

การประยุกต์การควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรียลไทม์ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์
สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน



นายอนุพัฒน์ วรรณดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

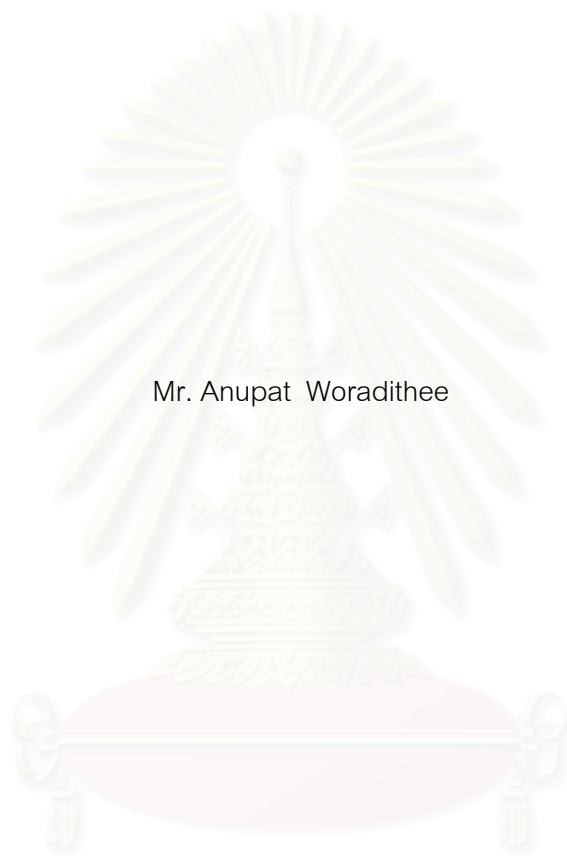
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-347-167-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF GENERIC MODEL CONTROL WITH KALMAN FILTER
FOR EXOTHERMIC CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR



Mr. Anupat Woradithee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology
Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-347-167-7


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์การควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนิร์ก ร่วมกับ คาลมานฟิลเตอร์
 สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน
โดย นายอนุพัฒน์ วรดีดี
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมขสุต
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์

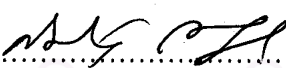
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

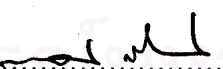

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย โพธิ์พิจิตร)

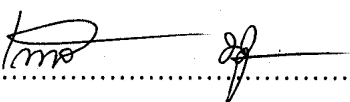
คณะกรรมการวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมขสุต)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.แก้วลี พงษ์ชาทร)

อนุพัฒน์ วรดิถี : การประยุกต์การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกร่วมกับคาลมาน
 ฟิลเตอร์สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน
 (APPLICATION OF GENERIC MODEL CONTROL WITH KALMAN FILTER FOR
 EXOTHERMIC CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR) อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.
 ดร.เลอสรวง เมฆสุด อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสุทธิ; 154
 หน้า, ISBN 974-347-167-7

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกสำหรับการควบคุม
 อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่งแบบผันกลับ
 ได้ซึ่งแสดงพฤติกรรมที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง และเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มี
 ปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่งแบบผันกลับไม่ได้ในกรณีศึกษา 3 กรณี คือ (1) ระบบแสดง
 พฤติกรรมที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์อย่างมาก (2) ระบบแสดงพฤติ
 กรรมที่มีหลายภาวะคงตัวและมีภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพและ (3) ระบบแสดงพฤติกรรมที่มี
 การแกว่งเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก ภายใต้ภาวะปฏิบัติการต่าง ๆ กัน

วัตถุประสงค์ของการทำงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก
 ที่ใช้ร่วมกับคาลมานฟิเตอร์ ซึ่งให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีและสามารถรับประกันเสถียรภาพ
 ของระบบควบคุมสำหรับระบบเวลาต่อเนื่องที่ไม่เป็นเชิงเส้นภายใต้ขอบเขตจำกัดต่าง ๆ ของการ
 ดำเนินการ โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาการควบคุมในด้านต่าง ๆ เป็นต้นว่า สมรรถนะของระบบ
 ควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ การติดตามค่าเป้าหมาย (setpoint)
 และการควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง/กระบวนการที่ทำการ
 ควบคุมเป็นต้น ซึ่งจากผลการจำลองระบบควบคุมได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลอง
 เจเนริกที่ใช้ร่วมกับคาลมานฟิเตอร์ให้สมรรถนะและความทนทานที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี
 ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า
 ตัวแปรกระบวนการและกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุม และเครื่องควบคุม
 ยังให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง/กระบวนการที่ทำการ
 ควบคุม

ภาควิชา เคมีเทคนิค
 สาขาวิชา เคมีเทคนิค
 ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อผู้คิด.....
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4172528123 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: Generic Model Control / State and Parameter estimation / Kalman Filter

ANUPAT WORADITHEE : APPLICATION OF GENERIC MODEL CONTROL WITH
KALMAN FILTER FOR EXOTHERMIC CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.LURSUANG MEKSUT THESIS CO-ADVISOR:
ASSIST.PROF.SOMKIAT NGAMPRASERTSITH, 154 pp. ISBN 974-347-167-7.

This research presents the application of Generic Model Control (GMC) with Kalman filter for the control of the temperature of a reversible exothermic, first order reaction in a continuous stirred tank reactor (CSTR), which exhibits highly nonlinear behavior, and that of an irreversible exothermic, first order reaction in a continuous stirred tank reactor. The latter composed of three cases: firstly exhibits extreme parametric sensitivity behavior, secondly exhibits ignition and extinction behavior for an open-loop system, and finally exhibits nonlinear oscillation at certain operating conditions.

The goals of this thesis are to design Generic Model Controller with Kalman filter which can give a good control performance and guarantee the stability of closed-loop nonlinear continuous time systems subject to constraints. Several different problems have been considered, such as control performance, disturbance rejection, setpoint tracking and parametric model/plant mismatch, etc. Simulation results have shown that the Generic Model Controller with Kalman filter provides better control performances than the conventional PID controller, especially for the cases of disturbance rejection and setpoint tracking. In addition, the Generic Model Controller is more robust than the PID in presence of model/plant mismatch.

Department Chemical Technology

Field of study Chemical Technology

Academic year 2000

Student's signature.....

Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุต และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้ความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ ทำให้การทำงานวิจัยสำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และ พี่น้อง ที่ให้กำลังใจให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณในการได้รับความสนับสนุนการค้นคว้าวิจัยจากมูลนิธิพระบรมราชานุสรณ์พระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัวและสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี

อนุพัฒน์ วรดิถี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฬ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	5
2. ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	8
2.1 ผลงานการประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติก ในอุตสาหกรรมเคมีทั่วไป.....	8
2.2 ผลงานการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่อง.....	9
2.3 ผลงานการประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกสำหรับ เครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่อง.....	10
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคาลมานฟิลเตอร์.....	11
3. ทฤษฎีของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติก.....	12
3.1 บทนำ.....	12
3.2 โครงสร้างของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติก.....	14

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 หลักการพื้นฐานของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก.....	15
3.4 รูปแบบของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกที่ใช้ในงานวิจัย.....	16
4. ทฤษฎีของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกที่ใช้ร่วมกับ	
การประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์.....	20
4.1 บทนำ.....	20
4.2 การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกร่วมกับการประมาณค่าสแตต และพารามิเตอร์.....	22
4.3 ทฤษฎีของคาลมานฟิลเตอร์.....	23
5. การจำลอง ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลองสำหรับ	
เครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้.....	27
5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกระบวนการที่ใช้ในการจำลอง.....	27
5.2 การตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่ไม่มีการควบคุม.....	30
5.3 การจำลอง ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลองการควบคุม.....	31
6. การจำลอง ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลองสำหรับ	
เครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้.....	46
6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกระบวนการที่ใช้ในการจำลอง.....	46
6.2 การตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่ไม่มีการควบคุม.....	51
6.3 การจำลอง ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลองการควบคุม.....	56
7. สรุปผลการทดลอง.....	89
รายการอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก การทำให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย.....	97
ภาคผนวก ข Linear in Control และ Zeros dynamics.....	101
ภาคผนวก ค Minimum Variance Estimation.....	104
ภาคผนวก ง การประมาณเชิงเส้นของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ความควบคุมได้ ความสังเกตได้ เสถียรภาพของระบบ.....	114
ภาคผนวก จ ตัวอย่างโค้ดโปรแกรม.....	122

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก จ กราฟแสดงผลการทดลอง.....	130
ภาคผนวก ช อุปกรณ์และผลการทดลอง.....	149
ประวัติผู้เขียน.....	154



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
5.1 ภาวะการปฏิบัติการของระบบที่สถานะคงตัวสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้.....	29
5.2 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้.....	39
5.3 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้.....	45
6.1 ภาวะในการปฏิบัติการของระบบที่สถานะคงตัวในกรณีศึกษา 3 กรณี สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้.....	49
6.2 สัญลักษณ์ของพารามิเตอร์และตัวแปรของกระบวนการ.....	50
6.3 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1.....	62
6.4 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1.....	66
6.5 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าตัวแปรรบกวนระบบมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับกรณีศึกษาที่ 2.....	75
6.6 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับกรณีศึกษาที่ 2.....	80
6.7 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าตัวแปรรบกวนระบบมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับกรณีศึกษาที่ 3.....	84
6.8 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับกรณีศึกษาที่.....	88

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
3.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก.....	14
3.2 Generalized GMC profile specification.....	19
4.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก ที่ใช้ร่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์.....	22
4.2 แบบจำลองของระบบที่มีสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม.....	24
5.1 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้.....	28
5.2 แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการเมื่อไม่มีการควบคุมและ มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบ.....	30
5.3 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบโดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	34
5.4 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบโดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	34
5.5 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของ เครื่องควบคุม (ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	35
5.6 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของ เครื่องควบคุม (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	36
5.7 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของ กระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	37
5.8 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของ กระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	37
5.9 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของ กระบวนการ (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	38

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5.10 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของ กระบวนการ (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	38
5.11 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายโดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	41
5.12 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายโดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	41
5.13 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่อง ควบคุม (ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	42
5.14 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่อง ควบคุม (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	42
5.15 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลอง ของกระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	43
5.16 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลอง ของกระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	44
5.17 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลอง ของกระบวนการ (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	44
5.18 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลอง ของกระบวนการ (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	45
6.1 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องซึ่งเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้.....	47
6.2 ผลการตอบสนองของกระบวนการสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อไม่มีการควบคุมและ มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรค่าตัวแปรกระบวนการ.....	52

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
6.3 ระบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง.....	53
6.4 ภาวะคงตัว 3 ภาวะของระบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง.....	54
6.5 ผลตอบสนองไดนามิกส์ของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (a) และ (b) แสดงความไม่มีเสถียรภาพของภาวะคงตัวกลาง (middle steady state) (c) และ (d) แสดงความมีเสถียรภาพของภาวะคงตัวบน (upper steady state) และภาวะคงตัวล่าง (lower steady state).....	54
6.6 ผลการตอบสนองของกระบวนการสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อไม่มีการควบคุมและมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ.....	55
6.7 ผลการตอบสนองของกระบวนการสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ.....	56
6.8 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	60
6.9 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	60
6.10 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายโดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	65
6.11 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายโดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	65
6.12 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบเจเนติกที่ $\tau = 60$	67
6.13 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบพีไอดีที่ $\tau = 60$	68
6.14 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 2.7517$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบเจเนติกที่ $\tau = 60$	69
6.15 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 2.7517$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบพีไอดีที่ $\tau = 60$	69
6.16 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบเจเนติกที่ $\tau = 60$	70

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
6.17 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบพีไอดีที่ $\tau = 60$	71
6.18 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายโดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	78
6.19 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายโดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	78
6.20 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบเจเนริกที่ $\tau = 60$	82
6.21 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบพีไอดีที่ $\tau = 60$	82
6.22 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	85
6.23 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	86
จ.1 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	130
จ.2 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	130
จ.3 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	130
จ.4 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (Φ เพิ่มขึ้น และ δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	130

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
จ.5 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรอบวงระบบ และมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	131
จ.6 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรอบวงระบบ และมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบฟuzzy.....	131
จ.7 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรอบวงระบบ และมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	131
จ.8 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรอบวงระบบ และมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบฟuzzy.....	131
จ.9 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรอบวงระบบ และมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	131
จ.10 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรอบวงระบบ และมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบฟuzzy.....	131
จ.11 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรอบวงระบบ และมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	132
จ.12 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรอบวงระบบ และมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบฟuzzy.....	132
จ.13 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	132

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
จ.14 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	132
จ.15 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	132
จ.16 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (Φ เพิ่มขึ้น และ δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	132
จ.17 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	133
จ.18 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	133
จ.19 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	133
จ.20 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	133
จ.21 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	133
จ.22 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	133

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
จ.23 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้น และ δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	134
จ.24 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้น และ δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	134
จ.25 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบเจเนติกที่ $\tau = 0$	134
จ.26 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบพีไอดีที่ $\tau = 0$	134
จ.27 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 2.7517$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบเจเนติกที่ $\tau = 0$	134
จ.28 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 2.7517$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบพีไอดีที่ $\tau = 0$	134
จ.29 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบเจเนติกที่ $\tau = 0$	135
จ.30 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบพีไอดีที่ $\tau = 0$	135
จ.31 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	135
จ.32 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	135
จ.33 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	135

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
จ.61 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	140
จ.62 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	140
จ.63 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	140
จ.64 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	140
จ.65 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้น และ δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	141
จ.66 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้น และ δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	141
จ.67 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30)โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	141
จ.68 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30)โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	141
จ.69 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (δ ลดลงร้อยละ 30)โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	141

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
จ.70 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (Φ เพิ่มขึ้น δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	141
จ.71 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	142
จ.72 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	142
จ.73 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	142
จ.74 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	142
จ.75 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	142
จ.76 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	142
จ.77 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้น และ δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	143
จ.78 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้น และ δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	143

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
จ.79 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ระบบโดยการควบคุมแบบเจเนติกที่ $\tau = 0$	143
จ.80 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ระบบโดยการควบคุมแบบพีไอดีที่ $\tau = 0$	143
จ.81 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	144
จ.82 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	144
จ.83 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	144
จ.84 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (Φ เพิ่มขึ้น และ δ ลดลง ร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	144
จ.85 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	145
จ.86 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	145
จ.87 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	145
จ.88 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	145

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
จ.89 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรอบวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	145
จ.90 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรอบวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	145
จ.91 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรอบวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้น และ δ ลดลง ร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	146
จ.92 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรอบวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้น และ δ ลดลง ร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	146
จ.93 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30)โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	146
จ.94 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30)โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	146
จ.95 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (δ ลดลงร้อยละ 30)โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	146
จ.96 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (Φ เพิ่มขึ้น และ δ ลดลงร้อยละ 30)โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	146
จ.97 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30)โดยการควบคุมแบบเจเนติก.....	147

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
จ.98 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	147
จ.99 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	147
จ.100 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	147
จ.101 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	147
จ.102 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	147
จ.103 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้น และ δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก.....	148
จ.104 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (β เพิ่มขึ้น และ δ ลดลงร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	148
ช.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	150
ช.2 การตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่ไม่มีการควบคุม.....	151
ช.3 การควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าเป้าหมาย 35.5°C	151
ช.4 การควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย.....	152

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ของแบบจำลองกระบวนการ

C	= ความเข้มข้นของสารภายในถังปฏิกรณ์ (mol/l)
C_1	= สัมประสิทธิ์ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ($cal/(mol.K)$)
C_{-1}	= สัมประสิทธิ์ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ($cal/(mol.K)$)
C_A	= ความเข้มข้นของสารตั้งต้น A (mol/l)
C_B	= ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ B (mol/l)
C_{Ai}	= ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น A (mol/l)
C_{Bi}	= ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น B (mol/l)
C_f	= ความเข้มข้นของสารขาเข้าถังปฏิกรณ์ (mol/l)
C_p	= ค่าความจุความร้อนของสาร ($cal/(kg.K)$)
ΔH	= ค่าความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา (cal/mol)
$k(T)$	= ค่าคงที่อัตราของ Arrhenius (s^{-1})
k_0	= ค่าคงที่ของ Arrhenius (s^{-1})
q	= อัตราการไหลเชิงปริมาตร (l/s)
Q	= อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสายป้อน (l/s)
Q_1	= พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไปข้างหน้า (cal/mol)
Q_{-1}	= พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาย้อนกลับ (cal/mol)
r_1	= อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ($cal/(l.K)$)
r_{-1}	= อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ($cal/(l.K)$)
R	= ค่าคงที่ของก๊าซ ($cal/(mol.K)$)
dt	= ช่วงเวลาสุ่ม ($min.$)
t	= เวลา ($min.$)
T	= อุณหภูมิของระบบ (K)
T_c	= อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (K)
T_i	= อุณหภูมิของสายป้อน (K)
U	= สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($J/(s.K.m^2)$)
V	= ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (m^3)
ρ	= ความหนาแน่นของสาร (kg/l)
τ	= ค่าคงที่เวลา ($min.$)

สัญลักษณ์เทอมตัวแปรไร้หน่วย

q	= เทอมตัวแปรไร้หน่วยของอัตราการไหลของสายป้อน
q_c	= เทอมตัวแปรไร้หน่วยของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น
u	= เทอมตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น
x_1	= เทอมตัวแปรไร้หน่วยของความเข้มข้น
x_2	= เทอมตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิ
ϕ	= เทอมตัวแปรไร้หน่วยของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา
β	= เทอมตัวแปรไร้หน่วยของค่าความร้อนของปฏิกิริยา
γ	= เทอมตัวแปรไร้หน่วยของพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา
δ	= เทอมตัวแปรไร้หน่วยของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

สัญลักษณ์ของเครื่องควบคุม

IAE	= ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด
K	= ค่าเมทริกซ์เกนคาลมาน
K_c	= ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดี
P	= ค่าเมทริกซ์ของความแปรปรวนร่วมของความผิดพลาดจากการประมาณ
Q	= ค่าความแปรปรวนร่วมของแบบจำลองของกระบวนการ
R	= ค่าความแปรปรวนร่วมของสัญญาณรบกวนค่าวัด
τ_i	= ค่าคงที่เวลาอินทิกรัลของตัวควบคุมแบบพีไอดี
τ_d	= ค่าคงที่เวลาเดอริเวทีฟของตัวควบคุมแบบพีไอดี
u	= ตัวแปรปรับกระบวนการ

สัญลักษณ์อักษรกรีก

η	= สัญญาณรบกวนค่าวัด
ξ	= สัญญาณรบกวนกระบวนการ

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำงานวิจัยและเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เนื่องจากปัญหาหลักในการควบคุมกระบวนการคือ การที่กระบวนการทางเคมีส่วนใหญ่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงและมักแสดงพฤติกรรมของลูปเปิดที่ซับซ้อน (complex open loop behavior) เช่น กระบวนการที่มีความหลากหลายของตัวแปรขาเข้าตัวแปรขาออก (input output multiplicity) กระบวนการที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ (strong parametric sensitivity) กระบวนการที่มีหลายภาวะคงตัว (multiple steady state) และกระบวนการที่มีการแกว่งเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก (nonlinear oscillation) เป็นต้น พฤติกรรมดังกล่าวก่อให้เกิดปัญหาในการควบคุมอย่างมากโดยส่งผลให้การควบคุมทำได้ยาก และถึงแม้ว่าเครื่องควบคุมแบบเชิงเส้น (linear controller) ซึ่งได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายก็ยังมีข้อจำกัดมากมายสำหรับกระบวนการที่มีพฤติกรรมดังกล่าว เท่าที่ผ่านมากการใช้เทคนิคการควบคุมแบบเชิงเส้นธรรมดาเช่นเทคนิคการควบคุมแบบพีไอดีนั้นค่อนข้างจำกัดสำหรับกระบวนการทางเคมีที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง [1] เช่นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนนั้นส่วนใหญ่มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูงการรบกวนระบบเพียงเล็กน้อยส่งผลให้ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีความซับซ้อนดังกล่าว นอกจากนี้กระบวนการที่ควบคุมยังมีข้อจำกัด (constraints) อย่างมากของการดำเนินงานภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ ความปลอดภัย อีกทั้งคุณภาพที่ได้มาตรฐาน ดังนั้นจึงมีความต้องการระบบการควบคุมที่มีประสิทธิภาพที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

จากการศึกษาค้นคว้าที่ผ่านมาพบว่าการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิต [2, 3] ได้รับการยอมรับว่าเป็นการควบคุมกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงได้มีการศึกษาค้นคว้าและนำไปใช้ควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรมทางเคมีอย่างแพร่หลาย ในปัจจุบันสามารถพบการประยุกต์ใช้งาน

ใช้งานในด้านต่าง ๆ มากมาย รวมถึงอุตสาหกรรมเคมี อาหาร รถยนต์ การบิน การผสมโลหะ การผลิตเยื่อกระดาษ การผลิตพลังงานและการกลั่นแยกทางปิโตรเคมี ฯลฯ เป็นต้น

บทบาทที่สำคัญอย่างมากของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกที่นำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมคือความสามารถในการควบคุม

- กระบวนการที่มีพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก
- กระบวนการที่มีจำนวนตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมจำนวนมาก
- กระบวนการที่มีขอบเขตจำกัดทั้งบนตัวแปรปรับ ตัวแปรควบคุม ตัวแปรสแตต
- กระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ การเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

เนื่องจากการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกเป็นการควบคุมโดยอาศัยแบบจำลองซึ่งสามารถครอบคลุมข้อมูลต่าง ๆ ของกระบวนการที่จะทำการควบคุมได้ ดังนั้นปัญหาต่าง ๆ ของการควบคุมสามารถรวมไว้ในอัลกอริทึมสำหรับการควบคุม ซึ่งรับประกันเสถียรภาพของระบบได้ ตราบเท่าที่แบบจำลองของกระบวนการสามารถเป็นตัวแทนของระบบได้อย่างถูกต้องหรือมีความน่าเชื่อถือ

งานวิจัยนี้จึงเริ่มขึ้นเพื่อทำการประยุกต์การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสแตตและพารามิเตอร์ (state and parameter estimation) ในรูปแบบของคาลมานฟิลเตอร์ [4] ในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible exothermic reaction) ของ Uppal [5] และเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ (reversible exothermic reaction) ของ Economou [6] เหตุผลในการเลือกกระบวนการทั้งสองนี้ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (CSTR) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่นิยมใช้กันมากในกระบวนการอุตสาหกรรมมีขอบเขตการใช้งานกว้างขวางและสามารถเปลี่ยนเงื่อนไขการทำงานได้มาก และเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องมีปัญหาดังกล่าวในการดำเนินการควบคุมที่น่าสนใจโดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนนั้นส่วนใหญ่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงและมักแสดงพฤติกรรมที่ซับซ้อนของลูฟเฟด เช่นการที่ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์อย่างมาก การที่ระบบมีหลายภาวะคงตัวและมีภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพและการที่ระบบมีการแกว่งเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก เป็นต้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความยากในการออกแบบการควบคุม จึงเหมาะสมที่จะนำไปทดสอบระบบการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกที่สร้างขึ้น

ในการจำลองการควบคุมได้ทำการควบคุมคุณหมุมของเครื่องปฏิกรณ์โดยแบบจำลองของเครื่องควบคุมที่ใช้อยู่ในรูปแบบของสมการสแตตสเปซ (state space) ซึ่งสามารถทำการคำนวณและปรับปรุงสมรรถนะของการควบคุมได้ง่ายและสามารถใช้ร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสแตตและพารามิเตอร์แบบคาลมานฟิลเตอร์ช่วยในการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ของแบบจำลองในเครื่องควบคุมให้ถูกต้องใกล้เคียงกับแบบจำลองของกระบวนการจริงให้มากที่สุดและช่วยให้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะ (performance) และความทนทาน (robustness) ของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกกับการควบคุมแบบพีไอดีทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ และการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุมเพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะและความทนทานที่ดีกว่าของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาและสร้างระบบการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก (Generic Model Control, GMC) ในรูปแบบของสมการสแตตสเปซร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสแตตและพารามิเตอร์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปแม็ตแลบ (MATLAB) ในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ และแบบผันกลับไม่ได้ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง

2. ทดสอบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกในการควบคุมคุณหมุมภายในเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวแบบต่อเนื่องโดยเปรียบเทียบผลการควบคุมกับระบบการควบคุมแบบพีไอดี

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวแบบต่อเนื่องที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้และแบบผันกลับไม่ได้โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปแม็ตแลบ

2. สร้างระบบการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกที่ใช้ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ในการควบคุมคุณหมุมภายในเครื่องปฏิกรณ์บนโปรแกรมสำเร็จรูปแม็ตแลบ

3. ทดสอบการทำงานของระบบการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกทั้งด้านสมรรถนะและความทนทานในการควบคุมสำหรับกรณีต่าง ๆ เช่นการควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ การเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและการควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองหรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดี

4. ทดสอบการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกร่วมกับคาเลมานฟิลเตอร์กับกระบวนการจริงที่ได้สร้างขึ้น (ภาคผนวก จ)

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัยออกเป็น 5 ขั้นตอนคือ

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในช่วงเวลาที่ผ่านมา

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกและการประมาณค่าตัวแปรสแตตและพารามิเตอร์ รวมทั้งศึกษาการประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมที่ผ่านมา โดยค้นคว้าจากวารสารงานวิจัยที่ได้มีผู้เสนอมาแล้ว เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกและตัวประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์สำหรับควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงให้มีประสิทธิภาพและความทนทาน

2. ศึกษาการใช้งานและการเขียนโปรแกรมแม็ตแลบ

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการศึกษาวิธีการเขียนโปรแกรมแม็ตแลบ โดยค้นคว้าจากหนังสือคู่มือการใช้โปรแกรมแม็ตแลบ [7] เนื่องจากโปรแกรมแม็ตแลบเป็นโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณสูงสามารถแสดงผลแบบกราฟิกได้ อีกทั้งการเขียนโปรแกรมสามารถทำได้ง่าย จึงเหมาะที่จะใช้ในการออกแบบการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกที่ใช้ร่วมกับตัวประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ โดยแบ่งงานในขั้นตอนนี้เป็น 4 ส่วนคือ

ก. เขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ของกระบวนการที่ทำการควบคุม

ข. เขียนโปรแกรมการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก

ค. เขียนโปรแกรมการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกที่ใช้ร่วมกับคาเลมานฟิลเตอร์

ง. เขียนโปรแกรมการควบคุมแบบพีไอดีเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

3. การจำลองการควบคุม

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการทดสอบความสามารถของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกที่ ออกแบบขึ้นทั้งในด้านสมรรถนะและความทนทาน สำหรับกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร ระบบระบบและการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุม เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบ พีไอดี

4. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการควบคุมโดยการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดี โดยพิจารณาจากผลการตอบสนองของกระบวนการและค่า อินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE)

5. จัดทำวิทยานิพนธ์เป็นรูปเล่มฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ในการ ควบคุมกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงซึ่งเป็นปัญหาหลักในการควบคุมกระบวนการของ การควบคุมแบบดั้งเดิมที่อาศัยเครื่องควบคุมแบบเชิงเส้น

1.6 เนื้อหาวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเนื้อหาต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 7 บท ซึ่งประกอบด้วย

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขต การวิจัย ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และเนื้อหาวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงผลงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งแบ่งเป็นผลงานทางด้านการประยุกต์ใช้การ ควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกในกระบวนการอุตสาหกรรมโดยทั่วไป ผลงานทางด้านการ ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบอื่นในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง และผลงานวิจัยที่ เกี่ยวข้องกับคาลมานฟิลเตอร์

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกซึ่งอธิบายถึงข้อดีและข้อจำกัดรวมถึงสิ่งที่ต้องการสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก โครงสร้างของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก หลักการพื้นฐานของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกและรูปแบบของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกที่ใช้ในงานวิจัย

บทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกที่ใช้ร่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ซึ่งได้อธิบายถึงข้อดี ข้อจำกัดและสิ่งที่ต้องการสำหรับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ การใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกร่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์และทฤษฎีของคาลมานฟิลเตอร์

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ในการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ โดยกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการที่ใช้ในการจำลองผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลอง ในการทดสอบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมและแบบจำลองกระบวนการ (plant/model-mismatch) เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดีทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุม

บทที่ 6 กล่าวถึงผลการประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกร่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ในรูปแบบของคาลมานฟิลเตอร์ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ซึ่งแสดงพฤติกรรมของลูเปิดที่ซับซ้อนในกรณีศึกษา 3 กรณี คือ ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์อย่างมาก ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีหลายภาวะคงตัวและมีภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพ และระบบแสดงพฤติกรรมที่มีการแกว่งเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก โดยกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมถึงค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ใช้ในการทดลองสำหรับกรณีต่าง ๆ การจำลอง ผลการจำลอง ผลการทดสอบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมและแบบจำลองของกระบวนการเปรียบเทียบกับ การควบคุมแบบพีไอดีทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการแบบขั้นบันได (step) และในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุม

บทที่ 7 เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลองรวมทั้งข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

และบทสุดท้ายเป็นภาคผนวกซึ่งกล่าวถึงการทำให้ระบบอยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วย การประมาณเชิงเส้นของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ความควบคุมได้ ความสังเกตได้ เสถียรภาพของระบบ, linear in control และ zero dynamics, minimum variance estimation และผลการทดลองการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกพร้อมกับคาลมานฟิลเตอร์กับกระบวนการจริงที่สร้างขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

บทนี้กล่าวถึงผลงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งแบ่งเป็นผลงานทางด้านการประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกในกระบวนการอุตสาหกรรมโดยทั่วไป ผลงานทางด้านการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบต่าง ๆ ในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่อง และผลงานทางด้านการประยุกต์ใช้ระบบการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่อง

2.1 ผลงานการประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกในอุตสาหกรรมเคมีโดยทั่วไป

จากการพัฒนาอัลกอริทึมต่างๆ ที่ผ่านมาเช่นไดนามิกส์เมตริกซ์ [8] โมเดลอัลกอริทึม [9] และอินเทอนัลโมเดล [10] นั้น แบบจำลองสำหรับการทำนายพฤติกรรมของกระบวนการและคำนวณค่าการควบคุมนั้นมักมาจากการประมาณเชิงเส้นของกระบวนการจากข้อมูลการตอบสนองแบบขั้นบันไดที่ได้จากการทดลอง ซึ่งยังมีข้อเสียเนื่องจากในกระบวนการทางเคมีจึงมักแสดงพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นและกระบวนการทางเคมีหรือชีวเคมีบางกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมผ่านช่วงของเวลา สำหรับกระบวนการเหล่านี้ทำให้มีความต้องการที่จะพัฒนาเครื่องควบคุมที่มีแบบจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้นในตัวเอง ดังนั้น Lee and Sullivan [2] จึงได้นำเสนอเครื่องควบคุมที่ชื่อว่าแบบจำลองเชิงเนริก (Generic Model Control, GMC) ในบทความซึ่งได้อธิบายถึงโครงสร้างของการควบคุมว่าเป็นการควบคุมที่ต้องอาศัยแบบจำลองของกระบวนการโดยแบบจำลองที่ใช้ในการควบคุมจะเป็นแบบจำลองเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้เนื่องจากสามารถใช้แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นในตัวเองควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกได้โดยตรง เพื่อที่จะกำหนดผลการตอบสนองที่ต้องการได้ ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้จึงไม่จำเป็นต้องทำให้เป็นเชิงเส้นก่อน แต่การประยุกต์ใช้งานของตัวควบคุมจะจำกัดแต่เพียงระบบซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นในตัวแปรปรับ (linear in control) หรือระดับกำลังหนึ่ง (relative degree one) ของตัวแปรปรับเท่านั้น สำหรับการปรับเครื่องควบคุมนั้นทำได้โดยการปรับค่าพารามิเตอร์เพียง 2 ค่าเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองของระบบที่ต้องการ

ต่อมา Cott and Macchietto [3] ได้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมแบบจำลองเชิงเนริกของ Lee และ Sullivan ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน และ

อาศัยหลักการของการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาของ Jutan and Uppal [11] ซึ่งการควบคุมนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการนี้ได้อย่างดีแต่การประมาณค่าความร้อนยังไม่ดีนัก ต่อมาได้มีผู้นำเสนอการประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาโดยอาศัยตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) ตามเอกสารงานวิจัยของ Kittisupakorn [12] จากงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานั้นดีมาก สามารถประมาณได้ใกล้เคียงกับความร้อนที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่ใช้ร่วมกับการประมาณค่าความร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะได้เป็นอย่างดี มีความทนทานสูงสามารถประยุกต์ใช้กับกระบวนการจริงได้ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้

การควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้ทั้งในระดับของโรงงานต้นแบบ (pilot-plant) และในระดับอุตสาหกรรมจำนวนมาก ให้ผลเปรียบเทียบกับหลายเทคนิคที่เป็นแบบตัวแปรขาเข้าตัวแปรขาออกหลายตัวแปรที่อาศัยการประมาณเชิงเส้น Riggs and Rhinehart [13] อัลกอริทึมนี้ถูกใช้ในการควบคุมระบบเตาหลอมทองเหลือง ซึ่งให้ผลที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุมแบบพีไอดี และได้มีการค้นพบว่าแบบจำลองสภาวะคงตัว (steady-state models) เหมาะสำหรับการลดความไม่เป็นเชิงเส้นในตัวควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิต

2.2 ผลงานการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่อง

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่มีพฤติกรรมทางไดนามิกส์ที่ยุ่งยากซับซ้อนและมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงนั้นมักก่อให้เกิดปัญหาในการควบคุมซึ่งจะส่งผลให้การควบคุมทำได้ยาก Uppal [5] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมที่ซับซ้อนของวงควบคุมแบบเปิดของเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่อง ซึ่งรวมถึงกระบวนการที่มีความหลากหลายของตัวแปรขาเข้าตัวแปรขาออก กระบวนการที่มีความไวต่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ กระบวนการที่มีการแกว่งเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก เป็นต้น

Hoo and Kantor [14] ได้ใช้วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear static state feedback) ในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบไม่ผันกลับ [5] โดยสมมติให้ทั้งอุณหภูมิและความเข้มข้นเป็นค่าที่สามารถวัดได้ ซึ่งต่อมาได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมแบบป้อนกลับขาออก (nonlinear output feedback control) กับเครื่องปฏิกรณ์แบบเดียวกันโดยใช้ตัวสังเกตการณ์แบบไม่เชิงเส้นในการประมาณความเข้มข้นเมื่อกำหนดให้อุณหภูมิเป็นค่าที่วัดได้เท่านั้น ซึ่งการประมาณนี้จำกัดเฉพาะปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ต่อมา Balchen [15] ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคต่าง ๆ ของ Reference System Synthesis (RSS) กับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องซึ่งมีปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่งและได้ศึกษาความไม่แน่นอนของค่าความจุความร้อน (heat capacity) และค่าพลังงานกระตุ้น (activated energy) ของปฏิกิริยา Bartusiak [16] ได้ใช้เทคนิคเดียวกันนี้กับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องซึ่งรวมไดนามิกส์ต่าง ๆ ของการหล่อเย็นและความหน่วงของค่าวัดต่ออุณหภูมิและความเข้มข้นของสาร ซึ่งต่อมา Adebekun and Schork [17] ได้ใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาเสถียรภาพของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาอันดับ n (nth order kinetics CSTR)

2.3 ผลงานการประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง

จากปัญหาที่น่าสนใจสำหรับการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นประเด็นสำคัญในการนำการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมเพื่อทดสอบและพัฒนาการควบคุมให้ดียิ่งขึ้น ผลงานการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องเริ่มจาก Economou [6] ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบอินเทอรัลโมเดลในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ วัตถุประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของการนำไปใช้และแสดงให้เห็นข้อดีของเครื่องควบคุมแบบไม่เชิงเส้นซึ่งมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเครื่องควบคุมแบบเชิงเส้นในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ที่จุดดำเนินการที่เหมาะสมในขณะเดียวกันก็ยังคงความเสถียรเมื่อมีตัวรบกวนระบบทั้งที่วัดได้และวัดไม่ได้

ต่อมา Riggs and Rhinehart [13] ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก ซึ่งเป็นการควบคุมซึ่งอาศัยแบบจำลองของกระบวนการกับเทคนิคการควบคุมแบบอินเทอรัลโมเดลแบบไม่เชิงเส้นในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน พบว่าการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีความทนทานมากกว่า

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคาลมานฟิลเตอร์

เนื่องจากปัญหาหลักในการควบคุมกระบวนการ ได้แก่การที่กระบวนการมีความไม่แน่นอนของแบบจำลองหรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ การที่ไม่สามารถวัดค่าสเตตได้ทั้งหมด และความถูกต้องของสเตตที่วัดได้มีค่าต่ำ ทำให้เกิดปัญหาในการควบคุม ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้การประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ร่วมกับเครื่องควบคุมในการควบคุมกระบวนการ ซึ่งคาลมาน

ฟิลเตอร์เป็นหนึ่งในตัวประมาณค่าที่ได้รับความนิยมและมีผู้สนใจนำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมขั้นสูงเรื่อยมาสำหรับผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคาลมานฟิลเตอร์นั้นมีตัวอย่างดังนี้

Gattu & Zafirious [18] ได้ประยุกต์คาลมานฟิลเตอร์ร่วมกับการควบคุมแบบควอดราติกไดนามิกส์แบบไม่เชิงเส้น โดยใช้คาลมานฟิลเตอร์เป็นพื้นฐานในการทำนายค่าสเตตในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์พอลิเมอไรเซชัน โดยได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมในกรณีที่มีการรบกวนระบบที่จุดการดำเนินการที่ไม่มีเสถียรภาพของลูฟเปิด

Kittisupakorn and Kershenbaum [12] ได้ทดสอบอัลกอริทึมของคาลมานฟิลเตอร์ซึ่งใช้ร่วมกับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก (Generic Model Control) ในการควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor) โดยตัวแปรที่วัดคือ อัตราการไหล ระดับน้ำในถัง และอุณหภูมิเพื่อใช้ในการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา ผลการควบคุมพบว่าคาลมานฟิลเตอร์สามารถประมาณค่าได้ถูกต้องใกล้เคียงกับของจริง และช่วยให้ตัวควบคุมมีความทนทานมากขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกซึ่งอธิบายถึงข้อดีและข้อจำกัดของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกและสิ่งที่ต้องการสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก โครงสร้างโดยทั่วไปของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก หลักการพื้นฐานของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกและรูปแบบของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกที่ใช้ในงานวิจัย

3.1 บทนำ

การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก (Generic Model Control, GMC) [2] เป็นรูปแบบหนึ่งของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ เป็นการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองเป็นพื้นฐาน (Model Based Control) ในการคำนวณค่าตัวแปรปรับที่ที่เหมาะสมเพื่อควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการ โดยแบบจำลองที่ใช้สำหรับการควบคุมมีทั้งแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น (linear model) และแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear model) ซึ่งสามารถครอบคลุมข้อมูลต่าง ๆ ของระบบทั้งที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นได้ รูปแบบต่าง ๆ ของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่เป็นที่รู้จักกันดีเช่น การควบคุมแบบไดนามิกส์เมทริกซ์ (Dynamic Matrix Control, DMC) [19] การควบคุมแบบโมเดลอัลกอริธึมมิก (Model Algorithmic Control, MAC) [20] การควบคุมแบบอินเทอร์เนลโมเดล (Internal Model Control, IMC) การควบคุมแบบควอดราติกไดนามิกส์ (Quadratic Dynamic Matrix Control, QDMC) [21] ซึ่งอาศัยหลักการเดียวกันคือเป็นการควบคุมโดยอาศัยแบบจำลองในการคำนวณชุดของค่าการควบคุมในอนาคตโดยการหาค่าความเหมาะสมสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) โดยให้มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ทำนายน้อยที่สุดภายใต้ข้อจำกัดของการดำเนินการต่าง ๆ เพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่ต้องการ นอกจากนี้รูปแบบทั่วไปของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟไม่ถูกจำกัดในพจน์ของแบบจำลอง ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และฟังก์ชันข้อจำกัด ซึ่งสามารถรวมไว้ในอัลกอริธึมสำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟได้ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสแตตและพารามิเตอร์เช่นคาลมานฟิลเตอร์ซึ่งจะช่วยส่งเสริมให้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีประสิทธิภาพการทำงานสูงยิ่งขึ้น ซึ่งในส่วนนี้ได้กล่าวถึงข้อดีและข้อจำกัดของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก รวมถึงสิ่งที่ต้องการสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก

3.1.1 ข้อดีและข้อจำกัดของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก

การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีข้อดีที่เหนือกว่าการควบคุมแบบเชิงเส้นแบบดั้งเดิม เช่นการควบคุมแบบพีไอดีคือ

- สามารถใช้แบบจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้นในตัวควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกโดยตรง เพื่อที่จะกำหนดผลตอบสนองที่ต้องการ ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้จึงไม่ต้องทำให้เป็นเชิงเส้นก่อน
- การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก สามารถรับประกันเสถียรภาพของระบบได้ทราบเท่าที่แบบจำลองของกระบวนการสามารถเป็นตัวแทนของระบบได้อย่างน่าเชื่อถือ นั่นคือเมื่อแบบจำลองเชื่อถือได้ในระดับหนึ่งเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกจะสามารถควบคุมกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามอาจกล่าวได้ว่าการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกรับประกันเสถียรภาพของระบบต่าง ๆ ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงได้โดยขึ้นกับแบบจำลองที่ใช้ว่าเป็นเชิงเส้น/ไม่เป็นเชิงเส้น หรือเป็นแบบจำลองที่ง่ายหรือมีความยุ่งยากซับซ้อน เป็นต้น
- สามารถใช้ควบคุมกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง กระบวนการที่มีตัวแปรขาเข้าตัวแปรขาออกจำนวนมากและกระบวนการที่มีขอบเขตจำกัดได้ดี

ข้อจำกัดของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก

- การประยุกต์ใช้งานของตัวควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกจะจำกัดแต่เพียงระบบซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นในตัวแปรปรับ (linear in control) หรือระดับกำลังหนึ่ง (relative degree one) ซึ่งหมายความว่าระบบที่เราต้องการควบคุมจะต้องมีตัวแปรปรับ (manipulated variable, u) ที่มีระดับกำลังหนึ่งเท่านั้น
- การประยุกต์ใช้งานของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก จำกัดสำหรับกระบวนการหรือระบบซึ่งสามารถหาแบบจำลองของกระบวนการที่น่าเชื่อถือและมีความถูกต้องพอสมควร ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกเป็นการควบคุมที่อยู่บนพื้นฐานของแบบจำลอง

3.1.2 สิ่งที่ต้องการสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก

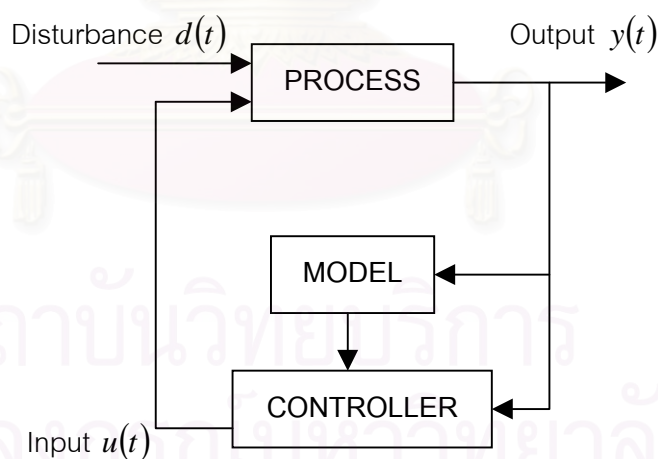
- การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกต้องการแบบจำลองของกระบวนการและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีความน่าเชื่อถือและถูกต้องพอสมควร โดยเราสามารถคาดหมายได้ว่าการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกจะสามารถทำการควบคุมระบบใด ๆ ที่มีแบบจำลองที่น่าเชื่อถือได้

เป็นอย่างดี แต่เมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองหรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะทำให้การคำนวณค่าตัวแปรปรับผิดไป วิธีแก้คือใช้การประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์เพื่อช่วยในการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ให้ถูกต้องหรือใกล้เคียงกับค่าที่ถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามการประมาณค่ายังขึ้นกับแบบจำลองที่ใช้และพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระบวนการว่ามีความผิดพลาดมากน้อยเพียงใด

- การควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรียลไทม์ต้องการ การวัดค่าของตัวแปรควบคุมรวมทั้งตัวแปรขาออกต่าง ๆ ของกระบวนการ ซึ่งทำให้รู้สถานะปัจจุบันของระบบ และอาศัยค่าตัวแปรขาออกที่วัดได้เป็นพื้นฐานในการคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมหรือประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ที่ไม่ถูกต้อง ซึ่งถ้าไม่มีการวัดค่าตัวแปรขาออกนี้เครื่องควบคุมและตัวประมาณค่าจะไม่สามารถคำนวณค่าตัวแปรปรับหรือประมาณค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรต่าง ๆ ได้เนื่องจากไม่สามารถทราบค่าที่ปัจจุบันของระบบ

3.2 โครงสร้างของการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรียลไทม์

การควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรียลไทม์กับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟรูปแบบต่าง ๆ นั้นมีโครงสร้างโดยรวมเหมือนกันโดยจะแตกต่างกันไปในรายละเอียด โครงสร้างโดยทั่วไปของการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรียลไทม์แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรียลไทม์

รูปแบบของการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรียลไทม์นั้นเป็นการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ซึ่งหมายความว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรียลไทม์จะทำการปรับค่าของตัวแปรปรับโดยอาศัยค่าเบี่ยงเบนจากค่าเป้าหมายของตัวแปรควบคุม ดังนั้นจึงเป็นที่คาดหมายได้

ว่า การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกจะสามารถทำการควบคุมระบบใด ๆ ที่มีแบบจำลองของกระบวนการที่สามารถเป็นตัวแทนของระบบได้อย่างน่าเชื่อถือได้เป็นอย่างดี และให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบดั้งเดิมเช่นการควบคุมแบบพีไอดี

3.3 หลักการพื้นฐานของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติก

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงโครงสร้างของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกโดยทั่วไป สำหรับในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติก ที่อาศัยสมการสเตตสเปซในรายละเอียดซึ่งพิจารณาถึง แบบจำลองของกระบวนการ (plant model)

3.3.1 แบบจำลองของกระบวนการ (Plant Model)

กระบวนการในทางเคมีที่มีการเปลี่ยนแปลงจะสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงและความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ของกระบวนการ ซึ่งเรียกว่าแบบจำลองของกระบวนการได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติอาจไม่สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์อย่างสมบูรณ์ครบถ้วนเพื่ออธิบายกระบวนการจริงซึ่งมีความซับซ้อนได้อย่างถูกต้อง แต่เป็นเพียงการประมาณการของกระบวนการจริงเท่านั้น ทั้งนี้แบบจำลองของกระบวนการจะสร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ทำความเข้าใจกระบวนการ โดยไม่ต้องใช้กระบวนการจริง
2. ทดสอบ/ออกแบบ รวมทั้งเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม
3. ออกแบบระบบและข้อจำกัดต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุม
4. หาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการและปรับค่าสภาวะการดำเนินการผลิตเพื่อให้ได้ผลกำไรสูงสุด

โดยทั่วไปกระบวนการแบบไม่เชิงเส้นต่าง ๆ (Nonlinear Plant) สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad , \quad x(t_0) = x_0 \quad (3.1)$$

$$y = g(x(t), u(t), t) \quad (3.2)$$

โดยที่

$$t \in [t_0, t_f]$$

เมื่อ f เป็นไดนามิกส์ของกระบวนการที่ต้องการควบคุม และสภาวะเริ่มต้น (initial condition) เป็นค่าวัดจากกระบวนการจริง, x_0 ที่เวลา t_0 ในช่วงเวลาจากปัจจุบัน, t_0 ถึงเวลาในอนาคต, t_f

โดยแบบจำลองไดนามิกส์ของกระบวนการสามารถหาได้จากแบบจำลองสมการดุลมวลและพลังงาน (Material and Energy Balance Model) เพื่อใช้ในการอธิบายกระบวนการที่ทำการควบคุม

3.3.2 แบบจำลองสมการดุลมวลและพลังงาน (Material and Energy Balance Model)

เป็นวิธีการหาแบบจำลองของกระบวนการที่นิยมใช้กันมากที่สุด การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงมวลและพลังงาน ในรูปของตัวแปรอื่นทั้งที่สามารถวัดค่าได้โดยตรงหรือไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงก็ตาม สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถหาได้โดยใช้พื้นฐานความรู้ต่าง ๆ เพื่ออธิบายกระบวนการ แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่นิยมใช้สำหรับระบบที่มีความยุ่งยากซับซ้อน ระบบที่เขียนให้อยู่ในรูปสมการดุลมวลและพลังงานได้ยากและระบบซึ่งมีตัวแปรจำนวนมากเป็นต้น

3.4 รูปแบบของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกที่ใช้ในงานวิจัย

ดังได้กล่าวข้างต้นแล้วว่าการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกเป็นการควบคุมโดยอาศัยแบบจำลองในการคำนวณค่าการควบคุมในอนาคตซึ่งสามารถใช้แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นในตัวควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกได้โดยตรงเพื่อที่จะกำหนดผลตอบสนองที่ต้องการโดยไม่ต้องทำให้เป็นเชิงเส้นก่อน นับว่าเป็นการควบคุมแบบให้แบบจำลองเป็นฐาน (Model Based) ชนิดไม่เป็นเชิงเส้นที่ง่าย ซึ่งสามารถทำความเข้าใจและนำไปใช้ได้ง่ายกว่าเทคนิคการควบคุมแบบอื่น ๆ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองของเครื่องควบคุมในรูปแบบของสมการสเตตสเปซ (State Space Model) ซึ่งสามารถทำการคำนวณและปรับปรุงสมรรถนะของการควบคุมได้ง่าย

พิจารณาสมการที่ใช้อธิบายแบบจำลอง

$$\dot{x} = f(x, u, d, t) \quad (3.3)$$

$$y = g(x) \quad (3.4)$$

เมื่อ

$$x = \text{เวกเตอร์สเตตที่มีมิติเท่ากับ } n$$

$u =$ เวกเตอร์ของตัวแปรปรับกระบวนการที่มีมิติเท่ากับ m

$d =$ เวกเตอร์ของตัวแปรกระบวนการที่มีมิติเท่ากับ l

$y =$ เวกเตอร์ขาออกที่มีมิติเท่ากับ p

โดยทั่วไปแล้ว f และ g เป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถเขียนสมการ (3.3) และ (3.4) อยู่ในรูป

$$\dot{y} = G_x f(x, u, d, t) \quad (3.5)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad G_x = \frac{\partial g}{\partial x}$$

เมื่อกระบวนการไม่อยู่ที่สถานะคงตัว (steady state) ที่กำหนด, y^* ต้องการทราบอัตราการแปลงค่า y , เพื่อทำให้กระบวนการกลับไปอยู่ที่สถานะคงตัวเดิม

$$\dot{y} = K_1(t)(y^* - y) \quad (3.6)$$

เมื่อ $K_1(t)$ เป็นเมทริกซ์เฉียง (diagonal matrix)

ในกรณีนี้ต้องการกระบวนการที่ไม่มีค่าออฟเซต (zero offset)

$$\dot{y} = K_2(t) \int (y^* - y) dt \quad (3.7)$$

เมื่อ $K_2(t)$ เป็นเมทริกซ์เฉียง เราอาจพิจารณาว่า $K_1(t)$ และ $K_2(t)$ เป็นค่าคงที่เมื่อเทียบกับเวลา ดังนั้นจะได้สมบัติในการควบคุมที่ดีเมื่อนำสมการที่ (3.6) และ (3.7) มารวมกันจะได้

$$(\dot{y})' = K_1(y^* - y) + K_2 \int (y^* - y) dt \quad (3.8)$$

การเลือกค่า K_1 และ K_2 ที่แตกต่างกันจะให้ผลการตอบสนองของ $y(t)$ ที่ต่างกัน

เราต้องการเลือกค่าตัวแปรปรับกระบวนการ $u(t)$ ที่เหมาะสมที่สามารถติดตามค่าเป้าหมายได้ดี โดยการเปลี่ยนรูปแบบใน optimal control problem (OCI)

$$\text{กำหนด} \quad \dot{x} = f(x, u, d, t)$$

$$y = g(x)$$

$$\text{เลือก } u(t) \text{ โดยที่ } |u| \leq \alpha$$

ทำการหาค่าต่ำสุด (minimize)

$$\int_0^t [h(x, u, d, t)^T W h(x, u, d, t)] dt \quad (3.9)$$

โดย

$$h(x, u, d, t) = G_x f(x, u, d, t) - K_1(y^* - y) - K_2 \int (y^* - y) dt \quad (3.10)$$

$W =$ เมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก (weighting matrix)

ถ้าการควบคุมเป็นไปได้เมื่อเทียบกับข้อจำกัด (constraint), มิติ m และ p เท่ากันและสมาชิกของ u อย่างน้อยที่สุดหนึ่งตัวปรากฏในทุก m สมการ ซึ่งแทนด้วยสมการที่ (3.8) แล้วผลจาก OCI ได้คำตอบ m สมการ มีตัวไม่ทราบค่า m ตัว

$$G_x f(x, u, d, t) - K_1(y^* - y) - K_2 \int (y^* - y) dt = 0 \quad (3.11)$$

โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองกระบวนการที่แท้จริงนั้นไม่สามารถทราบได้อย่างถูกต้อง จึงมีการประมาณแบบจำลองจากสมการที่ (3.11) ไปเป็นสมการที่ (3.12) ดังนี้

$$\hat{G}_x \hat{f}(x, u, d, t) - K_1(y^* - y) - K_2 \int (y^* - y) dt = 0 \quad (3.12)$$

เมื่อ $\hat{f}, \hat{G} = \partial \hat{g} / \partial x$ แทนการประมาณแบบจำลองจริง

ในกรณีทั่วไปมักกำหนดให้ตัวแปรขาออก, y และ ตัวแปรสแตต, x มีค่าเท่ากัน
พิจารณาระบบที่มีหลายตัวแปร (multivariable system)

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (3.13)$$

และแบบจำลองกระบวนการสมบูรณ์แบบ (perfect)

$$\hat{f} = f \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.10) จะได้

$$f(x, u, t) - K_1(x^* - x) - K_2 \int (x^* - x) dt = 0 \quad (3.15)$$

และ

$$\dot{x} = K_1(x^* - x) + K_2 \int (x^* - x) dt \quad (3.16)$$

ได้อัลกอริทึมของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกดังสมการที่ (3.16)

ถ้าเปลี่ยนรูปสมการที่ (3.16) ให้อยู่ในรูปลาปลาซ (Laplace transform) จะได้

$$\frac{x}{x^*} = \frac{2\tau\xi s + 1}{\tau^2 s^2 + 2\tau\xi s + 1} \quad (3.17)$$

โดย

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{K_2}} \quad \text{และ} \quad \xi = \frac{K_1}{2\sqrt{K_2}}$$

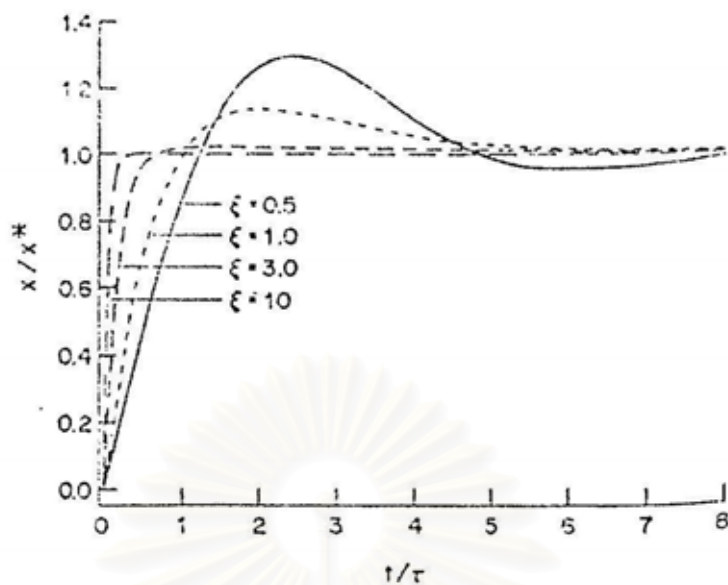
เมื่อนำผลจากสมการที่ (3.17) ไปเขียนกราฟระหว่าง x/x^* กับ t/τ แสดงดังรูปที่ 3.2 พบว่าค่า K_1 และ K_2 ที่ต่างกันจะให้ผลการตอบสนองของระบบต่างกันด้วย ซึ่งเราสามารถเลือกค่า K ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่ต้องการดังนี้

1. เลือก ξ จากรูป เพื่อกำหนดรูปแบบการตอบสนองที่ต้องการ
2. เลือก τ จากรูป เพื่อกำหนดเวลาการตอบสนองที่เหมาะสมซึ่งสัมพันธ์กับอัตราเร็วในการตอบสนองของระบบ

3. คำนวณค่า K_1 และ K_2 โดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$K_1 = \frac{2\xi}{\tau} \quad (3.18)$$

$$K_2 = \frac{1}{\tau^2} \quad (3.19)$$



รูปที่ 3.2 Generalized GMC profile specification [2]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ทฤษฎีของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติก ที่ใช้ร่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกที่ใช้ร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสแตตและพารามิเตอร์ซึ่งได้อธิบายถึงข้อดีและข้อจำกัดรวมถึงสิ่งที่ต้องการสำหรับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ การใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกร่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ และทฤษฎีของคาลมานฟิลเตอร์

4.1 บทนำ

การประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติก ร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสแตตและพารามิเตอร์เช่นคาลมานฟิลเตอร์จะช่วยส่งเสริมให้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกมีประสิทธิภาพการทำงานสูงยิ่งขึ้น เนื่องจากการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกเป็นการควบคุมที่ขึ้นกับแบบจำลอง ดังนั้นเมื่อแบบจำลองของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกแตกต่างจากกระบวนการจริงจะให้ผลการควบคุมที่ไม่ดี (การทำนายการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรขาออกจากแบบจำลองที่ผิดพลาดส่งผลให้การคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมผิดพลาด เมื่อนำค่าตัวแปรปรับที่คำนวณได้นี้ไปทำการควบคุมกับระบบจริง ทำให้การควบคุมไม่ได้ผลดี) ดังนั้นจึงต้องอาศัยการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์เข้ามาช่วยในการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ของแบบจำลองของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกให้ถูกต้องใกล้เคียงกับแบบจำลองของกระบวนการจริงมากที่สุด ซึ่งจะทำให้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกมีประสิทธิภาพดีขึ้น ในการประยุกต์ใช้จริงปกติแล้วจะมีการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ร่วมอยู่ด้วยเสมอ เนื่องจากเป็นความจริงที่ว่าในการหาแบบจำลองต้องมีการให้สมมติฐานหลายอย่าง ดังนั้นแบบจำลองที่หาได้ย่อมแตกต่างจากแบบจำลองของกระบวนการจริงเสมอ ซึ่งในการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์นั้นจะอาศัยข้อมูลตัวแปรขาออกที่วัดได้เป็นฐานในการนำไปคำนวณหรือประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ซึ่งผลการประมาณค่าจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรขาออกที่วัดได้ว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงใดรวมทั้งเทคนิคการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์เองมีข้อดีและข้อจำกัดอย่างไร ดังนั้นการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกที่ใช้ร่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์จะสามารถทำการควบคุมระบบให้เข้าสู่ค่าที่ต้องการและให้ผลการควบคุมที่ดีกว่ากรณีที่ไม่ใช้การประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์

4.1.1 ข้อดีและข้อจำกัดของการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์

ข้อดีของการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ร่วมกับเทคนิคการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริก คือ

- เทคนิคการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์สามารถนำมาใช้ร่วมกับการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกได้ และช่วยให้การควบคุมนี้มีประสิทธิภาพในการทำงานดียิ่งขึ้น
- เทคนิคการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่าสแตตที่ไม่สามารถวัดค่าได้หรือวัดค่าได้ไม่แน่นอน ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะทำการควบคุมค่าสแตตที่ไม่สามารถวัดค่าได้
- สามารถช่วยในการควบคุมกระบวนการที่มีความไม่แน่นอนของแบบจำลองและพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ เช่นในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองหรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการหรือตัวควบคุม (Plant/Model-Mismatch) เป็นต้น ซึ่งเป็นข้อดีในการประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกกับกระบวนการที่เราไม่ทราบข้อมูลต่าง ๆ ดีพอ

อย่างไรก็ตามความสามารถในการประมาณค่านี้ขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ใช้ ตัวพารามิเตอร์ที่ใช้และเทคนิคการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์เอง อีกทั้งแบบจำลองของตัวประมาณค่ารวมทั้งค่าตัวแปรขาออกที่วัดได้ว่าถูกต้องมากน้อยเพียงใด แต่โดยหลักการแล้วการประยุกต์ใช้การประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ร่วมกับเทคนิคการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกจะสามารถควบคุมระบบให้เข้าสู่ค่าที่ต้องการได้ดีกว่ากรณีที่ไม่มีการใช้การประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์

การประยุกต์ใช้เทคนิคการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์นี้มีข้อจำกัดคือ

- สามารถนำมาใช้ได้กับระบบซึ่งตัวแปรขาออกสามารถวัดได้และเชื่อถือได้เท่านั้น แต่ทั้งนี้ตัวแปรขาออกที่วัดค่าได้ต้องเป็นตัวแปรขาออกที่ทำให้ระบบที่สนใจสามารถสังเกตได้ (ภาคผนวก ง)

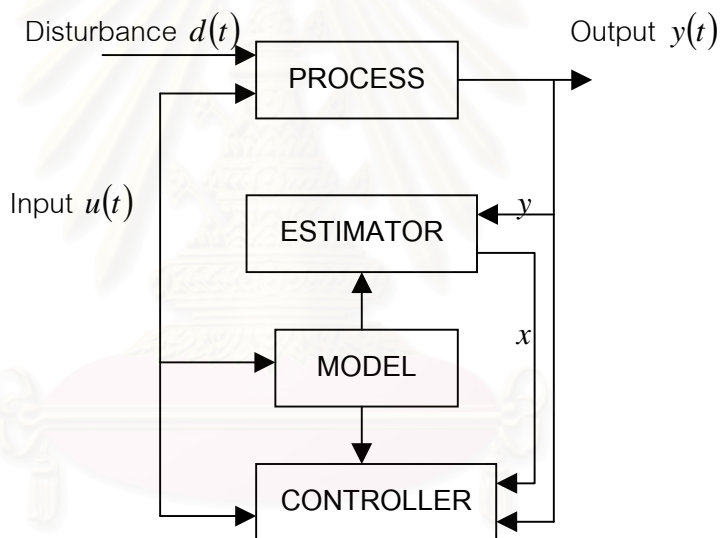
4.1.2 สิ่งที่ต้องการสำหรับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์

เทคนิคการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์นั้นอาศัยแบบจำลองเช่นเดียวกันเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรขาออกที่วัดได้กับค่าสแตตและพารามิเตอร์ที่ต้องการจะประมาณ ซึ่งผลการประมาณค่าจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับแบบจำลองเหล่านี้

- การประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ต้องการค่าวัดของตัวแปรที่สามารถวัดได้ โดยการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์นั้นจะอาศัยข้อมูลของตัวแปรขาออกที่วัดได้เป็นฐานในการนำไปคำนวณหรือประมาณค่าสแตตหรือพารามิเตอร์ ซึ่งถ้าไม่มีการวัดค่าตัวแปรขาออกเหล่านี้ตัวประมาณค่าจะไม่สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์และตัวแปรเหล่านี้ได้เนื่องจากไม่สามารถทราบค่าที่สภาวะปัจจุบันของระบบ

4.2 การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก ร่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์

การใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก ร่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ นั้นมีโครงสร้างโดยทั่วไปแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกที่ใช้ร่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์

ในการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ ตัวประมาณค่า (estimator) จะอาศัยข้อมูลค่าตัวแปรขาออกของกระบวนการที่วัดได้ (y) เป็นฐานในการคำนวณหรือประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ที่ไม่ถูกต้องหรือตัวแปรที่ไม่สามารถวัดค่าได้ โดยอาศัยแบบจำลองซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรขาออกที่วัดได้กับค่าสแตตและพารามิเตอร์ที่จะทำการประมาณ ค่าสแตตและพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณจะส่งเข้าตัวควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกในขณะเดียวกันค่าตัวแปรขาออกที่วัดได้เหล่านั้นจะป้อนให้กับตัวควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกด้วยซึ่งตัวควบคุม

ด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่อาศัยแบบจำลองในการคำนวณค่าของตัวแปรปรับที่เหมาะสม เพื่อควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ

4.2.1 รูปแบบโดยทั่วไปของการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์

ระบบเวลาต่อเนื่อง (Continuous-Time Systems):

$$\dot{\hat{x}}(t) = \hat{f}(\hat{x}(t), u(t), t) + K(t)[y(t) - \hat{y}(t)] \quad (4.1)$$

$$\hat{y}(t) = \hat{g}(\hat{x}(t), u(t), t) \quad (4.2)$$

ระบบเวลาติดสคริต (Discrete-Time Systems):

$$\hat{x}(k) = \hat{F}(\hat{x}(k), u(k), k) + K(k)[y(k) - \hat{y}(k)] \quad (4.3)$$

$$\hat{y}(k) = \hat{G}(\hat{x}(k), u(k), k) \quad (4.4)$$

ซึ่งค่า $K(t)$ หรือ $K(k)$ เป็นค่าที่ได้มาจากการหาคำตอบของสมการ ริคคาตี (Riccati equation)

4.3 ทฤษฎีของคาลมานฟิลเตอร์ (Kalman filter)

คาลมานฟิลเตอร์เป็นอัลกอริทึมในการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ ซึ่งง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งของการหาค่าความแปรปรวนต่ำสุด (Minimum Variance) ที่ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการแก้ปัญหาในการควบคุมที่มีความยุ่งยากซับซ้อน สามารถนำมาใช้ประมาณค่าสแตตที่ไม่สามารถวัดได้ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะควบคุมค่าสแตตที่ไม่สามารถวัดค่าได้และสามารถควบคุมกระบวนการที่มีความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้

หลักการของคาลมานฟิลเตอร์นั้นอาศัยการเขียนสมการในรูปสแตตสเปซ (state space)

$$\frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t) \quad (4.5)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (4.6)$$

ทำการแปลงสมการแบบจำลองไปอยู่ในรูปติดสคริต (discrete form) โดยการประมาณค่าตอบของสมการ (4.5) เป็น

$$\frac{x(k+1) - x(k)}{\Delta t} = Ax(k) + Bu(k) \quad (4.7)$$

ดังนั้นรูปแบบติดสคริตจากแบบจำลองเชิงเส้นสามารถแสดงได้เป็น

$$x(k+1) = \phi x(k) + \Gamma u(k) \quad (4.8)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (4.9)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \phi = I + A\Delta t \quad (4.10)$$

$$\Gamma = B\Delta t \quad (4.11)$$

การประมาณค่าสแตต สามารถทำได้โดยการใช้สมการต่าง ๆ ของคาลมานฟิลเตอร์ ในการประมาณที่แต่ละช่วงเวลาซึ่งเป็นการประมาณค่าความแปรปรวนต่ำสุด (minimum variance estimation) (ภาคผนวก ข) ซึ่งได้รวมความไม่แน่นอนของสมการแบบจำลองและการวัดเข้าไปด้วย

ดังสมการ

$$x(k+1) = \phi x(k) + \Gamma u(k) + \xi(k) \quad (4.12)$$

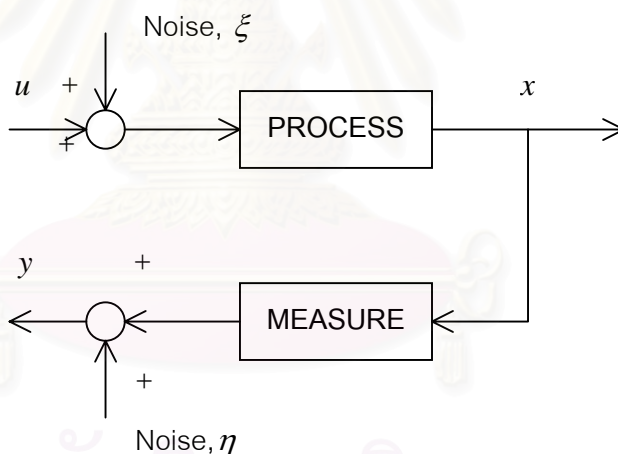
$$y(k) = Cx(k) + \eta(k) \quad (4.13)$$

โดยที่

$\xi(k)$ คือ สัญญาณรบกวนกระบวนการ (process noise) ซึ่งไม่เพียงแต่รวมสัญญาณขาเข้าของค่าการรบกวนระบบต่าง ๆ ยังได้รวมความไม่แน่นอนของแบบจำลองของกระบวนการไว้ด้วย

$\eta(k)$ คือ สัญญาณรบกวนค่าการวัด (measurement noise)

แผนภาพแสดงแบบจำลองของระบบตามสมการ (3.14) และ (3.15) แสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลองของระบบที่มีสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม

กำหนดให้

P คือเมตริกซ์ของความแปรปรวนร่วม (covariance) ของความผิดพลาดในการประมาณ

$$P = E\{\tilde{x}(k)\tilde{x}^T(k)\} \quad (4.14)$$

เมื่อ $\tilde{x}(k)$ คือความผิดพลาดจากการประมาณ

$$\tilde{x}(k) = x(k) - \hat{x}(k) \quad (4.15)$$

เมื่อ $\hat{x}(k)$ คือค่าประมาณของ x ที่เวลา k

Q คือความแปรปรวนร่วม (covariance) ของ $\xi(k)$ (จากแบบจำลอง)

$$Q = E[\xi(k)\xi^T(k)] \quad (4.16)$$

R คือความแปรปรวนร่วม (covariance) ของ $\eta(k)$ (จากแบบจำลอง)

$$R = E[\eta(k)\eta^T(k)] \quad (4.17)$$

ดังนั้นจะสามารถประมาณค่า x ที่เวลา $k+1$ ได้จากข้อมูลต่าง ๆ ที่เวลา k นั่นคือ เมื่อให้ $x(j/i)$ เป็นค่าประมาณของสแตต x ที่เวลา j โดยอาศัยค่าวัดที่เวลา i ทำนองเดียวกัน, $P(j/i)$ เป็นความแปรปรวนร่วมของความผิดพลาดจากการประมาณ (covariance of estimated errors) ที่เวลา j โดยอาศัยค่าวัดที่เวลา i

4.3.1 อัลกอริทึมคาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter Algorithm)

ขั้นตอนการออกแบบคาลมานฟิลเตอร์แบบมาตรฐานประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

การทำนาย (Prediction)

กำหนดค่า $\hat{x}(k/k), \hat{P}(k/k), Q, R$

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่าประมาณการของสแตตที่เวลา $k+1$

$$\hat{x}(k+1/k) = \phi\hat{x}(k/k) + \Gamma u(k) \quad (4.18)$$

และคำนวณค่าเมตริกซ์ของความแปรปรวนร่วมของความผิดพลาดจากการประมาณ (covariance of error of state estimates) ที่เวลา $k+1$

$$\hat{P}(k+1/k) = \phi\hat{P}(k/k)\phi^T + Q \quad (4.19)$$

การตรวจสอบ (Correction)

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาเมตริกซ์เกนคาลมาน (Kalman gain matrix) ที่เวลา $k+1$

$$K(k+1) = \hat{P}(k+1/k)C^T [C\hat{P}(k+1/k)C^T + R]^{-1} \quad (4.20)$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าการประมาณค่าใหม่โดยอาศัยค่าวัดของกระบวนการ

$$\hat{x}(k+1/k+1) = \hat{x}(k+1/k) + K(k+1)[y(k+1) - C\hat{x}(k+1/k)] \quad (4.21)$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าเมตริกซ์ของความแปรปรวนร่วมของความผิดพลาดจากการประมาณค่าใหม่ที่เวลา $k+1$ โดยอาศัยค่าวัดกระบวนการ

$$P(k+1/k+1) = [I - K(k+1)C]P(k+1/k)[I - K(k+1)C]^T + K(k+1)RK(k+1)^T \quad (4.22)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการบวกหนึ่งให้กับค่า k แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 1 ใหม่อีกครั้ง

การประยุกต์ใช้คาลมานฟิลเตอร์นั้นจะต้องอาศัยแบบจำลองซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่วัดค่าได้กับตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณนอกจากนี้จะต้องให้ค่าความไม่แน่นอนจากการประมาณ, P ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง, Q และความไม่แน่นอนของการวัด, R มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งความไม่แน่นอนเหล่านี้จะส่งผลถึงประสิทธิภาพในการประมาณค่าของคาลมานฟิลเตอร์

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือการพัฒนาทฤษฎีเบื้องต้นของการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตและทฤษฎีของคาลมานฟิลเตอร์ดังกล่าวมาแล้วข้างต้นสำหรับการออกแบบเครื่องควบคุมสำหรับระบบเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่ไม่เป็นเชิงเส้นภายใต้ขอบเขตจำกัดของการดำเนินงาน ที่สามารถรับประกันถึงเสถียรภาพและสมรรถนะความทนทานของการควบคุม โดยในงานวิจัยได้พิจารณาถึงปัญหาการควบคุมในด้านต่าง ๆ เป็นต้นว่าสมรรถนะของการควบคุม, การกำจัดค่าการรบกวนระบบ, การติดตามค่าเป้าหมาย และการควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง/กระบวนการที่ทำการควบคุม เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

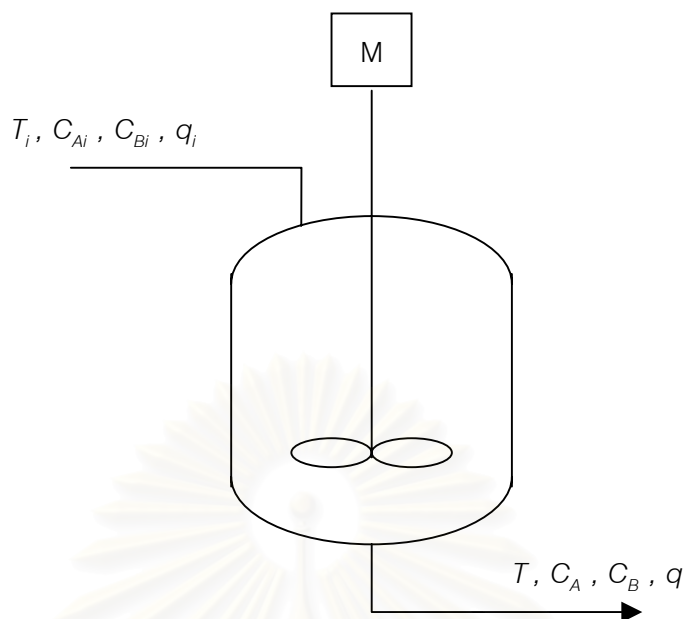
การจำลอง ผลการจำลอง และ การวิเคราะห์ผลการจำลอง สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มี ปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

บทนี้กล่าวถึงผลการประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ในรูปแบบของคาลมานฟิลเตอร์ในการควบคุมอุณหภูมิของสารในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (CSTR) ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ โดยกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการที่ใช้ในการจำลอง ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลองการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกในการควบคุมอุณหภูมิสารผลิตภัณฑ์ทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย โดยได้ทำการทดสอบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมและแบบจำลองของกระบวนการเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบพีไอดี

5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกระบวนการที่ใช้ในการจำลอง

สำหรับกระบวนการที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ของ Economou [6] ซึ่งเหตุผลในการเลือกกระบวนการนี้เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง (highly nonlinear) ทำให้การควบคุมทำได้ยากจึงเหมาะแก่การทดสอบการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก กระบวนการดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5.1

ปฏิกิริยาในระบบเกิดจากสารตั้งต้น A เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ B แบบผันกลับได้ซึ่งให้ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา (Heat of reaction, ΔH) ออกมาโดยสมมติว่าความหนาแน่นและค่าความจุความร้อนของระบบมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลาและถือว่าการสูญเสียความร้อนออกจากระบบมีค่าน้อยมาก ข้อสมมติที่สำคัญคือให้มีการผสมกันอย่างสมบูรณ์แบบภายในถังกวน (perfectly mixed) ดังนั้นสามารถหาแบบจำลองของระบบจากสมการอนุรักษ์มวลและพลังงานได้ดังนี้



รูปที่ 5.1 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

ก. สมการดุลมวลรวมของสารภายในถังกวน (total mass balance)

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho q_i - \rho q \quad (5.1)$$

ข. สมการดุลมวลของสารตั้งต้น A (reactant mass balance)

$$\frac{dVC_A}{dt} = q_i C_{Ai} - q C_A - V r_1 + V r_{-1} \quad (5.2)$$

ค. สมการดุลมวลของสารผลิตภัณฑ์ B (product mass balance)

$$\frac{dVC_B}{dt} = q_i C_{Bi} - q C_B + V r_1 - V r_{-1} \quad (5.3)$$

ง. สมการดุลพลังงานในถังปฏิกรณ์ (reactor energy balance)

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \rho q_i C_p T_i - \rho q C_p T - V \Delta H r_1 + V \Delta H r_{-1} \quad (5.4)$$

โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคือ

$$r_1 = k_1 C_A \quad (5.5)$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคือ

$$r_{-1} = k_{-1} C_B \quad (5.6)$$

และสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับเป็นไปตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius reaction)

$$k_1 = C_1 \exp\left(\frac{-Q_1}{RT}\right) \quad (5.7)$$

$$k_{-1} = C_{-1} \exp\left(\frac{-Q_{-1}}{RT}\right) \quad (5.8)$$

แทนค่าสมการที่ (5.1), (5.5) และ (5.6) ในสมการที่ (5.2) ดังนั้นสมการที่ (5.2) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{1}{\tau}(C_{Ai} - C_A) - k_1 C_A + k_{-1} C_B \quad (5.9)$$

เมื่อ $\tau = \frac{V}{q_i}$, $q_i = q$

ทำนองเดียวกันแทนค่าสมการที่ (5.1), (5.5) และ (5.6) ในสมการที่ (5.3) ได้เป็น

$$\frac{dC_B}{dt} = \frac{1}{\tau}(C_{Bi} - C_B) + k_1 C_A - k_{-1} C_B \quad (5.10)$$

แทนค่าต่าง ๆ ในสมการที่ (5.4) สามารถเขียนสมการที่ (5.4) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-\Delta H}{\rho C_p} (k_1 C_A - k_{-1} C_B) + \frac{1}{\tau}(T_i - T) \quad (5.11)$$

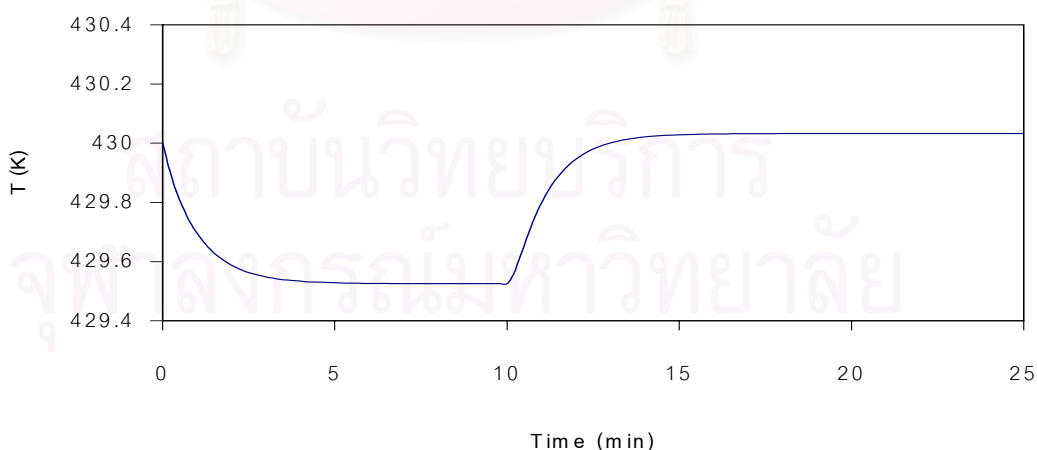
ดังนั้นสามารถเขียนแบบจำลองของกระบวนการนี้ได้ดังสมการที่ (5.9), (5.10) และ (5.11) ตามลำดับโดยที่สภาวะในการปฏิบัติการของระบบแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สภาวะการปฏิบัติการของระบบที่สถานะคงตัวสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

ตัวแปร	คำอธิบาย	ค่าตัวแปร	หน่วย
τ	ค่าคงที่เวลา	1	min
C_1	สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า	3×10^5	cal/(mol.K)
C_{-1}	สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ	6×10^7	cal/(mol.K)
R	ค่าคงที่แก๊ส	1.987	cal/(mol.K)
$-\Delta H$	ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา	5,000	cal/mol
Q_1	พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไปข้างหน้า	10,000	cal/mol
Q_{-1}	พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาย้อนกลับ	15,000	cal/mol
C_p	ค่าความจุความร้อนของสาร	1,000	cal/(kg.K)
ρ	ความหนาแน่นของสารในถังที่วาคงที่	1	kg/l
C_{Ai}	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเริ่มต้น A	1	mol/l
C_{Bi}	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารผลิตภัณฑ์ B	0	mol/l
T_i	อุณหภูมิของสายป้อน	427	K
T	อุณหภูมิเริ่มต้นของระบบ	430	K

5.2 การตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่ไม่มีการควบคุม (Openloop Response)

เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งแบบจำลองไดนามิกส์ของกระบวนการอธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์ 3 สมการ คือสมการที่ (5.9), (5.10) และ (5.11) ในการจำลองกระบวนการอาศัยการแก้สมการอนุพันธ์ของระบบโดยวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) โดยเริ่มต้นระบบที่ภาวะในการปฏิบัติการของระบบแสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งจะได้คำตอบของค่าที่ภาวะคงตัวสำหรับตัวแปรควบคุมคืออุณหภูมิ $[T=429.5 \text{ K}]$ พิจารณาการตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรกระบวนการแบบขั้นบันได โดยกำหนดให้ความเข้มข้นขาเข้าของสารตั้งต้นของเครื่องปฏิกรณ์, A , เป็นตัวแปรกระบวนการ โดยกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าแบบขั้นบันไดที่เวลา 10 นาที หลังจากทีระบบเข้าสู่ภาวะคงตัวแล้วให้มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 ของค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ภาวะคงตัว ส่วนค่าตัวแปรและพารามิเตอร์อื่น ๆ คงที่ที่ภาวะปฏิบัติการดังตารางที่ 5.1 บันทึกค่าการตอบสนองของกระบวนการเมื่อไม่มีการควบคุมใด ๆ สำหรับตัวแปรควบคุมคืออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์, T ในทุก ๆ 0.2 นาที เป็นเวลา 25 นาที จะได้กราฟการตอบสนองของกระบวนการแสดงดังรูปที่ 5.2 จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การตอบสนองของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปโดยระบบจะเข้าสู่ภาวะคงตัวค่าใหม่ที่แตกต่างจากค่าเดิม



รูปที่ 5.2 แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการเมื่อไม่มีการควบคุมและมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ

5.3 การจำลอง ผลการจำลอง และการวิเคราะห์ผลการจำลองการควบคุม

การจำลองการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้นั้นมีวัตถุประสงค์คือการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์, T ซึ่งเป็นตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายที่กำหนดโดยการปรับค่าอุณหภูมิของสายป้อน, T_i ซึ่งเป็นตัวแปรปรับกระบวนการกำหนดให้สามารถปรับเปลี่ยนได้อยู่ในช่วง $350 \text{ K} \leq T_i \leq 450 \text{ K}$ และกำหนดให้ความเข้มข้นขาเข้าของสารตั้งต้น, C_{A_i} เป็นตัวแปรกระบวนการ

จากการที่กระบวนการที่ทำการควบคุมนี้เป็นกระบวนการแบบไม่เชิงเส้นการจำลองกระบวนการจะใช้วิธีเชิงตัวเลขโดยใช้สภาวะในการปฏิบัติการเริ่มต้นของระบบแสดงดังตารางที่ 5.1 กำหนดให้พารามิเตอร์ทั้งหมดถูกกำหนดค่าไว้ยกเว้นอุณหภูมิของสายป้อน, T_i สำหรับเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกใช้แบบจำลองของเครื่องควบคุมในรูปแบบของสมการสเตตสเปซ โดยประยุกต์ใช้ร่วมกับการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ซึ่งใช้อัลกอริทึมของคาลมานฟิลเตอร์ สำหรับเครื่องควบคุมแบบพีไอดีใช้สมการในรูปความเร็ว (velocity form) โดยใช้เวลาสุ่มเดียวกันทั้งหมด

ในการทดลองเป็นการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย โดยในการควบคุมได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกและการควบคุมแบบพีไอดีในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

1. การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุมระหว่างการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกและการควบคุมแบบพีไอดี

ในการทดลองได้ทำการเลียนแบบจำลองการควบคุมโดยเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุมระหว่างการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกที่ใช้ร่วมกับตัวประมาณค่าแบบคาลมานฟิลเตอร์และการควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ โดยพิจารณาทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบ และกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุม โดยในการควบคุมได้พยายามปรับค่าของพารามิเตอร์ปรับจูนของเครื่องควบคุมให้ได้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกันที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

2. การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุมระหว่างการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกและการควบคุมแบบพีไอดี

เนื่องจากการประยุกต์ใช้ในการควบคุมจริงอาจมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม/กระบวนการ เกิดขึ้นซึ่งอาจส่งผลให้การควบคุมไม่ได้ผลดี ในการทดลองได้สมมติให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมและแบบจำลองของกระบวนการ ผิดพลาดไปจากค่าที่ภาวะคงตัวตามภาวะปฏิบัติการของระบบดังตารางที่ 5.1 โดยในการควบคุมยังคงใช้ภาวะของเครื่องควบคุมเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองโดยไม่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ปรับจูนใด ๆ พิจารณาการตอบสนองของกระบวนการสำหรับกรณีการทดลองดังนี้

2.1 การควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (Model-Mismatch)

สำหรับกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมอันเนื่องมาจากการหาแบบจำลองผิดหรือมีพารามิเตอร์ใด ๆ ผิดพลาดไปซึ่งจะไม่ส่งผลต่อการควบคุมแบบพีไอดีเนื่องจากเครื่องควบคุมแบบพีไอดีจะไม่ขึ้นกับตัวแปรหรือพารามิเตอร์ใด ๆ นอกจากค่าความผิดพลาดจากการควบคุมเท่านั้นและเครื่องควบคุมแบบพีไอดีอาศัยการปรับจูนจากกระบวนการจริงดังนั้นในการทดลองจึงไม่ต้องทำการทดสอบการควบคุมแบบพีไอดีในกรณีนี้ เมื่อแบบจำลองผิดจะส่งผลต่อการควบคุม ดังนั้นเพื่อทดสอบความทนทานของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก ในการจำลองได้กำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

- ก. ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30
- ข. ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

2.2 การควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Plant-Mismatch)

สำหรับกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการที่จะทำการควบคุม จะส่งผลต่อการควบคุมทั้งการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกและแบบพีไอดีเนื่องจากการควบคุมแบบพีไอดีอาศัยการปรับจูนจากกระบวนการจริง ดังนั้นเมื่อเกิดการผิดพลาดใด ๆ ของกระบวนการในระหว่างการควบคุมจะทำให้พารามิเตอร์ปรับจูนไม่สามารถปรับเครื่องควบคุมให้ทำงานได้ดีเทียบเท่ากับกรณีปกติ และสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกซึ่งเป็นการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองเป็นพื้นฐานเมื่อแบบจำลองผิดจะส่งผลต่อการควบคุม ดังนั้นเพื่อทดสอบความทนทานของ

การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกและฟิวอี้ ในการทดลองจึงกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุมในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

ก. ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

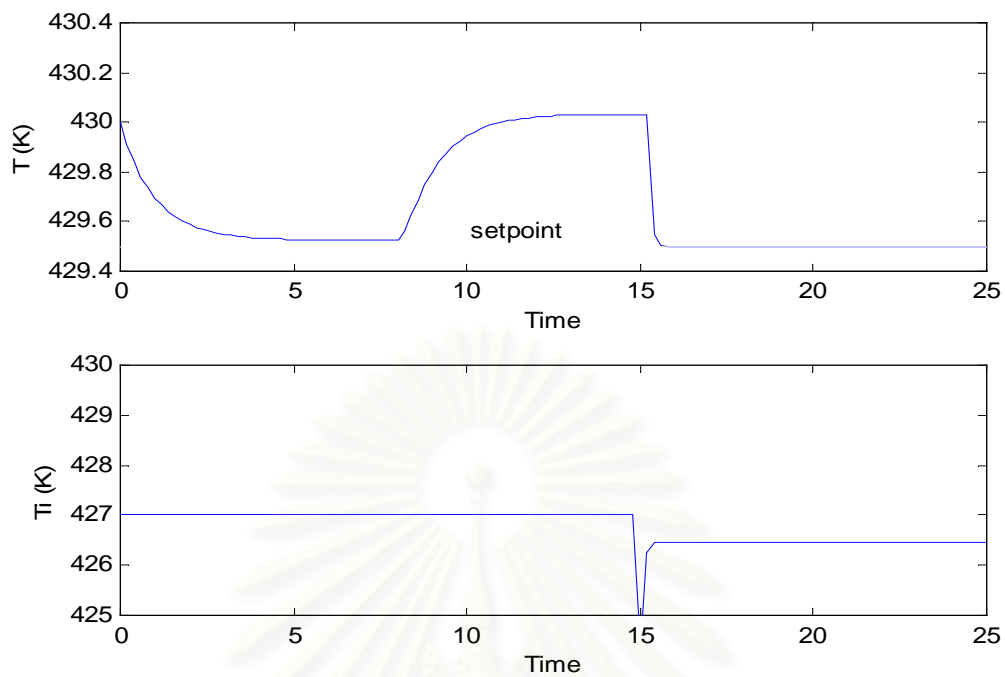
ข. ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

พิจารณาผลการควบคุมสำหรับกรณีการควบคุมต่าง ๆ ดังนี้

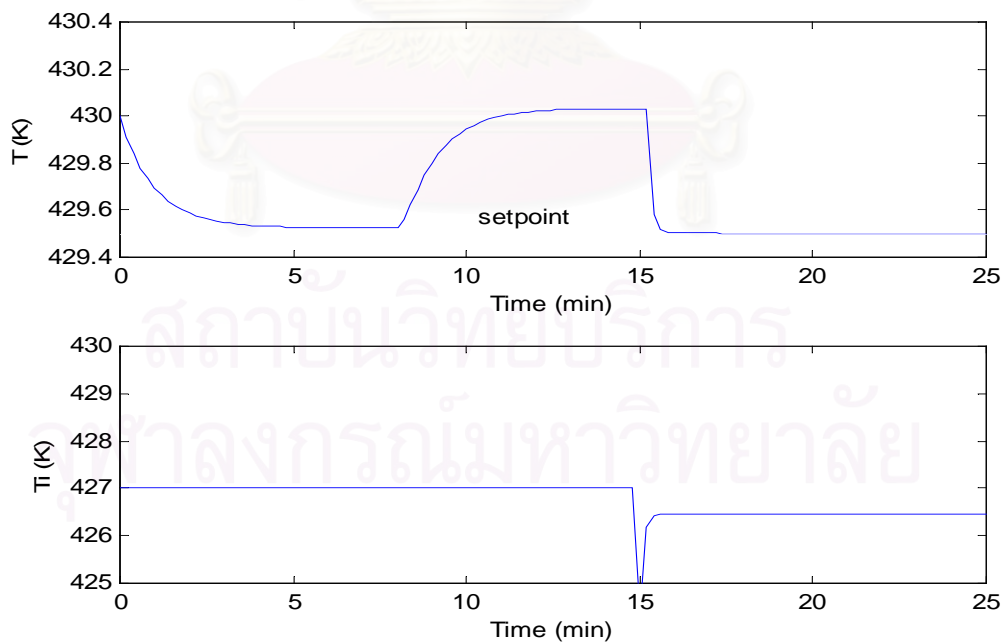
1. การควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได

1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม

วัตถุประสงค์ในการจำลองการควบคุมนี้เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 429.5 K ในกรณีที่ค่าตัวรบกวนระบบ, A_1 มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 ของค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ภาวะคงตัว ที่เวลา 8 นาทีหลังจากที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัวแล้วจากนั้นเริ่มทำการควบคุมที่เวลา 15 นาที โดยที่อุณหภูมิขาเข้า, T_1 ซึ่งเป็นตัวแปรปรับกระบวนการสามารถปรับเปลี่ยนได้ในช่วง $350 K \leq T_1 \leq 450 K$ พิจารณาการตอบสนองของกระบวนการเป็นเวลา 25 นาที เปรียบเทียบผลการควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกแสดงดังรูปที่ 5.3 และการควบคุมแบบฟิวอี้แสดงดังรูปที่ 5.4 พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระบบเปลี่ยนแปลงไป โดยระบบจะเข้าสู่ภาวะคงตัวค่าใหม่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเริ่มทำการควบคุมที่เวลา 15 นาที เครื่องควบคุมแบบเจเนติกและเครื่องควบคุมแบบฟิวอี้จะสามารถปรับสภาพของกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้ และเมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 5.2 พบว่าให้ผลใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองได้พยายามปรับค่าพารามิเตอร์ปรับจูนของเครื่องควบคุมให้ได้ผลใกล้เคียงกันที่สุดเท่าที่เป็นไปได้



รูปที่ 5.3 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบโดยการควบคุมแบบเจเนริก

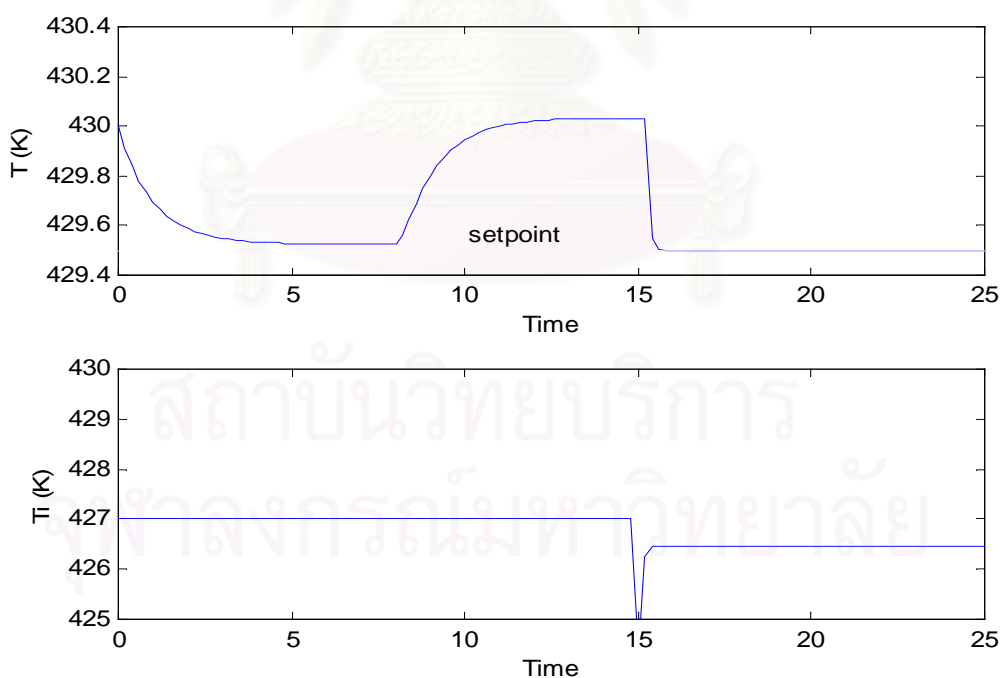


รูปที่ 5.4 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบโดยการควบคุมแบบพีไอดี

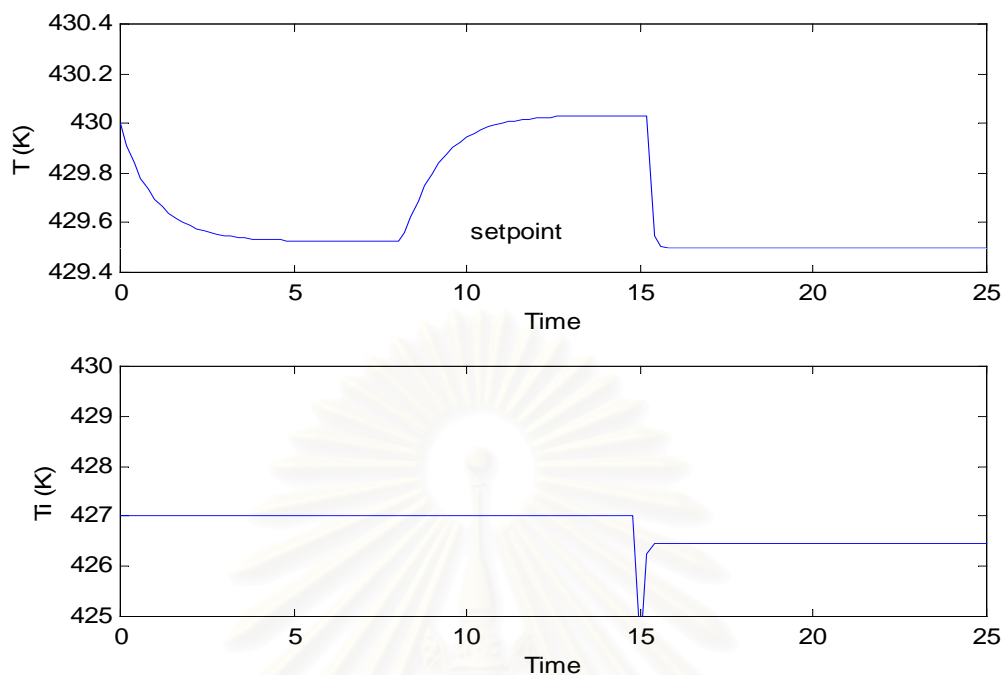
1.2 การทดสอบความทนทานของการควบคุม

1.2.1 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้น ร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ 5.5 และกรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ 5.6 ตามลำดับ และจากการพิจารณาค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดในการควบคุมพบว่าให้ผลใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีความทนทานสามารถควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมดังกล่าวได้



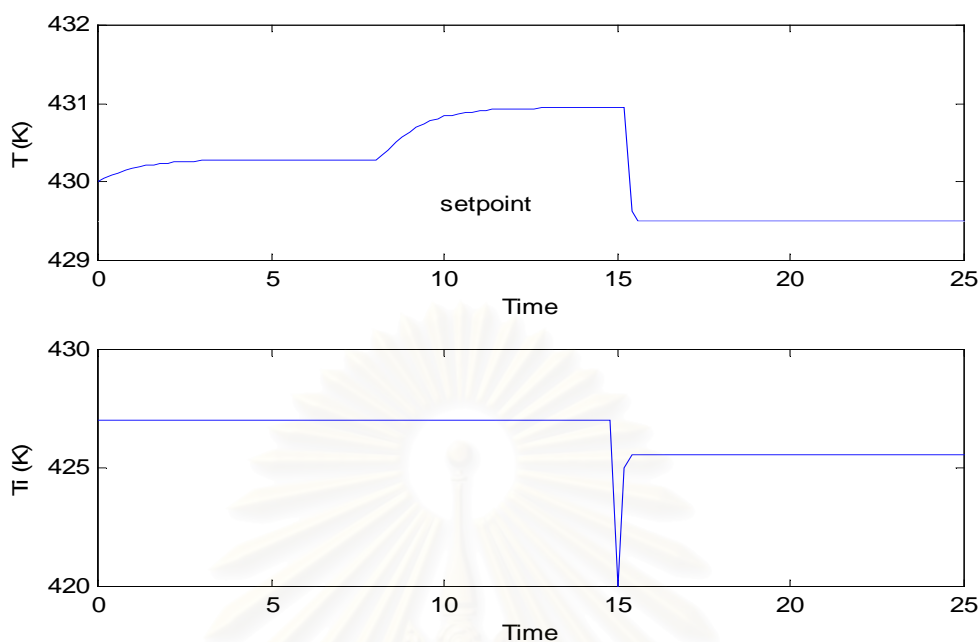
รูปที่ 5.5 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก



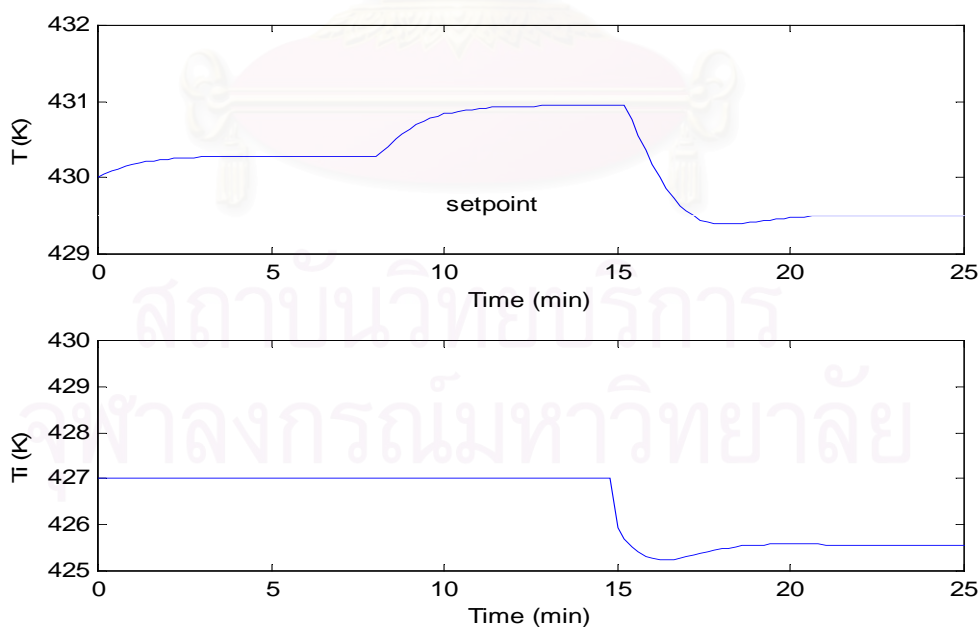
รูปที่ 5.6 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก

1.2.2 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ

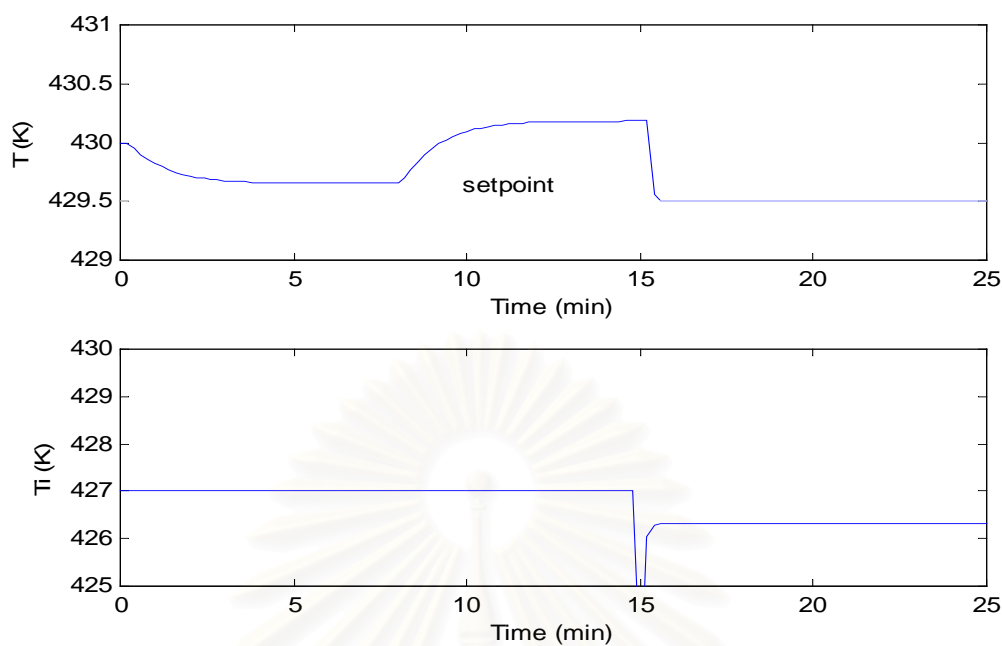
ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ และกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุม พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกแสดงดังรูปที่ 5.7 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ 5.8 และพิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกแสดงดังรูปที่ 5.9 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ 5.10 ตามลำดับ



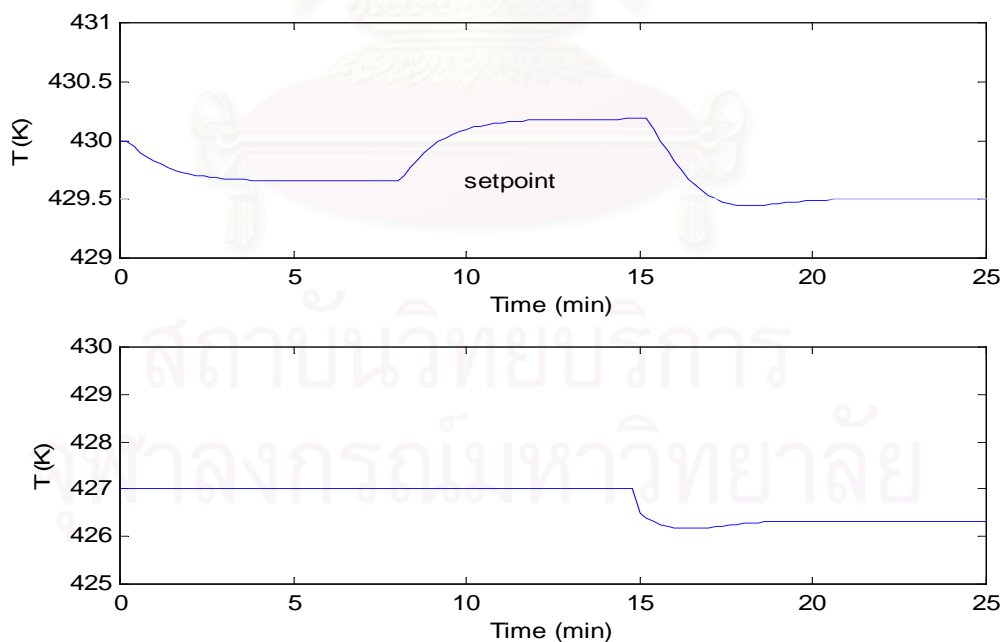
รูปที่ 5.7 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก



รูปที่ 5.8 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบฟัซซี่



รูปที่ 5.9 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีเอชไอ



รูปที่ 5.10 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี

พิจารณาจากช่วงเวลาเริ่มต้นถึงเวลา $t = 15$ นาทีซึ่งยังไม่มีการควบคุมเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดพบว่า เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการดังกล่าวจะส่งผลให้การตอบสนองของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนกระทั่งเริ่มทำการควบคุม เครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้โดยให้ผลใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่าการควบคุมแบบพีไอดี แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีความทนทานสูงกว่าการควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุม

ตารางที่ 5.2 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิ

เมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

กรณีการควบคุม	GMC	PID
1. ควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนระบบมีการเปลี่ยนแปลง		
1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม	3.9	3.9
1.2 การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุม		
1.2.1 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม		
1.2.1 ก. ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	3.9	-
1.2.1 ข. k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	3.9	-
1.2.2 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ		
1.2.2 ก. ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	15.8	18.4
1.2.2 ข. k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	6.1	9.4

2. การควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได

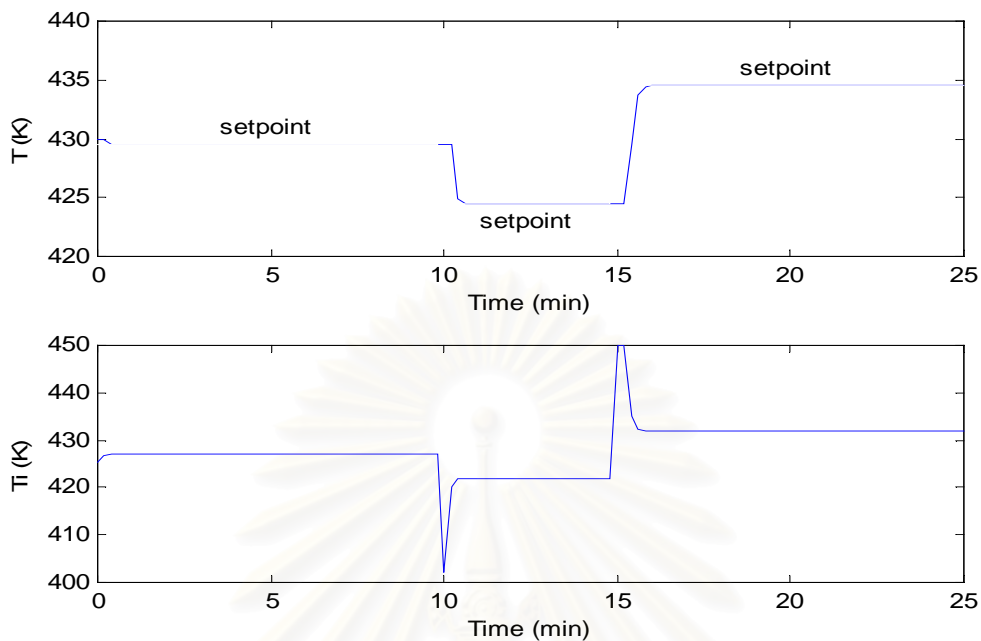
2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม

ในการจำลองการควบคุมกำหนดให้ค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดลดลง 5 K ที่เวลา 10 นาทีหลังจากที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัวแรก [$T = 429.5 \text{ K}$] แล้วจึงทำการควบคุม จากนั้นกำหนดให้ค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 10 K ที่เวลา 15 นาที พิจารณาผลการตอบสนองของกระบวนการเป็นเวลา 25 นาที เปรียบเทียบผลการควบคุมในการติดตามค่าเป้าหมาย สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ 5.11 และการควบคุมแบบพีไอดีแสดงดังรูปที่ 5.12 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมที่ดีในการติดตามค่าเป้าหมายในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีทำให้มีค่า offset ในการควบคุมที่เวลาที่มีการปรับเปลี่ยนค่าเป้าหมาย ทั้งนี้ในการควบคุมไม่ได้ทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ใหม่จากการควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการซึ่งได้พยายามปรับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมให้ได้ผลใกล้เคียงกันเท่าที่เป็นไปได้แล้ว นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 5.3 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุม

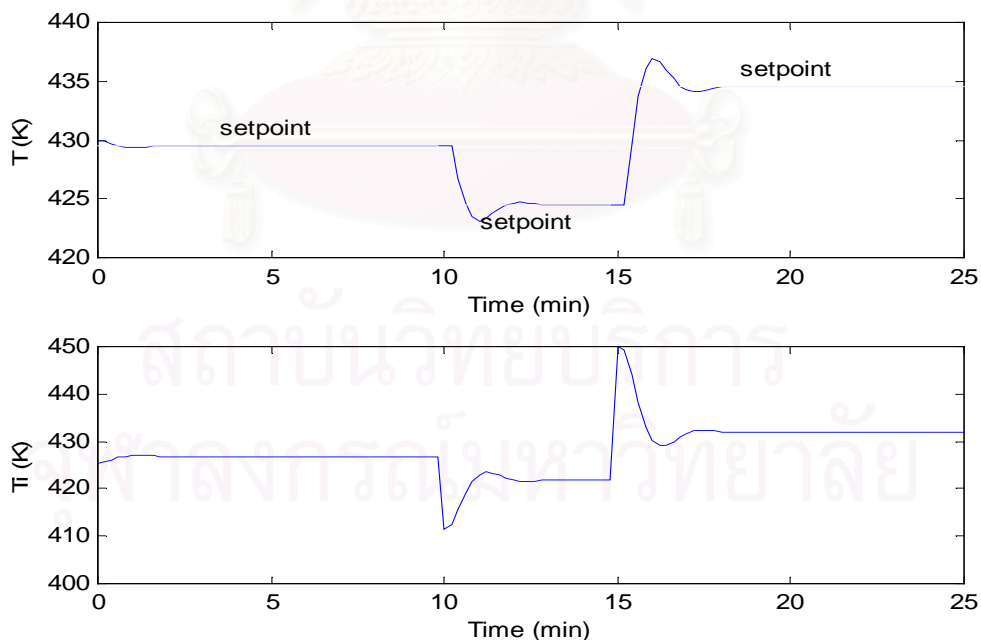
2.2 การทดสอบความทนทานของการควบคุม

2.2.1 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม

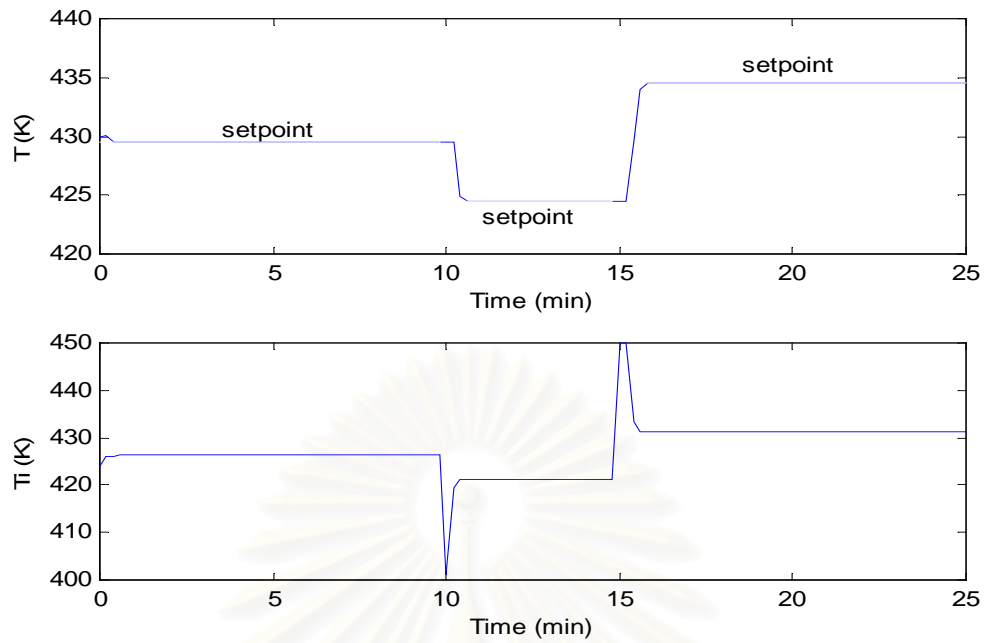
ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและกำหนดให้มีค่าความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ 5.13 และกรณีที่ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ 5.14 ตามลำดับ และจากการพิจารณาค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบกับการควบคุมในกรณีที่ไม่มีค่าความผิดพลาดพบว่าให้ผลใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีความทนทาน สามารถควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมได้



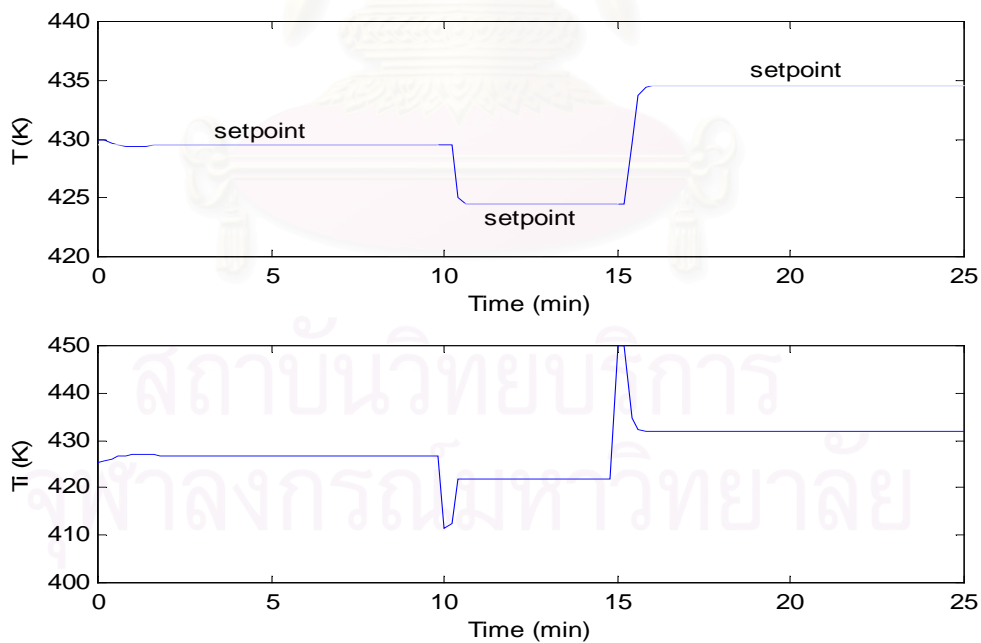
รูปที่ 5.11 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายโดยการควบคุมแบบเจเนติก



รูปที่ 5.12 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายโดยการควบคุมแบบพีไอดี



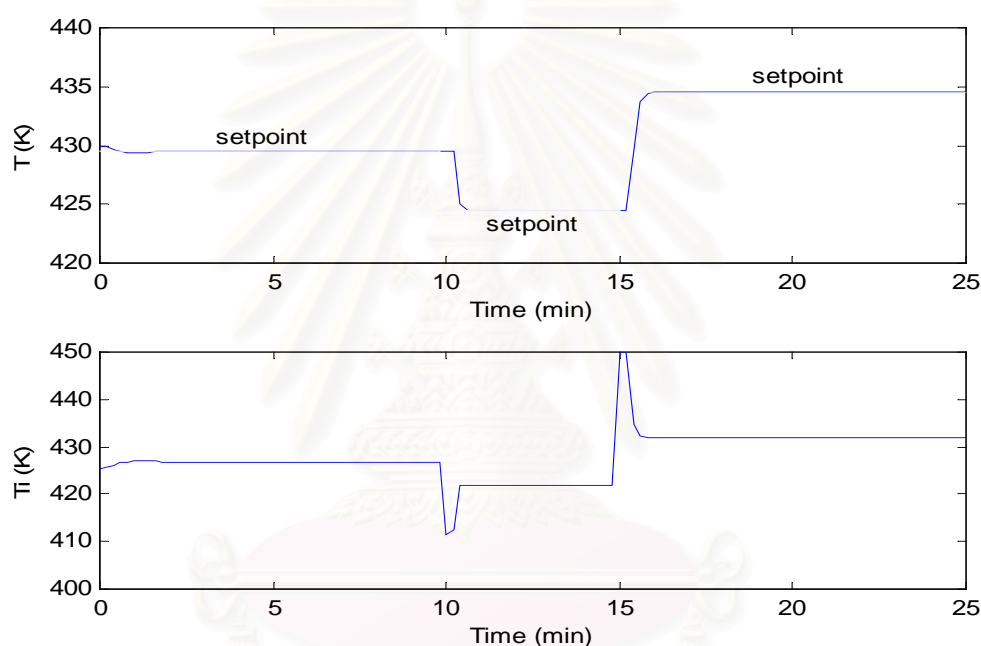
รูปที่ 5.13 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก



รูปที่ 5.14 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก

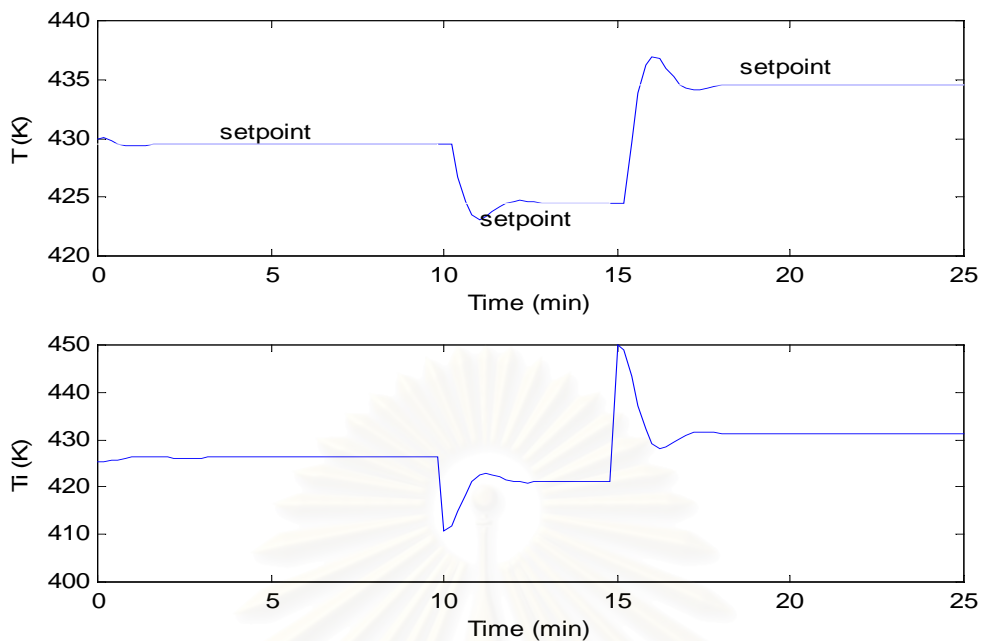
2.2.2 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุม พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก แสดงดังรูปที่ 5.15 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ 5.16 และกรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ 5.17 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ 5.18

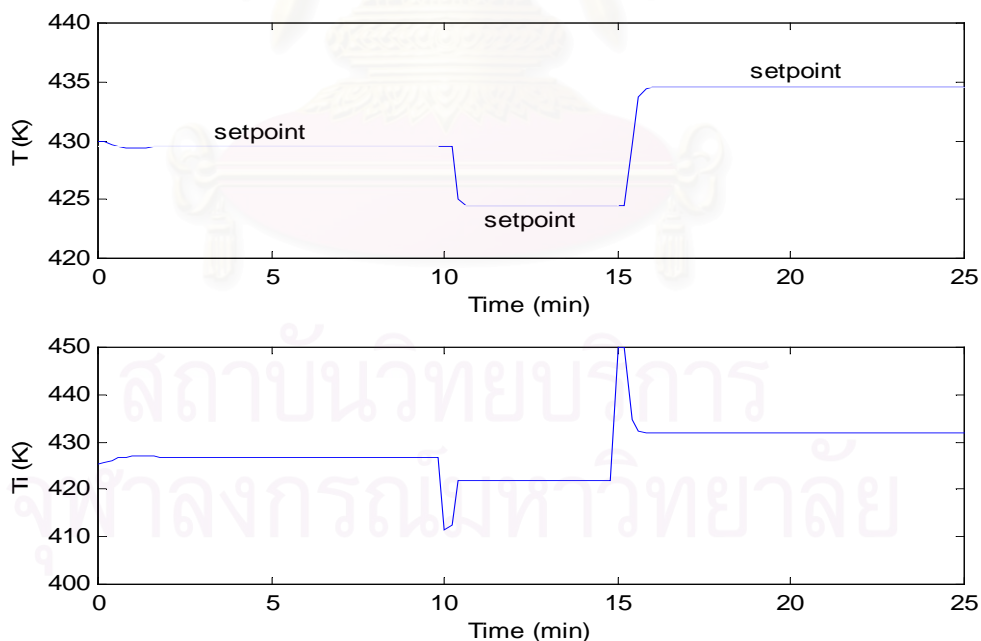


รูปที่ 5.15 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนริก

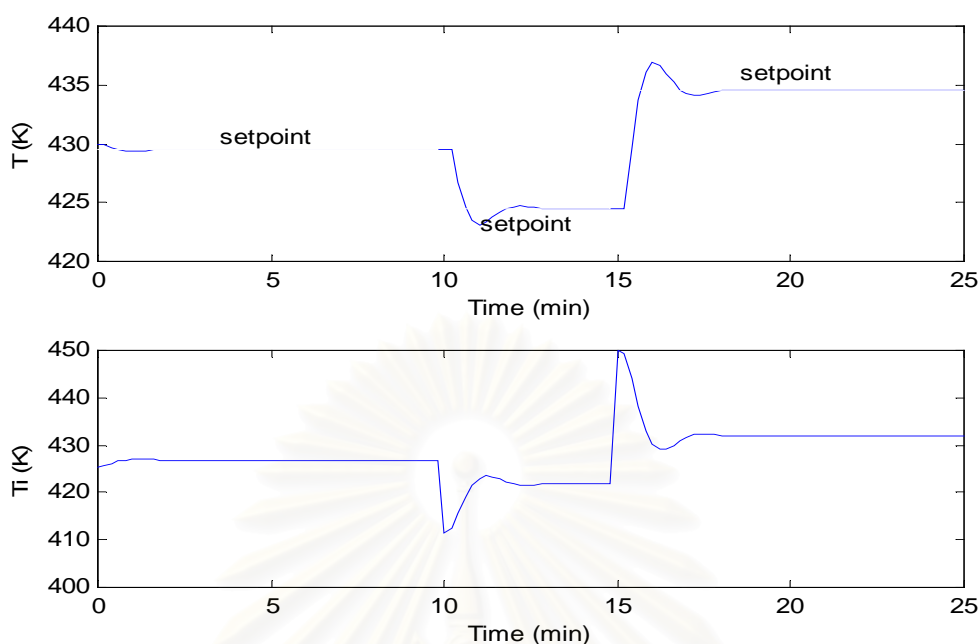
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.16 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 5.17 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบเจเนติก



รูปที่ 5.18 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30) โดยการควบคุมแบบพีไอดี

ตารางที่ 5.3 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

กรณีการควบคุม	GMC	PID
2. ควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลง		
2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม	8.3	12.5
2.2 การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุม		
2.2.1 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม		
2.2.1 ก. ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	8.3	-
2.2.1 ข. k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	8.3	-
2.2.2 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ		
2.2.2 ก. ΔH เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	15.3	16.7
2.2.2 ข. k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	9.6	12.8

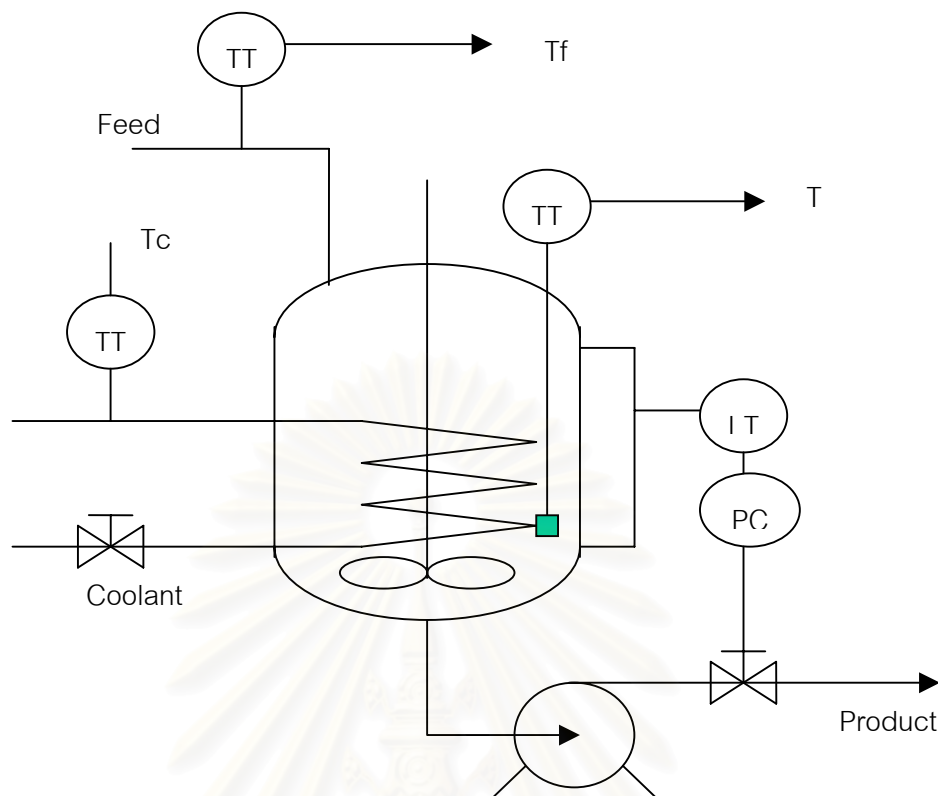
บทที่ 6

การจำลอง ผลการจำลอง และการวิเคราะห์ผลการจำลอง สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มี ปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้

บทนี้กล่าวถึงผลการประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ในรูปแบบของคาลมานฟิลเตอร์สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (CSTR) ที่มีปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ ซึ่งแสดงพฤติกรรมของลูฟเปิดที่ซับซ้อน (complex openloop behavior) ในกรณีการควบคุม 3 กรณีคือ กรณีที่ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์อย่างมาก กรณีที่ระบบมีหลายภาวะคงตัวและมีภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพและกรณีที่ระบบมีการแกว่งเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก โดยกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมถึงค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ใช้ในการทดลองสำหรับกรณีต่าง ๆ การจำลอง ผลการจำลอง และการวิเคราะห์ผลการจำลองการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์แบบคาลมานฟิลเตอร์ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุมโดยได้ทำการทดสอบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมและแบบจำลองของกระบวนการเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบพีไอดี

6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกระบวนการที่ใช้ในการทดลอง

กระบวนการที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง ซึ่งเกิดปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ของ Uppal [5] แสดงดังรูปที่ 6.1 ซึ่งเหตุผลในการเลือกกระบวนการนี้เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงและมีปัญหาต่าง ๆ ในการดำเนินการควบคุมที่น่าสนใจ จากพฤติกรรมที่ซับซ้อนของลูฟเปิดเช่นกรณีที่ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์อย่างมาก ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีหลายภาวะคงตัวและมีภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพและระบบแสดงพฤติกรรมที่มีการแกว่งเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความยากในการออกแบบการควบคุมและการทำการควบคุม จึงเหมาะแก่การทดสอบการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก



รูปที่ 6.1 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องซึ่งเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้

ปฏิกิริยาเคมีในระบบเกิดจากการที่สารตั้งต้นเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งให้ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาออกมา โดยสมมติว่าความหนาแน่นและค่าความจุความร้อนของระบบมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา และให้มีการผสมกันอย่างสมบูรณ์แบบภายในถังกวน ในการระบายความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีนั้นใช้น้ำหล่อเย็นที่ไหลผ่านขดลวด (cooling coil) ที่ขดรอบถังกวน สามารถหาแบบจำลองของระบบจากสมการอนุรักษ์มวลและพลังงานได้ดังนี้

- สมการดุลมวลรวมของสารภายในถังกวน (total mass balance)

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho Q - \rho Q_0 \quad (6.1)$$

- สมการดุลมวลของสารตั้งต้น (reactant mass balance)

$$\frac{dVC}{dt} = -Vr + Q(C_f - C) \quad (6.2)$$

- สมการดุลพลังงานของถังปฏิกรณ์ (reactor energy balance)

$$\rho C_p \frac{dVT}{dt} = UA(T_c - T) + \rho C_p Q(T_f - T) - V\Delta Hr \quad (6.3)$$

เมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคือ

$$r = kC \quad (6.4)$$

และสัมประสิทธิ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส

(Arrhenius reaction)

$$k = k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (6.5)$$

แทนค่าสมการที่ (6.1), (6.4) และ (6.5) ในสมการที่ (6.2) และจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{dC}{dt} = -k_0 C \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) + \frac{Q}{V}(C_f - C) \quad (6.6)$$

ทำนองเดียวกันแทนค่าสมการที่ (6.1), (6.4) และ (6.5) ในสมการที่ (6.3) และจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{-\Delta H}{\rho C_p}\right) k_0 C \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) + \frac{Q}{V}(T_f - T) + \frac{UA}{\rho C_p V}(T_c - T) \quad (6.7)$$

ดังนั้นสามารถเขียนแบบจำลองของกระบวนการนี้ได้ดังสมการที่ (6.6) และ (6.7)

เพื่อความสะดวกในการออกแบบการควบคุม แบบจำลองดังกล่าวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของพารามิเตอร์และตัวแปรไร้หน่วย (ภาคผนวก ก) ได้ดังนี้

นิยามพารามิเตอร์ไร้หน่วย (dimensionless parameters)

$$\beta = \frac{-\Delta H C_f}{\rho C_p T_{f0}} \gamma \quad (6.8)$$

$$\delta = \frac{UA}{\rho C_p Q_0} \quad (6.9)$$

$$\gamma = \frac{E}{RT_{f0}} \quad (6.10)$$

$$\phi = \frac{V}{Q_0} k_0 e^{-\gamma} \quad (6.11)$$

$$q = \frac{Q}{Q_0} \quad (6.12)$$

นิยามตัวแปรไร้หน่วย (dimensionless variables)

$$u = \frac{\gamma \delta}{T_{f0}} (T_c - T_{f0}) \quad (6.13)$$

$$v = \frac{\gamma q}{T_{f0}} (T_f - T_{f0}) \quad (6.14)$$

$$\tau = \frac{Q_0}{V} t \quad (6.15)$$

$$x_1 = \frac{C}{C_f} \quad (6.16)$$

$$x_2 = \frac{T - T_{f0}}{T_{f0}} \gamma \quad (6.17)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (6.6) และ (6.7) สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในเทอมของพารามิเตอร์และตัวแปรไร้หน่วยได้ดังนี้

$$\frac{dx_1}{d\tau} = -\phi x_1 K(x_2) + q(1 - x_1) \quad (6.18)$$

$$\frac{dx_2}{d\tau} = \beta \phi x_1 K(x_2) - (q + \delta)x_2 + u + v \quad (6.19)$$

เมื่อ

$$K(x_2) = \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) \quad (6.20)$$

ดังนั้นสามารถเขียนแบบจำลองของกระบวนการนี้ได้ดังสมการที่ (6.18), (6.19) และ (6.20) โดยที่สถานะในการปฏิบัติงานของระบบแสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ภาวะในการปฏิบัติการของระบบที่สถานะคงตัวในกรณีศึกษา 3 กรณี สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้

พารามิเตอร์	กรณีศึกษาที่ 1 ระบบมีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์อย่างมาก	กรณีศึกษาที่ 2 ระบบมีหลายภาวะคงตัวและมีภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพ	กรณีศึกษาที่ 3 ระบบมีการแกว่งเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก
ϕ	0.11	0.072	0.135
β	7	8	11
δ	0.5	0.3	1.5
T	300 K	330 K	300 K
x_1	1	1	1
x_2	0	2	0
ΔT_f	10 K	10 K	10 K
T_{f0}	300 K	300 K	300 K
T_f	300 K	300 K	300 K
q	1	1	1
γ	20	20	20

สัญลักษณ์ที่ใช้แสดงค่าพารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 สัญลักษณ์ของพารามิเตอร์และตัวแปรของกระบวนการ

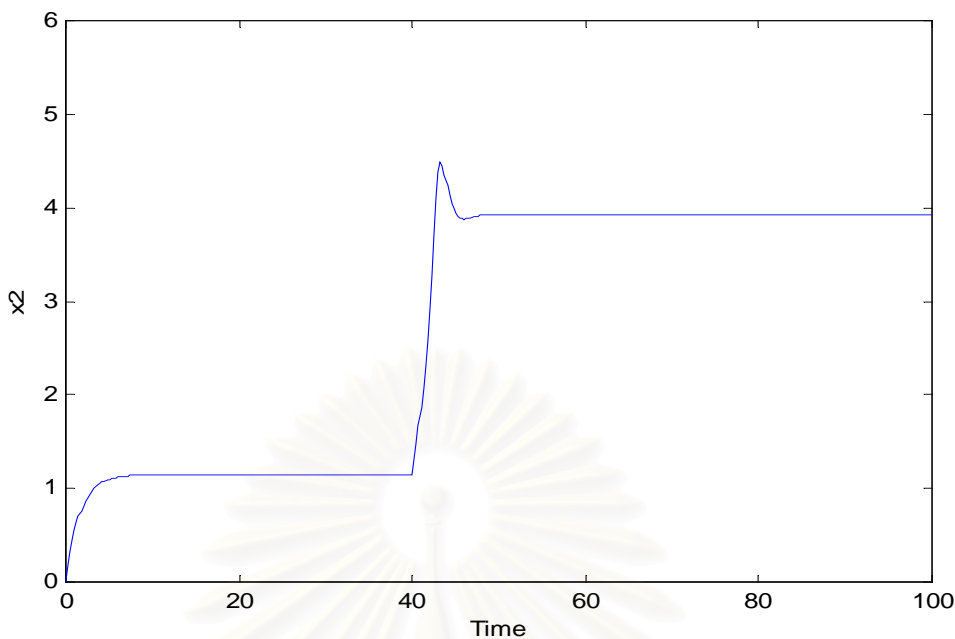
ตัวแปร	คำอธิบาย	หน่วย
C	ความเข้มข้นของสารภายในถังปฏิกรณ์	mol.m^{-3}
C_f	ความเข้มข้นของสารขาเข้า	mol.m^{-3}
C_p	ค่าความจุความร้อนของสาร	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
ΔH	ค่าความร้อนของปฏิกิริยา	J mol^{-1}
$k(T)$	ค่าคงที่อัตราของ Arrhenius	s^{-1}
k_0	ค่าคงที่ของ Arrhenius	s^{-1}
Q	อัตราการไหลของสายป้อน	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
Q_c	อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
q	เทอมตัวแปรไร้หน่วยของอัตราการไหลของสายป้อน	-
q_c	เทอมตัวแปรไร้หน่วยของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	-
R	ค่าคงที่ของก๊าซ	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
t	เวลา	s
T	อุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์	K
T_c	อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น	K
T_f	อุณหภูมิของสายป้อน	K
u	เทอมตัวแปรไร้หน่วยขาเข้าของกระบวนการ	-
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	$\text{J s}^{-1} \text{K}^{-1} \text{m}^{-2}$
V	ปริมาตรของถังปฏิกรณ์	m^3
x_1	เทอมตัวแปรไร้หน่วยของความเข้มข้น	-
x_2	เทอมตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิ	-
ϕ	เทอมตัวแปรไร้หน่วยของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา	-
β	เทอมตัวแปรไร้หน่วยของค่าความร้อนของปฏิกิริยา	-
γ	เทอมตัวแปรไร้หน่วยของพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา	-
δ	เทอมตัวแปรไร้หน่วยของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	-

6.2 การตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่ไม่มีการควบคุม (Openloop Response)

เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้แสดงในรูปที่ 6.1 ซึ่งไดนามิกส์ของกระบวนการอธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์ 2 สมการคือสมการที่ (6.18) และ (6.19) ทำการแก้สมการอนุพันธ์ของระบบโดยวิธีเชิงตัวเลข โดยอาศัยภาวะในการปฏิบัติการของระบบแสดงดังตารางที่ 6.1 จะได้คำตอบของค่าที่ภาวะคงตัวสำหรับกรณีศึกษา 3 กรณีคือ ในกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีที่ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์อย่างมาก จะได้ค่าที่ภาวะคงตัว $[x_2=1.1422]$ สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งเป็นกรณีที่ระบบมีหลายภาวะคงตัว และมีภาวะคงตัวที่ไม่เสถียรพบว่ามีคำตอบของค่าที่ภาวะคงตัว 3 ค่า คือ ที่ภาวะคงตัวล่าง (lower steady state) $[x_2= 0.8859]$ ค่าที่ภาวะคงตัวกลาง (middle steady state) $[x_2= 2.7517]$ และที่ภาวะคงตัวบน (upper steady state) $[x_2= 4.7050]$ และสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งเป็นกรณีที่ระบบมีการแกว่งเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก จะได้ค่าที่ภาวะคงตัว $[x_2= 0.5504]$

พิจารณากการตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการแบบขั้นบันไดโดยกำหนดให้อุณหภูมิเข้า, T_f เป็นตัวแปรกระบวนการโดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าแบบขั้นบันไดเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 300 K (27 °C) เป็น 310 K (37 °C) ที่เวลา $\tau = 40$ หลังจากทีระบบเข้าสู่ภาวะคงตัวแล้ว ส่วนค่าตัวแปรและพารามิเตอร์อื่น ๆ คงที่ที่ภาวะปฏิบัติการดังตารางที่ 6.1 บันทึกค่าของการตอบสนองของกระบวนการเมื่อไม่มีการควบคุมใด ๆ สำหรับตัวแปรควบคุมคืออุณหภูมิ, x_2 ในทุก ๆ ช่วงเวลาสุ่ม $d\tau = 0.25$ เป็นเวลา $\tau = 100$ จะได้กราฟของการตอบสนองของกระบวนการ (ในเทอมของตัวแปรไร้หน่วยของอุณหภูมิสัมพันธ์กับเวลา) สำหรับกรณีที่ 1 แสดงดังรูปที่ 6.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากจากค่าที่ภาวะคงตัวแรกไปยังภาวะคงตัวใหม่ แสดงให้เห็นว่าระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์อย่างมาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



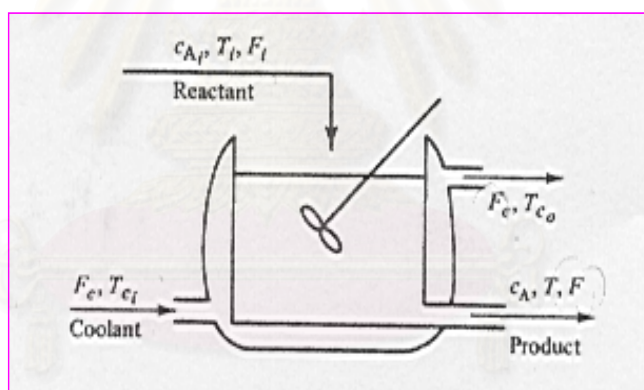
รูปที่ 6.2 ผลการตอบสนองของกระบวนการสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อไม่มีการควบคุมและมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ

สำหรับกรณีที่ 2 พิจารณาเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (CSTR) [22] ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนโดยเกิดปฏิกิริยา $A \rightarrow B$ ความร้อนจากปฏิกิริยาถูกนำออกไปโดยสารหล่อเย็นที่ไหลผ่านแจ็กเก็ต (jacket) โดยรอบเครื่องปฏิกรณ์เคมีแสดงดังรูปที่ 6.3 จากการวิเคราะห์ระบบของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง กราฟที่แสดงปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาคายความร้อน (heat released by the exothermic reaction) จะมีลักษณะเป็นรูปตัวเอสซึ่งอยู่ในฟังก์ชันของอุณหภูมิ (sigmoidal function of the temperature) คือเส้นกราฟ A ดังรูปที่ 6.4 ในขณะที่ความร้อนที่ถูกนำออกไปโดยสารหล่อเย็นเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับอุณหภูมิ (linear function of the temperature) คือเส้นกราฟ B ในรูปที่ 6.4 เมื่อเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องอยู่ที่ภาวะคงตัว (steady state) ค่าความร้อนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเท่ากับค่าความร้อนที่ถูกนำออกมาโดยสารหล่อเย็น ดังรูปที่ 6.4 จุด P_1, P_2, P_3 แสดงภาวะคงตัวดังกล่าว ภาวะคงตัว P_1 และ P_3 มีเสถียรภาพ ขณะที่ภาวะคงตัว P_2 ไม่มีเสถียรภาพ

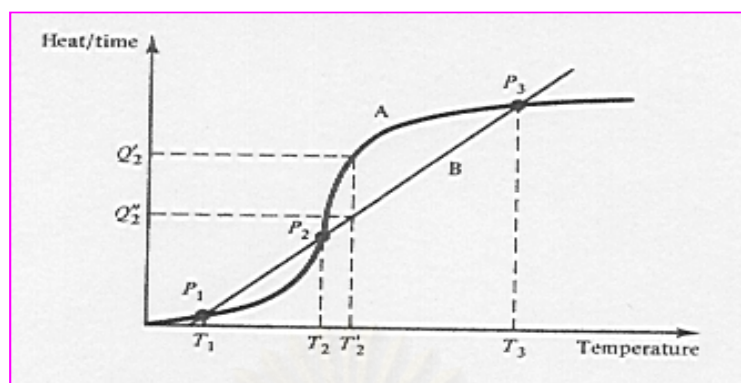
เพื่อความเข้าใจถึงความมีเสถียรภาพ พิจารณาภาวะคงตัว P_2 สมมติว่าเริ่มที่อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ T_2 และความเข้มข้น c_{A2} เมื่ออุณหภูมิสายป้อน (feed) T_i เพิ่มขึ้น มีผลให้อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มเป็น T_2' ที่อุณหภูมินี้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา (Q_2') มากกว่าความร้อนที่ถูกนำออกไปโดยสารหล่อเย็น (Q_2'') ด้วยเหตุนี้ทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์สูงขึ้นและส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นด้วย การที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น

ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาคายความร้อนก็จะมีปริมาณมากขึ้นทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์สูงมากขึ้นไปอีก ดังนั้นพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ T_i ทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เลื่อนจากภาวะคงตัว P_2 และอุณหภูมิจะถึงค่าที่ภาวะคงตัว P_3 ในที่สุด ดูรูปที่ 6.5 (a) ในลักษณะเดียวกัน ถ้าอุณหภูมิ T_i ลดลงอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ก็จะเลื่อนจากภาวะคงตัว P_2 ไปยังภาวะคงตัว P_1 ดูรูปที่ 6.5 (b) เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว ถ้าเครื่องปฏิกรณ์ทำงานที่ภาวะคงตัว P_3 หรือ P_1 และถูกรบกวนระบบโดยปกติแล้วมันจะสามารถกลับเข้าสู่จุด P_3 หรือ P_1 ได้ ดูรูปที่ 6.5 (c) และ (d)

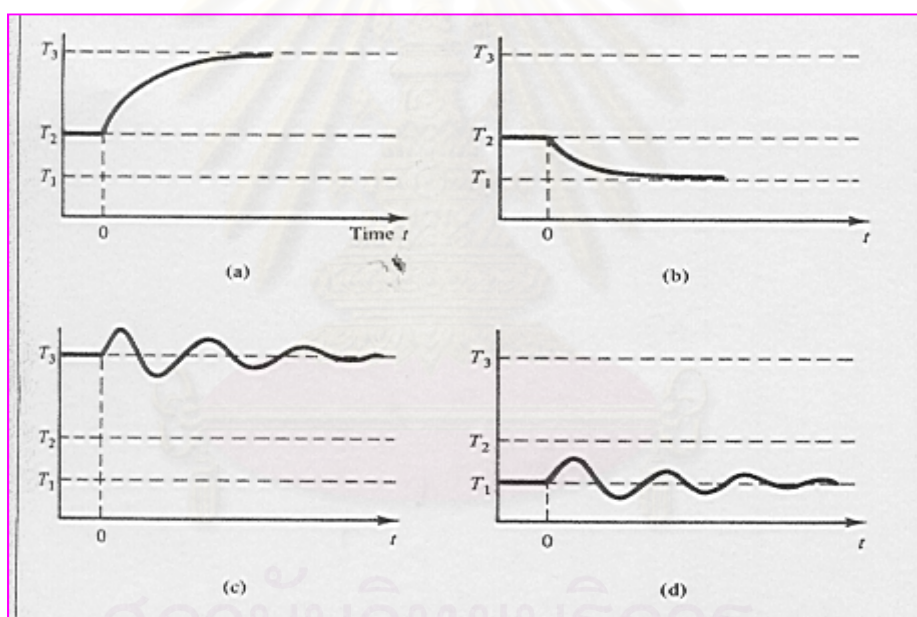
บางครั้งมีความต้องการที่จะให้เครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องทำงานที่ภาวะคงตัวกลางที่ไม่เสถียรภาพด้วยเหตุผลหลายประการ (1) ที่ภาวะคงตัว P_1 มีอุณหภูมิต่ำเกินไปเป็นเหตุให้ได้ผล (yield) ต่ำมาก (2) ที่ภาวะคงตัว P_3 อุณหภูมิสูงเกินไปส่งผลให้อยู่ในสถานะที่ไม่ปลอดภัยทำลายตัวเร่งปฏิกิริยาของระบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ลดปริมาณผลิตภัณฑ์ B และอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้จึงต้องการตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพที่สามารถควบคุมให้ระบบทำงานที่ภาวะที่ไม่เสถียรภาพได้



รูปที่ 6.3 ระบบเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่อง

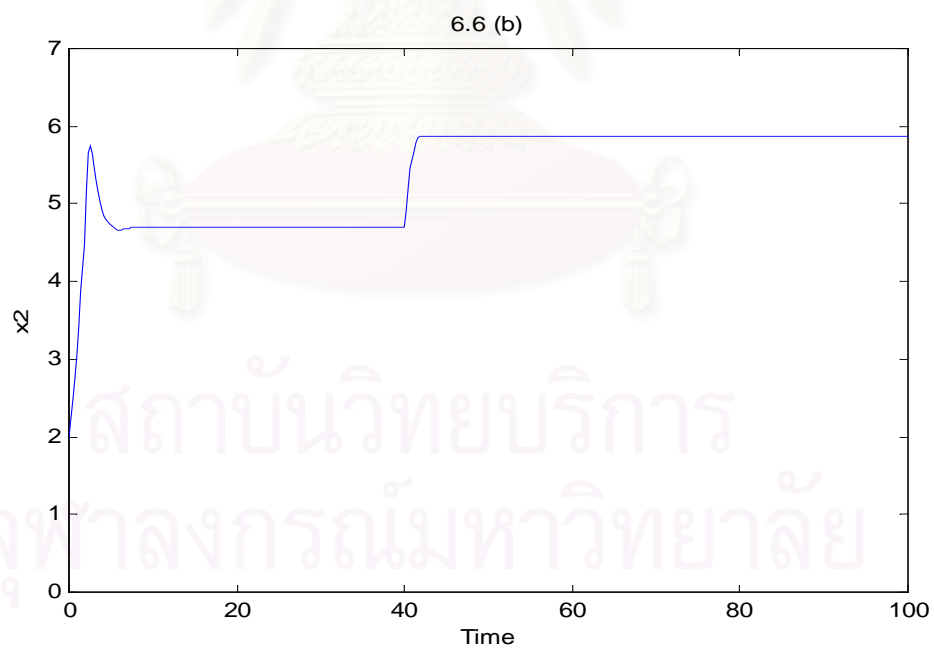
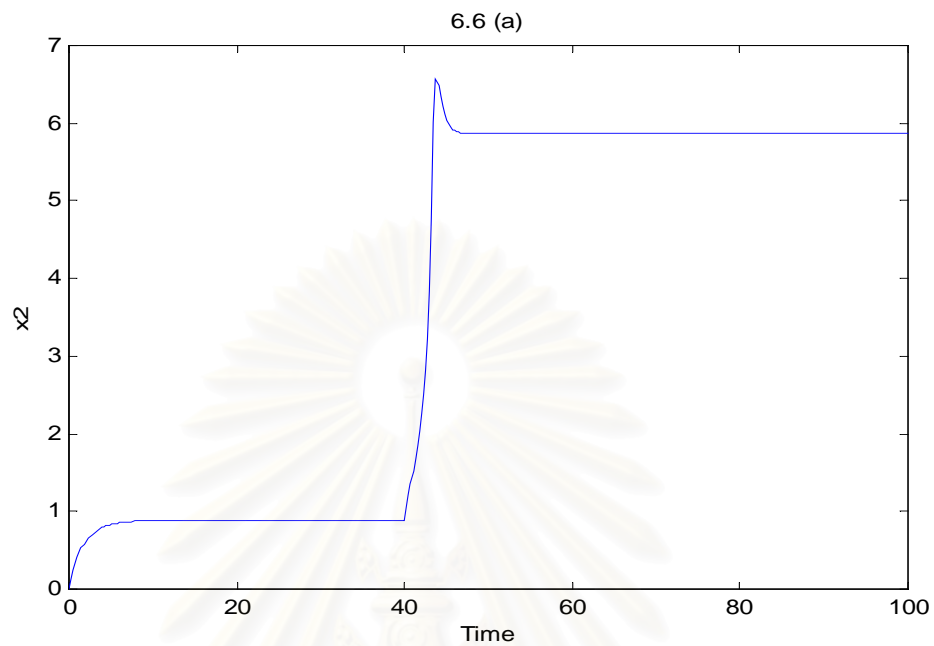


รูปที่ 6.4 ภาวะคงตัว 3 ภาวะของระบบเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่อง



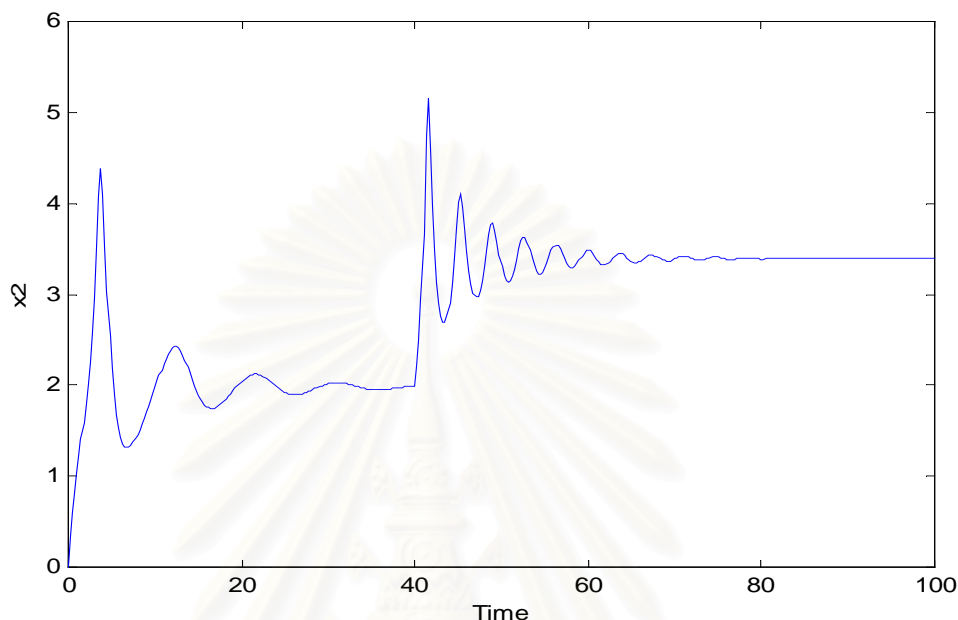
รูปที่ 6.5 ผลตอบสนองไดนามิกส์ของเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่อง (a) และ (b) แสดงความไม่มีเสถียรภาพของภาวะคงตัวกลาง (middle steady state) (c) และ (d) แสดงความมีเสถียรภาพของภาวะคงตัวบน (upper steady state) และภาวะคงตัวล่าง (lower steady state)

พิจารณากากราฟของการตอบสนองของกระบวนการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการที่ภาวะคงตัวล่างแสดงดังรูป 6.6 (a) และภาวะคงตัวบนแสดงดังรูปที่ 6.6 (b)



รูปที่ 6.6 ผลการตอบสนองของกระบวนการสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อไม่มีการควบคุมและมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ

พิจารณารูปภาพของการตอบสนองของกระบวนการสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 แสดงดังรูปที่ 6.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีค่าตัวแปรกระบวนการระบบจะส่งผลให้ระบบมีการแกว่งเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก



รูปที่ 6.7 ผลการตอบสนองของกระบวนการสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อไม่มีการควบคุมและมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบ

6.3 การจำลอง ผลการจำลอง และการวิเคราะห์ผลการจำลองการควบคุม

การจำลองการควบคุมสำหรับการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ในกรณีศึกษา 3 กรณี คือ (1) ระบบมีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์อย่างมาก (2) ระบบมีหลายภาวะคงตัวและมีภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพคือ ภาวะคงตัวล่าง (lower steady state) ภาวะคงตัวกลาง (middle steady state) ซึ่งเป็นภาวะที่ไม่มีเสถียรภาพ และภาวะคงตัวบน (upper steady state) (3) ระบบมีการแกว่งเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก ดังนั้นวัตถุประสงค์คือ การควบคุมอุณหภูมิซึ่งเป็นตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายที่กำหนดโดยการปรับอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น, u (ตัวแปรไร้หน่วย) ซึ่งเป็นตัวแปรปรับกระบวนการโดยได้ทำการตรวจสอบแล้วว่าการปรับค่าตัวแปรปรับนี้สามารถทำให้ระบบสามารถควบคุมได้ นอกจากนี้ในการควบคุมกำหนดให้มีขอบเขตจำกัดบนตัวแปรปรับโดยให้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นสามารถปรับเปลี่ยนได้ในช่วง $-2 \leq u \leq 2$ และกำหนดให้ค่าอุณหภูมิของสายป้อน, T_1 เป็นตัวแปรกระบวนการระบบ

เนื่องจากกระบวนการที่ทำการควบคุมนี้เป็นกระบวนการแบบไม่เชิงเส้นซึ่งการเลียนแบบกระบวนการอาศัยวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้สถานะในการปฏิบัติการเริ่มต้นของระบบแสดงดังตารางที่ 6.1 ให้พารามิเตอร์ทั้งหมดถูกกำหนดค่ายกเว้นอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น, T_f สำหรับเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกใช้แบบจำลองของเครื่องควบคุมในรูปแบบของสมการสเตตสเปซ โดยประยุกต์ใช้ร่วมกับการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ซึ่งใช้อัลกอริทึมของคาลมานฟิลเตอร์สำหรับเครื่องควบคุมแบบพีไอดีใช้สมการในรูปแบบความเร็ว (velocity form) โดยใช้เวลาสุ่มเดียวกันทั้งหมด

ในการทดลองการควบคุมเป็นการควบคุมอุณหภูมิทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย โดยเปรียบเทียบผลการควบคุมในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

1. การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุมระหว่างการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกและการควบคุมแบบพีไอดี

ทำการจำลองการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกที่ใช้ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์และการควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิ, x_2 (ตัวแปรไร้หน่วย) ของเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ในกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณี โดยพิจารณาทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุมเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุมโดยในการควบคุมได้พยายามปรับค่าของพารามิเตอร์ปรับจูนของเครื่องควบคุมให้ได้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกันที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

2. การเปรียบเทียบความทนทานของการควบคุมระหว่างการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกและการควบคุมแบบพีไอดี

ในการจำลองการควบคุมได้สมมติให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมและแบบจำลองของกระบวนการให้ผิดพลาดไปจากค่าที่ภาวะคงตัวตามสถานะปฏิบัติการของระบบดังตารางที่ 6.1 โดยในการควบคุมยังคงใช้สถานะของเครื่องควบคุมเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีค่าผิดพลาดของพารามิเตอร์ดังที่กล่าว โดยไม่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ปรับจูนใด ๆ เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบความทนทานของการควบคุมระหว่างการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกและการควบคุมแบบพีไอดี ในการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณี

โดยพิจารณาทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในระบบ และกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย กำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับกรณีความผิดพลาดดังนี้

2.1 การควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (Model-Mismatch)

เพื่อทดสอบความทนทานของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก ในการทดลองได้กำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

- ก. เทอมตัวแปรไร้หน่วยของค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30
- ข. เทอมตัวแปรไร้หน่วยของค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30
- ค. เทอมตัวแปรไร้หน่วยของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30
- ง. เทอมตัวแปรไร้หน่วยของค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ เทอมตัวแปรไร้หน่วยของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30

2.2 การควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Plant-Mismatch)

เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบความทนทานของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกและการควบคุมแบบพีไอดี ในการจำลองจึงกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการที่ทำการควบคุมในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

- ก. เทอมตัวแปรไร้หน่วยของค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30
- ข. เทอมตัวแปรไร้หน่วยของค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30
- ค. เทอมตัวแปรไร้หน่วยของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30
- ง. เทอมตัวแปรไร้หน่วยของค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ เทอมตัวแปรไร้หน่วยของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30

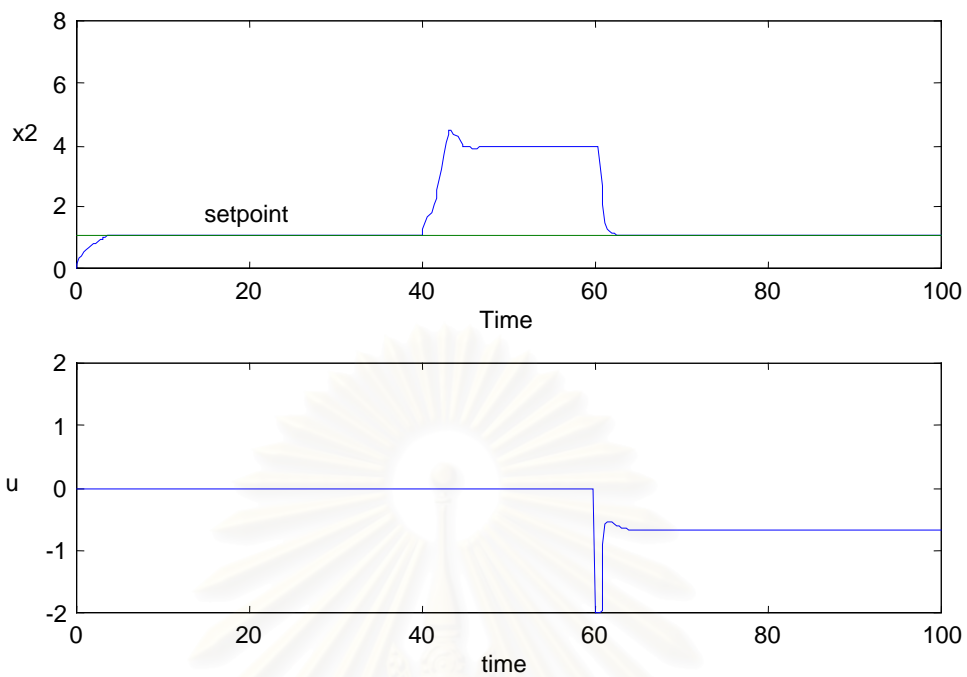
พิจารณาผลการควบคุมสำหรับกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณีดังนี้

6.3.1 กรณีศึกษาที่ 1 ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าพารามิเตอร์อย่างมาก

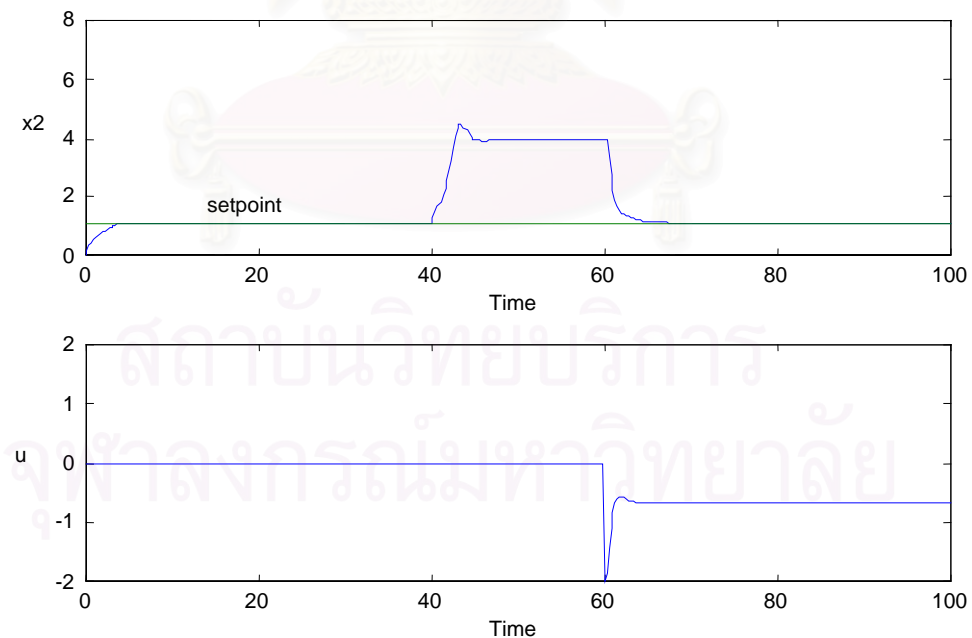
1. การควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวระบบมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได

1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม

วัตถุประสงค์ในการควบคุมคือ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ที่ค่าเป้าหมาย $[x_2 = 1.1422]$ ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ การจำลองกระบวนการเริ่มจากกระบวนการแบบลูฟเปิดที่ไม่มีการควบคุมใด ๆ ที่เวลาเริ่มต้น $\tau = 0$ จากนั้นกำหนดให้ค่า T_f มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 300 K (27°C) เป็น 310 K (37°C) ที่เวลา $\tau = 40$ หลังจากทีระบบเข้าสู่ภาวะคงตัวแล้วส่วนค่าตัวแปรและพารามิเตอร์อื่น ๆ คงที่ที่ภาวะปฏิบัติการดังตารางที่ 6.1 จนกระทั่งตัวควบคุมเริ่มทำงานที่เวลา $\tau = 60$ พิจารณาการตอบสนองของกระบวนการเป็นเวลา $\tau = 100$ เปรียบเทียบผลการควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกแสดงดังรูปที่ 6.8 และการควบคุมแบบพีไอดีแสดงดังรูปที่ 6.9 พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระบบเปลี่ยนแปลงไป โดยเข้าสู่ภาวะคงตัวค่าใหม่ที่แตกต่างจากค่าเดิมมาก จนกระทั่งเริ่มทำการควบคุมที่เวลา $\tau = 60$ เครื่องควบคุมแบบเชิงเนริกและเครื่องควบคุมแบบพีไอดีสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายค่าเดิมก่อนที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการแบบขั้นบันไดได้ และเมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) พบว่าให้ผลใกล้เคียงกันทั้งนี้เนื่องจากการจำลองได้พยายามปรับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมทั้งสองให้ได้ผลใกล้เคียงกันเท่าที่เป็นไปได้เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบผลการควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบ plant/model mismatch ต่อไป (พิจารณาจากรูปที่ 6.8 แล้ว พบว่าการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกยังมี offset อยู่เล็กน้อยแต่เมื่อเวลาผ่านไปเชื่อว่าจะสามารถเข้าสู่เป้าหมายได้ในที่สุด)



รูปที่ 6.8 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบ โดยการควบคุมแบบเจเนริก



รูปที่ 6.9 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบ โดยการควบคุมแบบพีไอดี

1.2 การทดสอบความทนทานของการควบคุม

1.2.1 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุมและกำหนดให้มีความผิดพลาดของแบบจำลองของการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริก พิจารณาผลการควบคุมของระบบควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.1 กรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.2 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.3 และสำหรับกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.4 ในภาคผนวก ๑. ตามลำดับ และพิจารณาผลการควบคุมการค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) ในการควบคุมจากตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมพบว่าให้ผลใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกมีความทนทาน สามารถควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมได้

1.2.2 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ และกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการที่ควบคุม พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.5 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.6 กรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.7 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.8 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.9 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.10 และสำหรับกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.11 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.12 ในภาคผนวก ๑. ตามลำดับ พบว่าเมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการที่ควบคุมในกรณีต่าง ๆ ดังกล่าวจะส่งผลให้การตอบสนองของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมอย่างมาก โดยเฉพาะช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการดังกล่าวจะเห็นได้จากช่วงเวลาที่ยังไม่มี

คุม จนกระทั่งเริ่มทำการควบคุม เครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้โดยให้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด และถึงแม้ว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีจะสามารถปรับสภาพของกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้แต่ยังมีค่า offset ในการควบคุมในช่วงเวลาเริ่มต้นของการควบคุมอยู่ โดยเฉพาะการควบคุมในกรณีหลังพบว่าเครื่องควบคุมไม่สามารถปรับสภาพของกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ทันที ในขณะที่เครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) ในตารางที่ 6.3 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีความทนทานสูงกว่าการควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและความผิดพลาด plant/model mismatch ดังกล่าว

ตารางที่ 6.3 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

กรณีการควบคุม	GMC	PID
1. ควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนระบบมีการเปลี่ยนแปลง		
1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม	56.6	56.9
1.2 การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุม		
1.2.1 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม		
1.2.1 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	57.1	-
1.2.1 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	56.9	-
1.2.1 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	56.6	-
1.2.1 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	57.1	-
1.2.2 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ		
1.2.2 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	264.5	265.4
1.2.2 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	149.5	149.8
1.2.2 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	165.4	165.4
1.2.2 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	205.8	206.2

2. การควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได

2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม

ในการจำลองการควบคุมกำหนดให้ค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดเพิ่มขึ้นร้อยละ 30 ที่เวลา $t = 40$ หลังจากที่ได้ควบคุมระบบให้เข้าสู่เป้าหมายค่าแรก $[x_2 = 1.1422]$ แล้วจากนั้นกำหนดให้ค่าเป้าหมายลดลงต่ำกว่าค่าเป้าหมายแรกร้อยละ 30 ที่เวลา $t = 60$ พิจารณาเปรียบเทียบผลการควบคุมในการติดตามค่าเป้าหมาย สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกแสดงดังรูปที่ 6.10 และการควบคุมแบบพีไอดีแสดงดังรูปที่ 6.11 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว และสามารถปรับสภาพของกระบวนการในการติดตามค่าเป้าหมายเมื่อเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดลดลงและเพิ่มขึ้นได้เป็นอย่างดี ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีใช้เวลาในการปรับสภาพของกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการช้ากว่า และยังมีค่า offset ในการควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกมีความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่า (ตารางที่ 6.4) แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกให้สมรรถนะที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

2.2 การทดสอบความทนทานของการควบคุม

2.2.1 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม

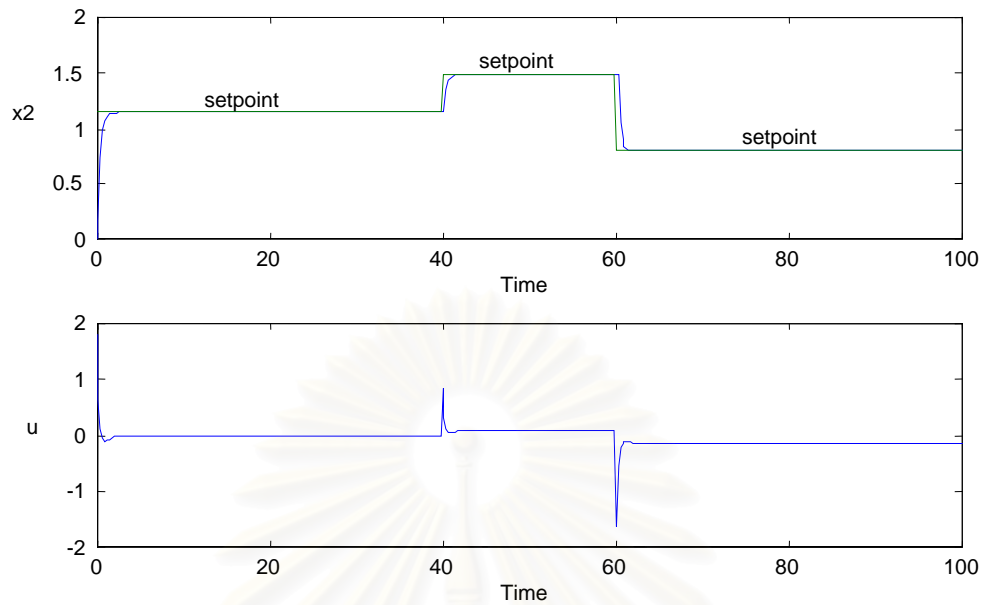
ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุมและกำหนดให้มีความผิดพลาดของแบบจำลองของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติก พิจารณาผลการควบคุมของระบบควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติก ในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.13 กรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.14 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.15 และสำหรับกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.16 ในภาคผนวก ๑. ตามลำดับ และพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) ในการควบคุมจากตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มี ความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมพบว่าให้ผลใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า

เครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีความทนทาน สามารถควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมได้

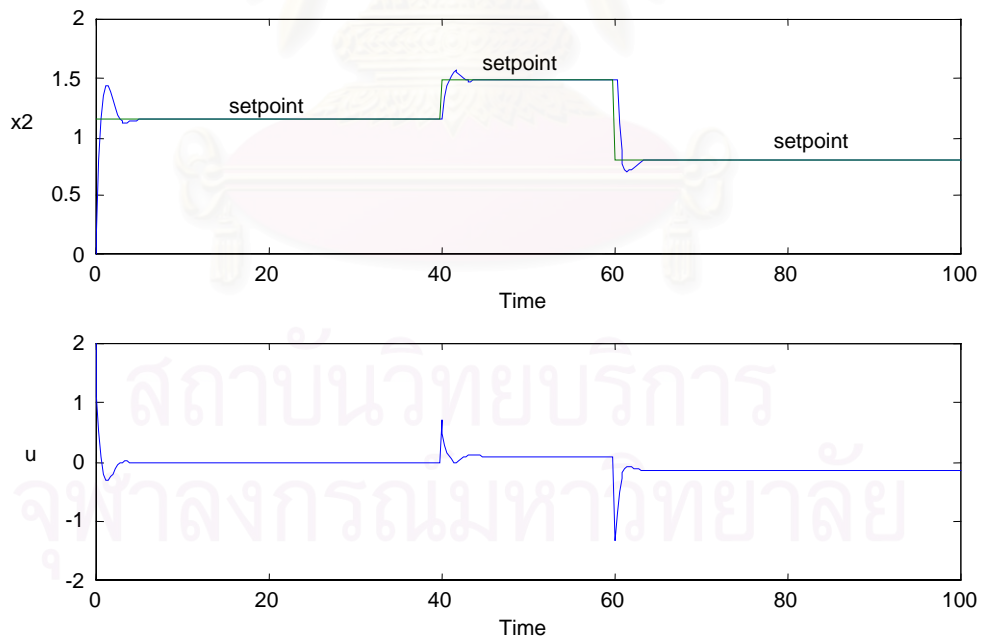
2.2.2 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุม และกำหนดให้มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุม พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.17 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.18 กรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.19 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.20 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.21 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.22 และกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.23 และพีไอดีแสดงดังรูป ๑.24 ตามลำดับ พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกยังให้ผลการควบคุมที่ดีในการติดตามค่าเป้าหมายโดยมีค่า offset เพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มี ความผิดพลาดดังกล่าว ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีค่า offset ในการควบคุมมากขึ้นและระบบมีการแกว่งก่อนเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีที่มีความผิดพลาดของค่าความร้อนของปฏิกิริยา และกรณีที่มีความผิดพลาดของทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.4 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มี ความผิดพลาดและให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีความทนทาน สามารถควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการดังกล่าวได้



รูปที่ 6.10 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายโดยการควบคุมแบบเจเนติก



รูปที่ 6.11 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายโดยการควบคุมแบบฟัซซี่

ตารางที่ 6.4 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิ
เมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

กรณีการควบคุม	GMC	PID
2. ควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลง		
2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม	1.5	1.9
2.2 การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุม		
2.2.1 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม		
2.2.1 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	1.6	-
2.2.1 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	1.6	-
2.2.1 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	1.5	-
2.2.1 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	1.5	-
2.2.2 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ		
2.2.2 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	1.5	2.7
2.2.2 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	1.5	2.3
2.2.2 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	1.5	2.1
2.2.2 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	1.5	2.6

6.3.2 กรณีศึกษาที่ 2 ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีหลายภาวะคงตัวและมีภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพ

1. การควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได

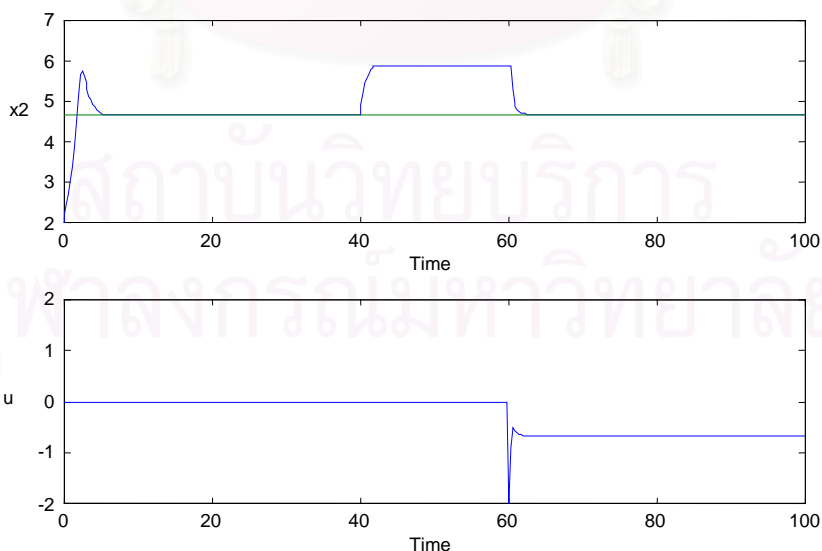
1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม

สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 จากหัวข้อที่ 6.2 พบว่ามีคำตอบของค่าที่ภาวะคงตัวของอุณหภูมิ 3 ค่า คือที่ภาวะคงตัวล่าง (lower steady state) $x_2 = 0.8860$ ค่าที่ภาวะคงตัวกลาง (middle steady state) $x_2 = 2.7517$ ซึ่งเป็นภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพ และค่าที่ภาวะคงตัวบน (upper steady state) $x_2 = 4.7050$ ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการควบคุมคือเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายดังกล่าวในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบ การจำลองกระบวนการอาศัยภาวะเริ่มต้นดังตารางที่ 6.1 พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตและการควบคุมแบบพีไอดีสำหรับกรณีการควบคุมต่าง ๆ ดังนี้

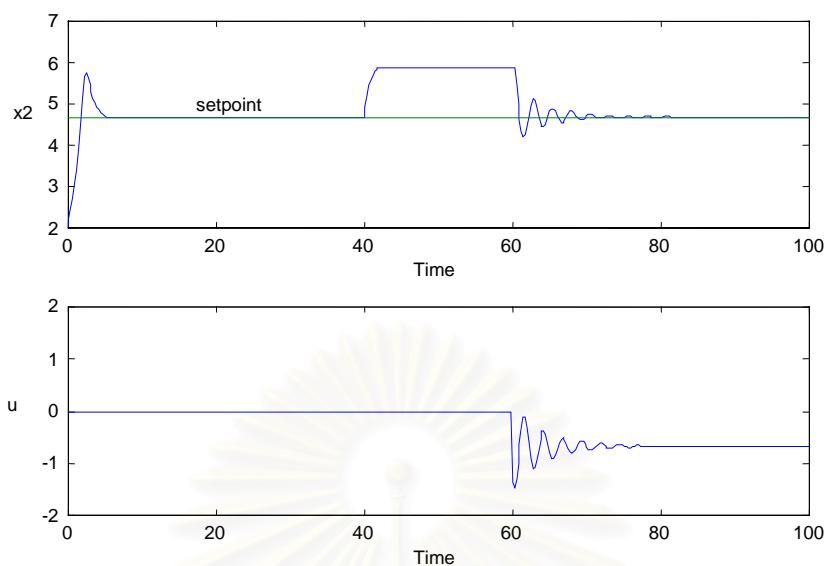
1.1.1 การควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$

พิจารณาผลการควบคุมเมื่อเริ่มทำการควบคุมที่เวลา $\tau = 60$ สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ 6.12 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ 6.13 ตามลำดับ พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบจะส่งผลให้การตอบสนองของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปดังพิจารณาได้จากช่วงที่ยังไม่มีการควบคุม จนเริ่มทำการควบคุมเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีการแกว่งอย่างมากก่อนที่จะปรับตัวเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ

เมื่อพิจารณาผลการควบคุมเมื่อเริ่มทำการควบคุมที่เวลาเริ่มต้น $\tau = 0$ สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ 6.25 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ 6.26 ในภาคผนวก 6. ตามลำดับ พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีโดยสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้อย่างราบเรียบกว่า ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีโอเวอร์ชูต (overshoot) ในการควบคุมอย่างมากและมีการแกว่งในช่วงเวลาที่เริ่มทำการควบคุมและช่วงเวลาที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบก่อนที่จะปรับตัวเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.5 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$ ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบ



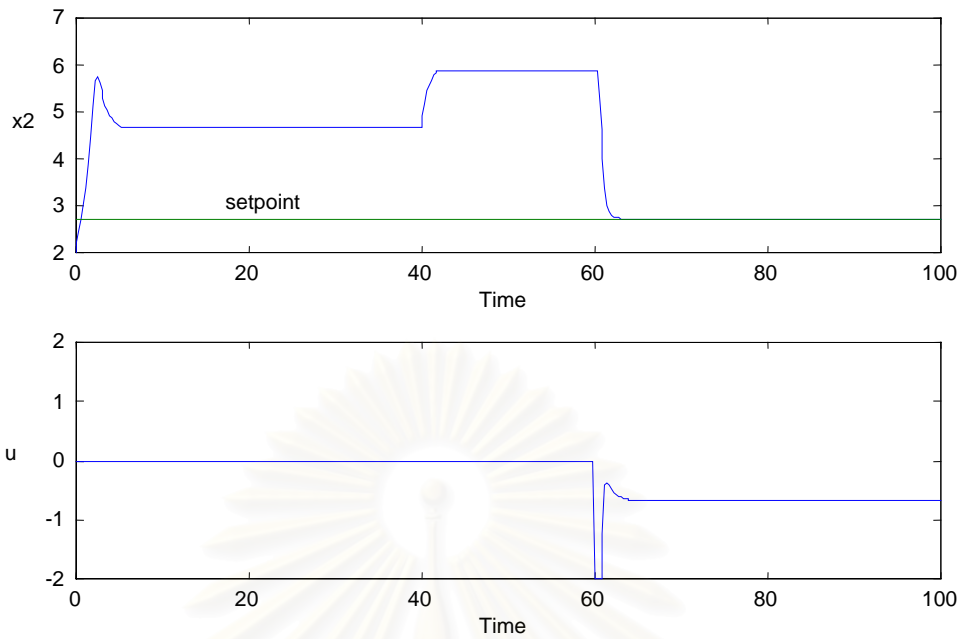
รูปที่ 6.12 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบโดยการควบคุมแบบเจเนริกที่ $\tau = 60$



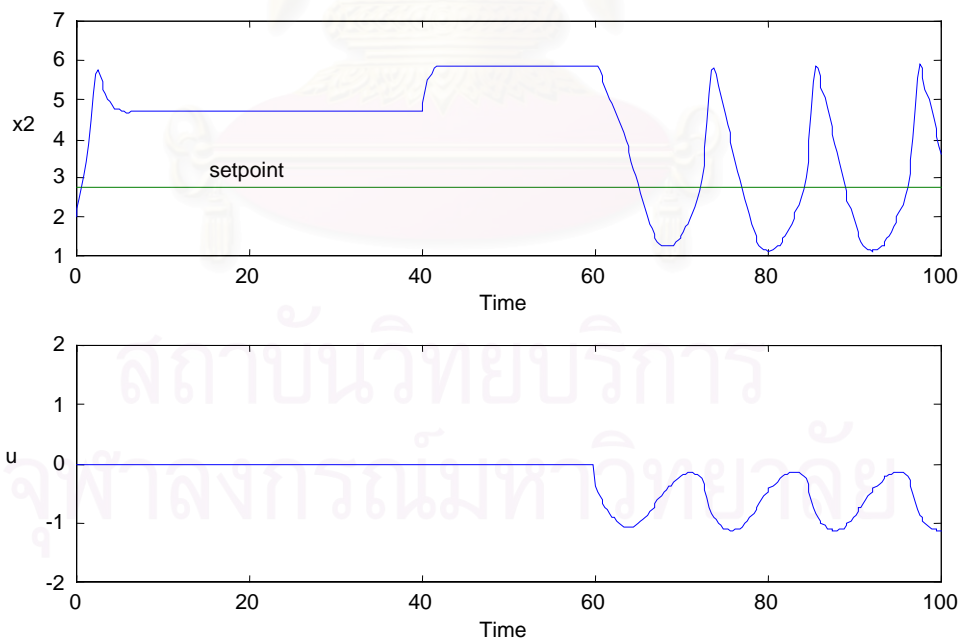
รูปที่ 6.13 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบโดยการควบคุมแบบพีไอดีที่ $\tau = 60$

1.1.2 การควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 2.7517$

พิจารณาผลการควบคุมเมื่อเริ่มทำการควบคุมที่เวลา $\tau = 60$ สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ 6.14 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ 6.15 ตามลำดับพบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีการแกว่งอย่างมากและไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้ เช่นเดียวกับผลการควบคุมเมื่อเริ่มทำการควบคุมที่เวลาเริ่มต้น $\tau = 0$ สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกซึ่งแสดงดังรูปที่ 6.27 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ 6.28 ในภาคผนวก ข. ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.5 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีสมรรถนะที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีซึ่งไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 2.7517$ ซึ่งเป็นค่าที่ภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพของกระบวนการที่ทำการควบคุม



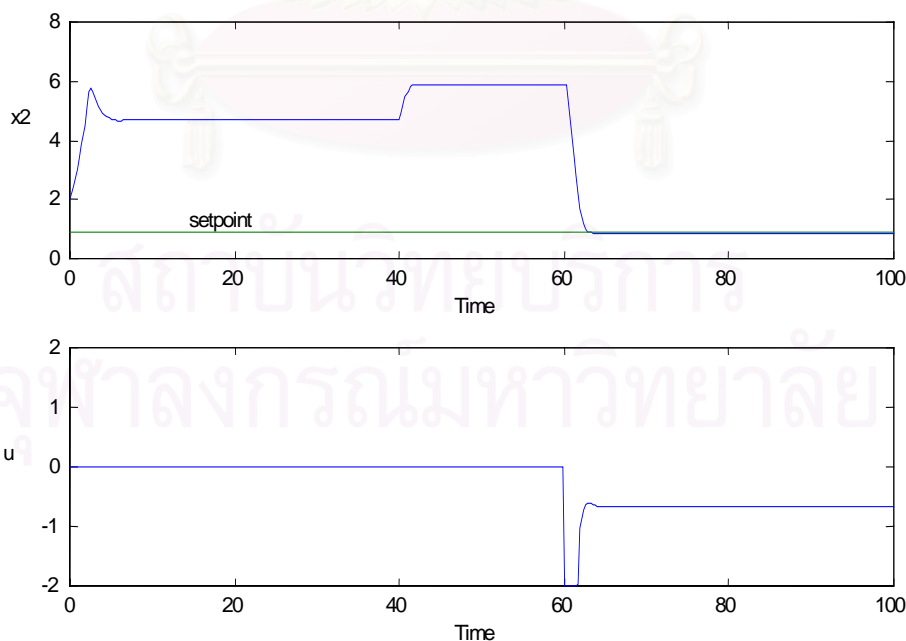
รูปที่ 6.14 ผลการควบคุมคุณภาพในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 2.7517$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบโดยการควบคุมแบบเจเนริกที่ $\tau = 60$



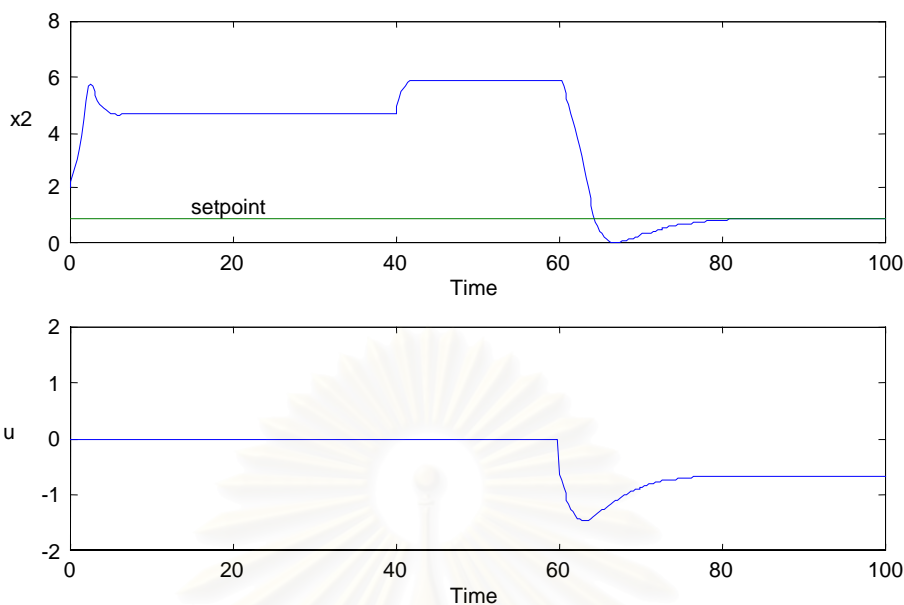
รูปที่ 6.15 ผลการควบคุมคุณภาพในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 2.7517$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบโดยการควบคุมแบบพีไอดีที่ $\tau = 60$

1.1.3 การควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$

พิจารณาผลการควบคุมเมื่อเริ่มทำการควบคุมที่เวลา $\tau = 60$ สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ 6.16 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ 6.17 ตามลำดับ พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมี offset ในการควบคุมก่อนที่จะปรับตัวเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ และเมื่อพิจารณาผลการควบคุมเมื่อเริ่มทำการควบคุมที่เวลาเริ่มต้น $\tau = 0$ สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ 6.29 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ 6.30 ในภาคผนวก 6. ตามลำดับ พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี โดยสามารถปรับค่าของอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้อย่างราบเรียบกว่า ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีการตอบสนองต่อการควบคุมที่ช้ากว่ามาก และมี offset ในการควบคุมอย่างมากในช่วงเวลาที่เริ่มทำการควบคุมและช่วงเวลาที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการก่อนที่จะปรับตัวเข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.5 พบว่า เครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$ ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ



รูปที่ 6.16 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการโดยการควบคุมแบบเจเนริกที่ $\tau = 60$



รูปที่ 6.17 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบโดยการควบคุมแบบพีไอดีที่ $\tau = 60$

1.2 การทดสอบความทนทานของการควบคุม

1.2.1 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดเมื่อเริ่มทำการควบคุมที่เวลาเริ่มต้น $\tau = 0$ สำหรับกรณีการควบคุมต่าง ๆ ดังนี้

1.2.1.1 การควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$

พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.31 กรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.32 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.33 และกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.34 ในภาคผนวก ๑. ตามลำดับ และพิจารณาผลการ

ควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมที่ค่าเป้าหมายเดียวกันพบว่าให้ผลใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกมีความทนทาน สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$ ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมได้

1.2.1.2 การควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 2.7517$

พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.35 กรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.36 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.37 และกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.38 ในภาคผนวก ๑. ตามลำดับ และพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมที่ค่าเป้าหมายเดียวกันพบว่าให้ผลใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกมีความทนทาน สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 2.7517$ ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมได้

1.2.1.3 การควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$

พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.39 กรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.40 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.41 และกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.42 ในภาคผนวก ๑. ตามลำดับ และพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมที่ค่าเป้าหมายเดียวกันพบว่าให้ผลใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกมีความทนทาน สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$ ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมได้

1.2.2 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ

จากการศึกษาพฤติกรรมของลูเปิดในกรณีศึกษาที่ 2 ในหัวข้อที่ 6.2 พบว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่ภาวะคงตัว จะส่งผลให้กระบวนการเปลี่ยนแปลงไปเป็นกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพจนไม่สามารถทำการซิมูเลตโดยวิธีการจำลองการควบคุมที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวข้างต้นได้ ดังนั้นจึงต้องเริ่มทำการควบคุมที่เวลาเริ่มต้น $t = 0$ เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ พิจารณาผลการควบคุมที่ค่าเป้าหมายต่าง ๆ ดังนี้

1.2.2.1 การควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$

พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.43 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.44 ในภาคผนวก ๑. ตามลำดับ พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกจะเกิดการแกว่งในช่วงเวลาสั้น ๆ ช่วงเวลาที่เริ่มต้นทำการควบคุมแต่ยังให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีไม่สามารถควบคุมกระบวนการที่ค่าเป้าหมายดังกล่าวได้ และไม่สามารถคำนวณค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) ในการควบคุมได้ แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีความทนทานต่อความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการดังกล่าว ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีไม่สามารถควบคุมกระบวนการในกรณีที่มีความผิดพลาดที่ค่าเป้าหมายที่กำหนดได้

กรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.45 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.46 สำหรับกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.47 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.48 และกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.49 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.50 ในภาคผนวก ๑. ตามลำดับ พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกรณีที่ไม่มีค่าผิดพลาดโดยเกิดโอเวอร์ชูตในช่วงเวลาเริ่มการควบคุมแต่ก็สามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วถึงแม้จะมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบที่ $t = 60$ ส่วนการควบคุมแบบพีไอดีนอกจากจะเกิดโอเวอร์ชูตแล้วยังใช้เวลามากในการเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการทั้งที่จุดเริ่มต้นของการควบคุมและ

จุดที่มีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบด้วย เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.5 แล้วแสดงให้เห็นว่าการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกมีความทนทานมากกว่าการควบคุมแบบพีไอดี

1.2.2.2 การควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 2.7517$

พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกแสดงดังรูปที่ ๕.51 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๕.52 กรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกแสดงดังรูปที่ ๕.53 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๕.54 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกแสดงดังรูปที่ ๕.55 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๕.56 และกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกแสดงดังรูปที่ ๕.57 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๕.58 ในภาคผนวก ข. ตามลำดับ พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกให้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมายดังกล่าวได้ โดยสามารถพิจารณาผลการควบคุมได้จากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกมีความทนทานต่อความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการดังกล่าว ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีไม่สามารถควบคุมกระบวนการในกรณีที่มีความผิดพลาดที่ค่าเป้าหมายที่กำหนดได้

1.2.2.3 การควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$

พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกแสดงดังรูปที่ ๕.59 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๕.60 กรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกแสดงดังรูปที่ ๕.61 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๕.62 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกแสดงดังรูปที่ ๕.63 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๕.64 และกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกแสดงดังรูปที่ ๕.65 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๕.66 ในภาคผนวก ข. ตามลำดับ พบว่าเครื่องควบคุม

ด้วยแบบจำลองเจเนติกให้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด และให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีซึ่งมีความผิดพลาดในการควบคุมมากกว่ากรณีที่ไม่มีความผิดพลาด ดังพิจารณาได้จากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิ เมื่อค่าตัวแปรกระบวนการระบบมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

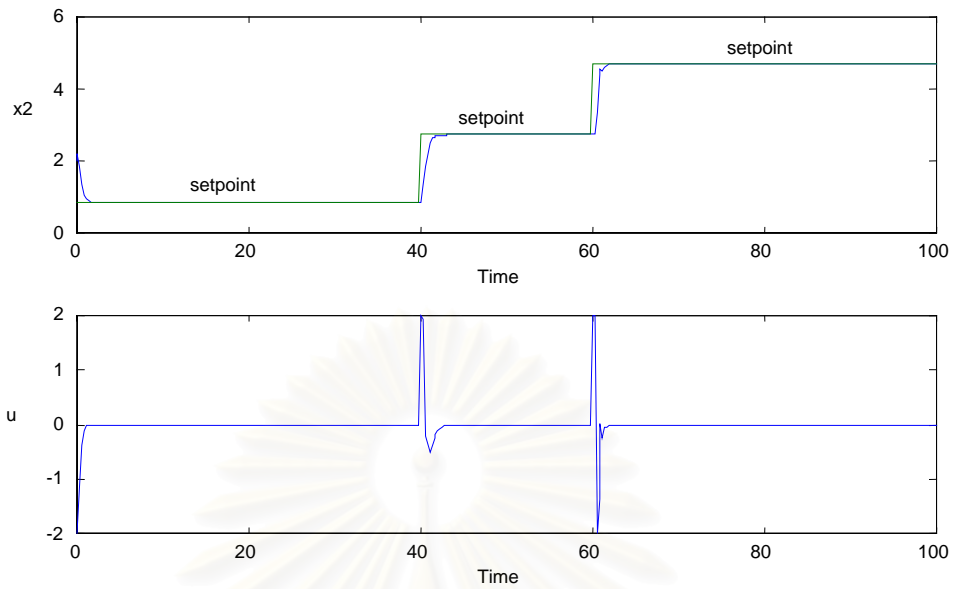
กรณีการควบคุม	GMC	PID
1. ควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวแปรกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลง		
1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม		
1.1.1 ควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $[x_2 = 4.7050]$ ที่เวลา $\tau = 60$ ควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $[x_2 = 4.7050]$ ที่เวลา $\tau = 0$	27.7 2.2	29.2 9.9
1.1.2 ควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $[x_2 = 2.7517]$ ที่เวลา $\tau = 60$ ควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $[x_2 = 2.7517]$ ที่เวลา $\tau = 0$	142.1 0.4	192.9 128.0
1.1.3 ควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $[x_2 = 0.8860]$ ที่เวลา $\tau = 60$ ควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $[x_2 = 0.8860]$ ที่เวลา $\tau = 0$	257.7 1.2	268.6 22.8
1.2 การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุม		
1.2.1 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม		
1.2.1.1 ควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $[x_2 = 4.7050]$		
1.2.1.1 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	3.0	-
1.2.1.1 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	2.6	-
1.2.1.1 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	2.2	-
1.2.1.1 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	2.6	-
1.2.1.2 ควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $[x_2 = 2.7517]$		
1.2.1.2 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	0.5	-
1.2.1.2 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	0.5	-
1.2.1.2 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	0.4	-
1.2.1.2 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	0.5	-
1.2.1.3 ควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $[x_2 = 0.8860]$		
1.2.1.3 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	1.2	-
1.2.1.3 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	1.2	-
1.2.1.3 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	1.2	-
1.2.1.3 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	1.2	-

กรณีการควบคุม	GMC	PID
1.2.2 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ		
1.2.2.1 ควบคุมที่ค่าเป้าหมาย [$x_2 = 4.7050$]		
1.2.2.1 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	2.8	N.A.
1.2.2.1 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	2.1	9.5
1.2.2.1 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	2.2	11.7
1.2.2.1 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	2.3	11.1
1.2.2.2 ควบคุมที่ค่าเป้าหมาย [$x_2 = 2.7517$]		
1.2.2.2 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	0.5	207.4
1.2.2.2 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	0.5	131.1
1.2.2.2 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	0.6	151.2
1.2.2.2 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	0.5	155.9
1.2.2.3 ควบคุมที่ค่าเป้าหมาย [$x_2 = 0.8860$]		
1.2.2.3 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	2.9	41.3
1.2.2.3 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	2.4	43.3
1.2.2.3 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	1.6	42.5
1.2.2.3 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	2.9	48.1

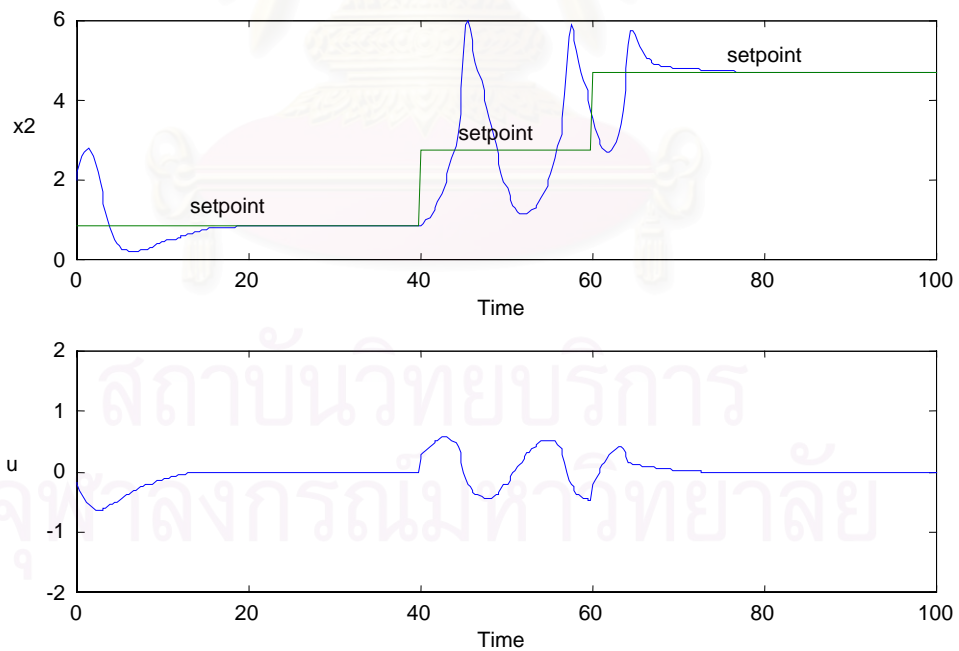
2. การควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได

2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม

ในการทดลองเริ่มต้นควบคุมอุณหภูมิที่ภาวะคงตัวล่าง (lower steady state) ที่ค่าเป้าหมาย $[x_2 = 0.8860]$ จากนั้นกำหนดให้ค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดเข้าสู่ค่าภาวะคงตัวกลาง (middle steady state) ที่ค่าเป้าหมาย $[x_2 = 2.7517]$ ที่เวลา $\tau = 40$ และกำหนดให้ค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดเข้าสู่ค่าภาวะคงตัวบน (upper steady state) ที่ค่าเป้าหมาย $[x_2 = 4.7050]$ ที่เวลา $\tau = 60$ พิจารณาผลการควบคุมในการติดตามค่าเป้าหมายสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกแสดงดังรูปที่ 6.18 และการควบคุมแบบพีไอดีแสดงดังรูปที่ 6.19 โดยไม่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่จากกรณีการควบคุมที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายค่าแรกได้อย่างรวดเร็วและสามารถปรับสภาพของกระบวนการในการติดตามค่าเป้าหมายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายเข้าสู่ภาวะคงตัวใหม่ได้เป็นอย่างดี ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีใช้เวลาในการปรับสภาพของกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายค่าแรกช้ากว่าและมีความผิดพลาดในการควบคุมอย่างมากอีกทั้งยังไม่สามารถควบคุมกระบวนการที่ค่าเป้าหมายที่ไม่มีเสถียรภาพได้ก่อนที่จะปรับตัวเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ภาวะคงตัวบน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.6 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกมีความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีมากแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกให้สมรรถนะที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุม



รูปที่ 6.18 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายโดยการควบคุมแบบเจเนติก



รูปที่ 6.19 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายโดยการควบคุมแบบฟัซซี่

2.2 การทดสอบความทนทานของการควบคุม

2.2.1 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุมและกำหนดให้มีความผิดพลาดของแบบจำลองของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก พิจารณาผลการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก ในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.67 กรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.68 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.69 และกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.70 ในภาคผนวก ๑. ตามลำดับ และพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด พบว่าให้ผลใกล้เคียงกันแสดงว่าการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีความทนทาน สามารถควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมได้

2.2.2 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุม และกำหนดให้มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุม พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.71 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.72 กรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.73 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.74 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.75 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.76 และกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.77 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.78 ในภาคผนวก ๑. ตามลำดับ พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีค่าโอเวอร์ชูตเพิ่มมากขึ้นในกรณีที่มีความผิดพลาดของค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา กรณีที่มีความผิดพลาดของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและกรณีที่ความ

ผิดพลาดของทั้งค่าคงที่ของอัตราการผลิตปฏิกิริยาและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และไม่สามารถควบคุมกระบวนการในกรณีที่มีความผิดพลาดของค่าความร้อนของปฏิกิริยาได้

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.6 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีความผิดพลาดในการควบคุมมากขึ้นและไม่สามารถควบคุมค่าความผิดพลาดในกรณีที่เครื่องควบคุมไม่สามารถควบคุมกระบวนการได้ แสดงให้เห็นว่าการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีความทนทานสูงกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี ในการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย และมีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการดังกล่าว

ตารางที่ 6.6 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิเมื่อเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

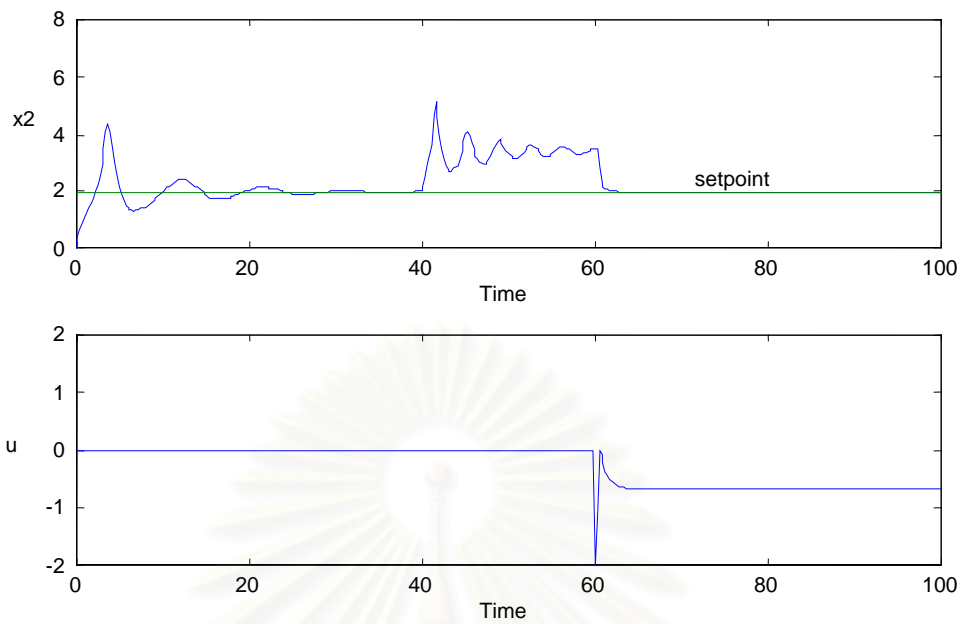
กรณีการควบคุม	GMC	PID
2. ควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลง		
2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม	4.7	46.9
2.2 การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุม		
2.2.1 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม		
2.2.1 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	5.4	-
2.2.1 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	5.0	-
2.2.1 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	4.7	-
2.2.1 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	5.0	-
2.2.2 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ		
2.2.2 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	6.7	50.8
2.2.2 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	5.2	58.9
2.2.2 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	4.6	55.5
2.2.2 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	5.5	61.2

6.3.3 กรณีศึกษาที่ 3 ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีการแกว่งเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น

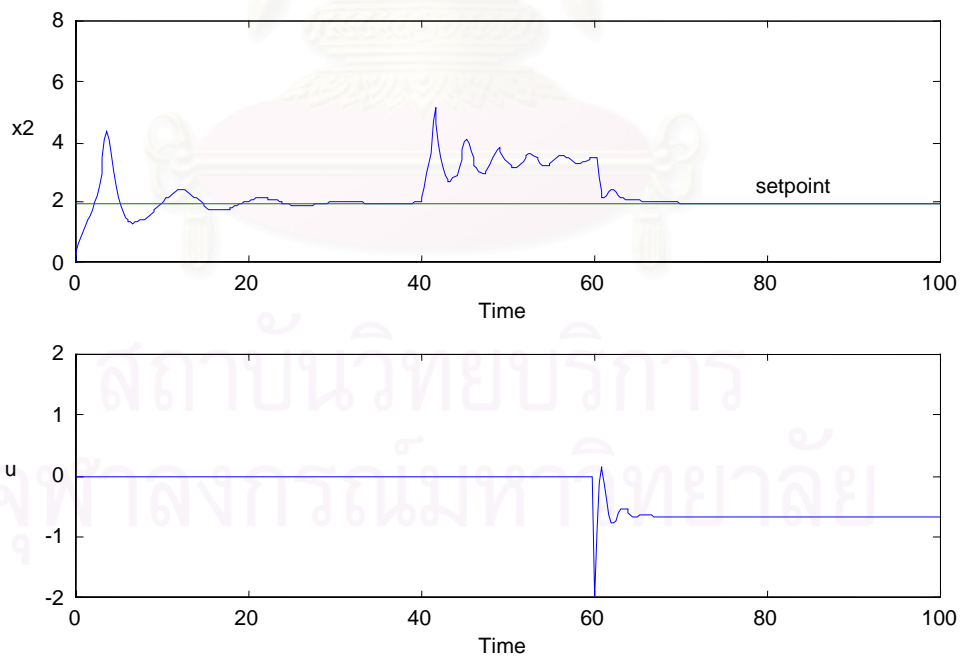
1. การควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวระบบมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได

1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม

วัตถุประสงค์ในการควบคุมคือ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ที่ค่าเป้าหมาย $[x_2 = 1.978]$ ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรระบบ โดยทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตและการควบคุมแบบพีไอดีเมื่อตัวควบคุมเริ่มทำงานที่เวลา $t = 60$ แสดงดังรูปที่ 6.20 และ 6.21 ตามลำดับ พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ หลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรระบบแบบขั้นบันไดได้รวดเร็วกว่าแบบพีไอดี และเมื่อพิจารณาผลการควบคุมเมื่อตัวควบคุมเริ่มทำงานที่เวลา $t = 0$ สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตแสดงดังรูปที่ 6.79 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ 6.80 ในภาคผนวก ฉ. ตามลำดับ พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว โดยที่การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรระบบไม่มีผลต่อการควบคุม ในขณะที่ผลการควบคุมของเครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีการแกว่งอย่างมากในช่วงเวลาเริ่มต้นก่อนเข้าสู่ค่าเป้าหมายและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรระบบ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.7 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตมีสมรรถนะที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรระบบ



รูปที่ 6.20 ผลการควบคุมคุณภาพในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ระบบโดยการควบคุมแบบเจเนริกที่ $\tau = 60$



รูปที่ 6.21 ผลการควบคุมคุณภาพในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ระบบโดยการควบคุมแบบพีไอดีที่ $\tau = 60$

1.2 การเปรียบเทียบความทนทานของการควบคุม

1.2.1 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรระบบและกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริก พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.81 กรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.82 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.83 และกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๑.84 ในภาคผนวก ๑. ตามลำดับ และพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดพบว่าให้ผลใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีความทนทานสามารถควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมได้

1.2.2 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรระบบและกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการที่ทำการควบคุม พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.85 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.86 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีการแกว่งของสัญญาณควบคุมอย่างมากและไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ค่าเป้าหมายดังกล่าวได้ และเมื่อพิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.87 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.88 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.89 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.90 และกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.91 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.92 ในภาคผนวก ๑. ตามลำดับ พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบ

จำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีการแกว่งของสัญญาณควบคุมอย่างมากที่เวลาเริ่มต้นและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบ ก่อนเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.7 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีมากแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีความทนทานสูงกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุมดังกล่าว

ตารางที่ 6.7 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุม

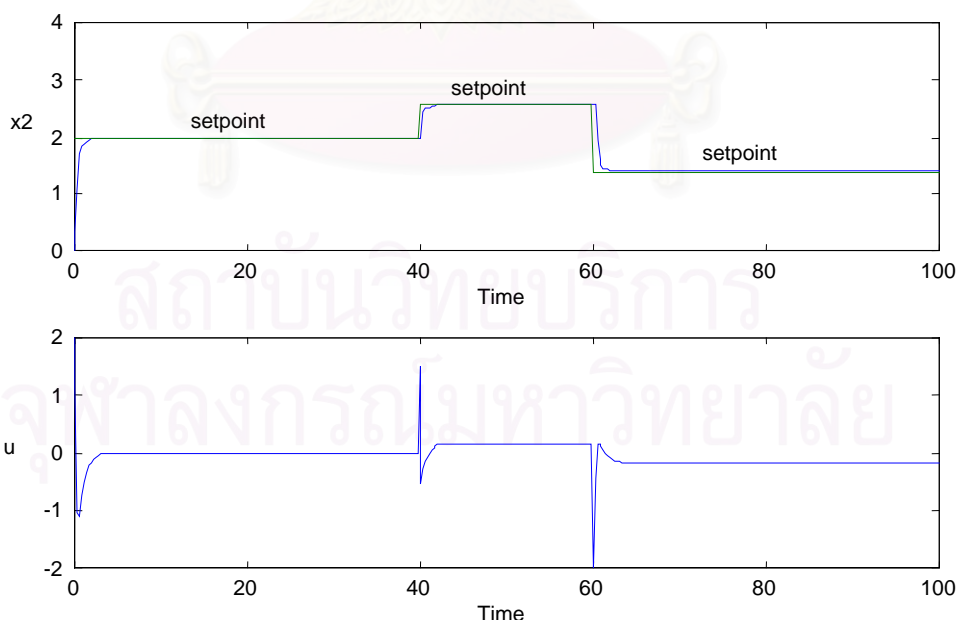
อุณหภูมิเมื่อค่าตัวแปรกระบวนการระบบมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับ
กรณีศึกษาที่ 3

กรณีการควบคุม	GMC	PID
1. ควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวแปรกระบวนการระบบมีการเปลี่ยนแปลง		
1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม $\tau = 60$ $\tau = 0$	39.7 1.7	40.8 2.7
1.2 การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุม		
1.2.1 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม		
1.2.1 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	1.8	-
1.2.1 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	1.8	-
1.2.1 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	1.7	-
1.2.1 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	1.8	-
1.2.2 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ		
1.2.2 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	1.5	N.A.
1.2.2 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	1.6	7.6
1.2.2 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	1.7	3.6
1.2.2 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	1.6	13.5

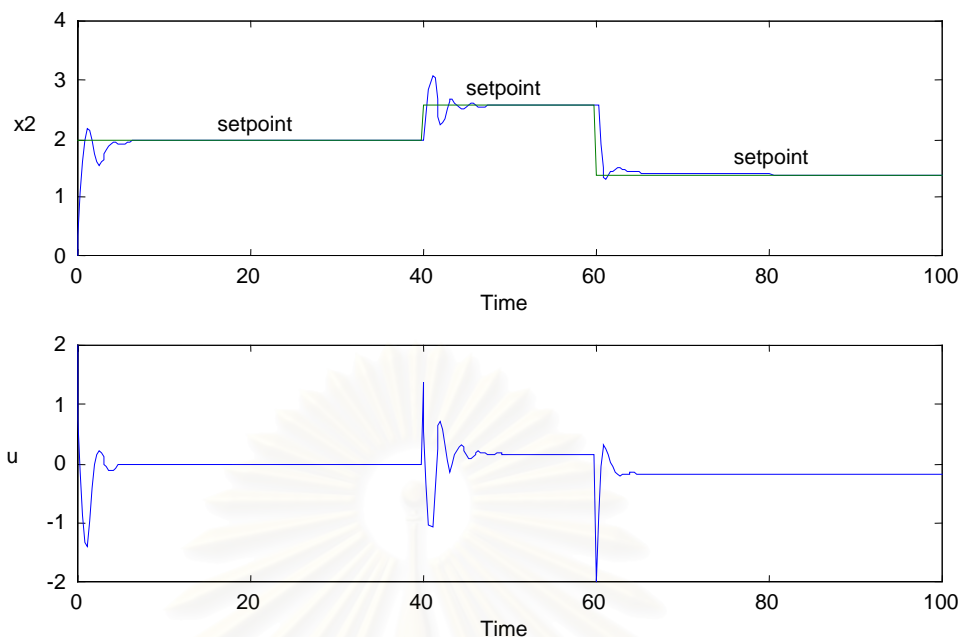
2. การควบคุมอุณหภูมิเมื่อเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได

2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม

ในการจำลองการควบคุมกำหนดให้เป้าหมายเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดเพิ่มขึ้นร้อยละ 30 ที่เวลา $t = 40$ หลังจากทีระบบเข้าสู่เป้าหมายค่าแรก $[x_2 = 1.9870]$ จากนั้นกำหนดให้ค่าเป้าหมายลดลงต่ำกว่าเป้าหมายค่าแรกร้อยละ 30 ที่เวลา $t = 60$ พิจารณาการตอบสนองของกระบวนการเปรียบเทียบผลการควบคุมในการติดตามค่าเป้าหมายในการควบคุมอุณหภูมิ สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ 6.22 และการควบคุมแบบพีไอดีแสดงดังรูปที่ 6.23 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมที่ดีในการติดตามค่าเป้าหมายเมื่อเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีการแกว่งของสัญญาณควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายเพิ่มขึ้นก่อนที่จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่กำหนด และเมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.8 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้สมรรถนะที่ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุม



รูปที่ 6.22 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายโดยการควบคุมแบบเจเนริก



รูปที่ 6.23 ผลการควบคุมอุณหภูมิในกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายโดยการควบคุมแบบพีไอดี

2.2 การทดสอบความทนทานของการควบคุม

2.2.1 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย และกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิต พิจารณาผลการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๖.93 กรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๖.94 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๖.95 และกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 แสดงดังรูปที่ ๖.96 ในภาคผนวก ข. ตามลำดับ และพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดพบว่าให้ผลใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตมีความทนทาน สามารถควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ และมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมได้

2.2.2 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมคุณภาพในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย และกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุม พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.97 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.98 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มี ความผิดพลาด ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีการแกว่งของสัญญาณควบคุมอย่างมากและไม่สามารถควบคุมกระบวนการที่ค่าเป้าหมายที่กำหนดได้ และเมื่อพิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.99 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.100 กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.101 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.102 และกรณีที่ทั้งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, δ ลดลงร้อยละ 30 สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกแสดงดังรูปที่ ๑.103 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ ๑.104 ในภาคผนวก ๑. ตามลำดับ พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มี ความผิดพลาด ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีการแกว่งของสัญญาณควบคุมอย่างมากที่เวลาเริ่มทำการควบคุมและจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายก่อนเข้าสู่เป้าหมายแต่ยังมี offset อยู่

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 6.8 พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีมาก แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีความทนทานสูงกว่าการควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมคุณภาพในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการที่ทำการควบคุม

ตารางที่ 6.8 ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิ
เมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดสำหรับกรณีศึกษาที่ 3

กรณีการควบคุม	GMC	PID
2. ควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลง		
2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม	2.9	4.4
2.2 การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุม		
2.2.1 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม		
2.2.1 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	3.0	-
2.2.1 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	3.0	-
2.2.1 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	2.9	-
2.2.1 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	3.1	-
2.2.2 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ		
2.2.2 ก. β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	2.7	N.A.
2.2.2 ข. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30	2.8	9.7
2.2.2 ค. δ ลดลงร้อยละ 30	2.8	5.9
2.2.2 ง. Φ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และ δ ลดลงร้อยละ 30	2.9	16.1

บทที่ 7

สรุปผลการทดลอง

บทนี้กล่าวถึงการสรุปผลที่ได้จากการจำลองการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตร่วมกับ คาลมานฟิลเตอร์ ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยา คายความร้อนอันดับหนึ่งแบบผันกลับได้และแบบผันกลับไม่ได้ โดยเปรียบเทียบสมรรถนะและ ความทนทานกับการควบคุมแบบพีไอดี จากการทดลองในบทที่ 5 และบทที่ 6

7.1 สรุปผลงานวิจัย

เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมและมี ปัญหาการดำเนินการควบคุมที่น่าสนใจโดยเฉพาะเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน เนื่อง จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนนั้นส่วนใหญ่มี ลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูงซึ่งการควบคุมอุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญ ถ้าไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและทำให้กระบวนการเกิด ความไม่เสถียรได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกทำการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวน แบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน 2 กระบวนการคือ (1) เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ดัง พิจารณาได้จากการตอบสนองของกระบวนการแบบลูฟเปิด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรบ กวนระบบคืออุณหภูมิขาเข้าเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้การตอบสนองของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป โดยจะเข้าสู่ภาวะคงตัวค่าใหม่ที่เพิ่มขึ้น และ (2) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มี ปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูงและมี พฤติกรรมของลูฟเปิด ดังพิจารณาได้จากการตอบสนองของกระบวนการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ตัวแปรบ กวนระบบคืออุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเพิ่มขึ้นทำให้ระบบแสดงพฤติกรรมที่ซับซ้อนของ กระบวนการใน 3 กรณีคือ กรณีที่ (1) ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าพารามิเตอร์อย่างมาก กรณีที่ (2) ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีหลายภาวะคงตัวและมีภาวะคงตัว ที่ไม่มีเสถียรภาพ และกรณีที่ (3) ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีการแกว่งเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น อย่างมาก นอกจากนี้กระบวนการทั้งสองยังมีข้อจำกัดของตัวแปรปรับกระบวนการคืออุณหภูมิขา เข้าสำหรับกระบวนการแรก และอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นสำหรับกระบวนการที่สอง ซึ่งสามารถ ปรับได้ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมเท่านั้น และกระบวนการทั้งสองนี้มีลักษณะเป็นกระบวนการที่มี

ตัวแปรขาเข้าตัวแปรขาออกตัวแปรเดียว (SISO) คือมีตัวแปรปรับเพียงตัวเดียวซึ่งสามารถควบคุมตัวแปรควบคุมได้เพียงตัวแปรตัวเดียว เมื่อพิจารณาจากพฤติกรรมและข้อจำกัดในการควบคุมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากระบวนการทั้งสองเป็นตัวแทนที่ดีของกระบวนการที่ครอบคลุมถึงปัญหาในการควบคุมส่วนใหญ่ที่พบในการควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรมคือกรณีที่กระบวนการมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงและมีขอบเขตจำกัดในการดำเนินการควบคุมซึ่งต้องการการออกแบบการควบคุมที่สามารถให้สมรรถนะและความทนทานที่ดี

จากการศึกษาค้นคว้าที่ผ่านมาพบว่า การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกเป็นการควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถควบคุมกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นและมีขอบเขตจำกัดได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกในการควบคุมกระบวนการที่มีปัญหาในการควบคุมดังกล่าวข้างต้น ซึ่งการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการเขียนโปรแกรมควบคุมบนโปรแกรมแม็ตแล็บซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ แบบจำลองของเครื่องควบคุมที่ใช้อยู่ในรูปแบบของสมการสเตตสเปซซึ่งสามารถทำการคำนวณและปรับปรุงสมรรถนะของการควบคุมได้ง่าย

จากการที่การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกเป็นการควบคุมโดยอาศัยแบบจำลอง ในการนำไปประยุกต์ใช้จริงในกระบวนการอุตสาหกรรมอาจมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการที่ใช้ในเครื่องควบคุมหรือแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุมเกิดขึ้นซึ่งอาจส่งผลให้การควบคุมไม่ได้ผลดี ดังนั้นจึงต้องอาศัยการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์เข้ามาช่วยในการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกให้ถูกต้องใกล้เคียงกับแบบจำลองกระบวนการจริงมากที่สุด สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้คาลมานฟิลเตอร์ในการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ที่ผิดพลาด โดยในการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์นั้นจะอาศัยข้อมูลค่าตัวแปรขาออกที่วัดได้เป็นฐานในการคำนวณหรือประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ซึ่งจะช่วยทำให้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกมีประสิทธิภาพดีขึ้น ดังนั้นในการจำลองการควบคุมจึงได้มีการทดสอบความทนทานของการควบคุมเปรียบเทียบกับ การควบคุมแบบพีไอดี โดยกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมและแบบจำลองของกระบวนการในทิศทางที่จะทำให้ระบบมีการตอบสนองที่รุนแรงมากขึ้นในการทดสอบการควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดดังกล่าว สำหรับกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมนั้นจะไม่ส่งผลต่อการควบคุมแบบพีไอดีเนื่องจากเครื่องควบคุมแบบพีไอดีไม่ได้อาศัยแบบจำลองในการควบคุม ดังนั้นจึงไม่ต้องทำการทดสอบการควบคุมแบบพีไอดีในกรณีนี้

เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนติกเปรียบเทียบกับ การควบคุมแบบพีไอดี ในการทดลองได้มีการทดสอบสมรรถนะในการ

ควบคุมทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรระบบและกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและการทดสอบความทนทานในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง/กระบวนการที่ทำการควบคุม ทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรระบบและกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

จากการทดสอบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกเปรียบเทียบกับควบคุมแบบพีไอดีสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

7.1.1 ผลการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะและความทนทานในการควบคุมระหว่างการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกและการควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ โดยพิจารณาจากทั้งกราฟแสดงผลการควบคุมและค่าอินทิกรัลของความผิดพลาดสัมบูรณ์ในการควบคุม พบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรระบบ และกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุมภายใต้ขอบเขตจำกัดของอุณหภูมิเข้าซึ่งเป็นตัวแปรปรับกระบวนการ นอกจากนี้ในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุม เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีการตอบสนองที่ช้าลงในการปรับสภาพของกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ และมีความผิดพลาดในการควบคุมเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีทั้งในด้านสมรรถนะและความทนทาน ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

7.1.2 ผลการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะและความทนทานในการควบคุมระหว่างการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกและการควบคุมแบบพีไอดี ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ โดยพิจารณาจากทั้งกราฟแสดงผลการควบคุมและค่าอินทิกรัลของความผิดพลาดสัมบูรณ์ในการควบคุม สำหรับกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณีพบว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี

มาก ทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าการรบกวนระบบและกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย ในการควบคุมภายใต้ขอบเขตจำกัดของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นซึ่งเป็นตัวแปรปรับกระบวนการ อีกทั้งระบบยังมีความทนทานต่อความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมและแบบจำลอง ของกระบวนการสูงกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งให้ผลการควบคุมที่ไม่ดี โดยมีความผิดพลาด ในการควบคุมมาก การตอบสนองของเครื่องควบคุมช้าและไม่สามารถควบคุมกระบวนการได้ใน บางกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการที่แสดงพฤติกรรมที่มีภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพได้ แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องควบคุมแบบ พีไอดี ทั้งในด้านสมรรถนะและความทนทานในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบ ต่อเนื่องที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปผลได้ดังนี้

* การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกเป็นการควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถควบคุม กระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นและมีขอบเขตจำกัดในการดำเนินงานได้ดี เนื่องจากการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกเป็นการควบคุมโดยอาศัยแบบจำลอง ซึ่งมีข้อดีคือข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับระบบสามารถรวมเข้าไว้ในแบบจำลองของเครื่องควบคุม ซึ่งเครื่องควบคุมสามารถใช้ทั้งค่า การรบกวนระบบและค่าตัวแปรขาออกของกระบวนการในการคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสม ภายใต้ขอบเขตจำกัดของตัวแปรปรับกระบวนการ ทำให้สามารถคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมกว่าการควบคุมแบบพีไอดีซึ่งให้สมรรถนะในการควบคุมที่ไม่ดีตามความต้องการ

* ในการประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกจำเป็นต้องอาศัยการประมาณค่า สเตตและพารามิเตอร์เข้ามาช่วยในการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ของแบบจำลองของ เครื่องควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกให้ถูกต้องใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุดทำให้ตัว ควบคุมสามารถคำนวณค่าตัวแปรปรับที่ถูกต้องเหมาะสม ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า คาลมานฟิลเตอร์ช่วยให้การควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกมีสมรรถนะและความทนทานสูงขึ้น และให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดีและการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกที่ไม่ได้ ใช้ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

* สำหรับกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมที่ใช้ในเครื่อง ควบคุมจะไม่ส่งผลต่อการควบคุมแบบพีไอดี เนื่องจากเครื่องควบคุมแบบพีไอดีไม่ได้ใช้แบบ จำลองในการควบคุมซึ่งการคำนวณค่าตัวแปรปรับจะขึ้นกับค่าความผิดพลาดจากการควบคุม เท่านั้น แต่สำหรับกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการที่จะทำการควบคุมจะส่งผล ต่อทั้งการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกและพีไอดี เนื่องจากเครื่องควบคุมแบบพีไอดีอาศัยการ

ปรับจากกระบวนการจริง ดังนั้นเมื่อมีความผิดพลาดใด ๆ ของกระบวนการในระหว่างการควบคุม จะทำให้พารามิเตอร์ปรับไม่สามารถปรับเครื่องควบคุมให้ทำงานได้ดีเทียบเท่ากับกรณีปกตินอกจากทำการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่ แต่สำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองที่ใช้ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์จะสามารถชดเชยสำหรับความผิดพลาดดังกล่าวได้โดยไม่ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่ซึ่งเป็นข้อดีของการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกในการที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการในอุตสาหกรรมที่เราไม่ทราบข้อมูลต่าง ๆ ดีพอ

7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

* การประยุกต์ใช้เทคนิคการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์นั้นจะให้ผลการประมาณค่าที่ดีหรือไม่ขึ้นกับค่าตัวแปรขาออกที่วัด และการเลือกค่าพารามิเตอร์ปรับให้เหมาะสมโดยอาศัยข้อมูลเบื้องต้นจากกระบวนการ ความถูกต้องของแบบจำลองและอุปกรณ์วัด ซึ่งจะส่งผลถึงการประมาณค่าด้วย นอกจากนี้ยังขึ้นกับเทคนิคการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์เอง ซึ่งในการพัฒนาในขั้นต่อไปอาจมีการพัฒนาจากคาลมานฟิลเตอร์ไปเป็นแบบคาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยาย (Extended Kalman Filter) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประมาณค่าให้ดียิ่งขึ้นและเหมาะกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้น

* เพื่อความสะดวกในการศึกษาค้นคว้าและนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรม การพัฒนาในขั้นต่อไปอาจมีการพัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

* เพื่อให้เทคนิคการควบคุมด้วยแบบจำลองเจเนริกสามารถตอบสนองต่อความต้องการในการใช้งานมากขึ้น การพัฒนาในขั้นต่อไปอาจมีการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการควบคุมการกวาดหนึ่งฟังก์ชันในการปรับให้ได้ค่าการตอบสนองที่ต้องการ เนื่องจากค่าการตอบสนองที่ต้องการสามารถกำหนดได้โดยการเลือกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการออกแบบการควบคุม

รายการอ้างอิง

1. Chang. H., Chen. L. H., Bifurcation Characteristics of Nonlinear Systems Under Convention PID Control. Chem. Eng. Sci. 39. (1984): 1127-1142.
2. Lee, P. L., Sullivan, G. R., Generic Model Control. Comput. Chem. Eng. 12. (1988): 573-598.
3. Cott, B. J., Macchietto, S., Temperature Control of Exothermic Batch Reactors Using Generic Model Control. Ind. Eng. Chem. Res. 28. (1989): 1177-1184.
4. Hamilton, J. C., Seborg D. E. and Fisher, D. G., An Experimental Evaluation of Kalman Filtering. AIChE J. 19. (1973): 901-907.
5. Uppal A., Ray, W. H. and Poore, A. B., On the Dynamic Behavior of Continuous Stirred Tank Reactors. Chem. Engng. Sci. 29. (1974): 967.
6. Economou C. G., Morari, M. and Palsson, B. O., Internal model control-5. Extension to nonlinear systems. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 25. (1986): 403-411.
7. สุธรรม ศรีเกษม, เมธินทร์ ทรงชัยกุล, สง่า ศรีศุภปริดา.
MATLAB เพื่อการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต.
8. Cutler, C. R., Morshedi, A. M., Quadratic Dynamic Matrix Control (QDMC). AIChE. 17. (1983).
9. Richalet, J., Rault, A., Testud, J. L., Papon, J., Model Predictive Heuristic Control: Application to Industrial Process. Automatica. 14. (1976): 413.
10. Garcia, C. E., Morari M., A unifying Review and Some New Results. Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev. 21. (1982): 308-323.
11. Jutan, A., Uppal, A., Combined Feedforward-Feedback Servo Control Scheme for an Exothermic Batch Reactor. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 23. (1984): 597-602.
12. Kittisupakorn, P. and Kershenbaum, L. S. The Use of a Partially Simulated Exothermic (PARSEX) Reactor for Experimental Testing of Control Algorithms. Iran lchemE. 72. Part A. (1994): 55-63.
13. Riggs, J. B., Rhinehart, R., Comparison Between Process Model Based Controllers. In Proceedings of the 1988 American Control Conference. Atlanta, GA. (1988): 1591-1595.

14. Hoo, K. A., Kantor, J. C., An Exothermic Continuous Stirred Tank Reactor is Feedback Equivalent to a Linear System. Chem. Eng. Commun. 37. (1985): 1-10.
15. Balchen, J. G., Lie, B., Solberg, I., Internal Decoupling in Non-Linear Process Control. Modeling, Ident. Control. 9. (1988): 137-148.
16. Bartusiak, R. D., Nonlinear Feedforward/Feedback Control Structures Designed by Reference System Synthesis. Chem. Eng. Sci. 44. (1989): 1837-1851.
17. Adebekun, A. K., Schork, F. J., On the Global Stabilization of n^{th} Order Reactions. Chem. Eng. Commun. (1991a): 47-59.
18. Gattu, G., Zafirious, E., Nonlinear Quadratic Dynamic Matrix Control With State Estimation. Ind. Eng. Chem. Res. 31. (1992): 1096-1104.
19. Cutler, C. R., and Ramaker, B. L., Dynamic Matrix Control-A Computer Control Algorithm. Proc. Automatica Control Conf., San Francisco, Paper WP5-B. (1980); AIChE Mtg., paper No. 51B, Houston. (1979).
20. Rouhani, R., Methra, R. K., Model Algorithmic Control (MAC) Basic Theoretical Properties. Automatica. 18. (1982): 401-414.
21. Garcia, C. E., and Morshedi, A. M., Quadratic programming solution of dynamic matrix control (QDMC). Chem. Eng. Commun. 46. (1986): 73-87.
22. George Stephanopoulos. Chemical Process Control An Introduction to Theory and Practice. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall, (n.d.).
23. ไพศาล กิตติศุภกร. เอกสารประกอบคำสอนวิชา 2105-619 Advanced Automatic Process Control (การควบคุมกระบวนการอัตโนมัติขั้นสูง). ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การทำให้ระบบอยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย

ในบทนี้กล่าวถึงการแปลงแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยา
คายความร้อนแบบไม่ผันกลับ ซึ่งอยู่ในรูปแบบที่ยุ่งยากซับซ้อนให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายในการออก
แบบระบบควบคุมโดยการรวมพจน์ต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วย

ก.1 การทำให้ระบบให้อยู่ในพจน์ตัวแปรไร้หน่วย

ก. สมการดุลมวลสารตั้งต้น

$$\frac{dC}{dt} = -k_0 C \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) + \frac{Q}{V}(C_f - C) \quad (\text{ก.1})$$

คูณตลอดสมการที่ (ก.1) ด้วย $\frac{V}{Q_0 C_f}$ แล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{d\frac{C}{C_f}}{d\frac{Q_0}{V}t} = \frac{-V}{Q_0} k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \frac{C}{C_f} + \frac{Q}{Q_0} \left(1 - \frac{C}{C_f}\right) \quad (\text{ก.2})$$

จัดรูปสมการใหม่โดยคูณ T_{f0} เข้าในพจน์ของเอ็กโปเนนเชียลทั้งบนและล่างจะได้

$$\frac{d\frac{C}{C_f}}{d\frac{Q_0}{V}t} = \frac{-V}{Q_0} k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_{f0}} \times \frac{T_{f0}}{T}\right) \frac{C}{C_f} + \frac{Q}{Q_0} \left(1 - \frac{C}{C_f}\right) \quad (\text{ก.3})$$

กำหนดให้พจน์ $\frac{C}{C_f} = x_1$; $\frac{Q_0}{V}t = \tau$; $\frac{E}{RT_{f0}} = \gamma$; $\frac{Q}{Q_0} = q$

แล้วจัดรูปสมการ (ก.3) ใหม่จะได้

$$\frac{dx_1}{d\tau} = -\frac{V}{Q_0} k_0 \exp\left(\frac{-\gamma}{T/T_{f0}}\right) x_1 + q(1 - x_1) \quad (\text{ก.4})$$

จัดรูปใหม่ได้

$$\frac{dx_1}{d\tau} = -\frac{V}{Q_0} k_0 \exp\left(\frac{-\gamma}{\frac{T - T_{f0} + T_{f0}}{T_{f0}}}\right) x_1 + q(1 - x_1) \quad (\text{ก.5})$$

$$\frac{dx_1}{d\tau} = -\frac{V}{Q_0} k_0 \exp\left(\frac{-\gamma}{1 + \frac{T - T_{f0}}{T_{f0}}}\right) x_1 + q(1 - x_1) \quad (\text{ก.6})$$

$$\frac{dx_1}{d\tau} = -\frac{V}{Q_0} k_0 \exp\left(\frac{-\gamma - \gamma\left(\frac{T - T_{f0}}{T_{f0}}\right) + \gamma\left(\frac{T - T_{f0}}{T_{f0}}\right)}{1 + \left(\frac{T - T_{f0}}{T_{f0}}\right)}\right) x_1 + q(1 - x_1) \quad (\text{ก.7})$$

$$\frac{dx_1}{d\tau} = -\frac{V}{Q_0} k_0 \exp\left(\frac{-\gamma\left(1 + \frac{T - T_{f0}}{T_{f0}}\right) + \gamma\left(\frac{T - T_{f0}}{T_{f0}}\right)}{1 + \left(\frac{T - T_{f0}}{T_{f0}}\right)}\right) x_1 + q(1 - x_1) \quad (\text{ก.8})$$

$$\frac{dx_1}{d\tau} = -\frac{V}{Q_0} k_0 \exp\left(-\gamma + \frac{\gamma\left(\frac{T - T_{f0}}{T_{f0}}\right)}{1 + \left(\frac{T - T_{f0}}{T_{f0}}\right)}\right) x_1 + q(1 - x_1) \quad (\text{ก.9})$$

$$\frac{dx_1}{d\tau} = -\frac{V}{Q_0} k_0 e^{-\gamma} x_1 \exp\left(\frac{\gamma\left(\frac{T - T_{f0}}{T_{f0}}\right)}{1 + \left(\frac{T - T_{f0}}{T_{f0}}\right)}\right) x_1 + q(1 - x_1) \quad (\text{ก.10})$$

กำหนดให้ $\frac{V}{Q_0} k_0 e^{-\gamma} = \Phi$ และ $\frac{T - T_{f0}}{T_{f0}} \gamma = x_2$

ดังนั้นสมการ (ก.10) จัดรูปใหม่เขียนในพจน์ตัวแปรไร้หน่วยได้เป็น

$$\frac{dx_1}{d\tau} = -\Phi x_1 \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) + q(1 - x_1) \quad (\text{ก.11})$$

ข. สมการสมดุลพลังงานของเครื่องปฏิกรณ์

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{-\Delta H}{\rho C_p} \right) k_0 C \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) + \frac{Q}{V}(T_f - T) + \left(\frac{UA}{\rho C_p V} \right) (T_c - T) \quad (\text{ก.12})$$

คูณตลอดสมการ (ก.12) ด้วยพจน์ $\frac{V}{Q_0} \times \frac{\gamma}{T_{f0}}$

พิจารณาพจน์ทางด้านซ้ายของสมการ (ก.12) จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\frac{d\left(\frac{T - T_{f0}}{T_{f0}} \gamma\right)}{d\left(\frac{Q_0}{V}\right)t}$$

ดังนั้นพจน์ทางซ้ายมือสามารถเขียนในพจน์ของตัวแปรไร้หน่วยได้เป็น

$$\frac{dT}{dt} \Rightarrow \frac{dx_2}{d\tau} \quad (\text{ก.13})$$

พิจารณาพจน์ $\exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$ จากสมการ (ก.12) และจากการพิสูจน์แล้วข้างต้นในส่วน ก.

ซึ่งสามารถเขียนได้ในพจน์ตัวแปรไร้หน่วยได้เป็น

$$\exp\left(\frac{-E}{RT}\right) = e^{-\gamma} \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) \quad (\text{ก.14})$$

พิจารณาพจน์ $\left(\frac{-\Delta H}{\rho C_p}\right) k_0 C \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$ จากสมการ (ก.12) เมื่อคูณด้วย $\frac{V}{Q_0} \times \frac{\gamma}{T_{f0}}$

แล้ว คูณเข้าแล้วหารออกด้วย C_f และผลจากสมการ (ก.14) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\left(\frac{-\Delta H \gamma}{\rho C_p T_{f0}}\right) C_f \times \frac{C}{C_f} \times \frac{V}{Q_0} k_0 e^{-\gamma} \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right)$$

กำหนดให้พจน์ $\left(\frac{-\Delta H \gamma}{\rho C_p T_{f0}}\right) C_f = \beta$ ดังนั้นพจน์นี้สามารถเขียนในพจน์ตัวแปรไร้หน่วยได้

$$\left(\frac{-\Delta H}{\rho C_p}\right) k_0 C \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \Rightarrow \beta \Phi x_1 \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) \quad (\text{ก.15})$$

พิจารณาพจน์ $\frac{Q}{V}(T_f - T)$ จากสมการ (ก.12) จัดรูปใหม่โดยบวกเข้าและลบออกด้วย T_{f0} จะได้

$$\frac{Q}{V}(T_f + T_{f0} - T_{f0} + T) = \frac{Q}{V}(T_f - T_{f0}) - \frac{Q}{V}(T - T_{f0})$$

คูณตลอดสมการด้วย พจน์ $\frac{V}{Q_0} \times \frac{\gamma}{T_{f0}}$ แล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$\gamma \frac{Q}{Q_0} \left(\frac{T_f - T_{f0}}{T_{f0}} \right) - \frac{Q}{Q_0} \left(\frac{T - T_{f0}}{T_{f0}} \right) \gamma$$

กำหนดให้พจน์ $\gamma \frac{Q}{Q_0} \left(\frac{T_f - T_{f0}}{T_{f0}} \right) = v$

ดังนั้นพจน์นี้สามารถเขียนในพจน์ของตัวแปรไร้หน่วยได้เป็น

$$\frac{Q}{V}(T_f - T) \Rightarrow v - qx_2 \quad (\text{ก.16})$$

พิจารณาพจน์ $\left(\frac{UA}{\rho C_p V} \right) (T_c - T)$ จากสมการ (ก.12) สามารถจัดรูปใหม่โดยบวกเข้า

และลบออกด้วย T_{f0} จะได้

$$\left(\frac{UA}{\rho C_p V} \right) (T_c - T_{f0} + T_{f0} - T) = \frac{UA}{\rho C_p V} (T_c - T_{f0}) - \frac{UA}{\rho C_p V} (T - T_{f0})$$

คูณตลอดสมการด้วยพจน์ $\frac{V}{Q_0} \times \frac{\gamma}{T_{f0}}$ แล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{UA}{\rho C_p Q_0} \left(\frac{T_c - T_{f0}}{T_{f0}} \right) \gamma - \frac{UA}{\rho C_p Q_0} \left(\frac{T - T_{f0}}{T_{f0}} \right) \gamma \quad (\text{ก.17})$$

กำหนดให้พจน์ $\frac{UA}{\rho C_p Q_0} = \delta$ และพจน์ $\frac{UA}{\rho C_p Q_0} \left(\frac{T_c - T_{f0}}{T_{f0}} \right) \gamma = u$

ดังนั้นพจน์นี้สามารถเขียนในพจน์ของตัวแปรไร้หน่วยได้เป็น

$$\left(\frac{UA}{\rho C_p V} \right) (T_c - T) \Rightarrow u - \delta x_2 \quad (\text{ก.18})$$

ดังนั้นสมการสมดุลพลังงานของเครื่องปฏิกรณ์ (ก.12) สามารถเขียนในพจน์ตัวแปรไร้หน่วยได้เป็น

$$\frac{dx_2}{d\tau} = \beta \Phi x_1 \exp \left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}} \right) - (q + \delta)x_2 + u + v \quad (\text{ก.19})$$

ภาคผนวก ข

Linear in Control และ Zeros dynamics

ในบทนี้กล่าวถึงการตรวจสอบ linear in control ซึ่งเป็นการตรวจสอบว่ากระบวนการที่จะทำการควบคุม สามารถที่จะนำระบบการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตมาใช้ได้หรือไม่ และการตรวจสอบ zeros dynamics ซึ่งหมายถึง internal dynamics ในภาวะที่ตัวแปรควบคุมถูกควบคุมให้อยู่ในตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการ นั่นคือตัวแปรควบคุมจะมีค่าเท่ากับศูนย์ (ในรูปของค่าเบี่ยงเบน) ซึ่งจะบอกว่ากระบวนการที่ถูกควบคุมมีเสถียรภาพหรือไม่ เมื่อตัวแปรควบคุมถูกควบคุมโดยตัวควบคุมให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ

ข.1 Linear in Control [23]

พิจารณาเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ ซึ่งสมการอนุรักษ์มวลและพลังงานสามารถเขียนได้ในรูปตัวแปรไร้มิติและพารามิเตอร์ไร้มิติดังนี้

$$\frac{dx_2}{d\tau} = \dot{x}_2 = \beta\Phi x_1 \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) - (q + \delta)x_2 + u + v \quad (ข.1)$$

$$\frac{dx_1}{d\tau} = \dot{x}_1 = -\Phi x_1 \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) + q(1 - x_1) \quad (ข.2)$$

แบบที่ 1 เลือกที่จะควบคุม x_2

ดังนั้น $Y = x_2$

พิจารณาสมการ (ข.1) จาก GMC Algorithm

$$\dot{Y} = \dot{x}_2 = \beta\Phi x_1 \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) - (q + \delta)x_2 + u + v \quad (ข.3)$$

ซึ่งจะได้

$$u = \dot{Y} - \beta \Phi x_1 \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) + (q + \delta)x_2 - v$$

โดยที่

$$\dot{Y} = K_1(x_2^{sp} - x_2) + \int_0^{t_f} K_2(x_2^{sp} - x_2) dt$$

ดังนั้น

$$u = \left[K_1(x_2^{sp} - x_2) + \int_0^{t_f} K_2(x_2^{sp} - x_2) dt \right] - \beta \Phi x_1 \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) + (q + \delta)x_2 - v$$

แบบที่ 2 เลือกที่จะควบคุม x_1

ดังนั้น $Y = x_1$

พิจารณาสมการ (ข.2) จาก GMC Algorithm

$$\dot{Y} = \dot{x}_1 = -\Phi x_1 \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) + q(1 - x_1) \quad (ข.4)$$

พิจารณาจากสมการ (ข.3) และ (ข.4) เนื่องจากค่า u ไม่ปรากฏในสมการ (ข.4) ดังนั้นการควบคุมแบบ GMC ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการควบคุม x_1 ได้ (ไม่เป็น linear in control)

ข.2 Zeros Dynamics

Internal Dynamics ใช้กับสมการใด ๆ จากแบบจำลองกระบวนการที่นอกเหนือจากสมการที่การควบคุมแบบ GMC นำไปใช้

จากตัวอย่างกระบวนการเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ เมื่อควบคุม x_2

∴ Internal Dynamics คือ

$$\dot{x}_1 = -\Phi x_1 \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) + q(1 - x_1)$$

Zero Dynamics ($x_2 = 0$)

$$\frac{dx_1}{d\tau} = \dot{x}_1 = -\Phi x_1 + q(1 - x_1)$$

หรือ

$$\dot{x}_1 = -(\Phi + q)x_1 + q$$

$$\frac{dx_1}{d\tau} = \dot{x}_1 = -(\Phi + q)x_1 + q ; \quad x_1 = x_1(k) - x_1^{ss}$$

อินทิเกรตสมการอนุพันธ์เพื่อหาค่า x_1

กำหนดให้ $x_3 = -(\Phi + q)x_1 + q$

จะได้ $\dot{x}_3 = \frac{\partial x_3}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial t} = -(\Phi + q)\dot{x}_1 = -(\Phi + q)x_3$

$$\frac{dx_3}{x_3} = -(\Phi + q)dt$$

$$\ln x_3 = -(\Phi + q)t$$

$$x_3 = e^{-(\Phi+q)t}$$

$$x_1 = \frac{e^{-(\Phi+q)t} - q}{-(\Phi + q)}$$

$$x_1(\infty) = \frac{q}{(\Phi + q)}$$

ซึ่งจะได้ว่า ค่า x_1 มีค่าลดลงเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ในการใช้ตัวควบคุมแบบ GMC จะสามารถทำการควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ โดยที่กระบวนการจะมีเสถียรภาพ (ค่าตัวแปรขาออกอื่น ๆ จะเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง)

ภาคผนวก ค

Minimum Variance Estimation

บทนี้กล่าวถึงการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์แบบคาลมานฟิลเตอร์ซึ่งใช้หลักการของ minimum variance estimation และตัวอย่างในการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์

ค.1 Minimum Variance Estimation [23]

ต้องการหาค่าการประมาณที่ดีที่สุด (\hat{x}) เพื่อที่จะลดผลรวมน้ำหนักยกกำลังสองให้น้อยที่สุด

$$s = a(\hat{x} - x_0)^2 + b(y - c\hat{x})^2$$

ทำการหาอนุพันธ์ของสมการ ($\partial s / \partial \hat{x}$) และกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อหาค่าน้อยที่สุดจะได้ว่า

$$\partial s / \partial \hat{x} = 2a(\hat{x} - x_0) - 2bc(y - c\hat{x}) = 0$$

$$\hat{x} = x_0 + \frac{bc}{a + bc^2}(y - cx_0)$$

เมื่อ x_0 คือค่าการประมาณครั้งก่อนหรือค่าจากการคาดหมาย

y คือค่าการวัดปัจจุบัน

$$\frac{bc}{a + bc^2} \text{ คือค่าเกน (Gain)}$$

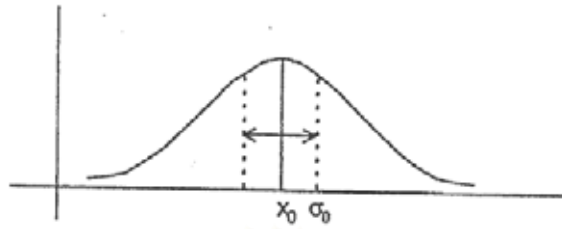
$$\hat{x} = x_0 + k(y - cx_0)$$

เมื่อ k คือเกน หรือค่าคงที่เฉพาะตำแหน่ง (locally Constant)

และจะใช้ความรู้ของความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องกับ x และ y

ความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องกับ x_0 (uncertainly associated with x_0)

$$E(x) = x_0 \quad ; \quad E(x - x_0)^2 = \sigma_0^2$$



ความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องกับ y (uncertainly associated with y)

$$y = cx + \eta$$

$$E(\eta) = 0 \quad ; \quad E(\eta^2) = \sigma_\eta^2$$



ซึ่งจะเลือก k เพื่อลดความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนจากการประมาณค่าของ x และ \hat{x}

ดังนั้น เลือก k เพื่อให้ $E(x - \hat{x})^2$ มีค่าต่ำสุด ซึ่ง

$$E(x - \hat{x})^2 = E\{x - x_0 - k(y - cx_0)\}^2$$

$$E(x - \hat{x})^2 = \sigma_0^2 + k^2(c^2\sigma_0^2 + \sigma_\eta^2) - 2kc\sigma_0^2$$

นั่นคือ $\frac{\partial [E(x - x_0)^2]}{\partial k} = 0$

$$\therefore \frac{\partial [E(x - \hat{x})^2]}{\partial k} = 2k(c^2\sigma_0^2 + \sigma_\eta^2) - 2c\sigma_0^2 = 0$$

$$k = \frac{c\sigma_0^2}{c^2\sigma_0^2 + \sigma_\eta^2}$$

จาก

$$\hat{x} = x_0 + k(y - cx_0)$$

$$\text{จะได้} \quad E(\hat{x} - x)^2 = \sigma_x^2 = \sigma_0^2 - \left(\frac{c^2 \sigma_0^4}{c^2 \sigma_0^2 + \sigma_\eta^2} \right)$$

นั่นคือในการประมาณค่าแต่ละครั้งโดยอาศัยค่าวัดได้ที่น่าเชื่อถือจะสามารถลดค่าความไม่แน่นอนของการประมาณลงได้ $\sigma_x^2(k+1) < \sigma_x^2(k)$ และ

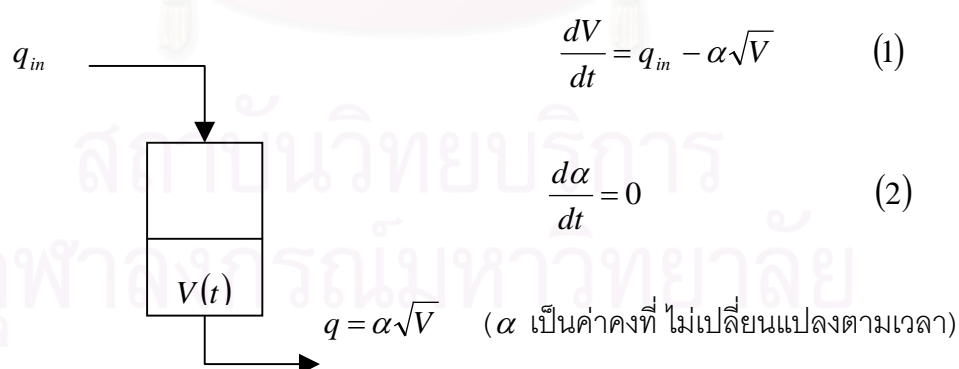
$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \sigma_\eta^2 &= 0 && \text{การประมาณมีค่าถูกต้องสมบูรณ์ } \sigma_x^2(\infty) = 0 \\ \sigma_\eta^2 &= \infty && \text{ไม่มีการปรับปรุงในการประมาณค่า } \sigma_x^2(\infty) = \sigma_x^2(0) \\ &&& \text{(การประมาณค่าไม่ดีขึ้น)} \end{aligned}$$

หลักการของคาลมานฟิลเตอร์และอัลกอริทึมคาลมานฟิลเตอร์แสดงรายละเอียดอยู่ในบทที่ 4

ขั้นตอนในการหาค่าสแตตที่ไม่สามารถวัดได้และพารามิเตอร์ที่ไม่แน่นอน มีดังนี้

1. เขียนสมการสแตตใหม่ในรูปสแตตสเปซ
2. ระบบสามารถสังเกตได้หรือไม่
3. แปลงสมการสแตตไปอยู่ในรูปดีสครีต
4. แทนสมการในรูปดีสครีตลงไปในการคาลมานฟิลเตอร์ โดยกำหนด P_0, Q, R และค่าการวัดที่เชื่อถือได้
5. ปรับปรุงค่าการประมาณทุกครั้งโดยใช้ค่าการวัดค่าใหม่

ตัวอย่าง



ข้อมูล

t	0	10	20
V	50	49	x

ที่ภาวะคงที่ (Steady State)

$$q_{in}^{ss} = 10 \text{ cm}^3 / \text{sec}$$

$$V_s = 50 \text{ cm}^3$$

$$\alpha_s = 1.4142$$

แต่ในความเป็นจริงแล้ว เงื่อนไขที่สมมตินี้จริงหรือไม่?

ตอบ เงื่อนไขเหล่านี้ไม่จริง เพราะว่า สมการสแตต (1) ไม่จริง $q \neq \alpha V^{1/2}$ และค่าคงที่ α อาจจะไม่
ได้มีค่าเท่ากับ 1.4142

$$(\text{จริง ๆ แล้ว } V = 48 \text{ cm}^3 \text{ และ } \alpha = 1.443)$$

เราจะหาค่าที่แท้จริงของค่า V และ α ได้อย่างไร?

ตอบ สามารถหาค่า V และ α ที่ถูกต้องได้โดยใช้ “คาลมานฟิลเตอร์”

สิ่งที่ต้องทำเป็นอันดับแรกคือ ต้องพิสูจน์ว่า “ระบบสามารถสังเกตได้จากการวัด q_{in} ”

โดยให้

$$x_1 = V - V_s$$

$$x_2 = \alpha - \alpha_s$$

$$\text{และ} \quad u = q_{in} - q_{in}^{ss}$$

แล้วเขียนสมการสแตตใหม่ในรูปสแตตสเปซ (State Space Form)

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-\alpha_s V_s^{-1/2}}{2} & -V_s^{1/2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} [u]$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.01 & -7.071 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} [u]$$

$$Y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

แล้วทำการแปลงสมการแบบจำลองไปอยู่ในรูปดีสครีต (Discrete Form)

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k)$$

$$Y(k) = Cx(k)$$

เวลาในการสุ่ม (T) มีค่าเท่ากับ 10 วินาที

$$\therefore \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9 & -70.71 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \end{bmatrix} [u(k)]$$

เวลานี้ จะเพิ่มความไม่แน่นอนของสมการแบบจำลองและการวัดเข้าไปด้วย

$$\therefore \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9 & -70.71 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \end{bmatrix} [u(k)] + \begin{bmatrix} \xi_{21}(k) \\ \xi_{22}(k) \end{bmatrix}$$

$$Y(k) = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \eta(k)$$

ใช้อัลกอริทึมคาลมานฟิลเตอร์ โดยที่

กรณีที่ 1

$$P_0 = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10^{-2} \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R = [100]$$

และ

$$\hat{x}(k/k) = \begin{bmatrix} V - V_s \\ \alpha - \alpha_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 49 - 50 \\ 1.4286 - 1.4142 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0.0144 \end{bmatrix}$$

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่าประมาณของสเตรตและเมตริกซ์ถ่วงดุล (weighting matrix) ที่เวลา ($k+1$)

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1/k) &= \Phi x(k/k) + \Gamma u(k) \\ &= \begin{bmatrix} 0.9 & -70.71 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ 0.0144 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \end{bmatrix} [0] \\ &= \begin{bmatrix} -1.9182 \\ 0.0144 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(k+1/k) &= \Phi P(k/k) \Phi^T + Q \\ &= \begin{bmatrix} 0.9 & -70.71 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10^{-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.9 & 0 \\ -70.71 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 230.999 & -0.7071 \\ -0.7071 & 0.01 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาเมตริกซ์เกนคาลมาน (Kalman gain matrix) ที่เวลา ($k+1$)

$$\begin{aligned} K(k+1) &= P(k+1/k) C^T [C P(k+1/k) C^T + R]^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 230.999 & -0.7071 \\ -0.7071 & 0.01 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.7071 & 0.01 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + [100]^{-1} \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.6979 \\ -0.0021 \end{bmatrix}$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าการประมาณใหม่

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1/k+1) &= \hat{x}(k+1/k) + K(k+1) \left[Y(k+1) - C \hat{x}(k+1/k) \right] \\ &= \begin{bmatrix} -1.9182 \\ 0.0144 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.6979 \\ -0.0021 \end{bmatrix} \left[[-1] - [1 \ 0] \begin{bmatrix} -1.9182 \\ 0.0144 \end{bmatrix} \right] \\ &= \begin{bmatrix} -1.9182 \\ 0.0144 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.6979 \\ -0.0021 \end{bmatrix} [-1 + 1.9182] \\ &= \begin{bmatrix} -1.2774 \\ 0.0124 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาเมตริกซ์ถ่วงดุลค่าใหม่ (weighting matrix)

$$\begin{aligned} P(k+1/k+1) &= [I - K(k+1)C]P(k+1/k)[I - K(k+1)C]^T + K(k+1)RK(k+1)^T \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.6979 \\ -0.0021 \end{bmatrix} [1 \ 0] \begin{bmatrix} 230.999 & -0.7071 \\ -0.7071 & 0.01 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \\ &\quad \begin{bmatrix} 0.6979 \\ -0.0021 \end{bmatrix} [1 \ 0]^T + \begin{bmatrix} 0.6979 \\ -0.0021 \end{bmatrix} [100] [0.6979 \ -0.0021] \\ &= \begin{bmatrix} 69.7884 & -0.2136 \\ -0.2136 & 0.0085 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

กรณีที่ 2 $P_0 = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10^{-2} \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R = [100]$

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่าประมาณของสเตรตและเมตริกซ์ถ่วงดุล (weighting matrix) ที่เวลา $(k+1)$

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1/k) &= \Phi x(k/k) + \Gamma u(k) \\ &= \begin{bmatrix} 0.9 & -70.71 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ 0.0144 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \end{bmatrix} [0] \\ &= \begin{bmatrix} -1.9182 \\ 0.0144 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(k+1/k) &= \Phi P(k/k) \Phi^T + Q \\ &= \begin{bmatrix} 0.9 & -70.71 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10^{-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.9 & 0 \\ -70.71 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 131.999 & -0.7071 \\ -0.7071 & 0.01 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาเมตริกซ์เกนคาลมาน (Kalman gain matrix) ที่เวลา $(k + 1)$

$$\begin{aligned} K(k+1) &= P(k+1/k)C^T [CP(k+1/k)C^T + R]^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 131.999 & -0.7071 \\ -0.7071 & 0.01 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 131.999 & -0.7071 \\ -0.7071 & 0.01 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + [100]^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 0.5690 \\ -0.0030 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าการประมาณใหม่

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1/k+1) &= \hat{x}(k+1/k) + K(k+1) [Y(k+1) - C\hat{x}(k+1/k)] \\ &= \begin{bmatrix} -1.9182 \\ 0.0144 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5690 \\ -0.0030 \end{bmatrix} \left[[-1] - \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1.9182 \\ 0.0144 \end{bmatrix} \right] \\ &= \begin{bmatrix} -1.9182 \\ 0.0144 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5690 \\ -0.0030 \end{bmatrix} [-1 + 1.9182] \\ &= \begin{bmatrix} -1.3958 \\ 0.0116 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาเมตริกซ์ถ่วงดุลค่าใหม่ (weighting matrix)

$$\begin{aligned} P(k+1/k+1) &= [I - K(k+1)C]P(k+1/k)[I - K(k+1)C]^T + K(k+1)RK(k+1)^T \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.5690 \\ -0.0030 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 131.999 & -0.7071 \\ -0.7071 & 0.01 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \\ &\quad \begin{bmatrix} 0.5690 \\ -0.0030 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} 0.5690 \\ -0.0030 \end{bmatrix} [100] \begin{bmatrix} 0.5690 & -0.0030 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 56.8964 & -0.3048 \\ -0.3048 & 0.0078 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

กรณีที่ 3 $P_0 = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10^{-2} \end{bmatrix}$, $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $R = [9]$

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่าประมาณของสแตตและเมตริกซ์ถ่วงดุล (weighting matrix) ที่เวลา $(k + 1)$

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1/k) &= \Phi x(k/k) + \Gamma u(k) \\ &= \begin{bmatrix} 0.9 & -0.7071 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ 0.0144 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \end{bmatrix} [0] \\ &= \begin{bmatrix} -1.9182 \\ 0.0144 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P(k+1/k) &= \Phi P(k/k) \Phi^T + Q \\
 &= \begin{bmatrix} 0.9 & -70.71 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10^{-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.9 & 0 \\ -70.71 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 230.999 & -0.7071 \\ -0.7071 & 0.01 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาเมตริกซ์เกนคาลมาน (Kalman gain matrix) ที่เวลา $(k+1)$

$$\begin{aligned}
 K(k+1) &= P(k+1/k)C^T [CP(k+1/k)C^T + R]^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} 230.999 & -0.7071 \\ -0.7071 & 0.01 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.7071 & 0.01 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + [9]^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} 0.9625 \\ -0.0029 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าการประมาณใหม่

$$\begin{aligned}
 \hat{x}(k+1/k+1) &= \hat{x}(k+1/k) + K(k+1) [Y(k+1) - C \hat{x}(k+1/k)] \\
 &= \begin{bmatrix} -1.9182 \\ 0.0144 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.9625 \\ -0.0029 \end{bmatrix} \left[[-1] - \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1.9182 \\ 0.0144 \end{bmatrix} \right] \\
 &= \begin{bmatrix} -1.9182 \\ 0.0144 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.9625 \\ -0.0029 \end{bmatrix} [-1 + 1.9182] \\
 &= \begin{bmatrix} -1.0344 \\ 0.0117 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาเมตริกซ์ถ่วงดุลค่าใหม่ (weighting matrix)

$$\begin{aligned}
 P(k+1/k+1) &= [I - K(k+1)C]P(k+1/k)[I - K(k+1)C]^T + K(k+1)RK(k+1)^T \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.9625 \\ -0.0029 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 230.999 & -0.7071 \\ -0.7071 & 0.01 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \\
 &\quad \begin{bmatrix} 0.9625 \\ -0.0029 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} 0.9625 \\ -0.0029 \end{bmatrix} [9] \begin{bmatrix} 0.9625 & -0.0029 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 8.6625 & -0.0265 \\ -0.0265 & 0.0079 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

สรุป

กรณีที่ 3 คือ

$$\text{กรณี } P_0 = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10^{-2} \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R = [9]$$

ซึ่ง $\hat{x}(k/k) = \begin{bmatrix} -1 \\ 0.0144 \end{bmatrix}$ เมื่อนำมาคำนวณโดยใช้คาลมานฟิลเตอร์

อัลกอริทึม เมื่อเปรียบเทียบกับ 2 กรณีแรก พบว่ากรณีที่ 3 ให้ผลการประมาณค่าออกมาได้ดีที่สุด โดยได้เมตริกซ์ถ่วงน้ำหนักค่าใหม่ออกมาให้น้อยที่สุด

$$\text{คือได้ } P(k+1/k+1) = \begin{bmatrix} 8.6625 & -0.0265 \\ -0.0265 & 0.0079 \end{bmatrix}$$

หมายเหตุ ในการพิจารณาว่ากรณีไหนให้ผลการประมาณค่าที่ดีที่สุด จะพิจารณาจากค่า $P(k+1/k+1)$ โดยดูค่าที่ตำแหน่ง P_{11} (คือ ความผิดพลาดจากการประมาณ V) และ P_{22} (คือความผิดพลาดจากการประมาณ α) จากการเปรียบเทียบ 3 กรณีพบว่า P_{11} ของกรณีที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด ส่วนค่า P_{22} มีค่ามากกว่ากรณีที่ 2 แต่น้อยกว่ากรณีที่ 1 จึงสรุปว่า กรณีที่ 3 ให้ผลการประมาณค่าโดยใช้คาลมานฟิลเตอร์ได้ดีที่สุด เนื่องจากวัตถุประสงค์ในการควบคุมระบบนี้ คือควบคุมระดับน้ำในถัง ฉะนั้นจึงให้ความสำคัญทางการประมาณค่า V (คือค่าที่ตำแหน่ง P_{11}) มากกว่า เนื่องจากถ้าเราสามารถประมาณค่าขาออกได้ถูกต้องหรือใกล้เคียงภาวะจริงที่สุด ก็จะได้ค่าความผิดพลาดที่เปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายที่ถูกต้อง ซึ่งทำให้ได้การควบคุมที่มีประสิทธิภาพดีกว่า กรณีที่เราใช้ค่าขาออกผิดพลาดหรือต่างไปจากภาวะจริงโดยไม่มี การประมาณค่าที่ถูกต้อง

$$\text{จากขั้นตอนที่ 3 ได้ค่า } \hat{x}(k+1/k+1) = \begin{bmatrix} -1.0344 \\ 0.0117 \end{bmatrix}$$

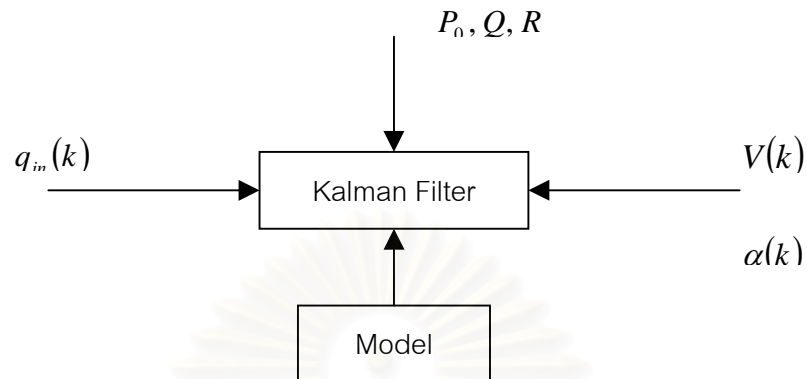
$$\text{จะได้ } V = -1.0344 + 50 = 48.9656 \quad (48 < 48.9656 < 50)$$

$$\alpha = 0.0117 + 1.4142 = 1.4259 \quad (1.4142 < 1.4259 < 1.443)$$

ข้อควรจำ

$$\begin{array}{ll} P = E(x - x_0)^2 & \text{ความไม่แน่นอนจากการประมาณ} \\ Q = E(\xi^2) = \sigma_\xi^2 & \text{ความไม่แน่นอนจากแบบจำลองของกระบวนการ} \\ R = E(\eta^2) = \sigma_\eta^2 & \text{ความไม่แน่นอนจากการวัด} \end{array}$$

Flow Diagram



จากแผนภาพข้างบน จะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้คาลมานฟิลเตอร์นั้นจะต้องให้แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่วัดค่าได้กับตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณในที่นี้คือ q_{in} V และ α ตามลำดับ นอกจากนี้จะต้องให้ค่าความไม่แน่นอนของการประมาณ (P_0) ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง (Q) และความไม่แน่นอนของการวัด (R) ซึ่งความไม่แน่นอนเหล่านี้จะส่งผลถึงประสิทธิภาพในการประมาณค่าของคาลมานฟิลเตอร์ ดังนั้นควรเลือกค่าความไม่แน่นอนเหล่านี้ให้เหมาะสม

ผลการประมาณค่าโดยทั่วไป



เมื่อวัดค่าขาออกแล้วทำการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ไปเรื่อย ๆ สุดท้ายจะได้อ่าค่าสแตตที่ประมาณได้จะเข้าใกล้ค่าสแตตจริง $\hat{x}_1 = -2$ และขณะเดียวกัน จะได้อ่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณเข้าใกล้ค่าพารามิเตอร์จริงด้วย $\hat{x}_2 = 0.0288$

ภาคผนวก ง

การประมาณเชิงเส้นของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ความควบคุมได้ ความสังเกตได้ เสถียรภาพของระบบ

ในบทนี้กล่าวถึงการทำให้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น (Linearization of Nonlinear Systems) โดยทำการประมาณค่าของเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้นรอบจุดใด ๆ โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ และกล่าวถึงคุณสมบัติของกระบวนการที่จะทำการควบคุมซึ่งจำเป็นต้องตรวจสอบก่อนที่จะลงมือควบคุม คุณสมบัติดังกล่าวได้แก่ ความควบคุมได้ (controllability) ความสังเกตได้ (observability) และเสถียรภาพของระบบที่ทำการควบคุม (system stability)

ง.1 การประมาณเชิงเส้นของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น [2] (Linearization of Nonlinear System)

ในการทำให้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น เราสามารถทำได้โดยการประมาณค่าของเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้นรอบจุดใด ๆ โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ ดังนี้

$$f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) \quad (ง.1)$$

โดยที่ x_0 เป็นจุดที่ทำการประมาณ

ในกรณีที่ตัวแปรมากกว่า 1 เราสามารถทำการประมาณเชิงเส้นได้ดังนี้

$$f_1(x, y) \approx f_1(x^s, y^s) + \frac{df_1}{dx} /_{(x^s, y^s)} (x - x^s) + \frac{df_1}{dy} /_{(x^s, y^s)} (y - y^s) \quad (ง.2)$$

$$f_2(x, y) \approx f_2(x^s, y^s) + \frac{df_2}{dx} /_{(x^s, y^s)} (x - x^s) + \frac{df_2}{dy} /_{(x^s, y^s)} (y - y^s) \quad (ง.3)$$

โดยในที่นี้จะทำให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดภาวะคงที่

ในการทำให้ระบบที่ทำการควบคุมเป็นเชิงเส้นดังกล่าวข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = f[x(t), u(t)] \quad (ง.4)$$

โดยที่ x คือเวกเตอร์สแตต (ตัวแปรที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ทั้งหมด)

u คือเวกเตอร์ตัวแปรปรับ

ซึ่งจะทำการประมาณเชิงเส้นรอบจุดใดจุดหนึ่ง (โดยทั่วไปคือจุดที่ภาวะคงที่) โดยใช้อนุกรมเทเลอร์

$$\frac{dx}{dt} \approx f(x^s, y^s) + \frac{df}{dx} /_{(x^s, u^s)} (x - x^s) + \frac{df}{du} /_{(x^s, u^s)} (u - u^s) \quad (ง.5)$$

กำหนดให้

$$\delta x = x - x_s \text{ และ } \delta u = u - u_s \quad (ง.6)$$

ซึ่งจะได้

$$\delta \dot{x} = \dot{x} - \dot{x}_s \text{ และ } \dot{x}_s = f(x_s, u_s) \quad (ง.7)$$

ดังนั้นสมการ (ง.5) เขียนได้เป็น

$$\delta \dot{x} = \frac{\partial f}{\partial x} /_{(x_s, u_s)} \delta x + \frac{\partial f}{\partial u} /_{(x_s, u_s)} \delta u \quad (ง.8)$$

หรือ

$$\delta \dot{x} = A \delta x + B \delta u \quad (ง.9)$$

โดยที่

$$A = \frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (ง.10)$$

$$B = \frac{\partial f}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial u_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \frac{\partial f_n}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_n} \end{bmatrix} \quad (ง.11)$$

ตัวอย่างการทำการประมาณเชิงเส้นของระบบที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องที่
เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบไม่ผันกลับซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในเทอมของพารามิเตอร์
และตัวแปรไร้หน่วย

$$\frac{dx_1}{d\tau} = -\Phi x_1 \exp \left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}} \right) + q(1 - x_1) \quad (ง.12)$$

$$\frac{dx_2}{d\tau} = \beta\Phi x_1 \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) - (q + \delta)x_2 + u + v \quad (\text{ง.13})$$

สามารถทำการประมาณเชิงเส้นหรือเขียนให้อยู่ในรูปของสมการสเตตสเปซในรูปแบบของสมการ

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (\text{ง.14})$$

$$y = Cx + Du \quad (\text{ง.15})$$

ดังนั้นสมการ (ง.12) - (ง.14) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} u \quad (\text{ง.16})$$

$$y = [c_{11} \quad c_{12}]x + [d_{11}]u \quad (\text{ง.17})$$

ตัวอย่างการหาค่าสมาชิกเมทริกซ์ A และ B

$$\text{จากสมการ } \frac{dx_2}{d\tau} = \beta\Phi x_1 \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) - (q + \delta)x_2 + u + v$$

ทำการหาอนุพันธ์ของสมการข้างต้นเทียบกับ x_1 จะได้

$$a_{21} = \beta\Phi \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right)$$

ทำการหาอนุพันธ์ของสมการข้างต้นเทียบกับ x_2 จะได้

$$a_{22} = \beta\Phi x_1 \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) \times \frac{1}{\left(1 + \frac{x_2}{\gamma}\right)^2} - (q + \delta)$$

ทำการหาอนุพันธ์ของสมการข้างต้นเทียบกับ u จะได้

$$b_{21} = 1$$

ค่าสมาชิกของเมทริกซ์ A, B และ C

	x_1	x_2	u
\dot{x}_1	$a_{11} = -\Phi \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) - q$	$a_{12} = -\Phi x_1 \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) \times \frac{1}{\left(1 + \frac{x_2}{\gamma}\right)^2}$	$b_{11} = 0$
\dot{x}_2	$a_{21} = \beta \Phi \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right)$	$a_{22} = \beta \Phi x_1 \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) \times \frac{1}{\left(1 + \frac{x_2}{\gamma}\right)^2} - (q + \delta)$	$b_{21} = 1$
u	$c_{11} = 0$	$c_{11} = 1$	$d_{11} = 0$

ง.2 ความควบคุมได้ (Controllability)

ในการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเวลาจะเริ่มทำการออกแบบตัวควบคุมควรทำการตรวจสอบความควบคุมได้ (controllability) ซึ่งเป็นการตรวจสอบว่าระบบที่ต้องการควบคุมนี้สามารถควบคุมได้หรือไม่โดยการปรับตัวแปรปรับที่กำหนดให้

การพิจารณาว่าเป็นระบบที่สามารถควบคุมได้หรือไม่นั้นสามารถพิจารณาได้จากค่าแรงค์ (rank) ของเมทริกซ์ของความควบคุมได้ (controllability matrix) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการ

$$\text{Controllability Matrix} = [B \quad AB \quad A^2B \dots A^{n-1}B] \quad (\text{ง.18})$$

เมื่อ n คือจำนวนตัวแปรสแตต ถ้าค่านี้เท่ากับฟูลแรงค์ (full rank) หรือขนาดของเมทริกซ์เดียวกันแล้วระบบนี้จะเป็นระบบที่สามารถควบคุมได้ด้วยตัวแปรปรับกระบวนการที่เลือกไว้

สำหรับในกรณีที่เมทริกซ์ความควบคุมได้ไม่เป็นเมทริกซ์จัตุรัสค่าแรงค์ของเมทริกซ์สามารถหาได้จากการหาค่าดีเตอมิแนนต์ (determinant) ของเมทริกซ์นั้น ถ้าค่าดีเตอมิแนนต์ไม่เท่ากับศูนย์ค่าแรงค์จะเท่ากับขนาด หรือค่าแรงค์ของเมทริกซ์สามารถหาโดยตรวจสอบว่าแต่ละแถวใด ๆ ไม่สามารถถูกแทนที่ด้วยแถวอื่นได้ซึ่งแสดงถึงว่า สมการไม่ขึ้นต่อกันดังนั้นค่าแรงค์เท่ากับขนาด

ง.3 ความสังเกตได้ (Observability)

ในการประยุกต์ใช้ระบบการควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงปริภูมิร่วมกับประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์เวลาจะเริ่มออกแบบตัวควบคุมควรทำการตรวจสอบความสังเกตได้ (observability) ซึ่งเป็นการตรวจสอบว่าเอาต์พุตที่เลือกมาจะสามารถนำไปทำนายค่าสแตตหรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วัดไม่ได้ของระบบได้หรือไม่ เนื่องจากการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์จะสามารถนำมาใช้กับระบบที่ซึ่งเอาต์พุตสามารถวัดได้และเชื่อถือได้เท่านั้น (ทั้งนี้ เอาต์พุตที่วัดค่าได้ต้องเป็นเอาต์พุตที่ทำให้ระบบที่สนใจสามารถสังเกตได้) ทำได้โดยการทำเมทริกซ์ความสังเกตได้ (observability matrix) ซึ่งอยู่ในรูปของ

$$\text{Observability Matrix} = \begin{bmatrix} C^T & A^T C^T & (A^2)^T C^T & (A^{n-1})^T C^T \end{bmatrix} \quad (\text{ง.19})$$

ถ้าสามารถตรวจสอบได้ว่าเป็นฟูลแรนค์ (full rank) หรือค่าดีเตอมิแนนต์ (determinant) หาค่าได้ไม่เท่ากับศูนย์แล้วค่าตัวแปรเอาต์พุตที่เลือกมานี้สามารถที่จะนำไปทำนายค่าสแตตและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้

ง.4 เสถียรภาพของระบบ (System Stability)

ในการตรวจสอบว่าระบบนั้น ๆ มีเสถียรภาพหรือไม่สามารถดูได้จากค่าของโพลของลูฟเปิด (open-loop pole) หรือค่าไอเก้น (eigen value) ของระบบนั้นว่าอยู่ทางซ้ายหรือทางขวาของแกนเชิงซ้อน ถ้าโพลอยู่ทางซ้ายของแกนเชิงซ้อนหรือค่าไอเก้นมีค่าเป็นลบ ก็แสดงว่า ระบบนั้น ๆ มีเสถียรภาพ แต่ถ้ามีโพลค่าใดค่าหนึ่งของระบบอยู่ทางขวาของแกนเชิงซ้อนหรือค่าไอเก้นค่าใดค่าหนึ่งเป็นบวกแสดงว่าระบบนั้น ๆ ไม่มีความเสถียร

พิจารณาระบบที่อยู่ในรูปของสมการสเตตสเปซดังสมการที่ (ง.14) ในการหาค่าโพลของระบบเริ่มต้นจากสมการ

$$\dot{x} = Ax \quad (\text{ง.20})$$

ถ้าให้คำตอบของสมการเป็น

$$x = ke^{\lambda t} \quad (\text{ง.21})$$

ทำการดิฟเฟอเรนเชียล (ง.21)

$$\dot{x} = \lambda ke^{\lambda t} \quad (\text{ง.22})$$

แทนค่าสมการ (ง.21) และ (ง.22) ใน (ง.20)

$$\lambda ke^{\lambda t} = Ake^{\lambda t} \quad (\text{ง.23})$$

จะได้ว่า

$$\lambda x = Ax \quad (\text{ง.24})$$

$$(\lambda I - A)x = 0 \quad (\text{ง.25})$$

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad (\text{เมื่อ } x \neq 0) \quad (\text{ง.26})$$

ดังนั้นค่า λ ที่ได้คือค่าของโพลของลูฟเปิดหรือค่าไอเก้นของระบบที่ทำการควบคุม

ตัวอย่าง การตรวจสอบความควบคุมได้, ความสังเกตได้ และเสถียรภาพของระบบ

จากระบบ
$$\frac{d^2 y}{dt^2} + a_2 \frac{dy}{dt} + a_1 y = u(t)$$

สามารถจัดให้อยู่ในรูป

$$\frac{dx}{dt} = AX + BU \quad (1)$$

$$Y = CX + DU \quad (2)$$

กำหนดให้ $x_1(t) = y(t)$

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = \frac{dy(t)}{dt} = x_2(t)$$

State Equations

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -a_1 x_1 - a_2 x_2 + u(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0] \quad D = [0] \quad (\text{วัดค่าตัวแปรขาออก } x_1)$$

ตรวจสอบความควบคุมได้ (controllability)

$$\text{Controllability Matrix} = [B \quad AB]$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -a_2 \end{bmatrix}$$

$$\det[B \quad AB] = -1 \neq 0 \quad \text{RANK} = 2$$

นั่นคือสามารถควบคุมได้

ตรวจสอบความสังเกตได้ (observability)

$$\begin{aligned} \text{Observability Matrix} &= \begin{bmatrix} C^T & A^T C^T \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\det[C^T \quad A^T C^T] = 1 \neq 0 \quad \text{RANK} = 2$$

นั่นคือสามารถวัดค่าเอาต์พุตที่วัดได้นำไปใช้ในการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ และ/หรือ พารามิเตอร์อื่น ๆ ได้

ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ (system stability)

พิจารณาว่าระบบที่กำลังศึกษาอยู่มีเสถียรภาพหรือไม่สามารถพิจารณาจากค่า pole ของระบบ โดยเริ่มแรกต้องทำสมการในรูปแบบ state space ให้อยู่ในรูปแบบ transfer function แล้วจึงทำการหาค่า pole

Take Laplace transform สมการ (1) และ (2) ได้

$$SX(S) = AX(S) + BU(S)$$

$$Y(S) = CX(S) + DU(S)$$

$$X(S) = (SI - A)^{-1} BU(S)$$

$$\therefore Y(S) = [C(SI - A)^{-1} B + D]U(S)$$

$$\frac{Y(S)}{U(S)} = G(S) = [C(SI - A)^{-1} B + D]$$

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -2 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -25 & 25 \end{bmatrix} \quad D = [0]$$

$$[SI - A] = \begin{bmatrix} S+1 & 0 \\ 0 & S+2 \end{bmatrix}$$

$$G(S) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S+1 & 0 \\ 0 & S+2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -25 & 25 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{(S+1)(S+2)} \begin{bmatrix} S+2 & 0 \\ 0 & S+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -25 & 25 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 G(s) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/(s+1) & 0 \\ 0 & 1/(s+2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -25 & 25 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1/(s+1) & 0 \\ 0 & 1/(s+2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -25 & 25 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1/(s+1) & 1/(s+1) \\ -25/(s+2) & 25/(s+2) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

pole = -1, -2 เพราะฉะนั้นระบบมีเสถียรภาพ

หา $G(s)$ เพื่อดูว่า เมื่อตัวแปรปรับมีการเปลี่ยนแปลงแล้วตัวแปรควบคุมมีเสถียรภาพหรือไม่

จากนั้นตรวจสอบว่าตัวแปรปรับมีเสถียรภาพหรือไม่ เมื่อต้องการควบคุมตัวแปรควบคุมเพื่อให้อยู่ค่าเซตพอยต์ที่กำหนด โดยดูจาก poles ของ $G^{-1}(s)$ หรือ ZEROS ของ $G(s)$

$$G^{-1}(s) = \frac{1}{\det G(s)} \text{adj}[G(s)] \quad \text{ซึ่ง} \quad \det G(s) = \frac{50}{(s+1)(s+2)}$$

ตัวแปรปรับมีเสถียรภาพ เพราะไม่มีค่า Zero

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างโค้ดโปรแกรม

ในบทนี้กล่าวถึงตัวอย่างการเขียนโปรแกรมเมตแดบของระบบควบคุมด้วยแบบจำลอง
เจเนริกร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบไม่ผันกลับ

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Openloop all case
```

```
%Case study I (strong parametric sensitivity)
```

```
%Control when disturbance's step change
```

```
%Performance & robustness start gmc control at time=60
```

```
%Control when setpoint's step change
```

```
%Performance & robustness start gmc control at time=0
```

```
%Case study II (multiple steady state)
```

```
%Control when disturbance's step change
```

```
%Performance start gmc control at time=60
```

```
%Performance & robustness start gmc control at time=0
```

```
%Control when setpoint's step change
```

```
%Performance & robustness start gmc control at time=0
```

```
%Case study III (nonlinear oscillation)
```

```
%Control when disturbance's step change
```

```
%Performance start gmc control at time=60
```

```
%Performance & robustness start gmc control at time=0
```

```
%Control when setpoint's step change
```

```
%Performance & robustness start gmc control at time=0
```

```

%Choose disturbance or setpoint step change
%a=0 refer disturbance step change
%a=1 refer setpoint step change
a=0;

%Simulation Time
dt=0.1;           %sampling time
t0=0;            %time at start of simulation
f_time=100;      %final time of simulation
step=ceil((f_time-t0)/dt)+1; %no. of step of simulation
time=linspace(t0,f_time,step); %time of simulation

%Plant Parameters
fi=0.072;        %rate of reaction
beta=8;          %heat of reaction
delta=0.3;       %heat transfer coefficient
q=1;             %flow rate of feed
gamma=20;        %activation energy
x10(1)=1;        %initial conc.
x20(1)=2;        %initial temp.

if a==0
    %Tf Disturbance Time
    t=40; td=t-t0;
    delTf=0;10; %temp. differ from normal temp.
    Tf0=300; %normal feed temp.
    Tf1=ones(1,ceil(td/dt))*Tf0;
    Tf2=ones(1,ceil(step-td/dt))*(Tf0+delTf);
    Tf=[Tf1 Tf2];
    v0=q*gamma*(Tf/Tf0-1); %disturbance value

```

```

%Define Setpoint
sp=ones(1,step)*1.978;

%Start GMC Control at time
t1=0;
tg=ceil((t1-t0)/dt);

elseif a==1
%Initial Disturbance Value
v0=zeros(1,step);

%Setpoint Change at Time
t=40; ts=t-t0;
t1=60;ts1=t1-t0;
sp1=ones(1,ceil(ts/dt))*1.9780; %first setpoint at time<40 min.
sp2=ones(1,ceil((ts1-ts)/dt))*1.3*1.9780; %second setpoint at 40<time<60
sp3=ones(1,ceil(step-ts1/dt))*0.7*1.9780; %third setpoint at 60<time<100
sp=[sp1 sp2 sp3]; %setpoint value
sp=sp(1,(1:step));

%Start GMC Control at time
t2=0;
tg=ceil((t2-t0)/dt);

else
fprintf('Please choose correct a')
pause
end

%Initial Manipulation Value
u0=2;zeros(1,step);

```

```

%Initial Parameter of GMC
t=2.0;          %setpoint time of pid control
damp=10;       %damppling ratio
tal=t/0.25;    %time constant
K1=2*damp/tal;
K2=1/(tal^2);

%Initial Parameters of Kalman Filter beta; fi; delta;
x1(tg+1)=1;x2(tg+1)=2;x3(tg+1)=1.3*8;x4(tg+1)=0.072;x5(tg+1)=0.3;
                %initial state variable
P=[x1(tg+1)/10000 x2(tg+1)/10000 x3(tg+1)/10000 x4(tg+1)/10000 x5(tg+1)/10000];
P=diag(P);      %initial error covariance matrix
Q=[0.01 0.01 x3(tg+1)/1000 x4(tg+1)/1000 x5(tg+1)/1000];
Q=diag(Q);      %initial covariance matrix of system error
R=1;            %covariance matrix of measurement error

%Plant Equation
%f1=-fi*x1*exp(x2/(1+x2/gamma))+q*(1-x1)          %f1=dx1/dt
%f2=beta*fi*x1*exp(x2/(1+x2/gamma))-(q+delta)*x2+u+v %f2=dx2/dt

%Runge-Kutta
sum=0;
for i=1:step
    k1=(-fi*x10(i)*exp(x20(i)/(1+x20(i)/gamma))+q*(1-x10(i)))*dt;
    l1=(beta*fi*x10(i)*exp(x20(i)/(1+x20(i)/gamma))-(q+delta)*x20(i)+u0(i)+v0(i))*dt;
    k2=(-fi*(x10(i)+k1/2)*exp((x20(i)+l1/2)/(1+(x20(i)+l1/2)/gamma))
        +q*(1-(x10(i)+k1/2)))*dt;
    l2=(beta*fi*(x10(i)+k1/2)*exp((x20(i)+l1/2)/(1+(x20(i)+l1/2)/gamma))
        -(q+delta)*(x20(i)+l1/2)+u0(i)+v0(i))*dt;
    k3=(-fi*(x10(i)+k2/2)*exp((x20(i)+l2/2)/(1+(x20(i)+l2/2)/gamma))
        +q*(1-(x10(i)+k2/2)))*dt;

```



```

I3=(beta*fi*(x10(i)+k2/2)*exp((x20(i)+I2/2)/(1+(x20(i)+I2/2)/gamma))
    -(q+delta)*(x20(i)+I2/2)+u0(i)+v0(i))*dt;
k4=(-fi*(x10(i)+k3)*exp((x20(i)+I3)/(1+(x20(i)+I3)/gamma))+q*(1-(x10(i)+k3)))*dt;
I4=(beta*fi*(x10(i)+k3)*exp((x20(i)+I3)/(1+(x20(i)+I3)/gamma))
    -(q+delta)*(x20(i)+I3)+u0(i)+v0(i))*dt;
x10(i+1)=x10(i)+(k1+2*k2+2*k3+k4)/6;
x20(i+1)=x20(i)+(I1+2*I2+2*I3+I4)/6;

```

```

% GMC control
if i<=tg
    u0(i)=2;0; %openloop at time < 60 min.
else %gmc control at time 60 min.
%Evaluate Coefficient Matrix of Linearization of State Space Equation
    %dx/dt=A*x+B*u
    a1=1+x2(i)/gamma;
    a11=-x4(i)*exp(x2(i)/a1)-q; %wrt x1
    a12=-x4(i)*x1(i)*exp(x2(i)/a1)/(a1^2); %wrt x2
    a13=0; %wrt beta
    a14=-x1(i)*exp(x2(i)/a1); %wrt fi
    a15=0; %wrt delta
    a21=x4(i)*x3(i)*exp(x2(i)/a1);
    a22=x4(i)*x3(i)*x1(i)*exp(x2(i)/a1)/(a1^2)-(q+x5(i));
    a23=x4(i)*x1(i)*exp(x2(i)/a1);
    a24=x3(i)*x1(i)*exp(x2(i)/a1);
    a25=-x2(i);
    a31=0;a32=0;a33=0;a34=0;a35=0;
    a41=0;a42=0;a43=0;a44=0;a45=0;
    a51=0;a52=0;a53=0;a54=0;a55=0;

%State Space Model
A=[a11 a12 0 a14 0

```

```

a21 a22 a23 a24 a25
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0];
B=[0;1;0;0;0];
C=[0 1 0 0 0];

%Discrete Form          %x(k)=AA(k-1)*x(k-1)+BB(k-1)*u(k-1)+Q
%Compute Transition Matrix      %y(k)=CC(k)*x(k)+R
I=eye(5);                %unit matrix
AA=I+A*dt;                %state transition matrix
BB=B*dt;                  %input transition matrix
CC=C;                     %known mapping matrix

kk1=(-x4(i)*x1(i)*exp(x2(i)/(1+x2(i)/gamma))+q*(1-x1(i)))*dt;
ll1=(x3(i)*x4(i)*x1(i)*exp(x2(i)/(1+x2(i)/gamma))-(q+x5(i))*x2(i)+u0(i)+v0(i))*dt;
kk2=(-x4(i)*(x1(i)+kk1/2)*exp((x2(i)+ll1/2)/(1+(x2(i)+ll1/2)/gamma))
+q*(1-(x1(i)+kk1/2)))*dt;
ll2=(x3(i)*x4(i)*(x1(i)+kk1/2)*exp((x2(i)+ll1/2)/(1+(x2(i)+ll1/2)/gamma))
-(q+x5(i))*(x2(i)+ll1/2)+u0(i)+v0(i))*dt;
kk3=(-x4(i)*(x1(i)+kk2/2)*exp((x2(i)+ll2/2)/(1+(x2(i)+ll2/2)/gamma))
+q*(1-(x1(i)+kk2/2)))*dt;
ll3=(x3(i)*x4(i)*(x1(i)+kk2/2)*exp((x2(i)+ll2/2)/(1+(x2(i)+ll2/2)/gamma))
-(q+x5(i))*(x2(i)+ll2/2)+u0(i)+v0(i))*dt;
kk4=(-x4(i)*(x1(i)+kk3)*exp((x2(i)+ll3)/(1+(x2(i)+ll3)/gamma))+q*(1-(x1(i)+kk3)))*dt;
ll4=(x3(i)*x4(i)*(x1(i)+kk3)*exp((x2(i)+ll3)/(1+(x2(i)+ll3)/gamma))
-(q+x5(i))*(x2(i)+ll3)+u0(i)+v0(i))*dt;
x1(i+1)=x1(i)+(kk1+2*kk2+2*kk3+kk4)/6;
x2(i+1)=x2(i)+(ll1+2*ll2+2*ll3+ll4)/6;

%Compute State Prediction
%x=AA*x+BB*u0(i);

```

```

x=[x1(i+1);x2(i+1);x3(i);x4(i);x5(i)];

%Compute System Covariance Prediction
P=AA*P*AA'+Q;

%Compute Kalman Gain
K=P*CC'*inv(CC*P*CC'+R);

%Update State Correction
x=x+K*(x20(i)-CC*x);
X(i)=x(2,1);

%Update Covariance Correction
P=(I-K*CC)*P*(I-K*CC)'+K*R*K';

%Compute Input Controller
err(i)=sp(i)-x(2,1);
err1=K2*err(i)*dt;
sum=err1+sum;

u0(i)=K1*err(i)+sum-x(3,1)*x(4,1)*x(1,1)*exp(x(2,1)/(1+x(2,1)/gamma))
      +(q+x(5,1))*x(2,1)-v0(i);

%bound of input
if u0(i)>2
    u0(i)=2;
elseif u0(i)<-2
    u0(i)=-2;
else
end
x1(i+1)=x(1,1);

```

```

x2(i+1)=x(2,1);
x3(i+1)=x(3,1);
x4(i+1)=x(4,1);
x5(i+1)=x(5,1);

end

u0(i+1)=u0(i);

end

%Calculate IAE
IAE0=0;           %Initial IAE
for i=1:step
    e=abs(sp(i)-x20(i));
    IAE=IAE0+e*dt;
    IAE0=IAE;
end
u0=u0(1,(1:step));
x20=x20(1,(1:step));
subplot(211),plot(time,x20,time,sp,'--');
subplot(212),plot(time,u0);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

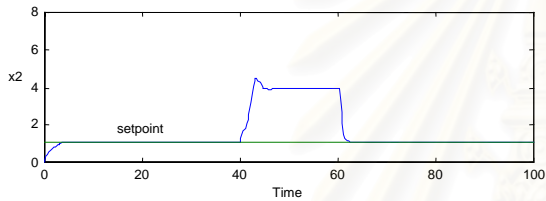
ภาคผนวก จ

กราฟแสดงผลการทดลอง

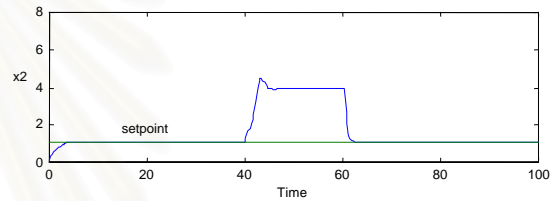
เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้

1. กรณีศึกษาที่ 1 ระบบมีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์อย่างมาก

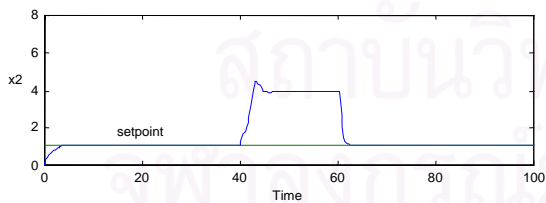
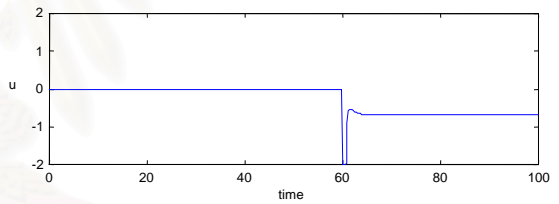
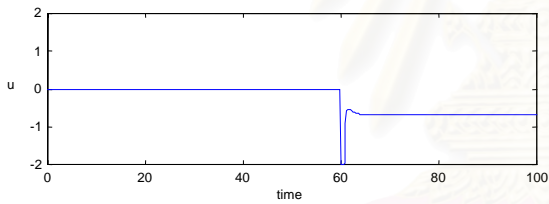
1.1 การควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดและมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (GMC)



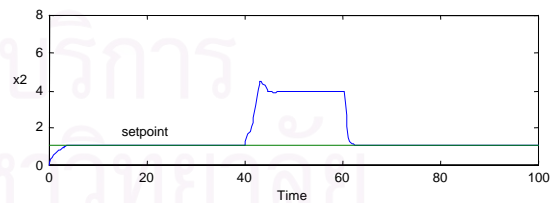
รูปที่ จ.1 β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



รูปที่ จ.2 ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

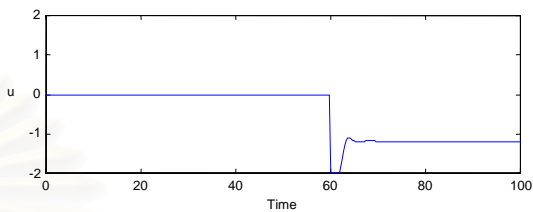
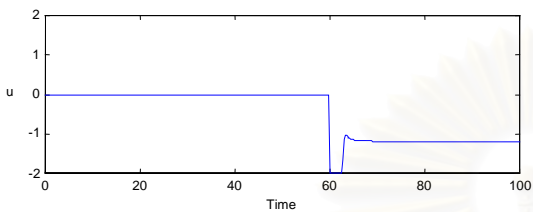
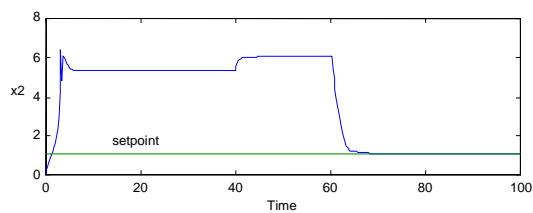
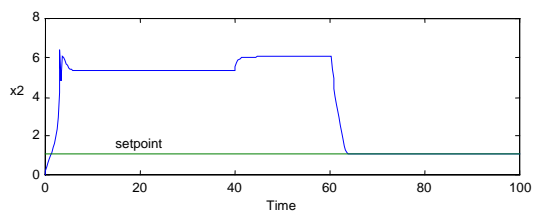


รูปที่ จ.3 δ ลดลงร้อยละ 30



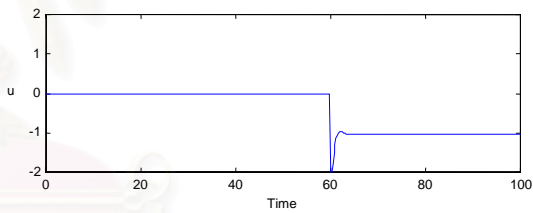
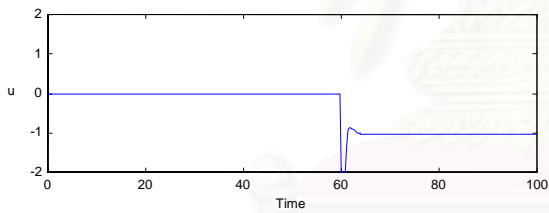
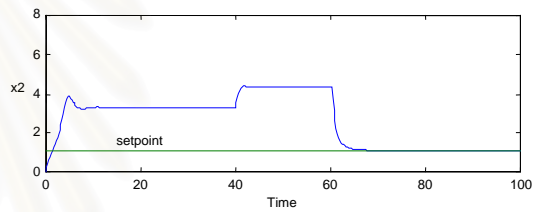
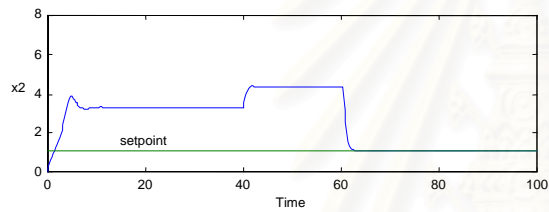
รูปที่ จ.4 ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

1.2 การควบคุมเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดและมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการ (GMC กับ PID)



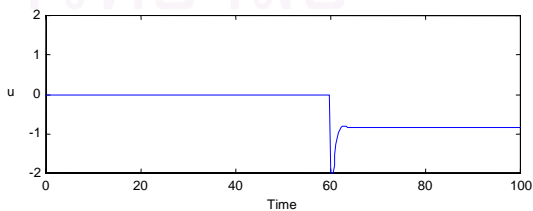
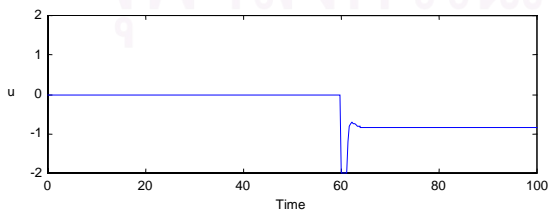
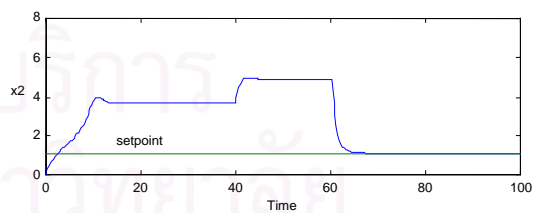
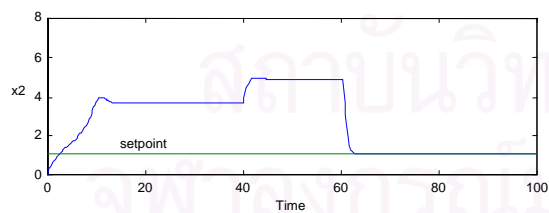
รูปที่ ๕.5 β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

รูปที่ ๕.6 β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



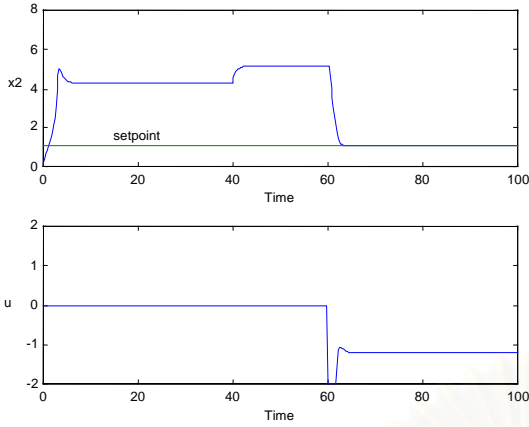
รูปที่ ๕.7 ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

รูปที่ ๕.8 ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

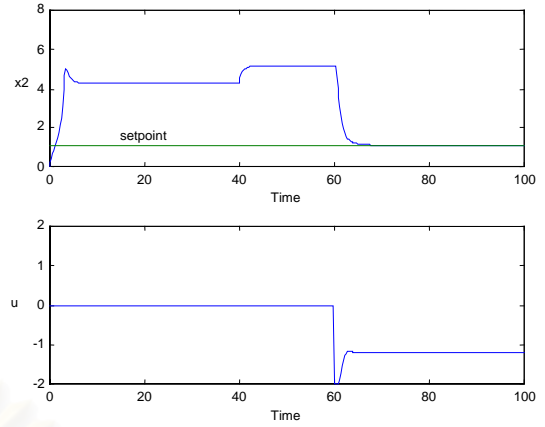


รูปที่ ๕.9 δ ลดลงร้อยละ 30

รูปที่ ๕.10 δ ลดลงร้อยละ 30

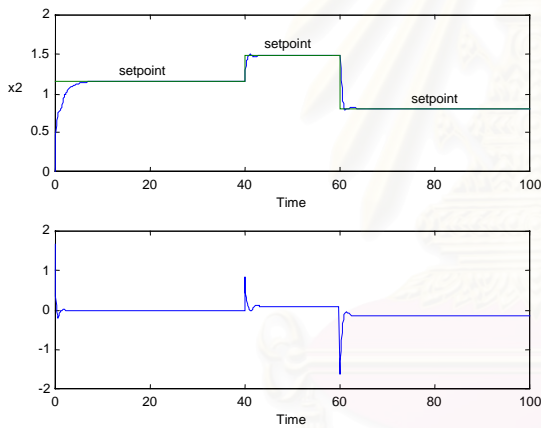


รูปที่ ๑.11 ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

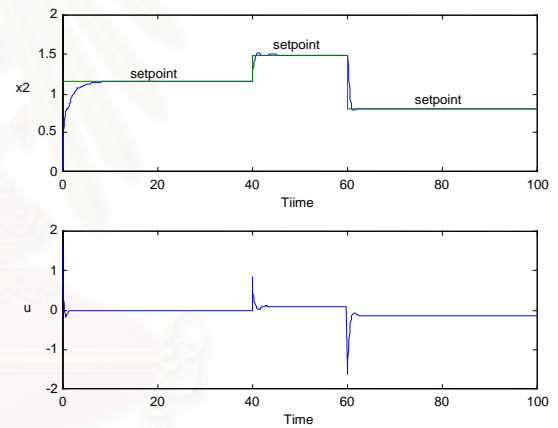


รูปที่ ๑.12 ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

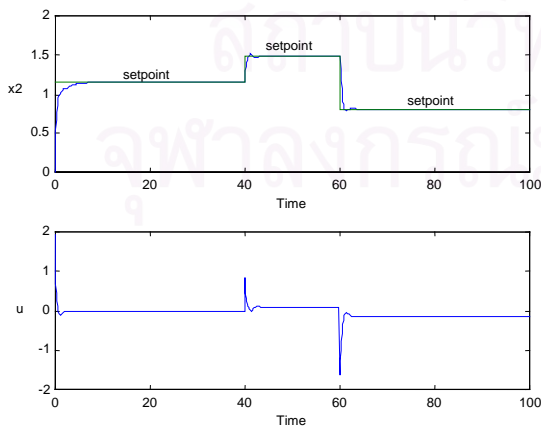
1.3 การควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดและมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (GMC)



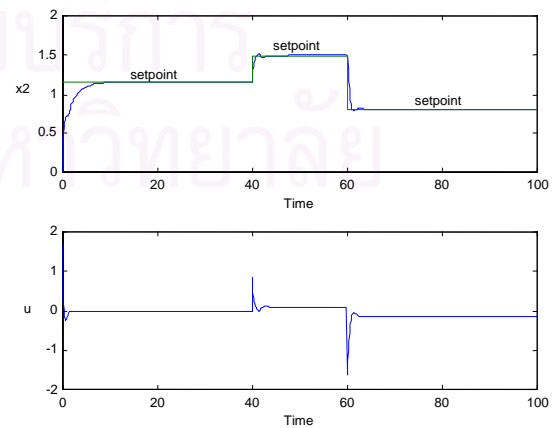
รูปที่ ๑.13 β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



รูปที่ ๑.14 ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

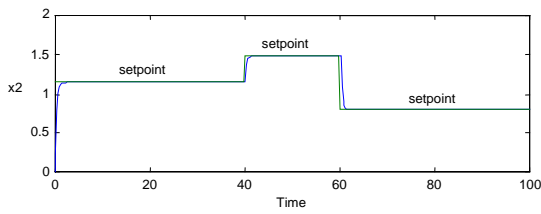


รูปที่ ๑.15 δ ลดลงร้อยละ 30

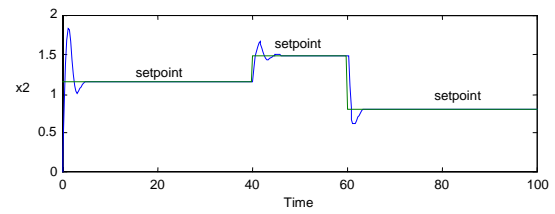


รูปที่ ๑.16 ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

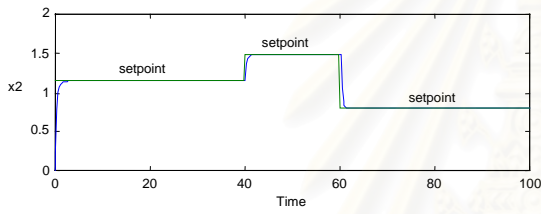
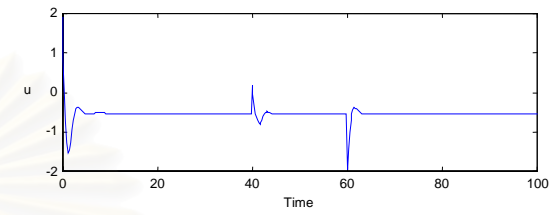
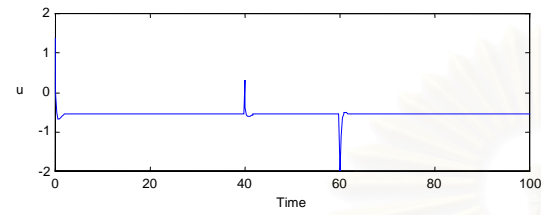
1.4 การควบคุมคุณภาพเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดและมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ (GMC กับ PID)



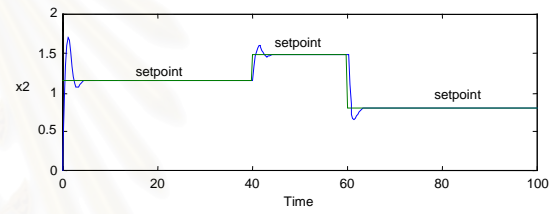
รูปที่ ๑.17 β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



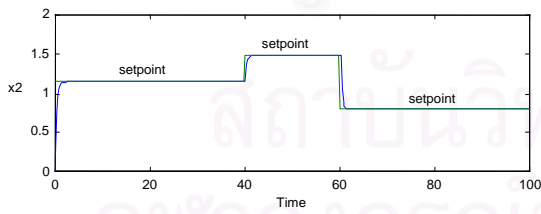
รูปที่ ๑.18 β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



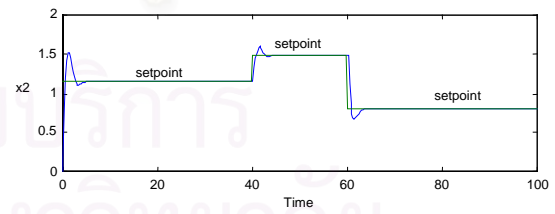
รูปที่ ๑.19 ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



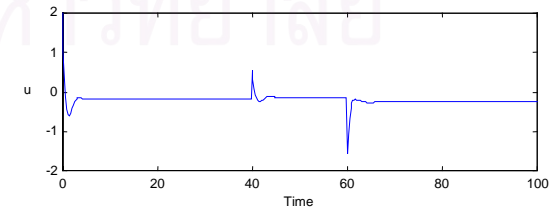
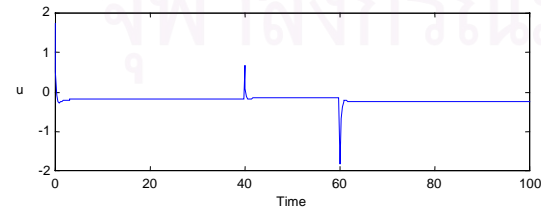
รูปที่ ๑.20 ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

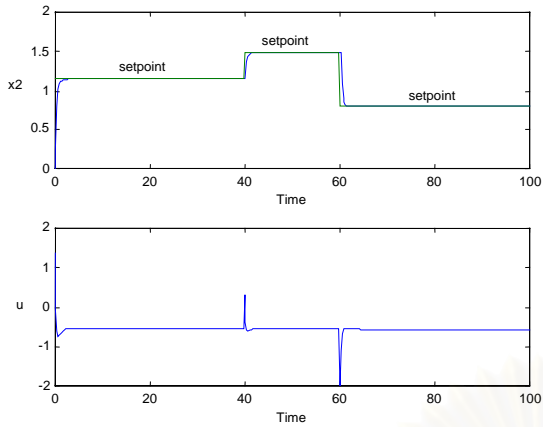


รูปที่ ๑.21 δ ลดลงร้อยละ 30

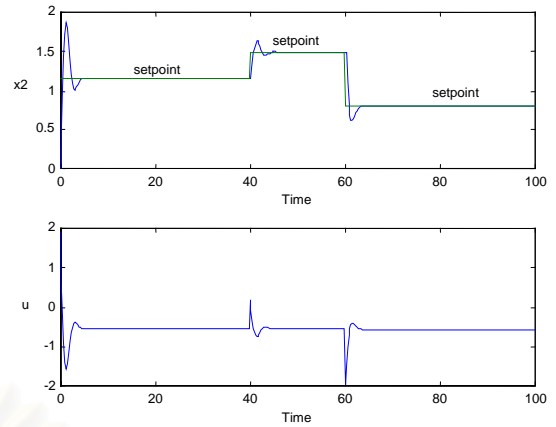


รูปที่ ๑.22 δ ลดลงร้อยละ 30





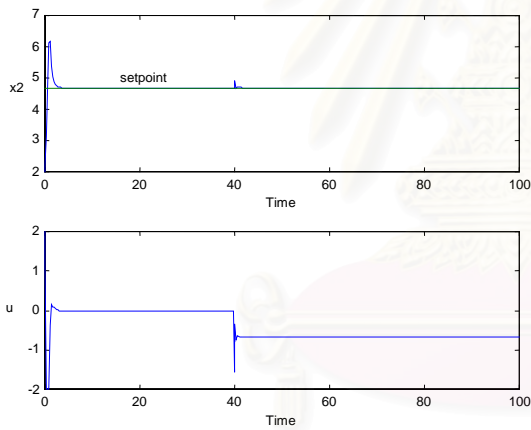
รูปที่ ๒.๒๓ ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30



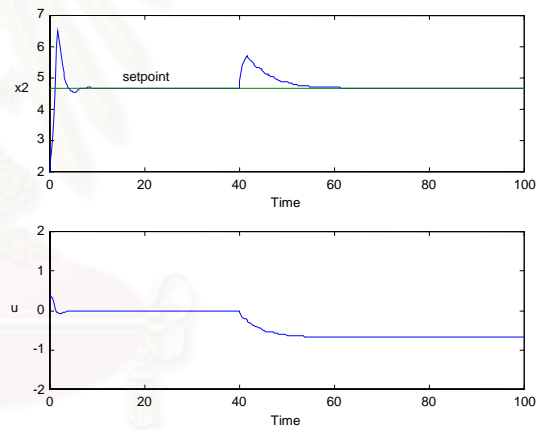
รูปที่ ๒.๒๔ ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

2. กรณีศึกษาที่ 2 ระบบมีหลายภาวะคงตัวและมีภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพ

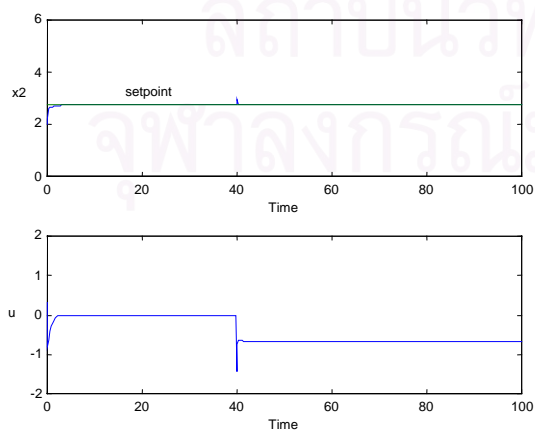
2.1 การควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่เวลา $\tau = 0$



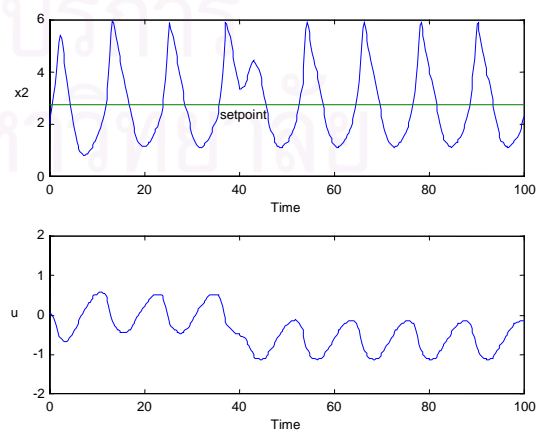
รูปที่ ๒.๒๕ GMC ภาวะคงตัวบน



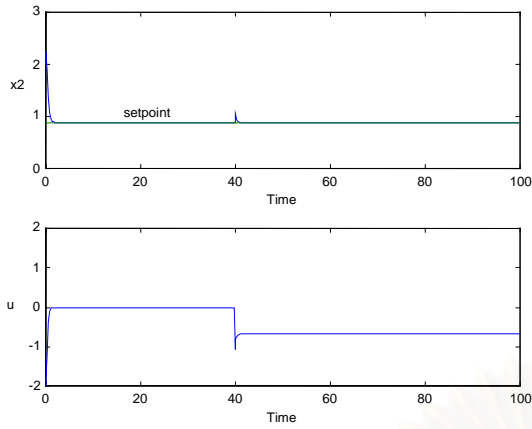
รูปที่ ๒.๒๖ PID ภาวะคงตัวบน



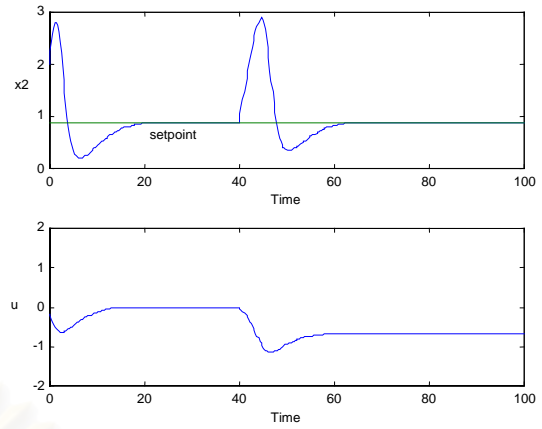
รูปที่ ๒.๒๗ GMC ภาวะคงตัวกลาง



รูปที่ ๒.๒๘ PID ภาวะคงตัวกลาง

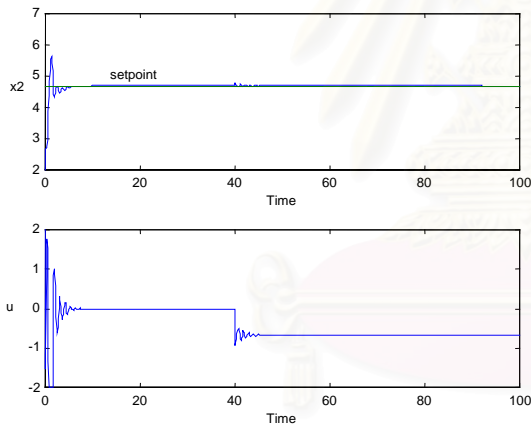


รูปที่ ๓.29 GMC ภาวะคงตัวล่าง

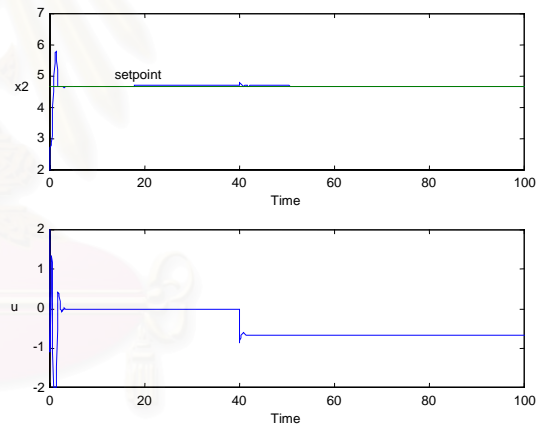


รูปที่ ๓.30 PID ภาวะคงตัวล่าง

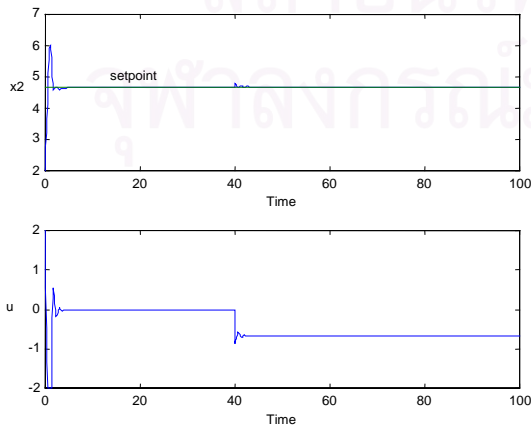
2.2 การควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดและมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (GMC)
 ก. การควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$



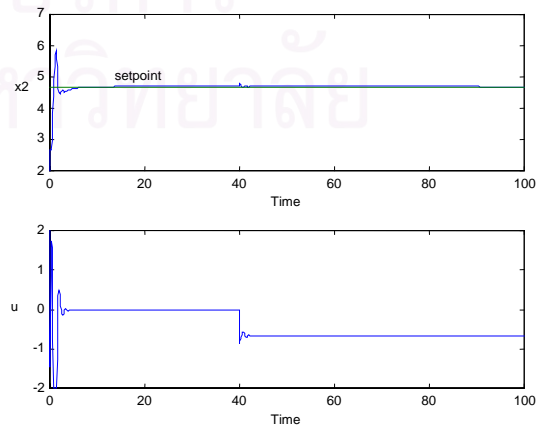
รูปที่ ๓.31 β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



รูปที่ ๓.32 ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

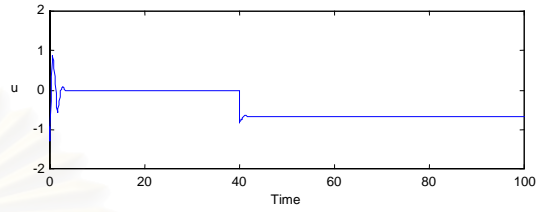
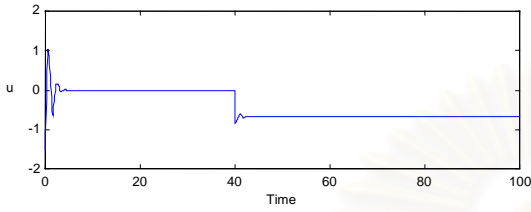
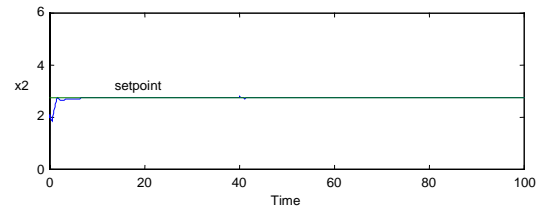
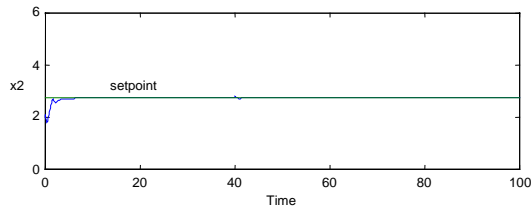


รูปที่ ๓.33 δ ลดลงร้อยละ 30



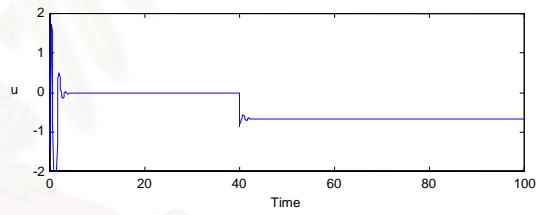
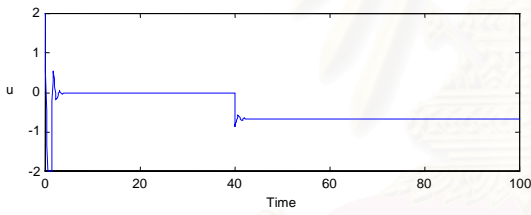
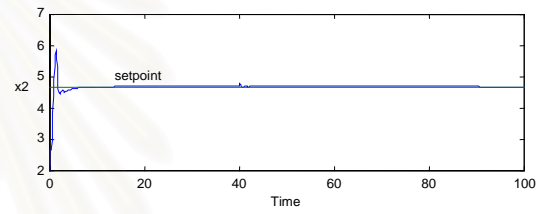
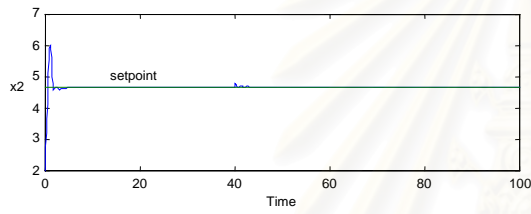
รูปที่ ๓.34 ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

ข. การควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 2.7517$



รูปที่ ๓.35 β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

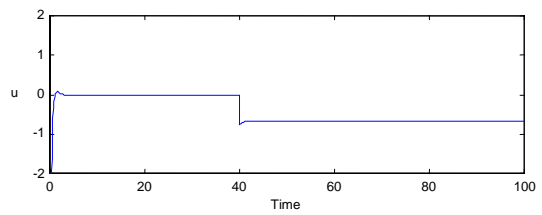
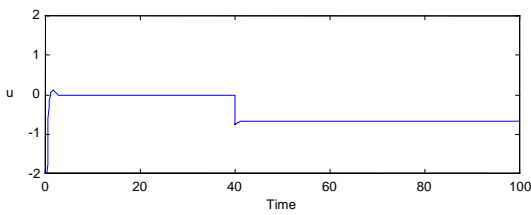
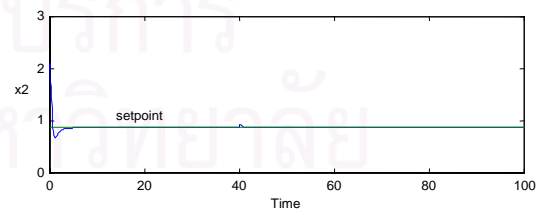
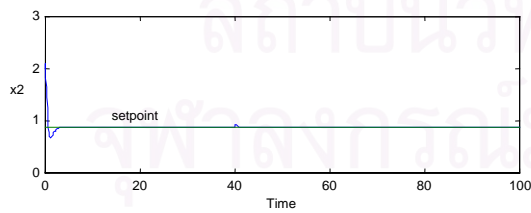
รูปที่ ๓.36 ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



รูปที่ ๓.37 δ ลดลงร้อยละ 30

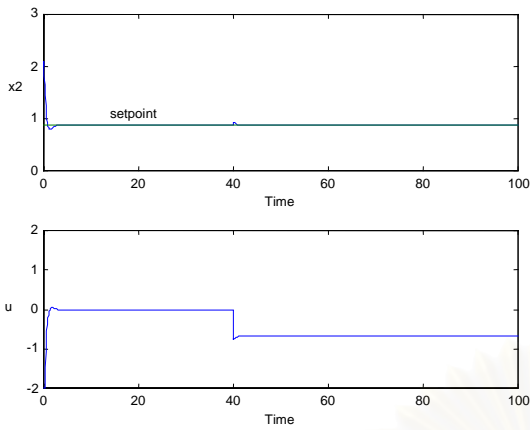
รูปที่ ๓.38 ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

ค. การควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$

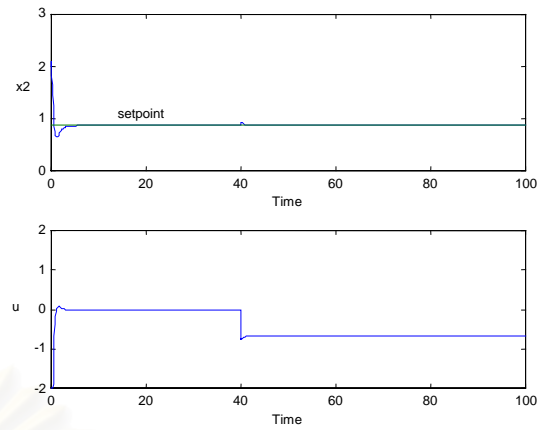


รูปที่ ๓.39 β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

รูปที่ ๓.40 ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



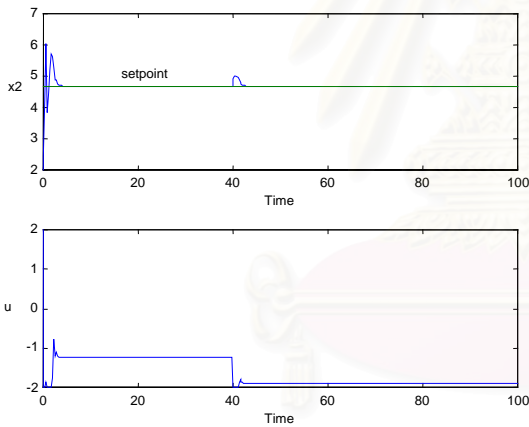
รูปที่ ๔.๑1 δ ลดลงร้อยละ 30



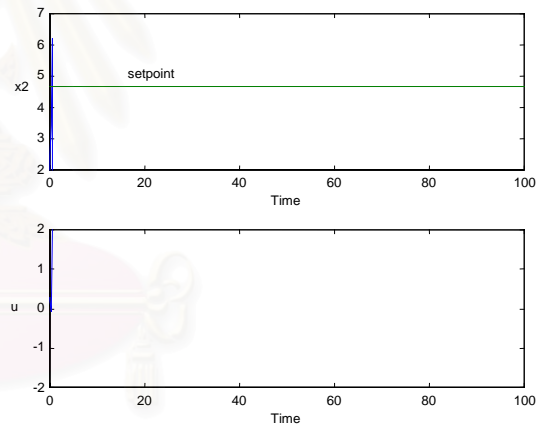
รูปที่ ๔.๑๒ ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

2.3 การควบคุมคุณภูมิเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดและมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการ (GMC กับ PID)

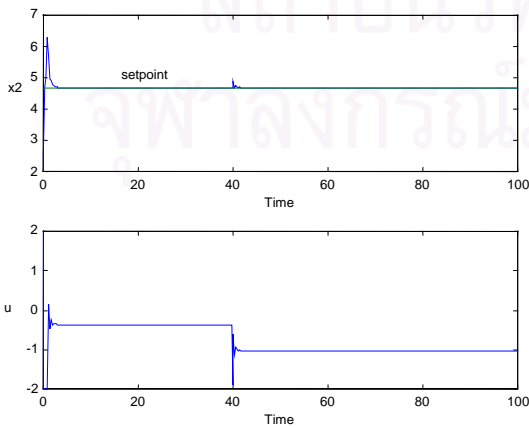
ก. การควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 4.7050$



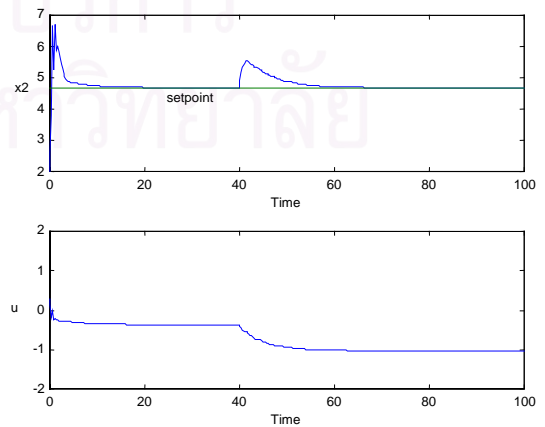
รูปที่ ๔.๑๓ β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



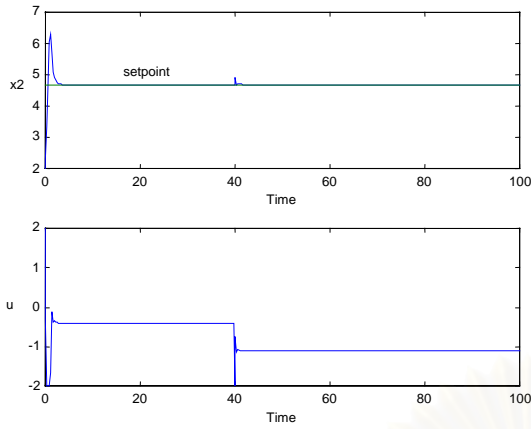
รูปที่ ๔.๑๔ β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



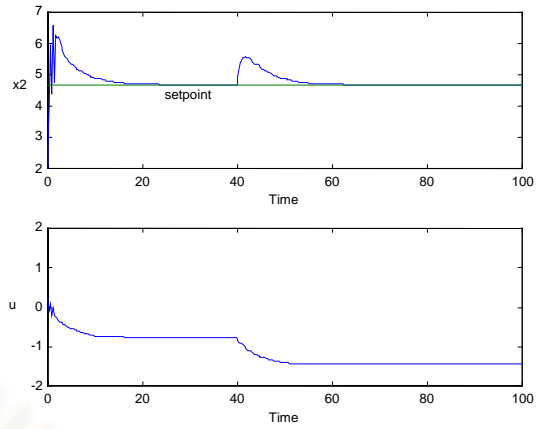
รูปที่ ๔.๑๕ ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



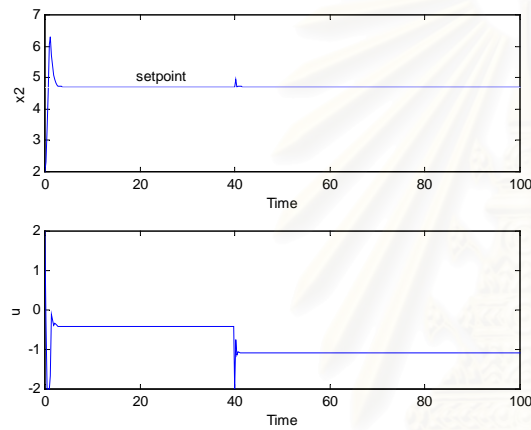
รูปที่ ๔.๑๖ ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



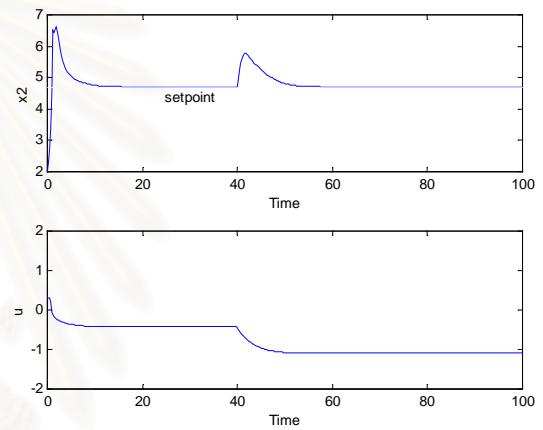
รูปที่ ๔.๔๗ δ ลดลงร้อยละ 30



รูปที่ ๔.๔๘ δ ลดลงร้อยละ 30

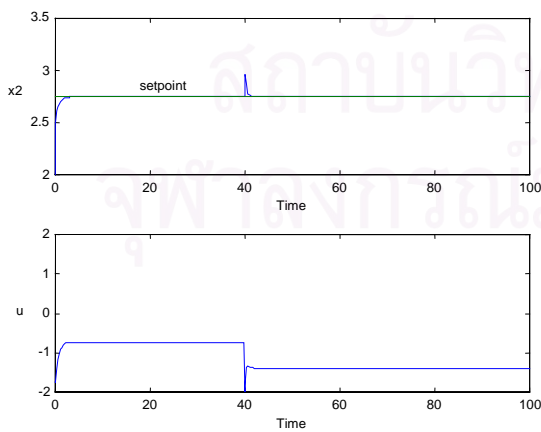


รูปที่ ๔.๔๙ ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

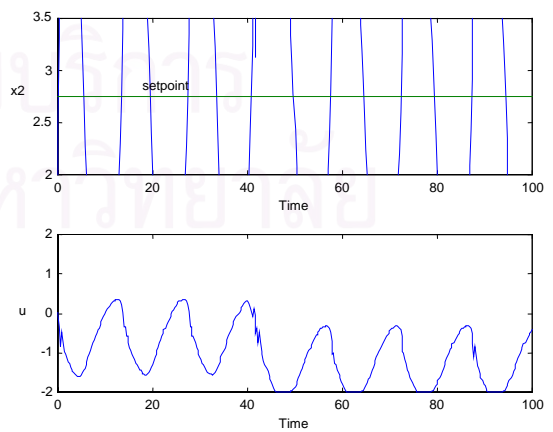


รูปที่ ๔.๕๐ ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

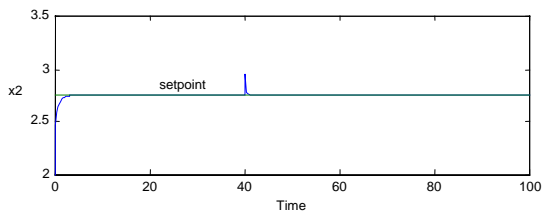
ข. การควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 2.7517$



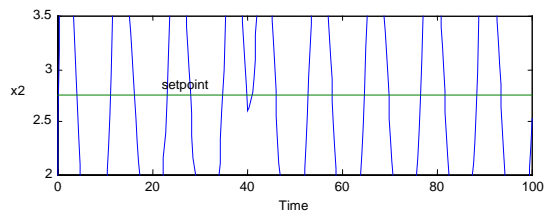
รูปที่ ๔.๕๑ β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



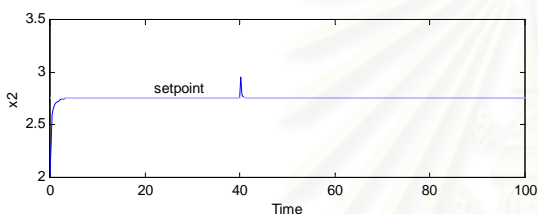
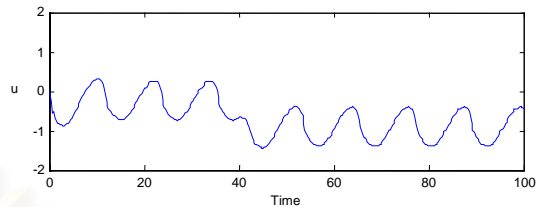
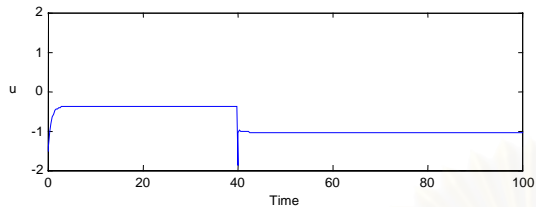
รูปที่ ๔.๕๒ β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



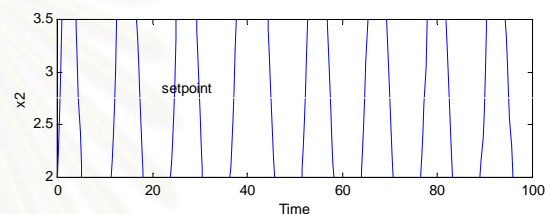
รูปที่ ๕.53 ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



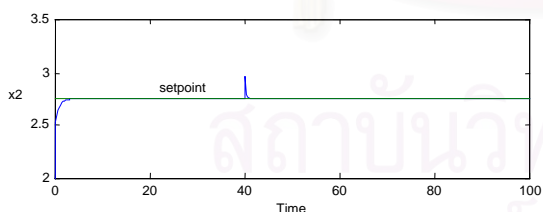
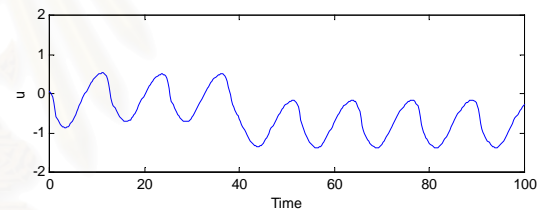
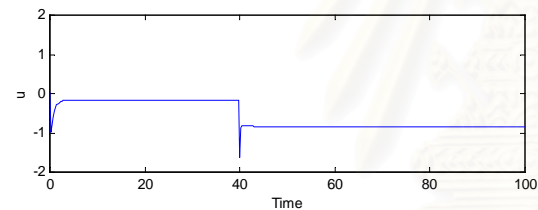
รูปที่ ๕.54 ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



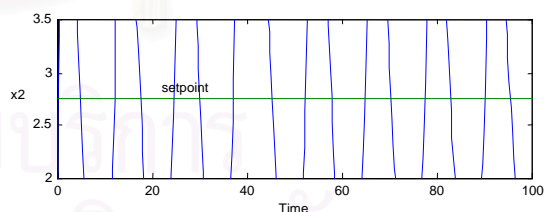
รูปที่ ๕.55 δ ลดลงร้อยละ 30



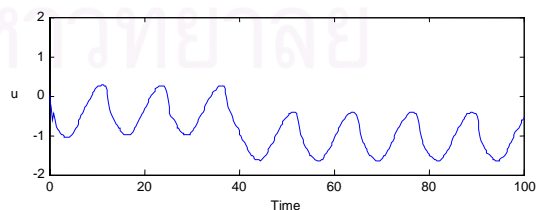
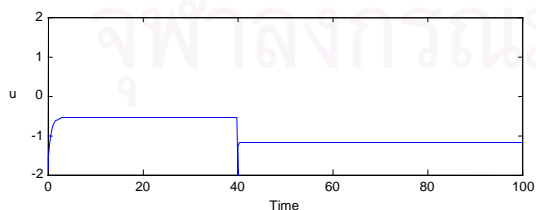
รูปที่ ๕.56 δ ลดลงร้อยละ 30



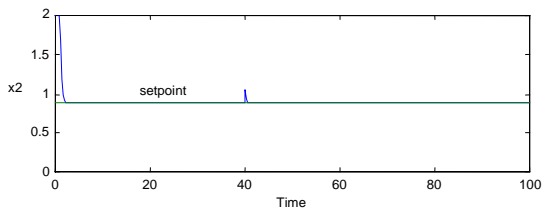
รูปที่ ๕.57 ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30



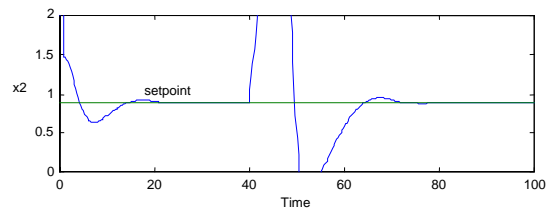
รูปที่ ๕.58 ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30



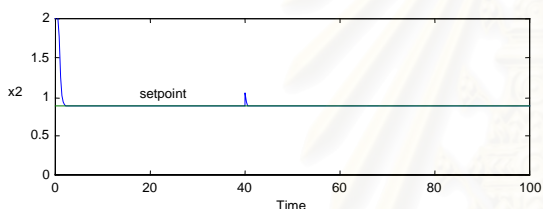
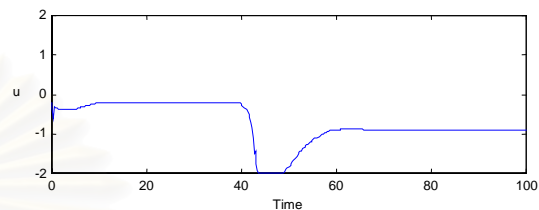
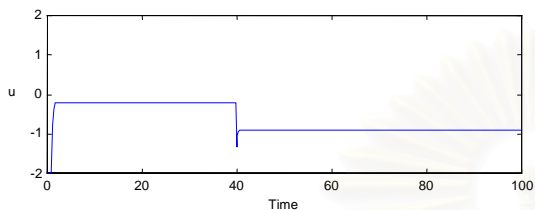
ค. การควบคุมที่ค่าเป้าหมาย $x_2 = 0.8860$



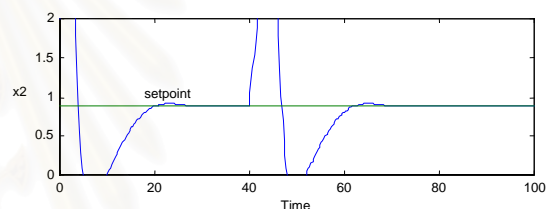
รูปที่ ค.59 β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



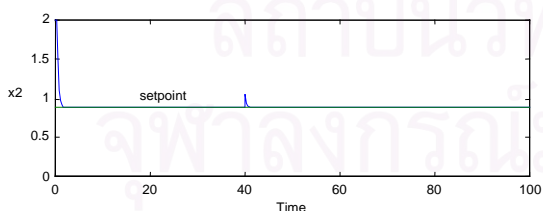
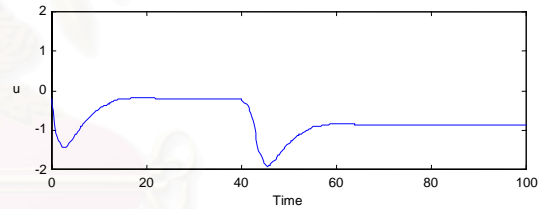
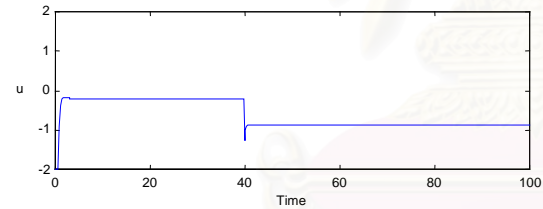
รูปที่ ค.60 β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



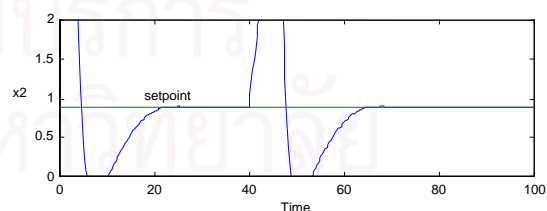
รูปที่ ค.61 ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



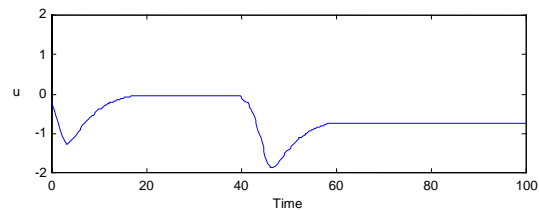
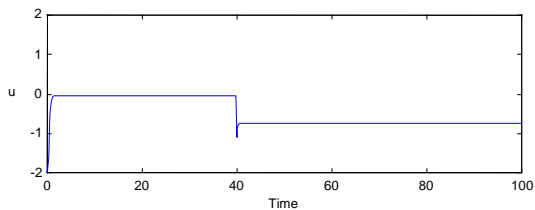
รูปที่ ค.62 ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

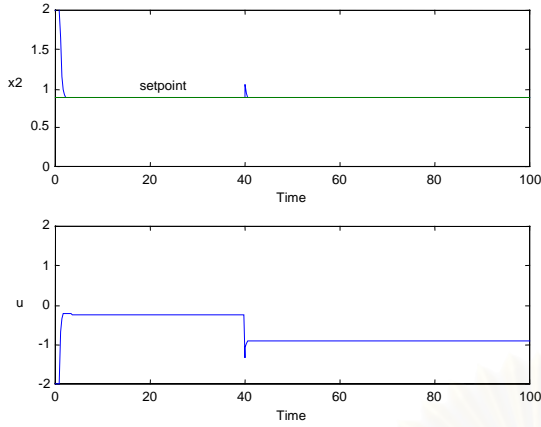


รูปที่ ค.63 δ ลดลงร้อยละ 30

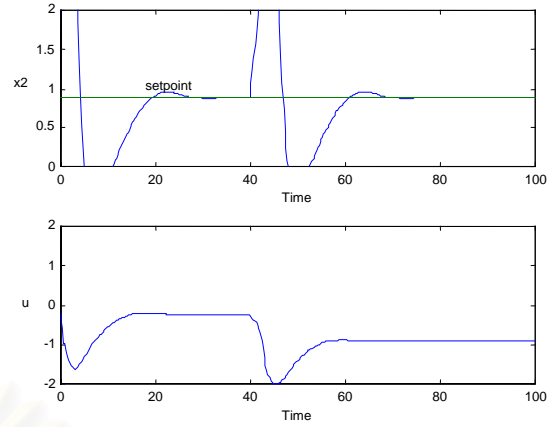


รูปที่ ค.64 δ ลดลงร้อยละ 30



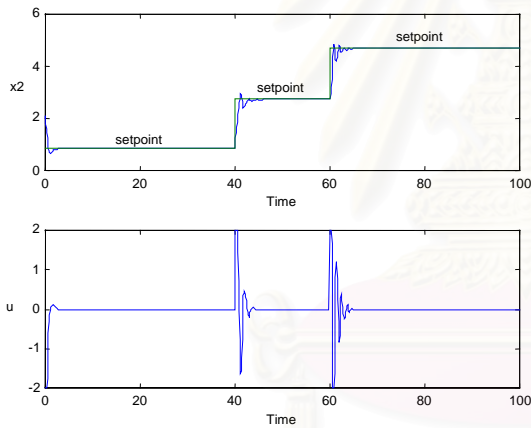


รูปที่ ๖.๖๕ ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

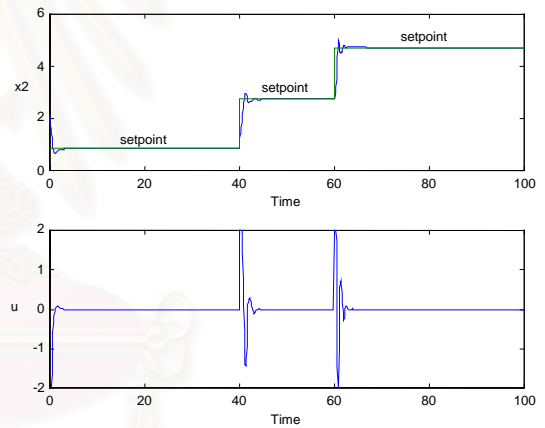


รูปที่ ๖.๖๖ ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

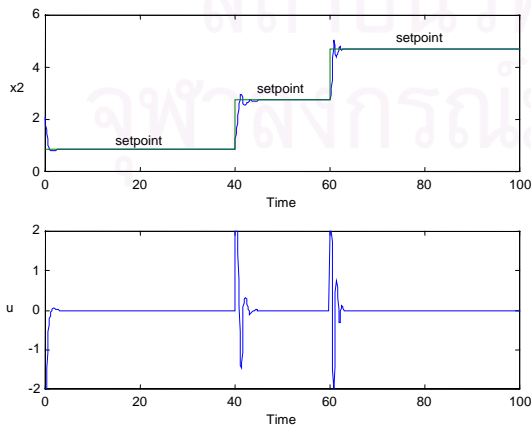
2.4 การควบคุมคุณภาพเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดและมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (GMC)



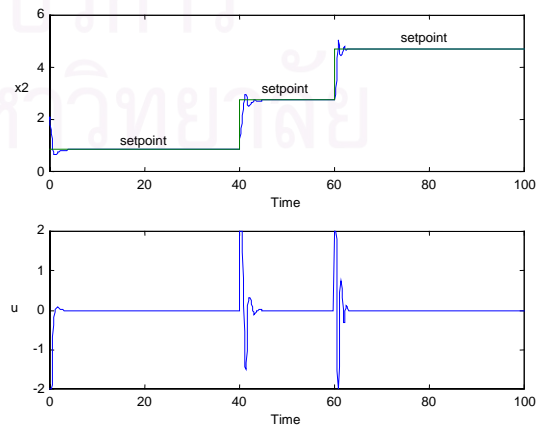
รูปที่ ๖.๖๗ β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



รูปที่ ๖.๖๘ ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

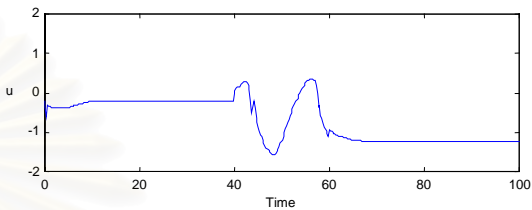
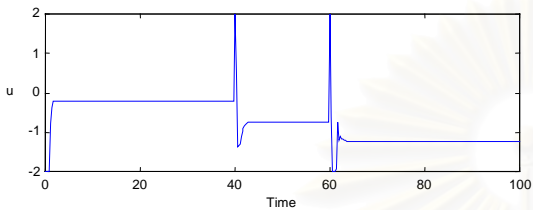
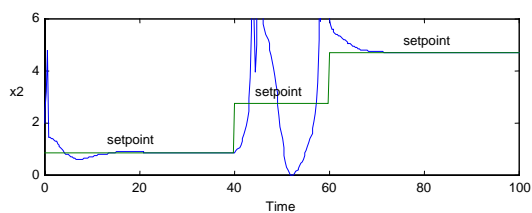
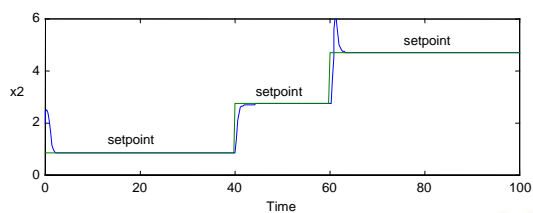


รูปที่ ๖.๖๙ δ ลดลงร้อยละ 30



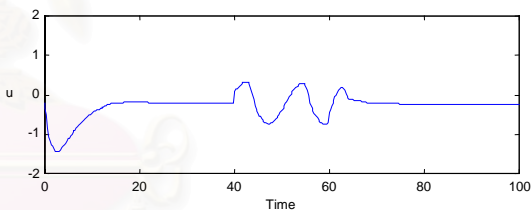
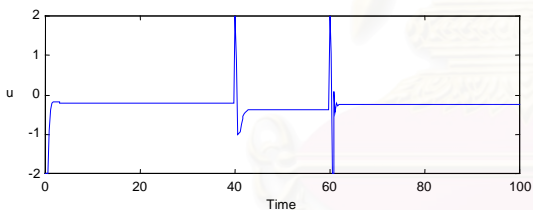
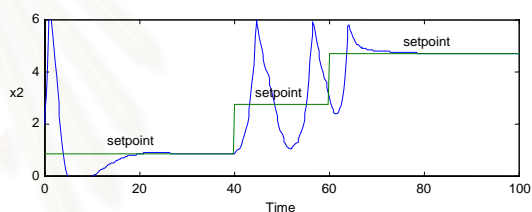
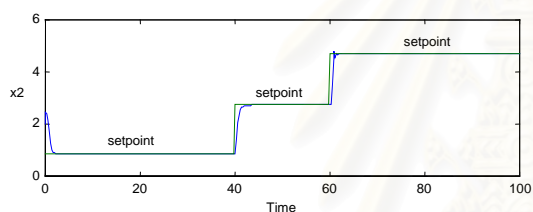
รูปที่ ๖.๗๐ ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

2.5 การควบคุมคุณภาพเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดและมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการ (GMC กับ PID)



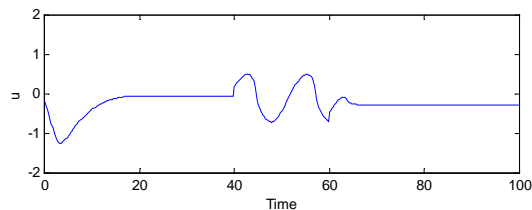
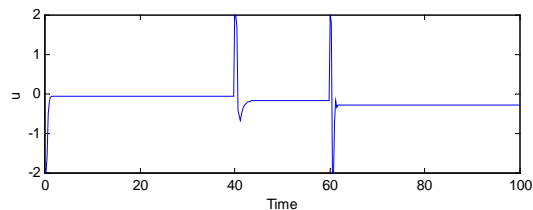
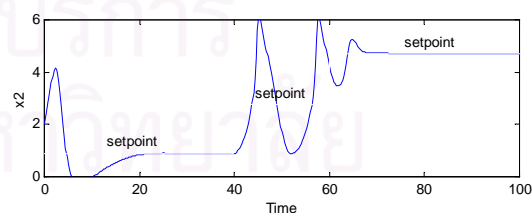
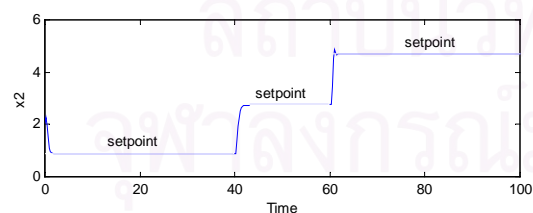
รูปที่ ๗.๗๑ β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

รูปที่ ๗.๗๒ β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



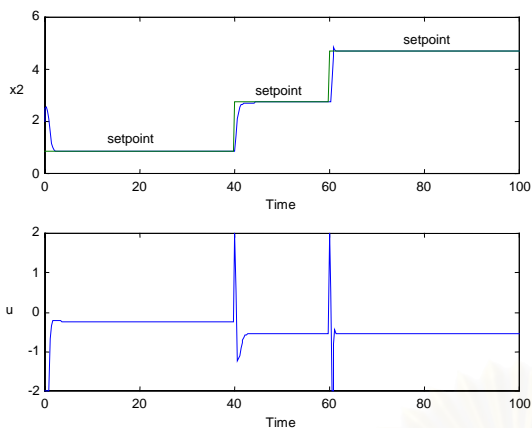
รูปที่ ๗.๗๓ ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

รูปที่ ๗.๗๔ ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

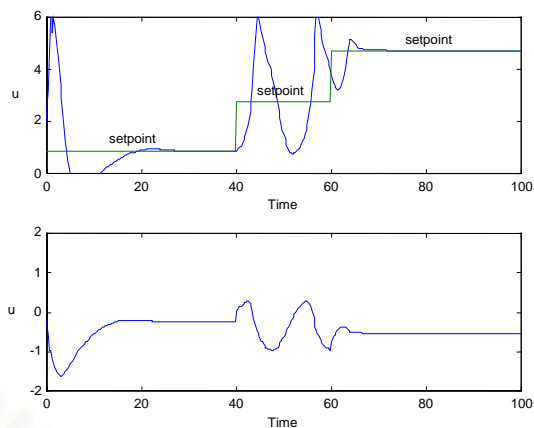


รูปที่ ๗.๗๕ δ ลดลงร้อยละ 30

รูปที่ ๗.๗๖ δ ลดลงร้อยละ 30



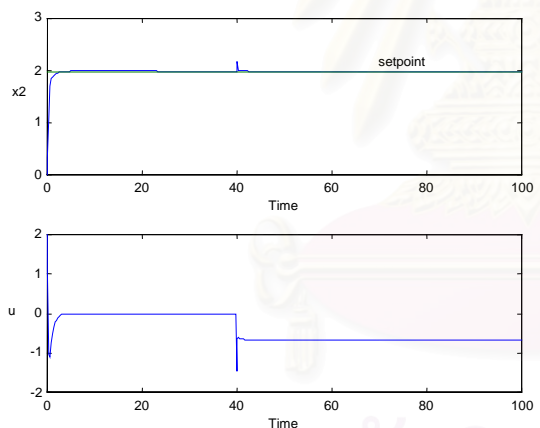
รูปที่ ๗.๗๗ ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30



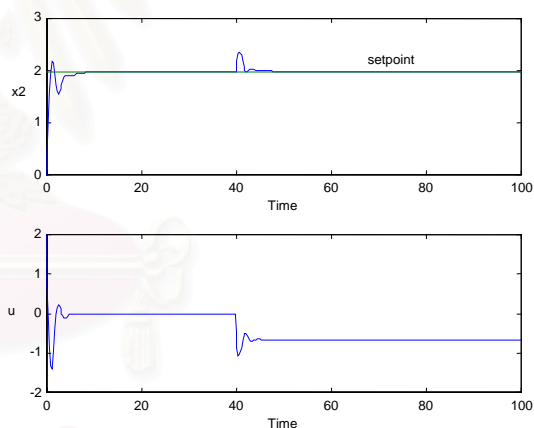
รูปที่ ๗.๗๘ ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

3. กรณีศึกษาที่ 3 ระบบมีการแกว่งเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น

3.1 การควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่เวลา $\tau = 0$



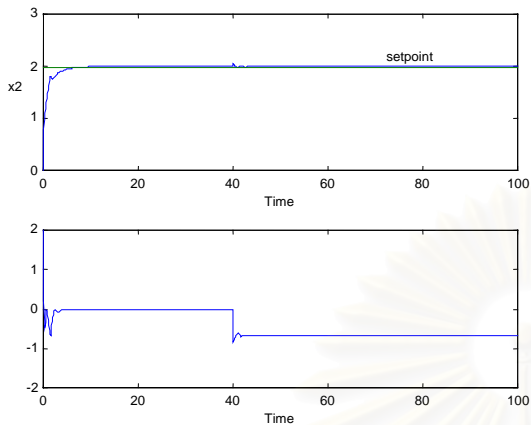
รูปที่ ๗.๗๙ GMC



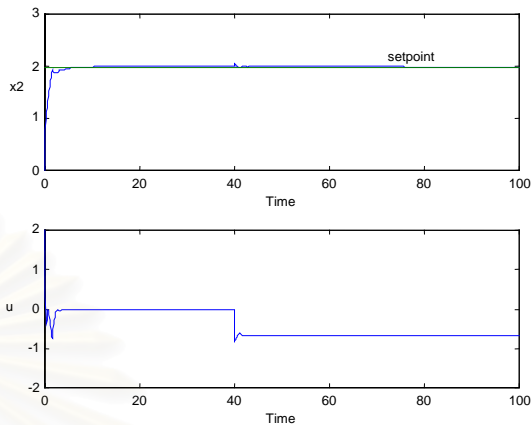
รูปที่ ๗.๘๐ PID

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

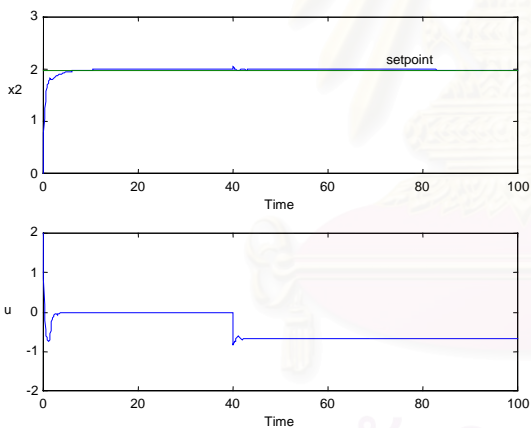
3.2 การควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดและมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (GMC)



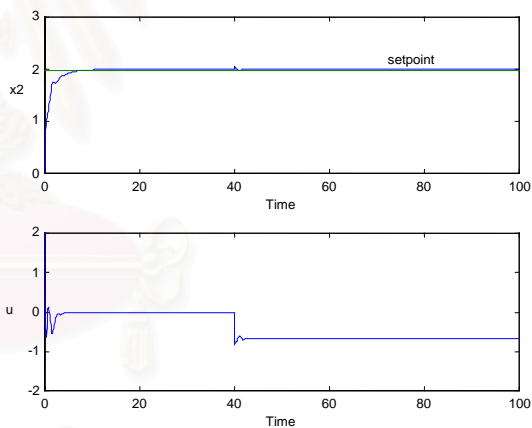
รูปที่ ๘.๘1 β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



รูปที่ ๘.๘๒ ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

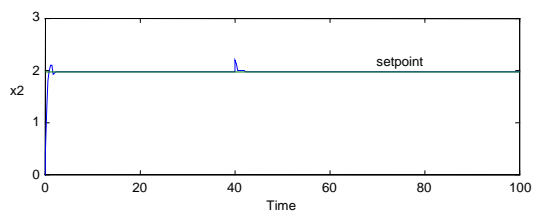


รูปที่ ๘.๘๓ σ ลดลงร้อยละ 30

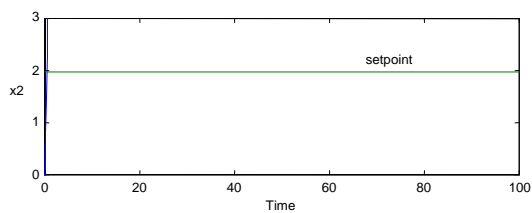


รูปที่ ๘.๘๔ ϕ เพิ่มขึ้นและ σ ลดลงร้อยละ 30

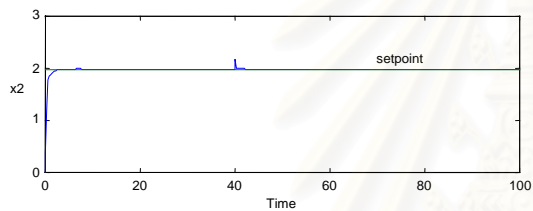
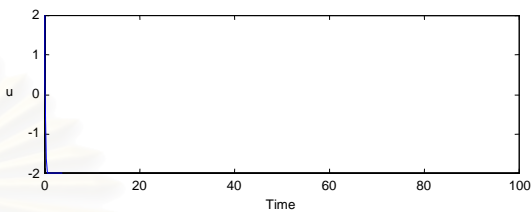
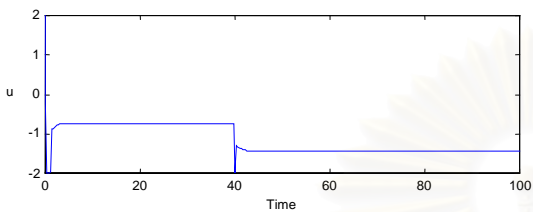
3.3 การควบคุมคุณภาพเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดและมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการ (GMC กับ PID)



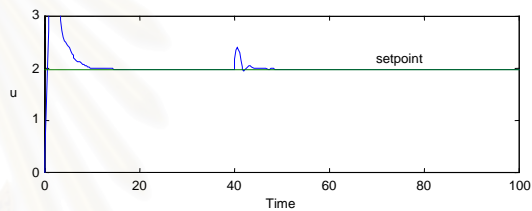
รูปที่ ๘.๘๕ β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



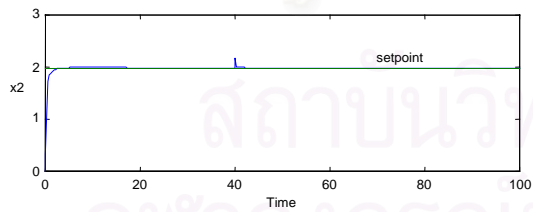
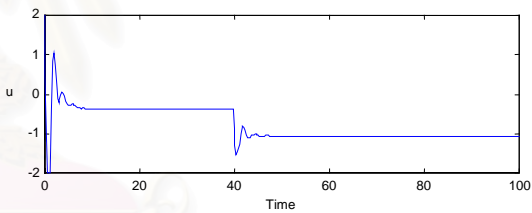
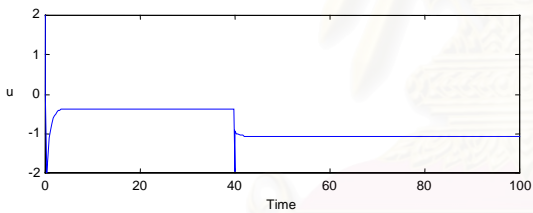
รูปที่ ๘.๘๖ β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



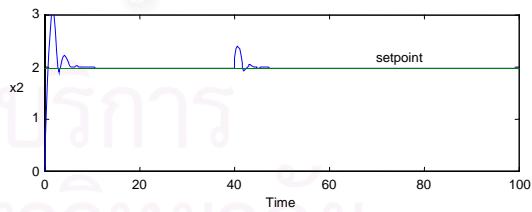
รูปที่ ๘.๘๗ ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



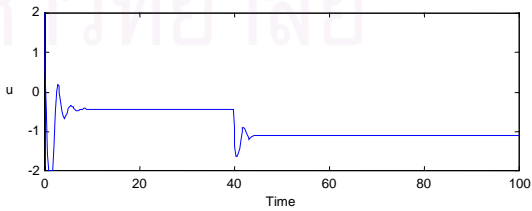
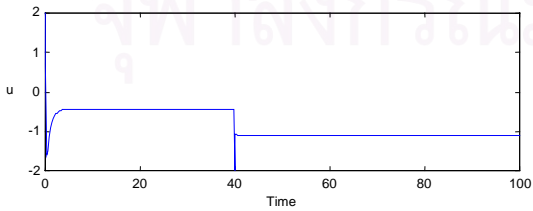
รูปที่ ๘.๘๘ ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

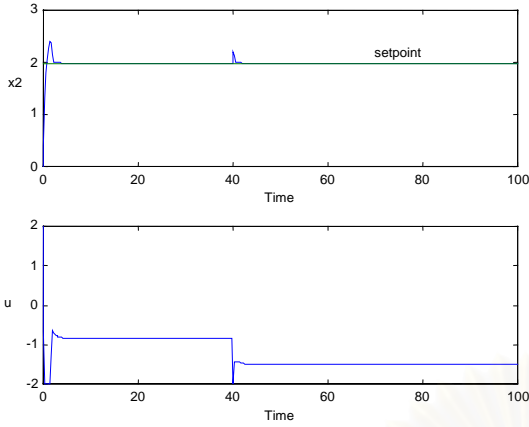


รูปที่ ๘.๘๙ δ ลดลงร้อยละ 30

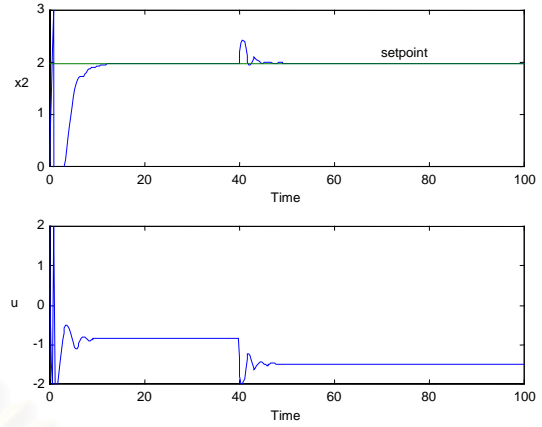


รูปที่ ๘.๙๐ δ ลดลงร้อยละ 30



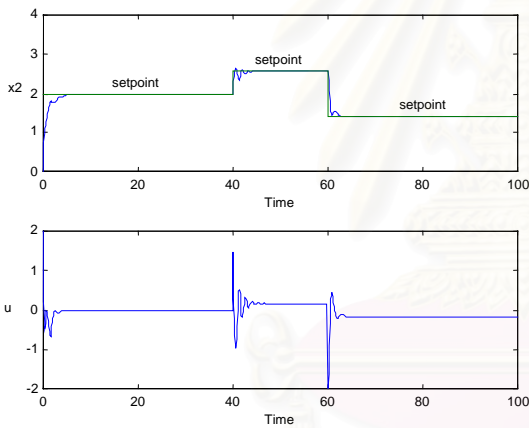


รูปที่ ๙.๙๑ ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

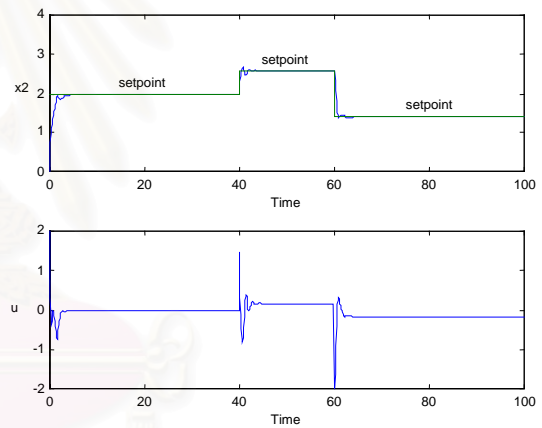


รูปที่ ๙.๙๒ ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

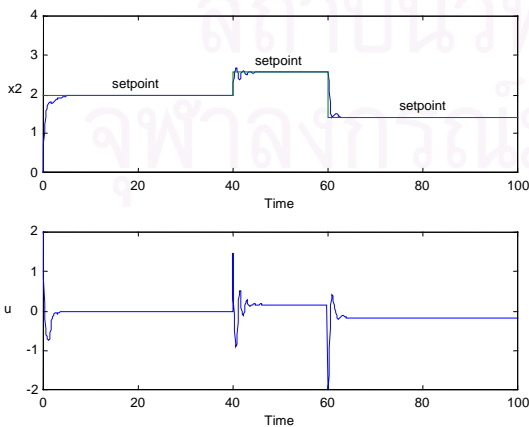
3.4 การควบคุมคุณภาพเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดและมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (GMC)



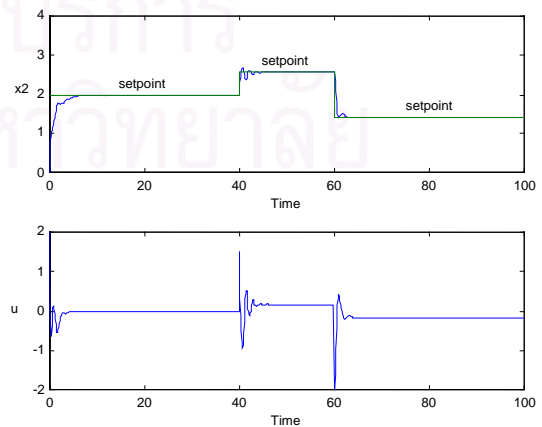
รูปที่ ๙.๙๓ β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



รูปที่ ๙.๙๔ ϕ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30

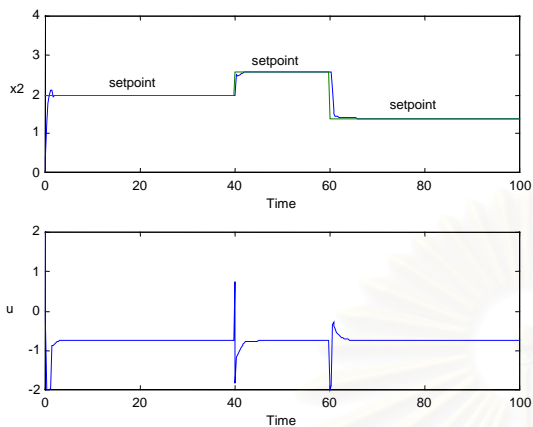


รูปที่ ๙.๙๕ δ ลดลงร้อยละ 30

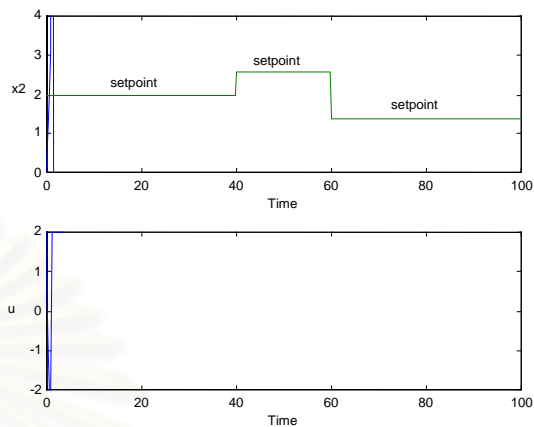


รูปที่ ๙.๙๖ ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

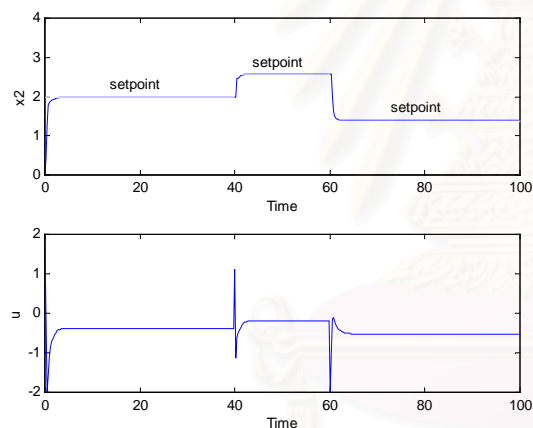
3.5 การควบคุมคุณภาพเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดและมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการ (GMC กับ PID)



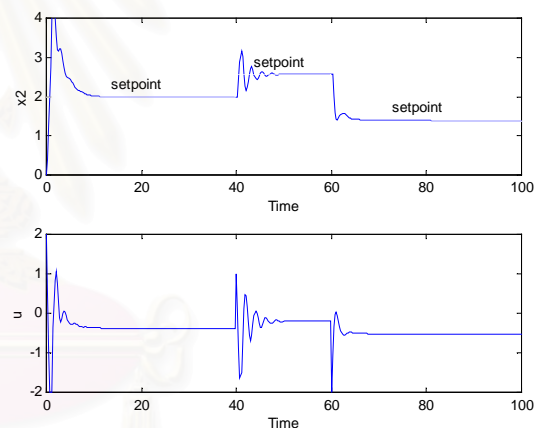
รูปที่ ๙.๙๗ β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



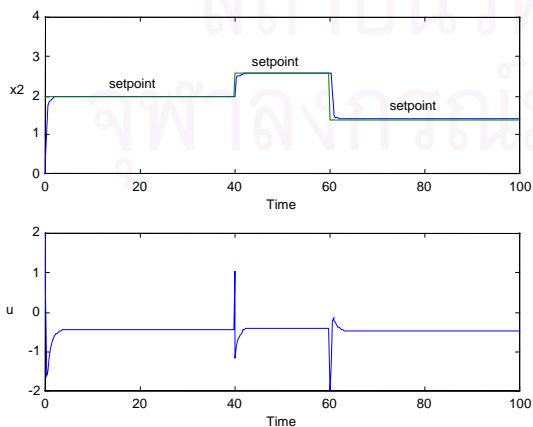
รูปที่ ๙.๙๘ β เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



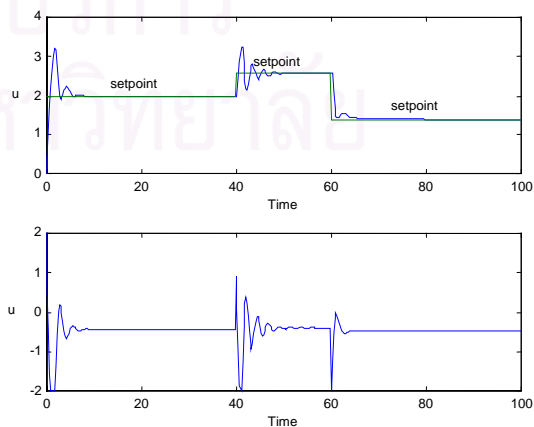
รูปที่ ๙.๙๙ δ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



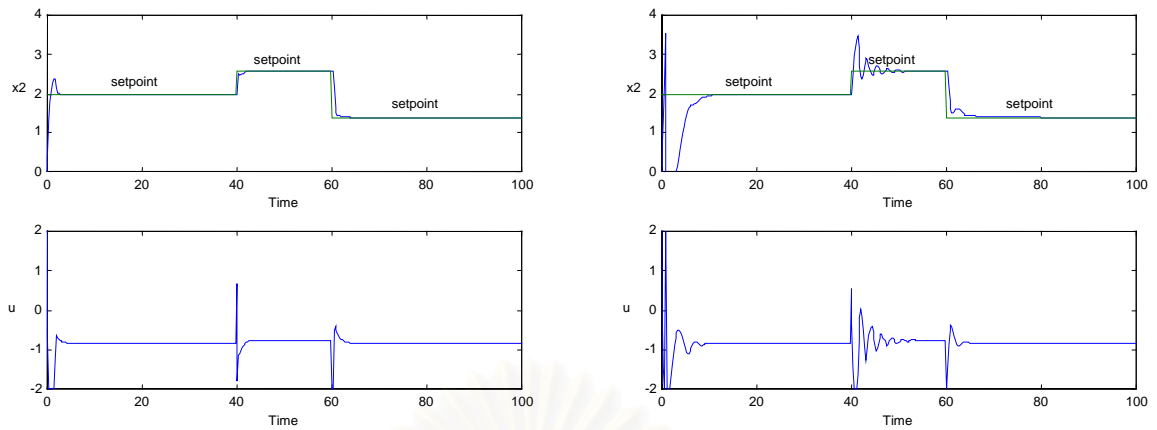
รูปที่ ๙.๑๐๐ δ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30



รูปที่ ๙.๑๐๑ δ ลดลงร้อยละ 30



รูปที่ ๙.๑๐๒ δ ลดลงร้อยละ 30



รูปที่ ๑.103 ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

รูปที่ ๑.104 ϕ เพิ่มขึ้นและ δ ลดลงร้อยละ 30

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

อุปกรณ์และผลการทดลอง

ข.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- ข.1.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์
- ข.1.2 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 โมลาร์

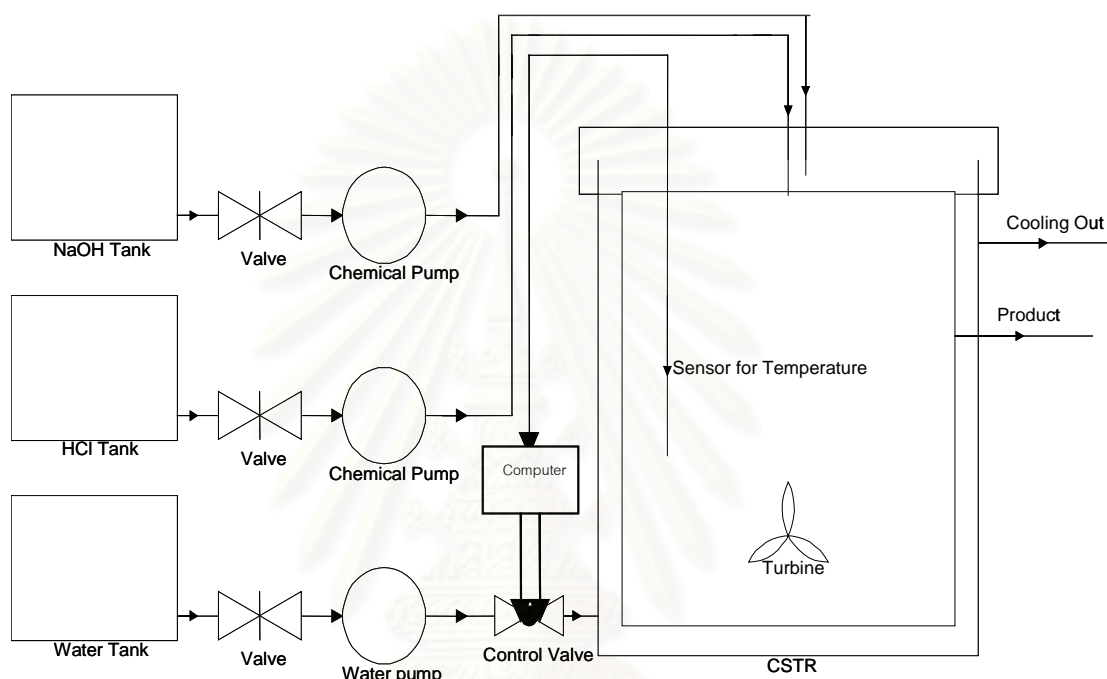
ข.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- ข.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (CSTR) มีลักษณะเป็นถังสองใบซ้อนกัน ตั้งในเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร ตั้งนอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร
- ข.2.2 ใบกวนชนิด disc-blade turbine เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร
- ข.2.3 มอเตอร์ (motor) สำหรับต่อกับใบกวน
- ข.2.4 ถังใส่สารเคมีและน้ำสามถัง ขนาดใบละ 9 ลิตร
- ข.2.5 โรตاميเตอร์ (rotameter) สำหรับปรับอัตราการไหลของน้ำอัตราการไหลสูงสุด 60 ลิตรต่อชั่วโมง และสารเคมีอัตราการไหลสูงสุด 24 ลิตรต่อชั่วโมง
- ข.2.6 บั๊มน้ำและบั๊มสารเคมี
- ข.2.7 อุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมี (temperature head transmitter) ให้สัญญาณออกมาอยู่ในช่วง 2-10 โวลต์
- ข.2.8 การ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลและแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาล็อก (A/D D/A card)
- ข.2.9 วาล์วควบคุม (control valve) ชนิดรับสัญญาณไฟฟ้า รับแรงดันอยู่ในช่วง 0-8 โวลต์หรือ -8/+8 โวลต์
- ข.2.10 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) สำหรับอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ
- ข.2.11 คอมพิวเตอร์

อุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ ข.1

ช.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ϕ	β	δ	T	x_1	x_2	T_{f0}	q	γ
	0.11	5	0.5	304.4	1	0	304.4	1	20



รูปที่ ช.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

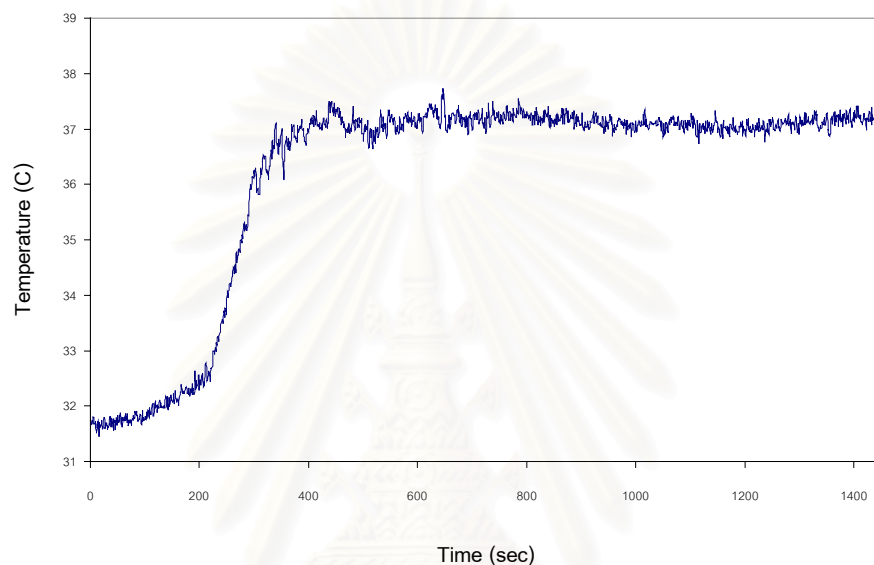
ช.4 ผลการทดลอง

ในส่วนนี้กล่าวถึงผลการประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยแบบจำลองเชิงเรียลไทม์ร่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ในรูปแบบของคาลมานฟิลเตอร์สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (CSTR) ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ โดยเลือกใช้ปฏิกิริยาระหว่างสารละลายกรดไฮโดรคลอริกกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ง่ายเพื่อทดสอบผลการควบคุมด้วยวิธีการดังกล่าว การควบคุมทำโดยการเขียนโปรแกรมควบคุมภาษาซี (Turbo C++) รับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (x_2) ซึ่งเป็นตัวแปรควบคุมผ่าน A/D card เพื่อทำการประมวลผลหาค่าตัวแปรปรับ (u) ที่เหมาะสมดังกล่าวในส่วนของทฤษฎีข้างต้นโดยคอมพิวเตอร์จากนั้นจึงส่งค่าตัวแปรปรับผ่าน D/A card ไปยังวาล์วควบคุมอัตโนมัติเพื่อเปลี่ยน

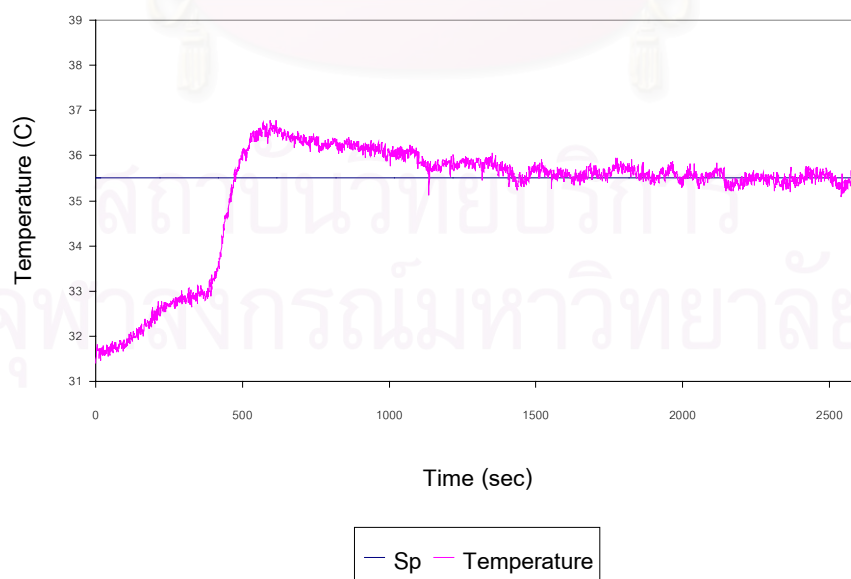
แปลงระดับการเปิดปิดวาล์วเป็นการควบคุมอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นทำให้ตัวแปรควบคุมอยู่ที่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ ทั้งนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. การตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่ไม่มี การควบคุม (Openloop Respond)
2. การควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าเป้าหมาย 35.5°C
3. การเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายจาก 33.5°C ไปเป็น 35.5°C

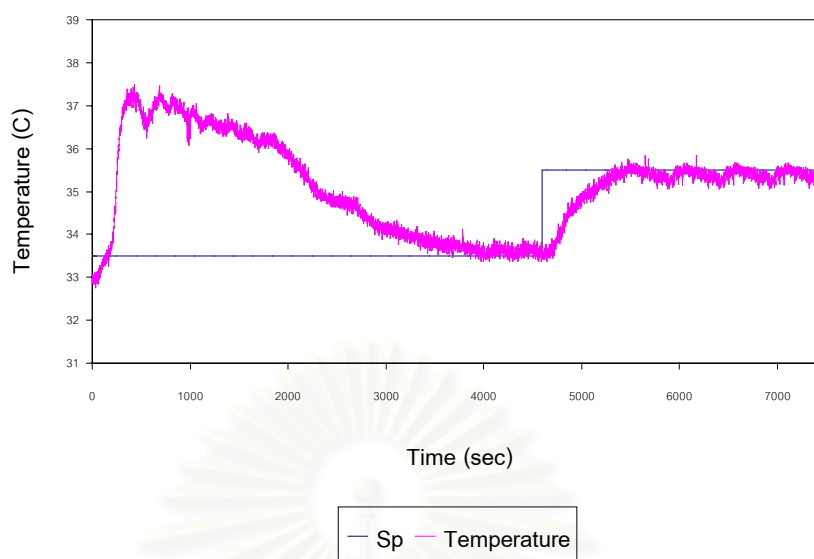
ผลการควบคุมแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ ๒.๒ การตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่ไม่มี การควบคุม



รูปที่ ๒.๓ การควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าเป้าหมาย 35.5°C



รูปที่ ๓.4 การควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

๓.5 สรุปผลการทดลอง

จากรูปผลการควบคุมกระบวนการทั้งสองกรณีข้างต้นยังไม่ได้ผลการควบคุมที่ดี เนื่องจากมีข้อบกพร่องในการดำเนินการทดลองหลายประการดังกล่าวต่อไปนี้

- การคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองยังไม่ได้ค่าที่ถูกต้องเท่าที่ควร
- การวัดอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์มีค่าความผิดพลาดอยู่บ้างนอกจากนี้ยังมีสัญญาณที่ไม่นิ่งเป็นผลจากสัญญาณรบกวนจากสัญญาณไฟฟ้าจากแหล่งอื่น ๆ เช่น มอเตอร์ที่ต่อกับใบกวน เป็นต้น ทำให้การประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นไม่ถูกต้องเป็นผลให้การคำนวณค่าตัวแปรปรับได้ค่าที่ไม่ถูกต้องเหมาะสม
- อัตราการไหลของสารตั้งต้นไม่คงที่ตลอดการทดลองอาจเป็นเหตุมาจากปั๊มหรือไมโครโรตารีที่ใช้ในการปรับอัตราการไหล
- การตอบสนองของวาล์วควบคุมต่อสัญญาณตัวแปรปรับค่อนข้างช้าและมีค่าความละเอียด (resolution) ค่อนข้างต่ำ ทำให้แยกสัญญาณตัวแปรปรับที่มีค่าแตกต่างกันน้อยไม่ออกทำให้ไม่มีผลต่อการตอบสนองของวาล์วควบคุม ส่งผลให้การควบคุมไม่ทันต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบ
- การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างสารที่ทำปฏิกิริยากันผ่านผนังสแตนเลสไปยังน้ำหล่อเย็นไม่ถูกต้อง การถ่ายเทความร้อนออกจากระบบจึง

ไม่ถูกต้องไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ส่งผลให้การควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์มีรวดเร็วทันต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบ

- ขอบเขตความสามารถในการปรับอัตราไหลของน้ำหล่อเย็นโดยวาล์วควบคุมแคบเกินไปเนื่องจากขนาดของท่อที่ต่อกับวาล์วไม่เหมาะสม ทำให้การควบคุมค่าตัวแปรควบคุมอยู่ในช่วงที่จำกัดมาก

ซ.6 ข้อเสนอแนะ

หากขจัดปัญหาที่เกิดขึ้นดังที่ได้กล่าวในหัวข้อผลการทดลองได้เป็นผลที่น่าพอใจ น่าจะทำให้ผลการควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายเป็นไปตามที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากการซิมูเลตมีการกำหนดข้อสมมติหลายอย่างซึ่งในการปฏิบัติงานจริงนั้น ไม่สามารถที่จะกำหนดเช่นนั้นได้ผลการควบคุมกระบวนการจึงไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร ผู้ทำการทดลองควรตระหนักถึงปัญหาข้อนี้ด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอนุพัฒน์ วรดิถี เกิดเมื่อวันที่ 22 กันยายน พ.ศ.2519 สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนบางปะกอกวิทยาคม เมื่อ พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาระบบควบคุมและเครื่องมือวัด จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2541 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย