

การแสดงเอกลักษณ์และการจำลองแบบการควบคุมของดีเฟลกมาเตอร์

นาย สุวัฒน์ชัย กลิ่นส่ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2538

ISBN 974-632-907-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**IDENTIFICATION AND CONTROL SIMULATION OF
DEPHLEGMATOR**

Mr. SUVATCHAI KLINSONG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

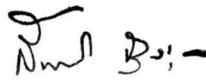
Chulalongkorn University

1995

ISBN 974-632-907-3

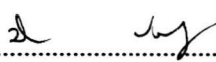
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การแสดงเอกลักษณ์และการจำลองแบบการควบคุมของดีเฟลกมาเตอร์
โดย นาย สุวัฒน์ชัย กลิ่นส่ง
ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต




.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ อุงสุวรรณ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(คุณอรสา อนงกัจรรยา)

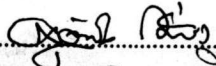



.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

สุวัฒน์ชัย กลิ่นสง : การแสดงเอกลักษณ์และการจำลองแบบการควบคุมของดีเฟลกมาเตอร์ (IDENTIFICATION AND CONTROL SIMULATION OF DEPHLEGMATOR) อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.มนตรี วงศ์ศรี, 164 หน้า. ISBN 974-632-907-3

งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบระบบการควบคุมอัตโนมัติโดยการระบุแบบจำลองของกระบวนการ วิธีการที่นำมาใช้ในการระบุแบบจำลองของกระบวนการคือ วิธีเส้นโค้งปฏิกิริยาของกระบวนการและวิธีทางสถิติ กระบวนการที่ศึกษาและทำการระบุแบบจำลองของกระบวนการคือ ดีเฟลกมาเตอร์ ตัวแปรปรับที่เกี่ยวข้องคือ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นขาเข้าดีเฟลกมาเตอร์ ตัวแปรที่ทำการวัดคือ อุณหภูมิของไอสารทั้งขาออกและขาเข้าดีเฟลกมาเตอร์ แบบจำลองที่ใช้จะเป็นกระบวนการอันดับหนึ่งและอันดับสองซึ่งเขียนอยู่ในรูป ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของไอสารขาออกกับอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นขาเข้าดีเฟลกมาเตอร์ และทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของไหลระหว่างอุณหภูมิขาเข้ากับอุณหภูมิขาออกของดีเฟลกมาเตอร์ ในส่วนของกระบวนการอันดับสองจะใช้ทั้งวิธีของ สมิต และ แฮริออท เมื่อได้แบบจำลองของกระบวนการแล้วจึงนำมาติดตั้งตัวควบคุม ตัวควบคุมที่ใช้จะเป็นของ พี าย ตี วิธีการจูนเครื่องควบคุมใช้วิธีของ โคะเฮน-คูน, ซิเกลอร์-นิโคลส์มาตรฐาน และชนิดแก้ไขปรับปรุง

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2538

ลายมือชื่อนิสิต 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 

C318029 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: PROCESS CONTROL / SIMULATION / PROCESS IDENTIFICATION / DEPHLEGMATOR

SUVATCHAI KLINSONG : IDENTIFICATION AND CONTROL SIMULATION OF DEPHLEGMATOR, THESIS

ADVISOR : DR. MONTREE WONGSRI, 164 pp. ISBN 974-632-907-3

In this study, the design of the control system of the dephlegmator is investigated by identifying the model of the process. The identification methods used are the process reaction curve and the statistical methods. The manipulated variable is the flow rate of cooling water. The measured variables are the temperature of the vapor in and the temperature of the vapor out. The first and second order transfer functions of the process and the load are obtained. The second order transfer functions are obtained using Smith and Harriot methods. The transfer function models, then, are used to find the controller parameters by the Cohen-Coon and the original and modified Ziegler and Nichols methods.

ภาควิชา..... วิศวกรรมเคมี

สาขาวิชา..... วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา..... 2538

ลายมือชื่อนิสิต..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้โอกาส, คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด ขอขอบคุณบริษัทเฮงเค็ลไทย จำกัด ที่ผู้วิจัยได้ทำงานอยู่ในปัจจุบัน ที่ได้อนุญาตให้ผู้วิจัยเลิกงานก่อนเวลาในบางวันที่มีการบรรยายหรือมีกิจกรรมที่มหาวิทยาลัย อีกทั้งยังให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์จึงขอขอบคุณบริษัทเฮงเค็ลไทย จำกัด มา ณ ที่นี้ด้วย

อนึ่ง การจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์นี้จะบรรลุความสำเร็จไม่ได้ ถ้าไม่ได้รับความสนับสนุนจากอาจารย์มนตรี วงศ์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์, เพื่อนๆ และพี่สาว ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เช่นกัน และขอขอบคุณศศกร อมตวงษ์ ที่ช่วยเป็นกำลังใจอันสำคัญ และช่วยในการอ่านปรัฟต้นฉบับของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่คอยถาม-ไต่และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการท	3
1.4 ขั้นตอนของงานวิทยานิพนธ์.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	5
2. ทฤษฎี.....	7
2.1 แนวคิดกระบวนการและองค์ประกอบหลักในการควบคุม	7

2.1.1	กระบวนการ (Process).....	7
2.1.2	อุปกรณ์การวัด (Measuring Device).....	9
2.1.3	ตัวควบคุม (Controller)	9
2.1.4	อุปกรณ์ปรับกระบวนการ (Final Control Element).....	11
2.2	ชนิดของการควบคุมอัตโนมัติ	12
2.2.1	การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control).....	12
2.2.2	การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feedforward Control)	12
2.3	ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี และการนำไปใช้งาน.....	13
2.4	หลักการพื้นฐานของ พี อาย ดี.....	14
2.4.1	ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller).....	15
2.4.2	ตัวควบคุมแบบอินทิเกรต (Integral controller).....	18
2.4.3	ตัวควบคุมแบบดิริเวทีฟ (Derivative).....	19
2.5	ลักษณะสมบัติของกระบวนการ (Process Characteristic).....	20
2.5.1	ความช้าในการตอบสนอง (Process Time Lag)	21
2.5.2	เดดไทม์ (Deadtime).....	22
2.5.3	ความจุเล็ก (Capacity Lag).....	23
2.6	แบบต่าง ๆ ของการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control).....	24
2.6.1	ตัวควบคุมแบบ เปิด-ปิด (On- Off Controller).....	25
2.6.2	การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)	26
2.6.3	การควบคุมแบบสัดส่วน อินทิเกรต (PI - Control).....	30

2.6.4 การควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล ดีไรเวทีฟ (PID)	33
2.6.5 การควบคุมแบบสัดส่วน ดีไรเวทีฟ (PD - Control)	35
2.7 ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี และส่วนประกอบในการใช้งาน	36
2.7.1 ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี ชนิดต่าง	36
2.7.2 ส่วนประกอบในการใช้งานของตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี	37
2.8 การนำตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี ไปใช้งาน (PID Controller Utilization)	39
2.8.1 การกำหนดแบบการควบคุม (Control Mode Selection).....	39
2.9 ลักษณะและพฤติกรรมของกระบวนการ อันดับหนึ่ง และอันดับสอง ต่อการ เปลี่ยนแปลงสายป้อน	42
2.9.1 เราสามารถแบ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ ตัวปรับค่า (manipulated variable) ได้ 6 ชนิดที่สำคัญ	43
2.10 วิธีหาแบบจำลองของกระบวนการโดยการพิตกราฟหลังจากการทดสอบสเต็ป	46
2.10.1 แบบจำลองของกระบวนการอันดับหนึ่ง	46
2.10.2 แบบจำลองของกระบวนการอันดับสอง	47
2.11 การจูนตัวควบคุม (Controller Tuning)	49
2.11.1 ขั้นที่ 1 การจูนตัวควบคุมแบบลองผิดลองถูก (Trial and Error Tuning)	50
2.11.2 ขั้นที่ 2 วิธีการควบคุมแบบการไซเคิลแบบต่อเนื่อง (Continuous Cycling Method)	53
3. โปรแกรมช่วยวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมแมทแลบ.....	54

3.1	คุณลักษณะของโปรแกรมเมทแลบ.....	55
3.1.1	การคำนวณเกี่ยวกับเมทริกซ์	56
3.1.2	การคำนวณโพลีโนเมียล	56
3.1.3	การจัดการเกี่ยวกับเวกเตอร์.....	56
3.1.4	การจัดการเกี่ยวกับการแสดงผลกราฟ.....	56
3.1.5	การจัดการต่างๆ ของกระบวนการสัญญาณ	57
3.1.6	การวิเคราะห์ไม่เชิงเส้น	57
3.1.7	การประเมินและวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	57
3.2	โปรแกรมซิมูลิงค์ (Simulink).....	57
3.2.1	การจำลองแบบแบบจำลองหรือออกแบบแบบจำลอง.....	58
3.2.2	การวิเคราะห์แบบจำลอง.....	63
3.3	เครื่องมือในการวิเคราะห์อื่นๆ.....	64
3.4	ตัวอย่างการใช้งาน.....	65
3.5	การจับสไลด์ไดอะแกรมที่มีอันดับที่มากกว่าหนึ่งโดยวิธีการเปลี่ยนแปลงแบบสตีฟ (Fitting Higher Order Model using Step Change)	69
4.	กระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้อง และการระบุแบบจำลองกระบวนการ.....	73
4.1	ดีเฟลทมาเตอร์	75
4.2	การระบุแบบจำลองการทดลอง (Empirical Model Identification).....	77
4.2.1	วิธีการสร้างแบบจำลองจากการทดลอง.....	80
4.2.2	การทดลองของกระบวนการ.....	81

4.2.3	การหาโครงสร้างของแบบจำลอง.....	82
4.2.4	การประเมินค่าพารามิเตอร์	82
4.2.5	การตรวจสอบ (Verification).....	83
4.3	วิธีการที่ใช้ในการระบุกระบวนการ	84
4.3.1	การระบุกระบวนการโดยใช้วิธีเส้นโค้งปฏิบัติของกระบวนการ.....	85
4.3.2	การระบุแบบจำลองโดยวิธีทางสถิติ	85
5.	การเก็บข้อมูล, การทดลองและการระบุกระบวนการ	88
5.1	วิธีการเก็บข้อมูล.....	88
5.1.1	อุปกรณ์ที่ใช้	88
5.1.2	ขั้นตอนการทำการเก็บข้อมูลและการทดลอง.....	90
5.1.3	ตัวอย่างการคำนวณ	93
5.2	ข้อมูลและผลการทดลอง.....	104
5.2.1	ข้อมูลจากการหาแบบจำลองโดยเส้นโค้งปฏิบัติของกระบวนการ	104
5.2.2	ผลและข้อมูลการหาแบบจำลองโดยวิธีทางสถิติ.....	110
5.3	การจำลองและการเลียนแบบกระบวนการด้วยแมทแล็บ	115
5.3.1	กระบวนการอันดับหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบโพลเดเปลี่ยน.....	115
5.3.2	กระบวนการอันดับหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยน	125
5.3.3	กระบวนการอันดับสองที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบโพลเดเปลี่ยน.....	135
5.3.4	กระบวนการอันดับสองที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยน.	144

6. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	149
6.1 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	149
6.2 ปัญหาและความยากลำบากในการทำการทดลอง.....	153
6.3 สรุปผลการทดลอง	155
6.4 ข้อเสนอแนะ.....	156
รายการอ้างอิง.....	158
ภาคผนวก.....	160
ประวัติผู้เขียน.....	164

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	การกำหนดแบบการควบคุมที่เหมาะสมอย่างหยาบๆ.....	41
ตารางที่ 2.2	การกำหนดแบบการควบคุมของระดับ อัตราไหล แรงดัน และอุณหภูมิ.....	42
ตารางที่ 2.3	แสดงการตั้งค่าของตัวควบคุมแบบไซเคิลแบบต่อเนื่องของซีเกลอร์ และนิโคลัส	53
ตารางที่ 5.1	แสดงข้อมูลและผลการคำนวณการระบุแบบจำลองการกระบวนการ โดยวิธีทางสถิติ	96
ตารางที่ 5.2	แสดงค่าต่างที่ได้จากการคำนวณในสมการ 4.5.....	102
ตารางที่ 5.3	แสดงข้อมูลของอัตราการไหลของน้ำเย็นก่อนมีการเปลี่ยนแปลงแบบสตีฟ ...	104
ตารางที่ 5.4	แสดงข้อมูลของอัตราการไหลของน้ำเย็นหลังจากมีการเปลี่ยนแปลง แบบสตีฟ.....	104
ตารางที่ 5.5	แสดงข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขาออกของดีเฟลกมาเตอร์ต่อ เวลาหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงแบบสตีฟซึ่งได้จากการหาโดยวิธีเส้นโค้ง ปฏิกิริยาของกระบวนการ.....	104
ตารางที่ 5.6	แสดงข้อมูล y/KM ต่อเวลาซึ่งคำนวณมาจากตารางที่ 5.5	106
ตารางที่ 5.7	แสดงข้อมูลที่อ่านได้จากการเขียนกราฟในตารางที่ 5.6	107

ตารางที่ 5.8 แสดงข้อมูลที่อ่านและคำนวณได้จากตารางที่ 5.6 สำหรับกระบวนการ อันดับหนึ่ง.....	108
ตารางที่ 5.9 แสดงข้อมูลที่อ่านและคำนวณได้จากตารางที่ 5.6 สำหรับกระบวนการ อันดับสองโดยวิธีการของเฮอริอท	108
ตารางที่ 5.10 แสดงข้อมูลที่อ่านและคำนวณได้จากตารางที่ 5.6 สำหรับกระบวนการ อันดับสองโดยวิธีการของสมิธ	109
ตารางที่ 5.11 แสดงข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขาออกและอุณหภูมิขาเข้าของ ดีเฟลกมาเตอร์ต่อเวลาหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าซึ่งได้จากการ หาโดยวิธีทางสถิติ	110
ตารางที่ 5.12 แสดงผลการคำนวณ Y' และ X' โดยใช้ข้อมูลจากตาราง 5.11.....	112
ตารางที่ 5.13 แสดงข้อมูลต่างๆ ที่อ่านและคำนวณได้จากตารางที่ 5.11	114
ตารางที่ 5.14 แสดงค่าการควบคุมของตัวควบคุมต่างๆ ที่คำนวณไว้แล้ว.....	116
ตารางที่ 5.15 แสดงค่าการควบคุมของตัวควบคุมต่างๆ ที่คำนวณไว้แล้ว.....	126
ตารางที่ 5.16 แสดงค่าการควบคุมของตัวควบคุมต่างๆ ที่คำนวณไว้แล้ว (เฮอริอท)	136
ตารางที่ 5.17 แสดงค่าการควบคุมของตัวควบคุมต่างๆ ที่คำนวณไว้แล้ว (สมิธ).....	138
ตารางที่ 6.1 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบ เภมพ์ในการวัดที่ใช้ตัดสินคุณภาพการควบคุม จากการทดลองของแบบจำลองกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลง แบบโพลดเปลี่ยน.....	151

ตารางที่ 6.2 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบ เกณฑ์ในการวัดที่ใช้ตัดสินคุณภาพการควบคุม จากการทดลองของแบบจำลองกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลง แบบเซตพอยท์เปลี่ยน.....	152
ตารางที่ 6.3 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบ เกณฑ์ในการวัดที่ใช้ตัดสินคุณภาพการควบคุม จากการทดลองของแบบจำลองกระบวนการอันดับสองที่มีการเปลี่ยนแปลง แบบ โพลดเปลี่ยน.....	152
ตารางที่ 6.4 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบ เกณฑ์ในการวัดที่ใช้ตัดสินคุณภาพการควบคุม จากการทดลองของแบบจำลองกระบวนการอันดับสองที่มีการเปลี่ยนแปลง แบบเซตพอยท์เปลี่ยน.....	153

สารบัญรูปรภาพ

รูปที่ 2.1	บล็อกไดอะแกรมแสดงตัวแปรขาเข้าและขาออกของกระบวนการ	8
รูปที่ 2.2	แบบจำลองแสดงสถานะทางฟิสิกส์ของกระบวนการ	8
รูปที่ 2.3 ก.	บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมแบบป้อนกลับ	9
รูปที่ 2.3 ข.	บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมแบบป้อนกลับ	9
รูปที่ 2.4	แสดงบล็อกไดอะแกรมขั้นตอนของการควบคุม	10
รูปที่ 2.5	แสดงบล็อกไดอะแกรมระบบชุดควบคุมแบบป้อนกลับ	11
รูปที่ 2.6	แสดงบล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมการไหล	14
รูปที่ 2.7	แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบป้อนกลับ	15
รูปที่ 2.8	แสดงบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบสัดส่วนในอุดมคติ	17
รูปที่ 2.9	แสดงบล็อกไดอะแกรมของพฤติกรรมที่แท้จริงของตัวควบคุมแบบสัดส่วน	17
รูปที่ 2.10	แสดงบล็อกไดอะแกรมของการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี าย ในขณะที่ทำการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ป	18
รูปที่ 2.11	แสดงบล็อกไดอะแกรมชนิดของการตอบสนองของกระบวนการควบคุมแบบ ป้อนกลับ	19
รูปที่ 2.12	แสดงลักษณะสมบัติของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน	21

รูปที่ 2.13	กระบวนการที่แสดงความล่าช้าในการตอบสนองเป็นแบบเดคไทม์อย่างเดี่ยว	22
รูปที่ 2.14	แสดงกระบวนการที่ความล่าช้าในการตอบสนองเป็นแบบ ความจุเล็ก	23
รูปที่ 2.15	แสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณขาออก กับ สัญญาณขาเข้าของตัวควบคุม แบบเปิด-ปิด (กรณี ลูฟเปิด)	25
รูปที่ 2.16	แสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณขาออก กับ สัญญาณขาเข้าของตัวควบคุม แบบสัดส่วน(กรณี ลูฟเปิด)	27
รูปที่ 2.17	ผลของการปรับค่า PB กรณีใช้การควบคุมแบบสัดส่วน	28
รูปที่ 2.18	แสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณขาออกกับสัญญาณขาเข้าของตัวควบคุมแบบ พี อย ในขณะลูฟเปิด	30
รูปที่ 2.19	แสดงผลของการควบคุมที่ค่า τ_I ต่างๆ กรณี PB มีค่าคงที่ ที่ $(\tau_{I1}, \tau_{I2}, \tau_{I3})$	31
รูปที่ 2.20	แสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณขาออกกับสัญญาณขาเข้า เมื่อไบแอสเปลี่ยนไป	32
รูปที่ 2.21	แสดงผลของการกระทำการแบบดีไรเวทีฟในตัวควบคุมแบบ พี ดี ขณะเปิดลูฟ	34
รูปที่ 2.22	แสดงวิธีการเบื้องต้นในการหาค่าความจุเล็ก และเดคไทม์	40
รูปที่ 2.23	แสดงวิธีการหาค่าไทม์ดีเลย์ และ ค่าคงที่เวลาจากกราฟการตอบสนอง	47
รูปที่ 2.24	วิธีแฮริออต แสดงลักษณะส่วนหนึ่งของการตอบสนองกระบวนการ อันดับสองชนิดแคมป์เกิน ที่ $v/((\tau_1 + \tau_2) = 0.5$	48
รูปที่ 2.25	วิธีของสมิท แสดงความสัมพันธ์ของ ζ และ τ ที่ t_{20} และ t_{∞}	49
รูปที่ 2.26	แสดงการตอบสนองที่ $K_C > K_{CU}$	51

