การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการที่มีหลายอินพุทหลายเอาท์พุท โดยการใช้การควบคุมเชิงแบบจำลองภายใน

นายถวัลย์ แสงสว่าง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-817-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 15620777

CONTROLLER DESIGN FOR MULTI-INPUT MULTI-OUTPUT PROCESS USING INTERNAL MODEL CONTROL

Mr.Thawal Saengsawang

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1998

ISBN 974-331-817-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการที่มีหลายอินพุทหลายเอาท์พุท โดยการใช้การควบคุมเชิงแบบจำลองภายใน
โดย	นายฉวัลย์ แสงสว่าง
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

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

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ถวัลย์ แสงสว่าง: การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการที่มีหลายอินพุท หลายเอาท์พุท โดยการใช้การควบคุมเชิงแบบจำลองภายใน (CONTROLLER DESIGN FOR MULTI-INPUT MULTI-OUTPUT PROCESS USING INTERNAL MODEL CONTROL) อ.ที่ปรึกษา : อ. ดร.มนตรี วงศ์ศรี, 113 หน้า ISBN 974-331-817-8.

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการที่มีหลายอินพุทหลายเอาท์พุทของระบบที่เป็นอินพุทสองตัวแปรและเอาท์พุทสองตัวแปรโดยเลือกทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเดดไทม์ การออกแบบตัวควบคุมที่ได้ทำการศึกษาวิจัยและเปรียบเทียบมีทั้งหมดสามแนวทางซึ่งประกอบด้วยการออกแบบตัวควบคุมเชิงแบบจำลองภายในที่มีหลายอินพุทหลายเอาท์พุทแบบลูพหมู่ (MIMO IMC) การออกแบบตัวควบคุมเชิงแบบจำลองภายในที่มีหนึ่งอินพุท หนึ่งเอาท์พุทแบบลูพหมู่ (SISO IMC) และการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) ผลการวิจัยทำให้ทราบว่าการออกแบบตัวควบคุมของ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์ซึ่งใช้แนวความคิดแบบใหม่นั้น “ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก” และโดยการใช้ดีคัพเปลอร์แบบบางส่วน จะให้ผลการตอบสนองที่ดีหรือมีความเหมาะสมมากกว่าการออกแบบตัวควบคุมของ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ (SISO IMC) และยังมีผลการตอบสนองที่ดีกว่าการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีไม่ว่าจะเป็นแบบพีไอดีทั่วไป หรือแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์ และนอกจากนี้การหาค่าตัวควบคุมของ IMC ซึ่งคิดตามหลักการของ IMC โดยไม่รวมเดดไทม์นั้นจะส่งผลให้การออกแบบตัวควบคุมของ IMC มีสมรรถนะที่ดีขึ้น.

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C817736 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: IMC / MIMO IMC / SISO IMC / MULTIVARIABLE CONTROL

THAWAL SAENGSAWANG: CONTROLLER DESIGN FOR MULTI-INPUT MULTI-OUTPUT PROCESS USING INTERNAL MODEL CONTROL.
THESIS ADVISOR: MONTREE WONGSRI, Ph.D. 113 pp.
ISBN 974-331-817-8

The process in this research is multi-input multi-output process as two input variables and two output variables system with first order plus dead time. Three controller designs including multiloop multi-input multi-output IMC; MIMO IMC, multiloop single-input single-output IMC; SISO IMC and PID control are investigated and compared for the process mentioned above. Interestingly, the response of MIMO IMC controller design using a new approach called "Weighting Decouplers" and partial decouplers are more appropriate for the process studied than SISO IMC and PID either PID with or without decouplers controller designs. Additionally, The IMC controller evaluation, G_c^* without dead time applied causes the more efficient performance of IMC controller design.

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้โดยได้รับความช่วยเหลือจากหลายๆท่านผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนตรวจทานแก้ไขเกี่ยวกับการศึกษาวิจัยและการพัฒนางานวิจัยนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความสนใจและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้เป็นอย่างสูง

ขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และน้องๆที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติผู้ใหญ่ พี่น้อง และผู้มีอุปการคุณซึ่งเลี้ยงดู สนับสนุน และให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ..... 3
1.2 วัตถุประสงค์..... 4
1.3 ขอบเขต..... 5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 5
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์..... 6

บทที่ 2 ผลงานที่เกี่ยวข้อง
2.1 คำนำ..... 7
2.2 ผลงานที่เกี่ยวข้องและที่ผ่านมา..... 7

บทที่ 3 การออกแบบ Multivariable IMC
3.1 คำนำ..... 16
3.2 ผลกระทบของอินเตอร์แอกชันที่มีต่อระบบการควบคุมลูพหมู่..... 16
3.3 ทฤษฎีพื้นฐาน IMC..... 20
3.4 วิธีการออกแบบการควบคุม Multivariable IMC; MIMC..... 28
3.5 การจูนตัวควบคุม..... 38
3.6 การเปรียบเทียบผลการควบคุม..... 40
3.7 ระบบการควบคุมที่มีดีคัพเปลอร์..... 42

หน้า

บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง

4.1 คำนำ..... 44

4.2 วิธีการทดลอง..... 45

ตัวอย่างการทดลองที่ 1..... 45

4.2.1 การควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป..... 47

4.2.2 การควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์..... 51

4.2.3 การควบคุมแบบโมเดลภายในที่ไม่มีดีคัพเปลอร์..... 54

4.2.4 การควบคุมแบบโมเดลภายในที่มีดีคัพเปลอร์..... 63

ตัวอย่างการทดลองที่ 2..... 72

4.2.5 การควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป..... 74

4.2.6 การควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์..... 76

4.2.7 การควบคุมแบบโมเดลภายในที่ไม่มีดีคัพเปลอร์..... 81

4.2.8 การควบคุมแบบโมเดลภายในที่มีดีคัพเปลอร์..... 86

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 คำนำ..... 90

5.2 บทสรุปผลการวิจัย..... 91

5.2.1 เปรียบเทียบการควบคุมตัวแปรอิสระ..... 91

5.2.2 การเปรียบเทียบผลการควบคุมแบบ PID ทั่วไปกับที่มีดีคัพเปลอร์..... 92

5.2.3 การเปรียบเทียบผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์และมีดีคัพเปลอร์.. 93

5.2.4 การเปรียบเทียบผลการควบคุมแบบ PID ทั่วไป

กับแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์..... 93

5.2.5 การเปรียบเทียบผลการควบคุมแบบ PID ทั่วไปกับแบบ IMCที่มีดีคัพเปลอร์... 94

5.2.6 การเปรียบเทียบผลการควบคุมแบบ PID ที่มีดีคัพเปลอร์

กับแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์..... 94

หน้า

5.2.7 การเปรียบเทียบผลการควบคุมแบบ PID ที่มีดีคัพเปลอร์
กับแบบ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์.....95
5.2.8 การเปรียบเทียบผลการควบคุม, G_c^* ในการควบคุมแบบ IMC..... 95
5.2.9 สรุปและวิจารณ์ผลการใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก (Weighted Decouplers)... 95
5.3 ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย.....101
5.4 ข้อเสนอแนะในการศึกษาค้นคว้าต่อไป..... 101

รายการอ้างอิง.....103

ภาคผนวก

ภาคผนวกที่ 1.....106
ภาคผนวกที่ 2.....109

ประวัติผู้วิจัย.....113

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 การคำนวณค่าตัวควบคุมโดยวิธีการของซิเกลอร์ – นิโคลส์..... 40

การทดลองที่ 1

ตารางที่ 4.1 ค่า K_c และ τ_c ที่ได้จากการทดลองของ McAVOY..... 46

ตารางที่ 4.2 ค่า IAE เมื่อมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์และโหลดสำหรับกรณีศึกษา 4.2.1..... 50

ตารางที่ 4.3 ค่า IAE เมื่อมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์และโหลดสำหรับกรณีศึกษา 4.2.2..... 53

ตารางที่ 4.4 ค่า IAE สำหรับกรณีศึกษา 4.2.3 ของการทดลองที่ 1.....57

ตารางที่ 4.5 ค่า IAE สำหรับกรณีศึกษา 4.2.3 ของการทดลองที่ 2.....61

ตารางที่ 4.6 ค่า IAE เมื่อมีการจูนตัวควบคุมสำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่รวมเลคไทม์.... 62

ตารางที่ 4.7 ค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์..... 65

ตารางที่ 4.8 ค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบ IMC โดยใช้ดีคัพเปลอร์แบบครึ่งหนึ่ง
(Partial Decoupling,D_{21})..... 65

ตารางที่ 4.9 ค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก
โดยแยกตามกรณี..... 68

ตารางที่ 4.10 ค่า IAE เมื่อจูนตัวควบคุมสำหรับการควบคุมแบบ IMC
ที่มีดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก..... 70

การทดลองที่ 2

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลต่างๆที่ได้รับการจูนแล้ว.....73

ตารางที่ 4.12 ค่า IAE เมื่อมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์และโหลดสำหรับกรณีศึกษาพีไอดีทั่วไป..... 76

ตารางที่ 4.13 ค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์.....78

ตารางที่ 4.14 ค่า K_c และ τ_c หลังจากการจูนตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์..... 78

ตารางที่ 4.15 ค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์..... 83

ตารางที่ 4.16 ค่า IAE เมื่อจูนตัวควบคุมสำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์..... 83

ตารางที่ 4.17 ค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่ใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก.....87

ตารางที่ 4.18 ค่า IAE เมื่อจูนตัวควบคุมสำหรับการควบคุมแบบ IMC
ที่มีดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก..... 88

สารบัญภาพ

หน้า

รูป ก กระบวนการแบบหลายตัวแปร..... 2
รูป ข การออกแบบการควบคุมลูพหมู่..... 2
รูป ค การออกแบบการควบคุมหลายตัวแปร..... 3

รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรการจูน τ_c สำหรับกระบวนการอันดับหนึ่ง ที่มีเดดไทม์..... 12
รูปที่ 2.2 โครงสร้างการควบคุม SISO IMC แบบลูพหมู่..... 13

รูปที่ 3.1 ระบบการควบคุมลูพหมู่..... 17
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมสำหรับระบบ 2 X 2 แบบเปิด..... 19
รูปที่ 3.3 โครงสร้างทั่วไปของ IMC..... 20
รูปที่ 3.4 โครงสร้างป้อนกลับอย่างง่าย..... 21
รูปที่ 3.5 โมเดลแบบสองบล็อก..... 21
รูปที่ 3.6 โมเดลภายในที่มีตัวกรอง..... 23
รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมป้อนกลับ..... 27
รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมระบบ 2 X 2 ที่มีตัวควบคุมเป็นลูพเดี่ยว..... 28
รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมระบบ 2 X 2 ที่มีตัวควบคุมเป็นลูพเดี่ยวสองลูพ..... 29
รูปที่ 3.10 กระบวนการ SISO ที่มีหลายตัวแปร..... 31
รูปที่ 3.11 กระบวนการ MIMO ที่มีขนาด 2 X 2..... 31
รูปที่ 3.12 กระบวนการ MIMO ที่มีขนาด n X n..... 31
รูปที่ 3.13 ตัวควบคุมแบบ 1 – 1 / 2 – 2..... 33
รูปที่ 3.14 โครงสร้างการควบคุม Multiloop IMC..... 34
รูปที่ 3.15 แผนผังการรวมลูพของ G_{c1}^{*} แบบ IMC..... 36
รูปที่ 3.16 แผนผังการรวมลูพของ G_{c2}^{*} แบบ IMC..... 37

หน้า

รูปที่ 4.1 หอกลั่นสำหรับการควบคุมที่มีหลายตัวแปร.....46
รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป.....48
รูปที่ 4.3 ผลการตอบสนองการควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป ที่ $y_1 = 1$, $y_2 = 0$..... 49
รูปที่ 4.4 ผลการตอบสนองการควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 1$..... 49
รูปที่ 4.5 ผลการตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด.....50
รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบพีไอดี ที่มีดีคัพเปลอร์..... 51
รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองการควบคุมแบบพีไอดี ที่มีดีคัพเปลอร์ ที่ $y_1 = 1$, $y_2 = 0$.....52
รูปที่ 4.8 ผลการตอบสนองการควบคุมแบบพีไอดี ที่มีดีคัพเปลอร์ ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 1$.....52
รูปที่ 4.9 ผลการตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด.....53
รูปที่ 4.10 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์..... 56
รูปที่ 4.11 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ ที่รวมเดดไทม์
ที่ $y_1 = 1$, $y_2 = 0$..... 56
รูปที่ 4.12 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ ที่รวมเดดไทม์
ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 1$..... 56
รูปที่ 4.13 ผลการตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด.....57
รูปที่ 4.14 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ ไม่รวมเดดไทม์
ที่ $y_1 = 1$, $y_2 = 0$..... 59
รูปที่ 4.15 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ ไม่รวมเดดไทม์
ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 1$..... 60
รูปที่ 4.16 ผลการตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด.....60
รูปที่ 4.17 ผลการตอบสนองหลังการจูนตัวควบคุม เมื่อ.....63
รูปที่ 4.18 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์..... 64
รูปที่ 4.19 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์ ที่ $y_1 = 1$, $y_2 = 0$..... 64
รูปที่ 4.20 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบ IMC
โดยการใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก..... 66
รูปที่ 4.21 ผลการจูนตัวควบคุมแบบ IMC ที่ใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก
ที่ $y_1 = 1$, $y_2 = 0$..... 71
รูปที่ 4.22 ผลการจูนตัวควบคุมแบบ IMC ที่ใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก
ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 1$..... 71

หน้า

รูปที่ 4.23 หอกลั่นสำหรับการควบคุม..... 72
รูปที่ 4.24 ผลการควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$..... 74
รูปที่ 4.25 ผลการควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 0.005$..... 75
รูปที่ 4.26 ผลการตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด.....75
รูปที่ 4.27 ผลการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์ ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$.....76
รูปที่ 4.28 ผลการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์ ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 0.005$..... 77
รูปที่ 4.29 ผลการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด..... 77
รูปที่ 4.30 ผลการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์หลังการจูน
ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$..... 79
รูปที่ 4.31 ผลการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์หลังการจูน
ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 0.005$..... 79
รูปที่ 4.32 ผลการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์หลังการจูน
เมื่อเปลี่ยนโหลด(-0.04)..... 80
รูปที่ 4.33 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$..... 81
รูปที่ 4.34 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 0.005$..... 82
รูปที่ 4.35 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ เมื่อเปลี่ยนโหลด (-0.04).....82
รูปที่ 4.36 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ หลังการจูน
ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$..... 84
รูปที่ 4.37 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ หลังการจูน
ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 0.005$..... 85
รูปที่ 4.38 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ หลังการจูน
เมื่อเปลี่ยนโหลด (-0.04)..... 85
รูปที่ 4.39 ผลการจูนตัวควบคุมแบบ IMC ที่ใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก
ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$..... 89
รูปที่ 4.40 ผลการจูนตัวควบคุมแบบ IMC ที่ใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก
ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 0.005$..... 89

หน้า

รูปที่ 4.23 หอกลั่นสำหรับการควบคุม..... 72
รูปที่ 4.24 ผลการควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$..... 74
รูปที่ 4.25 ผลการควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 0.005$..... 75
รูปที่ 4.26 ผลการตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด.....75
รูปที่ 4.27 ผลการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์ ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$.....76
รูปที่ 4.28 ผลการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์ ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 0.005$..... 77
รูปที่ 4.29 ผลการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด..... 77
รูปที่ 4.30 ผลการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์หลังการจูน
ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$..... 79
รูปที่ 4.31 ผลการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์หลังการจูน
ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 0.005$..... 79
รูปที่ 4.32 ผลการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์หลังการจูน
เมื่อเปลี่ยนโหลด(-0.04)..... 80
รูปที่ 4.33 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$..... 81
รูปที่ 4.34 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 0.005$..... 82
รูปที่ 4.35 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ เมื่อเปลี่ยนโหลด (-0.04).....82
รูปที่ 4.36 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ หลังการจูน
ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$..... 84
รูปที่ 4.37 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ หลังการจูน
ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 0.005$..... 85
รูปที่ 4.38 ผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ หลังการจูน
เมื่อเปลี่ยนโหลด (-0.04)..... 85
รูปที่ 4.39 ผลการจูนตัวควบคุมแบบ IMC ที่ใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก
ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$..... 89
รูปที่ 4.40 ผลการจูนตัวควบคุมแบบ IMC ที่ใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก
ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 0.005$..... 89

หน้า

รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบการควบคุมทั้ง 4 แบบ กรณีเปลี่ยนเซ็ทพอยท์ ที่
$y_1 = 1$, $y_2 = 0$ ของการทดลองที่ 1.....97
รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบการควบคุมทั้ง 4 แบบ กรณีเปลี่ยนโหลดของการทดลองที่ 1.....98
รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบการควบคุมทั้ง 4 แบบ กรณีเปลี่ยนเซ็ทพอยท์ ที่
$y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$ ของการทดลองที่ 2.....99
รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบการควบคุมทั้ง 4 แบบ กรณีเปลี่ยนโหลดที่ –0.04 ของการทดลองที่ 2.....100

ภาคผนวก 1

รูปที่ 1 การหาค่า K_{cu} และ P_u ของ X_D ครั้งที่ 1.....106
รูปที่ 2 การหาค่า K_{cu} และ P_u ของ X_B ครั้งที่ 1.....107
รูปที่ 3 การหาค่า K_{cu} และ P_u ของ X_D ครั้งที่ 2.....108

ภาคผนวก 2

รูปที่ 1 ห้องสมุดของบล็อกไดอะแกรมของ Simulink.....109
รูปที่ 2 บล็อกที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณแบบต่างๆ.....109
รูปที่ 3 รูปแบบของสัญญาณส่งออกแบบต่างๆ.....110
รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของดีสครีตแบบต่างๆ.....110
รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมและเกนแบบต่างๆ ที่เป็นแบบเชิงเส้น.....111
รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมและเกนแบบต่างๆ ที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น.....111
รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมของตัวเชื่อมสัญญาณแบบต่างๆ.....112
รูปที่ 8 บล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ควบคุมเพิ่มเติม.....112