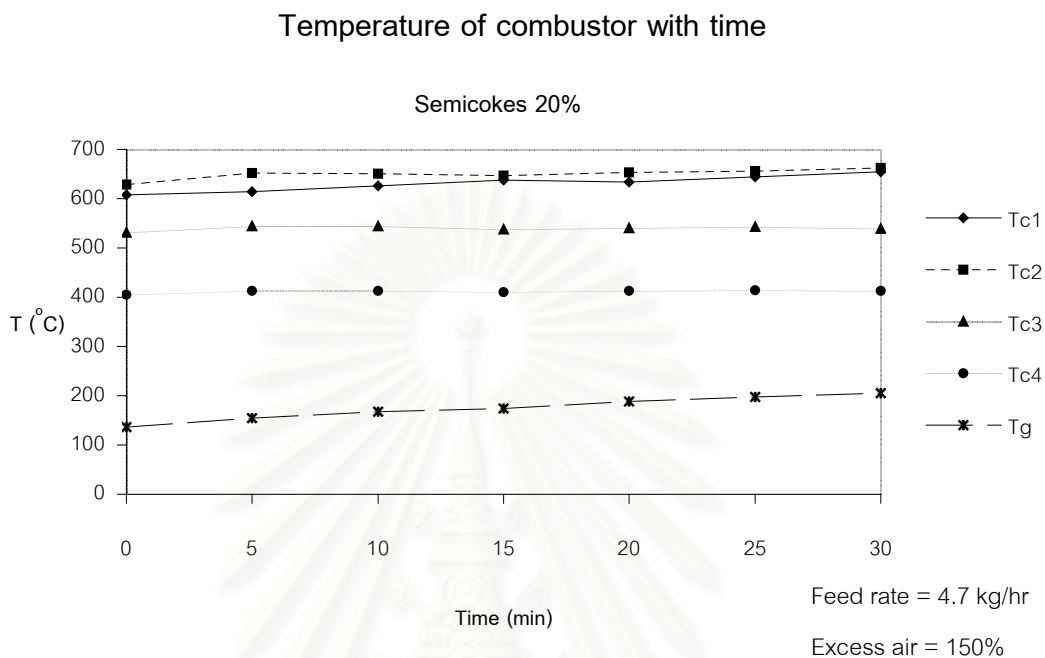


รูปที่ 6.34 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย เมื่ออัตราส่วนผสมของถ่านแกลบต่อแกลบ 0% โดยน้ำหนัก (แกลบอย่างเดียว)

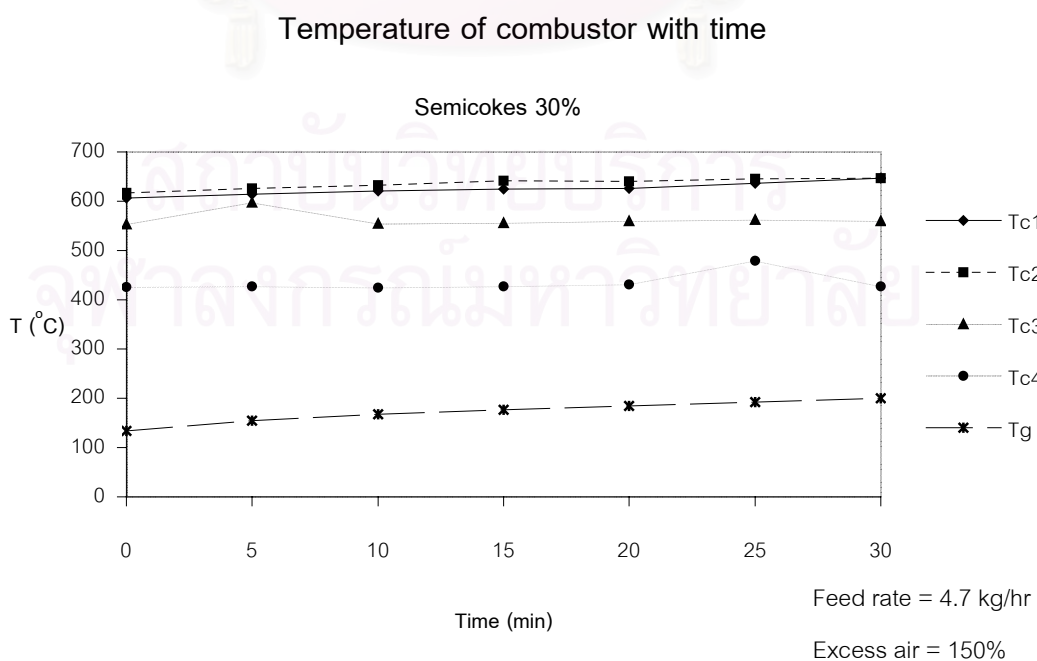
## Temperature of combustor with time



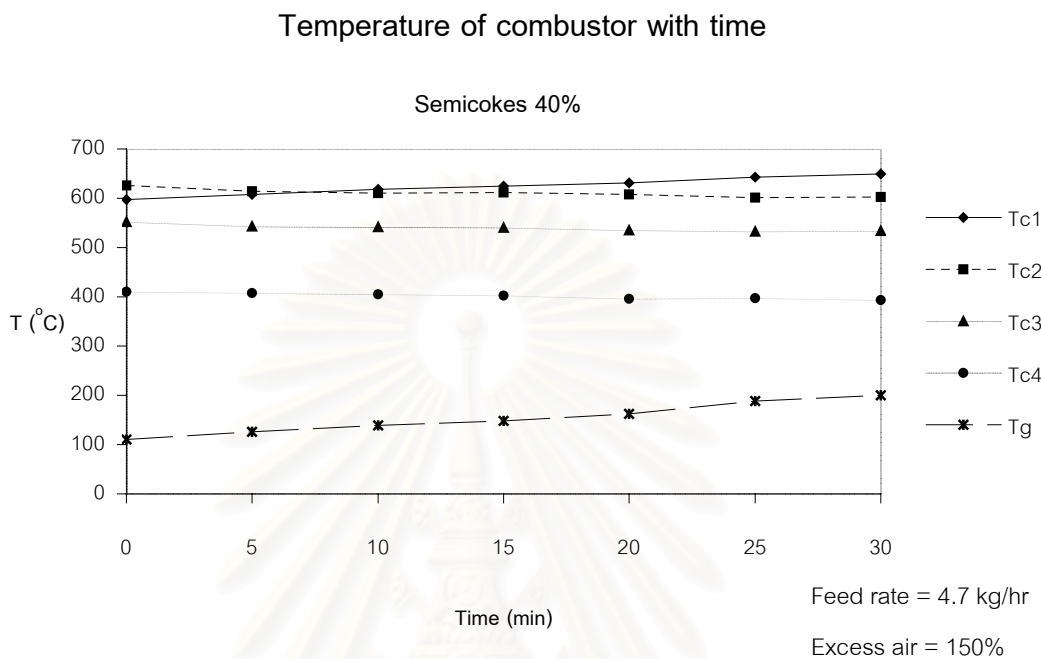
รูปที่ 6.35 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย เมื่ออัตราส่วนผสมของถ่านแกลบต่อแกลบ 10% โดยน้ำหนัก



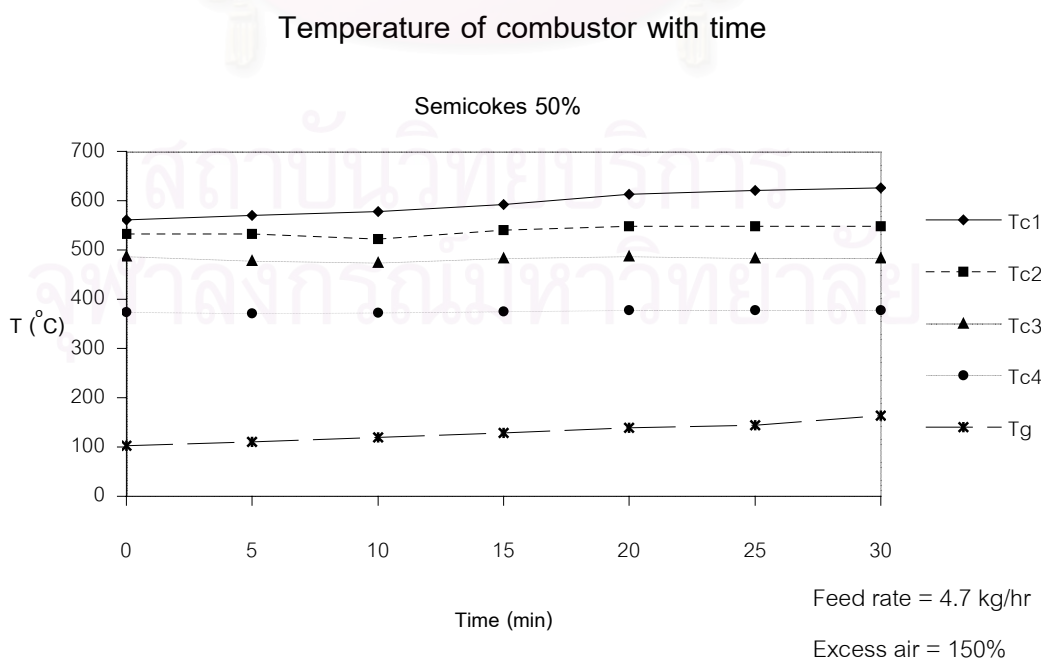
รูปที่ 6.36 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย เมื่ออัตราส่วนผสมของถ่านแกลบต่อแกลบ 20% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 6.37 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย เมื่ออัตราส่วนผสมของถ่านแกลบต่อแกลบ 30% โดยน้ำหนัก

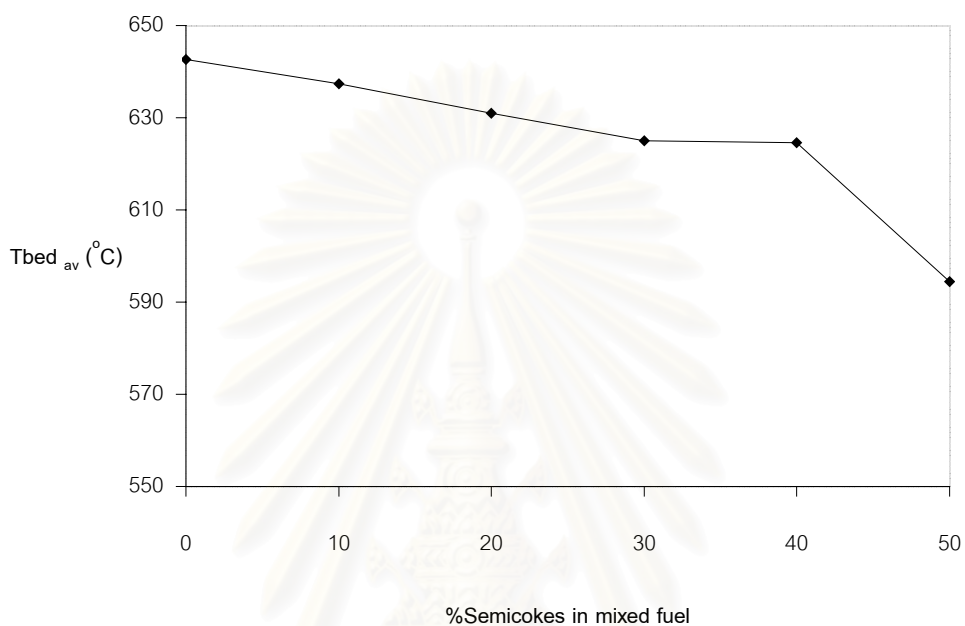


รูปที่ 6.38 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย เมื่ออัตราส่วนผสมของถ่านแกลบต่อแกลบ 40% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 6.39 แสดงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ความสูงต่างๆ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย เมื่ออัตราส่วนผสมของถ่านแกลบต่อแกลบ 50% โดยน้ำหนัก

Effect of Semicokes : Rice husks Ratio on average bed temperature



รูปที่ 6.40 แสดงอุณหภูมิเบดเฉลี่ยเมื่ออัตราส่วนผสมถ่านแกลบต่อแกลบเปลี่ยนไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 7

### อภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้จะอภิปรายผลการทดลองทั้ง 3 ส่วนคือ การเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด การไพโรไลซิสแกลบในห้องไพโรไลซิสแบบเบดหนึ่ง และการใช้ถ่านแกลบเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด

#### 7.1 ผลการทดลองการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด

ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่ศึกษาในการทดลองนี้ได้แก่ อัตราการป้อนแกลบ และปริมาณอากาศส่วนเกิน ผลของปัจจัยแต่ละตัวอธิบายได้ดังนี้

##### 7.1.1 อัตราการป้อนแกลบ

อัตราการป้อนแกลบในการทดลองนี้เท่ากับ 3.2 , 4.7 และ 6.4 kg/hr คิดเป็นอัตราการป้อนแกลบต่อพื้นที่หน้าตัดเตาเผาเท่ากับ 100 , 150 และ 200 kg/hr m<sup>2</sup>

จากผลการทดลอง อุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราการป้อนแกลบสูงจะสูงกว่าที่อัตราการป้อนแกลบต่ำ ซึ่งตรงกับความเป็นจริงเนื่องจากที่อัตราการป้อนแกลบสูงความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แกลบมีปริมาณมากกว่า ยกเว้นอุณหภูมิเบดที่มีค่าลดลงเมื่ออัตราการป้อนแกลบเพิ่มขึ้น สาเหตุหนึ่งอาจเป็นเพราะตำแหน่งการเกิดการเผาไหม้ของแกลบภายในเตาเผาส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณเหนือเบด (Freeboard combustion) อุณหภูมิเบดจะได้รับความร้อนบางส่วนจากการเผาไหม้และความร้อนจะถูกกักเก็บไว้ที่ทรายซึ่งเป็นวัสดุเบด เมื่ออัตราการป้อนแกลบสูงขึ้นปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะมากขึ้นด้วย ทำให้ปริมาณความร้อนที่พัดพาออกจากเบดในรูปของอากาศร้อนมีมากขึ้นและส่งผลให้อุณหภูมิเบดมีค่าลดลง

สิ่งที่ยืนยันว่าการเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณเหนือเบดก็คือ กราฟการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผา (รูปที่ 6.17 ถึง 6.19) จากกราฟพบว่าตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงที่สุดในทุกสภาวะการทดลองคือ ตำแหน่งที่สูงจากแผ่นกระจายลม 75 cm อธิบายได้ว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งอย่างเช่นแกลบซึ่งมีปริมาณสารระเหยสูง (ประมาณ 55% โดยน้ำหนัก) สารระเหย (Volatile matter) ที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็งจะถูกปล่อยออกมาและเกิดการเผาไหม้ก่อนส่วนที่เป็นคาร์บอนในเชื้อเพลิง สารระเหยเหล่านี้มีความหนาแน่นน้อยจึงผสมกับ

อากาศและเกิดการเผาไหม้ที่บริเวณเหนือเบต จึงเป็นผลให้อุณหภูมิบริเวณเหนือเบตเล็กน้อย สูงกว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งอื่นๆภายในเตาเผา

จากกราฟชุดเดียวกันนี้ จะสังเกตเห็นผลของอัตราการป้อนแกลบต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผา พบว่าที่อัตราการป้อนแกลบสูง การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดช่วงความสูงของเตาเผามากกว่าที่อัตราการป้อนแกลบต่ำ เพราะที่อัตราการป้อนแกลบสูงปริมาณอากาศที่ใช้มีค่ามาก ทำให้ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซไอเสียมีค่ามากไปด้วย อุณหภูมิภายในเตาเผาที่ตำแหน่งความสูงเหนือแผ่นกระจายลมหลายๆจุดจึงยังไม่ต่ำมากนัก การกระจายอุณหภูมิจึงค่อนข้างสม่ำเสมอ

### 7.1.2 ปริมาณอากาศส่วนเกิน

ปริมาณอากาศส่วนเกินเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้ เนื่องจากในทางปฏิบัติ อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี (Stoichiometric Air fuel ratio) ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์

ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 100 , 150 และ 200% ที่ทุกอัตราการป้อนแกลบ จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ทุกตำแหน่งมีค่าลดลงเมื่ออากาศส่วนเกินมากขึ้น สาเหตุเพราะเมื่ออากาศส่วนเกินมีค่ามากขึ้น ความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซไอเสียจะมีค่ามากขึ้นด้วยเช่นกัน

การพิจารณาสภาพของการเผาไหม้จริงที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาได้จากองค์ประกอบของก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่ง Stock ได้เสนอไว้ดังนี้

ก) ถ้าก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้มีแต่  $N_2$  ,  $CO_2$  ,  $H_2O$  และ  $SO_2$  ซึ่งให้เห็นว่าเป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

ข) การที่มีก๊าซ  $O_2$  .ในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ หมายถึงว่ามีปริมาณอากาศที่มากเกินไปในการเผาไหม้

ค) ปริมาณก๊าซ  $CO_2$  ที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ เปรียบเทียบกับปริมาณ  $CO_2$  ที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (Ultimate  $CO_2$ ) ของเชื้อเพลิง นั่นคือ ยิ่งมีค่า  $CO_2$  สูงก็แสดงว่ามีปริมาณอากาศที่มากเกินไป แต่ไม่จำเป็นว่าจะมีการเผาไหม้ที่ดี และการที่มี

CO<sub>2</sub> ต่ำจะชี้ให้เห็นว่า มีปริมาณอากาศมากเกินไป หรือเกิดการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงไม่ดีเท่าที่ควร

ง) ถ้าปรากฏว่ามี CO , H<sub>2</sub> หรือไฮโดรคาร์บอนในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์โดยที่

- ถ้าไม่มีปริมาณ O<sub>2</sub> เหลืออยู่ ก็แสดงว่าการเผาไหม้เกิดที่ปริมาณอากาศน้อยเกินไป
- แต่ถ้ามีทั้ง O<sub>2</sub> และ CO (หรือมี H<sub>2</sub> และไฮโดรคาร์บอน) เหลืออยู่ แสดงว่าเชื้อเพลิงและอากาศไม่ได้เกิดการผสมกันในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ (Combustion zone) หรืออาจจะเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิของการเผาไหม้ต่ำเกินไป และยังอาจเกิดจากเชื้อเพลิงไม่มีเวลาเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้

จากองค์ประกอบก๊าซไอเสียที่ได้จากการทดลองพบว่า ปริมาณ CO ที่วัดได้ไม่ค่อยสม่ำเสมอ เนื่องจากการเก็บตัวอย่างก๊าซไปวิเคราะห์องค์ประกอบทำได้ไม่ดีนัก แต่ยังคงเห็นแนวโน้มของปริมาณ CO เมื่ออากาศส่วนเกินเปลี่ยนไป คือ เมื่ออากาศส่วนเกินมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณ CO มีค่าลดลง เนื่องจากการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงทำได้ดีขึ้น การเผาไหม้จึงสมบูรณ์ขึ้น ส่วนปริมาณ O<sub>2</sub> มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้น ตรงกับความเป็นจริงเพราะเมื่อปริมาณอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้น ปริมาณ O<sub>2</sub> ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยายังคงเท่าเดิม ส่วนที่เหลือก็จะออกมาในก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น สุดท้ายคือปริมาณ CO<sub>2</sub> จะมีค่าลดลงเมื่ออากาศส่วนเกินมีค่าเพิ่มขึ้น ตรงกับข้อเสนอของ Strock ที่กล่าวไว้ข้างบน

ปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นในทุกสภาวะของการทดลองนี้มีค่าไม่เกิน 1% (โดยปริมาตร) เมื่อเทียบกับงานวิจัยของอภิชัย เทอดเทียนวงษ์ ที่ทำการทดลองเผาไหม้แก๊สในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดเช่นเดียวกัน พบว่าปริมาณ CO ที่ได้อยู่ในช่วง 1-1.5% ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 50-90% จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน และหากนำค่ามาวิเคราะห์ร่วมกันก็จะเห็นแนวโน้มปริมาณ CO ที่ลดลงเมื่ออากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

### 7.1.3 ความเร็วของการฟลูอิดไธซ์

สภาวะการทำงานโดยทั่วไปของเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดจะใช้ค่าความเร็วในการฟลูอิดไธซ์อยู่ในช่วง 2-5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการฟลูอิดไธซ์ ที่ความเร็วนี้จะทำให้เชื้อเพลิงสัมผัสกับวัสดุเบดได้ดี ช่วยพัดพาให้เถ้าที่เกิดขึ้นลอยออกมาจากเตาเผาพร้อมกับก๊าซไอเสียได้ดี และช่วยให้เบดมีลักษณะปั่นป่วน (Turbulent) ทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ดีขึ้น (รายละเอียดดูในบทที่ 4)

ค่าความเร็วของการฟลูอิดไอซ์ ( $U_f$ ) ที่ใช้ในการทดลองนี้อยู่ระหว่าง 0.87 – 2.62 เท่าของความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไอซ์ ( $U_{mf}$ ) ส่วนค่าที่ใช้ในการออกแบบเตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดคือ 3 เท่า ความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเนื่องจากค่าความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไอซ์ที่วัดได้จากการทดลองคลาดเคลื่อนจากค่าที่ใช้ในการออกแบบ ส่งผลให้ค่าความเร็วของการฟลูอิดไอซ์คลาดเคลื่อนตามไปด้วย

ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้ค่าความเร็วของการฟลูอิดไอซ์ที่ต่ำเกินไปเห็นได้ชัดเจนจากกราฟรูปที่ 6.5 ที่ความเร็วในการฟลูอิดไอซ์เท่ากับ 0.87 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการฟลูอิดไอซ์ ที่สภาวะนี้เตาเผาไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากเบดทรายยังไม่เกิดการฟลูอิดไอซ์ มีการสะสมของซีเถ้าภายในเบดและส่งผลให้เตาเผาดับในที่สุด ส่วนที่สภาวะการทดลองอื่นๆ ที่ค่าความเร็วของการฟลูอิดไอซ์อยู่ในช่วง 1.09-2.62 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการฟลูอิดไอซ์นั้นเตาเผาสามารถทำงานได้ตามปกติ

ปริมาณ CO ที่อยู่ในก๊าซไอเสียมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วฟลูอิดไอซ์เพิ่มขึ้น ส่วนหนึ่งเป็นเพราะความเร็วฟลูอิดไอซ์ที่เพิ่มขึ้นหมายถึงปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นด้วย (เหตุผลได้อธิบายไปในหัวข้อที่แล้ว) อีกสาเหตุหนึ่งอาจจะเป็นเพราะความเร็วฟลูอิดไอซ์เพิ่มขึ้นทำให้เชื้อเพลิงสัมผัสกับอากาศและเบดทรายได้ดีขึ้น เชื้อเพลิงที่เข้าสู่เตาเผาเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้อย่างรวดเร็ว และเถ้าที่เกิดขึ้นถูกพัดพาออกไปจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ดีขึ้น ส่งผลให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น ปริมาณ CO จึงลดลง

## 7.2 ผลการทดลองการไพโรไลซิสแกลบในห้องไพโรไลซิสแบบเบดหนึ่ง

ปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสที่ศึกษาในการทดลองนี้คือ อุณหภูมิของห้องเผาไหม้ และเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิส ผลของปัจจัยแต่ละตัวอธิบายได้ดังนี้

### 7.2.1 อุณหภูมิของห้องเผาไหม้

ตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 6 อุณหภูมิของห้องเผาไหม้ไม่ใช่ตัวแปรโดยตรงสำหรับปฏิกิริยาไพโรไลซิส ห้องเผาไหม้เป็นเพียงแหล่งความร้อนให้กับปฏิกิริยาไพโรไลซิสเท่านั้น แต่อุณหภูมิในห้องเผาไหม้มีความสัมพันธ์กับอัตราการให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยาและอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสซึ่งเป็นตัวแปรโดยตรง การปรับค่าอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิของปฏิกิริยาไพโรไลซิสในทางปฏิบัติทำได้ยาก ในการทดลองนี้จึงปรับอุณหภูมิห้องเผาไหม้แทน

อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสที่ได้จากการทดลองมีลักษณะเหมือนกันในทุกสภาวะการทดลอง อุณหภูมิในห้องเผาไหม้มีค่าค่อนข้างคงที่เนื่องจากเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัวขณะทำการทดลอง ส่วนอุณหภูมิในห้องไพโรไลซิสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 15-20 นาทีแรกของการทดลองเป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนจากห้องเผาไหม้สู่ห้องไพโรไลซิส หลังจากนั้นอุณหภูมิของห้องไพโรไลซิสจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ในการทดลองนี้เนื่องจากมีการควบคุมเวลาที่غلบอยู่ในห้องไพโรไลซิสไว้ไม่เกิน 90 นาที ยังไม่นานพอที่จะเห็นสภาวะคงตัวของอุณหภูมิภายในห้องไพโรไลซิส

อุณหภูมิเบดของห้องเผาไหม้ (ที่ปรับได้จากการปรับสภาวะควบคุมในห้องเผาไหม้) ในการทดลองนี้อยู่ที่ 740 , 775 และ 790°C จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิของห้องเผาไหม้ที่ปรับในการทดลองแทบจะไม่มีผลต่อองค์ประกอบของถ่านกลบที่ผลิตได้ จากกราฟที่ 6.28 สังเกตได้ว่าองค์ประกอบของถ่านกลบไม่ว่าจะเป็น C , H , O , N และ Ash มีค่าเกือบจะคงที่ แต่เนื่องจากอุณหภูมิห้องเผาไหม้ในการทดลองนี้ต่างกันไม่มากนัก ตรงนี้จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าแท้จริงแล้วอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบถ่านกลบ

เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านกลบที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทำให้ค่าความร้อนของถ่านกลบมีค่าไม่แตกต่างกันมากเมื่ออุณหภูมิของห้องเผาไหม้เปลี่ยนไป ค่าความร้อนของถ่านกลบที่ได้อยู่ในช่วงประมาณ 14.98-16.68 MJ/kg เมื่อเทียบกับกลบซึ่งมีค่าความร้อน 13.59 MJ/kg พบว่าค่าความร้อนของถ่านกลบมีค่ามากกว่า แต่เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของถ่านกลบซึ่งมีปริมาณต่ำกว่ากลบประมาณ 2 เท่า ทำให้การเผาไหม้ถ่านกลบทำได้ง่ายขึ้น (รายละเอียดของการเผาไหม้ถ่านกลบจะแสดงในหัวข้อต่อไป)

ปริมาณถ่านกลบที่ผลิตได้เมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้เปลี่ยนไปก็มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 4.7-5.1 kg จากปริมาณกลบที่ป้อนเข้าสู่ห้องไพโรไลซิส 18.0 kg โดยมีปริมาณกลบส่วนหนึ่งที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากห้องเผาไหม้ส่งผ่านมาไม่ถึงทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส

ในส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์อีกตัวหนึ่งซึ่งได้จากการบวนการไพโรไลซิส นั้น ผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงยังคงเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับกรณีถ่านกลบ คือเมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้เปลี่ยนไป แทบจะไม่เห็นความแตกต่างขององค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ เหตุผลคงเป็นเช่นเดียวกับในกรณีของถ่านกลบที่ว่าความแตกต่างของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่ปรับได้มีค่าน้อยเกินไป ทำให้ไม่สามารถสรุปผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้

อย่างไรก็ดี องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยก๊าซ CO และ CH<sub>4</sub> ทำให้ยืนยันได้ว่ากระบวนการไพโรไลซิสได้เกิดขึ้นจริง ค่าความร้อนของก๊าซที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 3.78-4.80 MJ/Nm<sup>3</sup> จากกราฟรูปที่ 6.33 ค่าความร้อนของก๊าซสูงสุดที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้เท่ากับ 775°C เหตุผลที่ค่าความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมินี้และลดลงในช่วงอุณหภูมิอื่นนั้นยังคงไม่ชัดเจนเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในห้องไพโรไลซิสนั้นซับซ้อนและในปัจจุบันก็ยังค้นหาข้อสรุปที่ชัดเจนเกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสไม่ได้

สรุปได้ว่าอุณหภูมิห้องเผาไหม้น่าจะมีผลต่อผลิตภัณฑ์ของกระบวนการไพโรไลซิสทั้งถ่านแกลบและก๊าซเชื้อเพลิง เพราะอุณหภูมิห้องเผาไหม้ส่งผลต่ออุณหภูมิของห้องไพโรไลซิสและอัตราการให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยา แต่ในการทดลองนี้การปรับสภาวะควบคุมในห้องเผาไหม้ยังให้ความแตกต่างของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ได้ไม่มากนัก จึงทำให้ไม่สามารถสรุปผลกระทบที่ว่ามันได้อย่างชัดเจน

## 7.2.2 เวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิส

การปรับเปลี่ยนเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิสทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาของแกลบในห้องไพโรไลซิสต่างกัน เวลาที่ยาวนานขึ้นจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากห้องเผาไหม้สู่ห้องไพโรไลซิสนานขึ้นด้วย ในการทดลองนี้ปรับค่าเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิสทั้งหมด 3 ค่าคือ 30 , 60 และ 90 นาที ผลของเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิสที่มีต่อผลิตภัณฑ์เป็นดังนี้

อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้และห้องไพโรไลซิสมีลักษณะเหมือนเดิมเมื่อเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิสเปลี่ยนไป แต่ที่เวลา 90 นาทีจะเห็นแนวโน้มสภาวะคงตัวของอุณหภูมิในห้องไพโรไลซิสได้ชัดเจนกว่าที่เวลา 30 นาที อุณหภูมิสูงสุดในห้องไพโรไลซิสสูงสุดที่ประมาณ 600°C

องค์ประกอบของถ่านแกลบเมื่อเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิสเปลี่ยนไปมีความแตกต่างกันอยู่บ้าง ปริมาณ C ในถ่านแกลบมีแนวโน้มลดลงที่เวลาในห้องไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น เพราะในห้องไพโรไลซิสยังคงมีอากาศหลงเหลืออยู่บ้าง O<sub>2</sub> ในอากาศจะทำปฏิกิริยากับแกลบได้นานขึ้น ปริมาณ C ในถ่านแกลบจึงมีค่าลดลง ในขณะที่เดียวกันปริมาณเถ้าก็มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในห้องไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นด้วยเหตุผลเดียวกันนี้เอง ส่วนปริมาณ H ในถ่านแกลบมีค่าลดลงเมื่อเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ปริมาณ H ที่อยู่ในแกลบจะเปลี่ยนเป็นก๊าซเชื้อเพลิงได้มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณ H ในถ่านแกลบที่ได้น้อยลง

ค่าความร้อนของถ่านแกลบเมื่อเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิสเปลี่ยนไปจะมีความแตกต่างกันพอสมควร เวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิส 60 นาทีจะให้ค่าความร้อนของถ่านแกลบสูงที่สุด ที่เวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิส 30 นาทีนั้น ปฏิริยาไพโรไลซิสยังเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ส่วนที่เวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิส 90 นาทีนั้น ปฏิริยาไพโรไลซิสได้เสร็จสิ้นไปแล้ว (สังเกตได้จากการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงสิ้นสุดลงที่เวลาประมาณ 45-50 นาที) การให้ความร้อนต่อไปแก่ถ่านแกลบจะเป็นการไปลดปริมาณ C ในถ่านแกลบและทำให้ค่าความร้อนลดลง

ปริมาณถ่านแกลบที่ผลิตได้เมื่อเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิสเปลี่ยนไปมีแนวโน้มลดลงที่ชัดเจน เนื่องจากแกลบในห้องไพโรไลซิสมีเวลาเปลี่ยนแปลงกลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิงได้มากขึ้น อีกทั้งแกลบบางส่วนเมื่อมีเวลานานขึ้นก็จะมีโอกาสทำปฏิริยากับ  $O_2$  ที่มีอยู่บ้างในห้องไพโรไลซิสได้เพิ่มขึ้น ทำให้ถ่านแกลบบางส่วนกลายเป็นเถ้าไปในที่สุด

ในส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงนั้น เวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิสส่งผลต่อองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงไม่ชัดเจนนัก ที่เห็นได้ชัดที่สุดคือปริมาณ CO ซึ่งเกิดขึ้นมากที่สุดที่เวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิส 60 นาที ส่วน  $CH_4$  มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิสมากขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วยปฏิริยาที่ซับซ้อนดังที่กล่าวไว้แล้ว จึงยังสรุปสาเหตุของผลดังกล่าวได้ไม่ชัดเจน

ส่วนค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น เพราะปริมาณ  $CH_4$  ที่มีค่าความร้อนสูงที่สุดในบรรดาองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลงนั่นเอง

สรุปได้ว่าเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิสมีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ทั้งถ่านแกลบและก๊าซเชื้อเพลิง แต่การอภิปรายผลทำได้อย่างจำกัดเนื่องจากปฏิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสนั้นซับซ้อนมาก แม้ในปัจจุบันก็ยังคงหาข้อสรุปที่ตรงกันในเรื่องนี้ไม่ได้ อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งถ่านแกลบและก๊าซเชื้อเพลิงได้ยืนยันการเกิดขึ้นของกระบวนการไพโรไลซิสว่ามีอยู่จริง และวัตถุประสงค์หลักของการทดลองในส่วนนี้คือการผลิตถ่านแกลบเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดก็ได้บรรลุตามความต้องการ

### 7.3 ผลการทดลองการใช้ถ่านแกลบเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไธด์เบด

ลักษณะของการเผาไหม้ทั้งในช่วงการ Start up และในสภาวะคงตัวของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านแกลบและแกลบเป็นวัตถุประสงค์หลักของการทดลองในส่วนนี้

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงตามลักษณะของการเผาไหม้ที่สังเกตได้จากการทดลองคือ ที่ปริมาณถ่านแกลบตั้งแต่ 10-40% ปริมาณถ่านแกลบ 50% และปริมาณถ่านแกลบสูงกว่า 50%

ก่อนทำการทดลองจริงได้ลอง Start up เตาเผาโดยใช้แกลบ เมื่ออุณหภูมิเบดอยู่ที่ประมาณ  $650^{\circ}\text{C}$  แล้วทดลองป้อนเชื้อเพลิงผสมที่เปอร์เซ็นต์ถ่านแกลบต่างๆ ลงไปเพื่อดูลักษณะของการเผาไหม้ พบว่าที่อุณหภูมินี้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมทำได้ถึงเปอร์เซ็นต์ถ่านแกลบ 80% โดยที่เปอร์เซ็นต์ถ่านแกลบ 80% นี้ เปลวไฟเริ่มขาดหายเป็นช่วงๆ แต่ยังคงลุกไหม้ได้ แต่ถ้าเพิ่มปริมาณถ่านแกลบในเชื้อเพลิงผสมเป็น 90% เปลวไฟจะขาดหายไปเป็นเวลานานแต่ยังคงมีอยู่บ้างนานๆครั้ง และถ้าเพิ่มปริมาณถ่านแกลบเป็น 100% สังเกตพบว่าไม่มีเปลวไฟลุกติดเลย

เมื่อเริ่มการทดลองจริง ในส่วนของการ Start up ที่ปริมาณถ่านแกลบในเชื้อเพลิงผสมไม่เกิน 40% (โดยน้ำหนัก) นั้นเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว การลุกติดไฟของเชื้อเพลิงผสมไม่แตกต่างจากการเผาไหม้ของแกลบอย่างเดียว (ที่ 0% ของถ่านแกลบ) อุณหภูมิเบดของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย (ประมาณ  $15-20^{\circ}\text{C}$ ) เมื่อปริมาณถ่านแกลบในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้น สาเหตุเพราะการเผาไหม้ของถ่านแกลบเกิดขึ้นได้ยากกว่าการเผาไหม้แกลบ เมื่อมีปริมาณถ่านแกลบเพิ่มขึ้น อุณหภูมิเบดที่ได้จึงลดลง

เมื่อปริมาณถ่านแกลบในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้นเป็น 50% การ Start up เริ่มมีปัญหา อุณหภูมิเบดไม่เพิ่มขึ้นในทันทีแต่จะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ สังเกตเปลวไฟยังคงมีอยู่แต่นานๆ จึงจะติดซักครั้ง เมื่อปล่อยให้เตาเผาทำงานไปเรื่อยๆประมาณ 30 นาที อุณหภูมิเบดจะเพิ่มขึ้นจาก  $550^{\circ}\text{C}$  ไปถึง  $670^{\circ}\text{C}$  โดยที่ในระหว่างนี้เปลวไฟยังคงติดๆดับๆ เมื่ออุณหภูมิเบดถึง  $670^{\circ}\text{C}$  การลุกติดไฟจะต่อเนื่องขึ้น แต่หลังจากนั้นอุณหภูมิเบดจะเริ่มลดลงแต่เตาเผา ยังคงลุกติดไฟต่อไปได้จนเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว อุณหภูมิเบดที่ได้มีค่าต่ำกว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมที่ปริมาณถ่านแกลบ 40%

สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อธิบายได้ว่าองค์ประกอบของถ่านแกลบซึ่งมี C และถ้าเป็นองค์ประกอบหลักนั้นมีปริมาณสารระเหยต่ำ การลุกติดไฟของเชื้อเพลิงแข็งส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการเผาไหม้ของส่วนที่เป็นสารระเหยซึ่งจะถูกปล่อยออกมาในขณะที่อุณหภูมิการเผาไหม้อยู่ที่ประมาณ  $200-300^{\circ}\text{C}$  ส่วนที่เหลือได้แก่ C นั้นจะเผาไหม้ที่อุณหภูมิที่สูงกว่าอยู่ที่ประมาณ  $500-600^{\circ}\text{C}$  เชื้อเพลิงผสมที่ปริมาณถ่านแกลบ 50% อัตราส่วนของถ่านแกลบที่มีมากขึ้นทำให้สารระเหยในเชื้อเพลิงผสมมีน้อยลง การลุกติดไฟจึงที่อุณหภูมิต่ำๆจึงเริ่มขาดหายไป และส่วน



ที่เป็น C ในเชื้อเพลิงผสมจะสะสมตัวอยู่ในเบตและให้ความร้อนแก่เบตไปเรื่อยๆ อุณหภูมิของเบตจึงเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิเบตสูงเพียงพอต่อการลุกไหม้ของเชื้อเพลิงผสมแล้ว เตาเผาจึงทำงานต่อไปได้ ส่วนที่สภาวะคงตัวของการเผาไหม้นั้น โดยลักษณะของเชื้อเพลิงผสมที่มีปริมาณถ่านแกลบมากขึ้นทำให้มีปริมาณถ่านมากขึ้นด้วย อุณหภูมิเบตที่สภาวะคงตัวจึงมีแนวโน้มลดลง

เมื่อปริมาณถ่านแกลบในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้นเป็น 60% ลักษณะการ Start up เหมือนที่เชื้อเพลิงผสมที่ปริมาณถ่านแกลบ 50% คือ จำเป็นต้องให้เบตสะสมอุณหภูมิจาก  $550^{\circ}\text{C}$  ขึ้นไปจนถึงประมาณ  $680^{\circ}\text{C}$  แล้วการลุกติดไฟจึงจะเริ่มเกิดขึ้น แต่เมื่อปล่อยให้เตาเผาทำงานต่อไป อุณหภูมิเบตไม่สามารถคงอยู่ได้และดับในที่สุด สาเหตุน่าจะเป็นเพราะว่าปริมาณถ่านที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมที่อัตรานี้มีมากเกินไปที่เตาเผาฟลูอิดเบตจะทำงานได้

ในที่นี้พอจะสรุปลักษณะการเผาไหม้ของถ่านแกลบได้ดังนี้

ก) ถ่านแกลบไม่สามารถลุกติดไฟได้ แต่มีส่วนที่เป็นคาร์บอนซึ่งมีค่าความร้อนอยู่เมื่อนำไปเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดเบต จะสามารถคงอุณหภูมิเบตเอาไว้ได้แต่ไม่มีเปลวไฟลุกติด

ข) การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมเกิดขึ้นอย่างแยกส่วน ส่วนที่เป็นแกลบจะทำให้เกิดเปลวไฟ ส่วนที่เป็นถ่านแกลบซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าแกลบจะตกลงในเบตเป็นส่วนใหญ่และทำหน้าที่เพิ่มความร้อนให้กับเบต

ค) การจะใช้งานเชื้อเพลิงผสมที่เปอร์เซ็นต์สูงๆ (ตั้งแต่ 50% ขึ้นไป) จำเป็นต้องทำให้อุณหภูมิเบตสูงเสียก่อนป้อนเชื้อเพลิงผสม (ประมาณ  $650^{\circ}\text{C}$ ) ต้องคำนึงถึงการกำจัดเถ้าที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากให้ออกจากบริเวณเผาไหม้ให้ทัน และไม่สามารถใช้งานเชื้อเพลิงผสมเหล่านี้ในการ Start up เตาเผาที่อุณหภูมิการ Start up ของแกลบได้

#### 7.4 ปัญหาที่เกิดขึ้นในเตาเผาฟลูอิดเบตที่สร้างขึ้น

จากการทดลองการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดเบตและการไฟโรไลซิสแกลบในห้องเผาไหม้แบบเบตนิ่งในเตาเผาที่สร้างขึ้นทำให้ได้รับรู้ปัญหาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ได้รวบรวมไว้ตรงนี้เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับงานวิจัยต่อไป

#### 7.4.1 เปรียบเทียบผลการออกแบบกับสภาวะการทำงานจริงของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด

ก) ในการออกแบบสร้างเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดค่าความเร็วในการฟลูอิดไคซ์ที่ใช้คือ 3 เท่าของความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไคซ์ และปริมาณอากาศส่วนเกิน 100% แต่จากการทดลองจริงค่าความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไคซ์มากกว่าค่าที่คำนวณได้ ทำให้ความเร็วในการฟลูอิดไคซ์ในการทดลองจริงทำได้อยู่ในช่วง 0.87-2.62 เท่าของความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไคซ์ ผลกระทบที่เกิดขึ้นคือการที่เบดเกิดการฟลูอิดไคซ์ได้น้อยลง การสัมผัสกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศและเชื้อเพลิงกับเบดทำได้น้อยลง แต่เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดยังคงทำงานได้อย่างไม่มีปัญหา ส่วนปริมาณอากาศส่วนเกินที่สภาวะการทดลองอยู่ที่ 100-200% เนื่องจากที่อากาศส่วนเกิน 100% ปริมาณ CO ที่ได้ยังคงมากอยู่ (ประมาณ 1.0% โดยปริมาตร) จึงทำการเพิ่มอากาศส่วนเกินและปริมาณ CO ที่อยู่ในก๊าซไอเสียก็ลดลงจริง (ประมาณ 0.3-0.6% โดยปริมาตร)

ข) ในการออกแบบสร้างชุดป้อนแกลบแบบสกรู ค่าการป้อนเชื้อเพลิงในการออกแบบเท่ากับ 5.0 kg/hr อัตราการป้อนแกลบที่ใช้จริงในการทดลองอยู่ในช่วง 3.2-6.4 kg/hr จากการทดลองพบว่าที่อัตราการป้อนแกลบ 6.4 kg/hr จะพบปัญหาการไหลของก๊าซในบริเวณการเผาไหม้ออกมาทางชุดป้อนแกลบแบบสกรูเป็นจำนวนมาก และผนังเตาเผาที่เป็นเหล็กเกิดร้อนแดงขึ้น หากเพิ่มอัตราการป้อนแกลบอีกอาจทำให้ผนังเตาเสียหายได้

ค) ในการออกแบบห้องไฟโรไลซิส ค่าปริมาณแกลบใน 1 แบทซ์การทดลองเท่ากับ 18 kg และเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไฟโรไลซิสเท่ากับ 30 นาที สภาวะที่ทำการทดลองจริงค่าปริมาณแกลบใน 1 แบทซ์การทดลองคือ 18.0 kg และเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไฟโรไลซิสคือ 30 , 60 และ 90 นาที เวลาที่แกลบอยู่ในห้องไฟโรไลซิสที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากต้องการศึกษาผลของมันที่มีต่อผลิตภัณฑ์ของกระบวนการ

#### 7.4.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำงานของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด

ก) ปัญหาการอุดตันของแกลบในชุดป้อนแกลบแบบสกรูบริเวณส่วนต่อระหว่างท่อป้อนกับ Hopper การลดลงอย่างกะทันหันของพื้นที่หน้าตัดทำให้แกลบเกิดการอัดตัวและปิดกั้นการป้อนเชื้อเพลิงในรอบการหมุนของสกรูรอบต่อไป ในการทดลองจำเป็นต้องหมั่นคอยดูและแก้ไขการอุดตันที่เกิดขึ้นทำให้เสียเวลาและแรงงานมาก

ข) ปัญหาการจับตัวกันของแกลบและเกิดเป็นช่องว่างขึ้นใน Hopper ทำให้แกลบไม่ไหลจาก Hopper ลงไปบริเวณที่เป็นเกลียวสกรู ในการทดลองจำเป็นต้องหมั่นคอยกระทิ้งแกลบเหล่านี้ให้ช่องว่างที่เกิดขึ้นหายไป

ค) เกิดการเสียรูปของผนังเตาเล็กน้อยอันเนื่องมาจากความเครียดที่เกิดจากความร้อน (Thermal stress) ปกติในการสร้างเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดจำเป็นต้องมีแนวฉนวนกันความร้อน (Refractory lining) เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับผนังเตา แต่ในการทดลองนี้อาศัยการถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้ผ่านผนังเตาไปยังห้องไฟโรไลซิส การสร้างแนวฉนวนจะไปขัดขวางการถ่ายเทความร้อนได้ วิธีแก้ไขในงานวิจัยต่อไปอาจจะต้องหารูปแบบการถ่ายเทความร้อนแก่กระบวนการไฟโรไลซิสแบบใหม่เช่น การให้ความร้อนโดยใช้ก๊าซไอเสีย หรือการให้ความร้อนโดยการถ่ายเทวัสดุเบดร้อน

ง) ปัญหาการไหลของก๊าซจากการเผาไหม้ออกมาทางชุดป้อนแกลบแบบสกรูอันเนื่องมาจากความดันภายในเตาเผาบริเวณจุดป้อนเชื้อเพลิงมีค่ามากกว่าความดันบรรยากาศ วิธีแก้ไขอาจทำได้โดยเพิ่มระบบลม (Pneumatic conveying) สำหรับช่วยป้อนแกลบเข้าสู่เตาเผา ซึ่งจะสามารถปรับความดันของลมที่เหมาะสมที่ไม่ทำให้ก๊าซไอเสียไหลออกมาได้

จ) ปัญหาการนำถ่านแกลบออกจากห้องไฟโรไลซิส เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของห้องไฟโรไลซิสมีขนาดเล็ก ทำให้การไหลลงของถ่านแกลบจากด้านบนของเตาเผาสู่ช่องโกยถ่านแกลบด้านล่างจำเป็นต้องมีการช่วยกระทิ้ง วิธีแก้ไขอาจทำได้โดยออกแบบห้องไฟโรไลซิสให้ทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous) เช่น อาจมีชุด Screw feeder ที่ด้านล่างของห้องไฟโรไลซิสเพื่อนำถ่านแกลบออก

## บทที่ 8

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 8.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบหลักได้แก่ CO และ CH<sub>4</sub> จากแกลบและถ่านแกลบโดยกระบวนการไพโรไลซิส แหล่งความร้อนที่ป้อนให้กับกระบวนการได้มาจากการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดและถ่ายเทความร้อนผ่านผนังห้องเผาไหม้เข้าสู่ห้องไพโรไลซิส การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆคือ การเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไธด์เบด การไพโรไลซิสแกลบในห้องไพโรไลซิสแบบเบดนิ่ง และการใช้ถ่านแกลบเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไธด์เบด ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังต่อไปนี้

สภาวะการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดในงานวิจัยนี้ ศึกษาตัวแปรหลัก 3 ตัวคือ อัตราการป้อนแกลบ ความเร็วในการฟลูอิดไธด์ และปริมาณอากาศส่วนเกิน ทั้ง 3 ตัวแปรถูกกำหนดให้เป็นสภาวะควบคุมในการทดลอง สภาวะการเผาไหม้ที่ให้อุณหภูมิเบดสูงที่สุดคือที่อัตราป้อนแกลบ 4.7 kg/hr และอากาศส่วนเกิน 100% (หรือคิดเป็นความเร็วในการฟลูอิดไธด์เท่ากับ 1.29 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการฟลูอิดไธด์) อุณหภูมิเบดที่ได้อยู่ที่ 680°C ก๊าซไอเสียประกอบด้วย O<sub>2</sub> 14.25% , CO<sub>2</sub> 8.15% และ CO 0.72%

การปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนแกลบส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในเตาเผา ที่อัตราการผลิตสูงขึ้น อุณหภูมิภายในเตาเผาสูงขึ้นด้วยเพราะปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงมีค่ามากขึ้น ส่วนการปรับปริมาณอากาศส่วนเกินและความเร็วในการฟลูอิดไธด์มีความเกี่ยวเนื่องกัน เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน ความเร็วในการฟลูอิดไธด์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เพราะพื้นที่หน้าตัดของเตาเผาที่มีค่าคงที่ ผลของการเพิ่มอากาศส่วนเกินจะทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาลดลงเนื่องจากความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซไอเสียมากขึ้น แต่ทำให้ปริมาณ CO ในก๊าซไอเสียมีค่าลดลง ผลของการเพิ่มความเร็วในการฟลูอิดไธด์จะทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดความสูงของเตาเผามีค่าสม่ำเสมอมากขึ้น

สภาวะการไพโรไลซิสแกลบในห้องไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งในการทดลองนี้ศึกษาตัวแปร 2 ตัวคือ อุณหภูมิเบดในห้องเผาไหม้ (เป็นตัวแทนของอุณหภูมิในห้องไพโรไลซิส) และเวลาที่แกลบอยู่ในห้องไพโรไลซิส ผลของการปรับตัวแปรทั้งสองต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ทั้งถ่านแกลบและก๊าซเชื้อเพลิงไม่ชัดเจน ถ่านแกลบและก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีองค์ประกอบไม่แตกต่างกันมากนักในทุกสภาวะการทดลอง องค์ประกอบหลักของถ่านแกลบที่ได้คือคาร์บอน (ประมาณ 50%

โดยน้ำหนัก)และถ้ำ (ประมาณ 40% โดยน้ำหนัก) ส่วนองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงคือก๊าซ CO อยู่ในช่วง 13-20% (โดยปริมาตร) และ CH<sub>4</sub> อยู่ในช่วง 6-8% (โดยปริมาตร) โดยที่ก๊าซ H<sub>2</sub> ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากประมาณ 1% (โดยปริมาตร) ค่าความร้อนของถ่านแกลบสูงสุดที่ผลิตได้เท่ากับ 16.68 MJ/kg มากกว่าค่าความร้อนของแกลบที่เท่ากับ 13.59 MJ/kg ส่วนค่าความร้อนสูงสุดของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตเท่ากับ 4.80 MJ/Nm<sup>3</sup>

สภาวะในการนำถ่านแกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดเป็นส่วนสุดท้ายที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านแกลบมีถ้ำสูงถึงประมาณ 40 % (โดยน้ำหนัก) ทำให้การเผาไหม้ถ่านแกลบอย่างเดียวยากทำได้ยาก ในการทดลองได้ผสมถ่านแกลบกับแกลบเข้าด้วยกันเรียกว่า เชื้อเพลิงผสม และพบว่าที่อัตราส่วนผสมถ่านแกลบไม่เกิน 40% (โดยน้ำหนัก) การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมเป็นไปได้อย่างรวดเร็วทั้งการ Start up เตาเผา และการเผาไหม้ในสภาวะคงตัว ที่อัตราส่วนผสมถ่านแกลบ 50% เป็นจุดเริ่มมีปัญหาในการ Start up และเป็นอัตราส่วนผสมสูงที่สุดที่ทำให้เตาเผาฟลูอิดไธด์เบดในการทดลองนี้ยังคงสามารถทำงานได้ และผลของปริมาณถ่านแกลบที่เพิ่มขึ้นในเชื้อเพลิงผสมจะทำให้อุณหภูมิเบดลดลง

โดยสรุปงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นการนำแกลบมาใช้งานในรูปพลังงานทดแทนในรูปแบบหนึ่ง ถ่านแกลบและก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิง ถ่านแกลบสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงป้อนกลับเข้าสู่เตาเผาฟลูอิดไธด์เบด ในขณะที่ก๊าซเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงและมีคุณค่าทางความร้อน ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสำหรับงานวิจัยต่อเนื่องด้านการไฟโรไลซิสแกลบต่อไป

## 8.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากแกลบและถ่านแกลบ โดยกระบวนการไพโรไลซิสที่มีแหล่งความร้อนจากเตาเผาฟลูอิดไธด์เบด แนวทางที่ควรศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้องค์ความรู้ในงานวิจัยเรื่องนี้ขยายออกไปได้แก่

ก) ทำการวัดปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้ที่ส่งผ่านไปยังกระบวนการไพโรไลซิส หากมีข้อมูลในส่วนนี้จะสามารถทำสมดุลพลังงานของกระบวนการไพโรไลซิสรวมถึงสามารถหาประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของกระบวนการได้

ข) พัฒนาการป้อนเชื้อเพลิงในห้องไพโรไลซิสให้เป็นแบบต่อเนื่อง ศึกษาวิธีการป้อนถ่านแกลบกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดให้ได้อย่างต่อเนื่อง รวมถึงหาประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบ

ค) ศึกษารูปแบบการให้ความร้อนแก่กระบวนการไพโรไลซิสในแบบอื่นๆ เช่น การให้ความร้อนโดยการถ่ายเทวัสดุเบตจากห้องเผาไหม้ไปยังห้องไพโรไลซิส หรือการให้ความร้อนผ่านก๊าซไอเสียที่ได้จากห้องเผาไหม้ไปยังห้องไพโรไลซิส แล้วเปรียบเทียบกับลักษณะการให้ความร้อนในงานวิจัยนี้

ง) ศึกษาการออกแบบเตาเผาให้สามารถใช้งานถ่านแกลบได้ดีขึ้น รวมถึงอาจศึกษาการเผาไหม้ถ่านแกลบเมื่อมีการอัดเป็นแท่งเทียบกับการเผาไหม้ถ่านไม้

จ) ศึกษากระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซเชื้อเพลิง เช่น ระบบแยกไอน้ำและน้ำมันทาร์ออกจากก๊าซเชื้อเพลิง รวมถึงการนำก๊าซเชื้อเพลิงไปใช้งานในหม้อไอน้ำหรือเครื่องยนต์สันดาปภายใน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. Wu Weizhang. Fluidized bed combustion of rice husk for energy and pozzolana. Thesis for the degree of Master of Engineering Asian Institute of Technology, 1987.
2. อติพันธ์ เหล่าวงศ์สิน. การพัฒนาเตาต้นแบบสำหรับการเผาไหม้แกลบแบบฟลูอิดไคซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
3. อภิชัย เทอดเทียนวงษ์. เตาเผาไหม้ชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2528.
4. สิทธิศักดิ์ อุปริวงษ์. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ของเตาไพโรไลซิสแบบไหลขึ้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
5. สุกิจ วชิรชูเดช. การผลิตก๊าซที่มีโอเลฟินเป็นองค์ประกอบจากชีวมวลโดยการไพโรไลซิสแกสซิฟิเคชันแบบเร็วด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เซชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2537.
6. Atul Sharma and T.Rajeswara Rao. Analysis of an annular finned pyrolyser. Energy conversion 10 (1998) : 985-997.
7. Mengxiang F., Chunjiang Y., Zhongyang L., Guanyi C. and Kefa C. Study of biomass gasification and combustion. Hangzhou, 1997.
8. C.Y.Wen and S.Dutta. Rates of Coal Pyrolysis and Gasification Reactions. Coal Conversion Technology. (1979) : 57-90.
9. Ronald F.Probstein and R.Edwin Flicks. Synthetic fuel. New York : McGraw-Hill, 1982.

10. จิรวุฒิ จิตตโสภณ. การออกแบบหม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
11. Daizo Kunii and Octave Levenspiel. Fluidization Engineering. Huntington, New York : R.E.Krieger Pub.,1977.
12. Prabir Basu and Scott A.Fraser. Circulating fluidized bed boilers : design and operation.Stoneham : Butterworth-Heinemann, 1991.
13. เสรีย์ ตู้ประกาย. การศึกษาและออกแบบเตาเผาจากตะกอนแบบฟลูอิดไต์เชด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.
14. สุทิน อินยาศรี และ จอมใจ ศิริพร. การเผาไหม้ชีวมวลโดยเตาเผาฟลูอิดไต์เชด. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2526.





**ภาคผนวก**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### การหาคุณสมบัติของเบดและเกลบ

#### ก.1 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของเบด

ในการทดลองนี้ วัสดุเบดที่ใช้คือทรายที่ผ่านการคัดแยกขนาดโดยผ่านตะแกรงร่อนทรายตามมาตรฐาน ASTM ขนาดของทรายที่ใช้คือ Mesh -30+50 (อยู่ในช่วง 300 ถึง 600 ไมครอน) ขนาดเฉลี่ยของทรายที่ใช้ในการออกแบบเท่ากับ 450 ไมครอน

การหาค่าสัดส่วนช่องว่าง ( $\epsilon_m$ ) ของทรายทำได้โดยการบรรจุทรายอย่างไม่เป็นระเบียบ (Random) ลงในกระบอกตวง บันทึกค่าปริมาตรของทรายที่บรรจุลงไป จากนั้นเติมสารนอร์มอลเฮกเซน (n-Hexane) ความเข้มข้น 99% โดยปริมาตร ที่ทราบปริมาตรแน่นอนลงไปผสมกับทราย บันทึกปริมาตรหลังการผสมไว้ นำไปหาค่าสัดส่วนช่องว่างตามสมการ

$$\epsilon_m = \frac{V_v + V_h - V_n}{V_v}$$

เมื่อ  $V_v$  = ปริมาตรของทราย + ช่องว่าง = 24 ml  
 $V_h$  = ปริมาตรของนอร์มอลเฮกเซนก่อนผสม = 12 ml  
 $V_n$  = ปริมาตรของทราย + ช่องว่างผสมกับนอร์มอลเฮกเซน = 26 ml

แทนค่าจะได้

$$\epsilon_m = \frac{24 + 12 - 26}{24} = 0.42$$

การหาค่าความกลม ( $\phi_s$ ) ทำได้โดยนำค่าสัดส่วนช่องว่างที่ได้จากการทดลองข้างบนไปเปิดตารางของ Kunii & Levenspiel (รูปที่ 4.5) เลือกใช้เส้น Normal packing

$$\phi_s = 0.85$$

การหาค่าความหนาแน่นของทราย ทำได้โดยนำทรายปริมาณหนึ่งมาชั่งน้ำหนักและวัดปริมาตร จากนั้นบรรจุทรายลงในกระบอกตวง เติมน้ำที่ทราบปริมาตรลงไปให้ผสมกับทรายให้

ทวม บันทักปริมาตรน้ำหลังการผสม หาผลต่างของปริมาตร นำไปหาค่าความหนาแน่นตามสมการ

$$\rho_s = \frac{M}{V}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } M &= \text{น้ำหนักของทราย} = 16.2659 \text{ g} \\ V &= \text{ผลต่างของปริมาตรน้ำเมื่อเริ่มต้นและสุดท้าย} = 8 \text{ ml} \end{aligned}$$

แทนค่าจะได้

$$\rho_s = \frac{16.2659 \times 10^{-3}}{8 \times 10^{-6}} = 2033.24 \text{ kg / m}^3$$

## ก.2 การหาคุณสมบัติทางเคมีของแกลบ

การวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของแกลบในการทดลองนี้ได้แก่ การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) การวิเคราะห์โดยละเอียด (Ultimate analysis) และการวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Heating value) การวิเคราะห์ทั้งหมดทำโดยส่งตัวอย่างแกลบไปตรวจสอบที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ผลของการวิเคราะห์แสดงอยู่ในรูปที่ ก.1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ที่ ว 0504/ 19582

ถึง นายภูสิษฐ อิศระญาณพงศ์

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ วัตถุตัวอย่าง ตาม คำร้อง  
ลงวันที่ 22 พฤศจิกายน 2542 เลขรับ 5731 วันที่ 22 พฤศจิกายน 2542  
ซึ่งกรมวิทยาศาสตร์ฯ ได้รับเมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน 2542

กอง เคมี

โทร. 2461387-95 ต่อ 265



### รายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง เครื่องหมาย หมายเลข  
ตรา ฯลฯ

ตามที่อยู่ส่งเรียก ที่ระบุตัวอย่างปฏิบัติการ

แกลบ	-	UL.91	1. Moisture,%	8.5
			2. Ash,%	17.6
			3. Volatile matter,%	55.2
			4. Fixed carbon,%	18.7
			5. Carbon,%	36.0
			6. Hydrogen,%	5.0
			7. Nitrogen,%	0.31
			8. Sulphur,%	0.05
			9. Oxygen,%	41.0
			10. Gross heat of combustion,cal/g	3502
			11. Net heat of combustion, cal/g	3245

- หมายเหตุ 1. วัสดุของตัวอย่างตามที่ได้รับเป็นเกณฑ์สำหรับการคำนวณผลการวิเคราะห์นี้  
2. รายการที่ 1-4,7-9 วิเคราะห์ตาม ASTM D3173,3174,3175,3172,3179,3177,3176  
ตามลำดับ รายการที่ 10-11 วิเคราะห์ตาม ASTM D1989 รายการที่ 5-6 วิเคราะห์ด้วย  
เครื่อง CHN analyzer

(นางสาวสวรรรยา เชื้อพันธุ์)  
นักวิทยาศาสตร์ 5

รายงานนี้ : - รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ เท่านั้น  
- ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง

12/2540

รูปที่ ก.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแกลบที่ใช้ในการทดลองนี้แบบ  
Proximate และ Ultimate

## ภาคผนวก ข

### การออกแบบเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดและห้องไพโรไลซิสแบบเบดหนึ่ง

#### ข.1 การออกแบบเตาเผาฟลูอิดไชน์เบด

##### ข.1.1 คุณสมบัติทราย อากาศ และแกลบ

ขนาดทรายที่ใช้อยู่ในช่วง 30-50 Mesh หรือ 300-600 ไมครอน

ค่าสัดส่วนช่องว่าง ( $\epsilon_m$ ) = 0.42 (จากการทดลอง)

ค่าความกลม ( $\phi_s$ ) = 0.85 (จากกราฟ)

ค่าความหนาแน่น ( $\rho_s$ ) = 2033.24 kg/m<sup>3</sup> (จากการทดลอง)

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $d_p$ ) = 450 ไมครอน

อากาศก่อนเข้าสู่เตาเผา

อุณหภูมิ ( $T_g$ ) = 35 °C

ค่าความหนาแน่น ( $\rho_g$ ) = 1.2 kg/m<sup>3</sup>

ค่าความหนืด ( $\mu_g$ ) = 0.000018 kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>

องค์ประกอบของแกลบจากการวิเคราะห์องค์ประกอบอย่างละเอียด (Ultimate Analysis)

C = 36.0 %

H = 5.0 %

N = 0.31 %

S = 0.05 %

O = 41.0 %

ค่าความร้อนของการเผาไหม้สูง (HHV) = 3502 Cal/g

ค่าความร้อนของการเผาไหม้ต่ำ (LHV) = 3245 Cal/g

ค่าความหนาแน่น (Bulk Density) = 100 kg/m<sup>3</sup> (จากการทดลอง)

### ข.1.2 ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี (Theoretical air fuel ratio)

ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีคำนวณได้จากสมการที่ (3.9)

$$A_0 = \frac{1}{0.232} \left[ \frac{1}{12} \times 32 \times c + \frac{1}{2} \times \frac{32}{2} \times \left( h - \frac{o}{8} \right) + \frac{1}{32} \times 32 \times s \right]$$

$$A_0 = \frac{1}{0.232} \left[ \frac{1}{12} \times 32 \times 0.36 + \frac{1}{2} \times \frac{32}{2} \times \left( 0.05 - \frac{0.41}{8} \right) + \frac{1}{32} \times 32 \times 0.0005 \right]$$

$$A_0 = 4.097 \quad \text{kg air / kg RH}$$

กำหนดปริมาณอากาศส่วนเกินในการออกแบบอยู่ที่ 100%

$$A = 2 A_0 = 8.194 \quad \text{kg air / kg RH}$$

ใช้ค่า  $A = 8.2$  kg air / kg RH ในการออกแบบ

### ข.1.3 ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity, $U_{mf}$ )

จากตารางที่ 4.2 ใช้ค่า  $K_1$  ของ Wen & Yu

$$\frac{1}{K_1} = 0.0408$$

$$K_1 = 24.5098$$

จากสมการที่ (4.10)

$$K_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s}$$

แทนค่าจะได้

$$\varepsilon_{mf} = \left( \frac{1.75}{24.5098 \times 0.85} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.4380$$

จากสมการที่ (4.10)

$$K_2 = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2}$$

แทนค่าจะได้

$$K_2 = \frac{150(1 - 0.4380)}{0.4380^3 \times 0.85^2} = 1389.15$$

จากสมการที่ (4.7)

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu_g^2}$$

แทนค่าจะได้

$$Ar = \frac{0.00045^3 \times 1.2 \times (2033.24 - 1.2) \times 9.81}{0.000018^2} = 6727.83$$

จากสมการที่ (4.7)

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \text{Re}_{p,mf}^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \text{Re}_{p,mf} = Ar$$

แทนค่าจะได้

$$\frac{1.75}{0.4380^3 \times 0.85} \text{Re}_{p,mf}^2 + \frac{150(1 - 0.4380)}{0.4380^3 \times 0.85^2} \text{Re}_{p,mf} = 6727.83$$

แก้สมการจะได้

$$Re_{p,mf} = 4.4878$$

จากสมการ (4.7)

$$Re_{p,mf} = \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu}$$

แทนค่าจะได้

$$U_{mf} = \frac{Re_{p,mf} \mu_g}{d_p \rho_g} = \frac{4.4878 \times 0.000018}{0.00045 \times 1.2} = 0.1496 \text{ m/s}$$

#### ข.1.4 พื้นที่หน้าตัดของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด

กำหนดอัตราการป้อนแกลบ	=	5.0	kg/hr
ปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 100% excess air	=	8.2	kg air / kg RH
ปริมาณอากาศที่ต้องใช้	= 5.0 x 8.2	=	41.0 kg air/hr
Air volume flow rate	= 41.0 / 1.2	=	34.17 m <sup>3</sup> /hr

ใช้ค่าความเร็วในการฟลูอิดไคซ์เป็น 3 เท่าของค่าความเร็วต่ำสุดในการฟลูอิดไคซ์

$$U_f = 3 U_{mf} = 3 \times 0.1496 = 0.4488 \text{ m/s}$$

พื้นที่หน้าตัดของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด คำนวณได้จาก

$$A = \frac{Q}{U_f} = \frac{34.17}{0.4488 \times 3600} = 0.0211 \text{ m}^2$$

เตาเผาที่มีหน้าตัดเป็นวงกลม ดังนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผาเท่ากับ



$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.0211}{\pi}} = 0.1641 \text{ m}$$

เพื่อความสะดวกในการสร้างเตาเผา ในที่นี้จึงออกแบบให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตาเผาเท่ากับ 0.2 เมตร

### ข.1.5 ความสูงของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด (Total Combustion Height, TCH)

$$\text{ความสูงเบตหนึ่ง } L_m = 0.2 \text{ m}$$

จากสมการ

$$\frac{L_{mf}}{L_m} = \frac{1 - \varepsilon_m}{1 - \varepsilon_{mf}}$$

แทนค่าจะได้

$$L_{mf} = \frac{0.2 \times (1 - 0.42)}{1 - 0.4380} = 0.2064 \text{ m}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $L_f$  กับ  $L_{mf}$  เป็นไปตามสมการ

$$\frac{L_f}{L_{mf}} = \frac{10.978(U_f - U_{mf})^{0.738} d_p^{1.006} \rho_s^{0.376}}{U_{mf}^{0.137} \rho_g^{0.126}} + 1$$

เมื่อ  $D_{bed} > 2.5$  นิ้ว และตัวแปรในสมการต้องอยู่ในหน่วยอังกฤษ แทนค่าจะได้

$$L_f = 0.2064 \times \left( \frac{10.978(2 \times 0.4908)^{0.738} \times 0.001476^{1.006} \times 126.9291^{0.376}}{0.4908^{0.137} \times 0.0749^{0.126}} + 1 \right) = 0.2363 \text{ m}$$

ค่าความสูงหลุดลอยส่งผ่าน (Transport Disengaging Height, TDH) คำนวณโดย

$$TDH \geq 3L_f$$

แทนค่าจะได้

$$\text{TDH} \geq 3 \times 0.2363 = 0.7089 \text{ m}$$

ค่าความสูงทั้งหมดของเตา (TCH) หาได้จาก

$$\text{TCH} \geq \text{TDH} + L_f = 0.7089 + 0.2363 = 0.9452 \text{ m}$$

เตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดที่จะสร้างขึ้นนี้จะไม่มีบริเวณฟรีบอร์ด (Freeboard) ทำให้ต้องเผื่อความสูงของเตาเผาไว้ให้มาก เพื่อไม่ให้วัสดุเบดหลุดลอยออกไปจากเตาเผา ในที่นี้เผื่อความสูงไว้ประมาณ 2 เท่า ดังนั้นค่าความสูงของเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดในงานวิจัยนี้เท่ากับ 2 เมตร

### ข.1.6 ระบบป้อนอากาศสำหรับเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด

ค่าความดันลดคร่อมเบดที่สภาวะเริ่มเกิดฟลูอิดไธซ์ชัน หาได้จากสมการ (4.5)

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

แทนค่าจะได้

$$\Delta P_b = 0.2064 \times (1 - 0.4380) \times (2033.24 - 1.2) \times 9.81 = 2312.38 \text{ Pa}$$

สำหรับแผ่นกระจายลม ออกแบบให้มีค่าความดันลดคร่อมโดยประมาณเท่ากับ 30% ของความดันลดคร่อมเบด

$$\Delta P_d = 0.3 \times \Delta P_b = 0.3 \times 2312.38 = 693.71 \text{ Pa}$$

ความดันลดคร่อมเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด คือผลรวมของค่าความดันลดคร่อมเบดกับค่าความดันลดคร่อมแผ่นกระจายลม

$$\Delta P_T = \Delta P_b + \Delta P_d = 2312.38 + 693.71 = 3006.09 \text{ Pa}$$

นอกจากความดันลดคร่อมเตาเผาฟลูอิดไต์ซ์เบดแล้ว ยังมีความดันลดผ่านอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบ อันได้แก่ ท่อลม ข้อต่อต่างๆ ออร์ฟิส วาล์วปรับอัตราการไหลอากาศ ไซโคลน และปล่องควัน ในที่นี้ออกแบบโดยการเผื่อค่าความดันลดอื่นๆ ประมาณ 50% ของความดันลดคร่อมเตาเผาฟลูอิดไต์ซ์เบด

$$\Delta P = 1.5 \times \Delta P_T = 1.5 \times 3006.09 = 4509.14 \text{ Pa}$$

หรืออยู่ในหน่วย mmH<sub>2</sub>O เท่ากับ

$$\Delta P = 459.65 \text{ mmH}_2\text{O}$$

อัตราการป้อนอากาศสำหรับการเผาไหม้

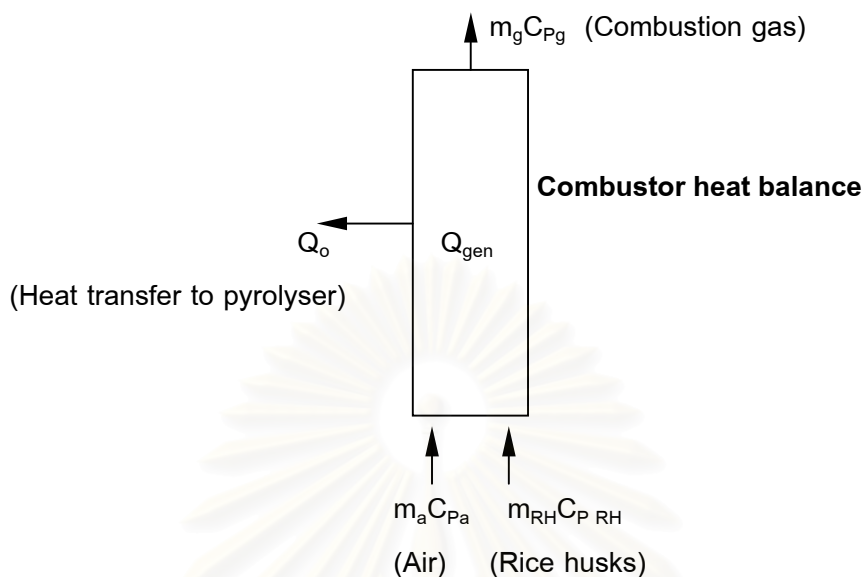
$$Q_a = \frac{34.17}{60} = 0.5695 \text{ m}^3/\text{min}$$

สรุบบระบบป้อนอากาศสำหรับเตาเผาฟลูอิดไต์ซ์เบด ใช้ Blower ที่ค่าความดันลดและอัตราการไหลดังนี้

อัตราการไหล	=	0.6	m <sup>3</sup> /min
ความดันลด	=	460	mmH <sub>2</sub> O

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ข.2 ห้องไฟโรไลซิสแบบเบตหนึ่ง



สมดุลพลังงานตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์กับปริมาณควบคุมตั้งรูป จะได้

$$Q - W = \Delta E$$

$$Q_{in} + Q_{gen} = Q_{out} + Q_{storage}$$

$$(m_{RH} C_{PRH} T_{\infty} + m_a C_{Pa} T_a) + m_{RH} (LHV)_{RH} = m_g C_{Pg} T_g + Q_o \quad (ข.1)$$

ข้อมูลเบื้องต้น

$C_{Pa}$	=	1.005 kJ/kg k	(ที่อุณหภูมิ 30°C)
$C_{PRH}$	=	1.212 kJ/kg k	(จากข้อมูลของ Sharma)
$T_{\infty}$	=	30°C	(โดยประมาณ)
$T_a$	=	30°C	(โดยประมาณ)
$T_g$	=	300°C	(โดยประมาณ)
$LHV_{RH}$	=	13,586 kJ/kg	(จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแกลบ)

คิดการเผาไหม้ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 100% จะได้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 8.2 (จากหัวข้อ ข.1.2)

$$m_a = 8.2 m_{RH}$$

ปริมาณก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ทางทฤษฎี (0% excess air) หาได้จากสมการ (3.23)

$$G_0 = (1 - 0.232) A_0 + \frac{44}{12} \times c + \frac{18}{2} \times h + \frac{64}{32} \times s + w + n$$

แทนค่าจะได้

$$G_0 = (1 - 0.232) \times 4.095 + \frac{44}{12} \times 0.36 + \frac{18}{2} \times 0.05 + \frac{64}{32} \times 0.0005 + 0.085 + 0.0031$$

$$G_0 = 5.004 \quad \text{kg / kg}_{RH}$$

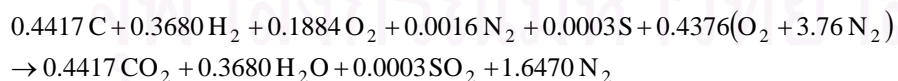
ดังนั้นที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 100% จะได้ปริมาณก๊าซไอเสียเท่ากับ

$$G = G_0 + (\% \text{ Excess air}) \times A = 5.004 + 1 \times 4.095 = 9.099 \quad \text{kg / kg}_{RH}$$

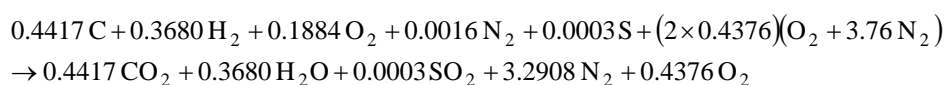
หรือ

$$m_g = 9.099 m_{RH}$$

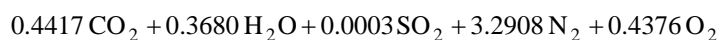
สำหรับการหาค่า  $C_{Pg}$  จะต้องทราบองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น ในที่นี้จะใช้ค่าที่ได้จากการดุลสมการการเผาไหม้ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 100% แล้วนำองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่ได้นั้นมาเฉลี่ยตามสัดส่วนโดยมวลเพื่อหาค่า  $C_{Pg}$  สมการการเผาไหม้ของแกลบทางทฤษฎี (0% excess air) เขียนได้ดังนี้



สมการการเผาไหม้ของแกลบที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 100% คือ



ก๊าซไอเสียประกอบด้วย



คิดอัตราส่วนโดยมวลของก๊าซแต่ละชนิดที่อยู่ในก๊าซไอเสียได้ดังนี้

Gas	Mole	Mass	Mass fraction
CO <sub>2</sub>	0.4417	0.4417x44=19.4348	0.1470
H <sub>2</sub> O	0.3680	0.3680x18=6.6240	0.0501
SO <sub>2</sub>	0.0003	0.0003x64=0.0192	0.0001 (neglect)
N <sub>2</sub>	3.2908	3.2908x28=92.1424	0.6969
O <sub>2</sub>	0.4376	0.4376x32=14.0032	0.1059
Total	4.5384	132.2236	1

ที่อุณหภูมิ 300°C ค่า C<sub>p</sub> ของก๊าซแต่ละชนิดเท่ากับ

$$\begin{aligned} C_{p \text{ CO}_2} &= 1.05826 \text{ kJ / kg k} \\ C_{p \text{ H}_2\text{O}} &= 2.01034 \text{ kJ / kg k} \\ C_{p \text{ N}_2} &= 1.06987 \text{ kJ / kg k} \\ C_{p \text{ O}_2} &= 0.99363 \text{ kJ / kg k} \end{aligned}$$

ค่า C<sub>p<sub>g</sub></sub> ของก๊าซไอเสียของการเผาไหม้ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 100% หาได้จาก

$$C_{p_g} = x_{\text{CO}_2} C_{p \text{ CO}_2} + x_{\text{H}_2\text{O}} C_{p \text{ H}_2\text{O}} + x_{\text{N}_2} C_{p \text{ N}_2} + x_{\text{O}_2} C_{p \text{ O}_2}$$

แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} C_{p_g} &= 0.1470 \times 1.05826 + 0.0501 \times 2.01034 + 0.6969 \times 1.06987 + 0.1059 \times 0.99363 \\ &= 1.1071 \text{ kJ / kg k} \end{aligned}$$

แทนค่าตัวแปรทั้งหมดลงในสมการ (ข.1)

$$(m_{RH} \times 1.212 \times 30 + 8.2 m_{RH} \times 1.005 \times 30) + m_{RH} \times 13586 = 9.099 m_{RH} \times 1.1071 \times 300 + Q_o$$

$$Q_o = 10847.54 m_{RH}$$

$$\frac{Q_o}{Q_{gen}} = \frac{10847.54 m_{RH}}{13586 m_{RH}} \times 100\% = 79.8\%$$

นั่นคือ ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านจากห้องเผาไหม้ไปยังห้องไพโรไลซิสคิดเป็น 79.8% ของปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้

ที่อัตราการป้อนแกลบ (ออกแบบ) เท่ากับ 5.0 kg/hr จะได้ค่าความร้อนถ่ายเทจากห้องเผาไหม้เข้าสู่ห้องไพโรไลซิสมีค่าเท่ากับ

$$Q_o = 10847.54 \times 5.0 = 54237.7 \quad \text{kJ/hr}$$

ค่าความร้อนที่ต้องการสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสแกลบ (ข้อมูลจากการทดลองของ Sharma) มีค่าเท่ากับ

$$Q_{pyrolysis} = 1500 \quad \text{kJ / kg}_{RH}$$

และกำหนดค่า Resident time สำหรับแกลบในห้องไพโรไลซิสเท่ากับ 30 นาที ดังนั้นปริมาณแกลบที่ต้องใช้สำหรับห้องไพโรไลซิสภายใน 1 Batch การทดลอง มีค่าเท่ากับ

$$m_{pyrolysis} = \frac{Q_o}{Q_{pyrolysis}} \times \text{Resident time} = \frac{54237.7}{1500} \times 0.5 = 18.08 \quad \text{kg}$$

ความหนาแน่น (Bulk density) ของแกลบ (จากการทดลอง) มีค่าเท่ากับ 100 kg/m<sup>3</sup> ดังนั้นปริมาตรห้องไพโรไลซิสคำนวณได้จาก

$$V_{pyrolysis} = \frac{m_{pyrolysis}}{\text{Density}} = \frac{18.08}{100} = 0.1808 \quad \text{m}^3$$

รูปทรงของห้องไพโรไลซิสเป็นวงแหวนล้อมรอบห้องเผาไหม้ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 m (จากหัวข้อ ข.1.4) และมีความสูง 2 m ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก (Outer diameter) ของห้องไพโรไลซิสมีค่าเท่ากับ

$$D_{\text{pyrolysis}} = \sqrt{\frac{4V_{\text{pyrolysis}}}{\pi H} + d^2_{\text{combustor}}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.1808}{\pi \times 2} + 0.2^2} = 0.394 \text{ m}$$

ในที่นี้ออกแบบให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของห้องไพโรไลซิสเท่ากับ 0.4 m



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ค

### ข้อมูลดิบการทดลอง

ในภาคผนวก ค นี้จะแสดงข้อมูลดิบของการทดลอง แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ การทดลองเฉพาะส่วนการเผาไหม้ของแกลบ การทดลองกระบวนการไพโรไลซิส และการทดลองการเผาไหม้ของ Semicokes

#### ค.1 การเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดซ์เบด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองครั้งที่ 1 วันที่ 10 พ.ย. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.  
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 29.4°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 26.1°C  
อัตราการป้อนแกลบ = 3.2 kg/hr อัตราการไหลอากาศ = 0.347 m<sup>3</sup>/min  
%อากาศส่วนเกิน = 100% Start up time = 28 min

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125 cm	X = 175 cm	
0	784.1	665.3	576.2	502.0	350.8
5	835.7	679.1	562.5	481.9	324.4
10	586.8	690.4	551.1	464.4	302.7
15	425.9	718.1	568.5	471.0	293.7
20	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR
25					
30					
35					
40					
45					
50					
55					
60					
Av.	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR

องค์ประกอบก๊าซไอเสีย

%CO <sub>2</sub>	%CO	%O <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
6.89	0.94	15.03	77.14

ปริมาณเถ้า = n/a kg

%C ในเถ้า = 4.838 %

ผลการทดลองครั้งที่ 2      วันที่ 11 พ.ย. 2543      เวลา 21.00-24.00 น.  
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 29.4°C      อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 26.1°C  
อัตราการป้อนแกลบ = 3.2 kg/hr      อัตราการไหลอากาศ = 0.449 m<sup>3</sup>/min  
%อากาศส่วนเกิน = 150%      Start up time = 25 min

