

ระบบควบคุมการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผาแบบกราฟท์ดาวนัด้วยคอมพิวเตอร์



นายธีรพจน์ โกราษฎร์

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2537

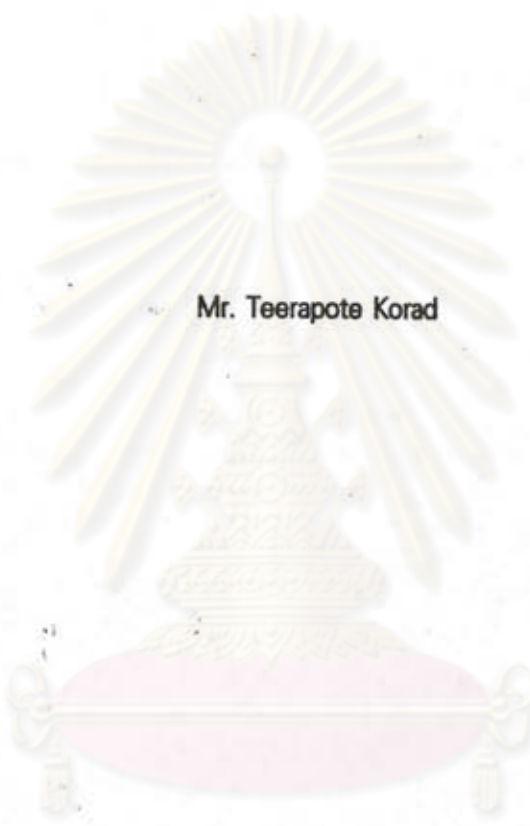
ISBN 974-584-006-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

18 S.A. 2545

1 1 9 7 4 1 2 3 X

COMPUTER-CONTROLLED SYSTEM FOR GAS COMBUSTION IN DRAFT-DOWN FURNACE



Mr. Teerapote Korad

ศูนย์วิทยทรัพยากร

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Chemical Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

1994

ISBN 974-584-006-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบควบคุมการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผาแบบดราฟท์ความร้อนด้วยคอมพิวเตอร์
โดย นายธีรพนธ์ โกราะภูฏ์
ภาควิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุต
อาจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



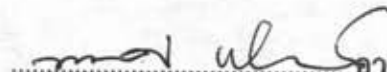
..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ กัญจนา บุญเกียรติ)



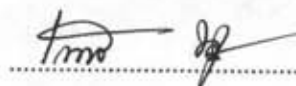
..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุต)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)



..... กรรมการ
(อาจารย์ แก้ววลี พฤชาทร)

ธีรพจน์ โกราชฎร์ : ระบบควบคุมการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผาแบบดราฟต์ดาวน์ด้วยคอมพิวเตอร์ (COMPUTER-CONTROLLED SYSTEM FOR GAS COMBUSTION IN DRAFT-DOWN FURNACE) อ. ที่ปรึกษา : ศ. ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, อ. ที่ปรึกษา
ร่วม : ผศ. ดร. เลอสรอง เมฆสุต, อ. ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, 148 หน้า. ISBN
974-584-006-8

ในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกอุณหภูมิและบรรยากาศในเตาเผาเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งที่มีผลต่อคุณภาพ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาาระบบควบคุมการเผาไหม้ก๊าซขึ้นเพื่อใช้กับเตาเผาได้อย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน โดยพัฒนาขึ้นเป็นระบบควบคุมอุณหภูมิและการเผาไหม้แบบอัตโนมัติโดยใช้คอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการประมวลผล ตัวแปรที่ควบคุมคืออุณหภูมิภายในเตาเผา ตัวแปรที่ใช้ในการปรับคืออัตราการป้อนก๊าซเชื้อเพลิง และอัตราการป้อนอากาศ ลักษณะการควบคุมเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) ลักษณะการควบคุมที่ทดสอบคือ Proportional, Proportional Integral และ Proportional Integral Derivative

การทดลองพบว่า กระบวนการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผาเป็นกระบวนการอันดับที่ 1 การควบคุมระบบการเผาไหม้แบ่งช่วงอุณหภูมิในการควบคุมออกเป็น 4 ช่วงคือ 350-550, 550-800, 800-1050 และ 1050-1350 องศาเซลเซียส การปรับแต่งค่าคงที่ของเครื่องควบคุมใช้วิธีของ Ziegler-Nichols ผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามต้องการ เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral และเครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative มีค่าความผิดพลาดต่ำกว่าเครื่องควบคุมแบบ Proportional ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของอุณหภูมิในแต่ละรูปแบบการควบคุมแสดงได้ดังนี้

- เครื่องควบคุมแบบ Proportional = 11.61 องศาเซลเซียส
- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral = 4.20 องศาเซลเซียส
- เครื่องควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative = 4.67 องศาเซลเซียส

เมื่อทดสอบระบบควบคุมแบบ Proportional Integral กับการเปลี่ยน set point แบบ ramp เครื่องควบคุมสามารถควบคุมการเผาไหม้ตามรูปแบบที่ต้องการได้อย่างแม่นยำเช่นกัน

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2536

ลายมือชื่อนิติ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
๒๕๓๖-๑๐-๕

C525641:MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD:COMPUTER-CONTROLLED/GAS COMBUSTION/DRAFT-DOWN FURNACE

TEERAPOTE KORAD : COMPUTER-CONTROLLED SYSTEM FOR GAS COMBUSTION IN DRAFT-DOWN FURNACE, THESIS ADVISOR : PROF. SOMSAK DAMRONGLERD, Ph. D., ASSIST. PROF. LURSUANG MEKASUT, Ph. D., PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph. D., 148 pp. ISBN 974-584-006-8

Temperature and furnace atmosphere are the most critical factors in the production of quality ceramics. An effective combustion controlled system has been developed for draft-down furnace to achieve maximum combustion efficiency and energy saving. This research has developed a computer system to control the temperature and furnace atmosphere in the furnace. The variable to be controlled is temperature in the furnace by adjusting volumetric flowrate of fuel gas and volumetric flowrate of air. The principle of the control is the **feedback control**. The controller types being tested include proportional, proportional integral, and proportional integral derivative.

This research demonstrated the combustion process in the furnace was the first order process; the controlled temperature was divided into 4 segments, 350-550, 550-800, 800-1050, and 1050-1350 degree Celsius. Tuning of the controller parameters was conducted by the method of Ziegler-Nichols. Results from the experiments revealed that the temperature could be controlled with in satisfactory limit. The proportional integral controller and the proportional integral derivative controller proved to have less deviation than the proportional controller. The average standard deviation of the controlled temperature in each type were as following

- The proportional = 11.61 degree Celsius
- The proportional integral = 4.20 degree Celsius
- The proportional integral derivative = 4.67 degree Celsius

In application of the proportional integral control system with changes in set point to ramp, the control system also perfectly controlled the combustion.

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา.....2536

ลายมือชื่อนิติ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ต้องขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด อาจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ อำพน วัฒนรังสรรค์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือการวิจัยเป็นอย่างดีมาตลอด

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ กัญจนา บุญเกียรติ อาจารย์ เก็จวลี พุกษาทร และอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยชี้แนะให้งานวิจัยนี้เสนอเป็นผลงานได้อย่างดี

ขอขอบคุณ คุณสมิตร วงศ์ไพบูลย์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด สีพระยาเอ็นจิเนียริง ผู้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยตลอดทั้งโครงการ

ขอขอบคุณ คุณจารึก พัฒพร หัวหน้าฝ่ายซ่อมบำรุง บริษัท Thai Shell Exploration & Production จำกัด ผู้ให้ยืมวัสดุควบคุมอัตโนมัติ

ขอขอบคุณ คุณสนธิ ปรีนคร ผู้ช่วยทำการปรับปรุงอุปกรณ์ในการทำวิจัย และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ช่วยเหลือด้านเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณที่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคและภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่เป็นกำลังใจ สนับสนุนและช่วยเหลือให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้อย่างรวดเร็ว

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนการทำวิจัยนี้มาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
สัญลักษณ์	ต
บทที่	
1 บทนำ	1
2 วารสารปริทัศน์	3
2.1 การเผาไหม้	3
2.2 ปฏิริยาการเผาไหม้ของก๊าซแอลพีจี	4
2.3 ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจี	5
2.3.1 สมการแสดงอุณหภูมิจากการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจีในเตาเผา	5
2.3.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของก๊าซแอลพีจีจากค่าความร้อน	7
2.4 ขั้นตอนการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกในเตาเผา	8
2.5 การควบคุมการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผา	10
2.6 ระบบการควบคุมกระบวนการทางเคมี	10
2.6.1 อิทธิพลที่มีผลต่อระบบการควบคุมกระบวนการทางเคมี	10
2.6.2 ตัวแปรในกระบวนการทางเคมี	11
2.6.3 องค์ประกอบของระบบควบคุม	13
2.7 รูปแบบของระบบควบคุม	13
2.7.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ	14
2.7.2 การควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ค่าวัดรองวิเคราะห์กระบวนการ	14
2.7.3 การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า	15
2.8 Transfer Function ของระบบ	15

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2 2.9 ลักษณะของระบบกระบวนการอันดับที่หนึ่ง	17
2.10 กระบวนการตอบสนองเชิงความถี่	19
2.10.1 การตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการอันดับหนึ่ง	19
2.10.2 แผนภูมิโบด	21
2.10.3 โค้งเชิงมุม	22
2.10.4 โค้งอัตราขยาย logarithm และมุมเฟส	23
2.11 การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการเคมี	24
2.11.1 จากการพิจารณาทางทฤษฎี	24
2.11.2 จากการทดลอง	25
2.11.2.1 การทดสอบด้วย Step	25
2.11.2.2 การทดสอบด้วยคลื่น Sine	26
2.11.2.3 การทดสอบด้วย Pulse	26
2.12 ชนิดของเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ	27
2.12.1 เครื่องควบคุมแบบ P	28
2.12.2 เครื่องควบคุมแบบ PI	29
2.12.3 เครื่องควบคุมแบบ PID	30
2.13 เครื่องควบคุมสัดส่วนการไหล	31
2.14 คุณสมบัติของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	31
2.15 การหาค่าคงที่ของเครื่องควบคุม	34
2.16 ระบบควบคุมกระบวนการด้วยคอมพิวเตอร์	35
2.17 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยคอมพิวเตอร์	39
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	42
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	42
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง	47
4 ผลการทดลอง	49
4.1 คุณสมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิง	49

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 4.2 การพัฒนาระบบและโปรแกรมสำหรับควบคุมการเผาไหม้ก๊าซด้วยคอมพิวเตอร์	50
4.2.1 ตัวแปรและความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบควบคุม	50
4.2.1.1 กระบวนการ	51
4.2.1.2 อุปกรณ์วัดสัญญาณ	53
4.2.1.3 เครื่องควบคุม	54
4.2.1.4 อุปกรณ์แปลงสัญญาณ digital เป็นสัญญาณ analog	54
4.2.1.5 อุปกรณ์แปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณลม	55
4.2.1.6 อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย	55
4.2.2 การปรับแต่งค่าคงที่ของเครื่องควบคุม	56
4.3 การทดสอบการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผาด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ	57
4.3.1 เครื่องควบคุมแบบ proportional	58
4.3.2 เครื่องควบคุมแบบ proportional integral	60
4.3.3 เครื่องควบคุมแบบ proportional integral derivative	62
4.3.4 การวิเคราะห์เชิงสถิติของผลทดสอบเครื่องควบคุมทั้ง 3 แบบ	66
4.3.5 ผลการทดลองเปรียบเทียบในด้านการใช้พลังงาน	67
4.4 ผลการทดลองควบคุมการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผาด้วยเครื่องควบคุมแบบ PI	68
4.4.1 ทดลองเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 800 °C	68
4.4.2 ทดลองเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 1250 °C	71
4.4.3 ทดลองเผาดินผสม dolomite ที่อุณหภูมิ 1100 °C	76
4.5 ผลการทดลองเครื่องควบคุมกับระบบควบคุมจำลอง	80
4.5.1 เปรียบเทียบผลการควบคุมกระบวนการจริงกับผลการควบคุม กระบวนการจำลอง	80
4.5.2 การปรับปรุงค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ proportional integral	82
4.5.3 การปรับปรุงค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ proportional integral derivative ..	87
5 วิจัยารณ์ผลการทดลอง	94
5.1 ตัวแปรและความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบควบคุม	94
5.1.1 กระบวนการ	94

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5	5.1.2 อุปกรณ์วัดสัญญาณ..... 96
	5.1.3 อุปกรณ์แปลงสัญญาณ digital เป็น analog และอุปกรณ์แปลง สัญญาณไฟฟ้าเป็นแรงดันลม 96
	5.1.4 อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย 96
	5.1.5 เครื่องควบคุมและการปรับแต่งค่าคงที่ของเครื่องควบคุม 96
	5.2 การควบคุมการเผาไหม้ด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ 97
	5.3 การทดสอบการควบคุมการเผาไหม้ด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ 97
	5.3.1 เครื่องควบคุมแบบ proportional 98
	5.3.2 เครื่องควบคุมแบบ proportional integral 98
	5.3.3 เครื่องควบคุมแบบ proportional integral derivative 98
	5.4 การทดลองการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผาด้วยเครื่องควบคุมแบบ PI 99
	5.5 การทดลองเครื่องควบคุมกับระบบควบคุมจำลอง 99
	5.5.1 เครื่องควบคุมแบบ proportional integral 100
	5.5.2 เครื่องควบคุมแบบ proportional integral derivative 100
6	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 101
	6.1 สรุปผลการทดลอง 101
	6.2 ข้อจำกัดของระบบควบคุมการเผาไหม้ก๊าซในงานวิจัย 102
	6.3 ข้อเสนอแนะ 102
เอกสารอ้างอิง 103
ภาคผนวก 105
ภาคผนวก ก 106
ภาคผนวก ข 107
ภาคผนวก ค 124
ภาคผนวก ง 137
ประวัติผู้เขียน 148

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซแอลพีจี	50
4.2 ค่าคงที่และเวลาคงที่ของกระบวนการ	52
4.3 ค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ proportional	56
4.4 ค่าคงที่และเวลาคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ proportional integral	57
4.5 ค่าคงที่และเวลาคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ proportional integral derivative	57
4.6 ผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเครื่องควบคุมทั้ง 3 แบบ	66
4.7 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของอุณหภูมิต่างของเครื่องควบคุมทั้ง 3 แบบ	66
4.8 ผลการใช้ก๊าซแอลพีจีเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้ได้ set point ที่ต้องการ (ลิตร)	67
4.9 ผลการใช้ก๊าซแอลพีจีเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้ได้ set point ที่ต้องการ (กิโลกรัม)	67
4.10 ผลการทดลองวิเคราะห์ของการทดลองเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 800 °C	71
4.11 ผลการทดลองวิเคราะห์ของการทดลองเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 1250 °C ก๊าซแอลพีจีเผาไหม้อย่างสมบูรณ์	75
4.12 ผลการทดลองวิเคราะห์ของการทดลองเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 1250 °C ก๊าซแอลพีจีเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์	75
4.13 ผลการทดลองวิเคราะห์ของการทดลองเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 1250 °C รวมทั้ง 6 ช่วงการควบคุม	76
4.14 ผลการทดลองวิเคราะห์ของการทดลองเผาดินผสม dolomite ที่อุณหภูมิ 1100 °C	79
ก1 ส่วนประกอบร้อยละโดยโมลของก๊าซแอลพีจีมาตรฐาน	106
ข1 ข้อมูลการทดลองทั้ง 7 ชุด	114

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อุณหภูมิการเผาผลิติดักกัษัตรีรามิกในเตาเผาที่เวลาต่าง ๆ	8
2.2 ตัวแปรเข้าและตัวแปรออกของกระบวนการอุตสาหกรรม	12
2.3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	14
2.4 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ค่าวัดองวิเคราะห์กระบวนการ	14
2.5 ระบบควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า	15
2.6 ก. แผนภาพของระบบตัวแปรเข้าออกตัวเดียว ข. แผนภาพ transfer function ของระบบ	15
2.7 ความสัมพันธ์ของตัวแปรออกกับเวลาของกระบวนการอันดับที่หนึ่ง เมื่อเปลี่ยนตัวแปรเข้าไปคงที่ค่าหนึ่ง	18
2.8 การตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการอันดับที่หนึ่ง	21
2.9 แผนภูมิโบลของกระบวนการอันดับที่หนึ่ง	22
2.10 โค้งเชิงมุมของกระบวนการอันดับที่หนึ่ง	23
2.11 โค้งแสดงค่า logarithm ของอัตราขยายและมุมเฟส	23
2.12 สภาพแวดล้อมภายนอกที่มีผลกระทบต่อสภาพของกระบวนการ	24
2.13 การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรออกเมื่อปรับค่าตัวแปรเข้าเพื่อทำการทดสอบ ด้วย step ของกระบวนการอันดับหนึ่ง	25
2.14 สัญญาณตัวแปรเข้าและตัวแปรออกรูป pulse	26
2.15 ผังสัญญาณของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	27
2.16 ค่า offset ที่เกิดจากการควบคุมแบบ P ในกระบวนการอันดับหนึ่ง	29
2.17 ระบบควบคุมสัดส่วนการไหล	31
2.18 ผังสัญญาณและ transfer function ของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	32
2.19 โครงสร้างการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบ	35
2.20 ผังสัญญาณควบคุมแบบป้อนกลับด้วยคอมพิวเตอร์	36
2.21 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์	37
2.22 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของค่าสัญญาณ	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 แนวโน้มของสัญญาณเมื่อเวลาในการชักรัดอย่างต่างกัน	38
3.1 แผนผังการทำงานของเครื่องมือในระบบการเผาไหม้ก๊าซควบคุมด้วย คอมพิวเตอร์	44
3.2 เตาเผาแบบกราฟท์ดาวนและเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุม	44
3.3 อุปกรณ์แรงดันลมและตำแหน่งในการติดตั้ง	45
3.4 ลักษณะภายในเตาเผา	45
3.5 วิธีการนำผลิตภัณฑ์เข้าเตาเผา	46
3.6 วาล์วควบคุมอัตโนมัติแบบนิวเมติก	46
3.7 ตำแหน่งในการติดตั้งวาล์วควบคุมอัตโนมัติทั้งสองตัว	47
4.1 การแปลงค่าสัญญาณของอุปกรณ์วัดสัญญาณ	53
4.2 ผลของตัวแปรออกของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ P	58
4.3 ผลของตัวแปรเข้าของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ P	59
4.4 สัญญาณควบคุมกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ P	59
4.5 ผลของตัวแปรออกของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PI	60
4.6 ผลของตัวแปรเข้าของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PI	61
4.7 สัญญาณควบคุมกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PI	61
4.8 ผลของตัวแปรออกของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PID	62
4.9 ผลของตัวแปรเข้าของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PID	63
4.10 สัญญาณควบคุมกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PID	63
4.11 ผลของตัวแปรออกของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PID ปรับค่า proportional gain ให้เท่ากับเครื่องควบคุมแบบ PI	64
4.12 ผลของตัวแปรเข้าของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PID ปรับค่า proportional gain ให้เท่ากับเครื่องควบคุมแบบ PI	65
4.13 สัญญาณควบคุมกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PID ปรับค่า proportional gain ให้เท่ากับเครื่องควบคุมแบบ PI	65
4.14 อุณหภูมิภายในเตาเผาจากการควบคุมและอุณหภูมิไอเสียจากการทดลองเผา compound clay ที่ 800 °C	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ผลการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีจากการทดลองเผา compound clay ที่ 800 °C	69
4.16 สมดุลมวลสารที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผา compound clay ที่ 800 °C	69
4.17 สมดุลพลังงานที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผา compound clay ที่ 800 °C	70
4.18 อากาศเกินพอที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผา compound clay ที่ 800 °C	70
4.19 อุณหภูมิภายในเตาเผาจากการควบคุมและอุณหภูมิไอเสียจากการทดลองเผา compound clay ที่ 1250 °C	72
4.20 ผลการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีจากการทดลองเผา compound clay ที่ 1250 °C	72
4.21 สมดุลมวลสารที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผา compound clay ที่ 1250 °C	73
4.22 สมดุลพลังงานที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผา compound clay ที่ 1250 °C	73
4.23 อากาศเกินพอที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผา compound clay ที่ 1250 °C	74
4.24 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของก๊าซแอลพีจีที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผา compound clay ที่ 1250 °C	74
4.25 อุณหภูมิภายในเตาเผาจากการควบคุมและอุณหภูมิไอเสียจากการทดลองเผา ดินผสม dolomite ที่ 1100 °C	77
4.26 ผลการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีจากการทดลองเผาดินผสม dolomite ที่ 1100 °C	77
4.27 สมดุลมวลสารที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผาดินผสม dolomite ที่ 1100 °C	78
4.28 สมดุลพลังงานที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผาดินผสม dolomite ที่ 1100 °C	78
4.29 อากาศเกินพอที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผาดินผสม dolomite ที่ 1100 °C	79
4.30 อุณหภูมิภายในเตาเผา ผลการทดลองจริงจากการเผา compound clay ที่ 800 °C กับผลการทดลองจากระบวนการควบคุมจำลอง	81
4.31 อัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี ผลการควบคุมจริงจากการเผา compound clay ที่ 800 °C กับผลการทดลองจากระบวนการควบคุมจำลอง	81
4.32 ผลของอุณหภูมิภายในเตาเผาจากกระบวนการจำลอง เมื่อเปลี่ยนค่า K_c โดยให้ค่า τ_1 คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PI	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 ผลการปรับอัตราการใช้ของก๊าซแอลพีจีของระบบควบคุมจำลอง เมื่อเปลี่ยนค่า K_c โดยให้ค่า τ_I คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PI	84
4.34 ผลของอุณหภูมิภายในเตาเผาจากกระบวนการจำลอง เมื่อเปลี่ยนค่า τ_I โดยให้ค่า K_c คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PI	85
4.35 ผลการปรับอัตราการใช้ของก๊าซแอลพีจีของระบบควบคุมจำลอง เมื่อเปลี่ยนค่า τ_I โดยให้ค่า K_c คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PI	86
4.36 ผลของอุณหภูมิภายในเตาเผาจากกระบวนการจำลอง เมื่อเปลี่ยนค่า K_c โดยให้ค่า τ_I และ τ_D คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PID	88
4.37 ผลการปรับอัตราการใช้ของก๊าซแอลพีจีของระบบควบคุมจำลอง เมื่อเปลี่ยนค่า K_c โดยให้ค่า τ_I และ τ_D คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PID	89
4.38 ผลของอุณหภูมิภายในเตาเผาจากกระบวนการจำลอง เมื่อเปลี่ยนค่า τ_I โดยให้ค่า K_c และ τ_D คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PID	90
4.39 ผลการปรับอัตราการใช้ของก๊าซแอลพีจีของระบบควบคุมจำลอง เมื่อเปลี่ยนค่า τ_I โดยให้ค่า K_c และ τ_D คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PID	91
4.40 ผลของอุณหภูมิภายในเตาเผาจากกระบวนการจำลอง เมื่อเปลี่ยนค่า τ_D โดยให้ค่า K_c และ τ_I คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PID	92
4.41 ผลการปรับอัตราการใช้ของก๊าซแอลพีจีของระบบควบคุมจำลอง เมื่อเปลี่ยนค่า τ_D โดยให้ค่า K_c และ τ_I คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PID	93
ข1 ข้อมูลตัวแปรออกของกระบวนการ ชุดที่ 1	107
ข2 ข้อมูลตัวแปรเข้าของกระบวนการ ชุดที่ 1	107
ข3 ข้อมูลตัวแปรออกของกระบวนการ ชุดที่ 2	108
ข4 ข้อมูลตัวแปรเข้าของกระบวนการ ชุดที่ 2	108
ข5 ข้อมูลตัวแปรออกของกระบวนการ ชุดที่ 3	109
ข6 ข้อมูลตัวแปรเข้าของกระบวนการ ชุดที่ 3	109
ข7 ข้อมูลตัวแปรออกของกระบวนการ ชุดที่ 4	110
ข8 ข้อมูลตัวแปรเข้าของกระบวนการ ชุดที่ 4	110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข9 ข้อมูลตัวแปรออกของกระบวนการ ชุดที่ 5	111
ข10 ข้อมูลตัวแปรเข้าของกระบวนการ ชุดที่ 5	111
ข11 ข้อมูลตัวแปรออกของกระบวนการ ชุดที่ 6	112
ข12 ข้อมูลตัวแปรเข้าของกระบวนการ ชุดที่ 6	112
ข13 ข้อมูลตัวแปรออกของกระบวนการ ชุดที่ 7	113
ข14 ข้อมูลตัวแปรเข้าของกระบวนการ ชุดที่ 7	113
ข15 ข้อมูลตัวแปรออกของกระบวนการ เมื่อทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 1	114
ข16 ข้อมูลตัวแปรเข้าของกระบวนการ เมื่อทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 1	115
ข17 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการ ข้อมูลทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 1	115
ข18 ข้อมูลตัวแปรออกของกระบวนการ เมื่อทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 2	116
ข19 ข้อมูลตัวแปรเข้าของกระบวนการ เมื่อทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 2	116
ข20 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการ ข้อมูลทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 2	117
ข21 ข้อมูลตัวแปรออกของกระบวนการ เมื่อทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 3	118
ข22 ข้อมูลตัวแปรเข้าของกระบวนการ เมื่อทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 3	118
ข23 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการ ข้อมูลทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 3	119
ข24 ข้อมูลตัวแปรออกของกระบวนการ เมื่อทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 4	120
ข25 ข้อมูลตัวแปรเข้าของกระบวนการ เมื่อทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 4	120
ข26 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการ ข้อมูลทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 4	121
ข27 ข้อมูลตัวแปรออกของกระบวนการ เมื่อทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 5	122
ข28 ข้อมูลตัวแปรเข้าของกระบวนการ เมื่อทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 5	122
ข29 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการ ข้อมูลทดสอบด้วย pulse ชุดที่ 5	123

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค1 ปริมาณก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในฟลูก๊าส จากการเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 1250 °C	124
ค2 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในฟลูก๊าส จากการเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 1250 °C	125
ค3 ปริมาณก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในฟลูก๊าส จากการเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 800 °C	125
ค4 อุณหภูมิภายในเตาเผาและอุณหภูมิไอเสีย จากการเผาดินผสม dolomite ที่อุณหภูมิ 1100 °C	126

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

A	=	พื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนของเตาเผาแบบกราฟท์ดาวน (m ²)
$C_{p,LPG}$	=	ค่าความจุความร้อนของก๊าซแอลพีจี (kJ / g °C)
$C_{p,Air}$	=	ค่าความจุความร้อนของอากาศ (kJ / g °C)
C_{p,H_2O}	=	ค่าความจุความร้อนของไอน้ำ (kJ / g °C)
$C_{p,i}$	=	ค่าความจุความร้อนขององค์ประกอบในฟลูว์ก๊าซ (kJ / g °C)
H_c,LPG	=	ค่าความร้อนของก๊าซแอลพีจี (kJ / g)
H_c,CO	=	ค่าความร้อนของการเผาไหม้ของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (kJ / g)
m_{H_2O}	=	ปริมาณไอน้ำ ในฟลูว์ก๊าซ (g / min.)
n_{LPG}	=	ปริมาณก๊าซแอลพีจีที่ป้อนเข้าเตาเผา (g / min.)
n_{Air}	=	ปริมาณอากาศแห้งที่ป้อนเข้าเตาเผา (g / min.)
n_{H_2O}	=	ปริมาณไอน้ำ ในอากาศ (g / min.)
T_{in}	=	อุณหภูมิของสารตั้งต้นที่ป้อนเข้าเตาเผา (°C)
T_{out}	=	อุณหภูมิของฟลูว์ก๊าซที่ออกจากเตาเผา (°C)
t	=	เวลาในการเผาไหม้ (min.)
U	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (kJ / m ² min. °C)
η_c	=	ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (%)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย