


๑๓๔

ตัวชดเชยเดดไทม์ในการควบคุมกระบวนการแบบป้อนกลับ



นาย บัญชา เวชวิทยาขลัง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2538

ISBN 974-632-645-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16884401

**DEADTIME COMPENSATORS IN FEEDBACK PROCESS  
CONTROL**

**Mr. Bancha Wetwitayaklung**

**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 974-632-645-7**

หัวข้อวิทยานิพนธ์      ตัวชดเชยเคดใหม่ในการควบคุมกระบวนการแบบป้อนกลับ  
โดย                              นาย บัญชา เวชวิทยาลัง  
ภาควิชา                        วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษา        อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี

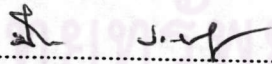
---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

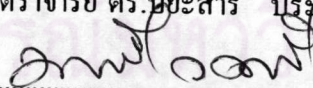


.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ อุงสุวรรณ)

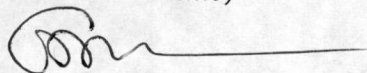
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.นิยะสาร ประเสริฐธรรม)



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



.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

บัญชี เลขวิทยาลัง : ตัวชดเชยเดดไทม์ในการควบคุมกระบวนการแบบป้อนกลับ (DEADTIME COMPENSATORS IN FEEDBACK PROCESS CONTROL) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. มนตรี วงศ์ศรี, 176 หน้า. ISBN 974-632-945-7

ลักษณะที่สำคัญของกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีคือ มีเดดไทม์และความซับซ้อนของกระบวนการ เดดไทม์นานมีผลเสียต่อสมรรถนะของระบบควบคุมกระบวนการทางวิศวกรรมเคมี ตัวชดเชยเดดไทม์ 2 ชนิดคือ ตัวทำนายของสมิทและตัวทำนายเชิงวิเคราะห์ได้ถูกนำมาศึกษาแบบจำลอง โดยนำมาพร้อมกับการควบคุมกระบวนการแบบป้อนกลับ กระบวนการที่ใช้ในการศึกษาเป็นกระบวนการอันดับ 2 และอันดับ 4 พบว่า 1) ทั้งตัวทำนายของสมิท หรือตัวทำนายเชิงวิเคราะห์ ให้ผลการตอบสนองและค่า ITAE ในกรณีเซ็ทพอยท์เปลี่ยนดีกว่าในกรณีโหลดเปลี่ยน 2) ความผิดพลาดของ  $\tau_m$  มีผลต่อการตอบสนองน้อยกว่าความผิดพลาดของ  $\theta_m$  นั่นคือ สมรรถนะของระบบควบคุมอ่อนไหวต่อ ความผิดพลาดของ  $\tau_m$  มากกว่า ความผิดพลาดของ  $\theta_m$  3) พบว่าตัวทำนายเชิงวิเคราะห์จะมีขอบเขตของความผิดพลาดที่ยอมรับได้น้อยกว่าตัวทำนายของสมิท เมื่อความผิดพลาดของโมเดลมีมากกว่า +20% หรือต่ำกว่า -10% ตัวทำนายเชิงวิเคราะห์ให้ผลการตอบสนองที่ไม่เสถียร 4) กรณีที่โมเดลที่มีความถูกต้องแม่นยำ ตัวทำนายเชิงวิเคราะห์จะให้ผลการตอบสนองที่เร็วกว่าและค่า ITAE ที่ต่ำกว่าตัวทำนายของสมิท แต่ตัวทำนายของสมิท จะสามารถทนทานต่อความผิดพลาดของโมเดลได้ดีกว่าตัวทำนายเชิงวิเคราะห์มาก



ศูนย์วิทยพัชกร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

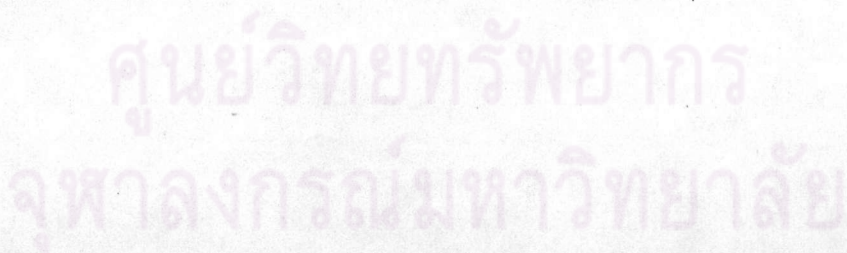
ภาควิชา ..... วิศวกรรมเคมี  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา ..... 2538

ลายมือชื่อนิติต ..... นิติต ๒๐๓๒๓๖  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## C317824 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: DEADTIME, FEEDBACK CONTROL, SMITH PREDICTOR, ANALYTICAL PREDICTOR  
BANCHA WETWITAYAKLUNG : DEADTIME COMPENSATORS IN FEEDBACK  
PROCESS CONTROL. THESIS ADVISOR: DR. MONTREE WONGSRI, D.Sc. 176 pp.  
ISBN 974-632-645-7

The important characteristics of a chemical engineering process are deadtime and process complexity. Long deadtime can deteriorate dynamic performance of a control system of a chemical engineering process. The two deadtime compensators: Smith and analytical predictors with conventional feedback controllers are selected to study their beneficiary via simulation using MATLAB. The process models used in this study are of 2nd and 4th orders. It is found that: 1) Both Smith and analytical predictors give better performance and lower ITAEs in the case of setpoint change than in the case of load change. 2) The error in  $\tau_m$  has less affect to the control performance than the error in  $\theta_m$ , i.e. the performance of the control system is more sensitive to  $\tau_m$  error than to  $\theta_m$  error. 3) The analytical predictor has small range of acceptable modeling error than of the Smith predictor. When the modeling error in deadtime is greater than +20% or lower than -10%, the analytical predictor results in an unstable response. 4) In the case that the model is accurate, the analytical gives the better performance both in speed and ITAE. However, the Smith predictor is more robust to the modeling error more than the analytical predictor.



ภาควิชา..... วิศวกรรมเคมี  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา..... 2538

ลายมือชื่อนิสิต..... มิ่งม โสภณศิริ  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... มิ่งม โสภณศิริ  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาด้วย คិតตลอด อีกทั้งขอขอบคุณบริษัทแซนคอส เคมีคอลซ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ผู้วิจัยได้ทำงานอยู่ใน ปัจจุบัน ที่ได้อนุญาตให้ผู้วิจัยเลิกงานก่อนเวลาในบางวันที่มีการบรรยายเพื่อให้ผู้วิจัยสามารถมาเรียน ได้ทันเวลา 18.30 น. จึงขอขอบคุณบริษัทแซนคอส เคมีคอลซ (ประเทศไทย) จำกัด มา ณ ที่นี้ด้วย และขอขอบคุณ พี่วัลลภ แยมเหมือน ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ แก่ผู้วิจัยจนกระทั่งวิทยา นิพนธ์ฉบับนี้เสร็จลุล่วงได้

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่คอยถาม-ไต่และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญบล็อกไดอะแกรม.....	ณ
สารบัญการตอบสนองและค่า ITAE.....	ด
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของการศึกษาปัญหาเคสใหม่.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนของงานวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
2. ทฤษฎี.....	5
2.1 ลักษณะของการเกิดเคสใหม่.....	5
2.1.1 สาเหตุที่มีเคสใหม่เกิดขึ้น.....	8
2.1.2 ผลเสียของการเกิดเคสใหม่.....	8
2.2 การชดเชยเคสใหม่.....	9
2.2.1 ตัวทำนายของสมิธ.....	9

	หน้า
2.2.2 ตัวทำนายเชิงวิเคราะห์.....	13
2.2.3 ผลการศึกษาของนักวิจัยอื่นๆ.....	20
3. โปรแกรมช่วยวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมแม่เหล็ก.....	23
3.1 การพัฒนาแม่เหล็ก.....	23
3.2 โปรแกรมซิมูเลชัน.....	26
3.2.1 การจำลองแบบโมเดลหรือออกแบบโมเดล.....	26
3.2.2 การวิเคราะห์แบบจำลอง.....	31
3.3 เครื่องมือในการวิเคราะห์อื่น.....	32
3.4 ตัวอย่างการใช้งาน.....	33
3.5 การจัดบล็อกไดอะแกรมที่มีอันคัมมากกว่าหนึ่งโดยวิธีการเปลี่ยนแปลงแบบ สแต็ค.....	36
3.6 การจูนตัวควบคุม.....	41
4. ผลการทดลอง.....	46
4.1 วิธีการทดลอง.....	46
4.1.1 การกำหนดและปรับเปลี่ยนค่าตัวแปร.....	48
4.1.2 การจูนตัวควบคุมกระบวนการ.....	48
4.1.3 การเปรียบเทียบผลการทดลอง.....	49
4.2 ผลการทดลอง.....	49
4.2.1 ตัวทำนายของสมิธซิมูเลทด้วยวิธีของ"ซีเกลอร์-นิโคลส์".....	49
4.2.2 ตัวทำนายเชิงวิเคราะห์ซิมูเลทด้วยวิธีของการควบคุมโมเดลภายใน.....	52
5. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	55





5.1	ตัวทำนายนของสมิธิจิมุเลทด้วยวิธีของ"ซิกเลอร์-นิโคลส์"	55
5.1.1	กระบวนการเป็นแบบสมการอันดับ 2	55
	ก. การเปลี่ยนแปลงแบบโหลดเปลี่ยน	55
	ข. การเปลี่ยนแปลงแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยน	56
5.1.2	กระบวนการเป็นแบบสมการอันดับ 4	58
	ก. การเปลี่ยนแปลงแบบโหลดเปลี่ยน	58
	ข. การเปลี่ยนแปลงแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยน	60
5.2	ตัวทำนายนเชิงวิเคราะห์จิมุเลทด้วยวิธีของการควบคุมวงจรมวจรภายใน	61
5.2.1	กระบวนการเป็นแบบสมการอันดับ 2	61
	ก. การเปลี่ยนแปลงแบบโหลดเปลี่ยน	61
	ข. การเปลี่ยนแปลงแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยน	62
5.2.2	กระบวนการเป็นแบบสมการอันดับ 4	64
	ก. การเปลี่ยนแปลงแบบโหลดเปลี่ยน	64
	ข. การเปลี่ยนแปลงแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยน	65
5.3	วิเคราะห์ผลการทดลอง	67
5.3.1	กระบวนการอันดับ 2	67
5.3.2	กระบวนการอันดับ 4	73
	รายการอ้างอิง	79
	ภาคผนวก ก. การหาค่า $K_{cu}$ และ $P_{cu}$ โดยวิธีการทำไชเคิลอย่างต่อเนือง	81
	ก.1 กระบวนการอันดับ 2 ที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบโหลดเปลี่ยน	81
	ก.2 กระบวนการอันดับ 2 ที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยน	83

	หน้า
ก.3 กระบวนการอันดับ 4 ที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบไหลเปลี่ยน.....	84
ก.4 กระบวนการอันดับ 4 ที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเจ็ทพอยท์เปลี่ยน.....	86
ภาคผนวก ข. การเปลี่ยนอันดับของกระบวนการที่มีมากกว่า 1 ให้เท่ากับกับ 1.....	88
ข.1 กระบวนการอันดับ 2.....	90
ข.2 กระบวนการอันดับ 4.....	91
ภาคผนวก ค. ลักษณะการตอบสนองและค่า ITAE ของตัวทำนยของสมิธ.....	92
ค.1 การตอบสนองของกระบวนการอันดับ 2.....	92
ค.2 การตอบสนองของกระบวนการอันดับ 4.....	116
ภาคผนวก ง. ลักษณะการตอบสนองและค่า ITAE ของตัวทำนยเชิงเคราะห้.....	140
ง.1 การตอบสนองของกระบวนการอันดับ 2.....	140
ง.2 การตอบสนองของกระบวนการอันดับ 4.....	158
ประวัติผู้เขียน.....	176

ศูนย์วิทยพัทพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 การหาค่า พีไอดี.....	45
ตารางที่ 4.1 ค่า $K_{Cu}$ และ $P_{Cu}$ และค่า พีไอดี กระบวนการอันดับ 2 ก่อนติดตั้ง ตัวทำนาของสมิธ.....	49
ตารางที่ 4.2 ผลของการซึมเลชันกระบวนการอันดับ 2 ตัวทำนาของสมิธ.....	50
ตารางที่ 4.3 ค่า $K_{Cu}$ และ $P_{Cu}$ และค่า พีไอดี กระบวนการอันดับ 4 ก่อนติดตั้ง ตัวทำนาของสมิธ.....	51
ตารางที่ 4.4 ผลของการซึมเลชันกระบวนการอันดับ 4 ตัวทำนาของสมิธ.....	52
ตารางที่ 4.5 ผลของการซึมเลชันกระบวนการอันดับ 2 ตัวทำนาเชิงวิเคราะห์.....	53
ตารางที่ 4.6 ผลของการซึมเลชันกระบวนการอันดับ 4 ตัวทำนาเชิงวิเคราะห์.....	54
<b>ตัวทำนาของสมิธ</b>	
<b>ก. การเปลี่ยนแปลงแบบโหนดเปลี่ยนของกระบวนการอันดับ 2 เมื่อติดตั้งตัวชดเชยเดดไทม์</b>	
ตารางที่ 5.1 $\tau_m$ มีความผิดพลาด.....	55
ตารางที่ 5.2 $\theta_m$ มีความผิดพลาด.....	56
<b>ข. การเปลี่ยนแปลงแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยนของกระบวนการอันดับ 2 เมื่อติดตั้งตัวชดเชยเดดไทม์</b>	
ตารางที่ 5.3 $\tau_m$ มีความผิดพลาด.....	57
ตารางที่ 5.4 $\theta_m$ มีความผิดพลาด.....	57
<b>ค. การเปลี่ยนแปลงแบบโหนดเปลี่ยนของกระบวนการอันดับ 4 เมื่อติดตั้งตัวชดเชยเดดไทม์</b>	
ตารางที่ 5.5 $\tau_m$ มีความผิดพลาด.....	59
ตารางที่ 5.6 $\theta_m$ มีความผิดพลาด.....	59
<b>ง. การเปลี่ยนแปลงแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยนของกระบวนการอันดับ 4 เมื่อติดตั้งตัวชดเชยเดดไทม์</b>	

ตารางที่ 5.7 $\tau_m$ มีความผิดพลาด.....	60
ตารางที่ 5.8 $\theta_m$ มีความผิดพลาด.....	61
<b>ตัวทำนายเชิงวิเคราะห์</b>	
<b>ก. การเปลี่ยนแปลงแบบโพลดเปลี่ยนของกระบวนการอันดับ 2 เมื่อติดตั้งตัวชดเชยเดดไทม์</b>	
ตารางที่ 5.9 $\tau_m$ มีความผิดพลาด.....	62
ตารางที่ 5.10 $\theta_m$ มีความผิดพลาด.....	62
<b>ข. การเปลี่ยนแปลงแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยนของกระบวนการอันดับ 2 เมื่อติดตั้งตัวชดเชยเดดไทม์</b>	
ตารางที่ 5.11 $\tau_m$ มีความผิดพลาด.....	63
ตารางที่ 5.12 $\theta_m$ มีความผิดพลาด.....	63
<b>ค. การเปลี่ยนแปลงแบบโพลดเปลี่ยนของกระบวนการอันดับ 4 เมื่อติดตั้งตัวชดเชยเดดไทม์</b>	
ตารางที่ 5.13 $\tau_m$ มีความผิดพลาด.....	64
ตารางที่ 5.14 $\theta_m$ มีความผิดพลาด.....	65
<b>ง. การเปลี่ยนแปลงแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยนของกระบวนการอันดับ 4 เมื่อติดตั้งตัวชดเชยเดดไทม์</b>	
ตารางที่ 5.15 $\tau_m$ มีความผิดพลาด.....	66
ตารางที่ 5.16 $\theta_m$ มีความผิดพลาด.....	66
<b>วิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	
ตารางที่ 5.17 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทำซิมูเลชันของกระบวนการอันดับ 2.....	68
ตารางที่ 5.18 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทำซิมูเลชันของกระบวนการอันดับ 4.....	73

## สารบัญบล็อคดีอะแกรม

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงถึงกระบวนการหาค่าเคคไทม์.....	5
รูปที่ 2.3 การควบคุมแบบป้อนกลับที่มีค่าเคคไทม์อยู่ในทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของ กระบวนการ.....	8
รูปที่ 2.4 ตัวทำนายของสมิท.....	9
รูปที่ 2.5 ตัวทำนายเชิงวิเคราะห์.....	13
รูปที่ 2.6 ตัวทำนายของสมิทแบบใหม่.....	20
รูปที่ 2.7 การปรับปรุงตัวทำนายของสมิทด้วยการประเมินค่าแบบย้อนกลับ.....	21
รูปที่ 3.1 ห้องสมุดบล็อกไคอะแกรมของซิมูลิงค์.....	27
รูปที่ 3.2 บล็อกที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณแบบต่างๆ.....	27
รูปที่ 3.3 รูปแบบของสัญญาณส่งออกแบบต่างๆ.....	28
รูปที่ 3.4 บล็อกไคอะแกรมของดีสครีตแบบต่างๆ.....	28
รูปที่ 3.5 บล็อกไคอะแกรมและเกนแบบต่างๆ ที่เป็นเชิงแบบเส้น.....	29
รูปที่ 3.6 บล็อกไคอะแกรมและเกนแบบต่างๆ ที่ไม่เป็นเชิงแบบเส้น.....	29
รูปที่ 3.7 บล็อกไคอะแกรมของตัวเชื่อมสัญญาณแบบต่างๆ.....	30
รูปที่ 3.8 บล็อกไคอะแกรมของอุปกรณ์ควบคุมเพิ่มเติม.....	30
รูปที่ 3.9 บล็อกไคอะแกรมของกระบวนการควบคุมแบบป้อนกลับที่มีตัวชดเชยเคคไทม์ของสมิท * และกระบวนการควบคุมแบบป้อนกลับแบบสัดส่วน.....	33
รูปที่ 3.11 บล็อกไคอะแกรมของกระบวนการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยวิธีของตัวทำนายเชิง วิเคราะห์โดยใช้วิธีการควบคุมโมเดลภายใน.....	35
รูปที่ 3.13 บล็อกไคอะแกรมที่ทำการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ป.....	37

	หน้า
รูปที่ 3.16 บล็อกไดอะแกรมที่ทำการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ปเมื่อติดตั้ง โมเดล.....	39
รูปที่ ก.1 บล็อกไดอะแกรมของกระบวนการป้อนกลับแบบไหลคเปลี่ยนของ กระบวนการอันดับ 2.....	82
รูปที่ ก.3 บล็อกไดอะแกรมของกระบวนการป้อนกลับแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยนของ กระบวนการอันดับ 2.....	83
รูปที่ ก.5 บล็อกไดอะแกรมของกระบวนการป้อนกลับแบบไหลคเปลี่ยนของ กระบวนการอันดับ 4.....	85
รูปที่ ก.7 บล็อกไดอะแกรมของกระบวนการป้อนกลับแบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยนของ กระบวนการอันดับ 4.....	86
รูปที่ ข.1 การทำการเปลี่ยนสเต็ปกระบวนการอันดับ 2.....	88
รูปที่ ข.3 ตรวจสอบถูกต้องของโมเดลของกระบวนการอันดับ 2 ที่ได้.....	89
รูปที่ ข.5 การทำการเปลี่ยนสเต็ปกระบวนการอันดับ 4.....	90
รูปที่ ข.7 ตรวจสอบถูกต้องของโมเดลของกระบวนการอันดับ 4 ที่ได้.....	91
รูปที่ ค.1 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการอันดับ 2 แบบไหลคเปลี่ยนก่อนติดตั้งตัวชดเชย เดคไทม์ของสมิธ.....	92
รูปที่ ค.3 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการอันดับ 2 แบบไหลคเปลี่ยนเมื่อติดตั้งตัวชดเชย เดคไทม์ของสมิธ.....	94
รูปที่ ค.13 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการอันดับ 2 แบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยนก่อนติดตั้งตัวชดเชย เดคไทม์ของสมิธ.....	104
รูปที่ ค.15 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการอันดับ 2 แบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยนเมื่อติดตั้งตัวชดเชย เดคไทม์ของสมิธ.....	106

รูปที่ ก.25 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการอันดับ 4 แบบไหลเปลี่ยนก่อนติดตั้งตัวชดเชย	
เดดไทม์ของสมิธ.....	116
รูปที่ ก.27 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการอันดับ 4 แบบไหลเปลี่ยนเมื่อติดตั้งตัวชดเชย	
เดดไทม์ของสมิธ.....	118
รูปที่ ก.37 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการอันดับ 4 แบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยนก่อนติดตั้งตัวชดเชย	
เดดไทม์ของสมิธ.....	128
รูปที่ ก.39 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการอันดับ 4 แบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยนเมื่อติดตั้งตัวชดเชย	
เดดไทม์ของสมิธ.....	130
รูปที่ ง.1 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการอันดับ 2 แบบไหลเปลี่ยนเมื่อติดตั้งทำนายน	
เชิงวิเคราะห์.....	140
รูปที่ ง.10 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการอันดับ 2 แบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยนเมื่อติดตั้งทำนายน	
เชิงวิเคราะห์.....	149
รูปที่ ง.19 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการอันดับ 4 แบบไหลเปลี่ยนเมื่อติดตั้งทำนายน	
เชิงวิเคราะห์.....	158
รูปที่ ง.28 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการอันดับ 4 แบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยนเมื่อติดตั้งทำนายน	
เชิงวิเคราะห์.....	167

สารบัญญการตอบสนองและค่า ITAE

	หน้า
รูปที่ 2.2 สัญญาณของเคดไทม์ที่เกิดขึ้น.....	7
รูปที่ 3.10 การตอบสนองผลการซิมูเลทตัวชดเชยเคดไทม์ของสมิทและการควบคุมกระบวนการ แบบป้อนกลับ.....	34
รูปที่ 3.12 การตอบสนองผลการซิมูเลทตัวทำนายเชิงวิเคราะห์แบบต่างๆ.....	36
รูปที่ 3.14 การเปลี่ยนแปลงแบบสเค็พของกระบวนการที่มากกว่า 1.....	38
รูปที่ 3.15 แสดงการหาค่า $\theta_m$ และค่า $\tau_m$ ของ $G_m$ .....	38
รูปที่ 3.17 การตอบสนองที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบสเค็พของกระบวนการที่มีอันดับ มากกว่า 1 และที่ได้เปลี่ยนเป็นอันดับ 1.....	40
รูปที่ 3.18 $K_C > K_{Cu}$ .....	42
รูปที่ 3.19 $K_C = K_{Cu}$ .....	43
รูปที่ 3.20 $K_C > K_{Cu}$ (without saturation).....	43
รูปที่ 3.21 $K_C > K_{Cu}$ (with saturation).....	44
รูปที่ 5.1ก.-ข. เปรียบเทียบ Response และค่า ITAE ของ Feedback Control และ Smith Predictor ของกระบวนการอันดับ 2 แบบโหลดเปลี่ยน.....	69
รูปที่ 5.2ก.-ข. เปรียบเทียบ Response และค่า ITAE ของ Feedback Control และ Smith Predictor ของกระบวนการอันดับ 2 แบบเจ็ทพอยท์เปลี่ยน.....	70
รูปที่ 5.3ก.-ข. เปรียบเทียบ Response และค่า ITAE ของ Analytical predictor และ Smith Predictor ของกระบวนการอันดับ 2 แบบโหลดเปลี่ยน.....	71
รูปที่ 5.4ก.-ข. เปรียบเทียบ Response และค่า ITAE ของ Analytical predictor และ Smith Predictor ของกระบวนการอันดับ 2 แบบเจ็ทพอยท์เปลี่ยน.....	72



รูปที่ 5.5ก.-ข. เปรียบเทียบ Response และค่า ITAE ของ Feedback Control และ Smith Predictor ของกระบวนการอันดับ 4 แบบโพลด์เปลี่ยน.....74

รูปที่ 5.6ก.-ข. เปรียบเทียบ Response และค่า ITAE ของ Feedback Control และ Smith Predictor ของกระบวนการอันดับ 4 แบบเซิร์ทพอยท์เปลี่ยน.....75

รูปที่ 5.7ก.-ข. เปรียบเทียบ Response และค่า ITAE ของ Analytical predictor และ Smith Predictor ของกระบวนการอันดับ 4 แบบโพลด์เปลี่ยน.....76

รูปที่ 5.8ก.-ข. เปรียบเทียบ Response และค่า ITAE ของ Analytical predictor และ Smith Predictor ของกระบวนการอันดับ 4 แบบเซิร์ทพอยท์เปลี่ยน.....77

รูปที่ ก.2 การเกิดไขเคล็ดต่อเนื่องเพื่อหาค่า  $K_{Cu}$  และ  $P_{Cu}$  ของกระบวนการอันดับ 2 แบบโพลด์เปลี่ยน.....82

รูปที่ ก.4 การเกิดไขเคล็ดต่อเนื่องเพื่อหาค่า  $K_{Cu}$  และ  $P_{Cu}$  ของกระบวนการอันดับ 2 แบบเซิร์ทพอยท์เปลี่ยน.....84

รูปที่ ก.6 การเกิดไขเคล็ดต่อเนื่องเพื่อหาค่า  $K_{Cu}$  และ  $P_{Cu}$  ของกระบวนการอันดับ 4 แบบโพลด์เปลี่ยน.....85

รูปที่ ก.8 เกิดไขเคล็ดต่อเนื่องเพื่อหาค่า  $K_{Cu}$  และ  $P_{Cu}$  ของกระบวนการอันดับ 4 แบบเซิร์ทพอยท์เปลี่ยน.....87

รูปที่ ข.2 ลักษณะการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนสเต็ม์พของกระบวนการอันดับ 2.....88

รูปที่ ข.4 ลักษณะการตอบสนองที่ได้จากการตรวจสอบโมเดลของกระบวนการอันดับ 2.....89

รูปที่ ข.6 ลักษณะการตอบสนองที่ได้จากการเปลี่ยนสเต็ม์พของกระบวนการอันดับ 4.....90

รูปที่ ข.8 ลักษณะการตอบสนองที่ได้จากการตรวจสอบโมเดลของกระบวนการอันดับ 4.....91

ลักษณะการตอบสนองและค่า ITAE ของตัวชดเชยเคดไทม์ของสมิธ

กระบวนการป้อนกลับอันดับ 2 แบบโหลดเปลี่ยน

รูปที่ ค.2ก.-ข. ก่อนติดตั้งตัวชดเชยเคดใหม่ของสมิธ.....	93
รูปที่ ค.4ก.-ข. โมเดลถูกต้อง.....	95
รูปที่ ค.5ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 10%.....	96
รูปที่ ค.6ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 30%.....	97
รูปที่ ค.7ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -10%.....	98
รูปที่ ค.8ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -30%.....	99
รูปที่ ค.9ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด 10%.....	100
รูปที่ ค.10ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด 30%.....	101
รูปที่ ค.11ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด -10%.....	102
รูปที่ ค.12ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด -30%.....	102

กระบวนการป้อนกลับอันดับ 2 แบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยน

รูปที่ ค.14ก.-ข. ก่อนติดตั้งตัวชดเชยเคดใหม่ของสมิธ.....	103
รูปที่ ค.16ก.-ข. โมเดลถูกต้อง.....	107
รูปที่ ค.17ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 10%.....	108
รูปที่ ค.18ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 30%.....	109
รูปที่ ค.19ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -10%.....	110
รูปที่ ค.20ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -30%.....	111
รูปที่ ค.21ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด 10%.....	112
รูปที่ ค.22ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด 30%.....	113
รูปที่ ค.23ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด -10%.....	114



รูปที่ ค.24ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด -30%.....	115
<b>กระบวนการป้อนกลับอันดับ 4 แบบโหลดเปลี่ยน</b>	
รูปที่ ค.26ก.-ข. ก่อนคิดตั้งตัวชดเชยเคคใหม่ของสมิท.....	117
รูปที่ ค.28ก.-ข. โมเดลถูกต้อง.....	119
รูปที่ ค.29ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 10%.....	120
รูปที่ ค.30ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 30%.....	121
รูปที่ ค.31ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -10%.....	122
รูปที่ ค.32ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -30%.....	123
รูปที่ ค.33ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด 10%.....	124
รูปที่ ค.34ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด 30%.....	125
รูปที่ ค.35ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด -10%.....	126
รูปที่ ค.36ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด -30%.....	127
<b>กระบวนการป้อนกลับอันดับ 4 แบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยน</b>	
รูปที่ ค.38ก.-ข. ก่อนคิดตั้งตัวชดเชยเคคใหม่ของสมิท.....	129
รูปที่ ค.40ก.-ข. โมเดลถูกต้อง.....	131
รูปที่ ค.41ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 10%.....	132
รูปที่ ค.42ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 30%.....	133
รูปที่ ค.43ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -10%.....	134
รูปที่ ค.44ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -30%.....	135
รูปที่ ค.45ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด 10%.....	136
รูปที่ ค.46ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด 30%.....	137

รูปที่ ค.47ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด -10%.....	138
รูปที่ ค.48ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด -30%.....	139
<b>ลักษณะการตอบสนองและค่า ITAE ของตัวทำนายเชิงวิเคราะห์</b>	
<b>กระบวนการป้อนกลับอันดับ 2 แบบโพลด์เปลี่ยน</b>	
รูปที่ ง.2ก.-ข. โมเดลถูกต้อง.....	141
รูปที่ ง.3ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 10%.....	142
รูปที่ ง.4ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 20%.....	143
รูปที่ ง.5ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 30%.....	144
รูปที่ ง.6ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -10%.....	145
รูปที่ ง.7ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -20%.....	146
รูปที่ ง.8ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด 10%.....	147
รูปที่ ง.9ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด -10%.....	148
<b>กระบวนการป้อนกลับอันดับ 2 แบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยน</b>	
รูปที่ ง.11ก.-ข. โมเดลถูกต้อง.....	150
รูปที่ ง.12ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 10%.....	151
รูปที่ ง.13ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 20%.....	152
รูปที่ ง.14ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 30%.....	153
รูปที่ ง.15ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -10%.....	154
รูปที่ ง.16ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -20%.....	155
รูปที่ ง.17ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด 10%.....	156
รูปที่ ง.18ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด -10%.....	157

กระบวนการป้อนกลับอันดับ 4 แบบโหลดเปลี่ยน

รูปที่ ง.20ก.-ข. โมเดลถูกต้อง.....	159
รูปที่ ง.21ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 10%.....	160
รูปที่ ง.22ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 20%.....	161
รูปที่ ง.23ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 30%.....	162
รูปที่ ง.24ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -10%.....	163
รูปที่ ง.25ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -20%.....	164
รูปที่ ง.26ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด 10%.....	165
รูปที่ ง.27ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด -10%.....	166

กระบวนการป้อนกลับอันดับ 4 แบบเซ็ทพอยท์เปลี่ยน

รูปที่ ง.29ก.-ข. โมเดลถูกต้อง.....	168
รูปที่ ง.30ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 10%.....	169
รูปที่ ง.31ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 20%.....	170
รูปที่ ง.32ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด 30%.....	171
รูปที่ ง.33ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -10%.....	172
รูปที่ ง.34ก.-ข. $\tau_m$ ผิดพลาด -20%.....	173
รูปที่ ง.35ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด 10%.....	174
รูปที่ ง.36ก.-ข. $\theta_m$ ผิดพลาด -10%.....	175