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125 cm	X = 175 cm	
0	646.5	683.2	627.2	539.2	334.2
5	658.3	682.7	629.2	537.5	330.7
10	669.5	688.1	626.4	538.8	327.2
15	657.8	671.5	617.7	533.6	324.8
20	670.7	681.1	623.2	537.3	322.9
25	666.8	682.5	611.3	527.6	319.8
30	665.0	671.5	614.6	531.8	319.2
35	659.6	679.0	613.7	525.6	316.1
40	656.8	677.6	603.4	520.9	314.2
45	671.9	686.0	605.7	523.8	314.4
50	660.4	678.1	607.9	522.3	312.0
55	674.7	686.5	603.5	523.1	311.4
60	663.6	683.9	605.7	521.8	310.3
Av.	663.2	680.9	614.6	529.5	319.8

องค์ประกอบก๊าซไอเสีย

%CO <sub>2</sub>	%CO	%O <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
6.71	-	15.26	78.03

ปริมาณถ่าน = 0.3 kg

%C ในถ่าน = 3.385 %

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองครั้งที่ 3 วันที่ 12 พ.ย. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.  
 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 28.9°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 26.1°C  
 อัตราการป้อนแกลบ = 3.2 kg/hr อัตราการไหลอากาศ = 0.548 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 200% Start up time = 33 min

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125 cm	X = 175 cm	
0	608.6	676.0	599.4	521.4	326.5
5	603.5	671.8	590.8	517.6	326.6
10	607.0	678.7	588.0	525.4	328.9
15	607.6	682.4	593.3	525.5	330.2
20	615.3	673.5	589.4	520.9	328.9
25	599.3	696.5	590.3	521.7	329.1
30	602.8	679.5	594.1	520.3	328.8
35	611.4	680.7	588.4	517.5	329.1
40	608.3	688.9	592.2	521.9	330.3
45	606.3	694.8	598.7	523.7	328.2
50	603.4	683.4	591.7	514.9	328.6
55	601.3	672.2	583.8	512.8	328.6
60	605.2	697.7	588.4	513.9	327.8
Av.	606.2	682.8	591.4	519.8	328.6

องค์ประกอบก๊าซไอเสีย

%CO <sub>2</sub>	%CO	%O <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
5.09	-	16.29	78.62

ปริมาณถ่าน = 0.3 kg

%C ในถ่าน = 3.507 %

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองครั้งที่ 4 วันที่ 13 พ.ย. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.  
 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 28.9°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 26.1°C  
 อัตราการป้อนแกลบ = 4.7 kg/hr อัตราการไหลอากาศ = 0.533 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 100% Start up time = 36 min

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125 cm	X = 175 cm	
0	666.5	731.4	682.7	587.7	312.6
5	672.6	736.1	683.1	588.6	314.4
10	678.2	735.6	680.5	596.2	316.2
15	681.6	739.1	690.6	593.1	320.1
20	688.1	736.8	688.2	600.5	322.1
25	688.8	742.0	692.8	602.0	325.4
30	687.5	737.4	684.0	593.4	326.4
35	688.9	745.4	681.7	595.1	328.9
40	686.6	755.2	686.8	591.7	331.2
45	688.6	748.8	676.6	592.5	333.6
50	683.9	750.6	676.0	589.8	333.1
55	661.7	734.1	664.8	580.5	330.4
60	673.1	744.7	670.9	584.1	332.9
Av.	680.5	741.3	681.4	591.9	325.2

องค์ประกอบก๊าซไอเสีย

%CO <sub>2</sub>	%CO	%O <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
8.15	0.72	14.25	76.88

ปริมาณถ่าน = 0.5 kg

%C ในถ่าน = 2.020 %

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองครั้งที่ 5 วันที่ 14 พ.ย. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.  
 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 29.4°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 26.1°C  
 อัตราการป้อนแกลบ = 4.7 kg/hr อัตราการไหลอากาศ = 0.673 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 150% Start up time = 25 min

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125 cm	X = 175 cm	
0	668.3	635.8	558.8	450.6	216.7
5	678.4	648.3	552.9	448.0	222.7
10	697.5	666.2	584.3	488.3	250.6
15	700.1	682.5	612.8	510.3	270.0
20	668.0	680.0	608.4	525.9	290.0
25	651.0	667.3	611.4	516.4	292.3
30	647.6	687.7	624.3	546.1	301.9
35	645.0	680.8	640.5	559.4	320.0
40	636.6	678.6	645.6	574.5	322.5
45	643.6	677.1	642.7	576.3	326.3
50	637.5	685.4	651.4	575.5	327.7
55	637.7	682.4	652.0	586.7	329.9
60	639.0	694.3	669.7	608.2	342.1
Av.	657.7	674.3	619.6	535.9	293.3

องค์ประกอบก๊าซไอเสีย

%CO <sub>2</sub>	%CO	%O <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
5.29	-	16.20	78.51

ปริมาณถ่าน = 0.5 kg

%C ในถ่าน = 1.085 %

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองครั้งที่ 6 วันที่ 15 พ.ย. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.  
 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 29.4°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 25.6°C  
 อัตราการป้อนแกลบ = 4.7 kg/hr อัตราการไหลอากาศ = 0.802 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 200% Start up time = 30 min

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125 cm	X = 175 cm	
0	599.3	677.8	635.3	575.4	412.1
5	595.1	668.8	632.1	565.5	417.4
10	605.3	673.3	636.9	586.9	425.5
15	603.9	674.6	647.0	589.0	421.8
20	600.1	664.8	653.9	603.3	428.7
25	608.6	676.6	651.6	601.3	425.8
30	600.1	661.5	646.8	606.0	432.8
35	613.0	682.9	667.8	621.7	438.6
40	595.7	650.1	650.0	611.7	439.1
45	593.6	664.1	658.9	624.1	446.6
50	609.2	655.4	656.1	619.6	443.1
55	596.9	657.2	663.8	617.7	452.2
60	603.8	655.6	666.5	615.9	447.4
Av.	601.9	666.4	651.3	602.9	433.2

องค์ประกอบก๊าซไอเสีย

%CO <sub>2</sub>	%CO	%O <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
4.52	0.19	16.47	78.82

ปริมาณถ่าน = 0.6 kg

%C ในถ่าน = 1.648 %

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองครั้งที่ 7 วันที่ 16 พ.ย. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.  
 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 29.4°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 26.1°C  
 อัตราการป้อนแกลบ = 6.4 kg/hr อัตราการไหลอากาศ = 0.723 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 100% Start up time = 24 min

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125 cm	X = 175 cm	
0	663.5	751.5	743.2	674.1	473.9
5	667.2	749.4	737.9	673.6	475.7
10	670.1	746.2	741.7	682.7	476.1
15	673.5	743.4	737.9	681.8	479.2
20	676.4	744.9	740.4	683.2	480.7
25	667.0	742.6	727.2	676.4	482.2
30	673.8	737.6	734.6	682.7	483.6
35	673.5	743.6	729.2	683.3	483.5
40	677.3	741.8	739.3	699.9	486.4
45	675.5	737.4	736.5	694.6	488.3
50	672.4	741.6	737.2	690.9	489.3
55	675.4	746.1	746.1	688.4	488.7
60	678.7	750.1	747.8	691.0	489.4
Av.	672.6	744.3	738.4	684.8	482.8

องค์ประกอบก๊าซไอเสีย

%CO <sub>2</sub>	%CO	%O <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
8.82	0.60	14.21	76.38

ปริมาณถ่าน = 0.7 kg

%C ในถ่าน = 1.786 %

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ผลการทดลองครั้งที่ 8 วันที่ 17 พ.ย. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.  
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 29.4°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 26.1°C  
อัตราการป้อนแกลบ = 6.4 kg/hr อัตราการไหลอากาศ = 0.905 m<sup>3</sup>/min  
%อากาศส่วนเกิน = 150% Start up time = 33 min

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125 cm	X = 175 cm	
0	615.8	665.0	668.7	634.9	470.2
5	614.6	662.6	673.1	646.3	471.1
10	615.4	686.7	680.3	648.6	473.0
15	620.7	684.4	692.4	659.0	489.6
20	638.2	712.3	697.4	659.3	501.8
25	640.3	728.6	713.2	672.6	507.1
30	639.0	715.6	716.6	675.3	501.3
35	626.6	703.2	702.9	666.8	489.9
40	629.7	700.9	702.9	660.5	495.2
45	635.6	700.3	701.8	670.8	491.2
50	641.5	710.6	716.2	678.4	504.9
55	648.9	709.0	703.6	667.8	505.1
60	647.2	717.8	713.4	678.3	501.1
Av.	631.8	699.8	698.7	663.0	492.4

องค์ประกอบก๊าซไอเสีย

%CO <sub>2</sub>	%CO	%O <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
6.16	0.33	15.90	77.61

ปริมาณถ่าน = 0.8 kg

%C ในถ่าน = 1.852 %

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองครั้งที่ 9 วันที่ 18 พ.ย. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.  
 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 29.4°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 26.1°C  
 อัตราการป้อนแกลบ = 6.4 kg/hr อัตราการไหลอากาศ = 1.085 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 200% Start up time = 27 min

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125cm	X=175 cm	
0	627.6	677.4	693.9	664.8	526.1
5	623.1	686.2	697.2	680.5	512.1
10	600.0	673.6	699.1	662.4	504.3
15	601.4	684.0	701.8	657.4	502.6
20	604.1	686.1	698.8	660.1	501.6
25	606.6	679.3	686.7	656.8	509.2
30	607.4	691.4	690.0	654.4	510.1
35	605.8	686.1	696.0	664.7	512.5
40	611.6	683.6	687.7	654.9	513.9
45	614.2	687.3	687.1	649.1	506.0
50	608.9	690.7	702.0	660.6	512.4
55	607.5	690.2	693.8	665.6	510.4
60	605.4	683.5	694.5	661.8	508.0
Av.	609.5	684.6	694.5	661.0	509.9

องค์ประกอบก๊าซไอเสีย

%CO <sub>2</sub>	%CO	%O <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
5.11	-	16.87	78.02

ปริมาณถ่าน = 0.9 kg

%C ในถ่าน = 1.907 %

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ค.2 การไพโรไลซิสแกลบในห้องไพโรไลซิสแบบเบตหนึ่ง

ผลการทดลองครั้งที่ 1      วันที่ 1 ธ.ค. 2543      เวลา 21.00-24.00 น.

### ห้องเผาไหม้

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 27.8°C      อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 25.6°C  
 อัตราการป้อนแกลบ = 4.7 kg/hr      อัตราการไหลอากาศ = 0.673 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 150%      Start up time = 24 min

### ห้องไพโรไลซิส

ปริมาณแกลบใน 1 แบทช์ = 18.0 kg      Pyrolysis time = 30 min

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้				อุณหภูมิ ก๊าซไอ เสีย(°C)	อุณหภูมิในห้องไพโรไลซิส			
	X=25 cm	X=75 cm	X=125 cm	X=175 cm		X=25 cm	X=75 cm	X=125 cm	X=175 cm
0	828.5	789.1	710.3	534.3	293.5	106.0	119.6	133.5	223.8
5	768.2	775.7	704.7	548.7	336.2	136.3	264.7	193.2	292.2
10	728.4	816.1	774.7	611.0	363.7	141.2	346.5	260.0	341.6
15	704.0	805.6	777.6	621.2	389.6	164.4	428.8	361.8	401.5
20	653.8	778.0	757.1	619.4	395.7	185.4	465.7	404.8	417.5
25	666.8	795.6	777.8	636.2	405.4	191.2	474.7	421.4	421.6
30	667.2	779.5	753.2	620.6	412.0	210.3	499.0	439.8	430.5
Av.	716.7	791.4	750.8	598.8	370.9	162.1	371.3	316.4	361.2

### องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิง

%O <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub>	%CO	%CH <sub>4</sub>	%H <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
9.97	19.55	16.85	8.30	1.02	44.32

### องค์ประกอบถ่านแกลบ

%C	%H	%O	%N	%Ash
49.382	0.933	10.522	0.163	39.0

ปริมาณถ่านแกลบที่ผลิตได้ = 4.9 kg = 67.12% of residue  
 ปริมาณแกลบที่ไม่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส = 2.4 kg = 32.88% of residue

ผลการทดลองครั้งที่ 2 วันที่ 2 ธ.ค. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.

ห้องเผาไหม้

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 27.8°C                      อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 26.1°C  
 อัตราการป้อนแกลบ = 4.7 kg/hr                      อัตราการไหลอากาศ = 0.673 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 150%                      Start up time = 28 min

ห้องไพโรไลซิส

ปริมาณแกลบใน 1 แบทช์ = 18.0 kg                      Pyrolysis time = 60 min

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้				อุณหภูมิ ก๊าซไอ เสีย(°C)	อุณหภูมิในห้องไพโรไลซิส			
	X=25 cm	X=75 cm	X=125 cm	X=175 cm		X=25 cm	X=75 cm	X=125 cm	X=175 cm
0	812.4	794.5	728.3	617.5	309.0	130.6	290.1	113.9	109.8
5	804.2	805.7	750.2	648.0	346.8	143.1	362.6	247.8	214.8
10	787.0	807.0	775.8	682.1	395.4	162.6	436.3	377.3	301.1
15	774.2	810.8	789.0	698.7	437.5	189.1	490.2	438.2	382.4
20	764.9	814.0	798.2	701.4	463.9	224.3	537.1	478.5	401.3
25	756.6	816.8	806.9	709.8	474.6	250.6	552.8	502.3	423.6
30	770.2	813.1	810.6	722.9	487.5	280.4	582.4	530.8	455.1
35	765.5	816.8	811.6	730.4	505.9	307.0	604.1	554.9	480.8
40	766.0	818.7	816.6	735.1	517.8	323.3	618.6	580.6	500.0
45	767.6	822.9	828.0	735.7	529.0	340.5	633.2	588.9	517.4
50	768.4	822.0	822.3	744.0	537.7	351.5	644.8	600.0	527.4
55	763.8	819.3	817.3	747.2	548.6	373.5	655.9	591.8	535.6
60	762.6	819.5	817.4	737.4	547.5	376.8	659.0	596.0	538.6
Av.	774.1	813.9	797.9	708.5	469.3	265.6	543.6	477.0	414.5

องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิง

%O <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub>	%CO	%CH <sub>4</sub>	%H <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
9.71	21.92	20.82	6.79	-	40.76

องค์ประกอบถ่านแกลบ

%C	%H	%O	%N	%Ash
48.533	1.023	5.389	0.155	44.9

ปริมาณถ่านแกลบที่ผลิตได้ = 4.7 kg = 78.33% of residue

ปริมาณแกลบที่ไม่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส = 1.3 kg = 21.67% of residue

ผลการทดลองครั้งที่ 3 วันที่ 3 ธ.ค. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.

ห้องเผาไหม้

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 28.3°C                      อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 26.1°C  
 อัตราการป้อนแกลบ = 4.7 kg/hr                      อัตราการไหลอากาศ = 0.673 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 150%                      Start up time = 26 min

ห้องไพโรไลซิส

ปริมาณแกลบใน 1 แบทช์ = 18.0 kg                      Pyrolysis time = 90 min

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้				อุณหภูมิ ก๊าซไอ เสีย(°C)	อุณหภูมิในห้องไพโรไลซิส			
	X=25 cm	X=75 cm	X=125 cm	X=175 cm		X=25 cm	X=75 cm	X=125 cm	X=175 cm
0	831.2	795.3	712.3	603.6	344.8	103.7	314.7	223.9	172.7
5	813.0	801.0	745.0	632.1	375.9	112.7	402.1	317.9	227.8
10	805.3	814.1	772.9	662.5	405.1	134.5	443.4	396.8	305.4
15	782.6	812.0	792.1	679.1	435.6	170.5	476.4	428.9	378.6
20	772.8	814.6	797.6	687.4	456.9	198.1	491.6	445.6	419.8
25	755.7	813.6	801.6	704.1	477.5	233.8	505.9	461.0	461.0
30	756.9	813.5	815.5	708.9	494.4	272.8	527.2	481.2	483.6
35	745.7	810.6	812.8	716.4	502.2	298.8	542.9	498.4	500.0
40	752.8	818.2	812.6	717.2	516.4	328.9	567.1	526.0	523.0
45	745.7	822.0	826.4	724.4	527.6	340.1	576.6	537.8	533.4
50	737.5	816.4	818.5	726.6	534.3	351.2	586.9	551.1	541.4
55	749.2	817.7	822.8	732.0	543.7	361.6	598.3	564.2	553.6
60	740.9	815.2	816.9	723.6	546.4	370.2	606.8	574.0	559.6
65	747.9	824.9	833.8	744.6	551.4	377.1	613.8	583.8	567.5
70	759.3	815.8	821.5	735.1	545.7	384.1	620.4	593.0	574.0
75	737.9	815.9	827.7	744.1	556.9	390.1	623.1	596.3	574.5
80	719.8	808.2	815.9	733.4	553.6	399.9	628.8	602.5	576.1
85	736.3	811.7	812.6	725.8	550.9	395.2	623.7	599.4	570.2
90	733.2	802.6	806.5	713.6	550.2	401.6	630.8	607.3	577.7
Av.	739.3	813.5	819.3	731.5	550.7	388.3	621.1	593.8	571.4

องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิง

%O <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub>	%CO	%CH <sub>4</sub>	%H <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
10.70	19.69	13.83	6.85	1.11	47.82

## องค์ประกอบถ่านแกลบ

%C	%H	%O	%N	%Ash
46.225	0.839	9.384	0.152	43.4

ปริมาณถ่านแกลบที่ผลิตได้ = 3.5 kg = 76.09% of residue

ปริมาณแกลบที่ไม่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส = 1.1 kg = 23.91% of residue



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองครั้งที่ 4 วันที่ 4 ธ.ค. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.

ห้องเผาไหม้

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 28.3°C                      อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 26.1°C  
 อัตราการป้อนแกลบ = 4.7 kg/hr                      อัตราการไหลอากาศ = 0.802 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 200%                      Start up time = 25 min

ห้องไพโรไลซิส

ปริมาณแกลบใน 1 แบทช์ = 18.0 kg                      Pyrolysis time = 60 min

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้				อุณหภูมิ ก๊าซไอ เสีย(°C)	อุณหภูมิในห้องไพโรไลซิส			
	X=25 cm	X=75 cm	X=125 cm	X=175 cm		X=25 cm	X=75 cm	X=125 cm	X=175 cm
0	797.2	772.0	721.9	603.6	329.9	113.3	124.7	95.4	145.4
5	799.5	787.4	756.3	634.0	355.5	134.2	148.4	101.9	168.3
10	774.0	798.0	779.5	656.2	399.4	159.9	217.6	166.2	232.6
15	739.8	793.7	763.0	618.5	424.8	173.9	313.0	344.5	318.5
20	709.1	802.3	804.0	681.1	465.2	177.0	391.9	435.9	395.2
25	697.8	806.9	814.4	699.2	488.2	185.5	437.8	465.8	445.9
30	712.3	811.2	819.9	705.0	509.8	195.4	468.9	486.0	483.8
35	718.8	826.5	834.2	723.7	526.0	207.6	498.4	503.2	515.9
40	723.1	825.0	831.3	737.2	548.5	227.0	530.0	519.3	543.9
45	728.8	827.0	841.4	749.4	563.7	272.3	553.7	537.0	566.5
50	733.9	823.1	838.8	750.8	573.6	304.3	574.4	555.2	578.2
55	748.0	829.5	845.8	758.4	578.6	345.9	591.5	570.6	583.4
60	745.2	836.6	858.3	773.2	595.6	362.0	606.4	584.7	592.6
Av.	740.6	810.7	808.4	699.3	489.1	219.9	419.7	412.7	428.5

องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิง

%O <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub>	%CO	%CH <sub>4</sub>	%H <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
10.05	21.21	13.33	6.49	0.91	48.01

องค์ประกอบถ่านแกลบ

%C	%H	%O	%N	%Ash
49.840	0.978	7.789	0.293	41.1

ปริมาณถ่านแกลบที่ผลิตได้ = 5.0 kg = 70.42% of residue

ปริมาณแกลบที่ไม่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส = 2.1 kg = 29.58% of residue

ผลการทดลองครั้งที่ 5 วันที่ 5 ธ.ค. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.

ห้องเผาไหม้

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 28.3°C                      อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 26.7°C  
 อัตราการป้อนแกลบ = 4.7 kg/hr                      อัตราการไหลอากาศ = 0.533 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 100%                      Start up time = 31 min

ห้องไพโรไลซิส

ปริมาณแกลบใน 1 แบทช์ = 18.0 kg                      Pyrolysis time = 60 min

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้				อุณหภูมิ ก๊าซไอ เสีย(°C)	อุณหภูมิในห้องไพโรไลซิส			
	X=25 cm	X=75 cm	X=125 cm	X=175 cm		X=25 cm	X=75 cm	X=125 cm	X=175 cm
0	816.4	816.8	752.2	543.8	301.9	117.5	217.7	203.2	246.8
5	810.1	821.9	775.8	570.9	311.1	145.5	291.7	257.8	295.5
10	751.8	838.2	767.8	575.5	330.3	173.7	395.9	352.0	362.6
15	745.2	843.5	773.5	600.8	337.6	176.5	429.2	369.0	384.0
20	727.5	848.4	770.0	598.6	345.8	181.0	466.0	390.1	399.5
25	802.5	886.5	781.0	579.2	354.6	197.3	523.3	425.3	438.9
30	798.5	860.1	777.4	565.6	351.0	214.4	557.8	442.2	433.4
35	790.4	856.9	770.4	598.5	370.6	267.7	640.8	483.2	453.7
40	788.4	850.4	768.4	600.9	370.5	273.9	657.2	488.0	454.2
45	791.5	844.7	774.8	632.2	370.7	282.8	659.5	508.7	462.4
50	796.8	847.8	772.3	636.2	370.3	290.4	672.2	563.9	488.4
55	800.7	839.7	763.2	634.4	367.3	291.1	675.6	571.0	491.9
60	807.6	834.6	766.9	636.2	361.8	292.5	681.7	587.4	495.0
Av.	786.7	845.3	770.3	597.9	349.5	223.4	528.4	434.0	415.9

องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิง

%O <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub>	%CO	%CH <sub>4</sub>	%H <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
9.89	20.45	14.88	7.49	1.16	46.12

องค์ประกอบถ่านแกลบ

%C	%H	%O	%N	%Ash
49.520	0.768	9.453	0.159	40.1

ปริมาณถ่านแกลบที่ผลิตได้ = 5.1 kg = 68.92% of residue

ปริมาณแกลบที่ไม่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส = 2.3 kg = 31.08% of residue



### ค.3 การใช้ถ่านแกลบเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดซ์เบด

ผลการทดลองครั้งที่ 1      วันที่    15 ม.ค. 2543      เวลา    21.00-24.00 น.  
 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง    = 27.8°C      อุณหภูมิกระเปาะเปียก    = 26.1°C  
 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงผสม    = 4.7 kg/hr      อัตราการไหลอากาศ    = 0.673 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน      = 150%      อุณหภูมิเบด Start up    = 550°C  
 อัตราส่วนถ่านแกลบในเชื้อเพลิงผสม    = 0% (โดยน้ำหนัก)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125 cm	X = 175 cm	
0	637.1	624.3	544.0	412.0	156.8
5	649.4	631.9	541.8	416.3	178.1
10	652.3	628.2	545.5	418.5	183.9
15	646.4	627.6	549.1	414.0	195.3
20	636.9	609.9	537.8	416.1	204.4
25	639.0	621.9	545.9	419.9	207.4
30	637.0	640.4	546.8	418.1	220.7
Av.	642.6	626.3	544.4	416.4	192.4

ผลการทดลองครั้งที่ 2 วันที่ 16 ม.ค. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.  
 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 28.3°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 26.7°C  
 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงผสม = 4.7 kg/hr อัตราการไหลอากาศ = 0.673 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 150% อุณหภูมิเบด Start up = 550°C  
 อัตราส่วนถ่านแกลบในเชื้อเพลิงผสม = 10% (โดยน้ำหนัก)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125 cm	X = 175 cm	
0	618.8	630.9	543.5	408.1	148.8
5	630.2	644.1	544.0	410.8	168.7
10	641.2	650.7	547.6	415.4	177.5
15	647.2	647.0	545.6	418.8	189.6
20	647.5	647.1	543.4	413.4	200.1
25	637.6	646.8	546.0	418.0	205.3
30	638.9	652.5	552.7	420.5	217.1
Av.	637.3	645.6	546.1	415.0	186.7

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองครั้งที่ 3 วันที่ 17 ม.ค. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.  
 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 27.8°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 25.6°C  
 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงผสม = 4.7 kg/hr อัตราการไหลอากาศ = 0.686 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 150% อุณหภูมิเบด Start up = 545°C  
 อัตราส่วนถ่านแกลบในเชื้อเพลิงผสม = 20% (โดยน้ำหนัก)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125 cm	X = 175 cm	
0	607.5	628.7	530.8	405.5	136.5
5	614.0	651.8	544.2	413.2	154.8
10	626.0	650.1	543.7	412.4	168.1
15	637.2	647.4	537.6	409.8	174.5
20	634.0	653.4	539.8	412.6	188.2
25	643.7	656.0	542.6	414.0	197.1
30	654.6	661.9	539.2	413.6	205.7
Av.	631.0	649.9	539.7	411.6	175.0

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองครั้งที่ 4 วันที่ 18 ม.ค. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.  
 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 27.2°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 25.0°C  
 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงผสม = 4.7 kg/hr อัตราการไหลอากาศ = 0.686 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 150% อุณหภูมิเบด Start up = 549°C  
 อัตราส่วนถ่านแกลบในเชื้อเพลิงผสม = 30% (โดยน้ำหนัก)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125 cm	X = 175 cm	
0	606.3	617.3	553.0	426.1	133.2
5	614.0	626.3	597.6	427.7	154.2
10	621.1	632.1	555.1	425.1	167.4
15	625.0	641.5	556.4	427.9	177.2
20	625.8	640.1	559.8	430.9	184.7
25	636.8	645.6	561.7	478.7	192.3
30	646.2	647.1	559.2	427.5	199.4
Av.	625.0	635.7	563.3	434.8	172.6

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองครั้งที่ 5 วันที่ 19 ม.ค. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.  
 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 27.2°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 25.6°C  
 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงผสม = 4.7 kg/hr อัตราการไหลอากาศ = 0.698 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 150% อุณหภูมิเบด Start up = 545°C  
 อัตราส่วนถ่านแกลบในเชื้อเพลิงผสม = 40% (โดยน้ำหนัก)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125 cm	X = 175 cm	
0	597.7	626.2	552.1	411.0	110.3
5	607.8	613.7	542.5	407.9	125.4
10	618.3	611.0	541.7	405.7	138.9
15	624.7	611.4	540.8	402.8	148.6
20	630.9	607.5	534.5	396.6	161.8
25	642.6	601.3	532.5	397.2	188.9
30	649.9	603.2	533.5	393.7	199.7
Av.	624.6	610.6	539.7	402.1	153.4

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองครั้งที่ 6 วันที่ 20 ม.ค. 2543 เวลา 21.00-24.00 น.  
 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 27.2°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก = 25.6°C  
 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงผสม = 4.7 kg/hr อัตราการไหลอากาศ = 0.711 m<sup>3</sup>/min  
 %อากาศส่วนเกิน = 150% อุณหภูมิเบด Start up = 535°C  
 อัตราส่วนถ่านกลบในเชื้อเพลิงผสม = 50% (โดยน้ำหนัก)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (°C)				อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)
	X = 25 cm	X = 75 cm	X = 125 cm	X = 175 cm	
0	561.4	532.7	486.8	374.4	102.3
5	570.2	531.9	477.4	371.9	110.9
10	578.1	521.6	473.7	372.6	119.6
15	591.7	539.8	482.9	375.6	128.7
20	613.5	547.7	486.9	378.2	138.7
25	620.8	548.2	483.1	377.7	144.8
30	625.8	548.3	482.5	377.4	163.2
Av.	594.5	538.6	481.9	375.4	129.7

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภูสิตฐ อิศระญาณพงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2520 จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปีการศึกษา 2539 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย