

การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดด้วยไมโครคอมพิวเตอร์



นางสาวเก็จวลี พุกษาท

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2533

ISBN 974-577-072-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

016695

MICROCOMPUTER CONTROL ON COAL COMBUSTION IN FLUIDIZED BED

Miss. KEJVALEE PRUKSATHORN

A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Chemical Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

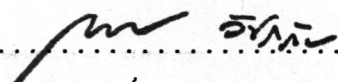
1990

ISBN 974-577-072-8

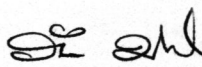
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดด้วยไมโครคอมพิวเตอร์
โดย นางสาวเก็จวลี นฤกษาท
ภาควิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสตุ

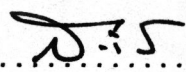


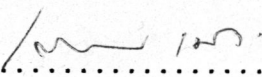
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

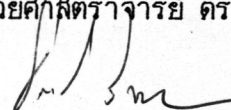
.....  คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรากัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ)

.....  กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)

.....  กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสตุ)

.....  กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิตศานต์)



เกียรติคุณ : วิทยานิพนธ์ : การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบดด้วยไมโครคอมพิวเตอร์
 (MICRO COMPUTER CONTROL ON COAL COMBUSTION IN FLUIDIZED BED) อ.ที่
 ปริญญา : ศ.ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.เลอสร่าง เมฆสุต,
 128 หน้า. ISBN 974-577-072-8

การเผาไหม้ถ่านหินเป็นปฏิกิริยาคายพลังงานความร้อน (exothermic reaction) และพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาสามารถวัดได้ในรูปของอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล สัญญาณที่เกิดขึ้นจากการวัดอุณหภูมิจะถูกนำไปใช้ควบคุมการเผาไหม้ของถ่านหินในเตาเผาอย่างอัตโนมัติด้วยวิธีการควบคุมการปรับอัตราการป้อนถ่านหิน หรือการปรับปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่เบด งานวิจัยนี้ได้นำเอาไมโครคอมพิวเตอร์มาประยุกต์เข้ากับระบบการควบคุม ซึ่งลักษณะการควบคุมของระบบเป็นแบบป้อนกลับ (feedback control) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาขึ้นโดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรตามรูปแบบการควบคุมที่ต้องการ ทั้งแบบ proportional, proportional integral และ proportional integral derivative

การทดลองพบว่า โปรแกรมทั้ง 3 แบบสามารถควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างต่อเนื่องและการเผาไหม้ถูกควบคุมให้อยู่ในสภาวะคงที่ได้ ที่ค่า Kc (proportional gain) เทียบกับโปรแกรมควบคุมแบบ proportional สามารถควบคุมแนวโน้มของอุณหภูมิได้ดีกว่าคือ มีค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุดเท่ากับ 6.63 ส่วนแบบ proportional integral และ proportional integral derivative มีค่าเบี่ยงเบนไปมากกว่า ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิในแต่ละรูปแบบการควบคุม สรุปได้ดังนี้

- proportional มีความผิดพลาดไม่เกิน 10 °ซ
- proportional integral มีความผิดพลาดไม่เกิน 12 °ซ
- proportional integral derivative มีความผิดพลาดไม่เกิน 15 °ซ

จากการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบดโดยใช้โปรแกรมควบคุมแบบ proportional ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยความเร็วอากาศ 36 - 44 เมตร/นาที อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ 5:1 - 2.33:1 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิเบด 750 - 900 °ซ สภาวะที่ได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงถึง 95 - 98 % อยู่ที่ความเร็วอากาศ 39 - 42 เมตร/นาที อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ 3:1 - 2.33:1 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิเบด 750 - 800 °ซ

ภาควิชา เคมี เทคนิค
 สาขาวิชา เคมี เทคนิค
 ปีการศึกษา ๒๕๓๒

ลายมือชื่อนิสิต
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

KEJVALEE PRUKSATHORN : MICRO COMPUTER CONTROL ON COAL COMBUSTION IN
FLUIDIZED BED, THESIS ADVISOR : PROF.SOMSAK DAMRONGLERD, Ph.D.,
ASSIST.PROF.LURSUANG MEKASUT, Ph.D. 128 pp. ISBN 974-577-072-8

The combustion of coal is an exothermic reaction and the amount of exhausted energy could be measured in term of temperature by thermocouple. The signal from the temperature measurement was amplified and converted to control the speed of feeding motor and the value of inlet air. This research work dealt with a feed back control system: a microcomputer was linked with the convertor and temperature controller. Software was developed by setting correlations in types of proportional, proportional integral and proportional integral derivative.

The experimental results revealed that all three types of software contribute a steady and continuous control of combustion system at the same Kc (proportional gain) value. The software program of proportional control system was the most suitable with a less standard deviation equal to 6.63. The errors of temperature in each type were as following

- The proportional < 10 °C
- The proportional integral < 12 °C
- The proportional integral derivative < 15 °C

Form the study of the effect of the variables on coal combustion in fluidized bed by using the software program of proportional control system, the variables consisted of air velocity of 36 - 44 metres/min., ratio of coal per dolomite between 5:1 - 2.33:1 by weight and bed temperature of 750-900 °C. The efficiency of the combustion condition could reached as high as 95 - 98 % at air velocity of 39 - 42 metres/min., with the ratio of coal per dolomite 3:1 - 2.33:1 by weight and bed temperature of 750 - 800 °C.

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา ๒๕๓๒

ลายมือชื่อนิสิต *tmr* *ks*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *ด.ส.ส*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม *ks*

กิตติกรรมประกาศ



ฉ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จล่วงไปด้วยดี ต้องขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือการวิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ อาจารย์ ดร. ทรายพงษ์ วิทิตานต์ และอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยชี้แนะให้งานวิจัยนี้เสนอเป็นผลงานได้อย่างดี

ขอขอบคุณบริษัท แพร่ลีกไนท์ จำกัด บริษัท เทพประทานการแร่ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อ วัสดุดิบตลอดการทดลอง ขอขอบคุณ คุณวัฒนา นนคุณ และสำนักงานพลังงานแห่งชาติที่อำนวยความสะดวกด้านการวิเคราะห์ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ช่วยเหลือด้านเครื่องมือ และการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่เป็นกำลังใจ สนับสนุน และช่วยเหลือให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จรวดเร็วยิ่งขึ้น

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณพี่ๆ ที่เป็นกำลังใจและสนับสนุน การทำวิจัยนี้มาโดยตลอด



| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ | ฉ |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญรูป | ฉ |
| สัญลักษณ์ | ด |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ | 1 |
| 2 วารสารปริทัศน์ | 4 |
| 2.1 ไฮโดรไดนามิกในเตาเผาแบบฟลูอิโดซ์เบด | 4 |
| 2.2 กลไกการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบด | 7 |
| 2.2.1 กลไกการเผาไหม้ของสารระเหย | 7 |
| 2.2.2 กลไกการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอน | 7 |
| 2.3 โมเดลการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเม็ดถ่านหิน | 8 |
| 2.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของอนุภาค | 9 |
| 2.4.1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้จากค่าความร้อน | 10 |
| 2.4.2 สมการแสดงอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหินและโตโลไมท์ในฟลูอิโดซ์เบด | 10 |
| 2.5 มลพิษและการควบคุมมลพิษในฟลูอิโดซ์เบด | 12 |
| 2.6 การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบด | 14 |
| 2.7 ระบบการควบคุมกระบวนการทางเคมี | 14 |
| 2.7.1 อิทธิพลของตัวแปรภายนอกที่มีต่อระบบ | 15 |
| 2.7.2 ระบบอยู่ในสภาวะคงที่หรือไม่ | 15 |
| 2.7.3 ด้านเศรษฐกิจ | 15 |
| 2.8 รูปแบบของระบบการควบคุม | 16 |
| 2.8.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ | 16 |
| 2.8.2 การควบคุมแบบอินเฟอเรนเชียล | 17 |
| 2.8.3 การควบคุมแบบฟีดฟอร์เวิร์ด | 18 |
| 2.9 การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการเคมี | 18 |
| 2.9.1 จากการพิจารณาทางทฤษฎี | 18 |

สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ | | หน้า |
|-------|---|------|
| 2 | 2.9.2 จากการศึกษาทดลอง | 19 |
| | 2.10 Transfer Function ของระบบ | 20 |
| | 2.11 ลักษณะของระบบกระบวนการลำดับที่หนึ่ง | 21 |
| | 2.12 ชนิดของเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ | 24 |
| | 2.12.1 เครื่องควบคุมแบบ P | 25 |
| | 2.12.2 เครื่องควบคุมแบบ PI | 26 |
| | 2.12.3 เครื่องควบคุมแบบ PID | 27 |
| | 2.13 การหาค่าคงที่ของเครื่องควบคุม | 27 |
| | 2.14 การควบคุมกระบวนการด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ | 29 |
| 3 | อุปกรณ์และวิธีการทดลอง | 36 |
| | 3.1 อุปกรณ์การทดลอง | 36 |
| | 3.1.1 อุปกรณ์การเตรียมวัตถุดิบ | 36 |
| | 3.1.1.1 เครื่องบดแบบเขี่ยผง | 36 |
| | 3.1.1.2 เครื่องร่อนแยกขนาด | 36 |
| | 3.1.2 อุปกรณ์การเผาไหม้ | 36 |
| | 3.1.2.1 เตาเผาแบบฟลูอิโดซ์เบด | 36 |
| | 3.1.2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหรือหม้อไอน้ำ | 37 |
| | 3.1.2.3 เครื่องตักฝุ่นแบบไซโคลน | 37 |
| | 3.1.2.4 เครื่องป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ | 37 |
| | 3.1.2.5 อุปกรณ์การวัดอุณหภูมิหรือเทอร์โมคัปเปิล | 37 |
| | 3.1.2.6 เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ | 37 |
| | 3.1.2.7 เครื่องขยายสัญญาณ | 37 |
| | 3.1.2.8 เครื่องควบคุมขั้นสุดท้าย | 38 |
| | 3.1.2.9 อุปกรณ์กำจัดฝุ่นและก๊าซแบบการดูดซึม | 38 |
| | 3.1.3 อุปกรณ์การชั่งและวิเคราะห์ตัวอย่าง | 38 |
| | 3.2 วิธีดำเนินการทดลอง | 41 |
| 4 | ผลการทดลอง | 43 |
| | 4.1 คุณสมบัติของถ่านหินและโดโลไมท์ | 43 |
| | 4.1.1 คุณสมบัติของถ่านหิน | 43 |

สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ | | หน้า |
|-------|---|------|
| 4 | 4.1.2 คุณสมบัติของไดโพลไมท์ | 44 |
| 4.2 | การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดด้วยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด | 45 |
| 4.3 | การพัฒนาโปรแกรมซอฟต์แวร์สำหรับควบคุมการเผาไหม้ | 48 |
| 4.3.1 | ทดสอบว่าไมโครคอมพิวเตอร์สามารถควบคุมการเผาไหม้ได้หรือไม่ | 48 |
| 4.3.2 | ทดสอบโปรแกรมส่วนควบคุมแบบอัตโนมัติ | 49 |
| 4.4 | การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดด้วยโปรแกรมอัตโนมัติแบบ P, PI, PID | 54 |
| 4.4.1 | การควบคุมด้วยโปรแกรมแบบ P | 54 |
| 4.4.2 | การควบคุมด้วยโปรแกรมแบบ PI | 62 |
| 4.4.3 | โปรแกรมควบคุมแบบ PID | 62 |
| 4.4.4 | โปรแกรมควบคุมแบบ P ที่พัฒนาใหม่ | 63 |
| 4.5 | ผลของตัวแปรที่มีต่อการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดที่ควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ | 73 |
| 4.5.1 | ความเร็วอากาศ | 75 |
| 4.5.2 | อัตราส่วนถ่านหินต่อไดโพลไมท์ | 77 |
| 4.5.3 | อุณหภูมิเบด | 81 |
| 5 | วิจารณ์ผลการทดลอง | 88 |
| 5.1 | คุณสมบัติของถ่านหินและไดโพลไมท์ | 88 |
| 5.2 | การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดด้วยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด | 88 |
| 5.2.1 | ช่วงการควบคุม เริ่มต้น | 88 |
| 5.2.2 | ช่วงการควบคุม เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ | 88 |
| 5.3 | การพัฒนาโปรแกรมซอฟต์แวร์สำหรับควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบด | 89 |
| 5.3.1 | ทดสอบการควบคุมของไมโครคอมพิวเตอร์ | 89 |
| 5.3.2 | ทดสอบโปรแกรมส่วนควบคุมแบบอัตโนมัติ | 90 |
| 5.4 | การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดด้วยโปรแกรมแบบ P, PI, PID | 93 |
| 5.4.1 | โปรแกรมควบคุมแบบ P | 93 |
| 5.4.2 | โปรแกรมควบคุมแบบ PI | 95 |
| 5.4.3 | โปรแกรมควบคุมแบบ PID | 96 |
| 5.4.4 | โปรแกรมควบคุมแบบ P ที่พัฒนาใหม่ | 97 |

สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| 5 5.5 ผลของตัวแปรที่มีต่อการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดที่ควบคุมด้วย ไมโครคอมพิวเตอร์ | 97 |
| 5.5.1 ความเร็วอากาศ | 98 |
| 5.5.2 อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ | 99 |
| 5.5.3 อุณหภูมิเบด | 101 |
| 6 สรุปและข้อเสนอแนะ | 103 |
| 6.1 ความเร็วอากาศ | 104 |
| 6.2 อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ | 104 |
| 6.3 อุณหภูมิเบด | 104 |
| เอกสารอ้างอิง | 105 |
| ภาคผนวก | 109 |
| ภาคผนวก ก | 110 |
| ภาคผนวก ข | 112 |
| ภาคผนวก ค | 119 |
| ประวัติผู้เขียน | 128 |



สารบัญตาราง

ฉ

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านหิน | 44 |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของโดโลไมท์ | 45 |
| 4.3 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์ เบดที่ควบคุมด้วย ไมโครคอมพิวเตอร์ | 74 |
| ก1 แสดงข้อมูลการทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิโดซ์ของถ่านหิน และโดโลไมท์ | 111 |
| ค1 ข้อมูลทดลองการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์ เบดด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ | 120 |



สารบัญรูป

ฉ

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 2.1 | แสดงการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันเคลื่อนที่ช้า เป็นฟังก์ชันเคลื่อนที่เร็ว | 5 |
| 2.2 | แสดงการเกิดปฏิกิริยาในส่วนต่างๆของฟลูอิดส์ เบดในอุดมคติ | 6 |
| 2.3 | กระบวนการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอนในฟลูอิดส์ เบด | 7 |
| 2.4 | แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซต่างๆตามแนวรัศมีของอนุภาค ถ่านหินที่กำลังเผาไหม้ภายในขอบเขตการแพร่ ก. แผ่นฟิล์มเชิงเดี่ยว ข. แผ่นฟิล์มเชิงคู่ | 9 |
| 2.5 | แผนภาพแสดงลักษณะการควบคุมแบบป้อนกลับ | 17 |
| 2.6 | แผนภาพแสดงลักษณะการควบคุมแบบอินเฟอเรนเชียล | 17 |
| 2.7 | แผนภาพแสดงลักษณะการควบคุมแบบฟีดฟอร์เวิร์ด | 18 |
| 2.8 | ความสัมพันธ์ระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม | 19 |
| 2.9 | ก. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรป้อนออกกับเวลา ข. กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงโดยประมาณของค่าตัวแปรในระบบลำดับที่หนึ่ง | 20 |
| 2.10 | ก. แผนภาพของระบบตัวแปรเข้าออกตัวเดียว ข. แผนภาพ transfer function ของระบบ | 20 |
| 2.11 | ความสัมพันธ์ของตัวแปรป้อนออกกับเวลาของกระบวนการลำดับที่หนึ่ง เมื่อเปลี่ยนตัวแปรป้อนเข้าไปคงที่ค่าหนึ่ง | 23 |
| 2.12 | วงจรถูกควบคุมแบบป้อนกลับ | 24 |
| 2.13 | ค่า offset ที่เกิดจากการควบคุมแบบ P ในกระบวนการลำดับที่หนึ่งเมื่อ ก. เปลี่ยนค่าตัวแปรที่กำหนด ข. เปลี่ยนค่าตัวแปรป้อนเข้า | 26 |
| 2.14 | แผนภาพแสดงรูปแบบการควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ | 29 |
| 2.15 | วงจรถูกควบคุมแบบป้อนกลับด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ | 29 |
| 2.16 | แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ | 31 |
| 2.17 | แสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะของค่าสัญญาณ | 32 |
| 2.18 | แนวโน้มของสัญญาณเมื่อเวลาในการชักตัวอย่างต่างกัน | 33 |
| 3.1 | แสดงแผนผังการทำงานของเครื่องมือในระบบการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดส์ เบดที่ควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ | 39 |
| 3.2 | แสดงอุปกรณ์และเครื่องมือในระบบการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดส์ เบด | 40 |
| 3.3 | แสดงแผนผังควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินและเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ | 40 |
| 3.4 | แสดงผังการดำเนินการทดลอง | 43 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.1 ผลการควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหินด้วยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด | 47 |
| 4.2 ผลการควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหินเมื่อใช้โปรแกรมควบคุมโดยผู้ควบคุม | 50 |
| 4.3 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมอัตโนมัติที่ความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงคือ อุณหภูมิที่กำหนด-อุณหภูมิการเผาไหม้ขณะนั้น > 30 อัตราการป้อนเปลี่ยนไป | 51 |
| " " " 21 - 30 " " | +20 |
| " " " 11 - 20 " " | +10 |
| " " " -20 - (-11) " " | +5 |
| " " " < -21 " " | -10 |
| 4.4 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมอัตโนมัติที่ความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงคือ อุณหภูมิที่กำหนด-อุณหภูมิการเผาไหม้ขณะนั้น > 30 อัตราการป้อนเปลี่ยนไป | 52 |
| " " " 21 - 30 " " | +1.5 |
| " " " 11 - 20 " " | +1 |
| " " " -20 - (-11) " " | +0.5 |
| " " " < -21 " " | -2 |
| 4.5 ผลการควบคุมเมื่อโปรแกรมใช้ค่า $K_c = 40$ เวลาในการเปรียบเทียบ 10 วินาที | 55 |
| 4.6 ผลการควบคุมเมื่อโปรแกรมใช้ค่าคงที่ $K_c = 12$ และ ช่วงเวลาในการ เปรียบเทียบ 25 วินาที จำนวนการวนรอบหรือจำนวนเท่าของเวลาที่ ใช้ในการเปรียบเทียบเมื่ออุณหภูมิมิมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนด = 7 | 56 |
| 4.7 ผลการควบคุมเมื่อโปรแกรมใช้ค่าคงที่ $K_c = 12$ และ ช่วงเวลาในการ เปรียบเทียบ 15 นาที จำนวนการวนรอบ = 7 | 56 |
| 4.8 ผลการควบคุมเมื่อโปรแกรมใช้ค่าคงที่ $K_c = 12$ และ ช่วงเวลาในการ เปรียบเทียบ 15 นาที จำนวนการวนรอบ = 7 | 58 |
| 4.9 ผลการควบคุมเมื่อโปรแกรมใช้ค่าคงที่ $K_c = 12$ และ ช่วงเวลาในการ เปรียบเทียบ 10 นาที จำนวนการวนรอบ = 8 | 59 |
| 4.10 ผลการควบคุมเมื่อโปรแกรมใช้ค่าคงที่ $K_c = 12$ และ ช่วงเวลาในการ เปรียบเทียบ 10 นาที จำนวนการวนรอบ = 7 | 60 |
| 4.11 ผลการควบคุมเมื่อโปรแกรมใช้ค่าคงที่ $K_c = 12$ และ ช่วงเวลาในการ เปรียบเทียบ 10 นาที จำนวนการวนรอบ = 6 | 64 |
| 4.12 แผนผังการทำงานของโปรแกรมอัตโนมัติแบบ P | 64 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.13 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมอัตโนมัติแบบ P ที่ค่า $K_c = 12$ เวลาในการเปรียบเทียบ 10 วินาที จำนวนการวนรอบ = 2 | 65 |
| 4.14 แผนผังการทำงานของโปรแกรมอัตโนมัติแบบ PI | 66 |
| 4.15 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมอัตโนมัติแบบ PI ที่ค่า $K_c = 12$, $\tau_i = 1.2$ เวลาในการเปรียบเทียบ 15 วินาที จำนวนการวนรอบ = 2 | 67 |
| 4.16 แผนผังการทำงานของโปรแกรมอัตโนมัติแบบ PID | 68 |
| 4.17 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมอัตโนมัติแบบ PID ที่ค่า $K_c = 12$, $\tau_i = 1.2$, $\tau_D = 0.5$ เวลาในการเปรียบเทียบ 10 วินาที จำนวนการวนรอบ = 2 | 69 |
| 4.18 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมอัตโนมัติแบบ PID ที่ค่า $K_c = 12$, $\tau_i = 1.3$, $\tau_D = 0.2$ เวลาในการเปรียบเทียบ 15 วินาที จำนวนการวนรอบ = 1 | 70 |
| 4.19 แผนผังการทำงานของโปรแกรมอัตโนมัติแบบ P ที่แก้ไขค่า offset ของการควบคุม | 71 |
| 4.20 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมอัตโนมัติแบบ P ที่แก้ไขค่า offset ใช้ค่า $K_c = 12$ เวลาในการเปรียบเทียบ 10 วินาที จำนวนการวนรอบ = 2 | 72 |
| 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ ที่อัตราส่วนก่านหินต่อโดโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก) | 75 |
| 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซซิลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับความเร็วอากาศ ที่อัตราส่วนก่านหินต่อโดโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก) | 76 |
| 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับความเร็วอากาศ ที่อัตราส่วนก่านหินต่อโดโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก) | 76 |
| 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบ่อนก่านหินกับความเร็วอากาศ ที่อัตราการบ่อนก่านหินต่อโดโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก) | 77 |
| 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้กับอัตราส่วนของแคลเซียม ต่อซิลเฟอร์ที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาที | 78 |
| 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้กับอัตราส่วนแคลเซียม ต่อซิลเฟอร์ที่ความเร็วอากาศ 41.81 เมตร/นาที | 78 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนถ่านหินกับอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลเฟอร์ที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาที่ | 79 |
| 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนถ่านหินกับอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลเฟอร์ที่ความเร็วอากาศ 41.81 เมตร/นาที่ | 80 |
| 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซซิลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลเฟอร์ที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาที่ | 80 |
| 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซซิลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลเฟอร์ที่ความเร็วอากาศ 41.81 เมตร/นาที่ | 81 |
| 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้กับอุณหภูมิเบดที่อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก) | 82 |
| 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้กับอุณหภูมิเบดที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาที่ | 82 |
| 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้กับอุณหภูมิเบดที่ความเร็วอากาศ 41.81 เมตร/นาที่ | 83 |
| 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนถ่านหินกับอุณหภูมิเบดที่อัตราส่วนของแคลเซียมต่อโดโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก) | 84 |
| 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนถ่านหินกับอุณหภูมิเบดที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาที่ | 84 |
| 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนถ่านหินกับอุณหภูมิเบดที่ความเร็วอากาศ 41.81 เมตร/นาที่ | 84 |
| 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซซิลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับอุณหภูมิเบดที่อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก) | 85 |
| 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซซิลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับอุณหภูมิเบดที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาที่ | 85 |
| 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซซิลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับอุณหภูมิเบดที่ความเร็วอากาศ 41.81 เมตร/นาที่ | 86 |
| 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับอุณหภูมิเบดที่อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก) | 86 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.41 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับ อุณหภูมิเบดที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาทีกี้ | 87 |
| 4.42 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับ อุณหภูมิเบดที่ความเร็วอากาศ 41.81 เมตร/นาทีกี้ | 87 |
| ก1 | ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับความดันลดเพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุด ที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์ของถ่านหินและโตโลไมท์ | 110 |

สัญลักษณ์



- A = พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อนจากเตาเผาแบบฟลูอิโดซ์
- C_p = ความเข้มข้นของออกซิเจนในวัฏภาคหนาแน่น (กรัม/โมล/ลบ. ซม.)
- C_s = ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ผิวหน้าของอนุภาคถ่านหิน (กรัม/โมล/ลบ. ซม.)
- F = อัตราการป้อนอากาศเข้าสู่เบด (กรัม/นาที)
- G_1 = อัตราการป้อนถ่านหิน (กรัม/นาที)
- G_2 = อัตราการป้อนโดโลไมท์ (กรัม/นาที)
- G_3 = อัตราการไหลออกของเถ้าจากท่อสิ้น (กรัม/นาที)
- G_4 = อัตราการไหลออกของเถ้าจากไซโคลน (กรัม/นาที)
- H_c = ค่าความร้อนของถ่านหิน (กิโลแคลอรี/กรัม)
- H_{co} = ค่าความร้อนของการเผาไหม้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (กิโลแคลอรี/กรัม)
- H_{cyc} = ค่าความร้อนของเถ้าจากไซโคลน (กิโลแคลอรี/กรัม)
- $H_{o.f}$ = ค่าความร้อนของเถ้าจากท่อสิ้น (กิโลแคลอรี/กรัม)
- H_s = ค่าความร้อนของปฏิกิริยาซัลเฟชัน (กิโลแคลอรี/กรัม)
- H_v = ค่าเอนทาลปีของน้ำในอากาศ (กิโลแคลอรี/กรัม)
- m_{H_2O} = ปริมาณความชื้นในฟลูอิโดซ์ (กรัม/นาที)
- n_{H_2O} = ปริมาณความชื้นในอากาศที่ป้อนเข้าสู่เบด (กรัม/นาที)
- n_1 = ปริมาณก๊าซแต่ละชนิดในฟลูอิโดซ์ (กรัม/นาที)
- R_c = สัมประสิทธิ์การเกิดปฏิกิริยาเคมี
- R_m = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของออกซิเจนภายนอกอนุภาค
- T_{in} = อุณหภูมิของถ่านหินและอากาศที่ป้อนเข้าสู่เบด (°ซ)
- $T_{r=rf}$ = อุณหภูมิอ้างอิง (°ซ)
- T_t = อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาใดๆ (°ซ)
- T = อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาใดๆ - อุณหภูมิอ้างอิง (°ซ)
- t = เวลาในการเผาไหม้ถ่านหิน (นาที)
- U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
- U_b = ความเร็วของฟองก๊าซ (ซม./นาที)
- U_{br} = ความเร็วสัมพัทธ์ของฟองก๊าซ (ความเร็วเมื่อเทียบกับวัฏภาคหนาแน่น) (ซม./วินาที)
- U_f = ความเร็วของก๊าซในเบดหนาแน่นที่สภาวะเริ่มต้นของการเกิดฟลูอิโดซ์ (ซม./วินาที)
- U_{mf} = ความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิโดซ์ (ซม./วินาที)
- W_t = อัตราการเผาไหม้ถ่านหิน

ϵ_{mf} = ช่องว่างต่ำสุด
 η_c = ประสิทธิภาพการเผาไหม้(%) —