

ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน



นางสาว อੰนธิการ์ วรรณะ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3598-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TEMPERATURE CONTROL SYSTEM OF A CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTOR



Miss Unthika Wanna

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science


Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-3598-7


หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาฟลูอิดไรต์แบบหมุนเวียน
โดย นางสาว อ้นธิการ์ วรรณะ
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด

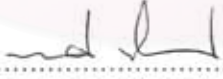
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

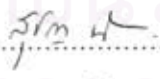

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชญา นิติวัดมานนท์)

อันธิการ์ วรรณะ : ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาฟลูอิดไรซ์แบบหมุนเวียน.
(TEMPERATURE CONTROL SYSTEM OF A CIRCULATING FLUIDIZED BED
COMBUSTOR) อ. ที่ปรึกษา: รศ. ดร. เลอสรวง เมฆสุด 125 หน้า. ISBN 974-173-598-7.

การเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นปฏิกิริยาคายพลังงานความร้อน (Exothermic reaction) และพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาสามารถวัดได้ในรูปของอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล สัญญาณจากการวัดอุณหภูมิจะถูกนำไปใช้ควบคุมการเผาไหม้ของถ่านหินในเตาเผาอย่างอัตโนมัติด้วยวิธีการควบคุมการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง และการปรับปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาเผา งานวิจัยนี้ได้นำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์เข้ากับระบบควบคุม ซึ่งลักษณะการควบคุมของระบบเป็นแบบป้อนกลับ (Feedback control) ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นโดยศึกษาจากความสัมพันธ์ของตัวแปรตามรูปแบบการควบคุมที่ต้องการ ทั้งแบบ Proportional(P) และ Proportional Integral(PI)

การทดลองพบว่า โปรแกรมทั้ง 2 แบบ สามารถควบคุมอุณหภูมิตามค่าเป้าหมายและต่อเนื่อง โดยค่า Kc (Proportional gain) เดียวกัน โดยค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิจากค่าเป้าหมาย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละรูปแบบการควบคุม สรุปได้ดังนี้

- เครื่องควบคุมแบบ P มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 8 องศาเซลเซียส
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 5.10 องศาเซลเซียส
- เครื่องควบคุมแบบ PI มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 7.5 องศาเซลเซียส
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3.67 องศาเซลเซียส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....อันธิการ์ วรรณะ.....
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2548.....

4572587523 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD : TEMPERATURE CONTROL/CIRCULATING FLUIDIZED BED/BIOMASS

UNTHIKA WANNA : TEMPERATURE CONTROL SYSTEM OF A CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTOR. THESIS ADVISOR : LURSUANG MEKASUT, Dr.de L'INPT, 125 PP. ISBN : 974-173-598-7

The combustion of fuel is an exothermic reaction and the amount of exhausted energy could be measured in term of temperature using thermocouple. The signal from the temperature measurement was amplified and converted to control the speed of feeding motor and the inlet air. This research work dealt with a feedback control system : a computer was linked with the converter and temperature controller. Softwares were developed by setting correlations for proportional and proportional integral control.

The experimental results revealed that all two types of software contribute to a steady and continuous control of combustion system at the same K_c (proportional gain) value. The errors of temperature and standard deviation in each type were as following

- The proportional error of temperature $< 8\text{ }^{\circ}\text{C}$
Standard deviation = $5.10\text{ }^{\circ}\text{C}$
- The proportional integral error of temperature $< 18\text{ }^{\circ}\text{C}$
Standard deviation = $3.67\text{ }^{\circ}\text{C}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Chemical Technology.....Student's signature.....*Unthika Wanna*.....
Field of study.....Chemical Technology.....Advisor's signature.....*S. Mekasut*.....
Academic year...2005....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยหรือค้นคว้าเพื่อทำวิทยานิพนธ์ ทุนสนับสนุนกลุ่มวิทยานิพนธ์เพื่อการตีพิมพ์เผยแพร่ และกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานสำนักนโยบายและแผนพลังงาน ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรธ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชญา นิติวฒนา นนท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการทดลองและห้องปฏิบัติการ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้.....	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	4
2.2 การวิเคราะห์ชีวมวล.....	6
2.3 การนำเอาเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ประโยชน์.....	7
2.4 ทฤษฎีการเผาไหม้.....	8
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้.....	9
2.6 เทคนิคทางฟลูอิดไดเซชัน.....	10
2.6.1 ฟลูอิดไธเบต.....	10
2.6.2 ความดันตกคร่อมฟลูอิดไธเบต.....	11
2.7 เตาเผาแบบฟลูอิดไธเบต.....	12
2.8 ฟลูอิดไธเบตแบบหมุนเวียน.....	12
2.9 กระบวนการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไธเบต.....	13
2.10 การเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไธเบต.....	14
2.11 ข้อดีและข้อเสียของฟลูอิดไดเซชัน.....	16

3.2.4 การออกแบบและสร้างบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมกับระบบการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศเข้าเตาเผา	44
3.2.5 การเขียนและปรับปรุงโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิของเตาเผา	45
3.2.6 ทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน.....	46
4. ผลการทดลอง.....	48
4.1 สมบัติของถ่านหินและเชื้อเพลิงชีวมวล.....	48
4.1.1 สมบัติของถ่านหิน.....	49
4.1.2 สมบัติของซังข้าวโพด.....	50
4.1.3 สมบัติของแกลบ.....	51
4.1.4 สมบัติของกากกาแฟ.....	52
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์และปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาต่อเวลา.....	56
4.2.1 ปริมาณเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่เข้าเตาเผาต่อนาที.....	56
4.2.2 ปริมาณเชื้อเพลิง (ถ่านหิน : ชีวมวล = 1 : 1) ที่เข้าเตาเผาต่อนาที.....	57
4.2.3 ปริมาณเชื้อเพลิง(ถ่านหิน : ชีวมวล = 2 : 1) ที่เข้าเตาเผาต่อนาที.....	58
4.2.4 ปริมาณเชื้อเพลิง (ถ่านหิน : ชีวมวล = 3 : 1) ที่เข้าเตาเผาต่อนาที.....	59
4.3 การเขียนโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน.....	60
4.4 ค่าคงที่ของกระบวนการ.....	62
4.5 การควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน.....	64
4.5.1 การควบคุมด้วยโปรแกรมแบบ P.....	66
4.5.2 การควบคุมด้วยโปรแกรมแบบ PI.....	75
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	85
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	85

บทที่	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ	86
รายการอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก	92
ภาคผนวก ข	99
ภาคผนวก ค	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	125



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านหิน	49
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของซังข้าวโพด	50
4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติของแกลบ	51
4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติของกากกาแฟ	52
4.5 แสดงปริมาณเชื้อเพลิงแต่ละตัวที่เข้าเตาเผาต่อหน้าที่	56
4.6 แสดงปริมาณเชื้อเพลิง (อัตราส่วน ถ่านหิน : ซีวมวล = 1 : 1 โดยน้ำหนัก) ที่เข้าเตาเผาต่อหน้าที่	57
4.7 แสดงปริมาณเชื้อเพลิง (อัตราส่วน ถ่านหิน : ซีวมวล = 2 : 1 โดยน้ำหนัก) ที่เข้าเตาเผาต่อหน้าที่	58
4.8 แสดงปริมาณเชื้อเพลิง (อัตราส่วน ถ่านหิน : ซีวมวล = 3 : 1 โดยน้ำหนัก) ที่เข้าเตาเผาต่อหน้าที่	59
4.9 แสดงค่าคงที่ของกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง	63
4.10 แสดงค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ P และ PI ของเชื้อเพลิงตัวอย่าง ตามสมมติฐานของ Cohen & Coon	64
4.11 แสดงค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ P(new) และ PI (new)	67
4.12 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงตัวอย่างที่อุณหภูมิเป้าหมาย	82
4.13 ร้อยละการเปิดวาล์วป้อนอากาศแต่ละเชื้อเพลิงตัวอย่างที่อุณหภูมิเป้าหมาย เมื่อความเร็วของอากาศสูงสุดมีค่า 4 เมตรต่อวินาที	84

สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ปราบกฎการณ์ฟลูอิดไฮดรอลิกชนิดต่างๆ	11
2.2 เครื่อง CFBC ในรูป (a) และ FCC ในรูป (b)(Grace, J. R., Avedan, A. A., and Knowlton, T. M., 1997)	13
2.3 การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในเตาฟลูอิดไฮดรอลิก.....	15
2.4 การเกิดปฏิกิริยาโดยทั่วไปของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	15
2.5 แผนภาพแสดงลักษณะการควบคุมแบบป้อนกลับ	20
2.6 แผนภาพแสดงลักษณะการควบคุมแบบอินเฟอร์เรนเชียล	21
2.7 แผนภาพแสดงลักษณะการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า	22
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม.....	23
2.9 ก. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรป้อนออกกับเวลา ข. กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงโดยประมาณของค่าตัวแปรในระบบ ลำดับที่หนึ่ง	24
2.10 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ	25
2.11 วงจรควบคุมแบบป้อนกลับ.....	25
2.12 ค่าที่เกิดจากการควบคุมแบบ ในกระบวนการลำดับที่หนึ่งเมื่อ ก. เปลี่ยนค่าตัวแปรที่กำหนด ข. เปลี่ยนค่าตัวแปรป้อนเข้า.....	25
2.13 ลักษณะการตอบสนองของกระบวนการสำหรับกระบวนการที่ใช้ระบบควบคุม แบบป้อนไปข้างหน้าอย่างเดียวและระบบที่ใช้โครงสร้างผสมทั้งป้อนไปข้างหน้า และป้อนกลับ	27
3.1 แสดงส่วนประกอบของเตาเผาและระบบการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผา ฟลูอิดไฮดรอลิกแบบหมุนเวียน.....	38
3.2 แอลวาล์ว (L-valve).....	38
3.3 ไซโคลน (Cyclone).....	39
3.4 หอดูดซึม (Absorption column).....	39
3.5 เครื่องเป่าอากาศ (Air blower).....	40
3.6 ระบบอุ่นอากาศ (Air preheater)	41

ภาพประกอบ	หน้า
3.7 เครื่องมือใช้วิเคราะห์สมบัติเชิงฟิสิกส์ของชีวมวลและถ่านหิน	
ก. บอมบ์แคลอรีมิเตอร์	
ข. เตาอบ	
ค. เตาเผาไฟฟ้า	
ง. เตาเผาแบบท่อ.....	43
3.8 วงจรอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมต่อกันระหว่างโปรแกรมกับระบบควบคุมอุณหภูมิ ของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	45
3.9 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิของระบบเตาเผา ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	47
4.1 แสดงการเปรียบเทียบความชื้นระหว่างชีวมวลตัวอย่างกับถ่านหิน.....	53
4.2 แสดงการเปรียบเทียบเถ้าระหว่างชีวมวลตัวอย่างกับถ่านหิน.....	53
4.3 แสดงการเปรียบเทียบสารระเหยระหว่างชีวมวลตัวอย่างกับถ่านหิน.....	54
4.4 แสดงการเปรียบเทียบคาร์บอนคงตัวระหว่างชีวมวลตัวอย่างกับถ่านหิน.....	54
4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนระหว่างชีวมวลตัวอย่างกับถ่านหิน.....	55
4.6 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุระหว่างชีวมวลตัวอย่างกับถ่านหิน (Dry Basis).....	55
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงที่เข้าเตาเผากับความถี่ของ อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วมอเตอร์.....	57
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงเมื่ออัตราส่วนถ่านหิน : ชีวมวลตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 1 : 1 ที่เข้าเตาเผากับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วมอเตอร์....	58
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงเมื่ออัตราส่วนถ่านหิน : ชีวมวลตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 2 : 1 ที่เข้าเตาเผากับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วมอเตอร์.....	59
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงเมื่ออัตราส่วนถ่านหิน : ชีวมวลตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 3 : 1 ที่เข้าเตาเผากับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วมอเตอร์...	60
4.11 หน้าต่างโปรแกรมติดต่อกับผู้ใช้งาน.....	61
4.12 กราฟการควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหิน เมื่อใช้ค่าคงที่กระบวนการ ตามสมมติฐานของ Cohen & Coon ($K_c = 14.06 \text{ g } / ^\circ\text{C}$) เมื่อใช้เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที.....	68

ภาพประกอบ	หน้า
4.13 กราฟการควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหิน เมื่อใช้ค่าคงที่กระบวนการตามสมมติฐานของ Cohen & Coon ($K_c = 14.06 \text{ g / } ^\circ\text{C}$) เมื่อใช้เวลาในการเปรียบเทียบ 10 วินาที.....	68
4.14 แผนผังการทำงานของโปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง.....	69
4.15 การควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.525$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง.....	70
4.16 การควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.211$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่านหิน : ซังข้าวโพด = 1:1	70
4.17 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.579$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่านหิน : แกลบ = 1:1.....	71
4.18 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.173$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่านหิน : กากกาแฟ = 1:1	71
4.19 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.952$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่านหิน : ซังข้าวโพด = 2:1	72
4.20 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.172$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่านหิน : แกลบ = 2:1.....	72
4.21 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.917$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่านหิน : กากกาแฟ = 2:1	73

ภาพประกอบ	หน้า
4.22 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิใน ส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.988$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : ซิ่งข้าวโพด = 3:1	73
4.23 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิใน ส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.988$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : แกลบ = 3:1	74
4.24 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิใน ส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.814$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : กากกาแฟ = 3:1	74
4.25 แผนผังการทำงานของโปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิใน ส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ Proportional Integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง	76
4.26 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิใน ส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ Proportional Integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.525$ กับ $\tau_i = 4.75$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาทีโดยใช้ ถ่วงน้ำหนักเป็นเชื้อเพลิง	77
4.27 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิใน ส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.211$ กับ $\tau_i = 4.95$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้ อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : ซิ่งข้าวโพด = 1:1	77
4.28 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิใน ส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.579$ กับ $\tau_i = 5.82$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้ อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : แกลบ = 1:1	78
4.29 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิใน ส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.173$ กับ $\tau_i = 5.59$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้ อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : กากกาแฟ = 1:1	78

บทที่	หน้า
4.30 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบ ป้อนกลับโดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.592$ กับ $\tau_i = 4.45$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้ อัตราส่วนถ่านหิน : ซังข้าวโพด = 2:1	79
4.31 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบ ป้อนกลับโดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.172$ กับ $\tau_i = 4.91$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้ อัตราส่วนถ่านหิน : แกลบ = 2:1	79
4.32 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบ ป้อนกลับโดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.917$ กับ $\tau_i = 4.95$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้ อัตราส่วนถ่านหิน : กากกาแฟ = 2:1	80
4.33 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบ ป้อนกลับโดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.848$ กับ $\tau_i = 5$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้ อัตราส่วนถ่านหิน : ซังข้าวโพด = 3:1	80
4.34 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบ ป้อนกลับโดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.988$ กับ $\tau_i = 5.27$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้ อัตราส่วนถ่านหิน : แกลบ = 3:1	81
4.35 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบ ป้อนกลับโดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.814$ กับ $\tau_i = 4.64$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้ อัตราส่วนถ่านหิน : กากกาแฟ = 3:1	81
4.36 เปรียบเทียบการควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหินระหว่างเครื่องควบคุม แบบ P และ เครื่องควบคุมแบบ PI	82

บทที่	หน้า
5.1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยน อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา.....	103
5.2 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง	103
5.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยน อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา.....	105
5.4 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:ซังข้าวโพด = 3:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง	105
5.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยน อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา.....	107
5.6 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:ซังข้าวโพด = 2:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง	107
5.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยน อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา.....	109
5.8 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:ซังข้าวโพด = 1:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง	109
5.9 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยน อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา.....	111
5.10 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:แกลบ = 3:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง	111
5.11 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยน อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา.....	113
5.12 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:แกลบ = 2:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง	113
5.13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยน อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา.....	115
5.14 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:แกลบ = 1:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง	115

บทที่	หน้า
5.15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา.....	117
5.16 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:กากกาแฟ = 3:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง	117
5.17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา.....	119
5.18 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:กากกาแฟ = 2:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง	119
5.19 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา.....	121
5.20 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:กากกาแฟ = 1:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง	121

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากความก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรมภายในประเทศขยายวงกว้างอย่างรวดเร็วทำให้ความต้องการใช้พลังงานมีมากขึ้น (เฉลิมพร อยู่ประเทศ, 2537) ในปัจจุบันการพัฒนาแหล่งพลังงานต่างๆ ในประเทศมาใช้ประโยชน์ กำลังเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะประเทศไทย เนื่องจากปัญหาทางด้านขาดแคลนพลังงาน ในขณะที่ประเทศไทยยังมีทรัพยากรต่างๆ ที่ยังไม่สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างเต็มที่ เช่น เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถนำมาผสมกับเชื้อเพลิงถ่านหินเพื่อลดต้นทุนเชื้อเพลิงถ่านหินที่ใช้ จึงได้มีการตื่นตัวในการนำทรัพยากรเหล่านี้มาใช้สำหรับหม้อไอน้ำและผลิตกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตามสมบัติทางกายภาพของถ่านหินและชีวมวลต่างๆ ย่อมไม่เหมือนกัน ดังนั้นการปรับเปลี่ยนชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิงผสมย่อมมีผลต่อประสิทธิภาพของการเผาไหม้ โดยเชื้อเพลิงชีวมวลจัดเป็นเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำ ดังนั้นต้องมีเตาเผาที่เหมาะสมในการเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้โดยใช้เตาเผาฟลูอิดไบนด์แบบหมุนเวียนเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถนำมาใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงคุณภาพต่ำได้ดี ให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง และสามารถควบคุมมลพิษได้ง่าย (สุทิน อินยาศรีและจอมใจ ศิริพร, 2526)

การควบคุมอุณหภูมิเพื่อกระบวนการเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงสุด (เก็จวลี พุกษาท, 2533) ทำให้ระบบเตาเผาได้พลังงานความร้อนตามที่ต้องการ โดยมีการใช้เชื้อเพลิงอย่างคุ้มค่าแต่ต้องพัฒนากระบวนการใช้พลังงานอย่างประหยัดและให้ประสิทธิภาพสูงสุด

ปัจจุบันมีการนำเอาเทคโนโลยีที่ทันสมัยเข้ามาประยุกต์ใช้ในการทำงาน (วัชรภรณ์ สุริยาภิวัฒน์, 2531) เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากคือ คอมพิวเตอร์ ทั้งนี้เพราะคอมพิวเตอร์สามารถทำงานได้อย่างสะดวก รวดเร็ว มีความถูกต้องแม่นยำ และมีประสิทธิภาพการทำงานสูง ในประเทศไทยเริ่มแรกได้นำเอาคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้กับงานด้านบัญชีและงานวิจัย ต่อมา มีการนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางขึ้นจนกระทั่งมีการนำเอามาใช้ใน

ขั้นตอนการควบคุมของอุตสาหกรรมเพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น การทำงานของคอมพิวเตอร์จะเป็นรูปแบบใดและมีประสิทธิภาพดีหรือไม่ขึ้นกับโปรแกรมที่ใช้ ถ้าโปรแกรมสามารถแก้ไขปัญหาหรือควบคุมระบบการทำงานได้อย่างดีและถูกต้องแล้ว จึงนับได้ว่าคอมพิวเตอร์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการนำคอมพิวเตอร์มาใช้งานจึงต้องคำนึงถึงโปรแกรมที่ใช้เป็นหลักสำคัญ การเขียนโปรแกรมที่ดีจะต้องทราบ กลไกของตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานของระบบ วัตถุประสงค์ในการนำเอาคอมพิวเตอร์มาใช้งานและความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัว แล้วจึงนำผลดังกล่าวทั้งหมดมาเขียนให้สัมพันธ์ในรูปของโปรแกรม จึงจะได้โปรแกรมที่ควบคุมการทำงานได้อย่างเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษา, ออกแบบ และทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ชีวมวลชนิดต่างๆ ในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน
2. ทำการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเผาไหม้ระหว่างชีวมวลและอากาศ
3. เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมระบบควบคุมอุณหภูมิและระบบการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาและออกแบบวงจรควบคุมอุณหภูมิ
3. ประกอบวงจรตรวจจับอุณหภูมิ และ วงจรควบคุมอุณหภูมิของเครื่องป้อนอากาศและเชื้อเพลิง
4. ศึกษาและออกแบบโปรแกรมการทำงานของระบบ

5. หาอัตราส่วนของอากาศและเชื้อเพลิงที่ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างมีประสิทธิภาพ
6. ประมวลผลการทดลองเพื่อหาสมการเพิ่มเติมในโปรแกรมที่ควบคุมให้เตาเผาทำงานที่อุณหภูมิที่ต้องการ
7. วิเคราะห์ สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

ได้โปรแกรมและระบบควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาแบบหมุนเวียนที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล (อภิชัย เทอดเทียนวงษ์, 2528) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร

ชีวมวล สามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ออกมาเป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงก็จะได้พลังงานออกมา

การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวล สามารถใช้ได้ทั้งในรูปของพลังงานความร้อน ไอน้ำ หรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า โดยจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดใดชนิดหนึ่งที่กล่าวมาข้างต้น หรือหลายชนิดรวมกันก็ได้

ชีวมวลจึงเป็นแหล่งเชื้อเพลิงราคาถูก หากมีการใช้ประโยชน์ในบริเวณที่ไม่ไกลจากแหล่งเชื้อเพลิงมากนัก เพื่อลดต้นทุนในการขนส่ง

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม (สมบัติ นิธิจิมณีรัตน์, 2531) ดังนั้นจึงมีของเหลือใช้หรือเหลือทิ้งจากการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวหลายชนิด และอุตสาหกรรมของประเทศส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมการเกษตร ดังนั้นจึงมีวัสดุเหลือทิ้งมากมาย สิ่งต่างๆ เหล่านี้สามารถนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงทดแทนฟืนและถ่านได้ทั้งสิ้น การนำชีวมวลมาใช้จึงช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนท้องถิ่น นอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม จะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะและไม่สร้างภาวะเรือนกระจก เนื่องจากการปลูกทดแทนทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปลดปล่อยเพิ่มเติม โดยมุ่งหวังว่าการพัฒนาโครงการเกี่ยวกับชีวมวลจะสามารถเสริมสร้างความเข้มแข็งและ การมีส่วนร่วมของชุมชนได้อีกด้วย

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกออกได้ 4 ประเภท (ฐานันดร สดแสงสุก, นริ ธนพัฒนากุล, วิชาญ บันพันธ์ และ เอกพัชร เจริญลาภ, 2537) คือ

1. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้(Forest Biomass) ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็นไม้เนื้ออ่อน (Soft wood) และแข็ง(Hard wood) ได้แก่ เศษไม้ เปลือกไม้ กิ่งไม้ และพวกซี้เลื่อย
2. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร(Agriculture Biomass) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด แกลบ เป็นต้น
3. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรมเกษตร(Industrial waste) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากโรงงานน้ำตาล ได้แก่ ซานอ้อย นอกจากนี้ยังมีกากสับปะรดที่ได้จากโรงงานทำสับปะรดกระป๋อง เชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีประมาณความร้อนสูงมาก
4. เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากมนุษย์(Domestic waste) ได้แก่ เชื้อเพลิงที่ได้จากขยะเทศบาล

สรุปข้อดีการใช้ชีวมวลเป็นพลังงาน (ศิริมล สูงสว่าง, 2526)

1. การเผาน้ำมันเตาและถ่านหินก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งถือว่าเป็นแก๊สเรือนกระจก จะทำให้โลกร้อนขึ้น แต่การเผาชีวมวลไม่ถือว่าการก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจก เพราะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกหมุนเวียนกลับไปใช้โดยพืช
2. การไม่นำชีวมวลมาใช้ โดยปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ จะเกิดแก๊สมีเทนซึ่งถือว่าเป็นแก๊สเรือนกระจกชนิดหนึ่ง และมีอันตรายกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 21 เท่า
3. ชีวมวลจะมีกำมะถัน หรือซัลเฟอร์ ไม่เกินร้อยละ 0.2 ดังนั้นการนำชีวมวลมาเผาไหม้ จะไม่สร้างปัญหาเรื่องฝนกรด (น้ำมันเตามีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 2 ส่วนถ่านหินมีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 0.3-3.8 ซึ่งขึ้นกับประเภทของถ่านหิน)
4. ซี้เถ้าของชีวมวลมีสภาพเป็นต่าง ดังนั้นเหมาะสมที่นำไปเพาะปลูก หรือปรับสภาพดินที่เป็นกรด นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก และซีเมนต์
5. การนำชีวมวลมาใช้ นอกจากจะก่อให้เกิดรายได้แก่ผู้ผลิตชีวมวลแล้ว ยังลดภาระในการกำจัด เช่น นำไปฝังกลบ หรือเผาทิ้ง เป็นต้น
6. ก่อให้เกิดรายได้ การสร้างงานในชุมชน

7. ประหยัดเงินตราต่างประเทศเพราะลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ เช่น น้ำมันเตา และถ่านหิน เป็นต้น
8. ถ้าโรงไฟฟ้าชีวมวลตั้งกระจายอยู่ตามที่ต่างๆ จะช่วยเสริมการจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าภูมิภาค ได้เป็นอย่างดีเช่น แรงดันไฟฟ้าไม่ตก แต่จะสม่ำเสมอ ลดการสูญเสียในสายไฟฟ้าและ หม้อแปลงลง

สรุปข้อเสียการใช้ชีวมวลเป็นพลังงาน (ศิริมล สูงสว่าง, 2526)

1. ชีวมวลมีน้ำหนักเบา ถ้าขนส่งชีวมวลทางรถบรรทุก ต้องขนส่งมากเที่ยว ซึ่งจะทำให้มีค่าใช้จ่ายมากขึ้นแล้ว ยังอาจมีผลกระทบต่อชุมชนในด้านการจราจร ความปลอดภัยในการใช้ถนน
2. เนื่องจากชีวมวลมีความชื้นสูง การออกแบบหม้อผลิตไอน้ำและปล่องไอเสียต้องมีขนาดใหญ่ตลอดจนถึงการติดตั้งอุปกรณ์ลดความชื้นเพิ่มเติม ซึ่งทำให้เงินลงทุนมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าชีวมวลมีความชื้นหลากหลายหม้อผลิตไอน้ำอาจทำงานได้ไม่เต็มที่
3. ไข่ไก่ชีวมวลมีจุดหลอมเหลวต่ำ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงเกินไป จะทำให้ไข่ไก่หลอมละลายติดในห้องเผาไหม้ ซึ่งมีผลให้หม้อผลิตไอน้ำมีประสิทธิภาพลดลง เพราะเกิดการอุดตัน
4. ชีวมวลบางประเภทมีส่วนผสมของอัลคาไลน์ ซึ่งจะกัดกร่อนท่อไอน้ำในหม้อผลิตไอน้ำ ดังนั้นในการออกแบบหม้อผลิตไอน้ำต้องคำนึงถึงจุดนี้

2.2 การวิเคราะห์ชีวมวล (ภาคผนวก ก.)

เนื่องจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแตกต่างกันตามประเภท เช่น ความชื้น ปริมาณคาร์บอน และ ค่าความร้อน จึงทำให้เชื้อเพลิงให้พลังงานในการสมบัติของเชื้อเพลิงสามารถวิเคราะห์ได้ โดยใช้มาตรฐาน ASTM D3172, D3173, D3174, D3175 และ D2015 ในการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ 2 แบบ (เฉลิมพร อยู่ประเทศ, 2537)

- การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate Analysis) การวิเคราะห์แบบนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับเชื้อเพลิงแข็งเมื่อได้รับความร้อน กล่าวคือ ทำให้ทราบถึงปริมาณสารระเหย

คาร์บอนคงตัว ปริมาณความชื้น และเถ้า ในส่วนของวิเคราะห์ค่าความร้อนจะวิเคราะห์แยกต่างหาก

- การวิเคราะห์โดยละเอียด (Ultimate Analysis) เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงว่าประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง เช่น คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และเถ้า ทำให้สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณของอากาศที่ใช้ น้ำหนักของไอน้ำ และจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์โดยละเอียดจะให้ข้อมูลที่เป็นส่วนประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง ไม่ได้ชี้ถึงสมบัติทางฟิสิกส์หรือการเผาไหม้แต่อย่างใด

การวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิงรูปแบบนี้จะเป็นตัวบ่งบอกในการเลือกเชื้อเพลิงและปริมาณที่ต้องใช้ในการเผาไหม้เพื่อให้ได้ความร้อนตามที่ต้องการ

2.3 การนำเอาเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ประโยชน์ (ฐานันดร สดแสงสุก, นทีธร ธนพัฒนานุกุล, วิษณุ บัณฑิตชัย และเอกพัชร เจริญลาภ, 2537)

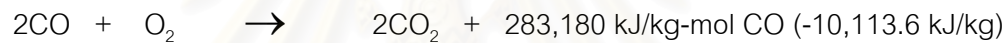
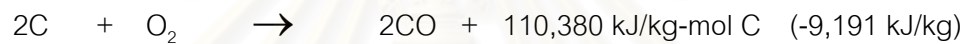
การใช้ประโยชน์จากชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานโดยวิธีทางความร้อนเคมีมีได้หลายกระบวนการ ดังนี้

- การเผาไหม้โดยตรง(Direct Combustion) เป็นวิธีที่ใช้กันมากในการนำชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการเผาไหม้จะได้ความร้อนและนำแก๊สร้อนไปใช้ในการอบแห้ง และผลิตไอน้ำที่มีความดันสูงใช้ในการให้ความร้อนและผลิตกระแสไฟฟ้า เชื้อเพลิงที่นิยมใช้คือ ชีวชีวมวล เศษไม้ แกลบข้าว และเปลือกถั่วลิสง
- กระบวนการไพโรไลซิส(Pyrolysis) เป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบไม่ผันกลับ โดยใช้ความร้อนในที่ซึ่งไม่มีแก๊สออกซิเจนอยู่ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว เช่น น้ำมัน น้ำ และทาร์ ของแข็งที่เหลือจากกระบวนการดังกล่าวได้แก่ คาร์บอน และขี้เถ้า
- กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน(Gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงแก๊ส โดยการเกิดกระบวนการไพโรไลซิสก่อน ในที่ๆ มีอากาศ หรือปริมาณออกซิเจนน้อย และมีไอน้ำ หรือคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ทำปฏิกิริยากับ ถ่าน และทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสให้เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน

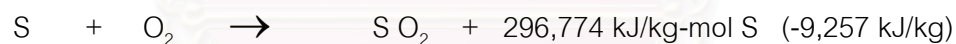
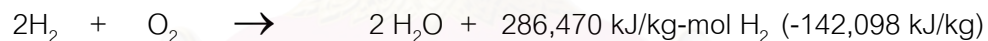
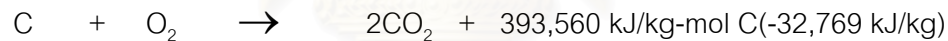
- กระบวนการไดเรกต์ลิวแฟคชั่น(Direct Liquefaction) เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยารีดักชั่น (Reduction) เพื่อที่จะเปลี่ยนเชื้อเพลิงชีวมวลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันหรือสารเคมี โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ไฮโดรเจน หรือคาร์บอนมอนอกไซด์และตัวทำละลายที่ดี ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์เคมีใช้ความดันและอุณหภูมิสูง

2.4 ทฤษฎีการเผาไหม้ (เบญจวรรณ วณิชยาเนนทร์, 2537)

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีชนิดหนึ่งซึ่งปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งเป็นการรวมตัวของออกซิเจนเข้ากับคาร์บอน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ เกิดเป็นสารประกอบคือคาร์บอนไดออกไซด์ ใอน้ำ และ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอนคือ



ซึ่งอาจเขียนรวมกันได้เป็น



นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาปฏิกิริยาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้อีกมากเช่น



โดยปกติแล้วจะไม่นำมาคิดเพื่อความสะดวกในการคำนวณทางด้านการเผาไหม้

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ (สมศักดิ์ ดำรงเลิศ, 2524)

การเผาไหม้เกิดได้ดีต้องมีภาวะเหมาะสม นั่นคือ

- มีอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนหรืออากาศ ในทางปฏิบัติต้องป้อนอากาศในปริมาณมากกว่าปริมาณที่ต้องการทางทฤษฎี(ปริมาณน้อยที่สุดของอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์) อากาศที่ต้องการตามทฤษฎีนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ ปฏิกิริยาการที่เห็นได้ชัดของการสันดาปไม่สมบูรณ์คือการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนในไอเสีย เพื่อแก้ปัญหาจึงต้องใช้ปริมาณอากาศเกินพอสำหรับการสันดาปที่สมบูรณ์ กล่าวคือในการเผาไหม้เพื่อที่จะให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ จึงต้องเพิ่มปริมาณอากาศขึ้นจนเพียงพอ ซึ่งจะได้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงสูงกว่าอัตราส่วนตามทฤษฎี อากาศที่เกินจากที่ต้องการนั้นเรียกว่าอากาศมากเกินพอ คำนวณได้จาก

$$\% \text{ excess air} = \frac{(\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง} - \text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี}) \times 100}{\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี}}$$

- อุณหภูมิที่สูงพอต่อการเผาไหม้ การเผาไหม้เชื้อเพลิง หรืออัตราการรวมตัวกันทางเคมีของเชื้อเพลิงกับอากาศนั้นจะขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นในตอนแรก และเกิดต่อไปเรื่อยๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะไปเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้สูงขึ้นทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นสิ่งที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้แบบเกิดขึ้นเองและต่อเนื่อง นั้นจะต้องมีปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเริ่มปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมามากขึ้นจนมีอุณหภูมิสูงพอจนเกิดการเผาไหม้แบบต่อเนื่องได้เอง โดยปกติแล้วในการเผาไหม้นั้นต้องการให้มีอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้เร็ว แต่การที่จะให้มีอุณหภูมิสูงได้มากนักก็ยาก มีข้อจำกัดที่สำคัญคือชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยหากอุณหภูมิสูงเกินไป อาจจะทำให้เกิดข้อเสียได้ คือ ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นสารที่ไม่ต้องการเช่น สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน(NO_x) หรืออาจทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นซิลิไซด์(Slag) เกาะติดที่ผนังที่เป็นเหล็กที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงและอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนได้

- เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาควรจะนานพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ให้ได้มากที่สุด แต่การที่ต้องการให้ผลสมบูรณ์คือเชื้อเพลิงเกิดการเผา

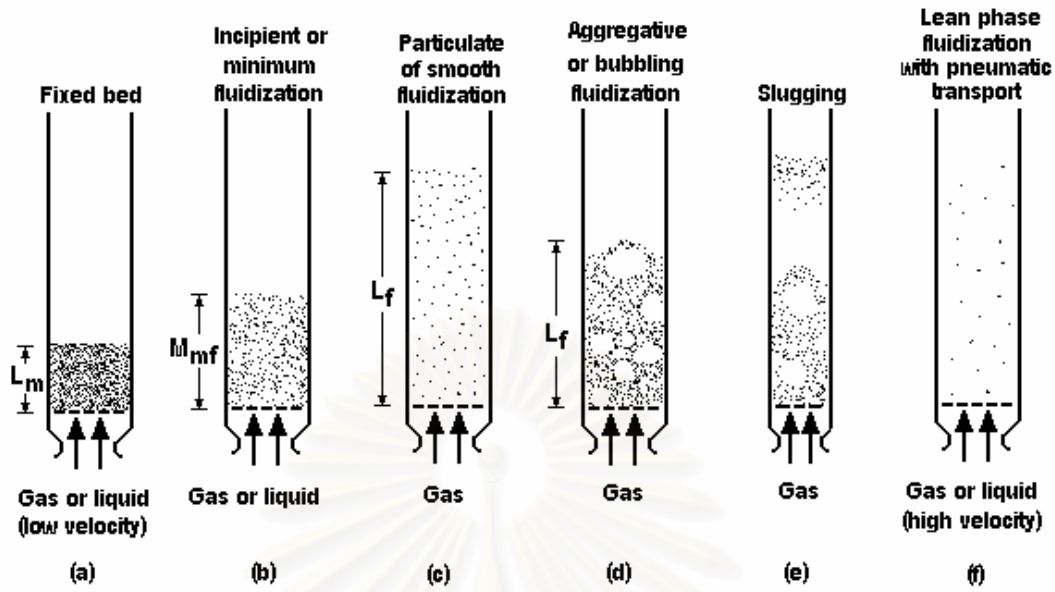
ใหม่จนหมดนั้นย่อมเป็นไปได้ยาก เพราะต้องใช้เวลาาน และทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นด้วย เพราะต้องใช้เตาเผาที่มีประสิทธิภาพสูงและขนาดใหญ่มาก หรืออาจจะต้องระบบไหลเวียนของเชื้อเพลิงกลับมาใหม่

2.6 เทคนิคทางฟลูอิดเซชัน (เบญจวรรณ วรวิชาเณทร์, 2537) (Fluidization)

ฟลูอิดเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่ของแข็งขนาดเล็กถูกทำให้อยู่ในสภาพคล้ายของไหลด้วยการพองของแก๊สหรือของเหลวที่ไหลผ่านเบดของของแข็งขึ้นไปด้านบนด้วยอัตราการไหลค่าหนึ่ง โดยอาจจะมีถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในขณะที่มีการสัมผัสระหว่างของแข็งกับของไหลนั้น สามารถแบ่งเทคนิคทางฟลูอิดเซชันออกเป็น 2 ประเภท คือ การฟลูอิดเซชันของเหลว (Liquid-solid Fluidization) และการฟลูอิดเซชันของแก๊ส (Gas-solid Fluidization)

2.6.1 ฟลูอิดเบด (สมศักดิ์ ดำรงเลิศ, 2524)

ลักษณะการเกิดฟลูอิดเบดมีขั้นตอนดังนี้คือ ในขณะที่ของไหล ไหลผ่านเบดของอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็ก ในทิศทางจากด้านล่างสู่ด้านบนด้วยอัตราการไหลค่อนข้างต่ำ เบดจะอยู่ในสภาพนิ่ง (Fixed bed) การไหลของของไหลจะก่อให้เกิดแรงดูด (Drag force) กระทำบนผิวของอนุภาคของแข็ง และมีทิศทางตามการไหลของของไหล แรงดูดที่เกิดขึ้นจะพยายามทำให้อนุภาคของแข็งลอยตัวขึ้นแต่แรงโน้มถ่วง (น้ำหนักของอนุภาค) ซึ่งกระทำในทิศทางตรงข้ามมีมากกว่า จึงทำให้เบดอยู่กับที่ เมื่ออัตราการไหลของของไหลที่ผ่านเบดสูงขึ้น จะมีผลให้แรงดูดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงความเร็วค่าหนึ่ง แรงทั้งสองที่กระทำบนอนุภาคของแข็งจะสมดุลกัน ภายใต้ภาวะการณีนี้อนุภาคของของแข็งแต่ละตัวมีอิสระในการเคลื่อนที่ เนื่องจากของไหลช่วยพยุงเอาไว้ เบดที่อยู่ในสภาพนี้เรียกว่า ฟลูอิดเบด (Fluidized bed) และที่จุดนี้เรียกว่า จุดต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum Fluidization) การเพิ่มขึ้นของการไหลที่สูงกว่าค่าความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดเซชันในระบบแก๊ส-ของแข็งมักจะมีพฤติกรรมต่างจากระบบของเหลว-ของแข็ง คือพบว่ามีเกิดการเกิดฟองอากาศ (Bubble Fluidization bed) หรือฟลูอิดเบดของแก๊ส (Gas Fluidization Bed) ซึ่งต่างจากในระบบฟลูอิดเซชันของของแข็งกับของเหลว ซึ่งการขยายตัวของชั้นของแข็งจะสม่ำเสมอจึงเรียกว่า ฟลูอิดเบดแบบสม่ำเสมอ หรือ ฟลูอิดเบดของของเหลว แสดงดังรูปที่ 2.1



รูป

ที่ 2.1 ปรัชการณรฟลูอิดเซชันแบบต่าง ๆ

แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราการไหลเพิ่มสูงจนถึงความเร็วสุดท้ายของการเกิดฟลูอิดเซชัน (Terminal Velocity) ของของแข็งแล้ว ของแข็งจะถูกพัดพาออกไปจากเบดไปกับของไหล เรียกว่า จุดนี้ว่า ฟลูอิดเบดแบบเฟืองจาง (Lean Phase Fluidized Bed) แสดงดังรูปที่ 2.1 ปรัชการณรฟลูอิดเซชันเบดที่น่าสนใจอีกอย่างของของแข็ง-แก๊สฟลูอิดเซชัน คือ การที่ฟองแก๊สเกิดรวมตัวกัน และมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อฟองแก๊สลอยขึ้นมา ทำให้ชั้นของของแข็งถูกฟองแก๊สผลักดันขึ้นไป เมื่อฟองแก๊สแตกอนุภาคของแข็งจะตกกลับลงมาอีก เรียกปรัชการณรนี้ว่าเกิด Slugging ซึ่งในกระบวนการฟลูอิดเซชันเบดมักไม่ต้องการให้เกิด เนื่องจากเพิ่มปัญหาของการพัดพาอนุภาคไปและ ลดประสิทธิภาพการทำงานของเบด ปรัชการณรนี้มักพบในฟลูอิดเซชันเบดที่แคบและสูง

2.6.2 ความดันตกคร่อมฟลูอิดเซชันเบด

เมื่อของไหลไหลผ่านเบดของอนุภาคของแข็งขึ้นไป ในตอนแรกเบดจะอยู่ในสภาพนิ่ง การไหลของของไหลจะเป็นแบบราบเรียบ ความดันตกที่เกิดในช่วงความเร็วการไหล (U_0) หรือ เลขเรย์โนลด์ต่ำ ซึ่งจะมีกรณีพิเศษคือ สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก และ $Re_p < 20$ ค่า Form drag มีความสำคัญมากเพียงอย่างเดียว

$$U_{mf} = d_p g (\rho_s - \rho_f) / 1650 \mu \dots\dots\dots(2.1)$$

สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ และ $Re > 1000$ ค่า Kinetic loss มีความสำคัญเพียงอย่างเดียว

$$U_{mf} = \{d_p g (\rho_s - \rho_f) / 25.5 \rho_s\}^{1/2} \dots\dots\dots(2.2)$$

2.7 เตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (ศิริมล สูงสว่าง, 2526)

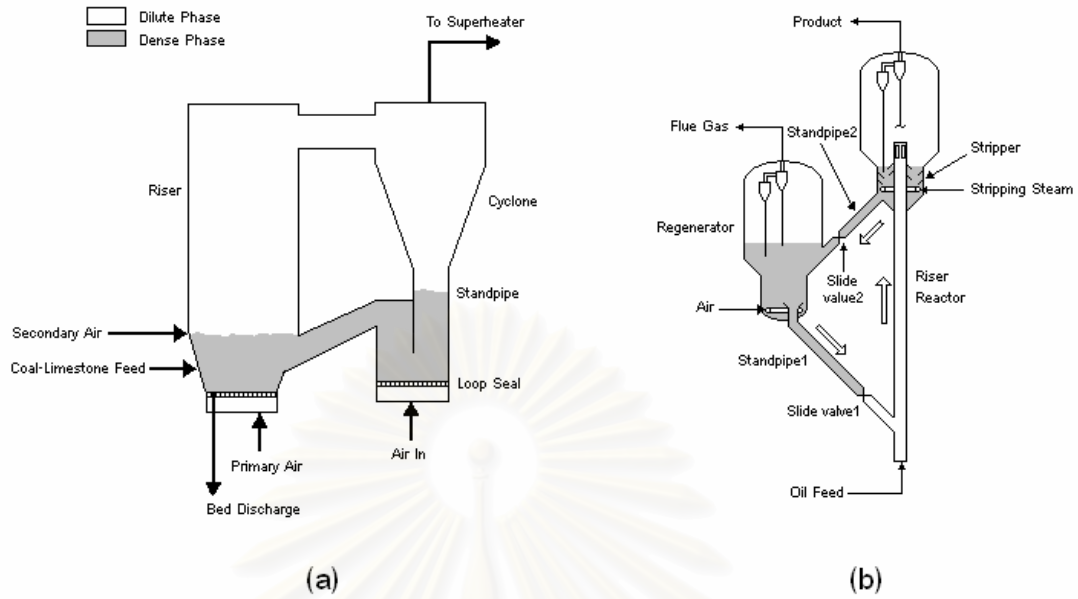
เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบ่งตามเทคนิคของการออกแบบเตาเผาได้เป็นหลายแบบ เช่น

- เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองอากาศ
(Bubbling Fluidized Bed Combustor)
- เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบความดันสูงกว่าบรรยากาศ
(Pressurized Fluidized Bed Combustor)
- เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน
(Circulation Fluidized Bed Combustor)
- เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบใช้เชื้อเพลิงแข็งได้หลายขนาด
(Multisolid Fluidized Bed Combustor)

2.8 ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulation Fluidized Bed ; CFB)

ระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน เป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการสัมผัสระหว่างแก๊สกับเม็ดของแข็งที่ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกโดย Winkler (Grace, J. R., Avedan, A. A., and Knowlton, T.M., 1997) และถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมโดย Warren Lewis และ Edwin Gilliland แห่ง Massachusetts Institute of Technology, MIT ซึ่งพยายามที่จะหารูปแบบของการสัมผัสกันระหว่างแก๊สกับเม็ดของแข็งที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการ Fluid catalytic cracking (FCC) และพบว่าระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน ซึ่งมีจลนพลศาสตร์เป็นแบบ Fast fluidized bed เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง และเหมาะสมในการใช้งาน

การนำระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนไปใช้งานโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น Circulating fluidized bed combustion (CFBC) และ Fluid catalytic cracking (FCC) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เครื่อง CFBC ในรูป (a) และ FCC ในรูป (b) (Grace, J. R., Avedan, A. A., and Knowlton, T. M., 1997)

ระบบฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนจะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

1. ส่วนที่ทำงานภายใต้ภาวะการเกิดฟลูอิโดซ์เบดที่ความเร็วสูง (Fast fluidized bed) ทางด้านท่อไรเซอร์
2. Gas-Solid Separator เช่น Cyclone ทำหน้าที่ดักจับเม็ดของแข็งที่หลุดออกมาจากท่อไรเซอร์
3. Standpipe และระบบท่อป้อนกลับ (Return system) ทำหน้าที่ป้อนเม็ดของแข็งที่ได้จาก Cyclone กลับไปยังด้านล่างของท่อไรเซอร์ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของเม็ดของแข็งในระบบ

2.9 กระบวนการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบด (สมศักดิ์ ดำรงเลิศ, 2524)

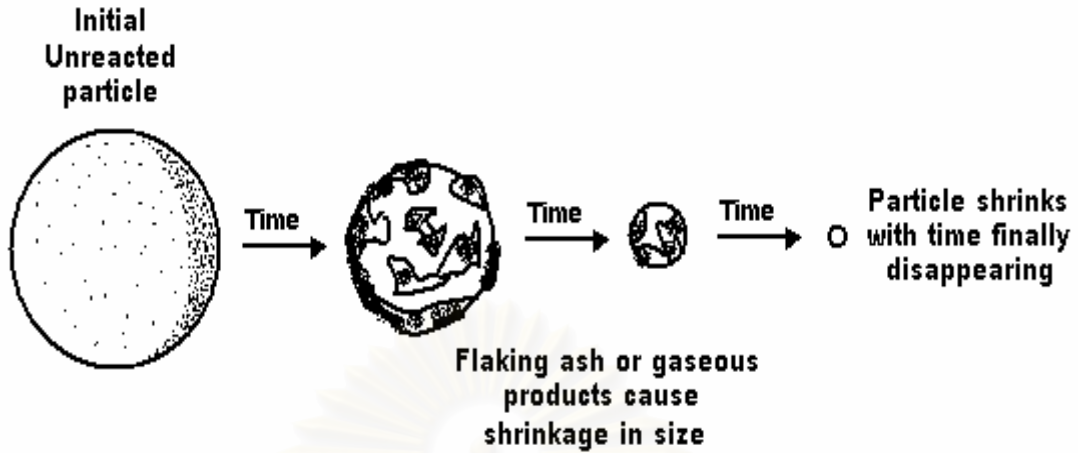
ในชีวมวลมีสารที่เรียกว่า เเผาไหม้ได้ (Combustible) และสารพวกเผาไหม้ไม่ได้ (Noncombustible) สารพวกเผาไหม้ได้ประกอบไปด้วย คาร์บอนคงตัว และ Volatile matter ส่วนสารเผาไหม้ไม่ได้ประกอบไปด้วย ความชื้น และเถ้า ในระบบการเผาไหม้ชีวมวลที่มีขนาดเล็ก ถูกพองให้ลอยตัวอยู่ในแก๊สโดยกระแสลมที่มีความเร็ว เบดและชีวมวลจะลอยกระจายอย่างสม่ำเสมอ และคลุกเคล้ากับอากาศในลักษณะคล้ายน้ำเดือด ทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น ชีวมวลอาจจะ

เผาไหม้ได้สูงถึงร้อยละ 97-99 โดยกระบวนการเผาไหม้ชีวมวลขนาดใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตร ในเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดมีขั้นตอนดังนี้ (ธนุทัย มงคลเลิศสิริกุล, 2537)

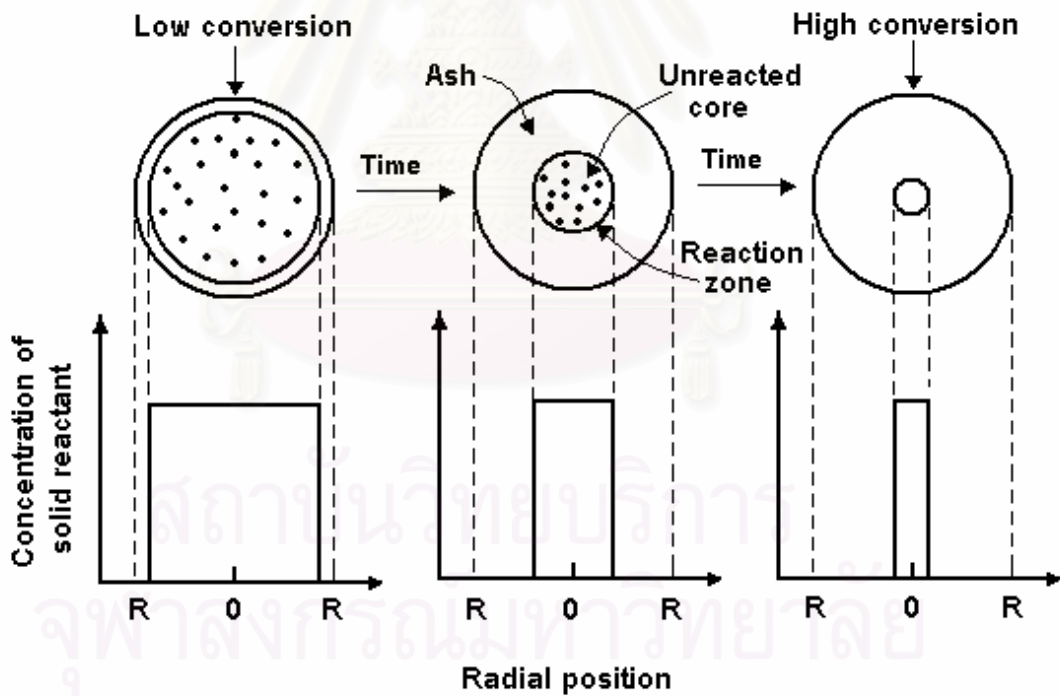
- Drying เป็นการกำจัดความชื้นในอนุภาคชีวมวลขณะเริ่มต้นรับความร้อนในเตาเผา
- Devolatilization เป็นขั้นตอนการสลายตัวของชีวมวลเกิดเป็นสารระเหย
- Ignition of volatile เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการจุดประกายไฟของสารระเหยที่ถูกปล่อยออกมา และอาจอยู่ล้อมรอบอนุภาคชีวมวลหรือไม่อยู่ที่ใดขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทำงาน
- Combustion of volatile เป็นกระบวนการเผาไหม้สารระเหย
- Ignition of char particle เป็นกระบวนการจุดประกายบนผิวหน้าของถ่านที่เหลือโดยเริ่มจากเป็นจุดเล็กๆ ที่ผิวด้านนอก แล้วค่อยๆ ขยายออกไปจนเกิดทั่วทั้งอนุภาค
- Combustion of residual char particle เป็นกระบวนการเผาไหม้อนุภาคถ่านที่เหลือหลังจากสารระเหย ระเหยออกจากอนุภาคชีวมวลบางส่วนหรือหมดแล้ว เมื่อเผาไหม้หมดจะเหลือเป็นขี้เถ้า

2.10 การเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไธด์เบด (สมบัติ นิธิภูมิรัตน์, 2531)

การเผาไหม้ในเตาฟลูอิดไธด์เบดว่าจะเกิดขึ้นโดยเชื้อเพลิงจะถูกพองให้ลอยตัวด้วยแก๊สหรืออากาศที่เข้าสู่เตาเผาโดยผ่านแผ่นกระจายลมเชื้อเพลิงจะมีสภาพคล้ายของไหล ภายในเตาเผาจะมีเบดที่ร้อน เช่น ทราบ หรือ ถ้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ เพื่อช่วยทำให้เกิดการผสมผสานของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนได้ดีและช่วยทำให้ถ้ำที่เกาะกับเชื้อเพลิงนั้นหลุดลอยออกไปกับแก๊ส ผิวของเชื้อเพลิงจึงสามารถสัมผัสกับออกซิเจนได้ตลอดเวลาทำให้เกิด การเผาไหม้ได้ดี แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะต่างกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งทั่วไปซึ่งจะเกิดการเผาไหม้ที่ผิวของเชื้อเพลิงก่อน จากนั้นบริเวณของการเกิดปฏิกิริยาก็จะค่อยๆ เคลื่อนเข้าไปโดยเหลือส่วนที่เกิดจากการเผาไหม้คือถ้ำไว้เป็นสารเฉื่อยทำให้เชื้อเพลิงมีโอกาสสัมผัสออกซิเจนลดลง ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเผาไหม้จะค่อยๆ ลดลงจนเผาไหม้หมดทั้งก้อนแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในเตาฟลูอิไดซ์เบด



รูปที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาโดยทั่วไปของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

2.11 ข้อดีและข้อเสียของฟลูอิดเซชัน (สุทิน อินยาศรี และจอมใจ ศิริพร, 2526)

ข้อดีและข้อเสียระหว่างการใช้เทคนิคฟลูอิดเซชันกับเทคนิคอื่นๆ มีรายละเอียดดังนี้

ข้อดี

- เนื่องจากเม็ดของแข็งมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมกันได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบตคองที่ตลอดซึ่งต่างจากเบตนิ่งหรือเบตบรรจุ อุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบต
- มีการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็ง เม็ดที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบนและเม็ดที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลยังน้อยกว่ามาก
- จากสมบัติที่คล้ายของไหล จึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือ ปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบตและไหลเติมเข้าไปในเบตได้ การควบคุมจึงทำได้โดยง่าย
- การที่เม็ดของแข็งไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบต เม็ดของแข็งนี้สามารถที่จะเป็นตัวนำความร้อนจากผนังแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่าเพราะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วของไหลอันเดียวกัน ฟลูอิดเซชันจึงเหมาะสมกับกระบวนการที่มีปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนหรือดูดความร้อนปริมาณมากๆ
- พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งและของไหลจะมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบตนิ่งที่ใช้จำนวนเม็ดของแข็งที่เท่ากันจึงมีประโยชน์ในการขยายงานทั้งการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร
- การทำงานด้วยฟลูอิดเซชันจะเสียพลังงานน้อยกว่าเพราะแรงเสียดทานและความดันตกของเบตน้อยกว่าในแบบบรรจุมาก
- สามารถกำจัดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้โดยไม่ต้องหยุดเครื่องทำงาน
- สามารถใช้ในการขนส่งเม็ดของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

ข้อเสีย

- เวลาที่ของไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็งนั้นสั้นมาก จึงอาจจะต้องใช้เบตสูงๆ หรือเบตหลายชั้น ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองต่อการลงทุนมาก

- มักเกิดฟองแก๊สในเบดเมื่อทำงานกับแก๊ส ทำให้การสัมผัสไม่ดีเป็นการสูญเสียเปลว ถ้ายังเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว จะทำให้ร้อยละการเกิดปฏิกิริยาลดลง
- เนื่องจากเกิดการผสมกันอย่างรวดเร็ว บางครั้งเม็ดของแข็งมีช่วงเวลาอยู่ในเบดสั้นเกินไป เมื่อทำงานแบบต่อเนื่องทำให้ผลลัพธ์เลวลงหรือเม็ดของแข็งมีสมบัติทางกายภาพไม่ตรงตามข้อกำหนด
- การทำงานมีข้อจำกัดเพราะถ้าความเร็วของของไหลมีค่าสูงเกินไป เม็ดของแข็งก็จะหลุดออกจากเบดไปพร้อมกับของไหล
- ในปฏิกิริยาที่ทำให้ตัวเร่งมีขนาดเล็กลง ต้องคอยปรับความเร็วของแก๊สเพื่อไม่ให้ตัวเร่งปลิวไป ซึ่งจะทำให้ได้ผลผลิตลดน้อยลง
- ใช้กับเม็ดของแข็งที่เปื่อยหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่ และตกลงมายังส่วนล่างของเบด

2.12 การควบคุมการเผาไหม้เชื้อเพลิงในฟลูอิดไคซ์เบด (สุกัญญา พนมอุทัย, บงกช พิพิธรังษี และอุไรภรณ์ อัมพามาต, 2545)

การควบคุมการเผาไหม้เชื้อเพลิงในฟลูอิดไคซ์เบดนั้นเสมือนกับว่าเป็นการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาให้มีค่าคงที่ตามต้องการ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นมากเนื่องจากถ้าของเชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้และค้างอยู่ในเตา เมื่ออุณหภูมิในเตามีค่าสูงถ้าจะหลอมตัวแล้วรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่ (Slag) ถ้ามีมากจะทำให้อากาศผ่านได้ลำบากอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะลดลง วิธีการควบคุมอุณหภูมิในเบดทำได้หลายวิธี คือ

- ควบคุมระดับความสูงของเบด โดยใช้ท่อระบายเชื้อเพลิงส่วนเกิน(Overflow tube)
- ควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิง โดยการปรับอัตราเร็วของระบบการป้อน เช่น อัตราการหมุนของสกรู
- ควบคุมความเร็วหรือปริมาณของอากาศ โดยผ่านอากาศที่มากเกินไป(Excess air) เพื่อดึงความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนออกจากเตาเผา
- ควบคุมโดยผ่านท่อถ่ายเทความร้อน(Heat exchanger) โดยใช้ท่อโลหะขดวางอยู่ในเบดที่บริเวณฟริบอร์ตหรือบริเวณอื่นของเตาโดยมีน้ำหรือไอน้ำไหลผ่านด้วยความเร็วพอเหมาะ

การควบคุมอุณหภูมิในเบตส่วนใหญ่ว่าจะควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ ซึ่งสามารถประยุกต์เอาเครื่องควบคุมมาใช้ในการควบคุมด้วย เครื่องควบคุมที่ใช้กันโดยทั่วไปมีเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด (On-off control), เครื่องควบคุมแบบ Proportional (P), เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral (PI) และเครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID) หรืออาจจะประยุกต์เอาเครื่องคอมพิวเตอร์มาใช้ควบคุมให้ได้รูปแบบการควบคุมต่างๆ ตามที่ต้องการ

2.13 ระบบการควบคุมกระบวนการทางเคมี (เก็จวลี พฤษภาทร, 2533)

ในการผลิตหรือปฏิบัติงานของกระบวนการเคมีต่างๆ ไปนั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงหลายอย่างด้วยกันคือ ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม ชีตความสามารถหรือข้อจำกัดของอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ และความประหยัด เป็นต้น แต่ในส่วนของการควบคุมกระบวนการต่างๆ นั้น นอกจากจะต้องทราบวัตถุประสงค์ที่ต้องการจะควบคุมแล้วยังมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงโดยทั่วๆ ไป 3 ประการ คือ

1. อิทธิพลของตัวแปรภายนอกที่มีต่อระบบ คือ ทราบว่าตัวแปรภายนอกเหล่านั้นมีผลต่อตัวแปรที่จะควบคุมอย่างไร เพื่อนำมาใช้พิจารณาเลือกรูปแบบการควบคุม และเครื่องควบคุมให้เหมาะสม
2. ระบบอยู่ในภาวะคงที่หรือไม่ คือ ตัวแปรของระบบสามารถอยู่ในภาวะเดิมหรือเปลี่ยนแปลงไปในช่วงที่ยอมรับได้เมื่อเวลาเปลี่ยนไป ถ้าระบบไม่สามารถอยู่ในภาวะคงที่ได้จะต้องควบคุมอย่างไรให้ระบบอยู่ในภาวะคงที่ได้
3. ด้านเศรษฐกิจ คือ เลือกลงควบคุมในช่วงที่จะให้ได้ผลตามวัตถุประสงค์ แต่ให้ผลกำไรมากที่สุด

ในกระบวนการเคมีสามารถแบ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 กลุ่ม (Stephanopoulos, G., 1984) คือ

- ตัวแปรป้อนเข้า (Input variables) คือ ตัวแปรจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการของระบบ แบ่งเป็น
 - ก. ตัวแปรปรับค่าได้ (Manipulated variables) คือ ตัวแปรป้อนเข้าที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้อย่างอิสระโดยผู้ควบคุมหรือเครื่องควบคุม

ข. ตัวแปรคงที่(Disturbances variables) คือ ตัวแปรป้อนเข้าที่มีค่าเฉพาะไม่สามารถเปลี่ยนค่าได้อย่างอิสระโดยผู้ควบคุมหรือเครื่องควบคุม

- ตัวแปรป้อนออก (Output variables) คือ ตัวแปรที่เป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการของระบบและมีอิทธิพลต่อสิ่งแวดล้อมนั้น แบ่งเป็น

ก. ตัวแปรวัดค่าได้(Measured output variables) คือ ตัวแปรป้อนออกที่สามารถใช้อุปกรณ์ต่างๆ วัดค่าได้โดยตรง

ข. ตัวแปรวัดค่าไม่ได้ (Unmeasured output variables) คือ ตัวแปรป้อนออกที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงด้วยเครื่องวัด แต่อาจจะได้จากการคำนวณหรือการแปลงค่า

ในระบบการควบคุมต่างๆ ไปนั้นจะมีองค์ประกอบของระบบดังนี้ คือ

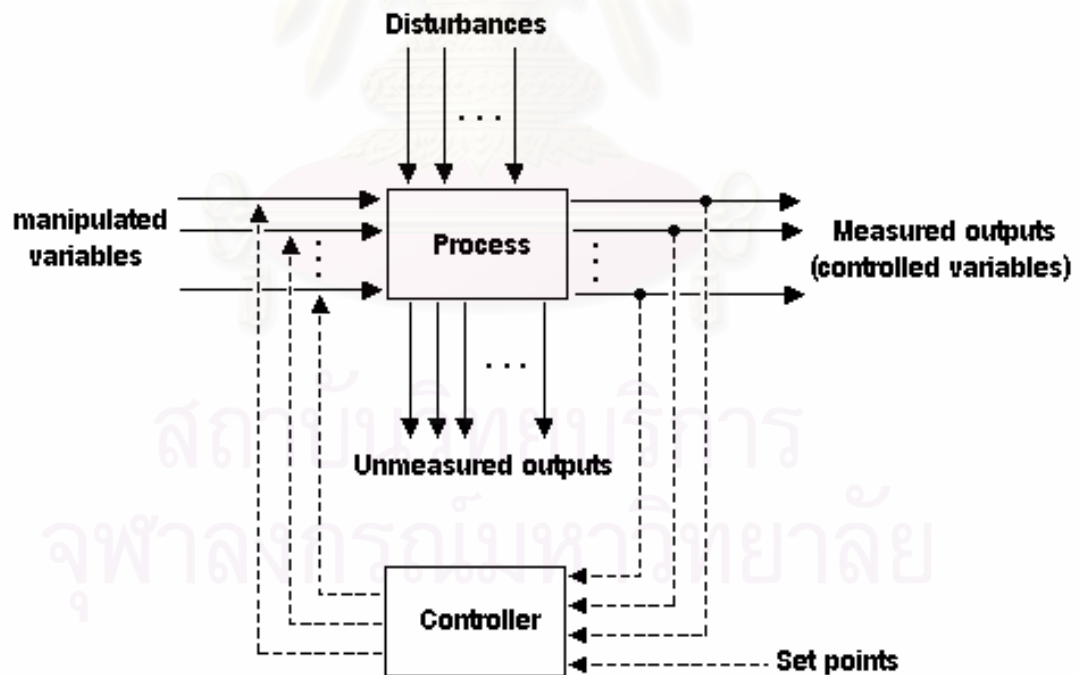
- ระบบกระบวนการที่ควบคุม คือ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการปฏิบัติงาน เช่น เตาเผา หอกลับ เครื่องปฏิกรณ์ต่างๆ เป็นต้น
- เครื่องวัดหรือเครื่องส่งสัญญาณ เช่น เทอร์โมคัปเปิ้ล เครื่องวัดที่ดีจะช่วยให้การควบคุมถูกต้องแม่นยำและได้ผลดีด้วย
- Transducers คือ เครื่องที่ใช้แปลงค่าที่วัดได้ก่อนนำไปใช้พิจารณาควบคุมในกรณีค่าที่วัดได้นั้นไม่สามารถนำไปใช้ควบคุมได้ทันที
- Transmission lines เป็นตัวพาสัญญาณไปยังเครื่องควบคุมหรืออุปกรณ์ที่ถูกควบคุม เช่น สายเทอร์โมคัปเปิ้ล (Transmission line) ที่ดีจะต้องมีความต้านทานสัญญาณน้อยมาก เพื่อไม่ให้สัญญาณผิดพลาดไปมากก่อนจะถึงที่หมายเพราะจะเกิดความผิดพลาดในการควบคุมได้
- เครื่องควบคุม(Controller) คือ เครื่องรับสัญญาณมาเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดและส่งสัญญาณไปควบคุมต่อ เครื่องควบคุมมีหลายชนิดตั้งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป ซึ่งในคอมพิวเตอร์นั้นการควบคุมจะเป็นแบบไหนขึ้นกับโปรแกรมที่ใช้
- เครื่องควบคุมขั้นสุดท้าย คือ เครื่องที่รับสัญญาณจากเครื่องควบคุมมาควบคุมค่าตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนค่าได้(Manipulated variables) เช่น เครื่องควบคุมการหมุนของมอเตอร์ในการป้อนเชื้อเพลิงหรืออากาศ

- เครื่องบันทึกค่า คือ เครื่องมือที่ใช้แสดงค่าของตัวแปรที่เกิดจากกระบวนการที่สามารถวัดได้โดยตรง หรือตัวแปรที่ต้องการควบคุม ตัวแปรที่ต้องการควบคุมอาจแสดงอยู่ในรูปค่าตัวเลข หรือกราฟของค่าตัวแปรต่อเวลา

2.14 รูปแบบของระบบควบคุม (Stephanopoulos, G., 1984)

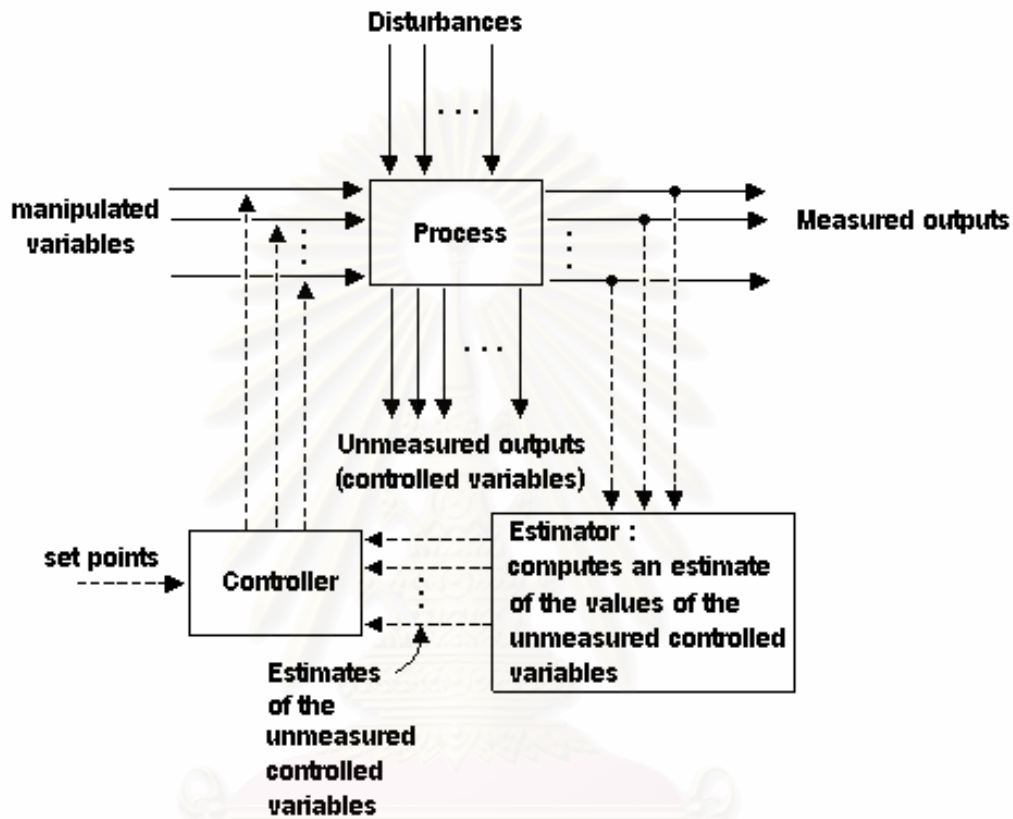
เมื่อทราบลักษณะชนิดของตัวแปรและองค์ประกอบของระบบควบคุมแล้ว จากนั้นพิจารณาถึงรูปแบบของการควบคุมที่จะใช้ว่า การควบคุมรูปแบบใดเหมาะสมกับกระบวนการและวัตถุประสงค์ของการควบคุม รูปแบบการควบคุมของกระบวนการทางเคมีทั่วๆ ไปมี 3 แบบ คือ

2.14.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) คือ การควบคุมโดยใช้ตัวแปรวัดค่าได้ (Measured output variables) โดยตรงจากระบบไปควบคุมตัวแปรปรับค่า (Manipulated variables) ได้เพื่อให้ตัวแปรที่ต้องการควบคุมอยู่ในช่วงที่กำหนด (Set point) การควบคุมแบบนี้เป็นรูปแบบการควบคุมที่ใช้กันส่วนมาก ลักษณะการควบคุมแสดงดังรูปที่ 2.5



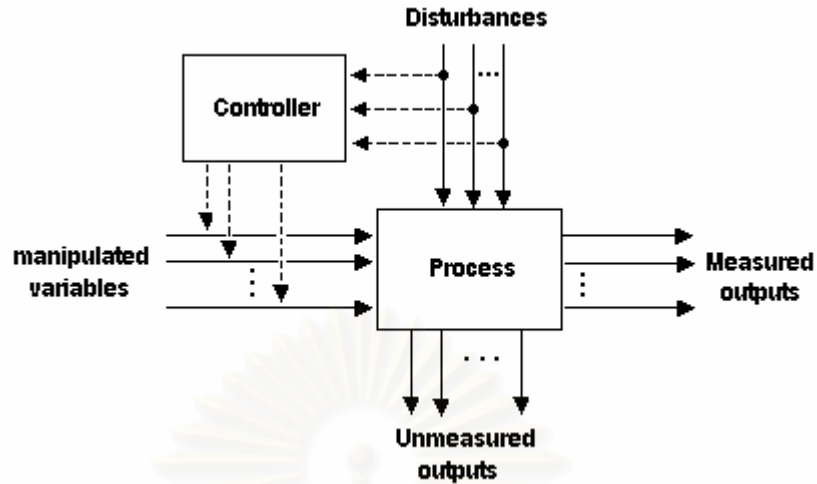
รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงลักษณะการควบคุมแบบป้อนกลับ

2.14.2 การควบคุมแบบอินเฟอเรนเชียล (Inferential control) คือ การควบคุมโดยใช้ผลที่ได้จากการคำนวณหรือประมาณค่าจากตัวแปรที่สามารถวัดค่าได้ ไปควบคุมตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้เพื่อให้ค่าตัวแปรที่ควบคุมอยู่ในช่วงที่กำหนด แสดงลักษณะการควบคุมดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงลักษณะการควบคุมแบบอินเฟอเรนเชียล

2.14.3 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed forward control) คือ การควบคุมโดยใช้ค่าตัวแปรคงที่ (Disturbance variables) ไปควบคุมตัวแปรปรับค่าได้ เพื่อควบคุมให้ตัวแปรป้อนออกอยู่ในช่วงที่กำหนด แสดงลักษณะการควบคุมดังรูปที่ 2.7



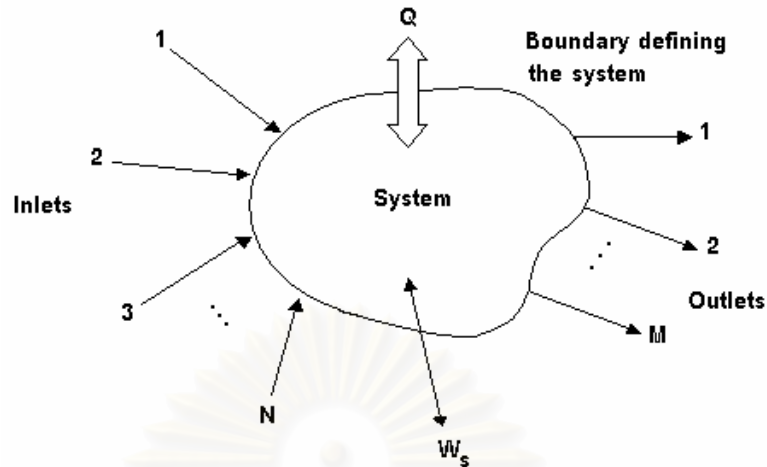
รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงลักษณะการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

2.15 การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการเคมี (Stephanopoulos, G., 1984)

ในการควบคุมกระบวนการต่างๆ จำเป็นต้องทราบตัวแปรที่ต้องการควบคุมกับตัวแปรอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการของระบบ ในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัวมีวิธีการหา 2 วิธี คือ

1. จากการพิจารณาทางทฤษฎี วิธีนี้เป็นการคาดเดาล่วงหน้าถึงความสัมพันธ์ที่จะเกิดขึ้นของตัวแปรในกระบวนการเคมีนั้นๆ ใช้ในกรณีที่ระบบยังไม่สามารถทำการทดลองได้ โดยต้องศึกษาจลนพลศาสตร์และกลไกการทำงานของกระบวนการที่จะเกิดขึ้น จากนั้นนำมาสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนการหาสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ทั่วไปมีดังนี้

- ทราบวัตถุประสงค์ของการควบคุม
 - ศึกษาและคาดเดาจลนพลศาสตร์และกลไกที่จะเกิดขึ้นของกระบวนการ
 - หาสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรป้อนเข้าและตัวแปรป้อนออกที่ต้องการควบคุม โดยใช้สมการดุลแรง ดุลมวลและพลังงาน (กัญจนา บุญเกียรติ, 2543)
- ความสัมพันธ์ของระบบกับสิ่งแวดล้อมแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม

การเลือกใช้สมการสมดุลแบบใดขึ้นกับชนิดของตัวแปรที่ควบคุมและลักษณะกระบวนการของระบบ การทำให้สมการทางคณิตศาสตร์มีรูปสมการที่ง่ายขึ้นจำเป็นต้องกำหนดสมมติฐานและสมการบางอย่างตามความเหมาะสม รูปแบบของสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสมการที่เปรียบเทียบกับเวลาและภาวะคงที่ เนื่องจากกระบวนการทางเคมีส่วนใหญ่จะควบคุมที่ภาวะคงที่

2. จากการทดลอง ใช้ในกรณีที่ระบบสามารถใช้ปฏิบัติงานได้แล้ว ค่าความสัมพันธ์ที่หาโดยวิธีนี้จะให้ค่าแน่นอนของระบบมากกว่าการคาดเดาทางทฤษฎี การหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรทำโดยเปลี่ยนค่าตัวแปรป้อนเข้าที่ใช้ปรับเปลี่ยนค่าไปเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง เพื่อดูผลของตัวแปรป้อนออกที่ต้องการควบคุมกับเวลา ตามสมมติฐานของ Cohen และ Coon (Cohen, G. H., and Coon G. A., 1953) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรป้อนออกกับเวลาแสดงดังรูปที่ 2.9

ซึ่งจะได้ค่าคงที่ต่างๆ ของระบบคือ

$$\text{ค่า Static gain } (K_p, K) = \frac{\text{ผลต่างของตัวแปรป้อนออกที่ภาวะคงที่}}{\text{ผลต่างของตัวแปรป้อนเข้าที่ภาวะคงที่}} = \frac{B}{A}$$

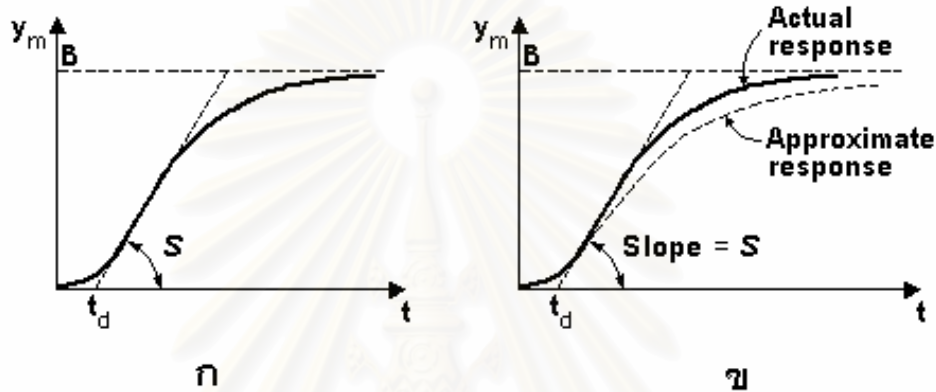
.....(2.3)

$$\text{ค่า Time constant } (\tau_p, \tau) = \frac{\text{ผลต่างของตัวแปรป้อนออกที่ภาวะคงที่}}{\text{ค่าความชันสูงสุดที่สัมผัสเส้นกราฟ}} = \frac{B}{S}$$

.....(2.4)

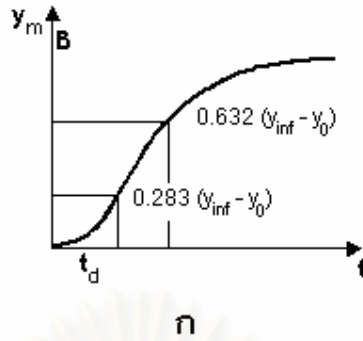
$$\text{ค่า Dead time (} t_d \text{)} = \text{ช่วงเวลาตั้งแต่เปลี่ยนค่าตัวแปรป้อนเข้าจนถึงจุดที่เส้นความชันสูงสุดตัดแกนเวลา} \dots\dots\dots(2.5)$$

ค่าคงที่ของระบบเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบเครื่องควบคุมต่อไป



รูปที่ 2.9 ก. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรป้อนออกกับเวลา
 ข. กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงโดยประมาณของค่าตัวแปรในระบบลำดับที่หนึ่ง

เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้เส้นเปลี่ยนความเว้าในการหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เนื่องจากขั้นตอนดังกล่าวเป็นสาเหตุของความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก (พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ, 2543) ในปี ค.ศ. 1972 ดร.สมิทส์เสนอให้กำหนดค่าพารามิเตอร์ทั้งสองโดยใช้ข้อมูลจากจุดสองจุดบนเส้นการตอบสนองของกระบวนการโดย จุดแรกคือจุดที่เวลาเท่ากับ $t_d + (1/3)\tau$ และจุดที่สองคือจุดที่เวลาเท่ากับ $t_d + \tau$ กำหนดตำแหน่งแรกโดย ลากเส้นแนวนอนจากแกน y ที่ค่าเท่ากับ 0.283 ของการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของค่า y หรือ $y = 0.283(y_{inf} - y_0)$ มาตัดเส้นกราฟการตอบสนองของกระบวนการ แล้วลากเส้นตั้งฉากจากจุดดังกล่าว(A) ลงมาพบแกน x ที่จุด B ส่วนจุดที่สองกำหนดโดย ลากเส้นแนวนอนจากแกน y ที่ค่าเท่ากับ 0.632 ของการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของค่า y หรือ $y = 0.632(y_{inf} - y_0)$ มาตัดเส้นกราฟการตอบสนองของกระบวนการ แล้วลากเส้นตั้งฉากจากจุดดังกล่าวมาพบแกน x ดังแสดงในรูปที่ 2.10



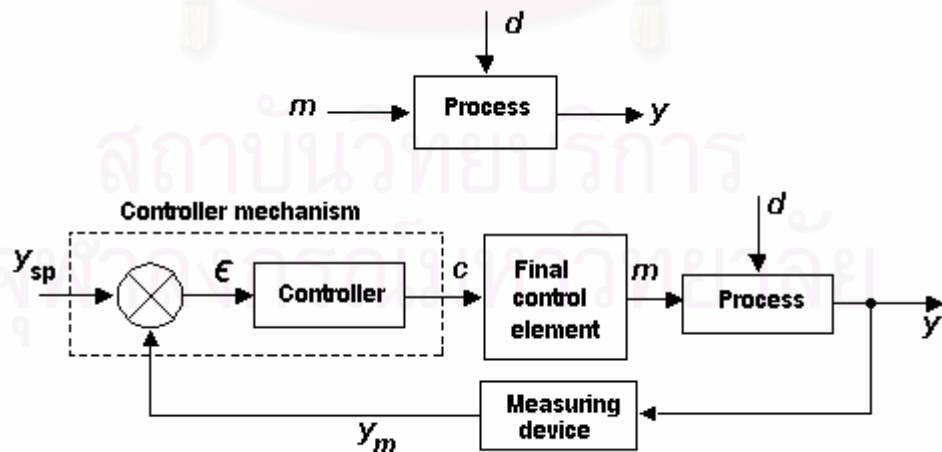
รูปที่ 2.10 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ

2.16 ชนิดของเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ (Type of Feedback Controller) (Stephanopoulos, G., 1984)

การควบคุมแบบป้อนกลับมีรูปแบบของการควบคุมและการทำงานของเครื่องควบคุมแสดงดังรูปที่ 2.11

ระบบมีขั้นตอนการทำงาน คือ เครื่องควบคุมจะรับสัญญาณค่าตัวแปรป้อนออกที่วัดค่าได้ และเป็นตัวแปรที่ต้องการควบคุม (Y_m) มาเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดไว้ (Set point, Y_{sp}) ค่าที่เปรียบเทียบได้คือ ค่าความผิดพลาด (Error, ϵ) ซึ่งเท่ากับ

$$\epsilon = Y_{sp} - Y_m \dots\dots\dots(2.6)$$



รูปที่ 2.11 วงจรควบคุมแบบป้อนกลับ

จากนั้นเครื่องควบคุมจะนำค่าความผิดพลาดมาพิจารณาควบคุม และเปลี่ยนเป็นสัญญาณไปควบคุมเครื่องควบคุมตัวแปรป้อนเข้า เพื่อให้ตัวแปรป้อนเข้ารักษาภาวะของตัวแปรป้อนออกให้ได้ตามต้องการ ซึ่งการทำงานจะวนอยู่ในลักษณะเช่นนี้ตั้งแต่เริ่มควบคุมจนถึงสิ้นสุดการควบคุม

การพิจารณาเปลี่ยนแปลงสัญญาณของเครื่องควบคุมมีความสำคัญมาก เพราะ ถ้าสัญญาณที่เปลี่ยนไปในการควบคุมไม่เหมาะสมกับกระบวนการของระบบแล้ว จะทำให้การควบคุมมีความยุ่งยากและไม่ให้ประสิทธิภาพที่ดีเท่าที่ควร การเปลี่ยนแปลงสัญญาณของเครื่องควบคุมขึ้นกับชนิดของเครื่องควบคุม เครื่องควบคุมที่ใช้กับระบบการควบคุมแบบป้อนกลับโดยปกติมี 3 ชนิด คือ

2.16.1 เครื่องควบคุมแบบ P (Proportional Controller)

เครื่องควบคุมแบบนี้ทำงานโดยเปลี่ยนค่าสัญญาณที่ส่งไปควบคุมจากค่าความผิดพลาดตามสมการ

$$c(t) = K_c \varepsilon(t) + C_s \dots\dots\dots(2.7)$$

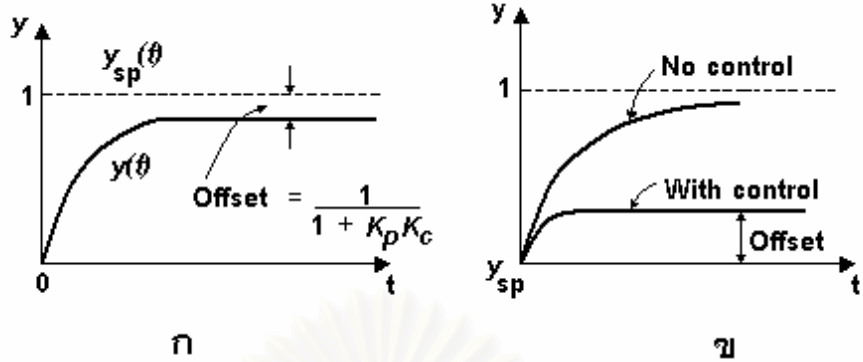
- เมื่อ K_c = ค่า proportional gain ของเครื่องควบคุม
- C_s = ค่าสัญญาณที่เครื่องควบคุมส่งไปเมื่อระบบอยู่ในภาวะคงที่ ($\varepsilon=0$)
- $c(t)$ = ค่าสัญญาณที่เครื่องควบคุมส่งไปช่วงเวลาใดๆ
- $\varepsilon(t)$ = ค่าความผิดพลาดช่วงเวลาใดๆ

จากรูปของสมการสามารถหา Transfer function ของเครื่องควบคุมได้เป็น

$$G_c(s) = K_c \dots\dots\dots(2.8)$$

ผลการใช้เครื่องควบคุมแบบนี้สามารถควบคุมระบบให้อยู่ในภาวะคงที่ได้ แต่ค่าที่ได้ไม่ใช่ค่าที่กำหนดไว้หรือค่าที่ต้องการแสดงดังรูปที่ 2.12 ผลต่างของค่าทั้งสองนี้เรียกว่า ค่า Offset ซึ่งเท่ากับ

$$\text{ค่า Offset} = \text{ค่าที่กำหนด (Set point)} - \text{ค่าที่ควบคุมได้จริง}$$



รูปที่ 2.12 ค่าที่เกิดจากการควบคุมแบบ ในกระบวนการลำดับที่หนึ่งเมื่อ
 ก. เปลี่ยนค่าตัวแปรที่กำหนด ข. เปลี่ยนค่าตัวแปรป้อนเข้า

2.16.2 เครื่องควบคุมแบบ PI (Proportional Integral Controller)

เครื่องควบคุมแบบนี้เรียกอีกอย่างว่า Proportional-plus-reset controller ทำการเปลี่ยนสัญญาณการควบคุมตามสมการ

$$C(t) = K_c \varepsilon(t) + K_c \int \varepsilon(t) dt + C_s \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

τ_i

เมื่อ τ_i = Integral time constant หรือ Reset time (นาที)

โดยปกติค่า τ_i จะอยู่ในช่วง 0.1 - 50 นาที

จากรูปสมการสามารถหา Transfer function ของเครื่องควบคุมได้คือ

$$G_c(s) = K_c (1 + 1 / \tau_i s) \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

เครื่องควบคุมแบบนี้เป็นเครื่องควบคุมที่เพิ่มส่วนของการอินทิเกรตค่าความผิดพลาด ร่วมกับเครื่องควบคุมแบบ Proportional เพื่อกำจัดค่า Offset ที่จะเกิดขึ้น ผลของเครื่องควบคุมแบบนี้สามารถกำจัดค่า Offset ได้แต่จะเกิดการแกว่งของค่าตัวแปรซึ่งเป็นข้อเสียของเครื่องควบคุมแบบนี้ การแกว่งของค่าตัวแปรจะมากขึ้นเมื่อ K_c เพิ่มขึ้น หรือค่า τ_i ลดลงเมื่อ K_c คงที่ ทั้งนี้เพราะเครื่องควบคุมแบบนี้เป็นการเพิ่มค่าลำดับของสมการการควบคุม

2.16.3 เครื่องควบคุมแบบ PID (Proportional Integral Derivative Controller)

เครื่องควบคุมแบบนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Proportional – plus – reset – plus –rate controller มีการเปลี่ยนสัญญาณการควบคุมตามสมการ

$$C(t) = K_c(t) + \frac{K_c}{\tau_i} \int \epsilon(t) dt + K_c \tau_D \frac{d\epsilon}{dt} + C_s \dots \dots \dots (2.11)$$

เมื่อ τ_D = Derivative time constant (นาทีก)

จากรูปสมการสามารถหา Transfer function ได้คือ

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_D s \right) \dots \dots \dots (2.12)$$

เครื่องควบคุมแบบนี้เป็นเครื่องควบคุมแบบคาดเดาเหตุการณ์ล่วงหน้า ช่วยลดค่าการแกว่งของตัวแปรที่เนื่องมาจากการควบคุมแบบ Proportional integral ดังนั้นเครื่องควบคุมแบบนี้จึงเป็นเครื่องควบคุมที่ดีที่สุดเพราะไม่มีปัญหาเรื่องค่า Offset และการแกว่งของค่าตัวแปร

ข้อคำนึงถึงของเครื่องควบคุมแบบนี้คือ

- ถ้าค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากันแต่ไม่เท่ากับศูนย์ จะไม่มีผลการควบคุมเนื่องจากเทอมของ Derivative เพราะค่า $d\epsilon / dt = 0$
- ถ้าการส่งสัญญาณมีความผิดพลาดไปจากค่าความเป็นจริงแล้ว แม้ผิดพลาดไปเพียงเล็กน้อย แต่ค่าสัญญาณการควบคุมจะเปลี่ยนแปลงไปมากเกินไปกว่าที่ควรจะเป็น การควบคุมจึงผิดพลาดได้ง่าย

2.16.4 การหาค่าคงที่ของเครื่องควบคุม

จากค่าคงที่ของกระบวนการในระบบที่หาได้จากการทดลองนั้นสามารถนำมาหาค่าคงที่ของเครื่องควบคุมที่จะใช้กับกระบวนการได้ ตามสมมติฐานของ Cohen และ Coon (Cohen, G. H., and Coon G. A., 1953) สามารถหาค่าคงที่ของเครื่องควบคุมต่างๆ ได้ดังนี้

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional หาค่าคงที่ K_c ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(\frac{1 + t_d}{3} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral หาค่าคงที่ K_c และ τ_I ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(\frac{0.9 + t_d}{12} \right) \dots\dots\dots(2.14)$$

$$\tau_I = t_d \left(\frac{30 + 3t_d/\tau}{9 + 20t_d/\tau} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative หาค่าคงที่ K_c , τ_I และ τ_D ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(\frac{4 + t_d}{3} \frac{1}{4} \right) \dots\dots\dots(2.16)$$

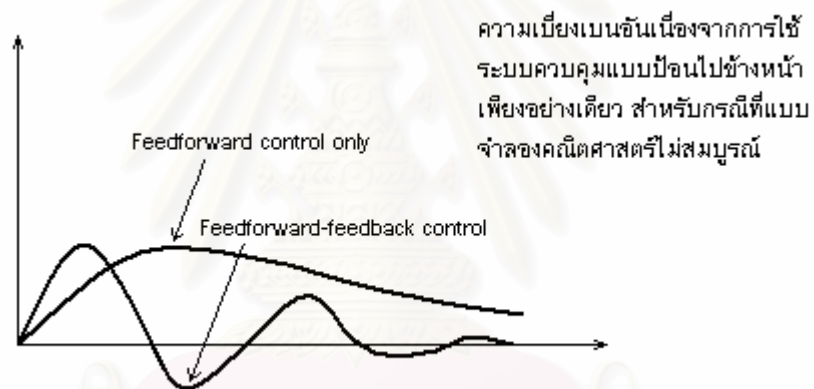
$$\tau_I = t_d \left(\frac{32 + 6t_d/\tau}{13 + 8t_d/\tau} \right) \dots\dots\dots(2.17)$$

$$\tau_D = t_d \left(\frac{4}{11 + 2t_d/\tau} \right) \dots\dots\dots(2.18)$$

ค่าคงที่ของเครื่องควบคุมที่หาได้จะเหมาะสมกับกระบวนการที่หาเท่านั้น ซึ่งถ้าเป็นกระบวนการอื่นแล้วค่าคงที่ที่ใช้จะมีค่าต่างกันออกไปตามลักษณะของกระบวนการ

2.17 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ (พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ, 2543)

เพื่อให้การควบคุมกระบวนการมีผลสมบูรณ์ จึงมักมีผู้นิยมนำระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและแบบป้อนกลับมาใช้ในการควบคุมกระบวนการร่วมกัน การเปรียบเทียบลักษณะการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้ระบบควบคุมที่เป็นแบบป้อนไปข้างหน้าอย่างเดียวกับระบบควบคุมที่มีทั้งโครงสร้างการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า และการควบคุมแบบป้อนกลับ จะเห็นได้ว่ากรณีที่แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ไม่สมบูรณ์ ซึ่งมักเป็นเรื่องปกติที่พบในการทำงานจริง การใช้ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียวมักก่อให้เกิดความเบี่ยงเบนระหว่างค่าตัวแปรที่ต้องการควบคุมกับค่าเป้าหมาย แสดงดังรูปที่ 2.13 การติดตั้งระบบควบคุมแบบป้อนกลับเข้าไปด้วยจะช่วยแก้ปัญหานี้ได้



รูปที่ 2.13 ลักษณะการตอบสนองของกระบวนการสำหรับกระบวนการที่ใช้ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าอย่างเดียวและระบบที่ใช้โครงสร้างผสมทั้งป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ

2.18 การควบคุมแบบสัดส่วน (พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ, 2543) (Ratio control)

การควบคุมแบบสัดส่วน จัดเป็นหนึ่งในลักษณะการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า โดยตัวแปรขาเข้ากระบวนการจะถูกวัดค่าและระบบควบคุมจะพยายามรักษาสัดส่วนของตัวแปรทั้งสองนี้ไว้ให้คงที่ ตัวอย่างที่พบมากได้แก่ การรักษาสัดส่วนของอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่ถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ โดยทั่วไปอัตราการไหลของทั้งสองกระแสจะถูกวัด แต่จะมีเพียงกระแสเดียวที่ถูกควบคุม

กระแสที่เพียงถูกติดตามการเปลี่ยนแปลงแต่ไม่ถูกควบคุม เรียกว่า กระแสอิสระ (Wild stream) สำหรับการควบคุมแบบสัดส่วน โครงสร้างที่นิยมใช้กันมีสองโครงสร้าง คือ

1. โครงสร้าง A วัดค่าอัตราการไหลทั้งสองกระแส แล้วนำมาหาค่าสัดส่วน ส่งค่าสัดส่วนไปเครื่องควบคุมเพื่อปรับค่าอัตราการไหลของกระแสปรับตาม เพื่อให้ค่าสัดส่วนของอัตราการไหลของทั้งสองกระแสตรงตามค่าเป้าหมาย
2. โครงสร้าง B วัดค่าอัตราการไหลของกระแสอิสระแล้วนำค่ามาคูณค่าสัดส่วนที่ต้องการ เพื่อให้เป็นค่าเป้าหมายให้เครื่องควบคุมใช้ในการปรับอัตราการไหลของกระแสปรับตาม

2.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- ก. จุติรัตน์ ตริยะสันติวงศ์ และคณะ, 2543 ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของหม้อไอน้ำฟลูอิดไต์เบด โดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างกาบมะพร้าวกับกะลามะพร้าว และถ่านหิน ในภาวะต่างๆ ที่กำหนดขึ้น พบว่า ปริมาณออกซิเจนในฟลูแก๊สมีค่าประมาณร้อยละ 10-15 เนื่องจากทำการป้อนอากาศเข้าเตาเผาในอัตราที่ค่อนข้างสูง เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง การสูญเสียพลังงานความร้อนของระบบเกิดจาก 4 สาเหตุคือการสูญเสียจากคาร์บอนมีค่าร้อยละ 8.5 การสูญเสียจากคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าร้อยละ 0.7 การสูญเสียจากฟลูแก๊สมีค่าร้อยละ 13 และการสูญเสียอื่นๆ เช่นจากผนังเตาด้านนอกร้อยละ 3.5 มลพิษที่เกิดจากเตาเผาฟลูอิดไต์เบด ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 65-125 ppm แก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์(SO₂)เฉลี่ยอยู่ในช่วง 30-200 ppm และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่า 200-2000 ppm
- ข. ฐานันตร์ สดแสงสูง และคณะ, 2537 ได้ทำการศึกษาหม้อไอน้ำฟลูอิดไต์เบดขนาดเล็ก พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ประมาณร้อยละ 99.37 แล้วจึงลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อให้ปริมาณอากาศและอัตราการป้อนอากาศเพิ่มขึ้นและมากเกินไป ทำให้เบดเต็นรุนแรงและปั่นป่วนมากขึ้น ปฏิกริยาการเผาไหม้จึงดีขึ้นเป็นผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้นด้วย ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากเบดไปยังผนังและท่อน้ำในส่วนที่ต่อจากห้องเผาไหม้มีความร้อนสูงขึ้นด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำและอัตราการผลิตไอน้ำจึงสูงขึ้นตามไปด้วย อัตราส่วนการป้อนอากาศกับเชื้อเพลิงประมาณ 7.42 ทำให้

ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำมีค่าสูงสุด ประมาณร้อยละ 93 และให้ปริมาณการผลิตไอน้ำ สูงสุดประมาณ 2.8 ตันต่อชั่วโมง และเมื่ออัตราการป้อนอากาศเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่ง จะทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนที่มีขนาดเล็กปลิวหลุดออกจากห้องเผาไหม้ก่อนที่จะเผา ไหม้ได้สมบูรณ์ จึงทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำและ อัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำจะลดลงเรื่อยๆ

- ค. ภัทรารุช พุทธิษอมรพันธ์ และคณะ, 2538 ได้ทำการทดลองเผาเชื้อเพลิงชีวมวลได้แก่ กากมันสำปะหลัง เปลือกถั่วลิสง และฟางข้าว เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนอากาศต่อ เชื้อเพลิงที่เหมาะสมในการเผาไหม้ในฟลูอิดไคซ์เบด ผลการทดลองพบว่า กากมัน สำปะหลัง เปลือกถั่วลิสง และฟางข้าว มีค่าเท่ากับ 7.25, 6.00 และ 7.15 ตามลำดับ และ ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าร้อยละ 99.71, 99.07 และ 97.92 ตามลำดับ และพบว่าอุณหภูมิเหนือเบดสูงกว่าที่ตำแหน่งเบด เป็นเพราะชีวมวลที่ใช้ปริมาณสาร ระเหยสูง ส่วนแก๊สพิษ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 0.029- 0.034 ส่วนสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน มีน้อยมากประมาณร้อยละ 0.012-0.020
- ง. สุภัฏญา พนมอุปถัมภ์ และคณะ, 2545 ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้กากมันสำปะหลังใน เต่าฟลูอิดไคซ์เบด พบว่าถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้นั้นหากให้ความร้อนที่ภาวะปกติคือทำ การให้ความร้อนในเตาเผาทั่วไปจะเริ่มมีการหลอมตัวที่อุณหภูมิประมาณ 850 องศา เซลเซียส แต่หากอยู่ในภาวะฟลูอิดไคซ์นั้นพบว่าอุณหภูมิที่ถ้าเริ่มหลอมตัวมีอุณหภูมิที่ สูงขึ้น(มากกว่า 930 องศาเซลเซียส) อันเนื่องมาจากอากาศที่เข้าเตาเผาทำให้เบดอยู่ใน ภาวะฟลูอิดไคซ์ ถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้จึงเกิดการฟุ้งกระจาย ซึ่งมีผลทำให้เกิดการ รวมตัวหรือจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของเถ้าได้ยาก รวมทั้งที่อุณหภูมินี้หากถ้าเกิดการ หลอมแล้วจะเป็นก้อนขนาดเล็กๆ ซึ่งส่งผลต่อการทำงานน้อย แต่หากอุณหภูมิสูงมากๆ เถ้าก็จะเกิดการหลอมตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ได้ จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 1085 องศาเซลเซียส เถ้าเกิดการหลอมเป็นก้อนขนาดใหญ่ซึ่งทำให้ภาวะการทำงานเปลี่ยนไป โดยสังเกตจากการที่อุณหภูมิในเบดและเหนือเบด เพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วเนื่องมาจากกลุ่ม ก้อนของเถ้าที่หลอมรวมตัวนั้นทำให้เบดไม่ฟลูอิดไคซ์จึงพาความร้อนออกไปได้น้อยลง อุณหภูมิเบดจึงสูงขึ้น รวมทั้งความดันลดที่ลดลงอย่างรวดเร็ว อันเนื่องมาจากเกิดการ

หลอมตัวเป็นก้อนใหญ่ การไหลของอากาศอยู่ในลักษณะ Channeling จึงทำให้ความดันตกลดลง

- จ. ศิวิมล สูงสว่าง, 2526 ได้นำเอาเทคนิคทางฟลูอิดไดซ์เบดมาประยุกต์ใช้กับการเผาไหม้ แกลบเพื่อผลิตพลังงานความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพและเป็นประโยชน์ต่อชนบทโดยตรง จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิการเผาไหม้ 700 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของอากาศ 0.470 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2.73 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะให้ประสิทธิภาพของความร้อนทั้งหมดร้อยละ 34.31 และ อัตราส่วนร้อยละของอากาศที่มากเกินไปมีค่าอยู่ในช่วง 1.50-2.80 ของปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี จากการทดลองประสบปัญหาในระบบการป้อนเชื้อเพลิง เพราะว่าเมื่อทำการทดลองป้อน แกลบด้วยเกลียวเป็นระยะเวลาานานจะเกิด การสึกกร่อนเนื่องจากการขีดสีที่อุณหภูมิสูง ในการทดลองได้ใช้ถ้ำแกลบเป็นเบด พบว่าเมื่อป้อนอากาศด้วยอัตราเร็วที่สูงถึงค่าหนึ่ง จะทำให้เตาดับได้ เพราะไม่มีเบดที่จะทำหน้าที่เก็บความร้อนไว้เนื่องจากปลิวหลุดออกไปกับ ไอเสียร้อน
- ฉ. อภิชัย เทอดเทียนวงษ์, 2528 ได้นำเอาเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดมาใช้เผาเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อศึกษาถึงผลของอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ความเร็วของอากาศในการฟลูอิดไดซ์ และขนาดของทรายที่ใช้ในเบดที่มีผลต่อการเผาไหม้ และ การถ่ายเทความร้อนระหว่างเบดกับท่อรับความร้อน จากผลการทดลองพบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับอัตราการป้อน 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมงเป็น 9 ต่อ 1, 10 ต่อ 1 และที่อัตราป้อน 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เป็น 8.5 ต่อ 1 เทียบเป็นปริมาณอากาศมากเกินไปประมาณร้อยละ 50-80 และความเร็วของอากาศประมาณ 85 เซนติเมตรต่อวินาที และในระบบที่ใช้ขนาดของทราย 40-50 เมช จะให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์และอุณหภูมิสูงสุดที่อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงต่ำกว่าระบบที่ใช้ทรายขนาด 30-40 เมช และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อในเบดอยู่ในช่วง 190-260 วัตต์ต่อตารางเมตร เคลวิน ในการทดลองประสบปัญหาเกี่ยวกับความร้อนแดงของผนังเตา เนื่องจากปูนทนไฟที่ปูนผนังภายในบางและไม่มีอุปกรณ์ดักเก็บถ้ำและเขม่า ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายในบรรยากาศตอนเริ่มจุดเตาแต่จะหมดไปเมื่อจุดติดและปรับอัตราส่วนอากาศได้เหมาะสมแล้ว

- ข. Haykiri-Acma, H., 2003 ศึกษาลักษณะการเผาไหม้เมื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลต่างๆ พบว่า ชีวมวลในแต่ละชนิดมีสมบัติการเผาไหม้แตกต่างกัน โดยชีวมวลในแต่ละชนิดจะมี อุณหภูมิในการติดไฟอยู่ในช่วงแคบๆ อุณหภูมิการติดไฟของชีวมวลวัดจากกระบวนการ เผาไหม้ โดยวัดได้ดังนี้ เมล็ดทานตะวัน 475 เคลวิน, เมล็ด Colza 423 เคลวิน, ลูกสน 475 เคลวิน, กากของคอตตอน 423 เคลวิน และกากของมะกอก 473 เคลวิน อุณหภูมิ สูงสุดของการเผาไหม้วัดได้ดังนี้ เมล็ดทานตะวัน 573 เคลวิน, เมล็ด colza 535 เคลวิน, ลูกสน 565 เคลวิน, กากของคอตตอน 598 เคลวิน และ กากของมะกอก 537 เคลวิน อัตราการเผาไหม้สูงสุดวัดได้ดังนี้ เมล็ดทานตะวัน 5.5 มิลลิกรัมต่อนาที, เมล็ด colza 2.8 มิลลิกรัมต่อนาที, ลูกสน 5.2 มิลลิกรัมต่อนาที, กากของคอตตอน 3.7 มิลลิกรัมต่อ นาทีและกากของมะกอก 3.4 มิลลิกรัมต่อนาที และยังพบว่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่ อุณหภูมิ 1273 เคลวิน ในชีวมวลแต่ละตัวมีร้อยละที่สูญเสียน้ำหนักแตกต่างกันดังนี้ เมล็ดทานตะวันร้อยละ 95.07, เมล็ด Colza ร้อยละ 91.05, ลูกสนร้อยละ 84.80, กาก ของคอตตอนร้อยละ 86.74 และ กากของมะกอก ร้อยละ 78.69
- ข. Hsuan,C.A. และ Chen, R., 2002 ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิขาออกจากเตาเผา พบว่า การควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับสามารถควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการสู่ค่าเป้าหมาย ได้ดี จากผลการทดลองพบว่าทั้งระบบ Fuzzy PID และ Neural network controller สามารถนำมาใช้ควบคุมอุณหภูมิขาออกจากเตาได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่า Fuzzy PID controller ใช้ช่วงเวลาในการควบคุมอุณหภูมิสู่ค่าเป้าหมายน้อย กล่าวคือ เมื่อเทียบกับ PID controller ทั่วๆ ไป Fuzzy PID ใช้เวลาเพียง 1 ส่วน 3 ถึง 1 ส่วน 4 ของ PID ทั่วๆ ไป
- ณ. Jones, J. M. และคณะ, 2000 ศึกษากลไกการเผาไหม้ของฟางเมื่อเปรียบเทียบกับ ถ่าน หินพบว่า อัตราการเผาไหม้ภายในของถ่านฟางขึ้นอยู่กับอัตราการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (1500 เคลวิน) และอัตราการเผาไหม้ภายนอกของถ่านฟางขึ้นอยู่กับอัตราการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ (1273 เคลวิน) จากการศึกษา CFD ของการเผาไหม้ฟาง เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหิน พบว่าปริมาณการระเหยมีค่าแตกต่างกัน เพราะปริมาณการระเหยของฟางขึ้นอยู่กับ คาร์บอนมอนอกไซด์ ส่วนปริมาณการระเหยของถ่านหินขึ้นอยู่กับปริมาณทาร์ ข้อ แตกต่างดังกล่าวทำให้อัตราการเผาไหม้ฟางช้าลง โดยมีอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำลงด้วย ทำให้ประมวลได้ว่าลักษณะการเผาไหม้ของฟางและถ่านหินก็มีความแตกต่างกัน

เนื่องมาจากอิทธิพลของโครงสร้างทางเคมี จากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาประยุกต์ใช้โดย
ทำการผสมฟางและถ่านหินสำหรับการเผาไหม้ให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ญ. ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์, 2547 ทำการศึกษาถึงแนวโน้มของอุณหภูมิและองค์ประกอบของ
แก๊สจากการเผาไหม้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ตลอดไรเซอร์ เมื่อมีการปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ
ได้แก่ สัดส่วนของถ่านหินและแกลบที่ป้อน อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ อัตราการป้อน
อากาศทุติยภูมิ พบว่าสำหรับอัตราการป้อนถ่านหิน 5.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง. และอัตรา
การป้อนกลับของเบดผ่าน L-valve 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ภาวะที่ทำให้เกิดการเผาไหม้
ในเตาเผาฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ได้สร้างขึ้นคือที่อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ
ในช่วง 480 – 920 ลิตรต่อนาที (ความเร็วประมาณ 1.0 -2.0 เมตรต่อวินาที) อุณหภูมิใน
การเผาไหม้ในระบบ CFB ค่อนข้างจะคงที่ตลอดไรเซอร์อยู่ในช่วงประมาณ 800 -1000
องศาเซลเซียส ที่อัตราการป้อนอากาศรวมน้อยกว่า 920 ลิตรต่อนาทีที่อุณหภูมิในไรเซอร์
จะสูงกว่าเมื่อมีการป้อนอากาศทุติยภูมิมากกว่า และที่ปริมาณการป้อนอากาศรวมทั้งตั้งแต่
920 ลิตรต่อนาทีขึ้นไปปริมาณและสัดส่วนของการป้อนอากาศทุติยภูมิแทบไม่มีผลต่อ
การเผาไหม้เลย แนวโน้มขององค์ประกอบของแก๊สตลอดไรเซอร์คือปริมาณ CO จะสูง
มากบริเวณส่วนล่างของไรเซอร์และจะลดลงอย่างรวดเร็วบริเวณตำแหน่งที่มีการป้อน
อากาศทุติยภูมิซึ่งจะช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น ปริมาณ O₂ จะลดลงตลอดความสูง
ไรเซอร์ ปริมาณ CO₂ จะเพิ่มขึ้นตลอดความสูงไรเซอร์ ปริมาณ SO₂ จะเพิ่มขึ้นตลอด
ความสูงไรเซอร์ อยู่ในช่วงไม่เกิน 400 – 600 ppm ปริมาณ NO และ NO₂ ค่อนข้างจะ
คงที่ตลอดไรเซอร์ อยู่ในช่วงไม่เกิน 100 และ 10 ppm ตามลำดับ เมื่อทำการปรับสัดส่วน
เชื้อเพลิงจากถ่านหิน เป็นถ่านหินผสมแกลบร้อยละ 3.5 และ 7 โดยน้ำหนัก พบว่า
อุณหภูมิตลอดไรเซอร์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณแกลบที่เพิ่ม แนวโน้มองค์ประกอบ
ของแก๊สทุกชนิดตลอดไรเซอร์ พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกับการเผาไหม้ถ่านหินอย่างเดียว
และพบว่าปริมาณ CO และ SO₂ ลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของแกลบในเชื้อเพลิงผสมที่การ
เผาไหม้สภาวะเดียว

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน แสดงดังรูปที่ 3.1

ก. เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน ประกอบด้วย

1. ท่อไรเซอร์(Riser) แบ่งออกเป็น ส่วนล่างและส่วนบนโดยส่วนล่างหล่อด้วยซีเมนต์ ทนไฟหนา 5 เซนติเมตร สูง 2 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร ส่วนบนทำด้วย สแตนเลสสตีลหนา 3 มิลลิเมตร สูง 1 เมตร มีช่อง สำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิ้ลและสำหรับดิ่งแก๊ส 8 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งแรกสูงจาก แผ่นกระจายอากาศ 10 เซนติเมตร และตำแหน่งต่อไปห่างกัน 40 เซนติเมตรขึ้นมาทางด้านบนของท่อไรเซอร์ นอกจากนี้ยังมีช่องสำหรับดูไฟ(Sight glass) เพื่อใช้ดูลักษณะการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน

2. ระบบป้อนกลับของแข็ง

2.1 ท่อ Downcomer ทำจากสแตนเลสสตีลหนา 2 มิลลิเมตร สูง 1.6 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 เซนติเมตร เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่าง ไชโคลนกับแวลวาล์ว ด้านล่างของ Downcomer มีวาล์วสำหรับปล่อย แก๊สออกจากระบบ

2.2 แวลวาล์ว(L-valve) ทำจากสแตนเลสสตีล โดยท่อที่ใช้มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว วาล์วที่ติดตั้งเป็นวาล์วปีกผีเสื้อ(Butterfly valve) เพื่อให้เกิดการเผาไหม้แบบหมุนเวียน แสดงดังรูปที่ 3.2

3. ไชโคลน(Cyclone) ทำจากสแตนเลสสตีล มีความสูง 0.80 เมตร แสดงดังรูปที่

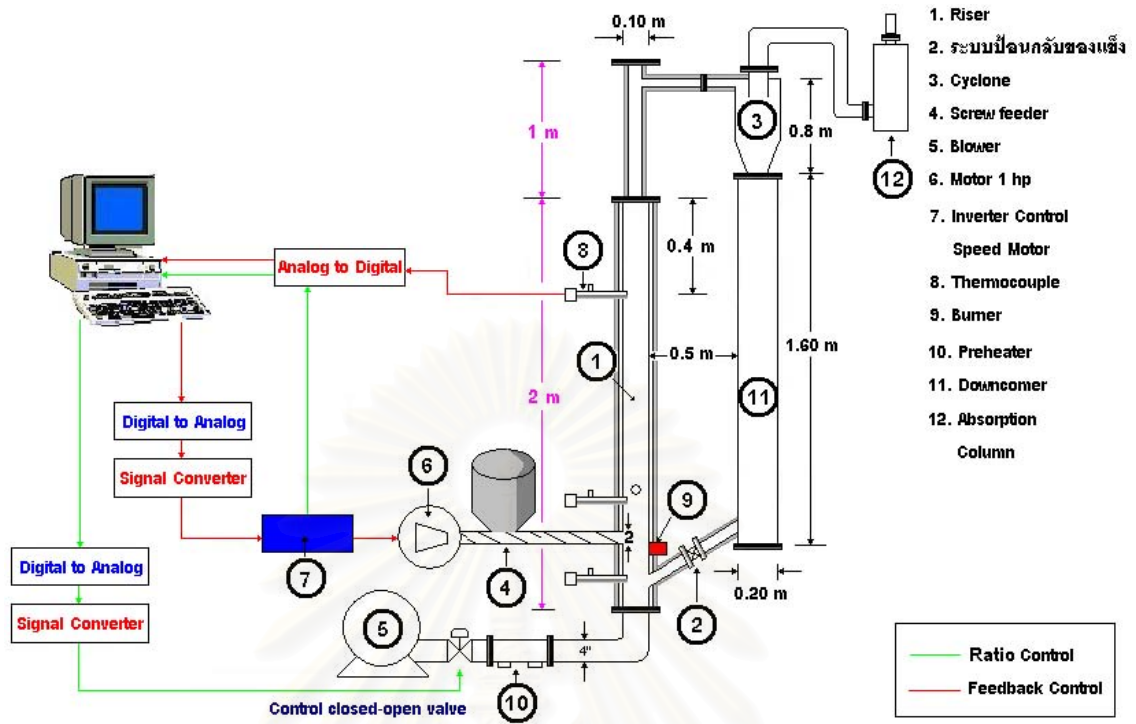
3.3

4. หอดูดซึม (Absorption column) คอลัมน์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ตัวคอลัมน์สูง 1.60 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมี 2 ส่วน ส่วนบนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร ส่วนล่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ภายในบรรจุตะแกรงสแตนเลส เส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร ขนาดช่องของตะแกรง 0.3 เซนติเมตร ภายในบรรจุตัวกลางในการดูดซึม ทำจากทอสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร บรรจุเหนือตะแกรงความสูงเบด 15 เซนติเมตร ส่วนบนของหอดูดซึมมีท่อสำหรับสเปรย์น้ำสวนทางกับทิศทางการเดินของแก๊สที่ออกจากไซโคลน ด้านล่างมีท่อทางเดินแก๊สจากไซโคลนเข้าสู่คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 เซนติเมตร หอดูดซึมทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของแก๊สและดูดซึมน้ำมันและเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้แสดงดังรูปที่ 3.4

ข. ระบบป้อนเชื้อเพลิง ประกอบด้วย

1. อุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิง ชนิด Screw feeder ประกอบด้วยถังบรรจุเชื้อเพลิงและระบบลำเลียงเชื้อเพลิง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวป้อน 4.8 เซนติเมตร ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยเครื่องควบคุมความเร็วของมอเตอร์ (Inverter)
2. มอเตอร์ยี่ห้อ SUPER LINE ชนิด SF-JR ขนาด 1 แรงม้า 380 V ใช้ไฟฟ้า 3 เฟส อัตราการหมุน 1400 รอบต่อนาที สำหรับขับ Screw feeder เพื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราเร็วต่างๆ โดยเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าบริเวณเหนือเบดเล็กน้อย
3. อินเวอร์เตอร์ยี่ห้อ YASKAWA รุ่น CIMR-G7A41P5 ขนาด 2 แรงม้า 380 V ใช้ไฟฟ้า 3 เฟส สามารถควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้า 4-20 mA สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ป้อนเชื้อเพลิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของเตาเผาและระบบการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน



รูปที่ 3.2 แอลวาล์ว (L-valve)



รูปที่ 3.3 ไซโคลน (Cyclone)



รูปที่ 3.4 หอดูดซึม (Absorption column)

ค. ระบบป้อนอากาศ ประกอบด้วย

1. เครื่องเป่าอากาศ (Air blower) สำหรับให้อากาศปฐมภูมิ (Primary air) ใช้มอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 15 แรงม้า แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องเป่าอากาศ (Air blower)

2. เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) ยี่ห้อ FU SHENG ชนิด รุ่น HTA-120 สำหรับให้อากาศที่ช่องเติมอากาศ(Aeration air) ใช้มอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 15 แรงม้า ลูกสูบมี Bore 51 มิลลิเมตร และ Stroke 42 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 515 รอบต่อนาทีที่ความถี่ 50 Hz และ 620 รอบต่อนาทีที่ความถี่ 60 Hz ขนาดถังเส้นผ่านศูนย์กลางคูณความยาวเป็น 325x970 มิลลิเมตร ความจุถึง 76 ลิตร ความดันที่ใช้งาน 7 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และความดันสูงสุด 10 กิโลกรัมต่อตารางเมตร
3. ระบบอุ่นอากาศ(Air preheater) มีลักษณะเป็นเชลล์และท่อ (Shell and tube) ให้ความร้อนโดยตรงโดยใช้หัวเผา 2 ตำแหน่ง โดยใช้แก๊สหุงต้ม(LPG) เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการอุ่นอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ระบบอุ่นอากาศ (Air preheater)

4. Gate Valve ขนาด 4 นิ้ว สำหรับควบคุมความเร็วลมเข้าเตาเผา
5. Butterfly valve ยี่ห้อ EBRO รุ่น Z011-K1 ขนาด 4 นิ้ว พร้อมหัวขับไฟฟ้ายี่ห้อ BERNARD รุ่น OA3 0.02 กิโลวัตต์ 230 V ใช้ไฟฟ้า 1 เฟส สามารถควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้า 4-20 mA สำหรับควบคุมความเร็วลมเข้าเตาเผา
- ง. ระบบวัดอุณหภูมิ ประกอบด้วย

เทอร์โมคัปเปิ้ล Type K คลาส 1500 องศาเซลเซียส 3 ตัว ต่อเข้ากับคอมพิวเตอรืผ่านวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับวัดอุณหภูมิในเตาเผาที่ตำแหน่งต่างๆโดยค่าที่วัดได้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้า จึงต้องมีตัวแปลงค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าเป็นค่าอุณหภูมิ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมในคอมพิวเตอรืเป็นส่วนประมวลผล

จ. ระบบควบคุมอุณหภูมิ ประกอบด้วย

1. คอมพิวเตอรื ระบบปฏิบัติการ Windows XP, Ram 128 MB เพื่อสามารถรองรับการทำงานของโปรแกรม Microsoft Visual Basic (พัฒนาพงศ์ พันธะติวงศ์, 2545) มีข้อดีคือสามารถเขียนโปรแกรมได้ง่าย และให้ผลงานออกมาอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงจัดให้ เป็นโปรแกรมประเภท Rapid Application Development หรือ RAD ซึ่งแปลว่าสามารถสร้างโปรแกรมประยุกต์ได้รวดเร็ว ด้วยข้อดีที่กล่าว

มาผู้วิจัยจึงเลือกโปรแกรมนี้ อีกทั้งยังลดการเชื่อมต่อลงระหว่างคอมพิวเตอร์กับ ฮาร์ดแวร์ เพื่อให้การประมวลผลรวดเร็วยิ่งขึ้น

2. วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างส่วนต่างๆ ของเตาเผาที่ต้องการควบคุมกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกการเชื่อมต่อโดยใช้พอร์ต Universal Serial Bus (USB)

3.1.2 เครื่องมือใช้วิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านหิน แสดงดังรูปที่ 3.7

- ก. บอมบ์แคลอริมิเตอร์(Bomb Calorimeter) แสดงดังรูปที่ 3.7 ก.

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงตัวอย่าง

- ข. เตาอบ(Oven) แสดงดังรูปที่ 3.7 ข.

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าความชื้นของเชื้อเพลิงตัวอย่าง

- ค. เตาเผาไฟฟ้า(Muffle Furnace) แสดงดังรูปที่ 3.7 ค.

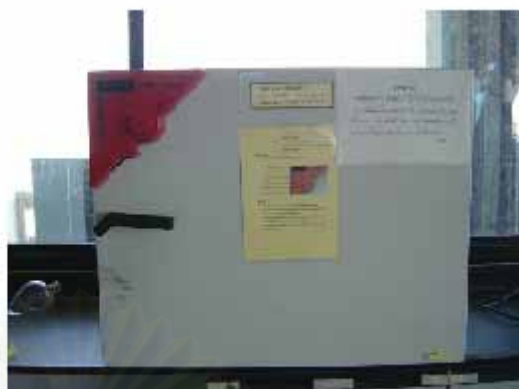
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงตัวอย่าง

- ง. เตาเผาแบบท่อ(Tube Furnace) แสดงดังรูปที่ 3.7 ง.

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่า Volatile matter ของเชื้อเพลิงตัวอย่าง



ก.



ข.



ค.



ง.

รูปที่ 3.7 เครื่องมือใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและค่าการนำความร้อน

ก. บอมบ์แคลอรีมิเตอร์

ข. เตาดอบ

ค. เตาดเผาไฟฟ้า

ง. เตาดเผาแบบท่อ

3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

การทดลองแบ่งเป็น 6 ส่วน คือ ก) การหาสมบัติทางกายภาพของถ่านหิน และ เชื้อเพลิงชีวมวล ได้แก่ ชั่งข้าวโพด แกลบ และกากกาแฟ ข) ทำการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์และปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เตาดเผาต่อเวลา ค) การหาค่าคงที่ของกระบวนการ ง) การออกแบบและสร้างบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมต่อ

ระหว่างโปรแกรมกับระบบการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศเข้าเตาเผา จ) การเขียนและปรับปรุงโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิของเตาเผา ฉ) ทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดแต่ละส่วน ดังนี้

3.2.1 การหาสมบัติทางกายภาพของถ่านหินและเชื้อเพลิงชีวมวล (ภาคผนวก ก.)

- ก. การหาค่าความร้อนของถ่านหินและเชื้อเพลิงชีวมวล สามารถหาได้โดยการใช้ออมบีแคลอริมิเตอร์(ASTM D2015)
- ข. การหาองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง เป็นการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน โดยการวิเคราะห์ CHNS/O ANALYZER(PERKIN) ส่วนออกซิเจนเป็นผลต่างของปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ถ้า มาลบออกจากปริมาณร้อยละทั้งหมด
- ค. การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยวิธี PROXIMATE ANALYSIS (ASTM D3172) สิ่งทีวิเคราะห์หาได้แก่ ปริมาณความชื้น(ASTM D3173) ปริมาณเถ้า(ASTM D3174) และ Volatile matter(ASTM D 3175)

3.2.2 ทำการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์และปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาต่อเวลา

3.2.3 การหาค่าคงที่ของกระบวนการ เมื่อเชื้อเพลิงที่ใช้มีดังต่อไปนี้

- ถ่านหิน
- อัตราส่วนถ่านหิน : ซังข้าวโพด = 3 : 1, 2 : 1, 1 : 1 (โดยน้ำหนัก)
- อัตราส่วนถ่านหิน : แกลบ = 3 : 1, 2 : 1, 1 : 1 (โดยน้ำหนัก)
- อัตราส่วนถ่านหิน : กากกาแฟ = 3 : 1, 2 : 1, 1 : 1 (โดยน้ำหนัก)

3.2.4 การออกแบบและสร้างบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมกับระบบการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศเข้าเตาเผา

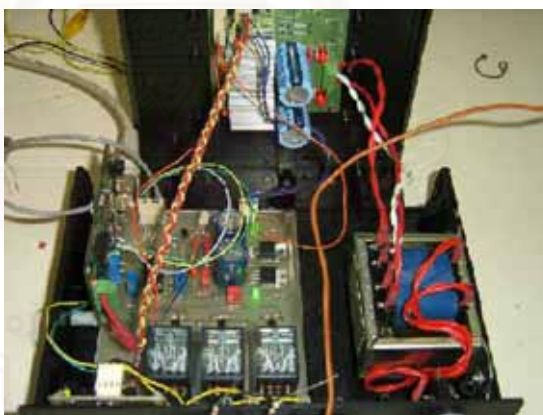
ก. ออกแบบวงจร และเขียนลายวงจรโดยใช้โปรแกรม Printed Circuit Board Design

ข. ติดตั้งอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นลายวงจรตามทีออกแบบดังรูปที่ 3.8 ประกอบด้วย

- หม้อแปลงทำหน้าที่แปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้า 220 โวลต์ ให้อยู่ในช่วง 0 - 6 โวลต์ แต่สัญญาณที่ได้มีลักษณะไม่ราบเรียบ จึงต้องส่งสัญญาณเข้าสู่วงจรแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อไป

- วงจรแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้จากหม้อแปลง 0 - 6 โวลต์ โดยใช้ไอซีเบอร์ 7805 แปลงสัญญาณให้อยู่ในช่วง 0 - (+5) และใช้ไอซีเบอร์ 7815แปลงสัญญาณให้อยู่ในช่วง 0 - (-5) โวลต์ แล้วส่งสัญญาณที่ได้เข้าสู่ส่วนต่างๆ ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์

- วงจรรับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ล Type K 3 ตัว โดยมีตัวดิเลย์จัดลำดับการรับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้าสู่วงจร โดยสัญญาณที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลมีค่าน้อยมาก จึงต้องทำการขยายสัญญาณ แล้วจึงส่งสัญญาณสู่บอร์ด USB



รูปที่ 3.8 วงจรอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมกับระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน

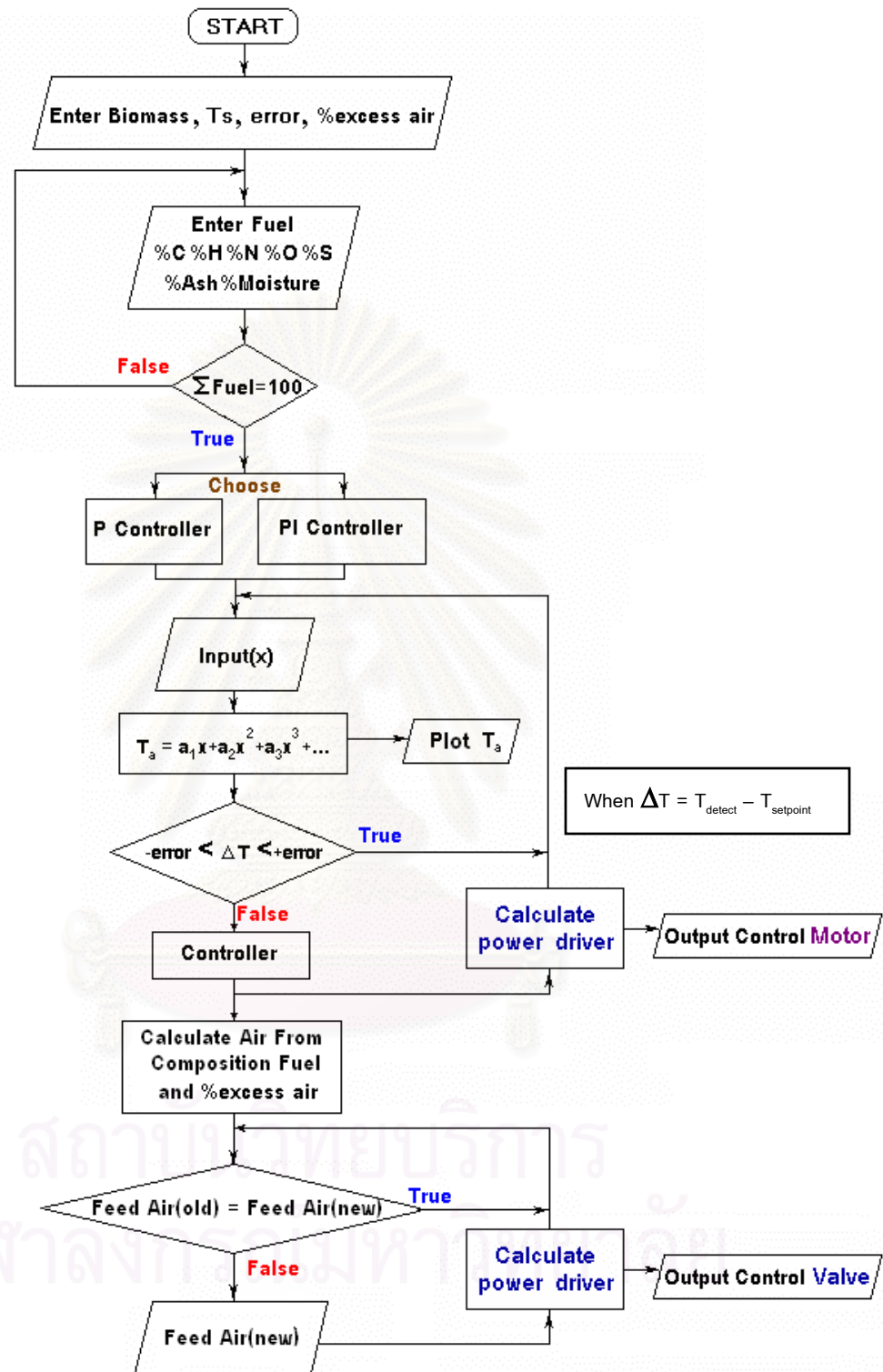
3.2.5 การเขียนและปรับปรุงโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิของเตาเผา แผ่นผังการควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.9

- ก. เขียนโปรแกรมส่วนการควบคุมตามแผนผังการทำงาน และ ส่วนของการเชื่อมต่อระหว่างบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์และโปรแกรมผ่านทางพอร์ตอนุกรมอนุกรมเอกประสงค์(Universal serial bus : USB)
- ข. ทดสอบการเชื่อมต่อโปรแกรมระหว่างวงจรถ่ายโอนข้อมูลกับโปรแกรมตรวจจับอุณหภูมิ
- ค. ทดสอบการเชื่อมต่อโปรแกรมระหว่างวงจรถ่ายโอนข้อมูลกับระบบการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศเข้าเตาเผา

3.2.6 ทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียน โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ

- การใช้ถ่านหิน และชีวมวลตัวอย่าง ได้แก่ ช้างข้าวโพด แกลบ และกากกาแฟ ที่อัตราส่วน ถ่านหินและชีวมวลมีค่า 1:1, 2:1, 3:1 (โดยน้ำหนัก)
- การควบคุมอุณหภูมิแบบ P และ แบบ PI ที่ช่วงอุณหภูมิ 700 – 900 องศาเซลเซียส

มีขั้นตอนคือ เริ่มต้นทำความสะอาดภายในเตาไม่ให้มีวัสดุติดหรือถ่านเหลืออยู่ คุ้นเตาโดยใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวจากหัวเผา (Burner) จนกระทั่งเตามีอุณหภูมิประมาณ 500 – 600 องศาเซลเซียส จึงทำการป้อนเชื้อเพลิงตัวอย่าง เมื่อเชื้อเพลิงตัวอย่างติดไฟดีแล้วจึงเปิดบัตรเตอร์ฟลายวาล์วตำแหน่ง แอลวาล์วเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของเชื้อเพลิงตัวอย่าง และเบด แล้วจึงทำการป้อนอากาศ และเชื้อเพลิงโดยพยายามรักษาอุณหภูมิให้ได้ถึงระดับที่ต้องการ จนกระทั่งมีอุณหภูมิเบดคงที่ จากนั้นเข้าสู่โปรแกรมแบบอัตโนมัติเพื่อควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาตามค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการบันทึกผล แล้วทำการทดลองเปลี่ยนค่าอุณหภูมิเป้าหมายค่าต่าง ๆ ทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้โดยแปรค่าตัวแปรต่าง ๆ ข้างต้น



รูปที่ 3.9 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิของระบบเตาเผาฟลูอิดไธด์แบบหมุนเวียน

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การควบคุมกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนด้วยคอมพิวเตอร์นั้น สิ่งสำคัญที่ควรจะศึกษา คือ ลักษณะกลไกการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน ระบบในการควบคุม ตัวแปรที่มีผลกระทบและตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเขียนและพัฒนาโปรแกรมที่จะนำมาใช้ได้อย่างเหมาะสม และศึกษาผลของตัวแปรโดยใช้โปรแกรมที่ได้ควบคุมการเผาไหม้ต่อไป

4.1 สมบัติของถ่านหินและเชื้อเพลิงชีวมวล

ในกระบวนการเผาไหม้ที่ศึกษานี้ใช้เชื้อเพลิง 4 ชนิด คือ ถ่านหิน ชังข้าวโพด แกลบ และกากกาแฟ เมื่อเผาไหม้แล้วเชื้อเพลิงจะให้ความร้อนและผลิตภัณฑ์อื่นๆ เกิดขึ้นหลายชนิด ขึ้นกับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิง เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาใช้ค่าของตัวแปรต่างๆ ที่จะศึกษาต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.1 สมบัติของถ่านหิน

ถ่านหินที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นถ่านหินจากอำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของถ่านหินแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านหิน

การวิเคราะห์แบบประมาณ		การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	
องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ความชื้น	17.39	คาร์บอน	48.28
เถ้า	25.70	ไฮโดรเจน	4.26
สารระเหย	37.67	ไนโตรเจน	0.57
คาร์บอนคงตัว	19.24	ซัลเฟอร์	1.54
		ออกซิเจน	2.26
		เถ้า	25.70
		ความชื้น	17.39
รวม	100.00	รวม	100.00

ค่าความร้อนของถ่านหิน (แห้ง) 5357.60 kcal/kg

ความหนาแน่นบัลค์ (Bulk density) 815.8 kg/m³

ขนาดถ่านหิน (Particle size) บดหยาบ

- 600 μm < Particle size < 1.18 mm : ร้อยละ 30
- 425 μm < Particle size < 600 μm : ร้อยละ 48
- Particle size < 425 μm : ร้อยละ 22

4.1.2 สมบัติของซังข้าวโพด

ซังข้าวโพดที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นซังข้าวโพดจากอำเภอบางสะพาน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของซังข้าวโพดแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของซังข้าวโพด

การวิเคราะห์แบบประมาณ		การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	
องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ความชื้น	11.44	คาร์บอน	39.32
เถ้า	2.15	ไฮโดรเจน	4.56
สารระเหย	75.51	ไนโตรเจน	0.66
คาร์บอนคงตัว	10.90	ซัลเฟอร์	-
		ออกซิเจน	41.81
		เถ้า	2.15
		ความชื้น	11.44
รวม	100.00	รวม	100.00

ค่าความร้อนของซังข้าวโพด(แห้ง) 4130.65 kcal/kg

ความหนาแน่นบัลค์ (Bulk density) 168.6 kg/m³

ขนาดซังข้าวโพด (Particle size) บดหยาบ

- 2.36 mm < Particle size < 4.75 mm : ร้อยละ 60
- 1.18 mm < Particle size < 2.36 mm : ร้อยละ 30
- Particle size < 1.18 mm : ร้อยละ 10

4.1.3 สมบัติของแกลบ

แกลบที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแกลบจากอำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแกลบแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติของแกลบ

การวิเคราะห์แบบประมาณ		การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	
องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ความชื้น	10.62	คาร์บอน	35.29
เถ้า	15.59	ไฮโดรเจน	4.47
สารระเหย	66.92	ไนโตรเจน	0.83
คาร์บอนคงตัว	6.87	ซัลเฟอร์	-
		ออกซิเจน	33.20
		เถ้า	15.59
		ความชื้น	10.62
รวม	100.00	รวม	100.00

ค่าความร้อนของแกลบ (แห้ง) 3629.59 kcal/kg

ความหนาแน่น (Bulk density) 104.6 kg/m³

ขนาดแกลบ (Particle size)

- ความยาวประมาณ 0.6 - 0.8 cm
- ความกว้างประมาณ 0.07 – 0.1 cm

4.1.4 สมบัติของกากกาแฟ

กากกาแฟที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นกากกาแฟจากอำเภอมาบอำมฤต จังหวัดชุมพร ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกากกาแฟแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติของกากกาแฟ

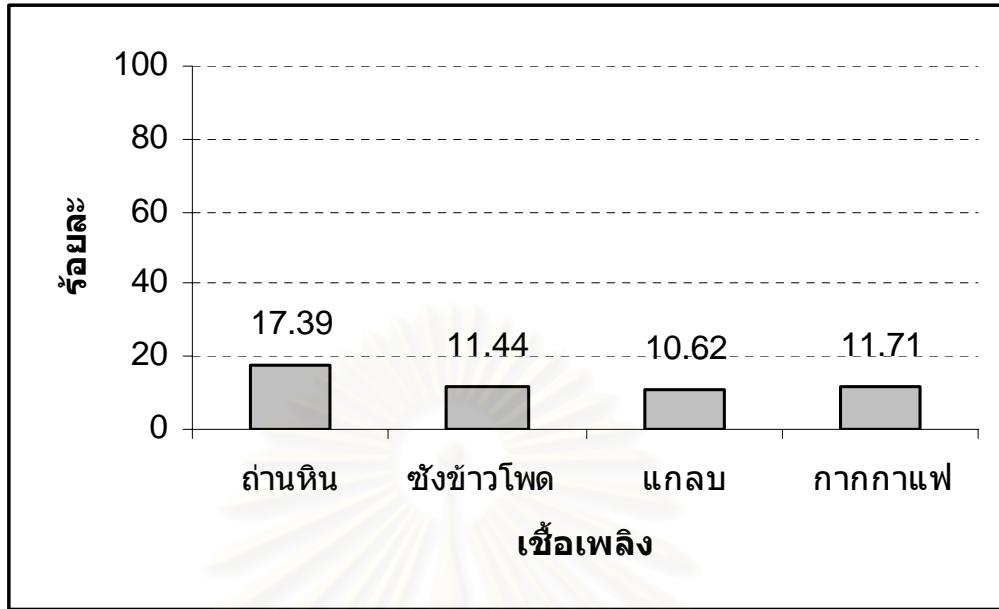
การวิเคราะห์แบบประมาณ		การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	
องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ความชื้น	11.71	คาร์บอน	40.11
เถ้า	6.38	ไฮโดรเจน	5.07
สารระเหย	66.70	ไนโตรเจน	1.54
คาร์บอนคงตัว	15.21	ซัลเฟอร์	-
		ออกซิเจน	35.19
		เถ้า	6.38
		ความชื้น	11.71
รวม	100.00	รวม	100.00

ค่าความร้อนของกากกาแฟ (แห้ง) 4202.58 kcal/kg

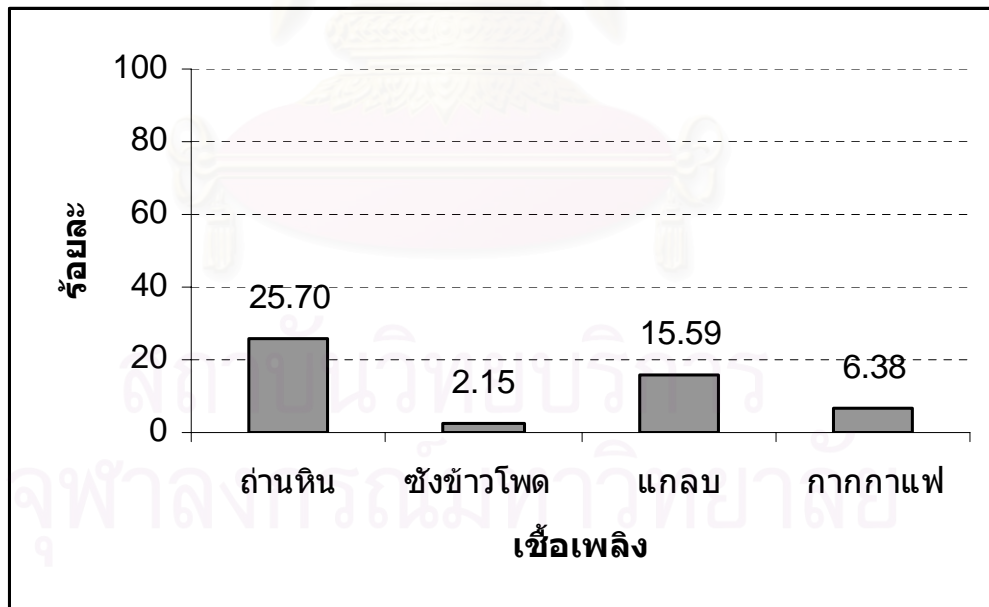
ความหนาแน่นบัลค์ (Bulk density) 125.3 kg/m³

ขนาดกากกาแฟ (Particle size)

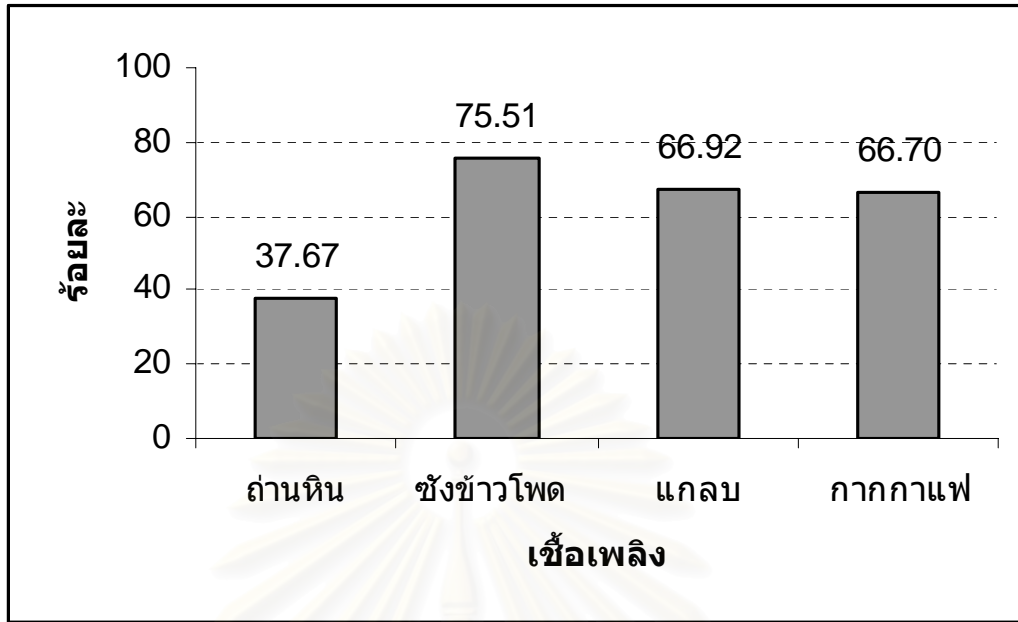
- 2.36 mm < Particle size < 4.75 mm : ร้อยละ 70
- 1.18 mm < Particle size < 2.36 mm : ร้อยละ 28.3
- Particle size < 1.18 mm : ร้อยละ 1.7



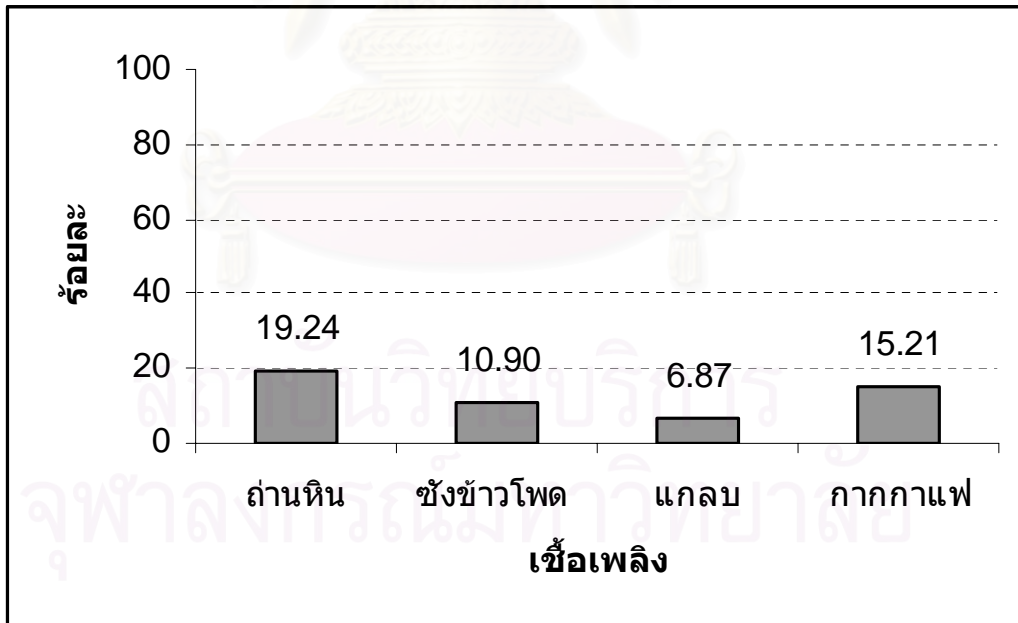
รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบความชื้นระหว่างชีวมวลตัวอย่างกับถ่านหิน



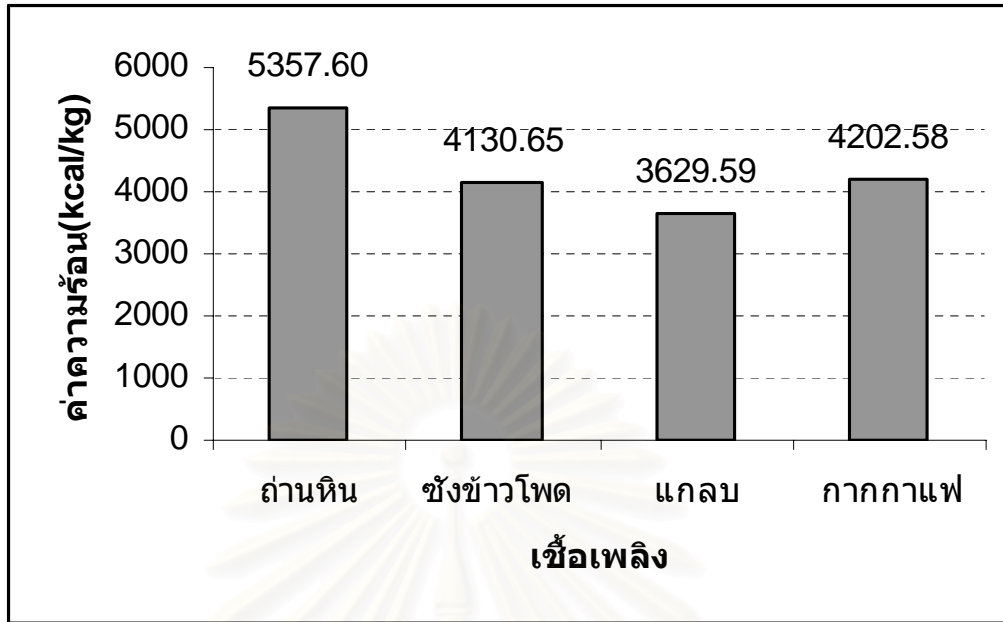
รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบเถ้าระหว่างชีวมวลตัวอย่างกับถ่านหิน



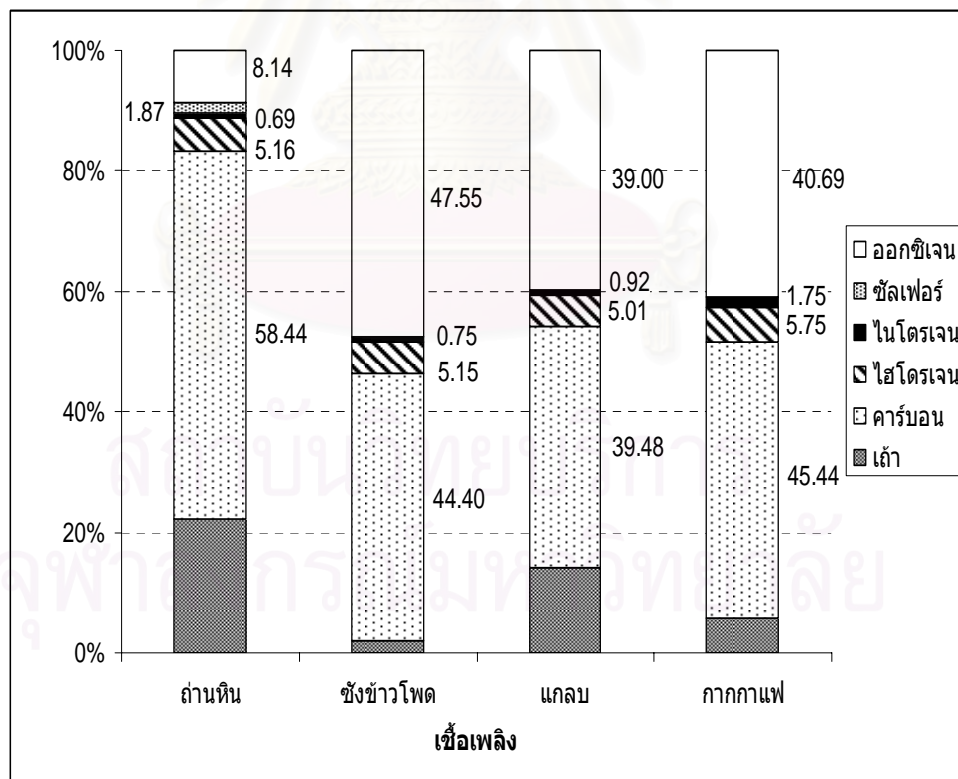
รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบสภาวะเหยระหว่างชีวมวลตัวอย่างกับถ่านหิน



รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบคาร์บอนคงตัวระหว่างชีวมวลตัวอย่างกับถ่านหิน



รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนระหว่างชีวมวลตัวอย่างกับถ่านหิน



รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุระหว่างชีวมวลตัวอย่างกับถ่านหิน (Dry Basis)

จากรูปที่ 4.1-4.6 แสดงการวิเคราะห์สมบัติถ่านหิน พบว่าถ่านหินที่ใช้มีคุณภาพต่ำเนื่องจากมีปริมาณเถ้าสูงและปริมาณคาร์บอนคงตัวน้อย เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของถ่านหินจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Ultimate Analysis พบว่าถ่านหินที่ใช้ศักดิ์ Subbituminous เมื่อพิจารณาค่าความร้อนของถ่านหินที่ได้จากการวิเคราะห์ Proximate Analysis สามารถบอกได้ว่า ถ่านหินที่ใช้เป็นถ่านหิน Subbituminous Type B (กัญจนา บุญเกียรติ, 2543)

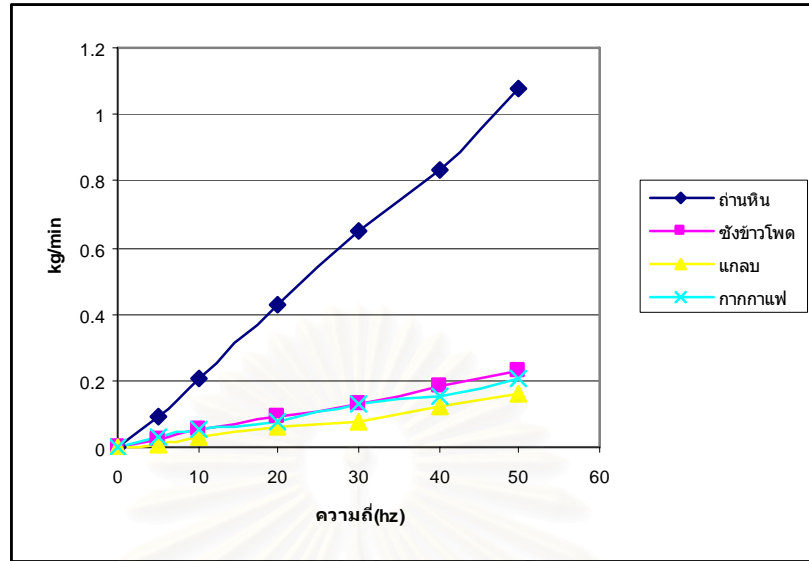
จากรูปที่ 4.1-4.6 แสดงการวิเคราะห์สมบัติชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ช้างข้าวโพด แกลบ และกากกาแฟ ด้วยวิธี Proximate Analysis พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ชนิด เป็นเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำ โดยพิจารณาจากเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณสารระเหย และความชื้นสูง ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคในการเผาไหม้ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุด

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์และปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาต่อเวลา

4.2.1 ปริมาณเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่เข้าเตาเผาต่อนาที เมื่อทำการเปลี่ยนค่าสัญญาณจากอินเวอร์เตอร์ แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณเชื้อเพลิงแต่ละตัวที่เข้าเตาเผา(กิโลกรัมต่อนาที)

อินเวอร์เตอร์ (เฮิรตซ์)	เชื้อเพลิงที่เข้าเตาเผา(กิโลกรัมต่อนาที)			
	ถ่านหิน	ช้างข้าวโพด	แกลบ	กากกาแฟ
50	1.08	0.23	0.16	0.21
40	0.83	0.18	0.12	0.15
30	0.65	0.13	0.08	0.13
20	0.43	0.09	0.06	0.08
10	0.20	0.05	0.03	0.05
5	0.09	0.02	0.01	0.03

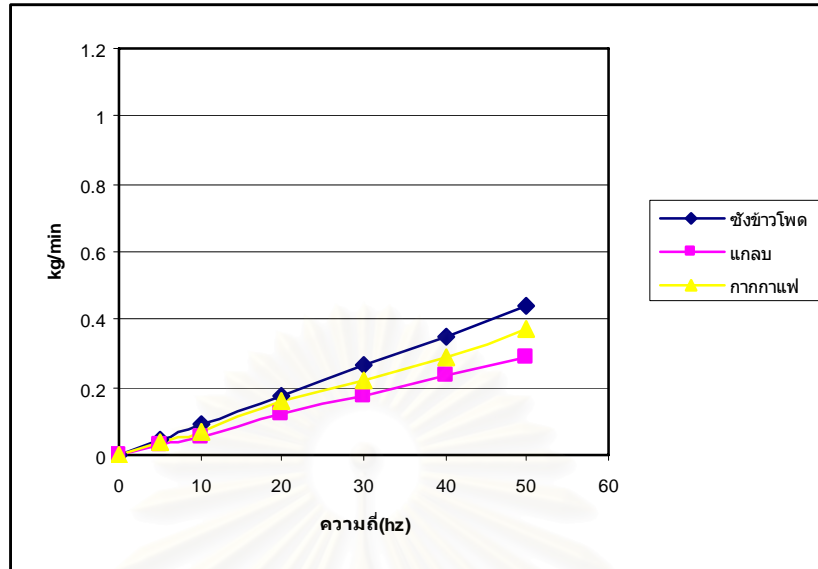


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงที่เข้าเตาเผากับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วมอเตอร์

4.2.2 ปริมาณเชื้อเพลิง (ถ่านหิน : ซีวมวล = 1 : 1) ที่เข้าเตาเผาต่อหน้าที่ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าสัญญาณจากอินเวอร์เตอร์ แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณเชื้อเพลิง (อัตราส่วน ถ่านหิน : ซีวมวล = 1 : 1 โดยน้ำหนัก) ที่เข้าเตาเผา (กิโลกรัมต่อหน้าที่)

อินเวอร์เตอร์ (เฮิรตซ์)	เชื้อเพลิงที่เข้าเตาเผา(กิโลกรัมต่อหน้าที่)		
	ถ่านหิน : ชิงช้าไฟเตด	ถ่านหิน : แกลบ	ถ่านหิน : กากกาแฟ
50	0.442	0.290	0.373
40	0.352	0.235	0.288
30	0.264	0.172	0.221
20	0.176	0.125	0.157
10	0.088	0.055	0.072
5	0.043	0.030	0.038

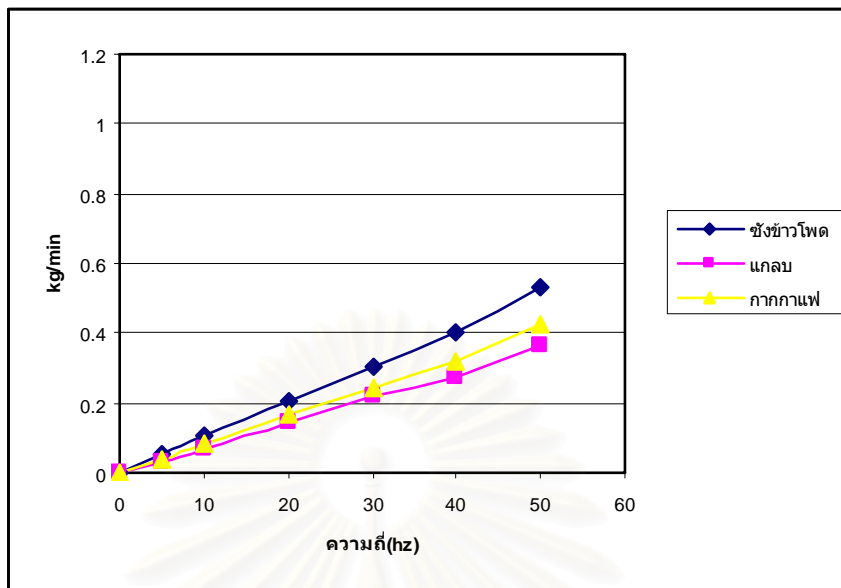


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงเมื่ออัตราส่วนถ่านหิน : ซังมวลตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 1 : 1 ที่เข้าเตาเผากับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วมอเตอร์

4.2.3 ปริมาณเชื้อเพลิง (ถ่านหิน : ซังมวล = 2 : 1) ที่เข้าเตาเผาต่อหน้าที่ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าสัญญาณจากอินเวอร์เตอร์ แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณเชื้อเพลิง (อัตราส่วน ถ่านหิน : ซังมวล = 2 : 1 โดยน้ำหนัก) ที่เข้าเตาเผา (กิโลกรัมต่อหน้าที่)

อินเวอร์เตอร์ (เฮิรตซ์)	เชื้อเพลิงที่เข้าเตาเผา(กิโลกรัมต่อหน้าที่)		
	ถ่านหิน : ซังข้าวโพด	ถ่านหิน : แกลบ	ถ่านหิน : กากกาแฟ
50	0.529	0.367	0.424
40	0.400	0.277	0.320
30	0.303	0.217	0.242
20	0.205	0.142	0.164
10	0.105	0.072	0.083
5	0.050	0.034	0.038

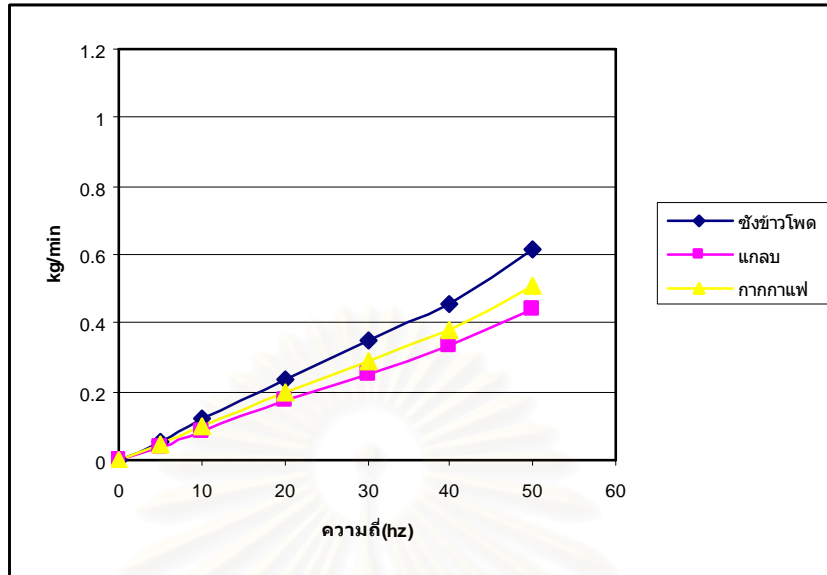


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงเมื่ออัตราส่วนถ่านหิน : ซังมวลตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 2 : 1 ที่เข้าเตาเผากับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วมอเตอร์

4.2.4 ปริมาณเชื้อเพลิง (ถ่านหิน : ซังมวล = 3 : 1) ที่เข้าเตาเผาต่อหน้าที่ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าสัญญาณจากอินเวอร์เตอร์ แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณเชื้อเพลิง (อัตราส่วน ถ่านหิน : ซังมวล = 3 : 1 โดยน้ำหนัก) ที่เข้าเตาเผา (กิโลกรัมต่อหน้าที่)

อินเวอร์เตอร์ (เฮิรตซ์)	เชื้อเพลิงที่เข้าเตาเผา(กิโลกรัมต่อหน้าที่)		
	ถ่านหิน : ซังข้าวโพด	ถ่านหิน : แกลบ	ถ่านหิน : กากกาแฟ
50	0.615	0.444	0.506
40	0.455	0.337	0.383
30	0.352	0.254	0.289
20	0.234	0.173	0.200
10	0.120	0.087	0.099
5	0.052	0.039	0.046

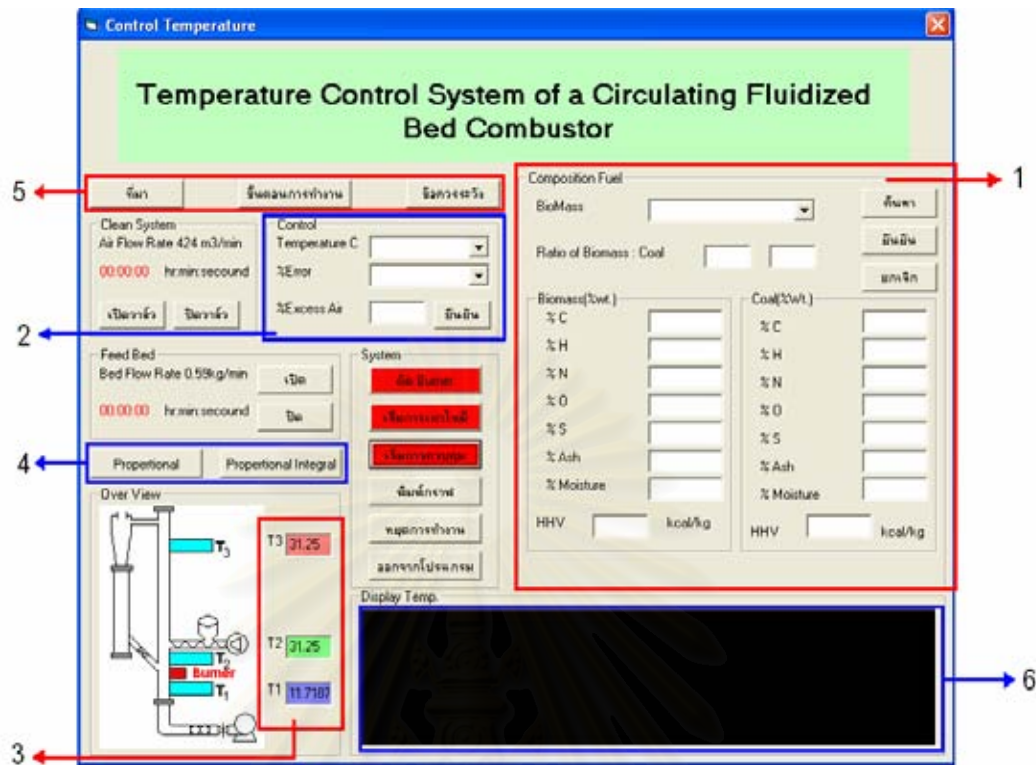


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงเมื่ออัตราส่วนถ่านหิน : ชีวมวลตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 3 : 1 ที่เข้าเตาเผากับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วมอเตอร์

จากการหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาเผาเมื่ออัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับชีวมวลมีค่าต่างๆ (ถ่านหิน : ชีวมวลตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 3 : 1, 2 : 1, 1 : 1 โดยน้ำหนัก) พบว่าปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงมีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.8 – 4.10 พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากการป้อนชีวมวลโดยไม่ได้ผสมกับถ่านหิน จากรูปที่ 4.7 พบว่าปริมาณชีวมวลที่เข้าสู่เตาเผาช่วงแรกมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ จนผ่านช่วงเวลานึงปริมาณที่เข้าสู่เตาเผามีค่าลดลง เพราะชีวมวลมีองค์ประกอบเป็นเส้นใย เมื่อทำการป้อนเข้าเตาเผาส่วนที่เป็นเส้นใยซึ่งมีน้ำหนักเบากว่าส่วนที่เป็นเนื้อของชีวมวลไปอัดกันบริเวณช่องว่างระหว่างเกลียวของ Screw feeder กับท่อ ทำให้ปริมาณชีวมวลที่เข้าเตาเผาลดลง

4.3 การเขียนโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนเวียน

เมื่อเขียนโปรแกรมส่วนการควบคุมตามแผนผังการทำงานดังรูปที่ 3.9 และ ส่วนของการเชื่อมต่อระหว่างบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์และโปรแกรมผ่านทางพอร์ตอนุกรมเอนกประสงค์(Universal serial bus : USB) โดยใช้โปรแกรม Visual Basic version 6.0 หน้าต่างการทำงานติดต่อกันระหว่างผู้ใช้กับคอมพิวเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 หน้าต่างโปรแกรมติดต่อกับผู้ใช้งาน

รายละเอียดการทำงานของแต่ละส่วนของหน้าต่างแสดงดังนี้

1. ส่วนของการรองรับการป้อนข้อมูลจากผู้ใช้เกี่ยวกับรายละเอียดของเชื้อเพลิง ได้แก่
 - ชนิดของชีวมวลที่ใช้ในการเผาไหม้ ได้แก่ ช้างข้าวโพด แกลบ และกากกาแฟ
 - อัตราส่วนระหว่างชีวมวลกับถ่านหิน ได้แก่ ชีวมวลต่อถ่านหิน = 1:3 1:2 1:1 0:1
 - องค์ประกอบของเชื้อเพลิง
2. ส่วนของการรองรับการป้อนข้อมูลจากผู้ใช้เกี่ยวกับการควบคุม ได้แก่
 - อุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการควบคุม ได้แก่ 700 °C, 800 °C และ 900 °C
 - ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ได้แก่ 1-10
 - ค่าร้อยละอากาศมากเกินพอที่ต้องการให้ป้อนเข้าสู่เตาเผา ได้แก่ 250
3. หน้าต่างแสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 โดยตำแหน่งที่ 3 คือตำแหน่งที่ระบบควบคุมอุณหภูมิให้คงที่

4. ส่วนที่ผู้ใช้ต้องเลือก เพื่อให้โปรแกรมประมวลผลการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ตัวควบคุมแบบ P หรือ PI
5. ปุ่มแสดงแหล่งที่มา(หลักการและทฤษฎี จากบทที่ 2) ขั้นตอนการทำงาน(จากหัวข้อ 3.2.6 หน้า 46) และ ข้อควรระวัง ได้แก่ การตรวจอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้งาน เช่น ท่อนำแก๊ส LPG, ข้อต่อท่ออากาศที่เชื่อมกับเตาเผา เป็นต้น
6. หน้าต่างแสดงแนวโน้มของอุณหภูมิที่ตรวจจับได้ทั้ง 3 ตำแหน่งกับเวลา

4.4 ค่าคงที่ของกระบวนการ

การเขียนโปรแกรมต้องใช้ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของเครื่องควบคุมแบบต่างๆ ตามหลักการของการควบคุมกระบวนการทางเคมี ซึ่งความสัมพันธ์แบบนี้จะมีค่าคงที่เฉพาะในแต่ละแบบ ในการทดลองหาค่าคงที่ของกระบวนการ (Process gain : K_p) เเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาฟลูอิดไคส์เบดแบบหมุนเวียนคือ เมื่อระบบอยู่ในภาวะคงที่แล้ว จากนั้นเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไปเป็นค่าคงที่อีกค่าหนึ่ง เช่น อัตราการป้อนเดิมเท่ากับ 150 กรัมต่อนาที เปลี่ยนเป็น 200 กรัมต่อนาที เป็นต้น และรอจนกว่าระบบเข้าสู่ภาวะคงที่เองอีกครั้งที่ความเร็วลมคงที่ จะได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่ และ ผลต่างของถ่านหินที่ป้อน ซึ่งจากการทดลองนี้จะได้ค่าคงที่ของกระบวนการแต่ละเชื้อเพลิงดังตารางที่ 4.9

การควบคุมการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ส่วนการปรับการป้อนเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้มีรูปแบบการควบคุมเป็นแบบป้อนกลับ (Feedback control) โดยใช้เครื่องควบคุม 2 แบบ คือ เครื่องควบคุมแบบ P และ เครื่องควบคุมแบบ PI แต่ละเครื่องควบคุมจะมีค่าคงที่สมมติฐานของ Cohen & Coon (Cohen, G. H., and Coon G. A., 1953) ดังนั้นจากค่าคงที่ของกระบวนการจะได้ค่าคงที่ของเครื่องควบคุมดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าคงที่ของกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง (ภาคผนวก ค.)

เชื้อเพลิง	ค่าคงที่ของกระบวนการ	เวลาคงที่ของกระบวนการ	ค่า Dead time
	K_p ($^{\circ}\text{C/g}$)	τ_p (นาที)	t_d (นาที)
ถ่านหิน	0.181	4.35	3.95
ถ่านหิน : ชั่งข้าวโพด (โดยน้ำหนัก)			
3 : 1	0.171	4.80	4.00
2 : 1	0.168	4.80	3.00
1 : 1	0.161	5.25	3.40
ถ่านหิน : แกลบ (โดยน้ำหนัก)			
3 : 1	0.167	5.55	3.65
2 : 1	0.162	5.55	3.15
1 : 1	0.152	6.75	5.65
ถ่านหิน : กากกาแฟ (โดยน้ำหนัก)			
3 : 1	0.172	3.87	4.23
2 : 1	0.169	4.80	3.80
1 : 1	0.162	5.62	3.97
พิจารณาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาในช่วงเวลา 10 นาที			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ P และ PI ของเชื้อเพลิงตัวอย่างตามสมมติฐานของ Cohen & Coon (ภาคผนวก ค.)

เชื้อเพลิง	เครื่องควบคุมแบบ P	เครื่องควบคุมแบบ PI	
	$K_c(g/^{\circ}C)$	$K_c(g/^{\circ}C)$	τ_I (นาที)
ถ่านหิน	14.06	7.46	4.76
ถ่านหิน : ซังข้าวโพด (โดยน้ำหนัก)			
3 : 1	16.37	8.65	5.06
2 : 1	19.05	10.95	4.45
1 : 1	20.46	11.34	4.95
ถ่านหิน : แกลบ (โดยน้ำหนัก)			
3 : 1	20.18	11.66	5.27
2 : 1	22.29	12.64	4.91
1 : 1	26.97	14.65	5.82
ถ่านหิน : กากกาแฟ (โดยน้ำหนัก)			
3 : 1	14.55	7.77	4.64
2 : 1	18.39	9.09	4.95
1 : 1	20.31	10.75	5.59

พิจารณาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาในช่วงเวลา 10 นาที

จากความสัมพันธ์ใหม่ที่เลือกใช้ ผู้วิจัยจะได้ทดลองเขียนโปรแกรมตามชนิดของเครื่องควบคุมทั้ง 2 แบบ ต่อไป เพื่อดูว่าโปรแกรมใดเหมาะสมกับระบบการเผาไหม้

4.5 การควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน

การเขียนโปรแกรมให้มีรูปแบบการทำงานให้เหมาะสมกับการเผาไหม้นั้น(เกียรติ พุกษาท, 2533) แบ่งเป็น 3 ส่วนคือ

- ก. ส่วนควบคุมโดยผู้ควบคุม(Manual control) คือ ผู้ควบคุมสามารถปรับเปลี่ยนค่าของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศได้ตามต้องการ โดยส่วนควบคุมนี้จะใช้เมื่อเริ่มการเผาไหม้จนกระทั่งภาวะการเผาไหม้อยู่ในภาวะคงที่

- ข. ส่วนของการอ่านค่าอุณหภูมิ คือ ส่วนนี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ผ่านวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อมาคำนวณเป็นค่าของอุณหภูมิเก็บไว้ในฐานข้อมูลของโปรแกรมสำหรับนำไปใช้ต่อไป
- ค. ส่วนของการควบคุมอัตโนมัติ(Automatic control) คือ ส่วนของโปรแกรมที่นำค่าอุณหภูมิที่อ่านได้มาเปรียบเทียบกับค่าของอุณหภูมิที่กำหนดและไปปรับเปลี่ยนค่าของอัตราการป้อนถ่านหินและอากาศตามความสัมพันธ์ที่เขียนไว้ในโปรแกรมเพื่อควบคุมภาวะการเผาไหม้ให้อยู่ในภาวะคงที่

การควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดมีการควบคุมแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ก. ส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) เป็นรูปแบบหนึ่งของการควบคุมที่เหมาะสมกับงานวิจัยที่ใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุม มีลักษณะการควบคุมคือ สัญญาณค่าอุณหภูมิการเผาไหม้ซึ่งเป็นตัวแปรป้อนออกที่วัดค่าได้ของระบบถูกนำกลับมาใช้พิจารณาปรับค่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงซึ่งเป็นตัวแปรป้อนเข้าที่ปรับค่าได้

ในการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมกระบวนการต่าง ๆ นั้น ส่วนสำคัญคือ โปรแกรมที่ใช้ซึ่งเปรียบเสมือนกับการทำงานของเครื่องควบคุม เครื่องควบคุมสำหรับการควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

- เครื่องควบคุมแบบ P (Proportional controller) เครื่องควบคุมแบบนี้จะทำให้เกิดค่า Offset ของการควบคุม
- เครื่องควบคุมแบบ PI (Proportional Integral controller) เครื่องควบคุมแบบนี้สามารถกำจัดค่า Offset แต่จะเกิดการแกว่งของอุณหภูมิที่ต้องการควบคุมมาก

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องควบคุมทั้ง 2 แบบ เปรียบเทียบกัน โดยแต่ละเครื่องควบคุมจะมีค่าคงที่ต่างกันดังสมการ 2.13, 2.14 และ 2.15 ตามสมมติฐานของ Cohen & Coon (Cohen, G. H., and Coon G. A., 1953) ดังตารางที่ 4.10

ข. ส่วนการควบคุมแบบอัตราส่วน (Ratio Control) มีลักษณะการควบคุม คือ ทำการเปรียบเทียบอัตราการป้อนเชื้อเพลิงกับอัตราการป้อนอากาศเข้าระบบ ว่ามีอัตราส่วนที่ผู้ควบคุมต้องการ

การควบคุมส่วนนี้มีขึ้นเพื่อให้เกิดการเผาเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะจากงานวิจัยทั่ว ๆ ไป มักมีการบ่อนอากาศคงที่ทำให้เมื่อมีการบ่อนเชื้อเพลิงน้อย จะทำให้สูญเสียความร้อนไปกับอากาศ ในทางตรงกันข้ามเมื่อมีการบ่อนเชื้อเพลิงมาก จะทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ

จากความสัมพันธ์ข้างต้น ผู้วิจัยจะทำการทดลองเขียนโปรแกรมตามชนิดของเครื่องควบคุมทั้ง 2 แบบ เพื่อดูว่าโปรแกรมใดเหมาะสมกับระบบการเผาไหม้

4.5.1 การควบคุมด้วยโปรแกรมแบบ P

เครื่องควบคุมแบบ P มีสมการความสัมพันธ์ คือ

$$\text{อัตราการบ่อนถ่านหิน} = K_c(\text{อุณหภูมิที่กำหนด} - \text{อุณหภูมิที่วัดได้}) + \text{อัตราการบ่อนถ่านหินที่ภาวะเดิม} \dots\dots\dots(4.1)$$

จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อใช้โปรแกรมควบคุมโดยใช้ค่าคงที่ตามสมมติฐานของ Cohen & Coon (Cohen, G. H., and Coon G. A., 1953) ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ให้คงที่ตามค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้เพราะค่า K_c มีค่าสูง (14.06 $g / ^\circ C$) เช่นเดียวกับงานวิจัยของเก็จวลิ (เก็จวลิ พฤกษาทร, 2533) ผู้วิจัยจึงทดลองซ้ำโดยใช้ค่าคงที่ตามสมมติฐานของ Cohen & Coon (Cohen, G. H., and Coon G. A., 1953) ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบเป็น 10 วินาที พบว่าก็ยังไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ให้คงที่ตามค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ได้แสดงดังรูปที่ 4.13 ผู้วิจัยจึงเลือกค่าคงที่ของการควบคุม (K_c) ใหม่ให้สอดคล้องกับการทำงานของระบบการเผาไหม้ คือ อัตราการบ่อนถ่านหินควรมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เพื่อให้อุณหภูมิการเผาไหม้คงที่ ดังนั้นจึงใช้ค่าคงที่ของการควบคุมให้มีค่าน้อยลง จากงานวิจัยของเก็จวลิ(เก็จวลิ พฤกษาทร, 2533) พบว่าการหาค่าคงที่ของกระบวนการจากสมการความสัมพันธ์ที่ 4.2 สามารถควบคุมอุณหภูมิสู่ค่าเป้าหมายได้ ผู้วิจัยจึงใช้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวมาใช้ในงานวิจัยนี้ จะได้ค่าคงที่ของกระบวนการดังตารางที่ 4.11

$$K_c = 1/K_p \dots\dots\dots(4.2)$$

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ P(new) และ PI (new)

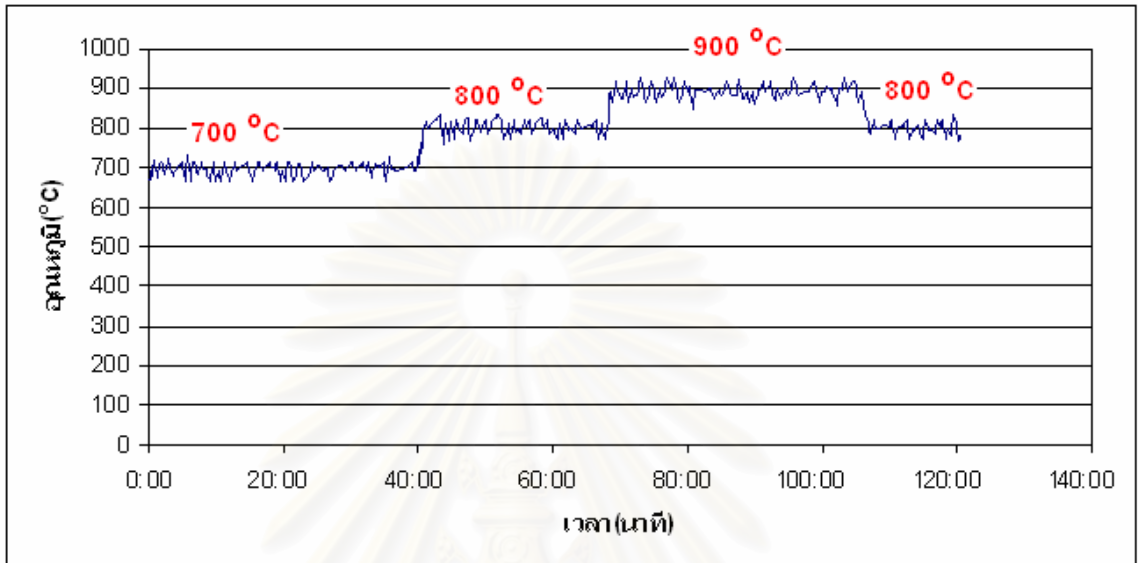
ชื่อเพลิง	เครื่องควบคุมแบบ P, PI $K_c(g/^\circ\text{C})$
ถ่านหิน	5.525
ถ่านหิน : ซังข้าวโพด (โดยน้ำหนัก)	
3 : 1	5.848
2 : 1	5.952
1 : 1	6.211
ถ่านหิน : แกลบ (โดยน้ำหนัก)	
3 : 1	5.988
2 : 1	6.172
1 : 1	6.579
ถ่านหิน : กากกาแฟ (โดยน้ำหนัก)	
3 : 1	5.814
2 : 1	5.917
1 : 1	6.173

พิจารณาอัตราการป้อนชื่อเพลิงในช่วงเวลา 10 นาที

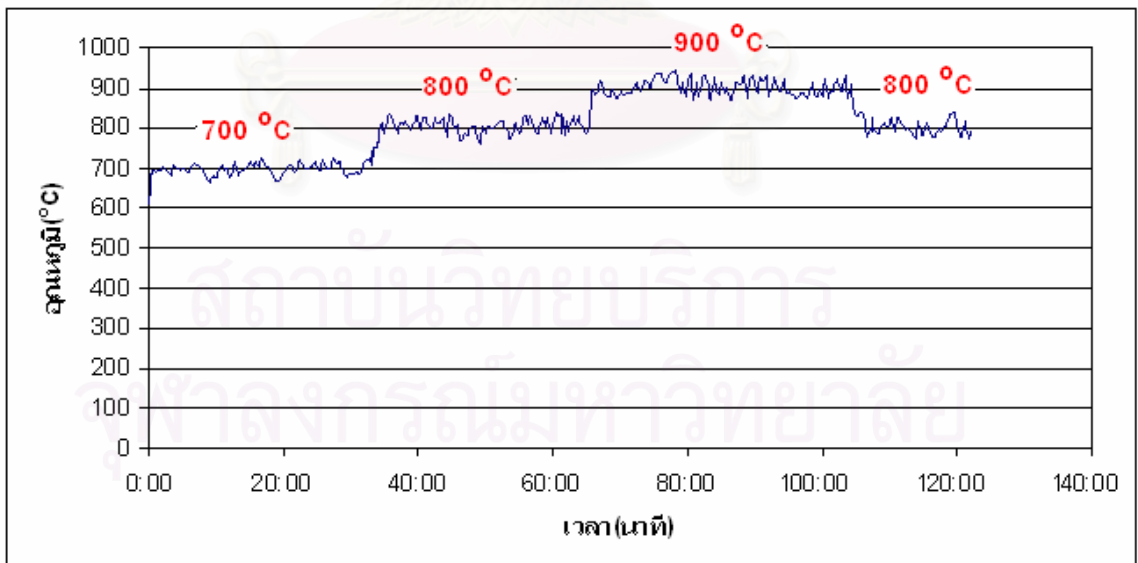
สำหรับช่วงเวลาในการนำค่าอุณหภูมิมาเปรียบเทียบจะต้องเป็นเวลาที่สัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลแทนลักษณะแนวโน้มของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริง คือไม่ดึงสัญญาณมาเปรียบเทียบที่ระยะเวลาห่างเกินไปเพราะจะทำให้ลักษณะแนวโน้มของอุณหภูมิเปลี่ยนไปจากความเป็นจริง ในงานวิจัยนี้มีการใช้ชื่อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินและซีวมวลจึงใช้ช่วงเวลาในการนำค่าอุณหภูมิมาเปรียบเทียบมีค่าเท่ากับ 5 วินาที เพราะซีวมวลติดไฟได้ง่าย

โปรแกรมที่เขียนนี้มีลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.14 โดยผลการควบคุมอุณหภูมิด้วยโปรแกรมนี้สามารถรักษาอุณหภูมิในการเผาไหม้ชื่อเพลิงถ่านหินแสดงดังรูป 4.15, การเผาไหม้ชื่อเพลิง (ถ่านหิน : ซีวมวล = 1:1) แสดงดังรูปที่ 4.16 - 4.18 , การเผาไหม้ชื่อเพลิง(ถ่านหิน : ซีวมวล = 2:1) แสดงดังรูปที่ 4.19 - 4.21 และ การเผาไหม้ชื่อเพลิง(ถ่านหิน : ซีวมวล = 3:1) แสดงดังรูปที่ 4.22 - 4.24 พบว่าระบบควบคุมอุณหภูมิสามารถควบคุมอุณหภูมิในการเผาไหม้ชื่อเพลิงสู่ค่า

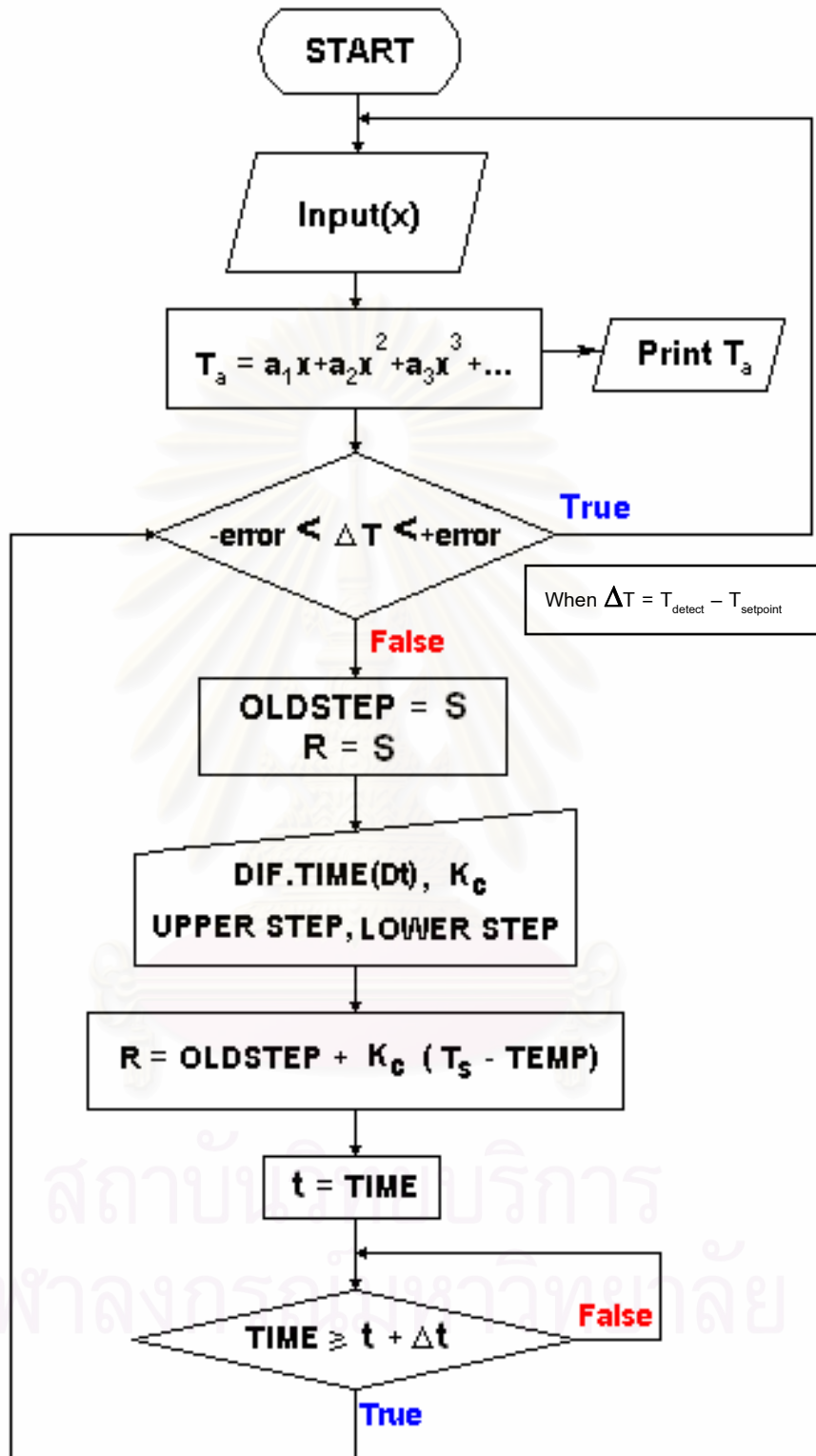
เป้าหมายได้จริง โดยในการเผาไหม้ถ่านหินการควบคุมมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิจากค่าเป้าหมาย $\pm 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที



รูปที่ 4.12 กราฟการควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหิน เมื่อใช้ค่าคงที่กระบวนการตามสมมติฐานของ Cohen & Coon ($K_c = 14.06\text{ g }/^{\circ}\text{C}$) เมื่อใช้เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที

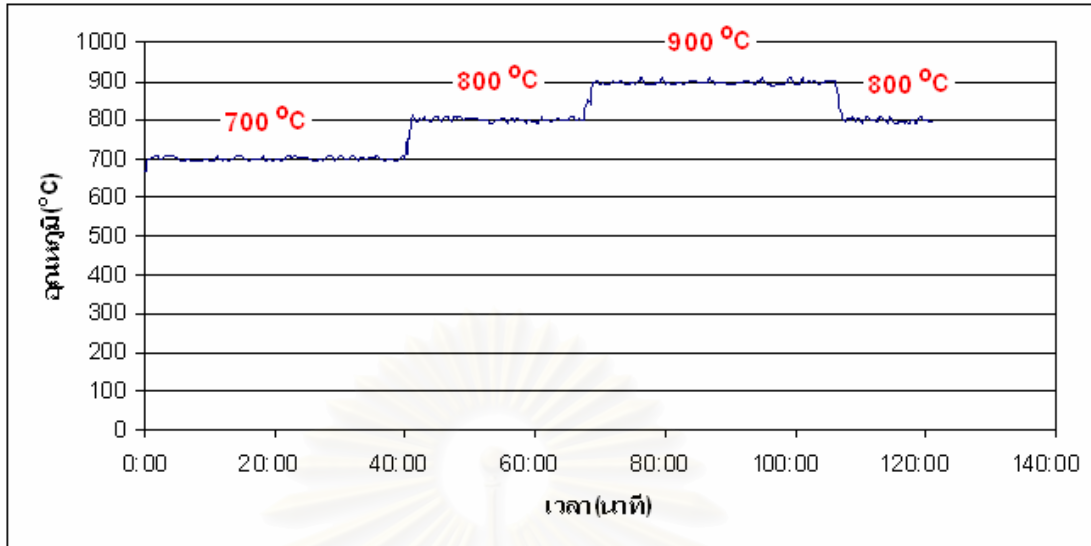


รูปที่ 4.13 กราฟการควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหิน เมื่อใช้ค่าคงที่กระบวนการตามสมมติฐานของ Cohen & Coon ($K_c = 14.06\text{ g }/^{\circ}\text{C}$) เมื่อใช้เวลาในการเปรียบเทียบ 10 วินาที

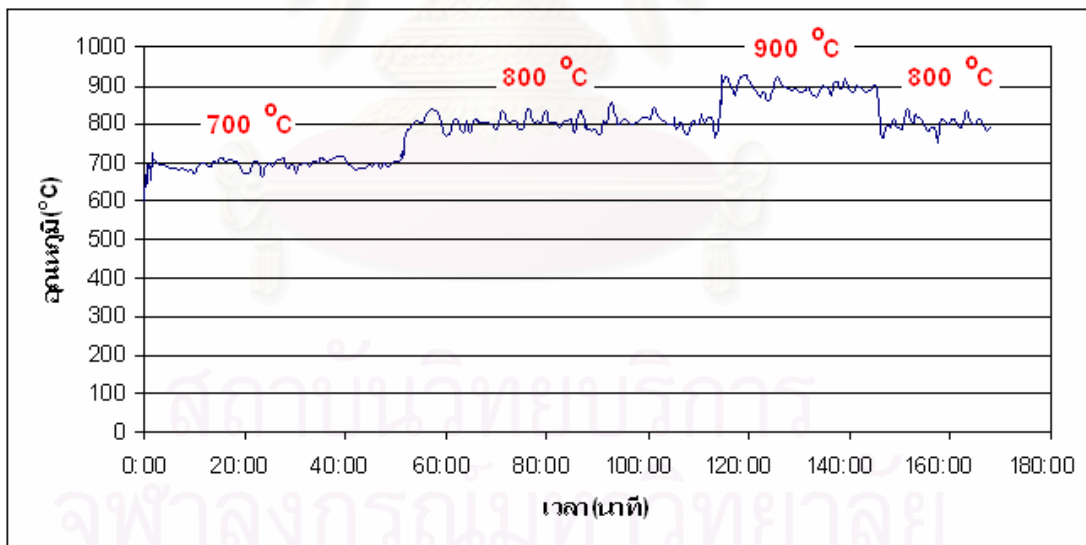


รูปที่ 4.14 แผนผังการทำงานของโปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในสถานการณ์ควบคุมแบบป้อนกลับ

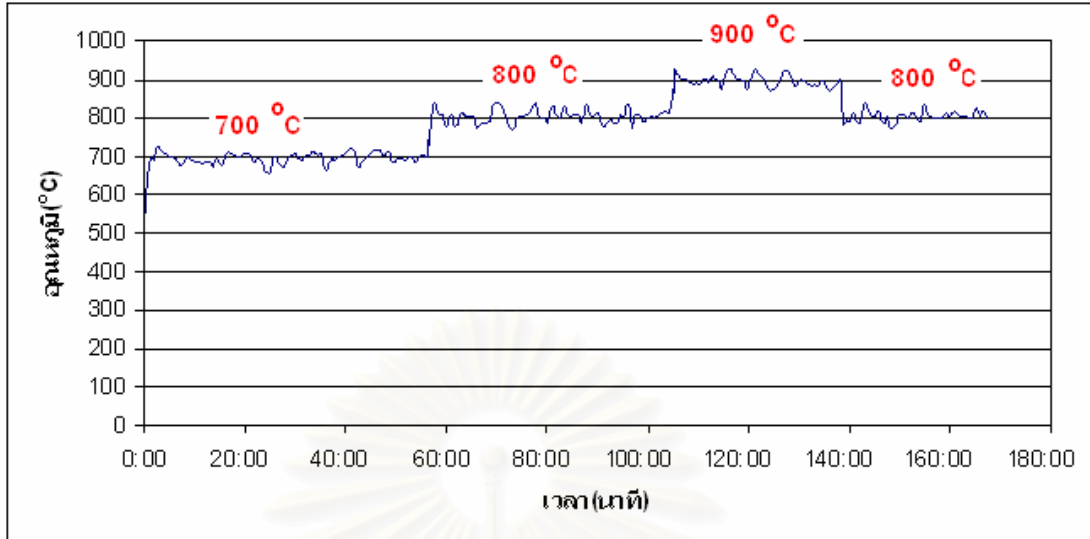
โดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง



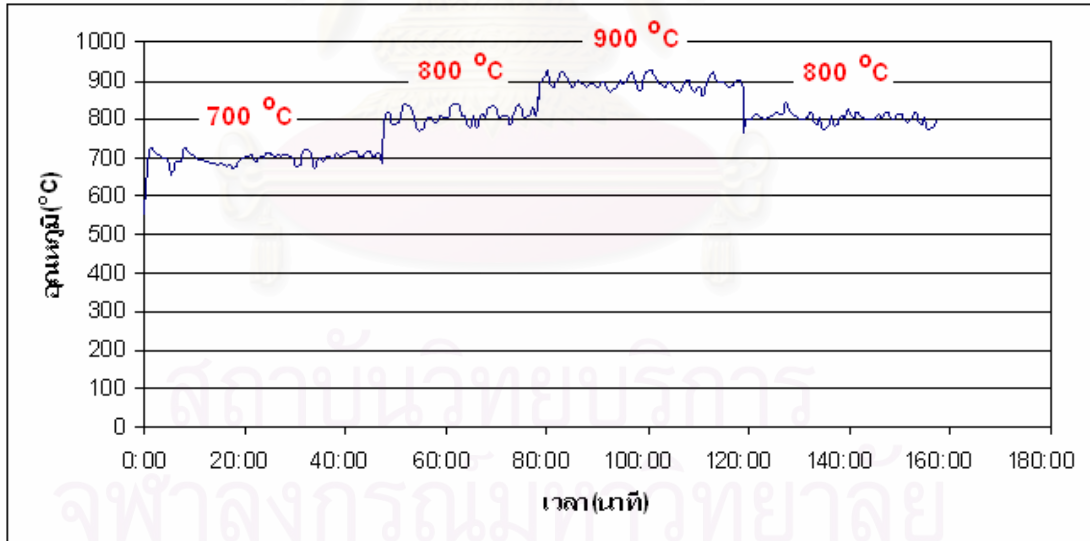
รูปที่ 4.15 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.525$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง



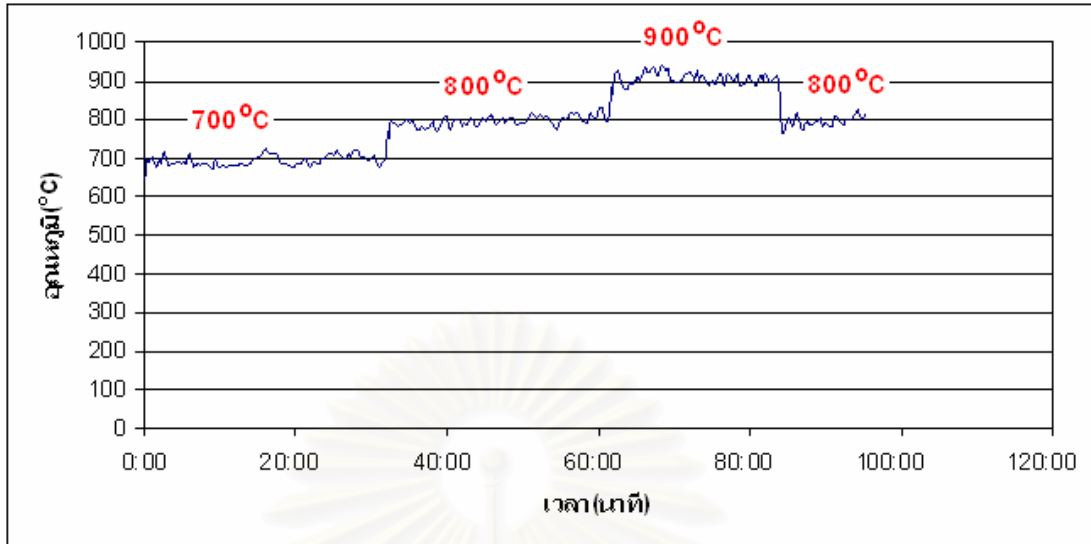
รูปที่ 4.16 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.211$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่านหิน : ซังข้าวโพด = 1:1



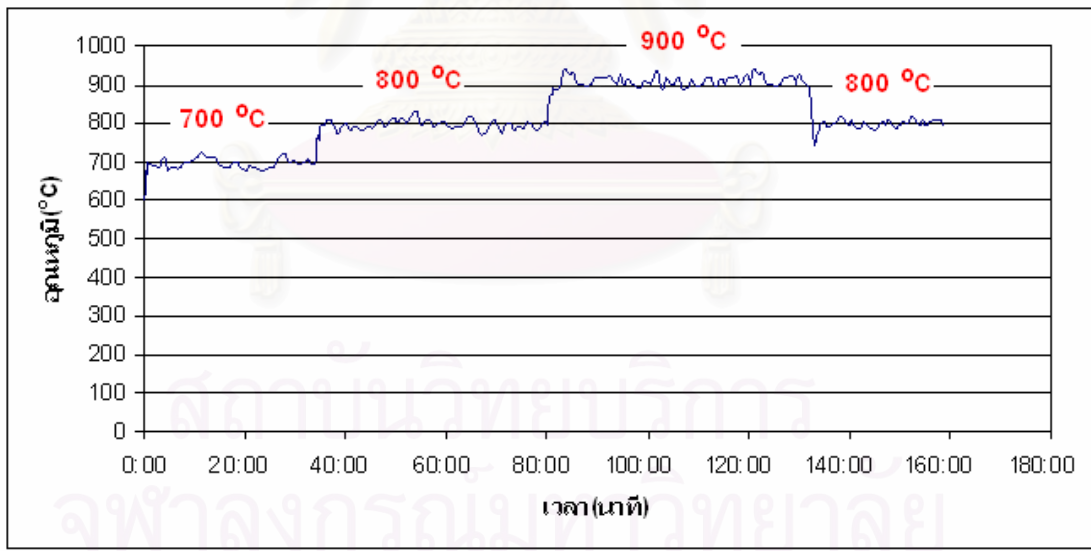
รูปที่ 4.17 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.579$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : แกลบ = 1:1



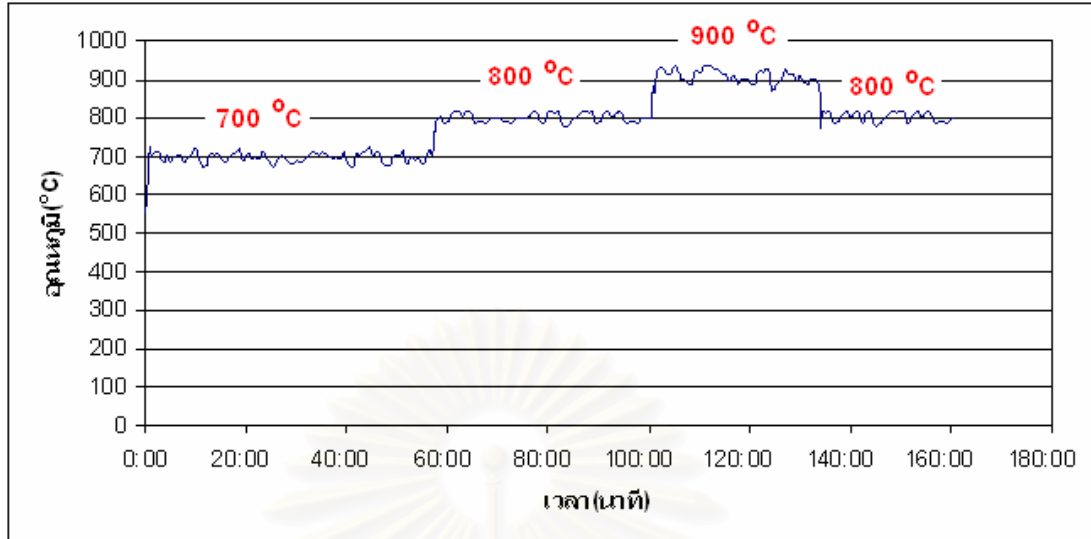
รูปที่ 4.18 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.173$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : กากกาแฟ = 1:1



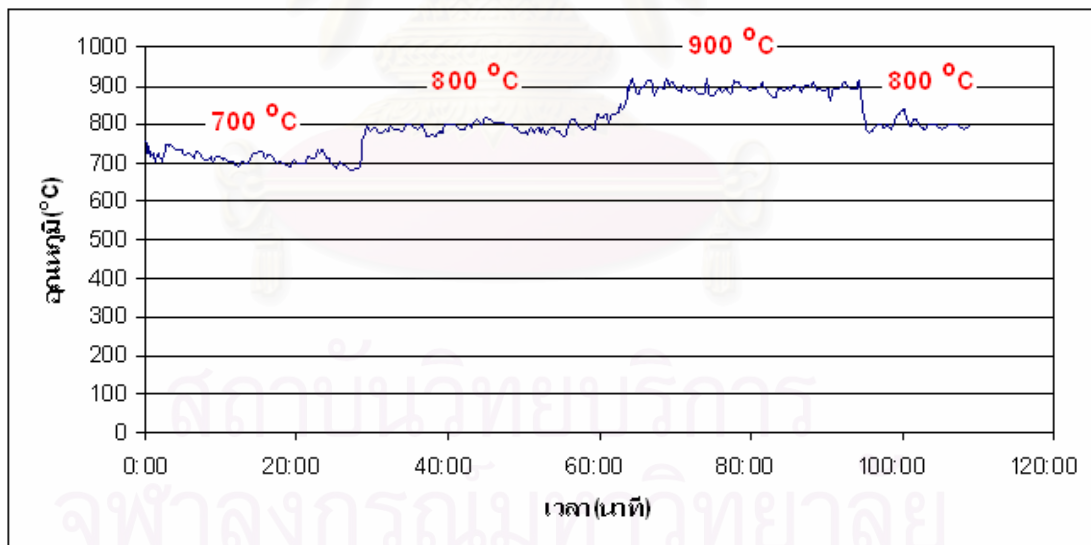
รูปที่ 4.19 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.952$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : ซิ่งซ้ำวโหด = 2:1



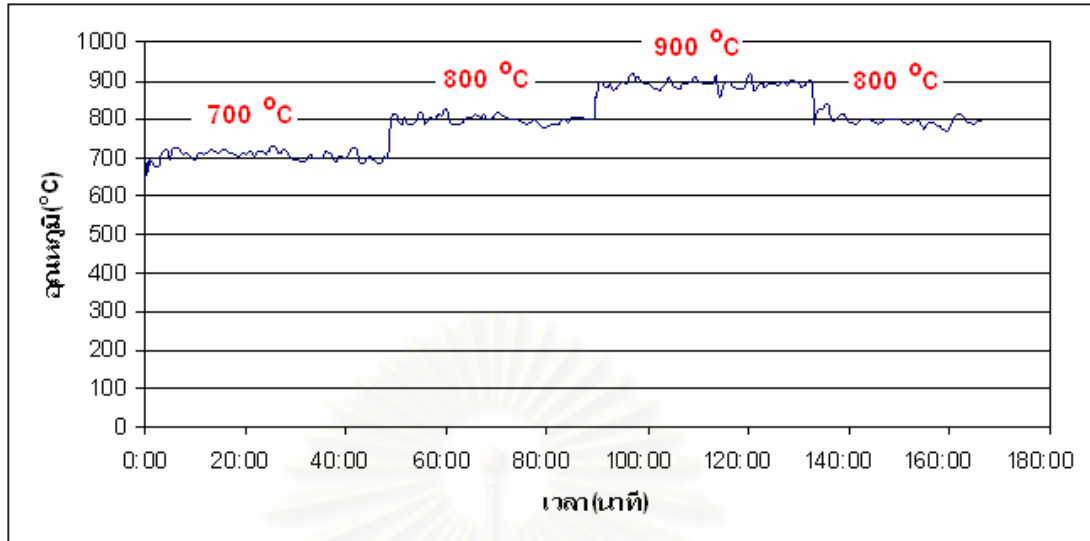
รูปที่ 4.20 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.172$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : แกลบ = 2:1



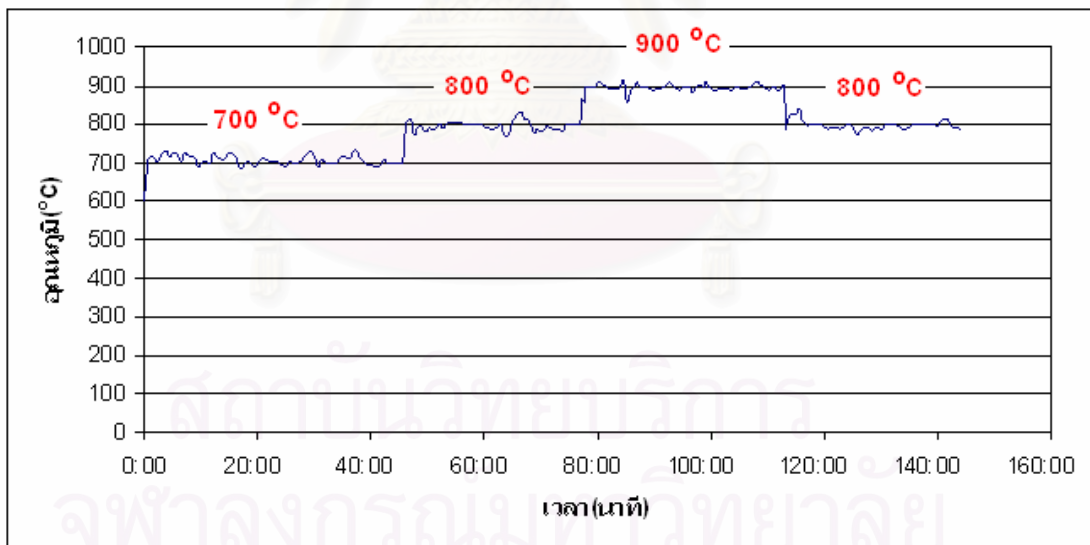
รูปที่ 4.21 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.917$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่านหิน : กากกาแฟ = 2:1



รูปที่ 4.22 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.848$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่านหิน : ซังข้าวโพด = 3:1



รูปที่ 4.23 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.988$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : แกลบ = 3:1



รูปที่ 4.24 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.814$ เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : กากกาแฟ = 3:1

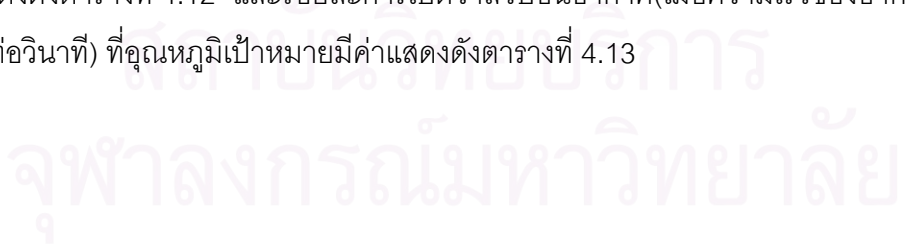
4.5.2 การควบคุมด้วยโปรแกรมแบบ PI

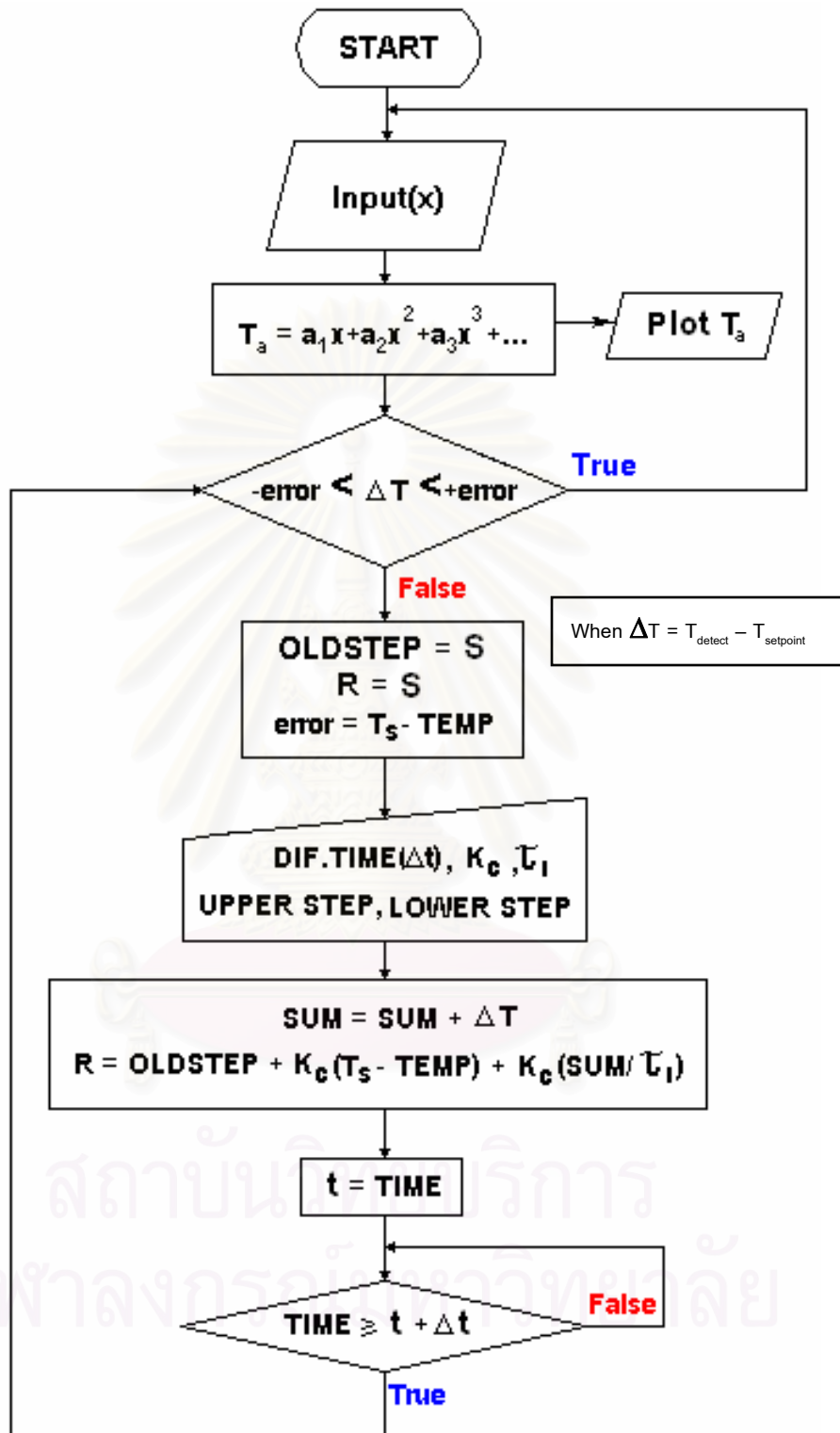
เมื่อโปรแกรมควบคุมแบบ P เกิดปัญหาเรื่องค่า Offset ดังนั้นผู้วิจัยจึงแก้ปัญหาโดยทดลองใช้ความสัมพันธ์ของเครื่องควบคุมแบบ PI ที่สามารถกำจัดค่า Offset ได้ทั้งหมด สมการความสัมพันธ์คือ

$$\text{อัตราการป้อนถ่านหิน} = K_c(\text{อุณหภูมิที่กำหนด} - \text{อุณหภูมิที่วัดได้}) + (K_c / \tau_i)(\text{พื้นที่ใต้กราฟระหว่างค่าผลต่างของอุณหภูมิกับเวลา}) + \text{อัตราการป้อนถ่านหินที่ภาวะเดิม} \dots\dots\dots(4.3)$$

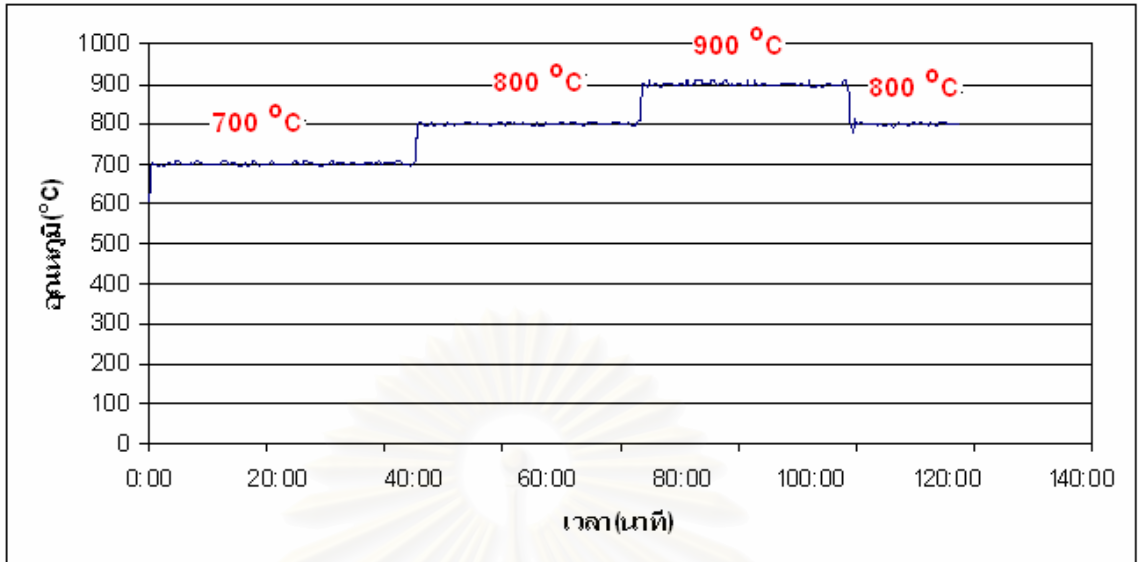
โปรแกรมที่เขียนนี้มีลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.25 โดยผลการควบคุมอุณหภูมิด้วยโปรแกรมนี้อาจรักษาอุณหภูมิในการเผาไหม้ถ่านหินแสดงดังรูปที่ 4.26 เมื่อใช้ K_c ดังตารางที่ 4.11 กับ $\tau_i = 4.76$ นาทีจากสมมติฐานของ Cohen & Coon (Cohen, G. H., and Coon G. A., 1953) พบว่าระบบควบคุมอุณหภูมิสามารถควบคุมอุณหภูมิในการเผาไหม้เชื้อเพลิงสู่ค่าเป้าหมายได้จริง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิจากค่าเป้าหมาย ± 7.5 °C ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที

ผลการควบคุมอุณหภูมิในการเผาไหม้เชื้อเพลิง (ถ่านหิน : ซีวมวล = 1:1) แสดงดังรูปที่ 4.27 - 4.29 , การเผาไหม้เชื้อเพลิง(ถ่านหิน : ซีวมวล = 2:1) แสดงดังรูปที่ 4.30 - 4.32 และ การเผาไหม้เชื้อเพลิง(ถ่านหิน : ซีวมวล = 3:1) แสดงดังรูปที่ 4.33 - 4.35 ให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการได้เมื่อใช้ K_c และ τ_i ดังตารางที่ 4.11 พบว่าระบบควบคุมอุณหภูมิสามารถควบคุมอุณหภูมิในการเผาไหม้เชื้อเพลิงสู่ค่าเป้าหมายได้จริง โดยพบว่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาที่อุณหภูมิเป้าหมายมีค่าแสดงดังตารางที่ 4.12 และร้อยละการเปิดวาล์วป้อนอากาศ(เมื่อความเร็วของอากาศสูงสุดมีค่า 4 เมตรต่อวินาที) ที่อุณหภูมิเป้าหมายมีค่าแสดงดังตารางที่ 4.13

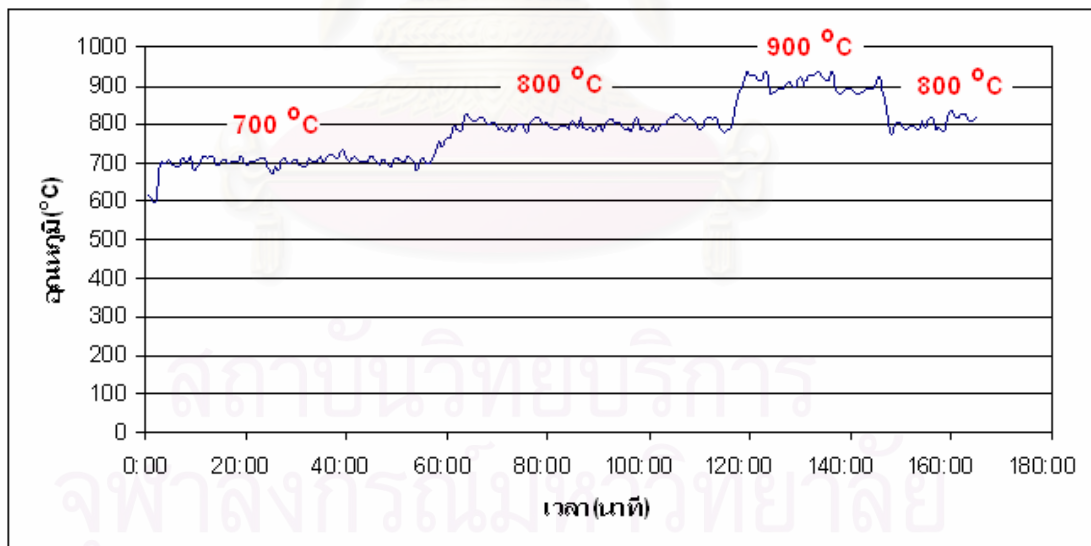




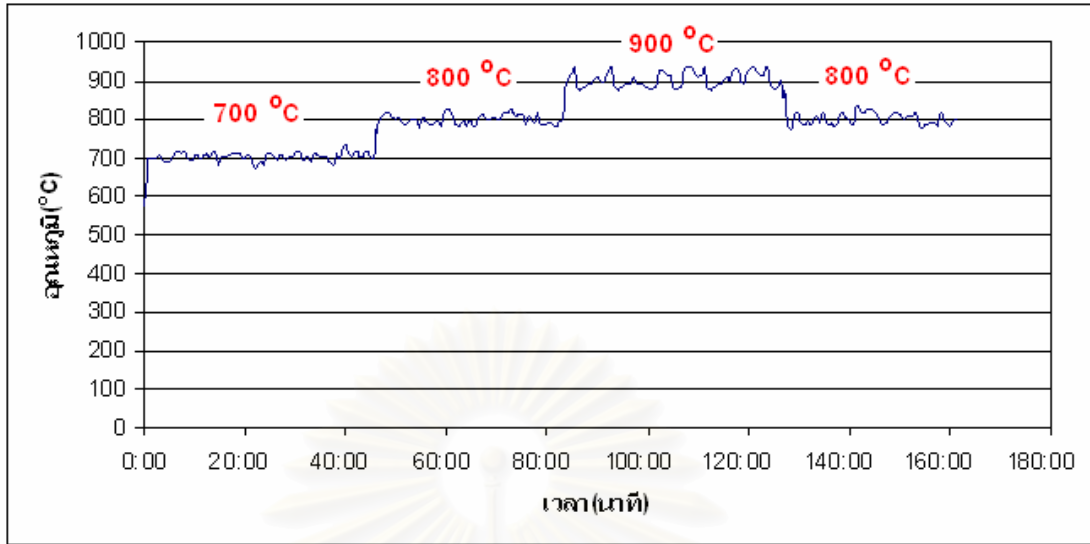
รูปที่ 4.25 แผนผังการทำงานของโปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในสถานการณ์ควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional Integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง



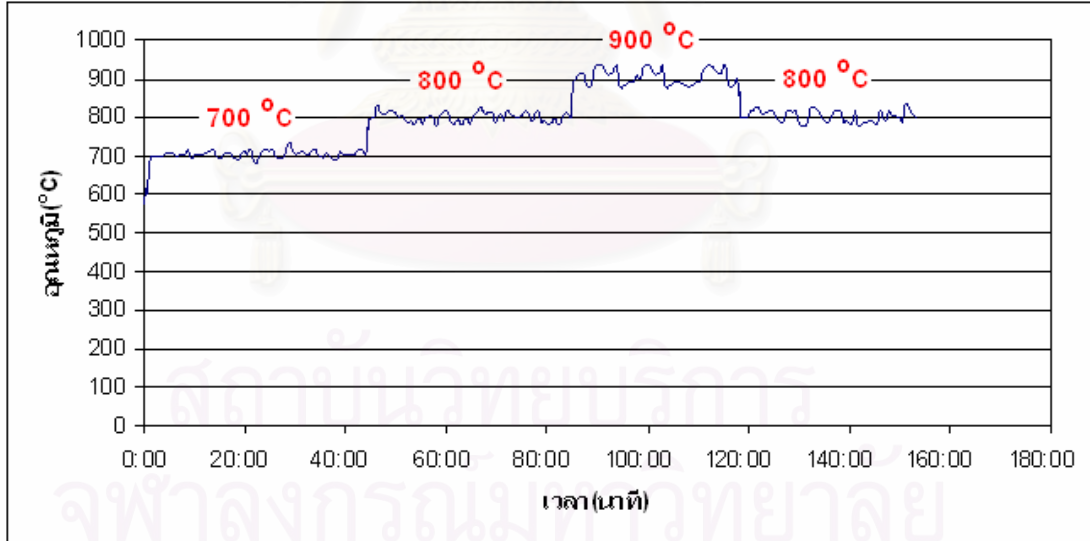
รูปที่ 4.26 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional Integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.525$ กับ $\tau_i = 4.76$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง



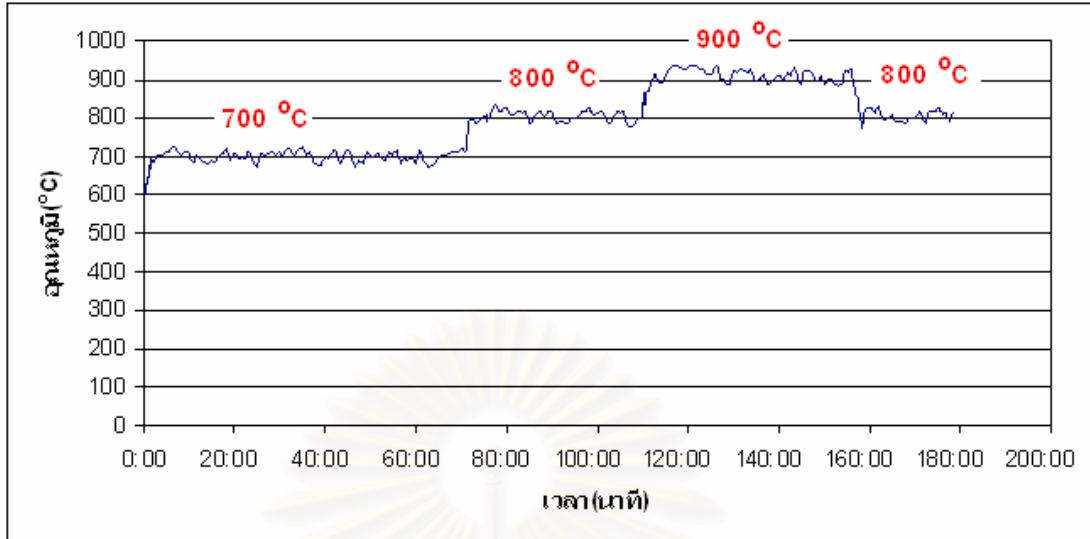
รูปที่ 4.27 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.211$ กับ $\tau_i = 4.95$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่านหิน : ซังข้าวโพด = 1:1



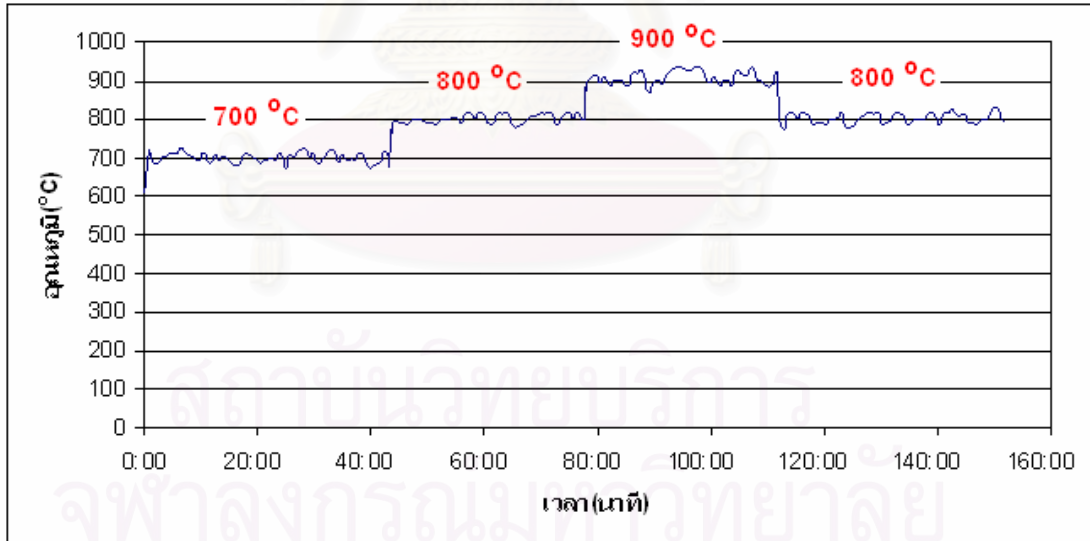
รูปที่ 4.28 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.579$ กับ $\tau_i = 5.82$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : แกลบ = 1:1



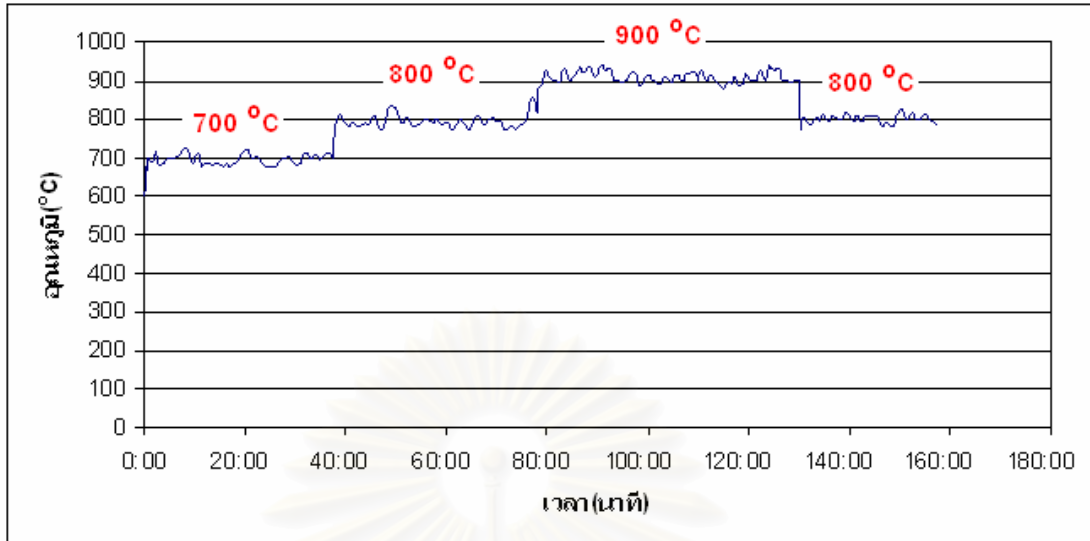
รูปที่ 4.29 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.173$ กับ $\tau_i = 5.59$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : กากกาแฟ = 1:1



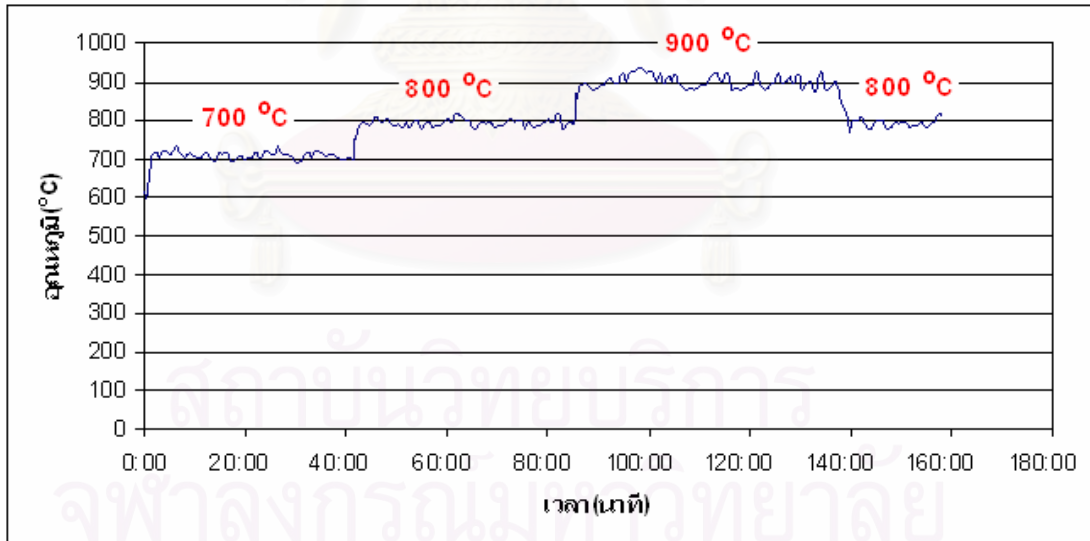
รูปที่ 4.30 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.592$ กับ $\tau_i = 4.45$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : ซิ่งซ้ำวโหด = 2:1



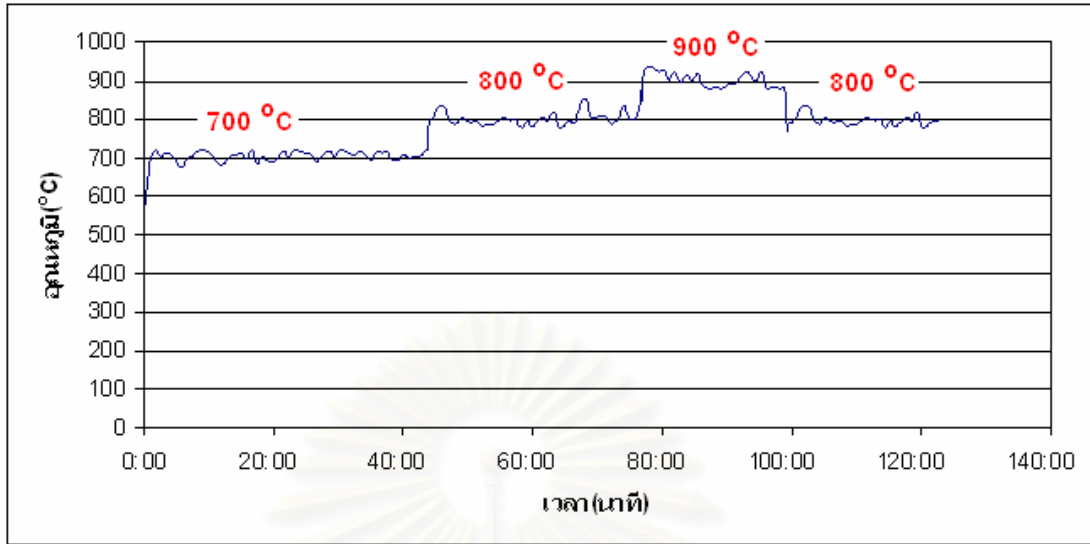
รูปที่ 4.31 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 6.172$ กับ $\tau_i = 4.91$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : แกลบ = 2:1



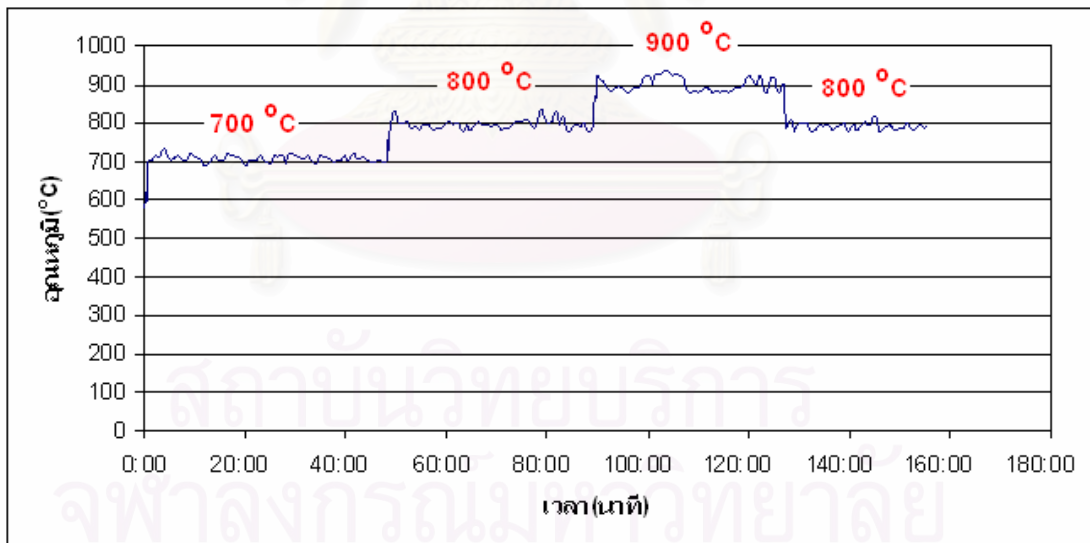
รูปที่ 4.32 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.917$ กับ $\tau_i = 4.95$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : กากกาเฟ = 2:1



รูปที่ 4.33 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.848$ กับ $\tau_i = 5.06$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : ชั่งข้าวโพด = 3:1



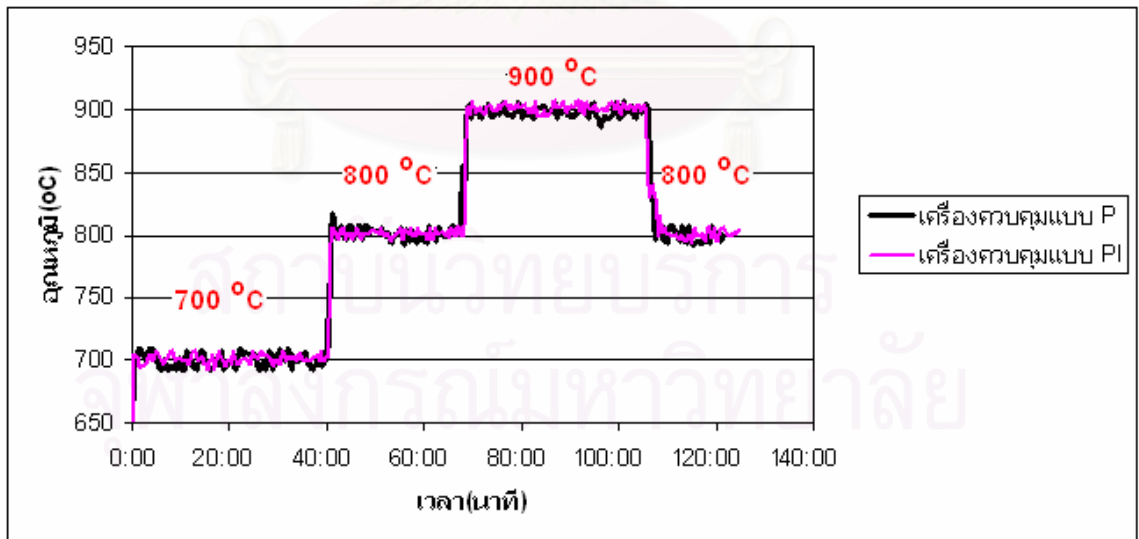
รูปที่ 4.34 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.988$ กับ $\tau_i = 5.27$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : แกลบ = 3:1



รูปที่ 4.35 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิในส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ Proportional integral controller เป็นตัวปรับค่าความถูกต้อง ที่ค่า $K_c = 5.814$ กับ $\tau_i = 4.64$ นาที เวลาในการเปรียบเทียบ 5 วินาที โดยใช้อัตราส่วนถ่วงน้ำหนัก : กากกาแพ = 3:1

ตารางที่ 4.12 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิเป้าหมาย

เชื้อเพลิง		อัตราการป้อนเชื้อเพลิง(กิโลกรัมต่อชั่วโมง)		
		700 °C	800 °C	900 °C
ถ่านหิน		1.20	3.84	6.57
ถ่านหิน : ซังข้าวโพด	3 : 1	1.75	4.56	8.75
	2 : 1	1.96	4.89	9.46
	1 : 1	2.46	5.59	10.25
ถ่านหิน : แกลบ	3 : 1	1.98	4.85	9.16
	2 : 1	2.22	5.26	10.01
	1 : 1	2.80	6.12	11.15
ถ่านหิน : กากกาแฟ	3 : 1	1.67	4.39	8.47
	2 : 1	1.87	4.72	9.10
	1 : 1	2.37	5.21	9.53



รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบการควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหินระหว่างเครื่องควบคุมแบบ P และเครื่องควบคุมแบบ PI

จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิค่าเป้าหมายแต่ละอุณหภูมิในช่วง 700 – 900 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิ มีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ดังตารางที่ 4.12 และร้อยละการเปิดวาล์ว ป้อนอากาศ(เมื่อความเร็วของอากาศสูงสุดมีค่า 4 เมตรต่อวินาที) ดังตารางที่ 4.13

จากรูปที่ 4.36 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบ หมุนเวียนระหว่างเครื่องควบคุมแบบ P และ เครื่องควบคุมแบบ PI พบว่าการควบคุมอุณหภูมิในเตาเผา ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนในงานวิจัยนี้ เครื่องควบคุมแบบ P มีค่า Offset ประมาณ 2 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิเป้าหมาย ± 8 องศาเซลเซียส และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าเป้าหมาย 5.10 องศาเซลเซียส ส่วนเครื่องควบคุมแบบ PI มีค่าความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิเป้าหมาย ± 7.5 องศาเซลเซียส และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าเป้าหมาย 3.67 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาการควบคุมอุณหภูมิเมื่อป้อนเชื้อเพลิงถ่านหิน : ชีวมวลตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 3 : 1, 2 : 1, 1 ; 1 (โดยน้ำหนัก) ของเครื่องควบคุมแบบ P จากรูปที่ 4.17-4.25 และ เครื่องควบคุมแบบ PI จากรูปที่ 4.28-4.36 พบว่ามีประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 700-900 องศาเซลเซียส ใกล้เคียงกัน อุณหภูมิมีค่าความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิเป้าหมาย ± 35 องศาเซลเซียส และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าเป้าหมาย 20.45 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของการผสมระหว่างถ่านหินกับชีวมวลตัวอย่าง

อย่างไรก็ตามจากการป้อนเชื้อเพลิงอัตราส่วนถ่านหิน : ชีวมวล มีค่าเท่ากับ 1 : 1 (โดยน้ำหนัก) พบว่าถึงแม้ระบบควบคุมจะสามารถควบคุมอุณหภูมิสู่ค่าเป้าหมายได้ แต่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงเข้าไปทาง Screw feeder จนเกิดการเผาไหม้อยู่ใน Hopper ที่ใส่เชื้อเพลิง เพราะชีวมวลมีมวลต่ำ ดังนั้นเมื่อมีการผสมกับถ่านหินในอัตราส่วนที่ต่ำ (โดยน้ำหนัก) อากาศที่ป้อนจาก Primary air บางส่วนจะผ่านเข้าทาง Screw feeder โดยพาความร้อนไปด้วย ทำให้เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงใน Hopper เมื่อมีการเผาไหม้ในระยะเวลาอันนานจะทำให้เกิดปัญหาต่อการควบคุมอุณหภูมิ เพราะสิ่งที่ป้อนจาก Screw feeder ไม่ใช่เชื้อเพลิง แต่เป็นเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ เมื่อเข้าสู่เตาเผาอาจทำให้เกิด Slag ได้

ตารางที่ 4.13 ร้อยละการเปิดวาล์วป้อนอากาศเชื้อเพลิงแต่ละตัวที่อุณหภูมิเป้าหมาย เมื่อความเร็วของอากาศสูงสุดมีค่า 4 เมตรต่อวินาที

เชื้อเพลิง	ร้อยละการเปิดวาล์วป้อนอากาศ		
	700 °C	800 °C	900 °C
ถ่านหิน	12.56	40.19	68.77
ถ่านหิน : ซังข้าวโพด	3 : 1	16.98	44.25
	2 : 1	18.52	46.20
	1 : 1	21.99	49.97
ถ่านหิน : แกลบ	3 : 1	18.50	45.32
	2 : 1	19.91	47.18
	1 : 1	23.02	50.31
ถ่านหิน : กากกาแฟ	3 : 1	16.70	43.91
	2 : 1	18.42	46.49
	1 : 1	22.61	49.70

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ถ่านหินและชีวมวลเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้เป็นพลังงานทดแทนที่สำคัญชนิดหนึ่ง เพราะถ่านหินและชีวมวลเมื่อนำมาเผาไหม้จะให้พลังงานความร้อนที่สามารถวัดได้ในรูปของอุณหภูมิ การนำพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ไปใช้งานต้องพิจารณาจากค่าอุณหภูมิของการเผาไหม้ แต่การใช้พลังงานจากการเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวลจะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยยังขึ้นกับระบบการเผาไหม้ที่ใช้ด้วย ซึ่งการประยุกต์เอาเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนมาใช้ในการเผาไหม้จะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิมีขึ้นเพื่อให้เตาเผามีอุณหภูมิตามที่ต้องการเพื่อการนำความร้อนที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยมีการใช้เชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจะปรับด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับ และอัตราการป้อนอากาศจะปรับด้วยการควบคุมแบบอัตราส่วนกับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงนั่นเอง

จากการควบคุมอุณหภูมิของการเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนในช่วง 700-900 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง พบว่าการควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนในงานวิจัยนี้ เครื่องควบคุมแบบ P มีค่า Offset ประมาณ 2 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิเป้าหมาย ± 8 องศาเซลเซียส และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าเป้าหมาย 5.10 องศาเซลเซียส ส่วนเครื่องควบคุมแบบ PI มีค่าความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิเป้าหมาย ± 7.5 องศาเซลเซียส และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าเป้าหมาย 3.67 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการสู่ค่าเป้าหมายประมาณ 2 – 3 นาที

เมื่อทำการผสมถ่านหินกับชีวมวล พบว่า การควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบ P และ เครื่องควบคุมแบบ PI มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน คือมีค่าความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิเป้าหมาย ± 35 องศาเซลเซียส และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าเป้าหมาย 20.45 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการผสมกันระหว่างถ่านหินกับชีวมวลว่ามีความสม่ำเสมอเพียงใด เวลาที่ใช้ในการสู่ค่าเป้าหมายประมาณ 2 – 3 นาที

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนถ่านหิน:ชีวมวลที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 2 : 1 เพราะต้องการอัตราส่วนที่ชีวมวลมีค่ามากเพื่อลดการใช้ถ่านหินซึ่งมีราคาสูงกว่าชีวมวล และที่อัตราส่วนนี้ไม่พบการเผาไหม้เข้า Screw Feeder ที่อาจจะก่อให้เกิดปัญหาในการควบคุมอุณหภูมิในระยะเวลานาน โดยใช้ร้อยละของอากาศมากเกินไปมีค่าเท่ากับ 250

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับปรุงการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา ทำการติดตั้ง Screw feeder ที่เหมาะสมสำหรับการป้อนชีวมวลเข้าเตาเผาเพิ่ม เพื่อแยกการป้อนถ่านหินกับชีวมวลออกจากกัน
2. เมื่อทำการปรับปรุงการป้อนเชื้อเพลิงแล้ว ทำการทดลองการควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบที่สร้างขึ้นกับเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนถ่านหิน : ชีวมวล โดยใช้ถ่านหินลดลง
3. ติดตั้งเครื่องวัดการไหลเข้าของอากาศ
4. พัฒนาเตาเผาให้มีระบบนำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป
5. พัฒนาโปรแกรมเพื่อให้ครอบคลุมกับชนิดของชีวมวลในประเทศมากขึ้น
6. ควบคุมอุณหภูมิโดยหาค่าคงที่ของกระบวนการโดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเมื่อผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ในกระบวนการ(ภาคผนวก ค)

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กัญญา บุญยเกียรติ. การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

เก็จวลี พุกษาทร. การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดไดซ์เบดด้วยไมโครคอมพิวเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.

จตุรรัตน์ ตียะสันติวงศ์, ณัฐวัศก์ วรรณรัชชาติ และ ธเนศ โรหิตร์ศรี. การประเมินสมรรถนะหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.

เฉลิมพร อยู่ประเทศ. จลนศาสตร์ของการไหลโรชีสสารชีวมวล. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2537.

ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์. การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ฐานันตร์ สดแสงสุก, นทีธร ธนพัฒน์กุล, วิษณุ บัณฑิตน์ และ เอกพัชร เจริญลาภ. การศึกษาม้อไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2537.

ณฤทัย มงคลเลิศศิริกุล. การศึกษาลักษณะเฉพาะของลิ้นตี่ในประเทศไทยสำหรับเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2537.

เบ็ญจวรรณ วนวิชาเอนทร์. การพัฒนาระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2537.

พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์. พลศาสตร์และการควบคุมกระบวนการ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

พัฒนพงศ์ พันธะติวงศ์. การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วย Microsoft Visual Basic Version

6.0. กรุงเทพมหานคร: ยงพลเทรดดิ้ง, 2545.

ภัทรารุช พุกเกษมรพันธ์, พรเทพ จิตวุฒิกโร และ แสง แซ่เล้า. การศึกษาการเผาไหม้ชีวมวลในเตาฟลูอิโดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2538.

วัชรารภรณ์ สุริยาภิวัดณ์. คอมพิวเตอร์เบื้องต้นและเทคนิคการเขียนโปรแกรม. ภาควิชาสถิติ คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.

สมบัติ นิธิภูมิรัตน์. การเผาไหม้ถ่านหินและการควบคุมมลพิษในฟลูอิโดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.

สมศักดิ์ ดำรงเลิศ. ฟลูอิโดไดซ์เบด. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2524.

สุกัญญา พนมอุปถัมภ์, บงกช พิพิธรังษี และ อุไรภรณ์ อัมพามาศ. การเผาไหม้กากมันสำปะหลังในเตาเผาฟลูอิโดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545.

สุทิน อินยาศรี และ จอมใจ ศิริพร. การเผาไหม้ชีวมวลโดยเตาเผาชนิดฟลูอิโดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2526.

สุวิทย์ เตีย, ภัทรวุฒิ พุกเกษมรพันธ์, พรเทพ จิตวุฒิกโร, แสง แซ่เล้า และ ทนงค์ ฉายวัฒน์. การเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิโดไดซ์เบด. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 22, 2 (พฤษภาคม-สิงหาคม 2542) : 47-63.

ศิวิมล สูงสว่าง. การเผาไหม้ถ่านหินในเตาเผาฟลูอิโดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.

อภิชัย เทอดเทียนวงศ์. เตาเผาไหม้ชีวมวลแบบฟลูอิโดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2528.

ภาษาอังกฤษ

Akiri-Acma H. Combustion Characteristics of Different Biomass Materials. Energy Conversion and Management 44(2003) : 155-162.

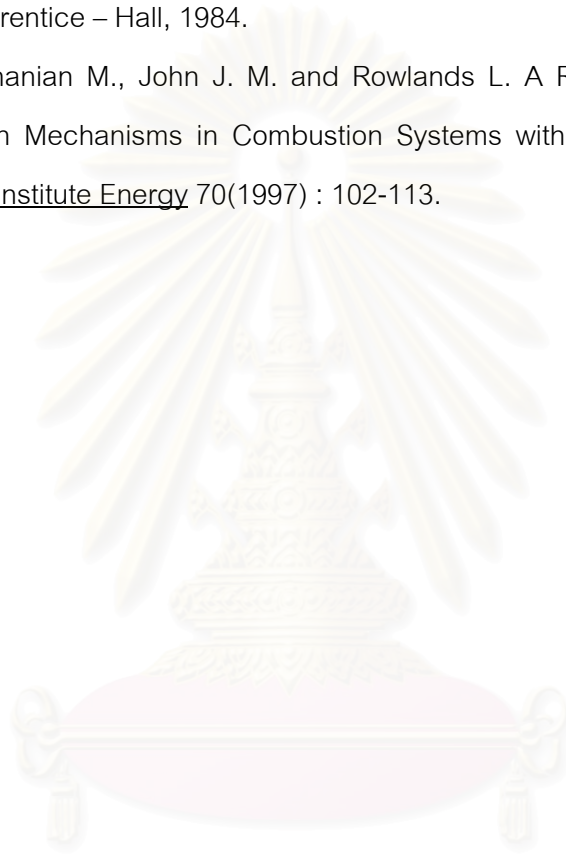
- Bakker R. R., Jenkins B. M, and Williams R. B. Fluidized Bed Combustion of Leached Rice-straw. Energy & Fuels 16(2002) : 356-365.
- Cohen G. H. and Coon G. A. Chemical process control : An introduction to theory and practice, vol.75. New York: Trans. ASME, 1953.
- Femat R., Jose A. R. And Miguel R. T. Robust Asymptotic linearization via uncertainty Estimation : Regulation of Temperature in A Fluidized Bed Reactor. Computers and Chemical Engineering 23(1999) : 697-708.
- Gill D. W. The Potential of Fluidized-Bed Combustion for Emission Control. Chemical Engineering Science 369(1981) : 278-280.
- Grace J. R., Avedan A. A., and Knowlton T.M. Circulating Fluidized Beds London: Chapman & Hall, 1997.
- Heinzel T., Siegle V., Spliethoff H. And Hein K. R. G. Investigation of Slagging in Pulverized Fuel Co-combustion of Biomass and Coal at A Pilot-scale Test Facility. Fuel Processing Technology 54(1998) : 109-125.
- Hsuan C. A. and Chen R. Intelligent Control of Exit Temperature in A Gas-fuel Can-type Combustor. Engineering Applications of Artificial Intelligence 15 (2002) : 391-400.
- John J. M., Pourkashanian M., Williams A. and Hainsworth D. A Comprehensive Biomass Combustion Model. Renewable Energy 19(2000) : 229-234.
- Kunii D., and Levenspiel O. Fluidization engineering, New York: John Wiley and Sons: 1969.
- Kunii D. and Levenspiel O. Circulating fluidized-bed reactors. Chemical Engineering Science 52 (1997) : 2471-2482.
- Kuttisupakorn P., Hussain M. A. And Petcherdask J. Studies on the Use of Neural Networks in Nonlinear Control Strategies. Chemical Engineering of Japan 34(4) (2001) : 453-465.
- Li X. T., Grace J. R., Lim C. J., Watkinson A. P., Chen H. P. And Kim J. R. Biomass Gasification in A Circulating Fluidized Bed. Biomass & Bioenergy 26(2004) : 171-193.

Renga R. R. and Wen C. Y. A Comprehensive Model for Fluidized Bed Coal Combustor
AIChE Journal 26(4) (1980) : 642-655.

Shen K., Lu J., Li Z. And Liu G. An Adaptive Fuzzy Approach for the Incineration
Temperature Control Process. Fuel 84(9) (2005) : 1144-1150.

Stephanopoulos G. Chemical process control : An introduction to theory and practice.
New Jersey: Prentice – Hall, 1984.

Williams A., Pourkashanian M., John J. M. and Rowlands L. A Review of No_x Formation
and Reduction Mechanisms in Combustion Systems with Particular Reference to
Coal. Journal Institute Energy 70(1997) : 102-113.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์สมบัติ

1 การวิเคราะห์แบบประมาณ(Proximate Analysis) : ASTM D3172

1.1 ความชื้น (Moisture) : ASTM D3173

วิธีการทดลอง

- 1) อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying Oven) 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (Desicator) ที่ไว้ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งแล้วบันทึกน้ำหนัก
- 2) ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่างชั่งมวล
- 3) นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักตัวอย่างคงที่
- 4) นำถาดอลูมิเนียมออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที จึงชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างอบแล้วอยู่ภายใน บันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ	M	=	ร้อยละของความชื้น
	W ₁	=	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)
	W ₂	=	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นหลังอบ (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1.2 เถ้า (Ash) : ASTM D3174

วิธีการทดลอง

- 1) เเผครุชชีเบิลพอร์ซเลน (Porcelain Crucible) พร้อมฝาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบิลพร้อมฝา
- 2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครุชชีเบิล ประมาณ 1 กรัม
- 3) นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซนจนควันระเหยหมด
- 4) ใส่ครุชชีเบิลพร้อมฝาในเตาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่
- 5) นำครุชชีเบิลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ	A	=	ร้อยละของเถ้า
	W_3	=	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝาที่มีเถ้า (กรัม)
	W_4	=	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1.3 ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) : ASTM D3175

วิธีการทดลอง

- 1) เเผครุชชีเบิลพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบิลพร้อมฝา บันทึกผล
- 2) ชั่งตัวอย่างใส่ในครุชชีเบิลประมาณ 1 กรัม

- 3) ปิดฝาครุชชีเบลล์ให้เรียบร้อยนำไปให้ความร้อนโดยอยู่ในหม้อปอกเตาเผา (Tubular Furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 4) หย่อนครุชชีเบลล์ให้อยู่บริเวณปากเตา อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 5) หย่อนครุชชีเบลล์ให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
- 6) นำครุชชีเบลล์ออกมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำไปใส่ในเคสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาทีนำไปชั่งและบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = \{100(W_5 - W_6) / -M$$

เมื่อ	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	W_5	=	น้ำหนักของครุชชีเบลล์พร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)
	W_6	=	น้ำหนักของครุชชีเบลล์พร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)
	M	=	ร้อยละของความชื้น

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

2 การหาค่าความร้อน (Gross Heating Value) : ASTM D2015

หลักการ การทำงานภายในเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ คือปรับอุณหภูมิของน้ำในถังให้เท่ากับเครื่องแช่บอมบ์ เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและวัดอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อนจาก

ตัวอย่างที่ถูกเผาไหม้ แล้วนำมาคำนวณหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ของตัวอย่างและค่าน้ำหนักสมมูลของเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์คำนวณได้จากค่าความร้อนของการเผาไหม้กรดเบนโซอิก

2.1 การหาค่าน้ำหนักสมมูล (Water equivalent) ของเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

เครื่องมือ Oxygen bomb calorimeter

สารเคมี

- 1) กรดเบนโซอิก (Benzoic acid)
- 2) 0.072 N ของ Na_2CO_3
- 3) Methyl orange
- 4) แก๊สออกซิเจน
- 5) น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

- 1) ชั่งกรดเบนโซอิกหนัก 0.9 ถึง 1.0 กรัม อัดเป็นเม็ดโดยใช้เครื่องอัดแล้วนำกรดเบนโซอิกอัดก้อนนี้มาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง บันทึกผล
- 2) ตัดลวดยาว 10 เซนติเมตร มาผูกระหว่างปลายทั้งสองของหัวบอมบ์
- 3) นำกรดเบนโซอิกอัดก้อนมาวางไว้ในครุชีเบิล นำครุชีเบิลไปวางในตำแหน่งด้านบนของบอมบ์ จัดให้ลวดที่ผูกไว้โค้งจนแตะผิวหน้าของเม็ดกรดเบนโซอิก
- 4) เติมน้ำกลั่นลงในออกซิเจนบอมบ์ 1 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปต
- 5) ประกอบหัวบอมบ์กับออกซิเจนบอมบ์เข้าด้วยกัน ชันเกลียวให้แน่นแล้วนำไปอัดแก๊สออกซิเจนให้มีความดัน 20-25 บรรยากาศ
- 6) เติมน้ำลงในถังบอมบ์ 1 ลิตร นำออกซิเจนบอมบ์ที่อัดแก๊สเรียบร้อยแล้ววางในถังบอมบ์ เติมน้ำลงในถังอีก 1 ลิตร เสียบสายจุดระเบิด 2 เส้นกับบอมบ์ แล้วปิดฝาของเครื่อง
- 7) เปิดสวิทช์ให้เครื่องกวนทำงาน ทุก ๆ นาทีบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำ เมื่อผ่านไป 5 นาที กดปุ่มจุดระเบิดพร้อมทั้งบันทึกค่าอุณหภูมิที่จุดระเบิดนี้ อ่านค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ ครึ่งนาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิสูงสุด แล้วลดลงหรือคงที่
- 8) ปิดสวิทช์ของเครื่อง นำออกซิเจนบอมบ์ออกจากเครื่อง ปลดออกแก๊สออกจากบอมบ์อย่างช้า ๆ จนหมด

- 9) ล้างหัวบอมบ์และออกซิเจนบอมบ์ รวมทั้งครุฑีเปิดด้วยน้ำกลั่นที่เติม Methyl orange จนหมดกรด (น้ำที่ล้างไม่เป็นสีชมพู)
- 10) นำน้ำที่ได้ไปไทเทรตกับ 0.072 N ของ Na_2CO_3 บันทึกปริมาตรของ Na_2CO_3 ที่ใช้
- 11) วัดความยาวของลวดที่เหลือจากการเผาไหม้

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$W = (H_g + e_1) + e_3 / t$$

เมื่อ	W	=	ค่าน้ำหนักสมมูลของเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์, แคลอรีต่อองศาเซลเซียส
	H	=	ค่าความร้อนของการเผาไหม้กรดเบนโซอิก = 6318 แคลอรีต่อกรัม
	g	=	น้ำหนักของกรดเบนโซอิก, กรัม
	e_1	=	การแก้ค่าความร้อนของการเกิดกรดไนตริก, แคลอรี
		=	จำนวนมิลลิลิตรของ 0.072 N ของ Na_2CO_3
	e_3	=	การแก้ค่าความร้อนของลวด, แคลอรี
		=	2.3 x ความยาวลวดที่ใช้, เซนติเมตร
	t	=	อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น, องศาเซลเซียส

2.2 การหาค่าความร้อน

วิธีการทดลอง

- 1) วางเส้นใยแอสเบสตอส (Asbestos) ลงในถ้วยเผาไหม้ จากนั้นใส่ตัวอย่างประมาณ 1 กรัม
- 2) ทำการทดลองเช่นเดียวกับกรณีของกรดเบนโซอิก

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$H = (t W - e_1 - e_2 - e_3) / g$$

เมื่อ	H	=	ค่าความร้อนของการเผาไหม้ของตัวอย่าง, แคลอรีต่อกรัม
	t	=	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นซึ่งได้แก่ค่าจากเทอร์โมมิเตอร์แล้ว, องศาเซลเซียส
		=	$t_c - t_a$
	t_c	=	อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้, องศาเซลเซียส
	t_a	=	อุณหภูมิเริ่มจุดระเบิด, องศาเซลเซียส
	W	=	ค่าน้ำหนักสมมูล, แคลอรีต่อองศาเซลเซียส
	e_1	=	การแก้ค่าความร้อนของการเกิดกรดไนตริก, แคลอรี
		=	จำนวนมิลลิลิตรของ 0.072 N ของ Na_2CO_3
	e_2	=	การแก้ค่าความร้อนของการเกิดกรดซัลฟูริก
		=	$14 \times (\% \text{ กำมะถัน})$
	e_3	=	การแก้ค่าความร้อนของลาวด, แคลอรี
		=	$2.3 \times \text{ความยาวลาวดที่ใช้, เซนติเมตร}$
	g	=	น้ำหนักของตัวอย่าง, กรัม

2.3 การหาปริมาณกำมะถันในถ่านหิน

เครื่องมือ

- เตาเผา (Muffle furnace)
- Porcelain crucible
- ปิเกตอร์
- ตะเกียงบุนเซน
- กรวยกรองและกระดาษกรอง

สารเคมี

- น้ำโบรมีนอิ่มตัว
- สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (1 : 9)
- สารละลายแบเรียมคลอไรด์ 100 กรัมต่อลิตร

4) น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

- 1) นำน้ำล้างบอมบ์ภายหลังการไทเทรตกับ Na_2CO_3 แล้วมาต้มจนเดือด กรองขณะร้อนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง
- 2) นำสารละลายที่ได้มาเติมน้ำโบรมีน 1 มิลลิลิตร
- 3) ทำให้เป็นกรดด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก แล้วนำไปต้มจนเดือด
- 4) ค่อย ๆ เติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ 10 มิลลิลิตร แล้วต้มต่อไปอีกประมาณ 15 นาที จนเกิดตะกอนสีขาวของแบเรียมซัลเฟต ตั้งทิ้งไว้ค้างคืนที่อุณหภูมิห้องหรืออย่างน้อย 2 ชั่วโมง
- 5) กรองตะกอนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้งจนหมดคลอไรด์ไอออน โดยทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส
- 6) นำกระดาษกรองพร้อมตะกอนแบเรียมซัลเฟตที่กรองได้มาใส่ในครุชีเบลที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำไปเผาจนหมดควันด้วยตะเกียงเบนเซน แล้วนำมาเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักตะกอนคงที่
- 7) ทิ้งให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ซึ่งน้ำหนักตะกอนแบเรียมซัลเฟต บันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของกำมะถัน} = 13.738(A - B) / W$$

เมื่อ	A	=	น้ำหนักตะกอนแบเรียมซัลเฟตจากตัวอย่าง, กรัม
	B	=	น้ำหนักตะกอนแบเรียมซัลเฟตจากการทำ Blank
	W	=	Correction, กรัม
		=	น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหิน, กรัม

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงตามทฤษฎี

1. การคำนวณจะคิดจากร้อยละขององค์ประกอบโดยน้ำหนักของถ่านหินที่ได้จากการวิเคราะห์โดยประมาณและการวิเคราะห์อย่างละเอียด ดังนี้

คาร์บอน (C) = 48.28 ไฮโดรเจน (H) = 4.26 ไนโตรเจน (N) = 0.57
 ซัลเฟอร์ (S) = 1.54 ออกซิเจน (O) = 2.26 เถ้า (Ash) = 25.70
 ความชื้น (Moisture) = 17.39

คำนวณปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการทำปฏิกิริยา

ฐานการคำนวณ ต่อ 1 กิโลกรัม ถ่านหิน

จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ สามารถคำนวณปริมาณออกซิเจนที่ต้องการได้ดังนี้

องค์ประกอบ	น้ำหนัก ต่อ 1 กิโลกรัม ถ่านหิน	ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการ(กิโลกรัม)
คาร์บอน	0.4828	$0.4828 \times 32 / 12 = +1.2875$
ไฮโดรเจน	0.0426	$0.0426 \times 16 / 2 = +0.3408$
ออกซิเจน	0.0226	$0.0226 \times 32 / 32 = -0.0226$
ซัลเฟอร์	0.0154	$0.0154 \times 32 / 32 = +0.0154$

รวมปริมาณออกซิเจนที่ต้องการทั้งหมดเท่ากับ 1.6211 กิโลกรัม

ปริมาณอากาศที่ต้องการ = $1.6211 / 0.232$

= 6.99 กิโลกรัม อากาศ / กิโลกรัม ถ่านหิน

2. การคำนวณจะคิดจากร้อยละขององค์ประกอบโดยน้ำหนักของซังข้าวโพดที่ได้จากการวิเคราะห์โดยประมาณและการวิเคราะห์อย่างละเอียด ดังนี้

คาร์บอน (C) = 39.32 ไฮโดรเจน (H) = 4.56 ไนโตรเจน (N) = 0.66
 ซัลเฟอร์ (S) = - ออกซิเจน (O) = 41.87 เถ้า (Ash) = 2.15
 ความชื้น (Moisture) = 11.44

คำนวณปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการทำปฏิกิริยา

ฐานการคำนวณ ต่อ 1 กิโลกรัม ชั่งข้าวโพด

จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ สามารถคำนวณปริมาณออกซิเจนที่ต้องการได้ดังนี้

องค์ประกอบ	น้ำหนัก ต่อ 1 กิโลกรัม ชั่งข้าวโพด	ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการ(กิโลกรัม)
คาร์บอน	0.3932	$0.3932 \times 32 / 12 = +1.0485$
ไฮโดรเจน	0.0456	$0.0456 \times 16 / 2 = +0.3648$
ออกซิเจน	0.4187	$0.4187 \times 32 / 32 = -0.4187$
ซัลเฟอร์	-	-

รวมปริมาณออกซิเจนที่ต้องการทั้งหมดเท่ากับ 0.9946 กิโลกรัม

ปริมาณอากาศที่ต้องการ = $0.9946 / 0.232$

= 4.29 กิโลกรัม อากาศ / กิโลกรัม ชั่งข้าวโพด

3. การคำนวณจะคิดจากร้อยละขององค์ประกอบโดยน้ำหนักของแกลบที่ได้จากการวิเคราะห์โดยประมาณและการวิเคราะห์อย่างละเอียด ดังนี้

คาร์บอน (C) = 35.29 ไฮโดรเจน (H) = 4.47 ไนโตรเจน (N) = 0.83
 ซัลเฟอร์ (S) = - ออกซิเจน (O) = 33.20 เถ้า (Ash) = 15.59
 ความชื้น (Moisture) = 10.62

คำนวณปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการทำปฏิกิริยา

ฐานการคำนวณ ต่อ 1 กิโลกรัม แกลบ

จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ สามารถคำนวณปริมาณออกซิเจนที่ต้องการได้ดังนี้

องค์ประกอบ	น้ำหนัก ต่อ 1 กิโลกรัม แกลบ	ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการ(กิโลกรัม)
คาร์บอน	0.3529	$0.3529 \times 32 / 12 = +0.9411$
ไฮโดรเจน	0.0447	$0.0447 \times 16 / 2 = +0.3576$
ออกซิเจน	0.3320	$0.3320 \times 32 / 32 = -0.3320$
ซัลเฟอร์	-	-

รวมปริมาณออกซิเจนที่ต้องการทั้งหมดเท่ากับ 0.9667 กิโลกรัม

ปริมาณอากาศที่ต้องการ = $0.9667 / 0.232$

= 4.17 กิโลกรัม อากาศ / กิโลกรัม แกลบ

4. การคำนวณจะคิดจากร้อยละขององค์ประกอบโดยน้ำหนักของกากกาแฟที่ได้จากการวิเคราะห์โดยประมาณและการวิเคราะห์อย่างละเอียด ดังนี้

คาร์บอน (C) = 40.11

ไฮโดรเจน (H) = 5.07

ไนโตรเจน (N) = 1.54

ซัลเฟอร์ (S) = -

ออกซิเจน (O) = 35.19

เถ้า (Ash) = 6.38

ความชื้น (Moisture) = 11.71

คำนวณปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการทำปฏิกิริยา

ฐานการคำนวณ ต่อ 1 กิโลกรัม กากกาแฟ

จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ สามารถคำนวณปริมาณออกซิเจนที่ต้องการได้ดังนี้

องค์ประกอบ	น้ำหนัก ต่อ 1 กิโลกรัม กากกาแฟ	ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการ(กิโลกรัม)
คาร์บอน	0.4011	$0.4011 \times 32 / 12 = +1.0696$
ไฮโดรเจน	0.0507	$0.0507 \times 16 / 2 = +0.4056$
ออกซิเจน	0.3519	$0.3519 \times 32 / 32 = -0.3519$
ซัลเฟอร์	-	-

รวมปริมาณออกซิเจนที่ต้องการทั้งหมดเท่ากับ 1.1233 กิโลกรัม

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอากาศที่ต้องการ} &= 1.1233 / 0.232 \\ &= 4.84 \text{ กิโลกรัม อากาศ / กิโลกรัม กากกาแฟ} \end{aligned}$$

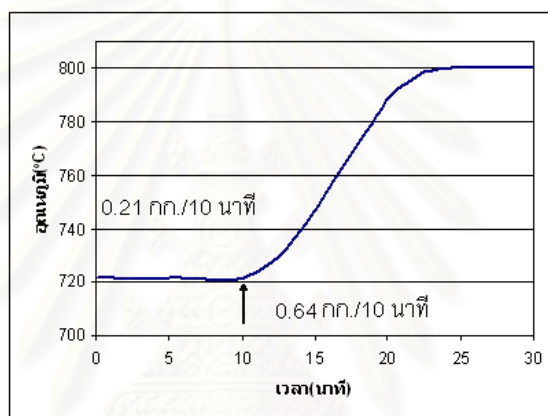


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

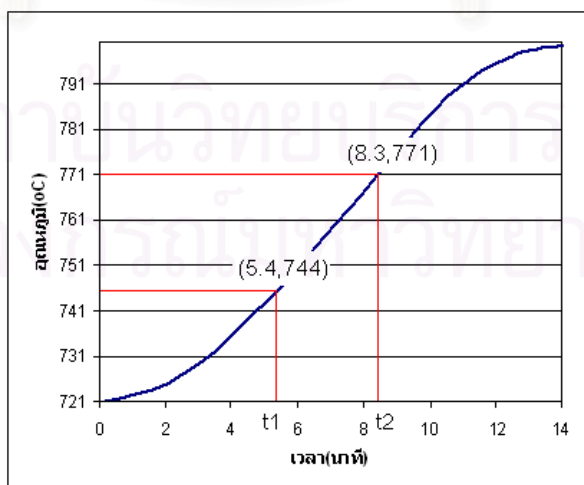
ภาคผนวก ค

การคำนวณหาค่าคงที่ของกระบวนการของเชื้อเพลิงตัวอย่าง

1. การคำนวณหาค่าคงที่ของกระบวนการเมื่อใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง หาได้จากเมื่อมีการเผาไหม้ ถ่านหินด้วยอัตราการป้อนถ่านหินคงที่ค่าหนึ่งจนอุณหภูมิในเตาเผาคงที่แล้ว จากนั้นเปลี่ยนอัตราการป้อนถ่านหินไปเป็นค่าคงที่อีกค่าหนึ่งรอจนอุณหภูมิคงที่อีกครั้ง โดยที่ความเร็วลมคงที่ จะได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่ และผลต่างของถ่านหินที่ป้อนแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา



รูปที่ 5.2 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง

คำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ของระบบจากรูปที่ 5.1 และ 5.2 คือ

$$\begin{aligned} \text{ค่า Static gain } (K_p, K) &= \frac{\text{ผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่}}{\text{ผลต่างของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ภาวะคงที่}} \\ &= \frac{800-722}{0.64-0.21} = 181.40^\circ\text{C}/(\text{kg}/10\text{min}) = 0.1814^\circ\text{C}/(\text{g}/10\text{min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Time constant } (\tau_p, \tau) &= \frac{3}{2} (t_2 - t_1) \\ &= \frac{3}{2} (8.3 - 5.4) = 4.35 \text{ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Dead time } (t_d) &= t_2 - \tau \\ &= 8.3 - 4.35 = 3.95 \text{ นาที} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional หาค่าคงที่ K_c ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(\frac{1 + t_d}{3} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.1814} \frac{4.35}{3.95} \left(\frac{1 + 3.95}{3} \right) \\ &= 14.06 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral หาค่าคงที่ K_c และ τ_i ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(\frac{0.9 + t_d}{12} \right) \dots\dots\dots(2.14)$$

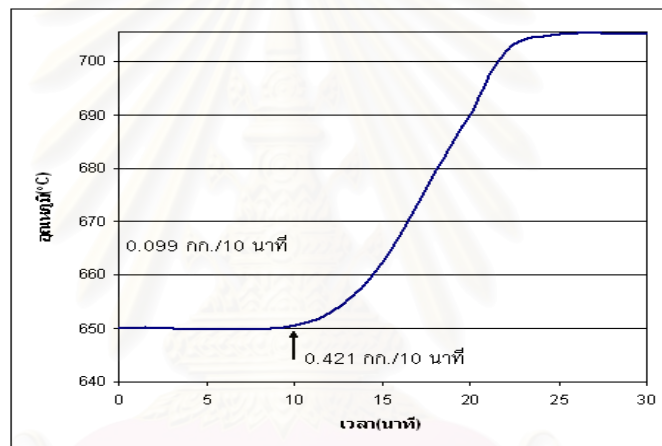
$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.1814} \frac{4.35}{3.95} \left(\frac{0.9 + 3.95}{12} \right) \\ &= 7.46 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\tau_i = t_d \left(\frac{30 + (3t_d/\tau)}{9 + (20t_d/\tau)} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

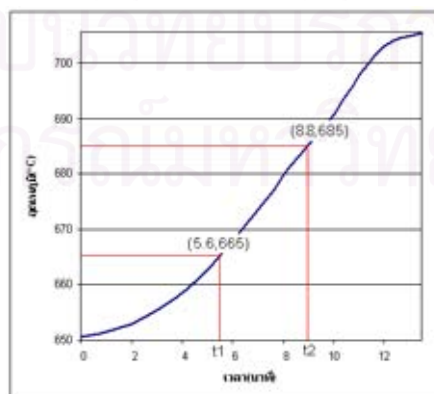
$$\tau_1 = 3.95 \times \left(\frac{30 + (3 \times 3.95 / 4.35)}{9 + (20 \times 3.95 / 4.35)} \right)$$

$$= 4.76 \text{ นาที}$$

2. การคำนวณหาค่าคงที่ของกระบวนการเมื่อใช้ถ่านหิน : ชั่งข้าวโพด = 3:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง หาได้จากเมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ค่าหนึ่งจนอุณหภูมิในเตาเผาคงที่แล้ว จากนั้นเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไปเป็นค่าคงที่อีกค่าหนึ่งจนอุณหภูมิคงที่อีกครั้ง โดยที่ความเร็วลมคงที่ จะได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่ และผลต่างของเชื้อเพลิงที่ป้อนแสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา
เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา



รูปที่ 5.4 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:ชั่งข้าวโพด = 3:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง

คำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ของระบบจากรูปที่ 5.3 และ 5.4 คือ

$$\begin{aligned} \text{ค่า Static gain } (K_p, K) &= \frac{\text{ผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่}}{\text{ผลต่างของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ภาวะคงที่}} \\ &= \frac{705 - 650}{0.421 - 0.099} = 171^\circ\text{C}/(\text{kg}/10\text{min}) = 0.171^\circ\text{C}/(\text{g}/10\text{min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Time constant } (\tau_p, \tau) &= \frac{3}{2} (t_2 - t_1) \\ &= \frac{3}{2} (8.8 - 5.6) = 4.8 \text{ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Dead time } (t_d) &= t_2 - \tau \\ &= 8.8 - 4.8 = 4 \text{ นาที} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional หาค่าคงที่ K_c ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(1 + \frac{t_d}{3} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.171} \frac{4.8}{4} \left(1 + \frac{4}{3} \right) \\ &= 16.37 (\text{g}/10 \text{ min})/^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral หาค่าคงที่ K_c และ τ_i ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(0.9 + \frac{t_d}{12} \right) \dots\dots\dots(2.14)$$

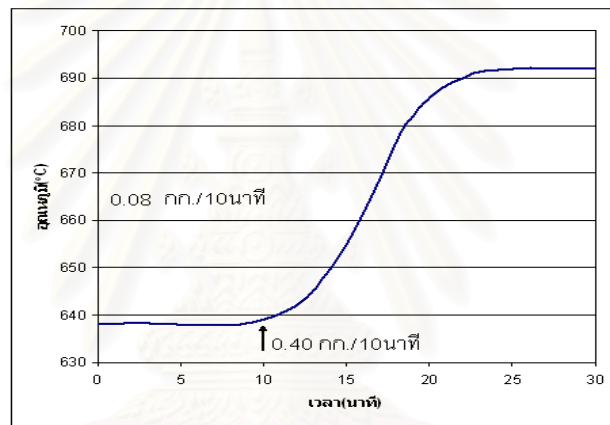
$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.171} \frac{4.8}{4} \left(0.9 + \frac{4}{12} \right) \\ &= 8.65 (\text{g}/10 \text{ min})/^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\tau_i = t_d \left(\frac{30 + (3t_d/\tau)}{9 + (20t_d/\tau)} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

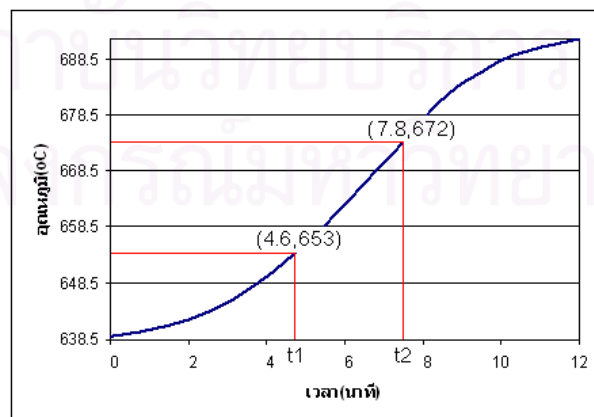
$$\tau_1 = 4 \times \left(\frac{30 + (3 \times 4 / 4.8)}{9 + (20 \times 4 / 4.8)} \right)$$

$$= 5.06 \text{ นาที}$$

3. การคำนวณหาค่าคงที่ของกระบวนการเมื่อใช้ถ่านหิน : ชั่งข้าวโพด = 2:1 (โดยน้ำหนัก)เป็นเชื้อเพลิง หาได้จากเมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ค่าหนึ่งจนอุณหภูมิในเตาเผาคงที่แล้ว จากนั้นเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไปเป็นค่าคงที่อีกค่าหนึ่งจนอุณหภูมิคงที่อีกครั้ง โดยที่ความเร็วลมคงที่ จะได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่ และผลต่างของเชื้อเพลิงที่ป้อนแสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา
เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา



รูปที่ 5.6 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:ชั่งข้าวโพด = 2:1 (โดยน้ำหนัก)เป็นเชื้อเพลิง

คำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ของระบบจากรูปที่ 5.5 และ 5.6 คือ

$$\begin{aligned} \text{ค่า Static gain } (K_p, K) &= \frac{\text{ผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่}}{\text{ผลต่างของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ภาวะคงที่}} \\ &= \frac{692 - 638}{0.40 - 0.08} = 168 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{kg}/10\text{min}) = 0.168 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{g}/10\text{min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Time constant } (\tau_p, \tau) &= \frac{3}{2} (t_2 - t_1) \\ &= \frac{3}{2} (7.8 - 4.6) = 4.8 \text{ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Dead time } (t_d) &= t_2 - \tau \\ &= 7.8 - 4.8 = 3 \text{ นาที} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional หาค่าคงที่ K_c ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(1 + \frac{t_d}{3} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.168} \frac{4.8}{3} \left(1 + \frac{3}{3} \right) \\ &= 19.05 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral หาค่าคงที่ K_c และ τ_i ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(0.9 + \frac{t_d}{12} \right) \dots\dots\dots(2.14)$$

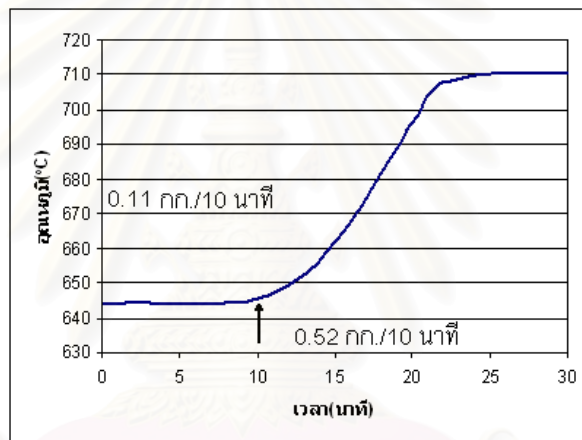
$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.168} \frac{4.8}{3} \left(0.9 + \frac{3}{12} \right) \\ &= 10.95 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\tau_i = t_d \left(\frac{30 + (3t_d/\tau)}{9 + (20t_d/\tau)} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

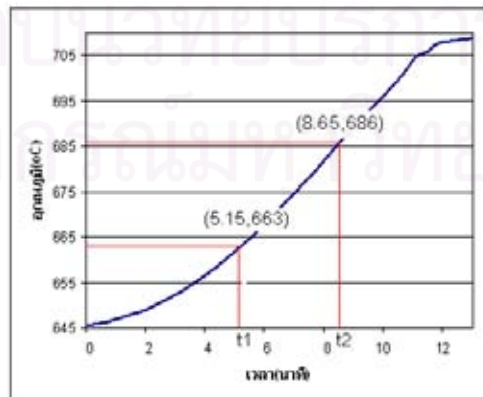
$$\tau_1 = 3 \times \left(\frac{30 + (3 \times 3/4.8)}{9 + (20 \times 3/4.8)} \right)$$

$$= 4.45 \text{ นาที}$$

4. การคำนวณหาค่าคงที่ของกระบวนการเมื่อใช้ถ่านหิน : ชั่งข้าวโพด = 1:1 (โดยน้ำหนัก)เป็นเชื้อเพลิง หาได้จากเมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ค่าหนึ่งจนอุณหภูมิในเตาเผาคงที่แล้ว จากนั้นเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไปเป็นค่าคงที่อีกค่าหนึ่งรอจนอุณหภูมิคงที่อีกครั้ง โดยที่ความเร็วลมคงที่ จะได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่ และผลต่างของเชื้อเพลิงที่ป้อนแสดงดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา
เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา



รูปที่ 5.8 การหาค่าพารามิเตอร์ t_u และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:ชั่งข้าวโพด = 1:1 (โดยน้ำหนัก)เป็นเชื้อเพลิง

คำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ของระบบจากรูปที่ 5.7 และ 5.8 คือ

$$\begin{aligned} \text{ค่า Static gain } (K_p, K) &= \frac{\text{ผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่}}{\text{ผลต่างของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ภาวะคงที่}} \\ &= \frac{710 - 644}{0.52 - 0.11} = 161 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{kg}/10\text{min}) = 0.161 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{g}/10\text{min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Time constant } (\tau_p, \tau) &= \frac{3(t_2 - t_1)}{2} \\ &= \frac{3(8.65 - 5.15)}{2} = 5.25 \text{ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Dead time } (t_d) &= t_2 - \tau \\ &= 8.65 - 5.25 = 3.4 \text{ นาที} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional หาค่าคงที่ K_c ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(\frac{1 + t_d}{3} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.161} \frac{5.25}{3.4} \left(\frac{1 + 3.4}{3} \right) \\ &= 20.46 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral หาค่าคงที่ K_c และ τ_i ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(\frac{0.9 + t_d}{12} \right) \dots\dots\dots(2.14)$$

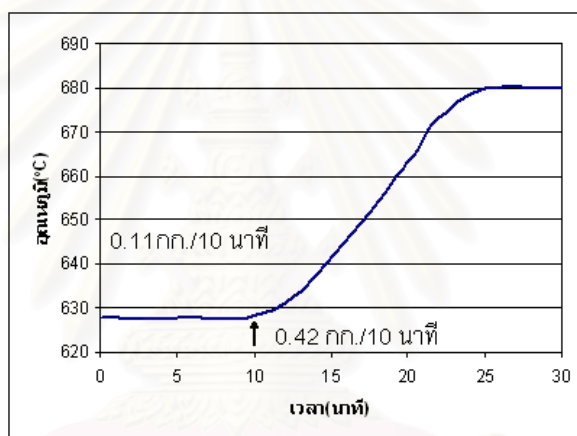
$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.161} \frac{5.25}{3.4} \left(\frac{0.9 + 3.4}{12} \right) \\ &= 11.34 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\tau_i = t_d \left(\frac{30 + (3t_d/\tau)}{9 + (20t_d/\tau)} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

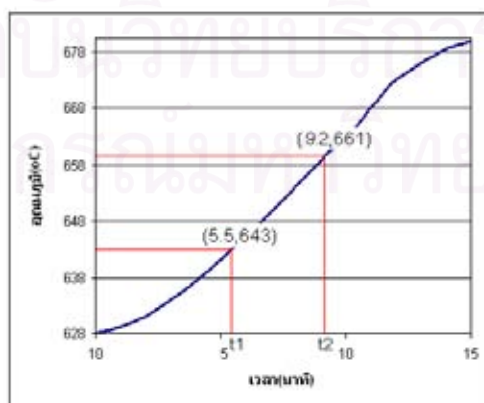
$$\tau_1 = 3.4 \times \left(\frac{30 + (3 \times 3.4 / 5.25)}{9 + (20 \times 3.4 / 5.25)} \right)$$

$$= 4.95 \text{ นาที}$$

5. การคำนวณหาค่าคงที่ของกระบวนการเมื่อใช้ถ่านหิน : แกลบ = 3:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง หาได้จากเมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ค่าหนึ่งจนอุณหภูมิในเตาเผาคงที่แล้ว จากนั้นเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไปเป็นค่าคงที่อีกค่าหนึ่งรอจนอุณหภูมิคงที่อีกครั้ง โดยที่ความเร็วลมคงที่ จะได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่ และผลต่างของเชื้อเพลิงที่ป้อนแสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา
เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา



รูปที่ 5.10 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:แกลบ = 3:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง

คำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ของระบบจากรูปที่ 5.9 และ 5.10 คือ

$$\begin{aligned} \text{ค่า Static gain } (K_p, K) &= \frac{\text{ผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่}}{\text{ผลต่างของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ภาวะคงที่}} \\ &= \frac{680 - 628}{0.42 - 0.11} = 167^\circ\text{C}/(\text{kg}/10\text{min}) = 0.167^\circ\text{C}/(\text{g}/10\text{min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Time constant } (\tau_p, \tau) &= \frac{3}{2} (t_2 - t_1) \\ &= \frac{3}{2} (9.2 - 5.5) = 5.55 \text{ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Dead time } (t_d) &= t_2 - \tau \\ &= 9.2 - 5.55 = 3.65 \text{ นาที} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional หาค่าคงที่ K_c ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(1 + \frac{t_d}{3} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.167} \frac{5.55}{3.65} \left(1 + \frac{3.65}{3} \right) \\ &= 20.18 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral หาค่าคงที่ K_c และ τ_i ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(0.9 + \frac{t_d}{12} \right) \dots\dots\dots(2.14)$$

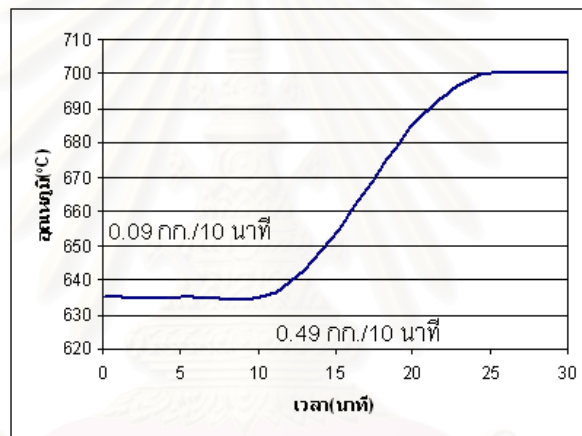
$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.167} \frac{5.55}{3.65} \left(0.9 + \frac{3.65}{12} \right) \\ &= 11.66 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\tau_i = t_d \left(\frac{30 + (3t_d/\tau)}{9 + (20t_d/\tau)} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

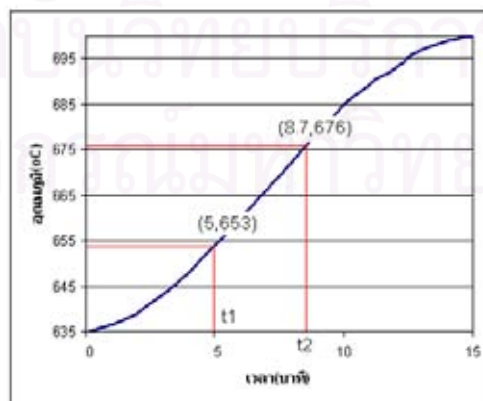
$$\tau_1 = 3.65 \times \left(\frac{30 + (3 \times 3.65 / 5.55)}{9 + (20 \times 3.65 / 5.55)} \right)$$

$$= 5.27 \text{ นาที}$$

6. การคำนวณหาค่าคงที่ของกระบวนการเมื่อใช้ถ่านหิน : แกลบ = 2:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง หาได้จากเมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ค่าหนึ่งจนอุณหภูมิในเตาเผาคงที่แล้ว จากนั้นเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไปเป็นค่าคงที่อีกค่าหนึ่งรอจนอุณหภูมิคงที่อีกครั้ง โดยที่ความเร็วลมคงที่ จะได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่ และผลต่างของเชื้อเพลิงที่ป้อนแสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา
เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา



รูปที่ 5.12 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน : แกลบ = 2:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง

คำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ของระบบจากรูปที่ 5.11 และ 5.12 คือ

$$\begin{aligned} \text{ค่า Static gain } (K_p, K) &= \frac{\text{ผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่}}{\text{ผลต่างของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ภาวะคงที่}} \\ &= \frac{700 - 635}{0.49 - 0.09} = 162 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{kg}/10\text{min}) = 0.162 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{g}/10\text{min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Time constant } (\tau_p, \tau) &= \frac{3(t_2 - t_1)}{2} \\ &= \frac{3(8.7 - 5)}{2} = 5.55 \text{ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Dead time } (t_d) &= t_2 - \tau \\ &= 8.7 - 5.55 = 3.15 \text{ นาที} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional หาค่าคงที่ K_c ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(1 + \frac{t_d}{3} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.162} \frac{5.55}{3.15} \left(1 + \frac{3.15}{3} \right) \\ &= 22.29 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral หาค่าคงที่ K_c และ τ_i ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(0.9 + \frac{t_d}{12} \right) \dots\dots\dots(2.14)$$

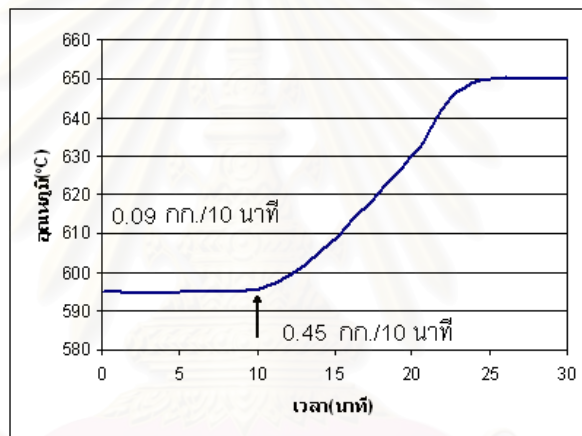
$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.162} \frac{5.55}{3.15} \left(0.9 + \frac{3.15}{12} \right) \\ &= 12.64 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\tau_i = t_d \left(\frac{30 + (3t_d/\tau)}{9 + (20t_d/\tau)} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

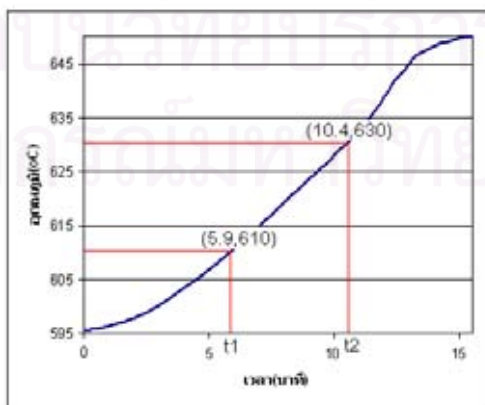
$$\tau_1 = 3.15 \times \left(\frac{30 + (3 \times 3.15 / 5.55)}{9 + (20 \times 3.15 / 5.55)} \right)$$

$$= 4.91 \text{ นาที}$$

7. การคำนวณหาค่าคงที่ของกระบวนการเมื่อใช้ถ่านหิน : แกลบ = 1:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง หาได้จากเมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ค่าหนึ่งจนอุณหภูมิในเตาเผาคงที่แล้ว จากนั้นเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไปเป็นค่าคงที่อีกค่าหนึ่งรอจนอุณหภูมิคงที่อีกครั้ง โดยที่ความเร็วลมคงที่ จะได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่ และผลต่างของเชื้อเพลิงที่ป้อนแสดงดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา



รูปที่ 5.14 การหาค่าพารามิเตอร์ t_g และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:แกลบ = 1:1(โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง

คำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ของระบบจากรูปที่ 5.13 และ 5.14 คือ

$$\begin{aligned} \text{ค่า Static gain } (K_p, K) &= \frac{\text{ผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่}}{\text{ผลต่างของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ภาวะคงที่}} \\ &= \frac{650 - 595}{0.45 - 0.09} = 152 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{kg}/10\text{min}) = 0.152 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{g}/10\text{min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Time constant } (\tau_p, \tau) &= \frac{3(t_2 - t_1)}{2} \\ &= \frac{3(10.4 - 5.9)}{2} = 6.75 \text{ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Dead time } (t_d) &= t_2 - \tau \\ &= 10.4 - 6.75 = 3.65 \text{ นาที} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional หาค่าคงที่ K_c ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(1 + \frac{t_d}{3} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.152} \frac{6.75}{3.65} \left(1 + \frac{3.65}{3} \right) \\ &= 26.97 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral หาค่าคงที่ K_c และ τ_i ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(0.9 + \frac{t_d}{12} \right) \dots\dots\dots(2.14)$$

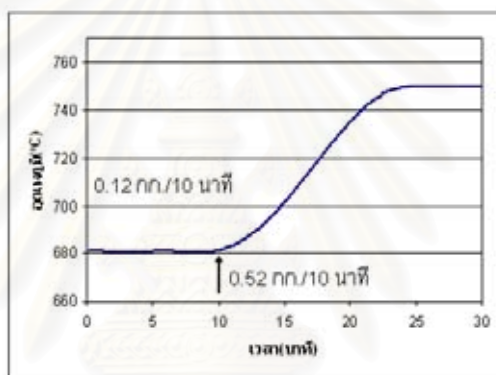
$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.152} \frac{6.75}{3.65} \left(0.9 + \frac{3.65}{12} \right) \\ &= 14.65 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\tau_i = t_d \left(\frac{30 + (3t_d/\tau)}{9 + (20t_d/\tau)} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

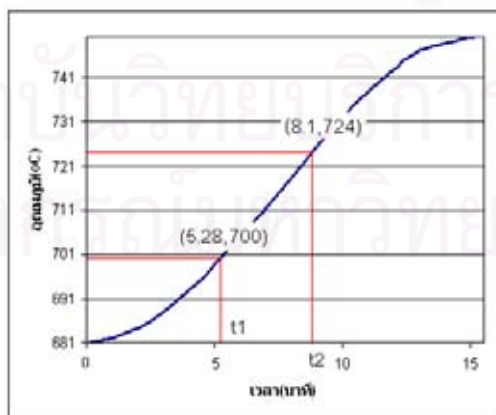
$$\tau_1 = 3.65 \times \left(\frac{30 + (3 \times 3.65 / 6.75)}{9 + (20 \times 3.65 / 6.75)} \right)$$

$$= 5.82 \text{ นาที}$$

8. การคำนวณหาค่าคงที่ของกระบวนการเมื่อใช้ถ่านหิน : กากกาแฟ = 3:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิงหาได้จากเมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ค่าหนึ่งจนอุณหภูมิในเตาเผาคงที่แล้ว จากนั้นเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไปเป็นค่าคงที่อีกค่าหนึ่งรอจนอุณหภูมิกคงที่อีกครั้ง โดยที่ความเร็วลมคงที่ จะได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่ และผลต่างของเชื้อเพลิงที่ป้อนแสดงดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา
เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา



รูปที่ 5.16 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:กากกาแฟ = 3:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง

คำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ของระบบจากรูปที่ 5.15 และ 5.16 คือ

$$\begin{aligned} \text{ค่า Static gain } (K_p, K) &= \frac{\text{ผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่}}{\text{ผลต่างของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ภาวะคงที่}} \\ &= \frac{750 - 681}{0.52 - 0.12} = 172^\circ\text{C}/(\text{kg}/10\text{min}) = 0.172^\circ\text{C}/(\text{g}/10\text{min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Time constant } (\tau_p, \tau) &= \frac{3}{2} (t_2 - t_1) \\ &= \frac{3}{2} (8.1 - 5.28) = 4.23 \text{ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Dead time } (t_d) &= t_2 - \tau \\ &= 8.1 - 4.23 = 3.87 \text{ นาที} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional หาค่าคงที่ K_c ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(1 + \frac{t_d}{3} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.172} \frac{4.23}{3.87} \left(1 + \frac{3.87}{3} \right) \\ &= 14.55 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral หาค่าคงที่ K_c และ τ_i ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(0.9 + \frac{t_d}{12} \right) \dots\dots\dots(2.14)$$

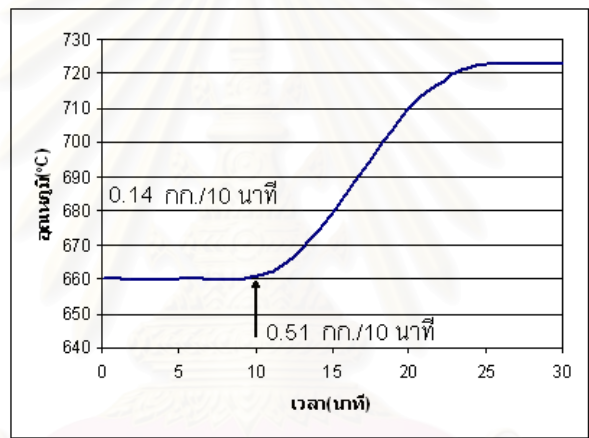
$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.172} \frac{4.23}{3.87} \left(0.9 + \frac{3.87}{12} \right) \\ &= 7.77 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\tau_i = t_d \left(\frac{30 + (3t_d/\tau)}{9 + (20t_d/\tau)} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

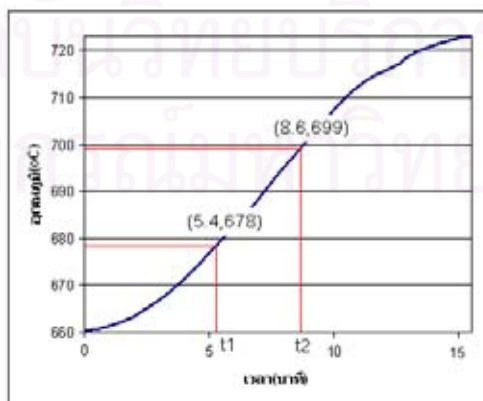
$$\tau_1 = 3.87 \times \left(\frac{30 + (3 \times 3.87 / 4.23)}{9 + (20 \times 3.87 / 4.23)} \right)$$

$$= 4.64 \text{ นาที}$$

9. การคำนวณหาค่าคงที่ของกระบวนการเมื่อใช้ถ่านหิน : กากกาแฟ = 2:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง หาได้จากเมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ค่าหนึ่งจนอุณหภูมิในเตาเผาคงที่แล้ว จากนั้นเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไปเป็นค่าคงที่อีกค่าหนึ่งรอจนอุณหภูมิคงที่อีกครั้ง โดยที่ความเร็วลมคงที่ จะได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่ และผลต่างของเชื้อเพลิงที่ป้อนแสดงดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา



รูปที่ 5.18 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:กากกาแฟ = 3:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง

คำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ของระบบจากรูปที่ 5.17 และ 5.18 คือ

$$\begin{aligned} \text{ค่า Static gain } (K_p, K) &= \frac{\text{ผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่}}{\text{ผลต่างของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ภาวะคงที่}} \\ &= \frac{723 - 660}{0.513 - 0.14} = 169^\circ\text{C}/(\text{kg}/10\text{min}) = 0.169^\circ\text{C}/(\text{g}/10\text{min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Time constant } (\tau_p, \tau) &= \frac{3}{2} (t_2 - t_1) \\ &= \frac{3}{2} (8.6 - 5.4) = 4.8 \text{ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Dead time } (t_d) &= t_2 - \tau \\ &= 10.5 - 4.8 = 3.8 \text{ นาที} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional หาค่าคงที่ K_c ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(\frac{1 + t_d}{3} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.169} \frac{4.8}{3.8} \left(\frac{1 + 3.8}{3} \right) \\ &= 18.39 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral หาค่าคงที่ K_c และ τ_i ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(\frac{0.9 + t_d}{12} \right) \dots\dots\dots(2.14)$$

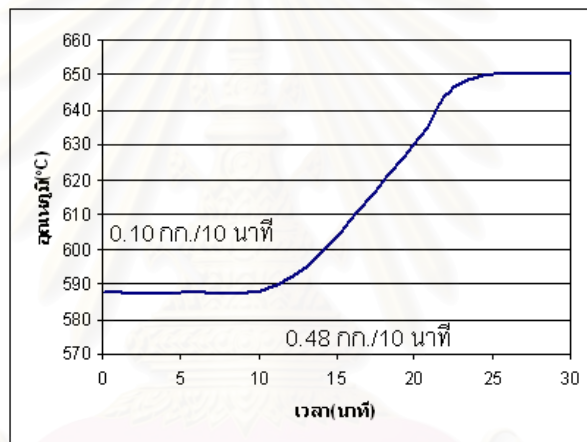
$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.169} \frac{4.8}{3.8} \left(\frac{0.9 + 3.8}{12} \right) \\ &= 9.09 \text{ (g/10 min)}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\tau_i = t_d \left(\frac{30 + (3t_d/\tau)}{9 + (20t_d/\tau)} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

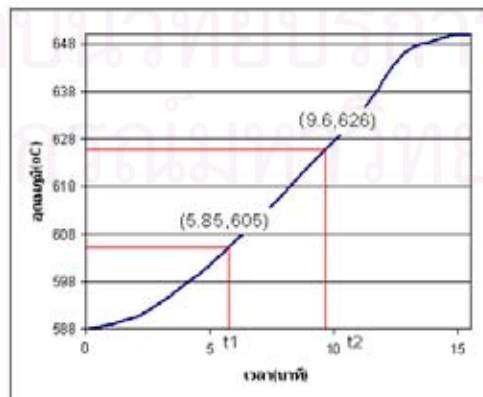
$$\tau_1 = 3.8 \times \left(\frac{30 + (3 \times 3.8 / 4.8)}{9 + (20 \times 3.8 / 4.8)} \right)$$

$$= 4.95 \text{ นาที}$$

10. การคำนวณหาค่าคงที่ของกระบวนการเมื่อใช้ถ่านหิน : กากกาแฟ = 1:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง หาได้จากเมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ค่าหนึ่งจนอุณหภูมิในเตาเผาคงที่แล้ว จากนั้นเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไปเป็นค่าคงที่อีกค่าหนึ่งจนอุณหภูมิคงที่อีกครั้ง โดยที่ความเร็วลมคงที่ จะได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่ และผลต่างของเชื้อเพลิงที่ป้อนแสดงดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา
เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา



รูปที่ 5.20 การหาค่าพารามิเตอร์ t_d และ τ เมื่อใช้ถ่านหิน:กากกาแฟ = 1:1 (โดยน้ำหนัก) เป็นเชื้อเพลิง

คำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ของระบบจากรูปที่ 5.19 และ 5.20 คือ

$$\begin{aligned} \text{ค่า Static gain } (K_p, K) &= \frac{\text{ผลต่างของอุณหภูมิที่ภาวะคงที่}}{\text{ผลต่างของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ภาวะคงที่}} \\ &= \frac{650 - 588}{0.485 - 0.102} = 162^\circ\text{C}/(\text{kg}/10\text{min}) = 0.162^\circ\text{C}/(\text{g}/10\text{min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Time constant } (\tau_p, \tau) &= \frac{3}{2} (t_2 - t_1) \\ &= \frac{3}{2} (9.6 - 5.85) = 5.625 \text{ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า Dead time } (t_d) &= t_2 - \tau \\ &= 9.6 - 5.625 = 3.975 \text{ นาที} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional หาค่าคงที่ K_c ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(1 + \frac{t_d}{3} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.162} \frac{5.625}{3.975} \left(1 + \frac{3.975}{3} \right) \\ &= 20.31 (\text{g}/10 \text{ min})/^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral หาค่าคงที่ K_c และ τ_i ได้จากสมการ

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} \left(0.9 + \frac{t_d}{12} \right) \dots\dots\dots(2.14)$$

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{0.162} \frac{5.625}{3.975} \left(0.9 + \frac{3.975}{12} \right) \\ &= 10.75 (\text{g}/10 \text{ min})/^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\tau_i = t_d \left(\frac{30 + (3t_d/\tau)}{9 + (20t_d/\tau)} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

$$\tau_1 = 3.975 \times \left(\frac{30 + (3 \times 3.975 / 5.625)}{9 + (20 \times 3.975 / 5.625)} \right)$$

$$= 5.52 \text{ นาที}$$

11. การหาค่าคงที่ของกระบวนการเมื่อใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเมื่อผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ในกระบวนการ โดยค่า Static gain ของกระบวนการที่ได้ โดยการคำนวณจากค่าคงที่แต่ละส่วนย่อยของกระบวนการมีดังต่อไปนี้

- อุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลเปลี่ยนเป็นสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้า
มีค่า $K_m = 0.002 \text{ V/}^\circ\text{C}$
- สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากวงจรเข้าสู่ตัวแปลงสัญญาณเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า
มีค่า $K_{f1} = 3.6 \text{ mA/V}$
- กระแสไฟฟ้าจากตัวแปลงสัญญาณเข้าสู่อินเวอร์เตอร์เปลี่ยนเป็นความถี่
มีค่า $K_{f2} = 3.25 \text{ hz/mA}$
- อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาเมื่อเปลี่ยนความถี่ของอินเวอร์เตอร์
มีค่า $K_{f3} = 224.4 \text{ (g/10 min)/hz}$
- อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิง
มีค่า $K_p = 0.1814 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{g/10min})$

เพราะฉะนั้น

$$K_{cu} \times K_m \times K_{f1} \times K_{f2} \times K_{f2} \times K_p = \text{constant}$$

$$K_{cu} = \frac{\text{constant}}{K_m \times K_{f1} \times K_{f2} \times K_p} \dots\dots\dots(6.1)$$

$$\text{เมื่อ } K_m \times K_{f1} \times K_{f2} \times K_{f2} \times K_p = 0.002 \text{ V/}^\circ\text{C} \times 3.6 \text{ mA/V} \times 3.25 \text{ hz/mA} \times$$

$$224.4(\text{g/10 min})/\text{hz} \times 0.1814 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{g/10min})$$

$$= 0.95$$

$$K_{cu} = \frac{\text{constant}}{0.95} \dots\dots\dots(6.2)$$

- จากการหาค่าคงที่โดยใช้สมการ Cohen&Coon ในเครื่องควบคุมแบบ Proportional

$$\text{ค่าคงที่ } K_c = 14.06 \text{ (g/10 min)/}^\circ\text{C}$$

$$K_{cu} K_p = \text{constant} \dots\dots\dots(6.3)$$

$$K_{cu} = 2(K_c) = 2 \times 14.06 = 28.12$$

แทนค่าลงในสมการที่ 6.3 จะได้

$$K_{cu} K_p = \text{constant} = 0.1814 \times 28.12 = 5.10$$

แทนค่า constant ลงในสมการที่ 6.2 จะได้

$$K_{cu} = \frac{5.10}{0.95} = 5.37 \text{ (g/10 min)}^{\circ}\text{C}$$

พบว่าค่าคงที่ของกระบวนการที่พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเมื่อผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ในกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกับการหาโดยวิธีคำนวณจากสมการที่ 4.2 ($K_c = 1/K_p$)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอันธิการ์ วรรณะ เกิดวันที่ 29 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์อิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย