

การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตสำหรับควบคุมค่าพีเอชในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

นางสาวนารัตน์ ควงวัง



สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา พ.ศ.2542

ISBN 974-332-622-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

12 พ.ย. 2546

I 19246961

**STATE FEEDBACK CONTROLLER APPLICATION FOR  
THE WASTE WATER PH-CONTROL PROCESS**



**Miss Wanarat Duangwang**

**สถาบันวิทยบริการ**

**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**

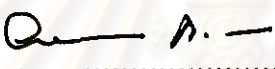
**Academic Year 1999**

**ISBN 974-332-622-7**


หัวข้อวิทยานิพนธ์      การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตตสำหรับควบคุมค่าพีเอชใน  
กระบวนการบำบัดน้ำเสีย  
โดย                              นางสาวนารัตน์ ดวงวัง  
ภาควิชา                            วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษา              ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
.....รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนันต์ชัย คงจันทร์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. หทัยชนก สุริยะบรรเลง)

วนรัตน์ ดวงวัง : การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตสำหรับควบคุมค่าพีเอชใน  
กระบวนการบำบัดน้ำเสีย (STATE FEEDBACK CONTROLLER APPLICATION FOR THE  
WASTE WATER PH-CONTROL PROCESS) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ไพศาล กิตติศุภกร; 145  
หน้า. ISBN 974-332-622-7.

โรงงานอุตสาหกรรมเคมีหลายประเภทมีการใช้กรดแก่ อาทิเช่น กรดไฮโดรคลอริกและกรด  
ซัลฟูริกในการทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงาน การใช้กรดเหล่านี้ทำให้น้ำเสียมีความเป็นกรดสูงซึ่งต้องผ่าน  
กระบวนการบำบัดก่อนปล่อยทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อม กระบวนการบำบัดน้ำเสียเกี่ยวข้องกับการปรับค่าพีเอช  
ซึ่งเป็นที่ทราบว่าเป็นปัญหาการควบคุมที่มีความท้าทายมาก เนื่องจากค่าพีเอชมีความไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้น  
การควบคุมค่าพีเอชด้วยตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ไม่สามารถให้ผลการควบคุมดีนัก ด้วยเหตุนี้ตัวควบคุมแบบ  
ฐานจำลองได้นำมาใช้ในการควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสีย

งานวิจัยนี้ได้เสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตซึ่งเป็นหนึ่งในตัวควบคุมแบบ  
ฐานจำลองในการควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียของโรงงานเหล็กกริดเย็น นอกจากนี้ตัวกรองกาลมานถูกนำมา  
ใช้ร่วมกับสมการของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าหรือไม่แน่นอน  
กรณีศึกษาได้กระทำโดยสร้างสมการของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตและสมการแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์บนโปรแกรมแมทแล็บ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตนั้นสามารถ  
นำไปควบคุมตัวแปรขาออกหลายตัว และให้สมรรถนะดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอดีในกรณี  
ที่มีตัวรบกวนเป็นอัตราการใช้และความเข้มข้นของน้ำเสียและกรด นอกจากนี้การใช้ตัวกรองกาลมานใน  
สมการของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตสามารถเพิ่มสมรรถนะของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตในกรณี  
ของตัวแปรวัดมีความสัญญาณรบกวน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา ๒๕๕๒

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

# 3971914021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: KALMAN FILTER/ PH CONTROL/STATE FEEDBACK CONTROL

WANARAT DUANGWANG: STATE FEEDBACK CONTROLLER APPLICATION FOR THE WASTE WATER PH-CONTROL PROCESS. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. PAISAN KITTISUPAKORN, Ph.D. 145 pp. ISBN 974-332-622-7.

Several chemical industrial plants have used strong acids such as Hydrochloric acid and Sulfuric acid to clean up material surfaces. The use of these acids causes the waste water with strong acidity which need to be treated before draining to the environment. The treatment process of the waste water involve a pH adjustment which has been known as one of the most challenging control problem because of the nonlinearity of the pH value. Therefore, a conventional pH controller cannot give a good control response. As a result, the use of model-based controllers for controlling the pH value of the waste water has been proposed.

This research presents the application of a state feedback controller, one of model-based controllers, in the control of the pH value of the waste water of a Cold Roll Mill Plant. In addition, Kalman filter is incorporated in the state feedback control formulation to estimate unknown/uncertain parameters. Simulation study has been done by formulating the state feedback controller as well as the mathematical model of the plant on a Matlab program. Simulation results indicate that the state feedback controller can be used to control multi-outputs and gives a better performance in comparison to a PID controller does, in the presence of disturbances in feed flowrate and feed concentration of waste water and acid. Furthermore, the addition of the Kalman filter in the state feedback controller formulation can improve the performance of the state feedback controller in the presence of random noise in measurements.

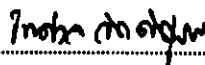
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

ปีการศึกษา.....2542.....

ลายมือชื่อนิสิต..........

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..........

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา และแนวคิดต่าง ๆ ในงานพัฒนางานวิจัย ตลอดจนแก้ไขและตรวจทานวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งให้กำลังใจในการฟันฝ่าอุปสรรคต่าง ๆ จนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ ประธานกรรมการ, อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี และอาจารย์ ดร.หทัยชนก คุริยะบรรเลง ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความสนใจและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยสะพานเซเช็ดไวร์ ที่ได้เอื้อเฟื้อให้ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูล มาทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือสนับสนุนทางการเงินในด้านการศึกษาและการทำงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จ

ขอบคุณเพื่อน ๆ รุ่นพี่ และน้อง ๆ ทุกคนที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย ด้วยดีตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา และมารดา ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ .....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ด
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ท
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนของงานวิจัย .....	4
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
2. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การควบคุมค่าพีเอช.....	6
2.2 การควบคุมแบบป้อนกลับสเตต .....	14
2.3 ตัวประมาณค่าคาลมานฟิลเตอร์ .....	15
2.4 บทสรุป .....	17
3. ทฤษฎีการควบคุม .....	18
3.1 บทนำ.....	18
3.1 การควบคุมแบบป้อนกลับสเตต .....	18
3.2 การประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ .....	32
4. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการที่ใช้ในการทดลอง และขั้นตอนการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต .....	38

4.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการควบคุมค่าพีเอช .....	38
4.2 ขั้นตอนการการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตต และการประมาณค่าสแตตโดยใช้คาลมานฟิลเตอร์ .....	44
4.3 บทสรุป.....	51
5. การทดลอง ผลการทดลอง .....	52
5.1 การควบคุม ณ สภาวะคงที่ .....	52
5.2 เมื่อมีตัวรบกวน .....	57
5.3 เมื่อมีแบบจำลองของกระบวนการผิดพลาด .....	71
5.4 เมื่อตัวแปรวัดมีสัญญาณรบกวน .....	89
6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง .....	95
6.1 วิเคราะห์.....	95
6.2 สรุปผล.....	97
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	98
รายการอ้างอิง .....	99
ภาคผนวก.....	102
ก. กระบวนการบำบัดน้ำเสีย .....	103
ข. มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง ตามประกาศของกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม .....	112
ค. โปรแกรมแมทแล็บและตัวอย่างการเขียนโปรแกรมควบคุมค่าพีเอช .....	117
ง. ข้อมูลและรายละเอียดจากผลการทดลอง.....	131
ประวัติผู้เขียน .....	145



## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพของกระบวนการเมื่อไม่มีการควบคุม.....	21
รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพของกระบวนการเมื่อมีการควบคุมแบบป้อนกลับสเตต .....	21
รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพของกระบวนการเมื่อมีการควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ร่วมกับพีไอ -คอนโทรล.....	24
รูปที่ 3.4 กราฟการตอบสนองของกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ เพิ่มขึ้นจากเดิมหนึ่งเท่าตัวสำหรับระบบที่มีอันดับเท่ากับ 4 โดยมีค่าโพลเท่ากับ $[-2, -10, -1-j, -1+j]$ .....	27
รูปที่ 3.5 แสดงโมเดลของระบบที่มีสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม.....	34
รูปที่ 3.6 โครงสร้างของโมเดลของคาลมานฟิลเตอร์ .....	35
รูปที่ 3.7 แสดงแผนภาพของกระบวนการควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ร่วมกับการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์.....	37
รูปที่ 4.1 แสดงไดอะแกรมของกระบวนการควบคุมค่าพีเอชและระดับน้ำในถังสะเทิน.....	39
รูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ร่วมกับพีไอคอนโทรล ในการควบคุมค่าพีเอช.....	44
รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ในการควบคุมค่าพีเอช... ..	45
รูปที่ 5.1.1 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง (h) โดยมีค่า closed-loop pole = $[-1.5, -24]$ และ $K_i = K_p/3$ (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	54
รูปที่ 5.1.1 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตควบคุมค่าพีเอช โดยมีค่า closed-loop pole = $[-1.5, -24]$ และ $K_i = K_p/3$ (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ).....	54
รูปที่ 5.1.2 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง $K_{ci} = 20 \text{ m}^2/\text{min}, \tau_{ii} = 3.07 \text{ min}$ (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ).....	55

รูปที่ 5.1.2 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ควบคุมค่าพีเอช  $K_{ci} = 20 \text{ m}^2/\text{min}$ ,  
 $\tau_i = 3.07 \text{ min}$  (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) ..... 55

รูปที่ 5.1.3.1 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตตพร้อมกับกาลมานฟิลเตอร์  
 ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง ซึ่งมีค่า  $P_o = [100 \ 0; 0 \ 10]$ ,  $Q = [1e+06 \ 0; 0 \ 1e+08]$   
 และ  $R = [1.2 \ 0; 0 \ 100]$ ..... 56

รูปที่ 5.1.3.1 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตตพร้อมกับกาลมานฟิลเตอร์  
 ควบคุมค่าพีเอช ซึ่งมีค่า  $P_o = [100 \ 0; 0 \ 10]$ ,  $Q = [1e+06 \ 0; 0 \ 1e+08]$ ,  
 และ  $R = [1.2 \ 0; 0 \ 100]$  ..... 56

รูปที่ 5.2.1 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตต ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง  
 กรณีมีตัวรบกวน + qa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) ... 59

รูปที่ 5.2.1 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตต ควบคุมค่าพีเอช  
 กรณีมีตัวรบกวน + qa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) ..... 59

รูปที่ 5.2.2 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง  
 กรณีมีตัวรบกวน + qa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) ..... 60

รูปที่ 5.2.2 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมค่าพีเอช  
 กรณีมีตัวรบกวน + qa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ). ..... 60

รูปที่ 5.3.1 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตต ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง  
 กรณีมีตัวรบกวน + qw 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....62

รูปที่ 5.3.1 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตต ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง  
 กรณีมีตัวรบกวน + qw 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....62

รูปที่ 5.3.2 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง  
 กรณีมีตัวรบกวน + qw 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....63

รูปที่ 5.3.2 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง  
 กรณีมีตัวรบกวน + qw 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....63

รูปที่ 5.4.1 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตต ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง  
 กรณีมีตัวรบกวน + CHa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) ..... 65

รูปที่ 5.4.1 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตต ควบคุมค่าพีเอช  
 กรณีมีตัวรบกวน + CHa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ)..... 65

รูปที่ 5.4.2 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง กรณีมีตัวรบกวน+CHa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ).....	66
รูปที่ 5.4.2 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมค่าพีเอช กรณีมีตัวรบกวน +CHa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	66
รูปที่ 5.4.1 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง กรณีมีตัวรบกวน + CHw 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	68
รูปที่ 5.4.1 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ควบคุมค่าพีเอช กรณีมีตัวรบกวน + CHw 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	68
รูปที่ 5.5.2 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง กรณีมีตัวรบกวน +CHw 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ).....	69
รูปที่ 5.5.2 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมค่าพีเอช กรณีมีตัวรบกวน +CHw 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	69
รูปที่ 5.3.1.1.1 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง กรณี Plant mismatch +qa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	73
รูปที่ 5.3.1.1.1 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ควบคุมค่าพีเอช กรณี Plant mismatch + qa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	73
รูปที่ 5.3.1.1.2 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง กรณี Plant mismatch + qa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	74
รูปที่ 5.3.1.1.2 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมความสูงค่าพีเอช กรณี Plant mismatch + qa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	74
รูปที่ 5.3.1.1.3 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง กรณี Plant mismatch + qa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ).....	75
รูปที่ 5.3.1.1.3 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมาน ฟิลเตอร์ ควบคุมค่าพีเอช กรณี Plant mismatch + CHw 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	75

รูปที่ 5.3.1.1.3 c) แสดงค่าประมาณและค่าจริงของตัวแปรสเตต $h$ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมาน ฟิลเตอร์ กรณี Plant mismatch+CHw 20%.....	76
รูปที่ 5.3.1.1.3 d) แสดงค่าประมาณและค่าจริงของตัวแปรสเตต $pH$ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมาน ฟิลเตอร์ กรณี Plant mismatch+CHw 20%.....	76
รูปที่ 5.3.1.1.1 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง กรณี Plant mismatch + CHa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	77
รูปที่ 5.3.1.1.2 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ควบคุมความสูงค่าพีเอช กรณี Plant mismatch + CHa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	77
รูปที่ 5.3.1.1.2 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง กรณี Plant mismatch + CHa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	78
รูปที่ 5.3.1.1.2 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมความสูงค่าพีเอช กรณี Plant mismatch + CHa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	78
รูปที่ 5.3.1.1.3 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง กรณี Plant mismatch + CHa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	79
รูปที่ 5.3.1.1.3 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมาน ฟิลเตอร์ ควบคุมค่าพีเอช กรณี Plant mismatch + CHa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	79
รูปที่ 5.3.1.1.3 c) แสดงค่าประมาณและค่าจริงของตัวแปรสเตต $h$ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมาน ฟิลเตอร์ กรณี Plant mismatch+CHa 20%.....	80
รูปที่ 5.3.1.1.3 d) แสดงค่าประมาณและค่าจริงของตัวแปรสเตต $pH$ เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมาน ฟิลเตอร์ กรณี Plant mismatch+CHa 20%.....	80
รูปที่ 5.3.2.1.1 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ควบคุม ความสูงของระดับน้ำในถัง กรณี Controller mismatch +qa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ).....	82

รูปที่ 5.3.2.1.1 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ควบคุมค่าพีเอช	
กรณี Controller mismatch + qa 20% (บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ).....	82
รูปที่ 5.3.2.1.2 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมาน ฟิลเตอร์	
ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง กรณี Controller mismatch + CHw 20%	
(บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ).....	83
รูปที่ 5.3.2.1.2 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์	
ควบคุมค่าพีเอช กรณี Controller mismatch + CHw 20%	
(บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	83
รูปที่ 5.3.2.1.2 c) แสดงค่าประมาณและค่าจริงของตัวแปรสเตต $h$	
เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมาน ฟิลเตอร์	
กรณี Controller mismatch+CHw 20%.....	84
รูปที่ 5.3.2.1.2 d) แสดงค่าประมาณและค่าจริงของตัวแปรสเตต $pH$	
เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมาน ฟิลเตอร์	
กรณี Controller mismatch+CHw 20%.....	84
รูปที่ 5.3.2.2.1 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ควบคุม ความสูงของระดับน้ำในถัง	
กรณี Controller mismatch+CHa 20%	
(บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ).....	85
รูปที่ 5.3.2.2.1 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ควบคุมค่าพีเอช	
กรณี Controller mismatch + CHa 20%	
(บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ).....	85
รูปที่ 5.3.2.2.2 a) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์	
ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง กรณี Controller mismatch + CHa 20%	
(บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ) .....	86
รูปที่ 5.3.2.2.2 b) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์	
ควบคุมค่าพีเอช กรณี Controller mismatch + CHa 20%	
(บน : ตัวแปรควบคุม ล่าง : ตัวแปรปรับ).....	86

รูปที่ 5.3.2.2.2 c) แสดงค่าประมาณและค่าจริงของตัวแปรสเตรต <i>h</i> เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตรตร่วมกับคาลมาน ฟิลเตอร์ กรณี Controller mismatch+CHa 20%.....	87
รูปที่ 5.3.2.2.2 d) แสดงค่าประมาณและค่าจริงของตัวแปรสเตรต <i>pH</i> เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตรตร่วมกับคาลมาน ฟิลเตอร์ กรณี Controller mismatch+CHa 20%.....	87
รูปที่ 5.1.4.1 a) เมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตรต ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง กรณีตัวแปรวัดมีสัญญาณรบกวน.....	90
รูปที่ 5.1.4.1 b) เมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตรต ควบคุมค่าพีเอช กรณีตัวแปรวัดมีสัญญาณรบกวน.....	90
รูปที่ 5.1.4.2 a) เมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง กรณีตัวแปรวัดมีสัญญาณรบกวน .....	91
รูปที่ 5.1.4.2 b) เมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมค่าพีเอช กรณีตัวแปรวัดมีสัญญาณรบกวน.....	91
รูปที่ 5.1.4.3 a) เมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตรตร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง กรณีตัวแปรวัดมีสัญญาณรบกวน.....	92
รูปที่ 5.1.4.3 b) เมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตรตร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ควบคุมค่าพีเอช กรณีตัวแปรวัดมีสัญญาณรบกวน.....	92
รูปที่ 5.1.4.3 c) รูปแสดงค่าตัวแปรวัด Level ที่มีสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน (เส้นประ)ตัวแปรเอาท์พุทที่ได้จากการประมาณ (เส้นทึบ) กรณีตัวแปรวัดมีสัญญาณรบกวน.....	93
รูปที่ 5.1.4.3 d) รูปแสดงค่าตัวแปรวัด pH ที่มีสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน (เส้นประ)ตัวแปรเอาท์พุทที่ได้จากการประมาณ(เส้นทึบ) กรณีตัวแปรวัดมีสัญญาณรบกวน.....	93
รูปที่ ก.1 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ตามปริมาณต่างๆที่ใส่ลงไปทำปฏิกิริยา.....	107
รูปที่ ค.1 กระบวนการควบคุมค่าพีเอชในถังสะเทิน .....	120
รูปที่ ง.1 a) แสดงกราฟการตอบสนองของกระบวนการควบคุมความสูงของ ระดับน้ำในถังเมื่อไม่มีตัวควบคุม .....	131



รูปที่ ง.1 b) แสดงกราฟการตอบสนองของกระบวนการควบคุมค่าพีเอช เมื่อไม่มีตัวควบคุม.....	131
รูป ง.2.1 แสดงค่า closed - loop poles กับการควบคุม Level (รูปบน) และการควบคุม pH (รูปล่าง) ด้วยตัวควบคุมแบบ พี-ป้อนกลับสเตต.....	132
รูป ง.2.2 การควบคุมค่าความสูง(รูปบน)การควบคุม pH (รูปล่าง) ด้วยตัวควบคุม แบบพีไอ-ป้อนกลับสเตต โดยมีค่า closed-loop poles = [-1.5,-24] แต่มี Ki ต่าง ๆ กัน.....	135
รูปที่ ง.3.1 แสดงการหาค่าตัวจูนพารามิเตอร์พีไอดี โดยวิธี Continuous Cycling Method ของ Ziegler-Nichols ในการควบคุมค่าพีเอช .....	138
รูปที่ ง.3.2 แสดงการหาค่า Kc และ $\tau_i$ ของการควบคุมแบบพีไอดี สำหรับการควบคุม ระดับน้ำโดยวิธี Trial and Error (ค่าแรกเป็น Kc และค่าที่สองเป็น $\tau_i$ ).....	139
รูป ง.4.1 แสดงค่าประมาณและค่าจริงของค่าแปรสแตต เมื่อ $P_o = [100 \ 0 \ ; 0 \ 10 \ ]$ $Q = [1e+06 \ 0 \ 0 \ ; 0 \ 1e+08 \ ]$ $R = [1.2 \ 0 \ ; 0 \ 100]$ .....	142
รูป ง.4.2 แสดงค่าความแปรปรวนร่วมของความผิดพลาดจากการประมาณ (P).....	142

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ณ สภาวะคงที่ .....	43
ตารางที่ 4.2 ค่าสมาชิกในเมทริกซ์ จาคอบีเยน A,B, C ,D.....	48
ตารางที่ 5.1 ค่าอินทิกรัลของความผิดพลาดสัมบูรณ์(AE) ของการควบคุมระดับน้ำในถัง และค่าพีเอชของน้ำเสียในถัง เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดต่าง ๆ ณ สภาวะเริ่มต้น.....	57
ตารางที่ 5.2. ค่าอินทิกรัลของความผิดพลาดสัมบูรณ์(AE) ของการควบคุมระดับน้ำในถัง และค่าพีเอชของน้ำเสียในถัง เมื่อมีตัวรบกวนต่าง ๆ เพิ่มขึ้น 20%ของของเดิม .....	70
ตารางที่ 5.3 ค่าอินทิกรัลของความผิดพลาดสัมบูรณ์(AE) ของการควบคุมระดับน้ำในถัง และค่าพีเอชของน้ำเสียในถัง เมื่อแบบจำลองผิดพลาด .....	88
ตารางที่ 5.4 ค่าอินทิกรัลของความผิดพลาดสัมบูรณ์(AE) ของการควบคุมระดับน้ำในถัง และค่าพีเอชของน้ำเสียในถัง เมื่อตัวแปรวัดมีสัญญาณรบกวน .....	94
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลของสารเคมีเกี่ยวกับปริมาณที่ต้องใช้ในการทำปฏิกิริยาสะเทิน โดยค่า neutralization factor เป็นค่าเปรียบเทียบความสามารถในการทำปฏิกิริยา เมื่อเทียบกับน้ำหนักของ calcium oxide (CaO) .....	109
ตารางที่ ง.1 ตารางแสดงค่า IAE เมื่อมีการควบคุมแบบพี-ป้อนกลับสเตต เมื่อมี ค่าclosed- loop polesต่าง ๆ .....	133
ตารางที่ ง.2 ตารางแสดงค่า IAE เมื่อมีการควบคุมแบบพีไอ-ป้อนกลับสเตต เมื่อมีค่า Ki ต่าง ๆ .....	136
ตารางที่ ง.3 ตารางแสดงค่า IAE ของการควบคุม level และ pH ต่อการจูนค่า Kc และ $T_i$ .....	139
ตารางที่ ง.4 ตารางแสดงค่า IAE เมื่อมีการควบคุมแบบป้อนกลับสเตต ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ เมื่อมีค่า P, Q และ R ต่างๆ กรณี สภาวะคงที่.....	143



## คำอธิบายสัญลักษณ์

- $A$  = พื้นที่หน้าตัดของถัง  
 $V$  = ปริมาตรของน้ำในถัง  
 $h$  = ความสูงของระดับน้ำในถัง  
 $\rho$  = ความหนาแน่นของสารละลาย  
 $q_a$  = อัตราไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสียเข้าถัง  
 $q_w$  = อัตราไหลเชิงปริมาตรของกรดเสียเข้าถัง  
 $q_b$  = อัตราไหลเชิงปริมาตรของด่างโซดาไฟเข้าถัง  
 $q$  = อัตราไหลออกเชิงปริมาตรของน้ำทิ้ง  
 $C_{H^+a}$  = ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในกรดเสีย  
 $C_{H^+w}$  = ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในน้ำเสีย  
 $C_{H^+}$  = ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในถัง  
 $C_{OH^-}$  = ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในด่าง  
 $K_p$  = อัตราขยายของการควบคุมแบบป้อนกลับสเตต  
 $K_i$  = อัตราขยายของการควบคุมแบบอินทิกรัลในการควบคุมป้อนกลับสเตต  
 $K_c$  = ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดี  
 $\tau_I$  = ค่าคงที่เวลาอินทิกรัลของตัวควบคุมแบบพีไอดี  
 $\tau_D$  = ค่าคงที่เวลาเดอริเวทีฟของตัวควบคุมแบบพีไอดี  
 $\Delta t$  = sampling time  
 $e$  = ความผิดพลาด  
 $\lambda$  = ค่าโพลวงปิด  
 $IAE$  = ค่าอินทิกรัลของความผิดพลาดสัมบูรณ์  
 $pH_{SP}$  = ค่าพีเอชเซ็ทพอยท์  
 $h_{SP}$  = ค่าเซ็ทพอยท์ของความสูงของระดับน้ำในถัง  
 $p\hat{H}$  = ค่าประมาณของค่าพีเอชในถัง  
 $\hat{h}$  = ค่าประมาณของความสูงของระดับน้ำในถัง  
 $P$  = ค่าความแปรปรวนร่วมของความผิดพลาดในการประมาณสเตต

- $Q$  = ค่าความแปรปรวนร่วมของสัญญาณรบกวนระบบ  
 $R$  = ค่าความแปรปรวนร่วมของสัญญาณรบกวนจากการวัด  
 $K$  = ค่าเกนของคาลมานฟิลเตอร์

#### สัญลักษณ์ตัวห้อย

- $sp$  = เซ็ทพอยท์  
 $s$  = ที่สภาวะคงที่ (steady state)

#### สัญลักษณ์อักษรกรีก

- $\varepsilon$  = Expectation  
 $\eta$  = สัญญาณรบกวนแบบสุ่มที่การวัด  
 $\xi$  = สัญญาณรบกวนแบบสุ่มจากการรบกวนที่ระบบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา และแนวคิดต่าง ๆ ในงานพัฒนางานวิจัย ตลอดจนแก้ไขและตรวจทานวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งให้กำลังใจในการฟันฝ่าอุปสรรคต่าง ๆ จนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ ประธานกรรมการ, อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี และอาจารย์ ดร.หทัยชนก คุริยะบรรเลง ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความสนใจและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยสะพานเหล็กไวร์ ที่ได้เอื้อเฟื้อให้ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูล มาทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ มุถุนิธิประไพ กุลศิริ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือสนับสนุนทางการเงินในด้านการศึกษาและการทำงานวิจัย ครั้งนี้จนสำเร็จ

ขอบคุนเพื่อน ๆ รุ่นพี่ และน้อง ๆ ทุกคนที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย ด้วยดีตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา และมารดา ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย