

การควบคุมอุณหภูมิด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ของปฏิกิริยาอีฟอร์มมิ่งแอล พี จี
ด้วยไอน้ำในฟลูอิด์เบด

นายนครินทร์ สุรพงศ์ประภา

ศูนย์วิทยพัทธยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2533

ISBN 974-578-113-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TEMPERATURE CONTROL BY MICROCOMPUTER OF STEAM-LPG REFORMING
IN FLUIDIZED BED



MR. NAKARIN SURAPONGPRAPA

ศูนย์วิทยทรัพยากร

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

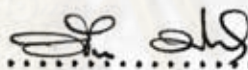
ISBN 974-578-113-4

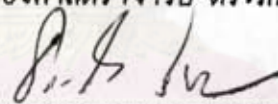
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมอุณหภูมิด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ของปฏิกิริยารีดอกซ์ของโพแทสเซียมไดโครเมต
ด้วยไอโอดีนในฟลูอิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
โดย นายนครินทร์ สุรพงศ์ประภา
ภาควิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานนท์


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภัทรนรรณ ประศาสน์สารกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานนท์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุต)

นครินทร์ สุรพงศ์ประภา : การควบคุมอุณหภูมิด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ของปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่ง
แอล พี จี ด้วยไอน้ำในฟลูอิดไลซ์เบด (TEMPERATURE CONTROL BY MICROCOMPUTER OF
STEAM-LPG REFORMING IN FLUIDIZED BED) อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร.ธราพงษ์ วิฑิตคานต์,
ศ.ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 115 หน้า. ISBN 974-578-113-4

การควบคุมอุณหภูมิในฟลูอิดไลซ์เบดด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ของปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งแอล พี จี ด้วย
ไอน้ำในกระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์ โดยการควบคุมแรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดลวดให้ความร้อนซึ่งพัน
รอบเครื่องปฏิกรณ์ด้วยโปรแกรมควบคุมแบบ P PI และ PID ปรากฏว่าทั้งสามโปรแกรมสามารถควบคุม
อุณหภูมิเบดให้คงที่ได้ เมื่อทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 650 ถึง 800 องศาเซลเซียส โดยมีออฟเซต
น้อยกว่า 1 องศาเซลเซียส และค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยไม่เกิน ± 5 องศาเซลเซียส ภายใต้การกำหนด
ค่าคงที่ของการควบคุมที่เหมาะสม

การควบคุมแบบ P เมื่อทำการทดลองศึกษาอิทธิพลของค่าคงที่ K_c ระหว่าง 8 ถึง 12 โวลต์
ต่อองศาเซลเซียส สามารถควบคุมอุณหภูมิเบดได้อย่างเหมาะสมที่ทุกสภาวะการทดลอง สำหรับค่าคงที่
 V_c นั้น เมื่อทำการทดลองในช่วงระหว่าง 70 ถึง 180 โวลต์ ในแต่ละสภาวะของการทดลอง ค่าที่
เหมาะสมในช่วงดังกล่าวมีเพียงค่าเดียวซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิเบดให้คงที่ได้โดยไม่มีออฟเซตเกิดขึ้น แต่
ที่ V_c ค่าอื่นในช่วงดังกล่าวจะเกิดออฟเซตขึ้นระหว่าง -7.6 ถึง +5 องศาเซลเซียส

สำหรับการควบคุมแบบ PI ภายใต้การกำหนดค่า T_i ระหว่าง 5 และ 15 นาที จะสามารถ
ควบคุมอุณหภูมิเบดให้คงที่ได้โดยมีออฟเซตเกิดขึ้นไม่เกิน -0.1 ถึง +0.3 องศาเซลเซียส

และการควบคุมแบบ PID ภายใต้การกำหนดค่าคงที่ T_d ระหว่าง 0.02 และ 1.0 นาที ก็
จะสามารถควบคุมอุณหภูมิเบดให้คงที่ได้โดยมีออฟเซตเกิดขึ้นไม่เกิน -3.6 ถึง -1.0 องศาเซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2533

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาช่วย

NAKARIN SURAPONGPRAPA : TEMPERATURE CONTROL BY MICROCOMPUTER OF
STEAM-LPG REFORMING IN FLUIDIZED BED. THESIS ADVISORS : THARAPONG
VITIDSANT, Ph.D., PROF.SOMSAK DAMRONGLERD, Ph.D. 115 PP.
ISBN 974-578-113-4

The temperature controll by microcomputer in fluidized bed of LPG-
steam reforming for synthesis gas production could be taken by controlling
electromotive force of heating coil around the reactor through P, PI and
PID programs. For all controllers, the temperature in the bed was constant
during all experiment ranging from 650 to 800 °C with offset value 1 °C and
average deviation within ± 5 °C under a suitable control.

In the P program, the suitable bed temperature could be used in every
values of K_c in the range of 8 to 12 °C. But for V_g , the experimentations
executed between 70 to 180 V revealed the only one suitable V_g that could
control the bed temperature without causing any offset. Other values of V_g
in that range could make offset value varying from -7.6 to 5.0 °C.

In the PI program, under T_i , between 5 to 15 minutes, the constant
temperature could be controlled within offset value between -0.1 to +0.3 °C.

Lastly, in the PID controller, under T_d , between 0.02 to 0.1 minutes,
the constant temperature could be controlled within offset value between -3.0
to -1.0 °C.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2533

ลายมือชื่อผู้พิมพ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร. ธารพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำตักเตือนและช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ด้วยดี มาตลอด และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุต ที่ให้คำปรึกษาแนะแนวเป็นอย่างดี ขอขอบคุณ คุณสังข์ ชมชื่น ที่ช่วยสร้างและซ่อมเครื่องมือในการวิจัยนี้จนสามารถ ดำเนินการวิจัยได้ดีตลอดมา ตลอดจนข้าราชการภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่กรุณาให้ความ สดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ และขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค และผู้อยู่เบื้องหลังทุกท่านที่เป็นกำลังใจสนับสนุน ช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

เนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอ ขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนการทำวิจัยนี้ มาโดยตลอด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตารางประกอบ	ฉ
สารบัญรูปประกอบ	ฉ
สัญลักษณ์	ค
บทที่	
1 บทนำ	1
2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยในอดีต	3
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี	3
2.2 ปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยไอน้ำ	6
2.2.1 ปฏิกิริยารีดอกซ์ของแอลกอฮอล์ด้วยไอน้ำ	7
2.2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของไฮโดรคาร์บอนด้วยไอน้ำ	8
2.2.3 จลนศาสตร์การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของไฮโดรคาร์บอนด้วยไอน้ำ	10
2.2.4 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของแอลกอฮอล์ด้วยไอน้ำ	11
2.3 ระบบควบคุมอัตโนมัติ	12
2.3.1 ส่วนประกอบของระบบควบคุม	13
2.3.2 รูปแบบของระบบควบคุม	14
2.3.3 ตัวควบคุม	16
2.4 ฟลูอิดเซชัน	23
2.4.1 การประยุกต์เทคนิคฟลูอิดเซชันในกระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์ของปฏิกิริยารีดอกซ์ของไฮโดรคาร์บอนด้วยไอน้ำ	23
2.5 งานวิจัยในอดีต	24

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	25
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	25
3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตก๊าซสังเคราะห์แบบฟลูอิดไลซ์เบด	26
3.1.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิ	29
3.1.3 เครื่องผลิตไอน้ำ	31
3.1.4 เครื่องวัดและควบคุมอัตราการป้อนก๊าซเข้าเครื่องปฏิกรณ์	33
3.1.5 เครื่องแยกตัวเร่งปฏิกิริยาและ ไอน้ำออกจากก๊าซผลิตภัณฑ์ ที่ได้	33
3.1.6 ที่เก็บตัวอย่างก๊าซ	34
3.1.7 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ	34
3.2 วิธีการทดลอง	37
3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี Ni/Al_2O_3	37
3.2.2 ทำการทดลองหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน ของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี Ni/Al_2O_3	38
3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง	38
4 ผลการทดลอง	40
4.1 ผลการทดลองควบคุมอุณหภูมิเบดโดยใช้โปรแกรมควบคุมแบบ P	40
4.1.1 อิทธิพลของ K_c ที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเบด	41
4.1.2 อิทธิพลของ V_{st} ที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเบดที่ อุณหภูมิต่าง ๆ	41
4.1.3 อิทธิพลของส่วนประกอบของสารตั้งต้นที่มีผลต่อการควบคุม อุณหภูมิเบด	49
4.1.4 อิทธิพลของอัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้นที่มีผลต่อการ ควบคุมอุณหภูมิเบด	49
4.2 ผลการทดลองควบคุมอุณหภูมิเบดโดยใช้โปรแกรมควบคุมแบบ PI	52
4.2.1 อิทธิพลของ T_c ที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเบด	53

สารบัญ - (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	4.2.2 การใช้โปรแกรมควบคุมแบบ PI เพื่อแก้ออฟเซตของ อุณหภูมิเฉลี่ย เนื่องมาจากการใช้โปรแกรมควบคุมแบบ P ในกรณีที่ v_s ไม่เหมาะสม	56
	4.2.3 อิทธิพลของอัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้นที่มีผลต่อการ ควบคุมอุณหภูมิเบด	58
4.3	ผลการทดลองควบคุมอุณหภูมิเบดโดยใช้โปรแกรมควบคุมแบบ PID	60
	4.3.1 อิทธิพลของ τ_D ที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเบด	61
	4.3.2 การใช้โปรแกรมควบคุมแบบ PID เพื่อแก้ออฟเซตของ อุณหภูมิเฉลี่ยเนื่องมาจากการใช้โปรแกรมควบคุมแบบ P ในกรณีที่ v_s ไม่เหมาะสม เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ กับการใช้โปรแกรมควบคุมแบบ PI	63
4.4	อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาไรฟอร์มมิ่งแอล ฟี จี ด้วยไอน้ำ	65
4.5	อิทธิพลของอัตราส่วน H_2O/LPG ที่มีผลต่อปฏิกิริยาไรฟอร์มมิ่ง แอล ฟี จี ด้วยไอน้ำ	67
5	วิจารณ์ผลการทดลอง	69
	5.1 การควบคุมด้วยโปรแกรมควบคุมแบบ P	70
	5.1.1 ค่าคงที่ K_c ที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเบด	70
	5.1.2 ค่าคงที่ v_s ที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเบดที่อุณหภูมิ ต่าง ๆ	72
	5.1.3 อัตราส่วนของไอน้ำต่อแอล ฟี จี ที่มีผลต่อการควบคุม อุณหภูมิเบด	75
	5.1.4 อัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้นที่มีผลต่อการควบคุม อุณหภูมิเบด	76
5.2	การควบคุมด้วยโปรแกรมควบคุมแบบ PI	77
	5.2.1 ค่าคงที่ τ_i ที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเบด	78
5.3	การควบคุมด้วยโปรแกรมควบคุมแบบ PID	79
	5.3.1 ค่าคงที่ τ_D ที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเบด	80

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการควบคุมด้วยโปรแกรมควบคุมแบบ P PI และ PID	81
5.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาฟอรัมมิ่งแอล พี จี ด้วยไอน้ำ	82
5.6 ผลของอัตราส่วน H_2O/LPG ที่มีต่อปฏิกิริยาฟอรัมมิ่งแอล พี จี ด้วยไอน้ำ	83
5.7 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาฟอรัมมิ่งแอล พี จี ด้วยไอน้ำ	84
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	88
เอกสารอ้างอิง	91
ภาคผนวก	93
ประวัติผู้เขียน	115

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
2.1 รูปแบบสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของมีเทนกับไอน้ำ	10
จ.1 แสดงข้อมูลการควบคุมอุณหภูมิด้วยโปรแกรมควบคุมแบบ P	101
จ.2 แสดงข้อมูลอิทธิพลของ H_2O/LPG ที่มีผลต่อการควบคุมแบบ P	103
จ.3 แสดงข้อมูลอิทธิพลของ U/U_{ref} ที่มีผลต่อการควบคุมแบบ P	103
จ.4 แสดงข้อมูลการควบคุมอุณหภูมิด้วยโปรแกรมควบคุมแบบ PI	104
จ.5 แสดงข้อมูลอิทธิพลของ U/U_{ref} ที่มีผลต่อการควบคุมแบบ PI	104
จ.6 แสดงข้อมูลการควบคุมอุณหภูมิด้วยโปรแกรมควบคุมแบบ PID	105
จ.7 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของ H_2O/LPG ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น	106
จ.8 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผล ต่อผลิตภัณฑ์	107
ฉ.1 ข้อมูลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ปลายเทอร์โมคัปเปิล กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิล	109
ช.1 สภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ	111

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
2.1	การเปลี่ยนแปลงพลังงานในการเกิดปฏิกิริยาบตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี	4
2.2	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาบตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี	5
2.3	ขั้นตอนการแตกตัวและการทำปฏิกิริยาของมีเทนกับไอน้ำ	9
2.4	โครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	15
2.5	โครงสร้างของระบบควบคุมแบบอินเฟอเรนเชียล	15
2.6	โครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟีดฟอร์เวิร์ด	16
2.7	ผลตอบสนองของการควบคุมแบบ P PI และ PID	21
3.1	ขั้นตอนการทำงานและการควบคุมในการผลิตก๊าซสังเคราะห์	26
3.2	กระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์ซึ่งควบคุมอุณหภูมิด้วยไมโครคอมพิวเตอร์	27
3.3	แสดงรายละเอียดของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตก๊าซสังเคราะห์แบบฟลูอิดไคซ์เบด	28
3.4	แสดง block diagram การควบคุมอุณหภูมิในเบดที่หน่วยผลิตก๊าซสังเคราะห์	29
3.5	ชุดทดลองผลิตก๊าซสังเคราะห์	30
3.6	ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์	30
3.7	เครื่องผลิตไอน้ำ และการป้อนน้ำกลับด้วยปั๊ม	32
3.8	เครื่องควบแน่นไอน้ำ ซึ่งออกแบบเป็นท่อสองชั้นในแนวตั้ง	34
3.9	บริเวณที่ทำการเก็บก๊าซตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์	35
3.10	เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ รุ่น GC 121 MB ที่ใช้วิเคราะห์ก๊าซตัวอย่าง	35
3.11	เครื่องอินทิเกรเตอร์แสดงผลการวิเคราะห์ก๊าซตัวอย่าง	36
3.12	ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al ₂ O ₃ ก่อนและหลังการใช้งาน	36
4.1	อิทธิพลของ K _c ที่มีผลต่อการตอบสนองของอุณหภูมิเบดที่ควบคุมได้จากการควบคุมแบบ P	42
4.2	อิทธิพลของ K _c ที่มีผลต่อออฟเซทของอุณหภูมิเบดที่ควบคุมได้ โดยจากการควบคุมแบบ P	43
4.3	อิทธิพลของ V _u ที่มีผลต่อการตอบสนองของอุณหภูมิเบดที่ควบคุมได้จากการควบคุมแบบ P	44

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.4	อิทธิพลของ $V_{\text{ธ}}$ ที่มีผลต่อออฟเซทของอุณหภูมิที่ควบคุมจากการควบคุมแบบ P	48
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $V_{\text{ธ}}$ ที่เหมาะสม กับอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม สำหรับการควบคุมแบบ P	48
4.6	อิทธิพลของส่วนประกอบของสารตั้งต้น $\text{H}_2\text{O}/\text{LPG}$ ที่มีผลต่อการตอบสนองของอุณหภูมิเบดที่ควบคุมได้จากการควบคุมแบบ P	50
4.7	อิทธิพลของอัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้น U/U_{mr} ที่มีผลต่อการตอบสนองของอุณหภูมิเบดที่ควบคุมได้จากการควบคุมแบบ P	51
4.8	อิทธิพลของ τ_c ที่มีผลต่อการตอบสนองของอุณหภูมิเบดที่ควบคุมได้จากการควบคุมแบบ PI	54
4.9	อิทธิพลของ τ_c ที่มีผลต่อค่าเบี่ยงเบนและออฟเซทของอุณหภูมิเบดที่ควบคุมได้ โดยการควบคุมแบบ PI	55
4.10	การลดค่าออฟเซทของการควบคุมแบบ P ด้วยการควบคุมแบบ PI ที่อุณหภูมิที่ต้องการ 700 องศาเซลเซียส	57
4.11	อิทธิพลของอัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้น U/U_{mr} ที่มีผลต่อการตอบสนองของอุณหภูมิเบดที่ควบคุมได้จากการควบคุมแบบ PI	59
4.12	อิทธิพลของ $\tau_{\text{ธ}}$ ที่มีผลต่อการตอบสนองของอุณหภูมิเบดที่ควบคุมได้จากการควบคุมแบบ PID	62
4.13	การลดค่าออฟเซทของการควบคุมแบบ P ด้วยการควบคุมแบบ PID ที่อุณหภูมิที่ต้องการ 700 องศาเซลเซียส	64
4.14	อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งแอล พี จี ด้วยไอน้ำ	66
4.15	อิทธิพลของส่วนประกอบของสารตั้งต้น $\text{H}_2\text{O}/\text{LPG}$ ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งแอล พี จี ด้วยไอน้ำ	68
5.1	แสดงปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองเทียบกับที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ ที่อุณหภูมิ 650 ถึง 800 องศาเซลเซียส	86

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.2	แสดงปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองเทียบกับที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ เมื่อ $H_2O/LPG = 1.5$ ถึง 6	87
ก.1	แสดงการหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันของ Ni/Al_2O_3 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	94
ก.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันกับอุณหภูมิ	95
ง.1	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับขีดของโรตารีเตอร์ตัวที่ 1 (R_1) กับอัตราการไหลของก๊าซ (Q_1)	99
ง.2	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับขีดของโรตารีเตอร์ตัวที่ 2 (R_2) กับอัตราการไหลของก๊าซ (Q_2)	100
ฉ.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ปลายเทอร์โมคัปเปิลกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิล	108
ช.1	แผนภาพของเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ	112
ช.2	แสดงพีคของก๊าซแต่ละชนิดที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ	113

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

- a แอคติวิตีของสาร A
 a_{CO_2} แอคติวิตีของ CO_2
 a_{CO} แอคติวิตีของ CO
 a_{H_2} แอคติวิตีของ H_2
 $a_{C_2H_6}$ แอคติวิตีของ C_2H_6
 a_{H_2O} แอคติวิตีของ ไอน้ำ
 A พื้นที่หน้าตัดของเบด (ตารางเซนติเมตร)
 $C(t)$ สัญญาณที่ส่งออกจากเครื่องควบคุมที่เวลา t ใด ๆ (โวลต์)
 C_s สัญญาณที่ส่งออกจากเครื่องควบคุมที่สภาวะคงที่ (โวลต์)
 dP ความดันลดที่เบด (เซนติเมตรน้ำ)
 $e(t)$ ค่าผิดพลาดที่ควบคุมได้ที่เวลา t ใด ๆ (องศาเซลเซียส)
 E_s ค่าพลังงานกระตุ้น (แคลอรี/ปอนด์โมล)
 G ค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (จูล/กรัมโมล)
 H_T เอนทาลปีของสารที่อุณหภูมิ T เคลวิน (จูล/กรัมโมล)
 k_o ค่าคงที่อาร์เรเนียส (โมล/กรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี/บรรยากาศ/ชั่วโมง)
 K_1 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา $2H_2 + O_2 \rightleftharpoons 2H_2O$
 K_2 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา $CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$
 K_c ค่าคงที่ของการควบคุม proportional gain (โวลต์/องศาเซลเซียส)
 P ปริมาณไอน้ำเริ่มต้น (โมล)
 P_{CH_4} ค่าความดันย่อยของ CH_4 (บรรยากาศ)
 Q_1 อัตราการไหลของอากาศที่สภาวะมาตรฐานที่ผ่านโรตารีเตอร์ตัวที่ 1 (ลิตร/นาที)
 Q_2 อัตราการไหลของอากาศที่สภาวะมาตรฐานที่ผ่านโรตารีเตอร์ตัวที่ 2 (ลิตร/นาที)
 r_{CH_4} อัตราการเกิดปฏิกิริยา CH_4 (โมล/กรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี/ชั่วโมง)
 R ปริมาณที่ C_2H_6 เข้าทำปฏิกิริยากับไอน้ำ (โมล)
 R_1 ระดับของโรตารีเตอร์ของแอล.พี.จี. ตัวที่ 1
 R_2 ระดับของโรตารีเตอร์ของ N_2 ตัวที่ 2
 S ปริมาณที่ CO ที่ทำปฏิกิริยากับไอน้ำ (โมล)
 T อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

- ๘
- $T(t)$ อุณหภูมิที่เวลา t ใด ๆ (องศาเซลเซียส)
 T_0 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ควบคุมได้ (องศาเซลเซียส)
 T_s อุณหภูมิของการควบคุมที่สภาวะคงที่ (องศาเซลเซียส)
 U ความเร็วในการฟลูอิดซ์ (เซนติเมตร/นาทีก)
 U_{mf} ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์ (เซนติเมตร/นาทีก)
 V แรงเคลื่อนไฟฟ้า (มิลลิโวลต์)
 $V(t)$ แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากขดลวดให้ความร้อนที่เวลา t ใด ๆ (โวลต์)
 V สัมประสิทธิ์ฟูกาสิตีของสาร A
 V_{CO_2} สัมประสิทธิ์ฟูกาสิตีของ CO_2
 V_{CO} สัมประสิทธิ์ฟูกาสิตีของ CO
 V_H สัมประสิทธิ์ฟูกาสิตีของ H_2
 V_P สัมประสิทธิ์ฟูกาสิตีของ C_2H_6
 V_S สัมประสิทธิ์ฟูกาสิตีของไอน้ำ
 V_s แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากขดลวดให้ความร้อนที่สภาวะคงที่ (โวลต์)
 X สัดส่วนโมลของสาร A
 X_{CO_2} สัดส่วนโมลของสาร CO_2
 X_{CO} สัดส่วนโมลของสาร CO
 X_H สัดส่วนโมลของสาร H_2
 X_P สัดส่วนโมลของสาร C_2H_6
 X_S สัดส่วนโมลของไอน้ำ
 Z พื้นผิวของตัวทำปฏิกิริยาที่มีความสามารถดูดซับสารตั้งต้นเอาไว้
 π ความดันสัมบูรณ์ (บรรยากาศ)
 τ_0 ค่าคงที่เวลาเดริวาทีฟ (นาทีก)
 τ_1 ค่าคงที่เวลาอินทิกรัล (นาทีก)