

การจูนตัวควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้แนวทางไอเอ็มซี



นางสาวสุภาพรณ เยี่ยมแสงามกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2539

ISBN 974-634-078-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 16892628

**FEEDBACK CONTROLLER TUNING
BY THE IMC APPROACH**

Miss Supapun Yeamlaengamkool

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1996

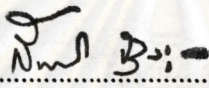
ISBN 974-634-078-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์
โดย
ภาควิชา
อาจารย์ที่ปรึกษา

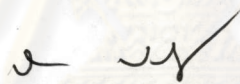
การจูนตัวควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้แนวทางไอเอ็มซี
นางสาวสุภาพรณ เยี่ยมแสงามกุล
วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี

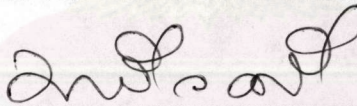



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

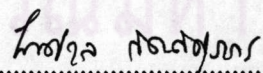

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ อุดสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


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


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


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุกร)

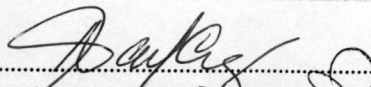
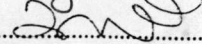


สุภาพรรณ เข้มแสงามกุล : การจูนตัวควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้แนวทางไอเอ็มซี
(FEEDBACK CONTROLLER TUNING BY THE IMC APPROACH) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์
ดร. มนตรี วงศ์ศรี, 147 หน้า. ISBN 974-634-078-6

ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการจูนแบบซีเกลอร์-นิโคลส์กับวิธีการจูนแบบไอเอ็มซีโดย
การเขียนแบบกระบวนการควบคุม โดยใช้โปรแกรม Simulink กระบวนการที่ใช้ในการทดสอบเป็น
กระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเดดไทม์ การจูนแบบไอเอ็มซีให้ค่าไอทีเออิน้อยกว่าการจูนโดย Z-N แต่อย่างไร
ก็ตามการจูนด้วยวิธีของ Z-N จะให้ความทนทานในการควบคุมมากกว่าวิธีของไอเอ็มซี ในกรณีการจูน
แบบ Z-N กระบวนการยังเสถียรอยู่เมื่อความผิดพลาดจากเดดไทม์ระหว่าง -100% ถึง +60% แต่เมื่อเดด
ไทม์ของกระบวนการผิดพลาดมีค่าเกินกว่าช่วงนี้กระบวนการจะไม่เสถียร ในกรณีการจูนแบบไอเอ็มซี การ
ควบคุมระบบมีความไวต่อการผิดพลาดของกระบวนการ ตัวอย่างเช่น ที่เดดไทม์แปรคั่นเท่ากับ 0.091
ระบบควบคุมจะไม่เสถียรเมื่อเดดไทม์ผิดพลาดมากกว่า $\pm 45\%$, ที่เดดไทม์แปรคั่นเท่ากับ 0.50 ระบบจะ
เสถียรเมื่อเดดไทม์ผิดพลาดลดลงจาก $\pm 45\%$ มาเป็น $\pm 4\%$ อย่างไรก็ตามการควบคุมทั้งสองแบบจะให้ผล
การควบคุมที่ใกล้เคียงกันเมื่อกระบวนการมีความผิดพลาดจากค่าคงที่ทางเวลาของกระบวนการ
โดยที่ระบบควบคุมจะเสถียรเมื่อความผิดพลาดของค่าคงที่ทางเวลาของกระบวนการมีค่าระหว่าง -40% ถึง
+300% ได้หาความสัมพันธ์ของ τ_c กับเดดไทม์แปรคั่นในกรณีที่ไม่มีค่าผิดพลาดของกระบวนการ
และในกรณีที่กระบวนการมีความผิดพลาดของเดดไทม์และค่าคงที่ทางเวลาของกระบวนการ 25%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2538

ลายมือชื่อนิสิต 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



C416779: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: FEEDBACK CONTROL / IMC APPROACH / Z-N / COMPARISION
SUPAPUN YEAMLAENGAMKOOL : FEEDBACK CONTROLLER TUNING
BY THE IMC APPROACH. THESIS ADVISOR : MONTREE WONGSRI,
Ph.D. 147 pp. ISBN 974-634-078-6

Ziegler-Nichols and IMC tuning methods are compared and studied via simulation using Simulink. A first order plus dead time model is used. An IMC controller yields a lower ITAE than a Z-N controller, however, the Z-N controller is more robust than the IMC controller. In the case of Z-N controller, when the model has -100% to +60% error in dead time, the control system is stable. When the error is beyond this range, the control system is unstable. In the case of the IMC controller, the control system is more sensitive to modeling error. For example, at a dead time fraction of 0.091, the control system is unstable when the error in dead time exceeds $\pm 45\%$. At a dead time fraction of 0.5 the error limit is reduced from $\pm 45\%$ to $\pm 4\%$. However, for the model error in process time constant the two controllers give similar performance, i.e. the stability range is between -40% to +300% error in the process time constant. The correlations of τ_c and dead time fraction are given in the case of the model with no error and 25% error in dead time and in process time constant.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2538.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากคณาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ศ.ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม รศ.ดร. อูรา ปานเจริญ
ดร. มนตรี วงศ์ศรี อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ
เกี่ยวกับการศึกษาวิจัยนี้มาโดยตลอด ทั้งนี้บุคคลที่สำคัญอย่างยิ่งอีกท่านหนึ่ง คือ คุณวัลลภ
เข้มเหมือน ที่คอยช่วยเหลือตลอดจนให้คำแนะนำและกำลังใจในการทำการศึกษา รวมถึง บริษัท
เออร์วิงคอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่อนุญาตให้ผู้วิจัยใช้เวลามาทำการศึกษา จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้
ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนและช่วยเหลือดูแลผู้
วิจัยโดยสม่ำเสมอจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 แรงจูงใจ	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ความสำคัญและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 หลักการทำงานของระบบควบคุม	7
2.1 คำนำ	7
2.2 หลักการทำงานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	7
ก. นิยามและบล็อกไดอะแกรมพื้นฐาน.....	8

ข. สมการการควบคุมแบบลูปปิด	9
ค. เสถียรภาพของการควบคุมแบบลูปปิด.....	10
ง. ตัวอย่างการควบคุมแบบป้อนกลับ.....	11
จ. ข้อดีข้อเสียของการควบคุมแบบป้อนกลับ	12
2.2 การควบคุมโดยใช้แนวทางไอเอ็มซี.....	12
2.3 การจูนตัวควบคุม.....	17
ก. การจูนโดยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols).....	17
2.4 การเปรียบเทียบผลการควบคุม.....	19
2.5 ผลงานการศึกษาที่ผ่านมา.....	21
บทที่ 3 โปรแกรมช่วยวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุม Matlab.....	25
3.1 คำนำ	25
3.2 คุณลักษณะของโปรแกรม Matlab.....	26
3.2.1 การพัฒนาของเมทแลบ.....	26
3.2.2 การคำนวณของ Matlab	26
3.3 โปรแกรม Simulink.....	28
3.3.1 ความสามารถของโปรแกรม Simulink.....	28
3.4 เครื่องมือในการวิเคราะห์อื่นๆ	35
3.5 ตัวอย่างการใช้งาน	36
บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	41
4.1 คำนำ	41

4.2	วิธีการศึกษาวิจัย.....	41
4.2.1	การสร้างแบบจำลอง.....	41
4.2.2	การกำหนดกรณีการศึกษา.....	44
4.2.3	การจูนตัวควบคุมกระบวนการ.....	45
4.2.4	การเปรียบเทียบผลการศึกษาแต่ละกรณี.....	45
4.3	ผลการศึกษาวิจัย.....	46
4.3.1	การศึกษากรณิที่ 1.....	46
4.3.2	การศึกษากรณิที่ 2.....	47
4.3.3	การศึกษากรณิที่ 3.....	50
4.3.4	การศึกษากรณิที่ 4.....	55
4.3.5	การศึกษากรณิที่ 5.....	60
4.3.6	การศึกษากรณิที่ 6.....	63
4.3.7	การศึกษากรณิที่ 7.....	66
4.3.8	การศึกษากรณิที่ 8.....	73
4.3.9	การศึกษากรณิที่ 9.....	76
บทที่ 5	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	81
5.1	คำนำ.....	81
5.2	บทสรุปผลการวิจัย.....	81
5.2.1	การเปรียบเทียบผลการควบคุมตัวแปรอิสระ.....	82
5.2.2	การกำหนดช่วงเวลาการเก็บข้อมูล.....	83

5.2.3 ตัวแปรการจูนในการควบคุมแบบไอเอ็มซี 83

5.2.4 ความทนทานของการควบคุมที่จูนโดย Z-N 84

5.2.5 ความทนทานของการควบคุมแบบไอเอ็มซี 85

5.2.6 วิธีการในการทำการเลียนแบบ 86

5.3 ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย 87

5.3.1 การเลือกอัลกอริทึมในการทำการเลียนแบบ 87

5.3.2 ความแตกต่างของการควบคุมแบบไอเอ็มซี 87

5.3.3 การตอบสนองของการควบคุมแบบไอเอ็มซี 88

5.4 ข้อเสนอแนะในการศึกษาค้นคว้าต่อไป 89

5.4.1 การปรับปรุงแบบจำลอง 89

5.4.2 การศึกษาตัวแปรการคำนวณ 89

5.4.3 การศึกษาวิจัยอื่นๆ 90

5.4.4 การควบคุมกระบวนการผลิตจริง 90

รายการอ้างอิง 91

ภาคผนวก 93

 ภาคผนวกที่ 1 94

 ภาคผนวกที่ 2 107

 ภาคผนวกที่ 3 111

ประวัติผู้เขียน 147

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าการคำนวณค่าตัวควบคุมโดยวิธีการของซีเกลอร์และนิโคลส์	19
ตารางที่ 2.2 การกำหนดค่าพีไอดีของการควบคุมแบบไอเอ็มซี	24
ตารางที่ 4. 1 แสดงลักษณะของกระบวนการที่ศึกษาวิจัย	43
ตารางที่ 1 ผลการควบคุมกระบวนการที่ตัวควบคุมจนโดย Z-N เมื่อ $\tau = 5$	111
ตารางที่ 2 ผลการควบคุมกระบวนการที่ตัวควบคุมจนโดย Z-N เมื่อ $\tau = 10$	112
ตารางที่ 3 ผลการควบคุมกระบวนการที่ตัวควบคุมจนโดย Z-N เมื่อ $\tau = 15$	113
ตารางที่ 4 ผลการควบคุมแบบไอเอ็มซี เพื่อหาค่าช่วงเวลาการเก็บข้อมูล ที่เหมาะสม เมื่อ $\tau = 5$	114
ตารางที่ 5 ผลการควบคุมแบบไอเอ็มซี เพื่อหาค่าช่วงเวลาการเก็บข้อมูล ที่เหมาะสม เมื่อ $\tau = 10$	115
ตารางที่ 6 ผลการควบคุมแบบไอเอ็มซี เพื่อหาค่าช่วงเวลาการเก็บข้อมูล ที่เหมาะสม เมื่อ $\tau = 15$	116
ตารางที่ 7 ค่าไอทีเออีจากการควบคุมแบบไอเอ็มซี ในการหาค่าตัวแปรการจน τ_c เมื่อ $\tau = 5$	117
ตารางที่ 8 ค่าไอทีเออีจากการควบคุมแบบไอเอ็มซี ในการหาค่าตัวแปรการจน τ_c เมื่อ $\tau = 10$	118

ตารางที่ 9 ค่าไอทีเออีจากการควบคุมแบบไอเอ็มซี

ในการหาค่าตัวแปรการจูน τ_c เมื่อ $\tau = 15$	119
ตารางที่ 10 สรุปค่าตัวแปรการจูนที่ให้ค่าไอทีเออีต่ำสุด เมื่อ $\tau = 5$	120
ตารางที่ 11 สรุปค่าตัวแปรการจูนที่ให้ค่าไอทีเออีต่ำสุด เมื่อ $\tau = 10$	121
ตารางที่ 12 สรุปค่าตัวแปรการจูนที่ให้ค่าไอทีเออีต่ำสุด เมื่อ $\tau = 15$	122
ตารางที่ 13 ค่าตัวแปรการจูน (τ_c)ที่เหมาะสมเมื่อกระบวนการมีการผิดพลาด	
ที่ $\tau = +25\%$ ของกระบวนการ $\tau = 10$	123
ตารางที่ 14 ค่าตัวแปรการจูน (τ_c)ที่เหมาะสมเมื่อกระบวนการมีการผิดพลาด	
ที่ $\tau = -25\%$ ของกระบวนการ $\tau = 10$	124
ตารางที่ 15 ค่าตัวแปรการจูน (τ_c)ที่เหมาะสมเมื่อกระบวนการมีการผิดพลาด	
ที่ $\theta = +25\%$ ของกระบวนการ $\tau = 10$	125
ตารางที่ 16 ค่าตัวแปรการจูน (τ_c)ที่เหมาะสมเมื่อกระบวนการมีการผิดพลาด	
ที่ $\theta = +25\%$ ของกระบวนการ $\tau = 10$	126
ตารางที่ 17 ค่าไอทีเออีจากการควบคุมแบบไอเอ็มซีในการหาค่าตัวแปรการจูน α	
เมื่อ $\tau = 5$	127
ตารางที่ 18 ค่าไอทีเออีจากการควบคุมแบบไอเอ็มซีในการหาค่าตัวแปรการจูน α	
เมื่อ $\tau = 10$	128
ตารางที่ 19 ค่าไอทีเออีจากการควบคุมแบบไอเอ็มซีในการหาค่าตัวแปรการจูน α	
เมื่อ $\tau = 15$	129

ตารางที่ 20	การเปรียบเทียบผลการควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนเซทพอยท์ เมื่อ $\tau = 5$	130
ตารางที่ 21	การเปรียบเทียบผลการควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนโหลด เมื่อ $\tau = 5$	130
ตารางที่ 22	การเปรียบเทียบผลการควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนเซทพอยท์ เมื่อ $\tau = 10$	131
ตารางที่ 23	การเปรียบเทียบผลการควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนโหลด เมื่อ $\tau = 10$	131
ตารางที่ 24	การเปรียบเทียบผลการควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนเซทพอยท์ เมื่อ $\tau = 15$	132
ตารางที่ 25	การเปรียบเทียบผลการควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนโหลด เมื่อ $\tau = 15$	132
ตารางที่ 26	แสดงผลการควบคุมแบบป้อนกลับ Z-N เมื่อเวลากระบวนการผิดพลาด ไปจากที่จูนไว้ เมื่อ $\tau = 10$	133
ตารางที่ 27	แสดงผลการควบคุมแบบป้อนกลับ Z-N เมื่อเดดไทม์กระบวนการผิดพลาด ไปจากที่จูนไว้ เมื่อ $\tau = 10$	134
ตารางที่ 28	แสดงผลการควบคุมแบบ ไอเอ็มซีเมื่อเวลาของแบบจำลองผิดพลาด เมื่อ $\tau = 10$	135
ตารางที่ 29	แสดงผลการควบคุมแบบ ไอเอ็มซีเมื่อเวลาของแบบจำลองผิดพลาด เมื่อ $\tau = 5$	136
ตารางที่ 30	แสดงผลการควบคุมแบบ ไอเอ็มซีเมื่อเวลาของแบบจำลองผิดพลาด เมื่อ $\tau = 15$	137
ตารางที่ 31	แสดงผลการควบคุมแบบ ไอเอ็มซีเมื่อเดดไทม์ของแบบจำลองผิดพลาด เมื่อ $\tau = 10$	138
ตารางที่ 32	แสดงผลการควบคุมแบบ ไอเอ็มซีเมื่อเดดไทม์ของแบบจำลองผิดพลาด เมื่อ $\tau = 5$	139

ตารางที่ 33 แสดงผลการควบคุมแบบไอเอ็มซีเมื่อเคดใหม่ของแบบจำลองผิดพลาด
 เมื่อ $\tau = 15$ 141

ตารางที่ 34 แสดงผลการควบคุมแบบไอเอ็มซีเมื่อเวลาของกระบวนการ (τ) ผิดพลาด
 เมื่อ $\tau = 10$ 143

ตารางที่ 35 แสดงผลการควบคุมแบบไอเอ็มซีเมื่อเคดใหม่ของกระบวนการผิดพลาด
 เมื่อ $\tau = 10$ 144

ตารางที่ 36 เปรียบเทียบผลการควบคุมแบบไอเอ็มซีกับ Z-N เมื่อเวลาของกระบวนการ (τ)
 ผิดพลาด เมื่อ $\tau = 10$ 145

ตารางที่ 37 เปรียบเทียบผลการควบคุมแบบไอเอ็มซีกับ Z-N เมื่อเวลาของกระบวนการ (τ)
 ผิดพลาด เมื่อ $\tau = 10$ 146

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบป้อนกลับ.....	8
รูปที่ 2.2 แสดงการควบคุมอุณหภูมิในถังกวนให้ความร้อน.....	11
รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมแสดงการควบคุมแบบโอเอ็มซี.....	13
รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรการจูน T_c ในกระบวนการอันหนึ่งที่มีเดดไทม์.....	23
รูปที่ 3. 1 ห้องสมุดของบล็อกไดอะแกรมของ Simulink.....	29
รูปที่ 3. 2 บล็อกที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณแบบต่างๆ.....	29
รูปที่ 3. 3 รูปแบบของสัญญาณส่งออกแบบต่างๆ.....	30
รูปที่ 3. 4 บล็อกไดอะแกรมของดีสครีตแบบต่างๆ.....	30
รูปที่ 3. 5 บล็อกไดอะแกรมและเกนแบบต่างๆ ที่เป็นแบบเชิงเส้น.....	31
รูปที่ 3. 6 บล็อกไดอะแกรมของและเกนแบบต่างๆ ที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น.....	31
รูปที่ 3. 7 บล็อกไดอะแกรมของตัวเชื่อมสัญญาณแบบต่างๆ.....	32
รูปที่ 3. 8 บล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ควบคุมเพิ่มเติม.....	33
รูปที่ 3. 9 แสดงแบบจำลองการควบคุมโดยใช้โปรแกรม Simulink.....	37
รูปที่ 3. 10 แสดงผลการควบคุมจากการทำเลียนแบบโดยโปรแกรม Simulink.....	37
รูปที่ 3. 11 แสดงแบบจำลองการควบคุมด้วยวิธีการต่างๆ.....	39
รูปที่ 3. 12 แสดงผลการควบคุมจากการทำเลียนแบบโดยโปรแกรม Simulink.....	40

รูปที่ 4. 1	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบป้อนกลับแบบดั้งเดิม	42
รูปที่ 4. 2	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบโอเอ็มซี	43
รูปที่ 4. 3	กราฟแสดงผลค่าความผิดพลาดไอทีเออีเมื่อ $\tau = 5$	49
รูปที่ 4. 4	กราฟแสดงผลค่าความผิดพลาดไอทีเออีเมื่อ $\tau = 10$	49
รูปที่ 4. 5	กราฟแสดงผลค่าความผิดพลาดไอทีเออีเมื่อ $\tau = 15$	50
รูปที่ 4. 6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการจูนและเดดไทม์	53
รูปที่ 4. 7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการจูนและเดดไทม์แฟรคชัน เมื่อเวลาของกระบวนการผิดพลาดเพิ่มขึ้นหรือลดลง 25% ที่ให้ค่าไอทีเออีและไอเออีต่ำสุด	54
รูปที่ 4. 8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการจูนและเดดไทม์แฟรคชัน เมื่อเวลาของกระบวนการผิดพลาดเพิ่มขึ้นหรือลดลง 25% ที่ให้ค่าไอทีเออีและไอเออีต่ำสุด	55
รูปที่ 4. 9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรการจูนที่เวลากระบวนการ = 5	57
รูปที่ 4. 10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรการจูนที่เวลากระบวนการ = 10	58
รูปที่ 4. 11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรการจูนที่เวลากระบวนการ = 15	59
รูปที่ 4. 12	กราฟเปรียบเทียบผลการควบคุมในกรณีมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์	61
รูปที่ 4. 13	กราฟเปรียบเทียบผลการควบคุมในกรณีมีการเปลี่ยนแปลงโหลด	62
รูปที่ 4. 14	กราฟแสดงผลการควบคุมเมื่อเวลาของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลง	64
รูปที่ 4. 15	กราฟแสดงผลการควบคุมเมื่อเดดไทม์มีการเปลี่ยนแปลง	65
รูปที่ 4. 16	กราฟแสดงผลการควบคุมแบบโอเอ็มซีเมื่อ τ_m มีความผิดพลาด	68

รูปที่ 4. 17 กราฟแสดงผลการควบคุมแบบไอเอ็มซีเมื่อ τ_m มีความผิดพลาดเมื่อ $\tau = 5$ 69

รูปที่ 4. 18 กราฟแสดงผลการควบคุมแบบไอเอ็มซีเมื่อ τ_m มีความผิดพลาดเมื่อ $\tau = 15$ 70

รูปที่ 4. 19 กราฟแสดงผลการควบคุมแบบไอเอ็มซีเมื่อ θ_m มีความผิดพลาดเมื่อ $\tau_m=10$ 72

รูปที่ 4. 20 กราฟแสดงผลการควบคุมแบบไอเอ็มซี
 เมื่อเวลาของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลง 75

รูปที่ 4. 21 กราฟแสดงผลการควบคุมแบบไอเอ็มซี
 เมื่อเดคไทม์ของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลง 76

รูปที่ 4. 22 เปรียบเทียบการควบคุมไอเอ็มซีกับ Z-N เมื่อ τ_p ผิดพลาด 79

รูปที่ 4. 23 เปรียบเทียบการควบคุมไอเอ็มซีกับ Z-N เมื่อ θ_p ผิดพลาด..... 80

รูปในภาคผนวกที่ 1

รูปที่ 1 กราฟแสดงการตอบสนองของการควบคุมกระบวนการเมื่อ $\tau = 5$ และ $\theta = 0.25$ 107

รูปที่ 2 กราฟแสดงการตอบสนองของการควบคุมกระบวนการเมื่อ $\tau = 5$ และ $\theta = 0.5$ 107

รูปที่ 3 กราฟแสดงการตอบสนองของการควบคุมกระบวนการเมื่อ $\tau = 5$ และ $\theta = 1.0$ 108

รูปที่ 4 กราฟแสดงการตอบสนองของการควบคุมกระบวนการเมื่อ $\tau = 5$ และ $\theta = 2.5$ 108

รูปที่ 5 กราฟแสดงการตอบสนองของการควบคุมกระบวนการเมื่อ $\tau = 5$ และ $\theta = 5.0$ 109

รูปที่ 6 กราฟแสดงการตอบสนองของการควบคุมกระบวนการเมื่อ $\tau = 5$ และ $\theta = 10.0$ 109

รูปที่ 7 กราฟแสดงการตอบสนองของการควบคุมกระบวนการเมื่อ $\tau = 10$ และ $\theta = 10.0$ 110

รูปที่ 8 กราฟแสดงการตอบสนองของการควบคุมกระบวนการเมื่อ $\tau = 10$ และ $\theta = 15.0$ 110