รูปที่ 2.27	แสดงการตอบสนองที่ $K_C = K_{CU}$	51
รูปที่ 2.28	แสดงการตอบสนองที่ $K_C > K_{CU}$ (without saturation)	52
รูปที่ 2.29	แสดงการตอบสนองที่ $K_C > K_{CU}$ (with saturation)	52
รูปที่ 3.1	แสดงถึงห้องสมุดของบล็อกไดอะแกรมของซิมูลิงค์	59
รูปที่ 3.2	แสดงถึงบล็อกที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณแบบต่างๆ	59
รูปที่ 3.3	แสดงถึงรูปแบบของสัญญาณส่งออกแบบต่างๆ	59
รูปที่ 3.4	แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของดีสครีตแบบต่างๆ	60
รูปที่ 3.5	แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมและแกนแบบต่างๆ ที่เป็นแบบเชิงเส้น	60
รูปที่ 3.6	แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของเมทแลบและค่าแกนแบบต่างๆ ที่เป็นแบบ ไม่เชิงเส้น	61
รูปที่ 3.7	แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของตัวเชื่อมสัญญาณแบบต่างๆ	61
รูปที่ 3.8	แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ควบคุมเพิ่มเติม	62
รูปที่ 3.9	แสดงแบบจำลองการควบคุม	66
รูปที่ 3.10	แสดงผลการควบคุมของตัวอย่างที่ 3.1	66
รูปที่ 3.11	แสดงแบบจำลองการควบคุมด้วยวิธีการต่างๆ.....	68
รูปที่ 3.12	แสดงผลการควบคุมของตัวอย่างที่ 3.2	68
รูปที่ 3.13	แสดงลักษณะของบล็อกไดอะแกรมที่จะทำการเปลี่ยนแปลงแบบสตีพ	69
รูปที่ 3.14	แสดงการเปลี่ยนแปลงแบบสตีพของกระบวนการที่อันดับมากกว่าหนึ่ง	70
รูปที่ 3.15	แสดงการหาค่า θ และค่า τ ของ G_p ใหม่	70
รูปที่ 3.16	แสดงลักษณะของบล็อกไดอะแกรมที่จะทำการเปลี่ยนแปลงแบบสตีพ	71

รูปที่ 3.17	แสดงการตอบสนองที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบสตีพของกระบวนการที่ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันมีอันดับมากกว่าหนึ่งและกระบวนการที่ทรานส์ เฟอร์ฟังก์ชันได้รับการเปลี่ยนเป็นอันดับหนึ่ง โดยวิธีการแบบสตีพ.....	72
รูปที่ 4.1	แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้อง.....	73
รูปที่ 4.2	แสดงรูปภาพกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้อง.....	74
รูปที่ 4.3	แสดงแผนภาพลักษณะของดีเฟลกมาเตอร์.....	76
รูปที่ 4.4	แสดงรูปภาพลักษณะของดีเฟลกมาเตอร์	76
รูปที่ 4.5	แสดงขั้นตอนการหาและการระบุแบบจำลองกระบวนการ ในรูป ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน.....	78
รูปที่ 4.6	แสดงตัวอย่างกระบวนการที่นำมาระบุแบบจำลองกระบวนการ	79
รูปที่ 5.1	แสดงลักษณะแบบแผนและตำแหน่ง	90
รูปที่ 5.2	แสดงการหาค่าเวลาจากเส้นโค้งปฏิกิริยา	93
	กระบวนการอันดับหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบโพลดเปลี่ยน	
รูปที่ 5.3	แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่ง.....	115
รูปที่ 5.4	แสดงการตอบสนองของที่ได้ไซเคิลแบบต่อเนื่องได้ $K_{cu} = 3.65$ $P_u = 1$	115
รูปที่ 5.5	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี วิธีของ ซิเกลอร์-นิโคลส์	117
รูปที่ 5.6	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.5 โดยวิธี ITAE.....	117
รูปที่ 5.7	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี ภาย วิธีของ ซิเกลอร์-นิโคลส์	118
รูปที่ 5.8	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.7 โดยวิธี ITAE.....	118
รูปที่ 5.9	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี ภาย ดี วิธีของซิเกลอร์-นิโคลส์.....	119

รูปที่ 5.10	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.9 โดยวิธี ITAE.....	119
รูปที่ 5.11	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อายุ ดี วิธีของ ซิกเลอร์-นิโคลส์ชนิดซัมโอเวอร์ชูต	120
รูปที่ 5.12	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.11 โดยวิธี ITAE	120
รูปที่ 5.13	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อายุ ดี วิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ ชนิดโนโอเวอร์ชูต	121
รูปที่ 5.14	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.13 โดยวิธี ITAE.....	121
รูปที่ 5.15	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี วิธีของ โคเสนคูน	122
รูปที่ 5.16	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.15 โดยวิธี ITAE.....	122
รูปที่ 5.17	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อายุ วิธีของ โคเสนคูน	123
รูปที่ 5.18	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.17 โดยวิธี ITAE.....	123
รูปที่ 5.19	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อายุ ดี วิธีของโคเสนคูน	124
รูปที่ 5.20	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.19 โดยวิธี ITAE	124
กระบวนการอันดับหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยน		
รูปที่ 5.21	แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่ง	125
รูปที่ 5.22	แสดงการตอบสนองของที่ได้ไซเคิลแบบต่อเนื่องได้ $K_{cu} = 3.65$ $P_u = 1$	125
รูปที่ 5.23	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี วิธีของ ซิกเลอร์-นิโคลส์	127
รูปที่ 5.24	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.23 โดยวิธี ITAE.....	127
รูปที่ 5.25	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อายุ วิธีของ ซิกเลอร์-นิโคลส์	128
รูปที่ 5.26	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.25 โดยวิธี ITAE	128

รูปที่ 5.27	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี วิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์	129
รูปที่ 5.28	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.27 โดยวิธี ITAE	129
รูปที่ 5.29	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี วิธีของ ซิกเลอร์-นิโคลส์ ชนิดซัมโอเวอร์ชูต	130
รูปที่ 5.30	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.29 โดยวิธี ITAE	130
รูปที่ 5.31	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี วิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ ชนิดโนโอเวอร์ชูต	131
รูปที่ 5.32	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.31 โดยวิธี ITAE	131
รูปที่ 5.33	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี วิธีของ โคะเสนกุน	132
รูปที่ 5.34	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.33 โดยวิธี ITAE	132
รูปที่ 5.35	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อาย วิธีของ โคะเสนกุน	133
รูปที่ 5.36	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.35 โดยวิธี ITAE	133
รูปที่ 5.37	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี วิธีของ โคะเสนกุน	134
รูปที่ 5.38	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.37 โดยวิธี ITAE	134
	กระบวนการอันดับสองที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบโหลดเปลี่ยน	
รูปที่ 5.39	แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมกระบวนการอันดับสอง(เฮอริออท)	135
รูปที่ 5.40	แสดงการตอบสนองของที่ได้ไซเคิลแบบต่อเนื่องได้ $K_{cu} = 2.3$ $P_u = 25$ (เฮอริออท)	135
รูปที่ 5.41	แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมกระบวนการอันดับสอง (สมิธ)	137

รูปที่ 5.42	แสดงการตอบสนองของที่ได้ไซเคิลแบบต่อเนื่องได้ $K_{cu} = 2.68$ $P_u = 22$ (สมิธ)	137
รูปที่ 5.43	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี วิธีของ ซิเกลอร์-นิโคลส์	139
รูปที่ 5.44	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.43 โดยวิธี ITAE	139
รูปที่ 5.45	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อาย วิธีของซิเกลอร์-นิโคลส์	140
รูปที่ 5.46	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.45 โดยวิธี ITAE	140
รูปที่ 5.47	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี ธีของซิเกลอร์-นิโคลส์	141
รูปที่ 5.48	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.47 โดยวิธี ITAE	141
รูปที่ 5.49	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี วิธีของ ซิเกลอร์-นิโคลส์ ชนิดซัมโอเวอร์ชูต	142
รูปที่ 5.50	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.49 โดยวิธี ITAE	142
รูปที่ 5.51	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี วิธีของซิเกลอร์-นิโคลส์ ชนิดโนโอเวอร์ชูต.....	143
รูปที่ 5.52	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.51 โดยวิธี ITAE	143
กระบวนการอันดับสองที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยน		
รูปที่ 5.53	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี วิธีของ ซิเกลอร์-นิโคลส์	144
รูปที่ 5.54	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.53 โดยวิธี ITAE	144
รูปที่ 5.55	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อาย วิธีของซิเกลอร์-นิโคลส์	145
รูปที่ 5.56	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.55 โดยวิธี ITAE	145
รูปที่ 5.57	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี ธีของซิเกลอร์-นิโคลส์	146

รูปที่ 5.58	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.57 โดยวิธี ITAE	146
รูปที่ 5.59	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี วิธีของ ซิกเลอร์-นิโคลส์ ชนิดซัมโอเวอร์ชูต	147
รูปที่ 5.60	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.59 โดยวิธี ITAE	147
รูปที่ 5.61	แสดงการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี วิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ ชนิดโนโอเวอร์ชูต	148
รูปที่ 5.62	แสดงการตอบสนองของการวัดค่าผิดพลาดของรูปที่ 5.61 โดยวิธี ITAE	148
รูปที่ ภ.1.	แสดงกราฟของอัตราการไหลของน้ำเย็นขณะทำการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ป ข้อมูลได้จาก ตารางที่ 5.3 และ 5.4.....	160
รูปที่ ภ.2	แสดงกราฟการกระจายของข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขาออกของ ดีเฟลกมาเตอร์ ซึ่งข้อมูลได้จาก ตารางที่ 5.5.....	160
รูปที่ ภ.3	แสดงกราฟการกระจายของข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขาออกของ ดีเฟลกมาเตอร์ ซึ่งข้อมูลได้จาก ตารางที่ 5.6.....	161
รูปที่ ภ.4	แสดงข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขาออกและอุณหภูมิขาเข้าของ ดีเฟลกมาเตอร์ต่อเวลาหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าซึ่ง ได้จากการ. 161	161
รูปที่ ภ.5	แสดงกราฟการกระจายของข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขาออกของ ดีเฟลกมาเตอร์ ซึ่งข้อมูลได้จาก ตารางที่ 5.11.....	162
รูปที่ ภ.6	แสดงกราฟการกระจายของข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขาเข้าของ ดีเฟลกมาเตอร์ ซึ่งข้อมูลได้จาก ตารางที่ 5.11.....	162
รูปที่ ภ.7	แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขาออกที่เกิดจากการวัดและการทำนาย.....	163