การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ย

นางสาว สุชาดา พันธุ์พฤกษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-636-618-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

i17339CEX

COMPARISON OF PERFORMANCE OF AVERAGING LIQUID LEVEL CONTROLLERS

Miss Suchada Punpruk

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

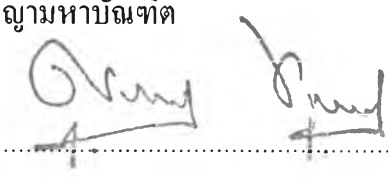
Chulalongkorn University

Academic Year 1996

ISBN 974-636-618-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ย
โดย	นางสาว สุชาดา พันธุ์พฤกษ์
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี

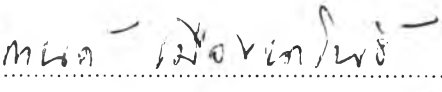
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต



.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

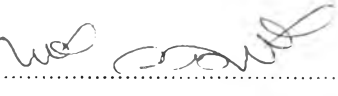
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



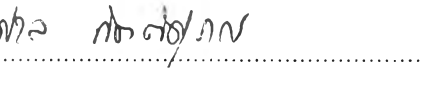
.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)



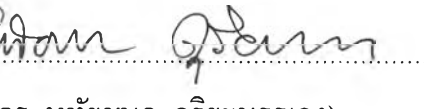
.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี)



.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร)



.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. หทัยชนก ดุริยะบรรเลง)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สุชาดา พันธุ์พฤกษ์ : การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ย (COMPARISON OF PERFORMANCE OF AVERAGING LIQUID LEVEL CONTROLLERS) อ.ที่ปรึกษา: ดร.มนตรี วงศ์ศรี, อ.ที่ปรึกษาร่วม: ดร.ไพศาล กิตติศุภกร 319 หน้า. ISBN 974-636-618-1

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบและเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ย 10 ชนิด ได้แก่ ตัวควบคุมแบบพี, ตัวควบคุมแบบพีไอ, ตัวควบคุมแบบพีแอล, ตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง, ตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก, ตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก, ตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกและตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก โดยการเลียนแบบระบบการควบคุมระดับของเหลวในถังพักโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แม็ทแลบ เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะ 6 หัวข้อ ได้แก่ 1) ความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนด, 2) ความง่ายในการปรับจูน, 3) เปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูทในการไหลขาออก, 4) ความสามารถในการเข้าสู่สภาวะคงตัว, 5) ความทนทานต่อสัญญาณรบกวน และ 6) การตอบสนองต่อการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด งานวิจัยนี้ได้รายงานสมรรถนะของตัวควบคุมแต่ละตัวตามเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะแต่ละหัวข้อ ตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยที่ให้สมรรถนะในการควบคุมดีที่สุดตามเกณฑ์โดยรวม 5 อันดับแรก ได้แก่ 1) ตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก, 2) ตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก, 3) ตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก, 4) ตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก และ 5) ตัวควบคุมแบบพีไอพี

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต สุชาดา พันธุ์พฤกษ์
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2539	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ไพศาล กิตติศุภกร

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C717146 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: AVERAGING LEVEL CONTROLLERS / LIQUID LEVEL CONTROL / SURGE TANK CONTROL

SUCHADA PUNPRUK : COMPARISON OF PERFORMANCE OF AVERAGING LIQUID LEVEL CONTROLLERS. THESIS ADVISOR: DR.MONTREE WONGSRI, THESIS CO-ADVISOR: DR.PISARN KITTISUPAKORN, 319 pp. ISBN 974-636-618-1

In this research, the performance of ten averaging level controllers: the proportional controller, the proportional integral controller, the proportional-lag controller, the nonlinear wide-range controller, the limited output change proportional controller, the limited output change proportional-integral controller, the limited output change nonlinear proportional-only controller and the limited output change nonlinear proportional-integral controller are evaluated and compared by simulation. This program is written in MATLAB program. The six performance criteria used to compare the controllers are 1) the ability to meet specifications, 2) the ease of tuning, 3) the percentage of overshoot in outiet flow, 4) the ability to reach steady-state, 5) the robustness with respect to noise and 6) the response of load change. This research reports the performance of each controller according to each performance criteria. Based on the overall performance criteria, the best five averaging level controllers are 1) the limited output change of proportional-integral controller, 2) the limited output change of proportional controller, 3) the limited output change of nonlinear proportional-only controller 4) the limited output change of nonlinear proportional-integral controller, 5) the proportional-integral/proportional controller, respectively.

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี **ลายมือชื่อนิสิต** สุชาดา พันธุ์พฤกษ์

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา**

ปีการศึกษา 2539 **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** ไพศาล กิตติภากร

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้โดยได้รับความช่วยเหลือจากหลาย ๆ ท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำในการพัฒนางานวิจัย ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ ประธานกรรมการ, อาจารย์ ดร.หทัยชนก ดุริยะบรรเลง กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความสนใจและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และน้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ภราดร ภักดีวานิช ที่ให้กำลังใจ, สนับสนุนและให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ในการทำงานวิจัยเป็นอย่างมาก

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติผู้ใหญ่ และผู้มีอุปการคุณซึ่งเลี้ยงดู, สนับสนุนและให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญภาพ.....ฌ
สารบัญตาราง.....ท
คำอธิบายสัญลักษณ์.....ป

บทที่ 1 บทนำ
1.1 บทนำทั่วไป.....1
1.2 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....4
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....6
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....7
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....8
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....9
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....10

บทที่ 2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....11

บทที่ 3 การควบคุมระดับและการออกแบบตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ย
3.1 บทนำ.....21
3.2 ความจำเป็นของถังพักในโรงงาน.....22
3.3 วัตถุประสงค์ของการควบคุมระดับ.....24
3.4 การออกแบบตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ย.....27

หน้า

3.5 การควบคุมระดับแบบทั่วไป.....30
3.5.1 ตัวควบคุมแบบพี.....32
3.5.2 ตัวควบคุมแบบพีไอ.....34
3.6 การควบคุมระดับแบบป้อนหน้า/ป้อนกลับ.....57
3.7 ตัวควบคุมระดับแบบไม่เชิงเส้น
3.7.1 ตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้น.....68
3.7.2 ตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง.....70
3.7.3 ตัวควบคุมแบบพีไอพี.....84
3.7.4 ตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพี.....88
3.7.5 ตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก.....92
3.7.6 ตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก.....94
3.7.7 ตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลง
ขาออก.....96
3.7.8 ตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลง
ขาออก.....97

บทที่ 4 การตรวจสอบโปรแกรมการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยที่เขียนขึ้นในงานวิจัย
4.1 บทนำ.....102
4.2 การเขียนโปรแกรมการควบคุมระดับของเหลวเฉลี่ยในถังพักและตรวจสอบ
โปรแกรมที่เขียนโดยเปรียบเทียบกับผลงานของผู้ที่ได้ทำมาแล้ว.....103
4.2.1 วัตถุประสงค์.....103
4.2.2 ขั้นตอนการดำเนินการ.....103
4.2.3 ผลการตรวจสอบ.....105

บทที่ 5 การทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ย
5.1 บทนำ.....127
5.2 เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ย.....129

หน้า

5.3 การทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดย
พิจารณาจากความสามารถในปรับให้ได้ตามข้อกำหนดและความง่าย
ในการปรับจูน....134
5.3.1 วัตถุประสงค์....134
5.3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง....134
5.3.3 ผลการทดลอง....136
5.4 การทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดย
พิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูทของสัญญาณการไหลขาออก....169
5.4.1 วัตถุประสงค์....169
5.4.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง....169
5.4.3 ผลการทดลอง....170
5.5 การทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดย
พิจารณาความสามารถในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของระดับของเหลว....174
5.5.1 วัตถุประสงค์....174
5.5.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง....174
5.5.3 ผลการทดลอง....176
5.6 การทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดย
พิจารณาการตอบสนองต่อการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด....184
5.6.1 วัตถุประสงค์....184
5.6.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง....184
5.6.3 ผลการทดลอง....186
5.7 การทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดย
พิจารณาความทนทานต่อสัญญาณรบกวน....213
5.7.1 วัตถุประสงค์....213
5.7.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง....214
5.7.3 ผลการทดลอง....216

หน้า

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

6.1 บทนำ....243

6.2 สรุปผลการวิจัย....243

6.3 กรณีศึกษา: การทดสอบการเลือกใช้ตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ย

6.3.1 กรณีศึกษาที่ 1....250

6.3.2 กรณีศึกษาที่ 2....256

6.3.3 กรณีศึกษาที่ 3....261

6.4 บทวิจารณ์และข้อเสนอแนะ....281

รายการอ้างอิง....285

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การเขียนโปรแกรมการควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ยโดยใช้

โปรแกรมคอมพิวเตอร์แม็ทแลบ....288

ก.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์แม็ทแลบ (MATLAB)....289

ก.2 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมการควบคุมระดับแบบเฉลี่ย

โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แม็ทแลบ....293

ก.3 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมการควบคุมระดับของเหลว

แบบเฉลี่ยโดยใช้ตัวควบคุมประเภทต่าง ๆ....302

ประวัติผู้เขียน....319

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 3.1 ระบบการควบคุมระดับของเหลวในถังพัก....24
รูปที่ 3.2 แผนภาพการออกแบบการควบคุมระดับแบบเฉลี่ย....27
รูปที่ 3.3 บล็อคไดอะแกรมของการควบคุมระดับของเหลวในถังพัก....30
รูปที่ 3.4 ผลที่ได้จากการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี....37
รูปที่ 3.5 ผลที่ได้จากการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอ....38
รูปที่ 3.6 ผลที่ได้จากการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอเมื่อระบบเป็นแบบแดมพ์ขาด (Underdamped)....39
รูปที่ 3.7 อัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (MRCO) และระดับของเหลวสูงสุด (MPH) ที่ได้จากกราฟแสดงผลการตอบสนองของการควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ย....41
รูปที่ 3.8 แผนภาพการปรับจูนอัตราการเปลี่ยนแปลงของการไหลขาออกเริ่มต้นของตัวควบคุมแบบพีไอ....49
รูปที่ 3.9 แผนภาพการปรับจูนค่าพีกระดับของตัวควบคุมแบบพีไอ....49
รูปที่ 3.10 แผนภาพการปรับจูนค่าเวลาที่เกิดพีกของตัวควบคุมแบบพีไอ....50
รูปที่ 3.11 ผลการตอบสนองของระดับของเหลวและการไหลขาออกสำหรับตัวอย่างที่ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม....53
รูปที่ 3.12 แผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพี....54
รูปที่ 3.13 แผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีไอ....54
รูปที่ 3.14 แผนภาพการควบคุมระดับของเหลวแบบพีแอลในถังพัก....58
รูปที่ 3.15 บล็อคไดอะแกรมของการควบคุมระดับของเหลวแบบพีแอล....59
รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพี, พีไอ และพีแอล....64
รูปที่ 3.17 การตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีแอลเมื่อทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่างกัน....65
รูปที่ 3.18 แผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีแอล....66

หน้า

รูปที่ 3.19 แผนภาพการปรับจูนค่าคงที่เวลาแล็กแบบป้อนหน้า (Feedforward lag time constant) ของตัวควบคุมแบบพีแอล....66
รูปที่ 3.20 ภาพแสดงสมการตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นสำหรับการควบคุมระดับ....69
รูปที่ 3.21 ผลเปรียบเทียบผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบช่วงกว้างเมื่อการรบกวนมีค่ามาก (ΔQ_i= 1 m^3/min)....73
รูปที่ 3.22 ผลเปรียบเทียบผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบช่วงกว้างเมื่อการรบกวนมีค่าน้อย (ΔQ_i = 0.1 m^3/min)....74
รูปที่ 3.23 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างเมื่อทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่างกัน....75
รูปที่ 3.24 แผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง....76
รูปที่ 3.25 ผลเปรียบเทียบการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพี, ตัวควบคุมแบบพีไอ, ตัวควบคุมแบบพีแอลและตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง เมื่อการรบกวนมีค่าน้อย (ΔQ_i= 0.1 m^3/min)....80
รูปที่ 3.26 ผลเปรียบเทียบการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพี, ตัวควบคุมแบบพีไอ, ตัวควบคุมแบบพีแอลและตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง เมื่อการรบกวนมีค่ามาก (ΔQ_i= 1.0 m^3/min)....81
รูปที่ 3.27 ผลการตอบสนองแบบความถี่ (Frequency response) ของการไหลขาออกต่อสัญญาณรบกวนในการไหลขาเข้าเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง....82
รูปที่ 3.28 แผนผังการควบคุมแบบพีไอพี....84
รูปที่ 3.29 ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอพี....87
รูปที่ 3.30 การทำงานของตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพี....88
รูปที่ 3.31 ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพี....90
รูปที่ 3.32 ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก....93
รูปที่ 3.33 ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก....95

หน้า

รูปที่ 3.34 ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก....97
รูปที่ 3.35 ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก....99
รูปที่ 4.1 พารามิเตอร์ของระบบถังพักมาตรฐานที่ใช้ในการทดลอง....104
รูปที่ 4.1a ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นในงานวิจัยนี้....106
รูปที่ 4.1b ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheung, 1978)....107
รูปที่ 4.2a ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นในงานวิจัยนี้....108
รูปที่ 4.2b ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheung, 1978)....109
รูปที่ 4.3a ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีแอลจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นในงานวิจัยนี้....110
รูปที่ 4.3b ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีแอลจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheung, 1978)....111
รูปที่ 4.4a ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นในงานวิจัยนี้....112
รูปที่ 4.4b ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheung, 1978)....113
รูปที่ 4.5a ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอพีจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นในงานวิจัยนี้....114
รูปที่ 4.5b ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอพีจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheung, 1978)....115
รูปที่ 4.6a ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพีจากโปรแกรมที่เขียนขึ้น....116

หน้า

รูปที่ 4.6b ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพีจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheung, 1978).....117
รูปที่ 4.7a ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นในงานวิจัยนี้.....118
รูปที่ 4.7b ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheung,1978).....119
รูปที่ 4.8a ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกจากโปรแกรมที่เขียนขึ้น.....120
รูปที่ 4.8b ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheung, 1978).....121
รูปที่ 4.9a ผลการตอบสนองของตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นในงานวิจัยนี้.....122
รูปที่ 4.9b ผลการตอบสนองของตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheung, 1978).....123
รูปที่ 4.10a ผลการตอบสนองของตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นในงานวิจัยนี้.....124
รูปที่ 4.10b ผลการตอบสนองของตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheung, 1978).....125
รูปที่ 5.1a ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 1 ถึง 5 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพี.....138
รูปที่ 5.1b ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 6 ถึง 10 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพี.....139
รูปที่ 5.2a ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 1 ถึง 5 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ.....141

หน้า

รูปที่ 5.2b ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 6 ถึง 10 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ....142
รูปที่ 5.3a ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 1 ถึง 5 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีแอล....144
รูปที่ 5.3b ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 6 ถึง 10 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีแอล....145
รูปที่ 5.4a ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 1 ถึง5เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง....147
รูปที่ 5.4b ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 6 ถึง 10 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง....148
รูปที่ 5.5a ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 1 ถึง 5 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอพี....150
รูปที่ 5.5b ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 6 ถึง 10 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอพี....151
รูปที่ 5.6a ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 1 ถึง 5 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพี....153
รูปที่ 5.6b ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 6 ถึง 10 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพี....154

หน้า

รูปที่ 5.7a ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 1 ถึง 5 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก.....156
รูปที่ 5.7b ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 6 ถึง 10 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก.....157
รูปที่ 5.8a ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 1 ถึง 5 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก.....159
รูปที่ 5.8b ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 6 ถึง 10 เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก....160
รูปที่ 5.9a ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 1 ถึง 5 เมื่อใช้ตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก.....162
รูปที่ 5.9b ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 6 ถึง 10 เมื่อใช้ตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก.....163
รูปที่ 5.10a ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 1 ถึง 5 เมื่อใช้ตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก.....165

หน้า

รูปที่ 5.10b ผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดในกรณีที่ 6 ถึง 10 เมื่อใช้ตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก.....166
รูปที่ 5.11a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลดจาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบพีในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....187
รูปที่ 5.11b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลดจาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบพีในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....188
รูปที่ 5.12a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลดจาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบพีไอในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....189
รูปที่ 5.12b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลดจาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบพีไอในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....190
รูปที่ 5.13a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลดจาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบพีแอลในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....191
รูปที่ 5.13b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลดจาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบพีแอลในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....192
รูปที่ 5.14a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลดจาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....193

หน้า

รูปที่ 5.14b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด จาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....194
รูปที่ 5.15a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด จาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบพีไอพีในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....195
รูปที่ 5.15b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด จาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบพีไอพีในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....196
รูปที่ 5.16a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด จาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพีในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....197
รูปที่ 5.16b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด จาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพีในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....198
รูปที่ 5.17a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด จาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....199
รูปที่ 5.17b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด จาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....200
รูปที่ 5.18a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด จาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....201
รูปที่ 5.18b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด จาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....202

หน้า

รูปที่ 5.19a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด จาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min)...203

รูปที่ 5.19b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด จาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min)...204

รูปที่ 5.20a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด จาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min)...205

รูปที่ 5.20b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลด จาก 100% สเต็พ เป็น 200% สเต็พของตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min)...206

รูปที่ 5.21a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....217

รูปที่ 5.21b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....218

รูปที่ 5.22a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....219

รูปที่ 5.22b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....220

รูปที่ 5.23a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีแอลในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....221

หน้า

รูปที่ 5.23b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีแอลในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....222

รูปที่ 5.24a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบช่วงกว้างในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....223

รูปที่ 5.24b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบช่วงกว้างในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....224

รูปที่ 5.25a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอพีในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....225

รูปที่ 5.25b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอพีในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....226

รูปที่ 5.26a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพีในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....227

รูปที่ 5.26b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพีในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....228

รูปที่ 5.27a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก ในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....229

รูปที่ 5.27b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก ในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....230

หน้า

รูปที่ 5.28a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....231
รูปที่ 5.28b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....232
รูปที่ 5.29a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....233
รูปที่ 5.29b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....234
รูปที่ 5.30a ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกในกรณีที่ 4 (MPH = 20%, MRCO = 2.50 m^3/min/min).....235
รูปที่ 5.30b ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาด 10% เกิดขึ้นในระบบ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกในกรณีที่ 6 (MPH = 30%, MRCO = 2.00 m^3/min/min).....236
รูปที่ 6.1 พารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในกรณีศึกษา.....250
รูปที่ 6.2 ผลการตอบสนองที่ได้จากการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยทั้ง 5 ชนิด เมื่อเกิดการรบกวนการไหลขาเข้าขนาด 100% สเต็พ ในกรณีศึกษาที่ 1.....253
รูปที่ 6.3 ผลการตอบสนองที่ได้จากการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยทั้ง 5 ชนิด เมื่อเกิดการรบกวนการไหลขาเข้าขนาด 200% สเต็พ ในกรณีศึกษาที่ 1.....254

หน้า

รูปที่ 6.4 ผลการตอบสนองที่ได้จากการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยทั้ง 5 ชนิด เมื่อเกิดการรบกวนการไหลขาเข้าขนาด 100% สเต็พและสร้างสัญญาณรบกวนขนาด 10% ในกรณีศึกษาที่ 1.....255
รูปที่ 6.5 ผลการตอบสนองที่ได้จากการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยทั้ง 5 ชนิด เมื่อเกิดการรบกวนการไหลขาเข้าขนาด 100% สเต็พ ในกรณีศึกษาที่ 2.....258
รูปที่ 6.6 ผลการตอบสนองที่ได้จากการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยทั้ง 5 ชนิด เมื่อเกิดการรบกวนการไหลขาเข้าขนาด 200% สเต็พ ในกรณีศึกษาที่ 2.....259
รูปที่ 6.7 ผลการตอบสนองที่ได้จากการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยทั้ง 5 ชนิด เมื่อเกิดการรบกวนการไหลขาเข้าขนาด 100% สเต็พและสร้างสัญญาณรบกวนขนาด 10% ในกรณีศึกษาที่ 2.....260
รูปที่ 6.8 ผลการตอบสนองที่ได้จากการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยทั้ง 5 ชนิด เมื่อเกิดการรบกวนการไหลขาเข้าขนาด 100% สเต็พ ในกรณีศึกษาที่ 3.....263
รูปที่ 6.9 ผลการตอบสนองที่ได้จากการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยทั้ง 5 ชนิด เมื่อเกิดการรบกวนการไหลขาเข้าขนาด 200% สเต็พ ในกรณีศึกษาที่ 3.....264
รูปที่ 6.10 ผลการตอบสนองที่ได้จากการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยทั้ง 5 ชนิด เมื่อเกิดการรบกวนการไหลขาเข้าขนาด 100% สเต็พและสร้างสัญญาณรบกวนขนาด 10% ในกรณีศึกษาที่ 3.....265
รูปที่ ก.1 ระบบการควบคุมระดับของเหลวในถังพัก.....294
รูปที่ ก.2 บล็อคไดอะแกรมของระบบลูพปิดสำหรับการควบคุมระดับของเหลวแบบป้อนหน้า.....295
รูปที่ ก.3 บล็อคไดอะแกรมของระบบลูพปิดสำหรับการควบคุมระดับของเหลวแบบป้อนหน้า/ป้อนกลับ.....295

หน้า

รูปที่ ก.4 ผลที่ได้จากการเขียนโปรแกรมระบบการควบคุมระดับแบบ
เฉลี่ยในถังพักโดยใช้ตัวอย่างโปรแกรมข้างต้น.....301

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการควบคุมระดับแบบแน่นอน (Tight level control) และการควบคุมระดับแบบเฉลี่ย (Averaging level control).....26
ตารางที่ 3.2 สรุปสมการของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยชนิดต่าง ๆ.....28
ตารางที่ 3.3 ผลที่ได้จากการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ทำการเปรียบเทียบ.....77
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำการกำหนดค่า MPH และค่า MRCO ในกรณีต่าง ๆ พร้อมทั้งค่า MPH, ค่า MRCO และค่าดัชนีสมรรถนะที่ได้จากการทดลอง.....137
ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำการกำหนดค่า MPH และค่า MRCO ในกรณีต่าง ๆ พร้อมทั้งค่า MPH, ค่า MRCO และค่าดัชนีสมรรถนะที่ได้จากการทดลอง.....140
ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีแอลที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำการกำหนดค่า MPH และค่า MRCO ในกรณีต่าง ๆ พร้อมทั้งค่า MPH, ค่า MRCO และค่าดัชนีสมรรถนะที่ได้จากการทดลอง.....143
ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำการกำหนดค่า MPH และค่า MRCO ในกรณีต่าง ๆ พร้อมทั้งค่า MPH, ค่า MRCO และค่าดัชนีสมรรถนะที่ได้จากการทดลอง.....146
ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอพีที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำการกำหนดค่า MPH และค่า MRCO ในกรณีต่าง ๆ พร้อมทั้งค่า MPH, ค่า MRCO และค่าดัชนีสมรรถนะที่ได้จากการทดลอง.....149
ตารางที่ 5.6 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำการกำหนดค่า MPH และค่า MRCO ในกรณีต่าง ๆ พร้อมทั้งค่า MPH, ค่า MRCO และค่าดัชนีสมรรถนะที่ได้จากการทดลอง.....152

หน้า

ตารางที่ 5.7 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำการกำหนดค่า MPH และค่า MRCO ในกรณีต่าง ๆ พร้อมทั้งค่า MPH, ค่า MRCO และค่าดัชนีสมรรถนะที่ได้จากการทดลอง.....155

ตารางที่ 5.8 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำการกำหนดค่า MPH และค่า MRCO ในกรณีต่าง ๆ พร้อมทั้งค่า MPH, ค่า MRCO และค่าดัชนีสมรรถนะที่ได้จากการทดลอง.....158

ตารางที่ 5.9 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำการกำหนดค่า MPH และค่า MRCO ในกรณีต่าง ๆ พร้อมทั้งค่า MPH, ค่า MRCO และค่าดัชนีสมรรถนะที่ได้จากการทดลอง.....161

ตารางที่ 5.10 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำการกำหนดค่า MPH และค่า MRCO ในกรณีต่าง ๆ พร้อมทั้งค่า MPH, ค่า MRCO และค่าดัชนีสมรรถนะที่ได้จากการทดลอง.....164

ตารางที่ 5.11 ผลสรุปการเปรียบเทียบความสามารถในการปรับให้ได้ตามข้อกำหนดจากจำนวนกรณีที่ให้ค่าดัชนีสมรรถนะเป็นบวกของตัวควบคุมทั้ง 10 ชนิด.....167

ตารางที่ 5.12 ผลสรุปการเปรียบเทียบความง่ายในการปรับจูนตัวควบคุมทั้ง 10 ชนิด.....168

ตารางที่ 5.13 ค่าเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูทของสัญญาณการไหลขาออกและค่าจากการปรับเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูทของสัญญาณการไหลขาออกของตัวควบคุมทั้ง 10 ชนิด.....171

ตารางที่ 5.14 ผลสรุปการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูทของสัญญาณการไหลขาออก.....173

หน้า

ตารางที่ 5.15 ค่าเปอร์เซ็นต์อ็อพเซ็ทของระดับของเหลวที่สภาวะคงตัวและค่าจากการปรับระดับของเหลวที่สภาวะคงตัวของตัวควบคุมทั้ง 10 ชนิดในกรณีต่าง ๆ....177
ตารางที่ 5.16 แสดงเวลาที่ใช้เข้าสู่สภาวะคงตัวของระดับของเหลวและค่าจากการปรับเวลาที่ใช้เข้าสู่สภาวะคงตัวของระดับของเหลวของตัวควบคุมทั้ง 10 ชนิดในกรณีต่าง ๆ....179
ตารางที่ 5.17 ผลสรุปการเปรียบเทียบความสามารถในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของระดับของเหลวของตัวควบคุมทั้ง 10 ชนิด....181
ตารางที่ 5.18 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) และค่าจากการปรับเปอรเซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่า MPH ของตัวควบคุมทั้ง 10 ชนิดในกรณีต่าง ๆ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลดจาก 100 % สเต็พ เป็น 200 % สเต็พ....207
ตารางที่ 5.19 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (MRCO) และค่าจากการปรับเปอรเซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่า MRCO ของตัวควบคุมทั้ง 10 ชนิดในกรณีต่าง ๆ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรโหลดจาก 100 % สเต็พ เป็น 200 % สเต็พ....209
ตารางที่ 5.20 ผลสรุปการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรโหลดของตัวควบคุมทั้ง 10 ชนิด....211
ตารางที่ 5.21 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) และค่าจากการปรับเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่า MPH ของตัวควบคุมทั้ง 10 ชนิดในกรณีต่าง ๆ เมื่อทำการสร้างสัญญาณรบกวนขนาด 10 % ขึ้นในระบบการควบคุม....237
ตารางที่ 5.22 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (MRCO) และค่าการปรับเปอร์เซ็นการเพิ่มขึ้นของค่า MRCO ของตัวควบคุมทั้ง 10 ชนิดในกรณีต่าง ๆ เมื่อทำการสร้างสัญญาณรบกวนขนาด 10 % ขึ้นในระบบการควบคุม....239

หน้า

ตารางที่ 5.23 ผลสรุปการเปรียบเทียบความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของตัวควบคุม
ทั้ง 10 ชนิด....241
ตารางที่ 6.1 ผลการสรุปเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ย....245
ตารางที่ 6.2 สรุปผลการลำดับสมรรถนะของตัวควบคุมระดับ
แบบเฉลี่ยชนิดต่าง ๆ....248
ตารางที่ 6.3 สรุปผลการลำดับกลุ่มสมรรถนะของตัวควบคุมระดับ
แบบเฉลี่ยชนิดต่าง ๆ จากค่าสมรรถนะที่ใกล้เคียงกัน....248
ตารางที่ 6.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนของตัวควบคุมทั้ง 5 ชนิด
ในกรณีศึกษาที่ 1 252
ตารางที่ 6.5 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับ
ทั้ง 5 ชนิดในกรณีศึกษาที่ 1 252
ตารางที่ 6.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนของตัวควบคุมทั้ง 5 ชนิด
ในกรณีศึกษาที่ 2 257
ตารางที่ 6.7 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับ
ทั้ง 5 ชนิดในกรณีศึกษาที่ 2 257
ตารางที่ 6.8 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนของตัวควบคุมทั้ง 5 ชนิด
ในกรณีศึกษาที่ 3 262
ตารางที่ 6.9 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับ
ทั้ง 5 ชนิดในกรณีศึกษาที่ 3 262
ตารางที่ 6.10 สรุปข้อมูลของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยชนิดต่าง ๆ ที่สนใจศึกษา 275

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดของถัง
CO	ตัวควบคุมขาออก (controller output)
C_p	โหมดพีขาออก (porprotional mode output)
e	ความผิดพลาด (error)
e_b	ช่วงความผิดพลาด (error band width)
F	ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุมแบบป้อนหน้า (Feedforward controller transfer function)
FT	ตัวส่งสัญญาณการไหล (Flow transmitter)
G_C	ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback controlier transfer funtion)
G_L	ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของตัวแปรโหลด (load variable transfer function)
G_M	ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของตัวแปรปรับค่า (manipulated variable transfer function)
H, h	ระดับของเหลว
h_T	ตัวส่งสัญญาณระดับขาออก (tank-level transmitter output, %)
ΔH	ช่วงของตัวส่งสัญญาณระดับ (level transmitter span)
ΔH_{peak}	ความแตกต่างของพีกระดับกับค่าเซ็ทพอยท์ (peak level deviation from set point)
H_{set}	ค่าเซ็ทพอยท์ระดับ (level set point)
H_{offset}	ค่าอ็อฟเซ็ทที่สภาวะคงตัว (Steady-state level offset)
K	แฟคเตอร์ของความไม่เชิงเส้น (nonlinearity factor)
K_L	ค่าเกนของลูพ
K_C	ค่าเกนของตัวควบคุมแบบป้อนกลับ
K_F	ค่าเกนของตัวควบคุมแบบป้อนหน้า
K_{co}	ค่าเกนเมื่อความผิดพลาดเป็นศูนย์ของตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง (zero-error gain of wide-range controller)
K_T	ค่าเกนของตัวส่งสัญญาณ

K_v	ค่าเกนของวาล์ว
LC	ตัวควบคุมระดับ
LOC	ลักษณะจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก
MPH	พีกระดับของเหลวสูงสุด (maximum peak height)
MRCO	อัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (maximum rate of change in outflow)
Q	การไหล
Q_i	การไหลขาเข้า
ΔQ_i	ขนาดของการรบกวนแบบสเต็พในการไหลขาเข้า
Q_o	การไหลขาออก
Q_{omax}	การไหลขาออกสูงสุด
S	ตัวแปรของลาปลาสทรานสฟอร์ม
t	เวลา
T	ค่าคงที่ของเวลา (time constant)
X	$Q_{omax} / \Delta Q_i$
V	ปริมาตรของถัง
ξ	สัมประสิทธิ์การแดมพ์ (damping coefficient)
ρ	ความหนาแน่นของของเหลว
τ_H	A / K_L
τ_I	เวลารีเซ็ท (reset time)
τ_{I0}	ค่าคงที่เวลาอินทิกรัลเมื่อความผิดพลาดเป็นศูนย์ของตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง (zero-error integral time constant for wide-range controller)
τ_{I1} ,τ_{I2}	ค่าคงที่เวลาอินทิกรัลของตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพี
τ_v	เวลาที่ใช้ในถัง (tank's hold-up time) = $V/ Q_{o\,max}$