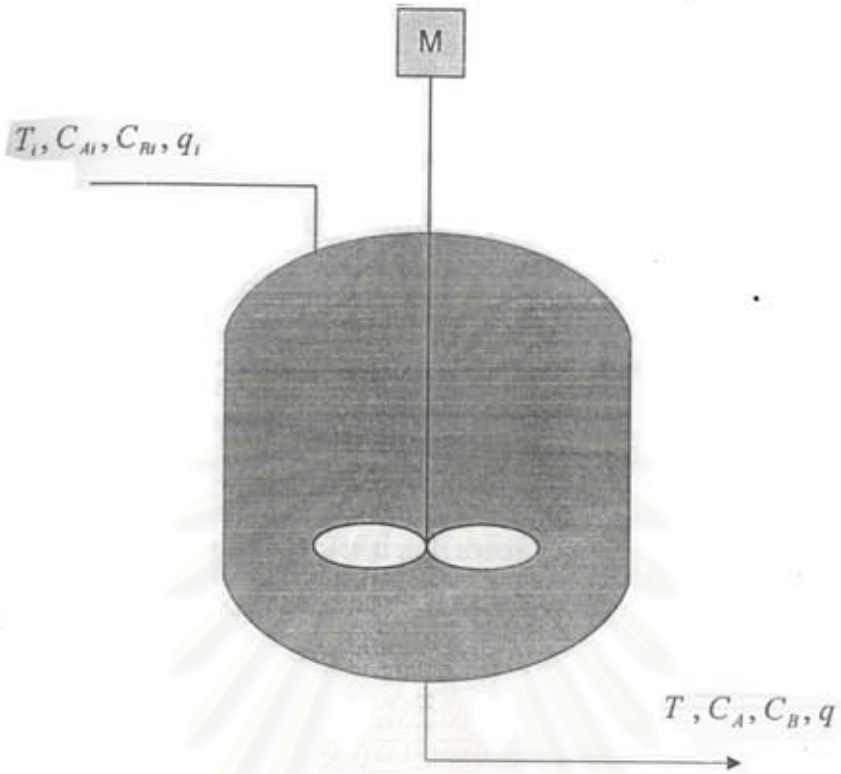
บทที่ 5

การจำลอง, ผลการจำลอง และ การวิเคราะห์ผลการจำลอง สำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่อง ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

บทนี้กล่าวถึงผลการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ในรูปแบบของคาลมานฟิลเตอร์ในการควบคุมอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารในเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่อง (CSTR) ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ โดยกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการที่ใช้ในการจำลอง, การจำลอง, ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลองการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟในการควบคุมอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์ โดยได้ทำการทดสอบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมและแบบจำลองของกระบวนการเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดี

5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกระบวนการที่ใช้ในการจำลอง

สำหรับกระบวนการที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ ของ Economou (1989) ซึ่งเหตุผลในการเลือกกระบวนการนี้เนื่องจากเป็นกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูง (highly nonlinear) ทำให้การควบคุมทำได้ยากจึงเหมาะแก่การทดสอบการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ กระบวนการดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 เครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

ปฏิกิริยาเคมีในระบบเกิดจากสารตั้งต้น A เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ B แบบผันกลับได้ ซึ่งให้ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา (Heat of reaction, ΔH) ออกมาโดยสมมติว่าความหนาแน่นและค่าความจุความร้อนของระบบมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลาและถือว่าการสูญเสียความร้อนออกจากระบบมีค่าน้อยมากข้อสมมติที่สำคัญคือให้มีการผสมกันอย่างสมบูรณ์แบบภายในถังกวน (perfectly mixed) ดังนั้นสามารถหาแบบจำลองของระบบจากสมการอนุรักษ์มวลสารและพลังงานได้ดังนี้

ก. สมการสมดุลมวลรวมของสารภายในถังกวน (total mass balance)

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho q_i - \rho q \tag{5.1}$$

ข. สมการสมดุลมวลของสารตั้งต้น A (reactant mass balance)

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

ค. สมการสมดุลมวลของสารผลิตภัณฑ์ B (product mass balance)

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

ง. สมการสมดุลพลังงานในถังปฏิกรณ์ (reactor energy balance)

$$\rho C_P\frac{dVT}{dt} = \rho q_i C_P T_i - \rho q C_P T - V\Delta H r_1 + V\Delta H r_{-1} \tag{5.4}$$

โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคือ

$$r_1 = k_1 C_A \tag{5.5}$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคือ

$$r_{-1} = k_{-1} C_B \tag{5.6}$$

และสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับเป็นไปตามความสัมพันธ์ของอารีเนียส (Arrhenius reaction)

$$k_1 = C_1 \exp(-Q_1 / RT) \tag{5.7}$$

$$k_{-1} = C_{-1} \exp(-Q_{-1} / RT) \tag{5.8}$$

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

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{1}{\tau}(C_{Ai} - C_A) - k_1 C_A + k_{-1} C_B \tag{5.8}$$

เมื่อ $\tau = \dfrac{q_i}{V}$

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

$$\frac{dC_B}{dt} = \frac{1}{\tau}(C_{Bi} - C_B) + k_1 C_A - k_{-1} C_B \tag{5.9}$$

แทนค่า ต่างๆ ในสมการที่ (5.4) สามารถเขียนสมการที่ (5.4) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-\Delta H}{\rho C_p}(k_1 C_A - k_{-1} C_B) + \frac{1}{\tau}(T_i - T) \tag{5.10}$$

ดังนั้นสามารถเขียนแบบจำลองของกระบวนการนี้ได้ดังสมการที่ (5.8), (5.9) และ (5.10) ตามลำดับโดยที่สภาวะในการปฏิบัติการของระบบแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สภาวะการปฏิบัติการของระบบที่สภาวะคงตัวสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

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	ค่าคงที่ของก๊าซ	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	1000	Cal/(kg.K)
ρ	ความหนาแน่นของสารในถังถือว่าคงที่	1	Kg/l
C_{A1}	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น A	1	Mol/l
C_{B1}	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารผลิตภัณฑ์ B	0	Mol/l
Ti	อุณหภูมิของสายป้อน	427	K
C_A	ความเข้มข้นของสาร A	0.492	Mol/l
C_B	ความเข้มข้นของสาร B	0.508	Mol/l
T	อุณหภูมิของระบบ	430	K

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 การตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่ไม่มีการควบคุม (Openloop Respond)

เครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งแบบจำลองไดนามิกส์ของกระบวนการอธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์ 3 สมการคือ สมการที่ (5.8), (5.9) และ (5.10) ในการจำลองกระบวนการอาศัยการแก้สมการอนุพันธ์ของระบบโดยวิธีเชิงตัวเลข โดยเริ่มต้นระบบที่สภาวะในการปฏิบัติการของระบบแสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งจะได้คำตอบของค่าที่สภาวะคงตัวสำหรับตัวแปรควบคุมคืออุณหภูมิ [T = 429.5] และความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ [B = 0.5054] พิจารณาการตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรรบกวนระบบแบบสเต็บโดยกำหนดให้ความเข้มข้นขาเข้าของสารตั้งต้นของเครื่องปฏิกรณ์, A_i เป็นตัวแปรรบกวนระบบ โดยกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าแบบสเต็บที่เวลา 10 นาที หลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว ให้มีค่าเพิ่มขึ้น 20% ของค่าที่สภาวะคงตัว ส่วนค่าตัวแปรและพารามิเตอร์อื่น ๆ คงที่ที่สภาวะปฏิบัติการดังตารางที่ 5.1 บันทึกค่าการตอบสนองของกระบวนการเมื่อไม่มีการควบคุมใด ๆ สำหรับตัวแปรควบคุมคืออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์, T และ ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์, B ในเครื่องปฏิกรณ์ ในทุก ๆ 0.2 นาที เป็นเวลา 20 นาที จะได้กราฟของการตอบสนองของกระบวนการแสดงดังรูปที่ ฉ.1 ในภาคผนวก ฉ. จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การตอบสนองของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปโดยระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวค่าใหม่ที่แตกต่างจากค่าเดิม

5.3 การจำลอง,ผลการจำลอง และ การวิเคราะห์ผลการจำลองการควบคุม

การจำลองการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบไม่ผันกลับนั้นวัตถุประสงค์คือการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าเซ็ทพอยท์ที่กำหนดโดยการปรับของค่าอุณหภูมิของสายป้อน, T_i ซึ่งเป็นตัวแปรปรับกระบวนการที่ได้ทำการตรวจสอบแล้วว่าการปรับค่าตัวแปรปรับนี้สามารถทำให้ระบบสามารถควบคุมได้ (controllability) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 350 K $\leq T_i \leq$ 450 K และกำหนดให้ความเข้มข้นขาเข้าของสารตั้งต้น, A_i เป็นตัวแปรรบกวนระบบ

จากการที่กระบวนการที่ทำการควบคุมนี้เป็นกระบวนการแบบไม่เชิงเส้นการจำลองกระบวนการจะใช้วิธีเชิงตัวเลขโดยใช้สภาวะในการปฏิบัติการเริ่มต้นของระบบแสดงดังตารางที่ 5.1 กำหนดให้พารามิเตอร์ทั้งหมดถูกกำหนดค่าไว้ยกเว้นอุณหภูมิสายป้อน, T_f โดยใช้ช่วงเวลาสุ่ม dt = 0.2 นาที สำหรับเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟใช้แบบจำลองของเครื่องควบคุมในรูปแบบของสมการสเตตสเปซดังสมการที่ (3.38) และ (3.39) ซึ่งในการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้มีการปรับปรุงการทำการประมาณระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นโดยเปลี่ยนจากการประมาณรอบจุดสภาวะคงตัวเป็นการประมาณรอบจุดใด ๆ ณ. เวลานั้น การคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมอาศัยการออฟติไมซ์ด้วยออฟเจ็กทีฟฟังก์ชั่นซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการที่ (3.41) ดังรายละเอียดที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4 โดยประยุกต์ใช้ร่วมกับการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ซึ่งใช้อัลกอริธึมของคาลมานฟิลเตอร์ดังรายละเอียดที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3 และใช้ช่วงเวลาสุ่ม dt = 0.2 นาทีเช่นเดียวกัน สำหรับเครื่องควบคุมแบบพีไอดีใช้สมการในรูปเวโลซิตี้ (velocity form) โดยใช้เวลาสุ่ม dt = 0.2 นาทีเช่นเดียวกัน

ในการทดลองได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอนคือ ตอนที่ 1 เป็นการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ และตอนที่ 2 เป็นการควบคุมความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์ โดยในการควบคุมได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟและการควบคุมแบบพีไอดีในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

1. การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟและการควบคุมแบบพีไอดี

ในการทดลองได้ทำการเลียนแบบจำลองการควบคุมโดยเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่ใช้ร่วมกับตัวประมาณค่าแบบคาลมานฟิลเตอร์และการควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิ , T และความเข้มข้น, B ของเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้โดยพิจารณาทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบ และกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์ในการควบคุม โดยในการควบคุมได้พยายามปรับค่าของพารามิเตอร์ปรับจูนของเครื่องควบคุมให้ได้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกันที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

2. การเปรียบเทียบความทนทานของการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟและการควบคุมแบบพีไอดี

เนื่องจากในการประยุกต์ใช้ในการควบคุมจริงอาจมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม/กระบวนการ เกิดขึ้นซึ่งอาจส่งผลให้การควบคุมไม่ได้ผลดี ในการทดลองได้สมมติให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมและแบบจำลองของกระบวนการ ผิดพลาดไปจากค่าที่สภาวะคงตัวตามสภาวะปฏิบัติการของระบบดังตารางที่ 5.1 โดยในการควบคุมยังคงใช้สภาวะของเครื่องควบคุมเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองโดยไม่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ปรับจูนใด ๆ พิจารณาการตอบสนองของกระบวนการสำหรับกรณีการทดลองดังนี้

2.1 การควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม (Model-Mismatch)

สำหรับกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมอันเนื่องมาจากการหาแบบจำลองผิดหรือมีพารามิเตอร์ใด ๆ ผิดพลาดไปซึ่งจะไม่ส่งผลต่อการควบคุมแบบพีไอดีเนื่องจากเครื่องควบคุมแบบพีไอดีจะไม่ขึ้นกับตัวแปรหรือพารามิเตอร์ใด ๆ นอกจากค่าความผิดพลาดจากการควบคุมเท่านั้นและเครื่องควบคุมแบบพีไอดีอาศัยการปรับจูนจากกระบวนการจริงดังนั้นในการทดลองจึงไม่ต้องทำการทดสอบการควบคุมแบบพีไอดีในกรณีนี้ แต่สำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟซึ่งเป็นการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองเป็นพื้นฐาน เมื่อแบบจำลองผิดจะส่งผลต่อการควบคุม ดังนั้นเพื่อทดสอบความทนทานของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ ในการจำลองได้กำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

ก. ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้น 30%

ข. ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30%

2.2 การควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Plant-Mismatch)

สำหรับกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการที่จะทำการควบคุม จะส่งผลต่อการควบคุมทั้งการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟและแบบพีไอดีเนื่องจากการควบคุมแบบพีไอดีอาศัยการปรับจูนจากกระบวนการจริงดังนั้นเมื่อเกิดการผิดพลาดใด ๆ ของกระบวนการในระหว่างการควบคุมจะทำให้พารามิเตอร์ปรับจูนไม่สามารถปรับเครื่องควบคุมให้ทำงานได้ดีเทียบเท่ากับกรณีปกติ และสำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟซึ่งเป็นการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองเป็นพื้นฐานเมื่อแบบจำลองผิดจะส่งผลต่อการควบคุม ดังนั้นเพื่อทดสอบความทนทานของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟและพีไอดี ในการทดลองจึงกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุมในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

ก. ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้น 30%

ข. ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30%

พิจารณาผลการควบคุมสำหรับกรณีการควบคุมต่าง ๆ ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3.1 การควบคุมอุณหภูมิ

ในการควบคุมใช้ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟและคาลมานฟิลเตอร์สำหรับการควบคุมอุณหภูมิแสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

Controller Parameters	Estimator Parameters
P = 10	Q = diag[10000 1 1 1]
M = 10	R = [1]
Ywt = 10	
Uwt = 1	

และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนเครื่องควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนเครื่องควบคุมแบบพีไอดี ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

	PID Tunning Parameters	
K_c = 3.8	τ_i = 2.5	τ_d = 0.01

พิจารณาการตอบสนองของกระบวนการสำหรับการควบคุมในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

1. การควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ป

1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม

วัตถุประสงค์ในการจำลองการควบคุมนี้คือเพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 429.5 K ในกรณีที่ค่าตัวรบกวนระบบ, A_f มีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็บเพิ่มขึ้น 20 % ของค่าที่สภาวะคงตัว ที่เวลา 8 นาทีหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจากนั้นเริ่มทำการควบคุมที่เวลา 15 นาที โดยที่อุณหภูมิขาเข้า, T_f ซึ่งเป็นตัวแปรปรับกระบวนการสามารถปรับเปลี่ยนได้ในช่วง $350\ \mathrm{K} \leq T_f \leq 450\ \mathrm{K}$ พิจารณาการตอบสนองของกระบวนการเป็นเวลา 20 นาที เปรียบเทียบผลการควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบสำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่อาศัยค่าพารามิเตอร์ปรับจูนในตารางที่ 5.2 แสดงดังรูปที่ 5.2 และการควบคุมแบบพีไอดีที่อาศัยค่าพารามิเตอร์ปรับจูนในตารางที่ 5.3 แสดงดังรูปที่ 5.3 พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระบบเปลี่ยนแปลงไป โดยระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวค่าใหม่ที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเริ่มทำการควบคุมที่เวลา 15 นาที เครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟและเครื่องควบคุมแบบพีไอดีจะสามารถปรับสภาพของกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการได้ และเมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 5.4 พบว่าให้ผลใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากในการจำลองได้พยายามปรับค่าพารามิเตอร์ปรับจูนของเครื่องควบคุมให้ได้ผลใกล้เคียงกันที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

1.2 การทดสอบความทนทานของการควบคุม

1.2.1 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม

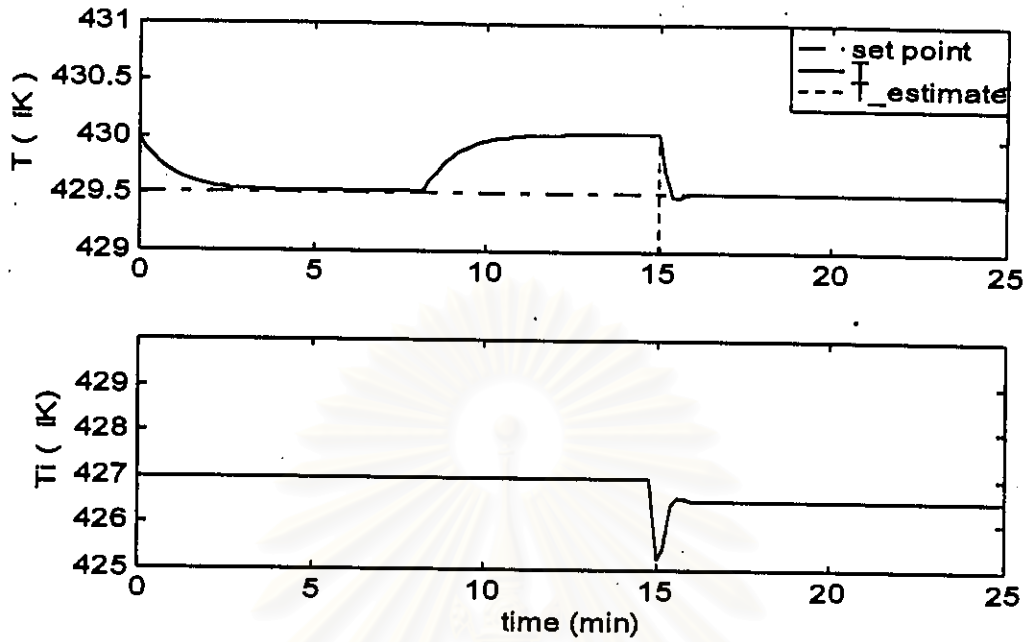
ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่อาศัยค่าพารามิเตอร์ปรับจูนในตารางที่ 5.2 ในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้น 30 % แสดงดังรูปที่ ฉ.6 และกรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30% แสดงดังรูปที่

ฉ.7 ในภาคผนวก ฉ. ตามลำดับ และจากการพิจารณาค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดในการควบคุมพบว่าให้ผลใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีความทนทานสามารถควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมดังกล่าวได้

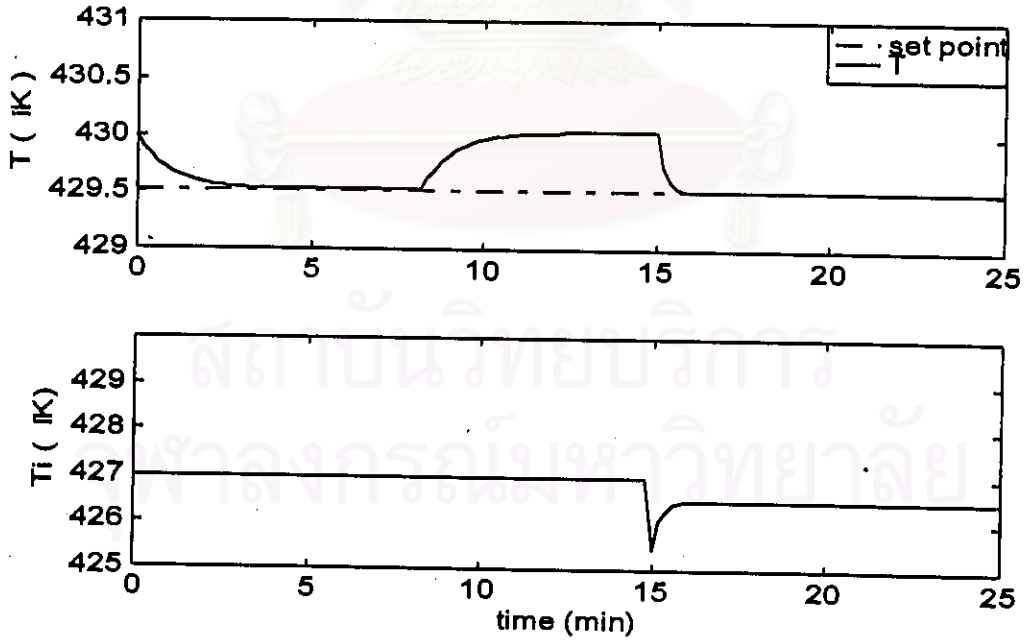
1.2.2 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบ และกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุม พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้น 30 % สำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแสดงดังรูปที่ 5.4 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ 5.5 และพิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา, k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30% สำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแสดงดังรูปที่ 5.6 และ พีไอดีแสดงดังรูปที่ 5.7 ตามลำดับ

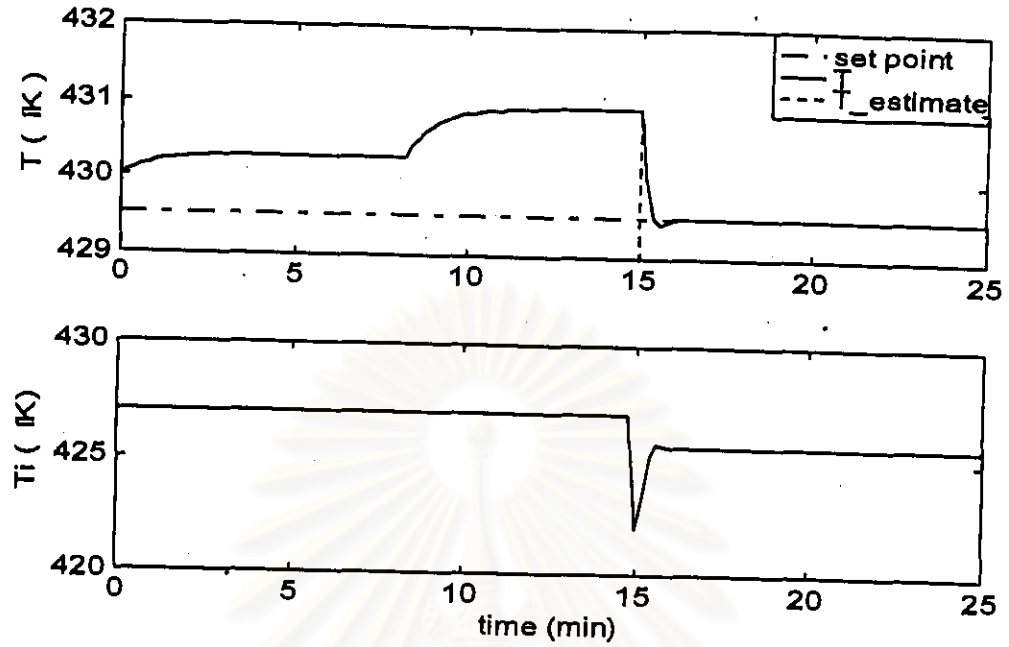
พิจารณาจากช่วงเวลาเริ่มต้นถึงเวลา t = 15 นาทีซึ่งยังไม่มีการควบคุมเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดพบว่า เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการดังกล่าวจะส่งผลให้การตอบสนองของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนกระทั่งเริ่มทำการควบคุม เครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการได้โดยให้ผลใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีการตอบสนองที่ช้ากว่าและยังมีค่าออฟเซ็ทในการควบคุม นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) พบว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่าการควบคุมแบบพีไอดี แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีความทนทานสูงกว่าการควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุม



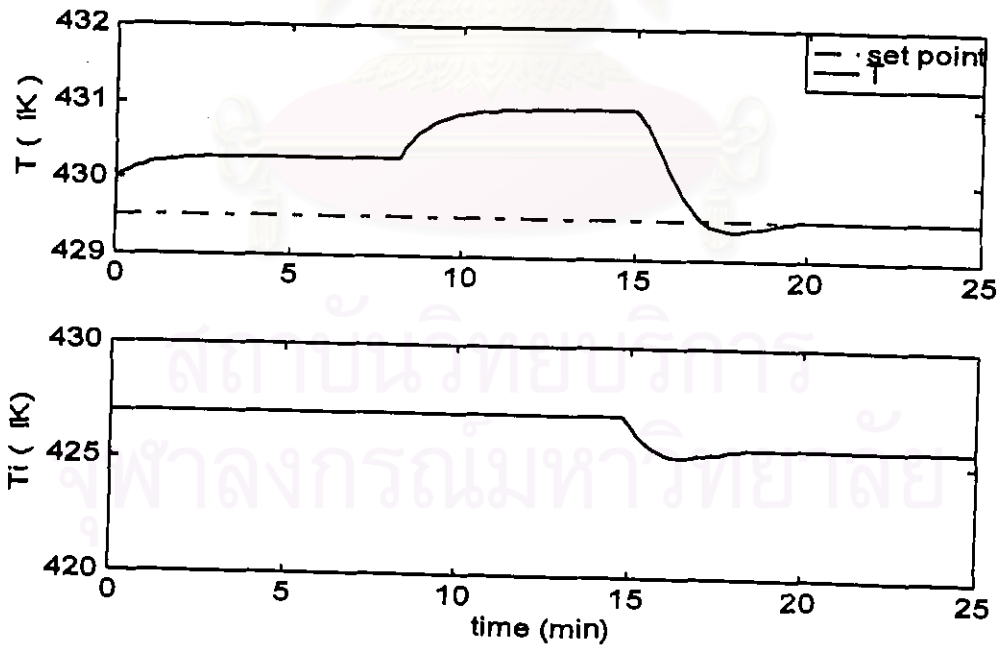
รูปที่ 5.2. ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบโดยการควบคุมแบบไมเคลพรีดิกทีฟ



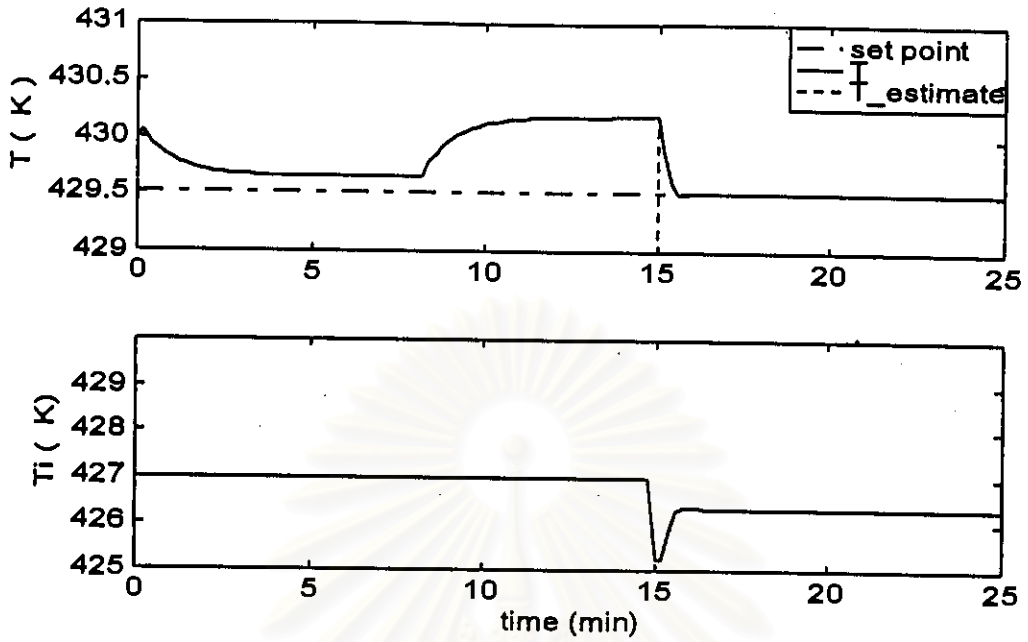
รูปที่ 5.3 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบโดยการควบคุมแบบพีไอดี



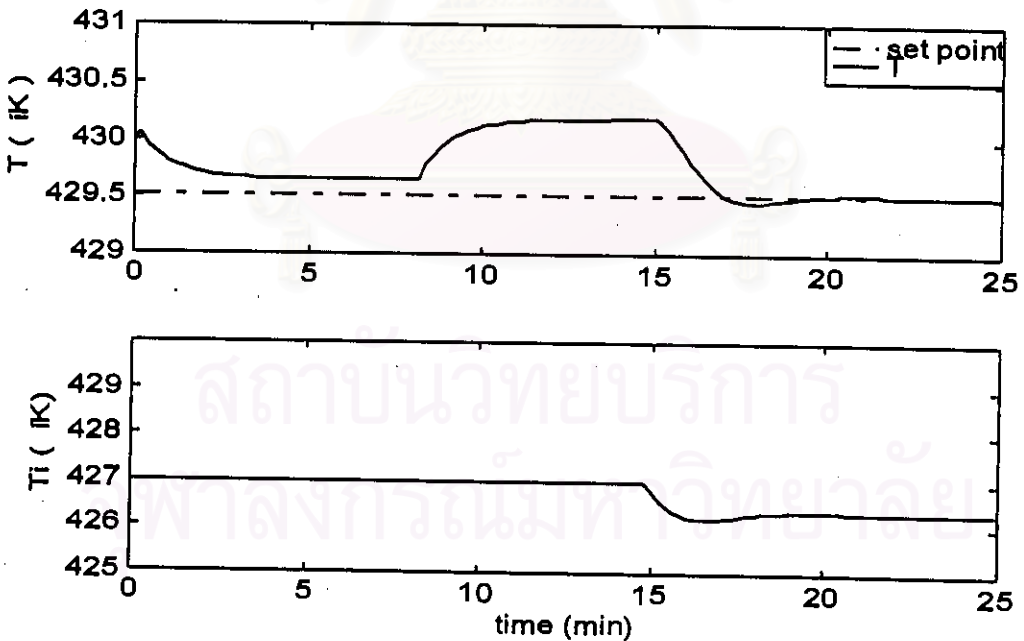
รูปที่ 5.4 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้น30%) โดยการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ



รูปที่ 5.5 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้น30%) โดย การควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 5.6 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ(k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30%)โดยการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ



รูปที่ 5.7 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนและมีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30%) โดย การควบคุมแบบพีไอดี

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็บสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

กรณีการควบคุม	MPC	PID
1. ควบคุมอุณหภูมิเมื่อตัวรบกวนระบบมีการเปลี่ยนแปลง		
1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม	3.6	3.6
1.2 การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุม		
1.2.1 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม		
1.2.1 ก. ΔH เพิ่มขึ้น 30 %	3.6	-
1.2.1 ข. k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30 %	3.6	-
1.2.2 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ		
1.2.2 ก. ΔH เพิ่มขึ้น 30 %	15.4	16.8
1.2.2 ข. k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30 %	5.7	6.3

2. การควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเซ็ทพอยท์มีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็บ

2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม

ในการจำลองการควบคุมกำหนดให้ค่าเซ็ทพอยท์เปลี่ยนแปลงแบบสเต็บลดลง 5 K ที่เวลา 10 นาทีหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวค่าแรก [T = 429.5] แล้วจึงเริ่มทำการควบคุม จากนั้นกำหนดให้เซ็ทพอยท์มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 10 K ที่เวลา 15 นาที พิจารณาผลการตอบสนองของกระบวนการเป็นเวลา 20 นาที เปรียบเทียบผลการควบคุมในการติดตามค่าเซ็ทพอยท์ สำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่อาศัยค่าพารามิเตอร์ปรับจูนในตารางที่ 5.2 แสดงดังรูปที่ 5.8 และการควบคุมแบบพีไอดีที่อาศัยค่าพารามิเตอร์ปรับจูนในตารางที่ 5.3 แสดงดังรูปที่ 5.9 พบว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการควบคุมที่ดีในการติดตามค่าเซ็ทพอยท์ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดียังมีค่าออฟเซ็ทในการควบคุมที่เวลาที่มีการปรับเปลี่ยนค่าเซ็ทพอยท์ ทั้งนี้ในการ

ทดลองไม่ได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ปรับจูนใหม่จากการควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบซึ่งได้พยายามปรับค่าพารามิเตอร์ปรับจูนของเครื่องควบคุมให้ได้ผลใกล้เคียงกันเท่าที่เป็นไปได้แล้ว นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 5.5 พบว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์ในการควบคุม

2.2 การทดสอบความทนทานของการควบคุม

2.2.1 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์และกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่อาศัยพารามิเตอร์ปรับจูนในตารางที่ 5.2 ในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้น 30 % แสดงดังรูปที่ ฉ.8 และกรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30% แสดงดังรูปที่ ฉ.9 ในภาคผนวก ฉ. ตามลำดับ และจากการพิจารณาค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบกับการควบคุมในกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดพบว่าให้ผลใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีความทนทาน สามารถควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์และมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมได้

2.2.2 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ

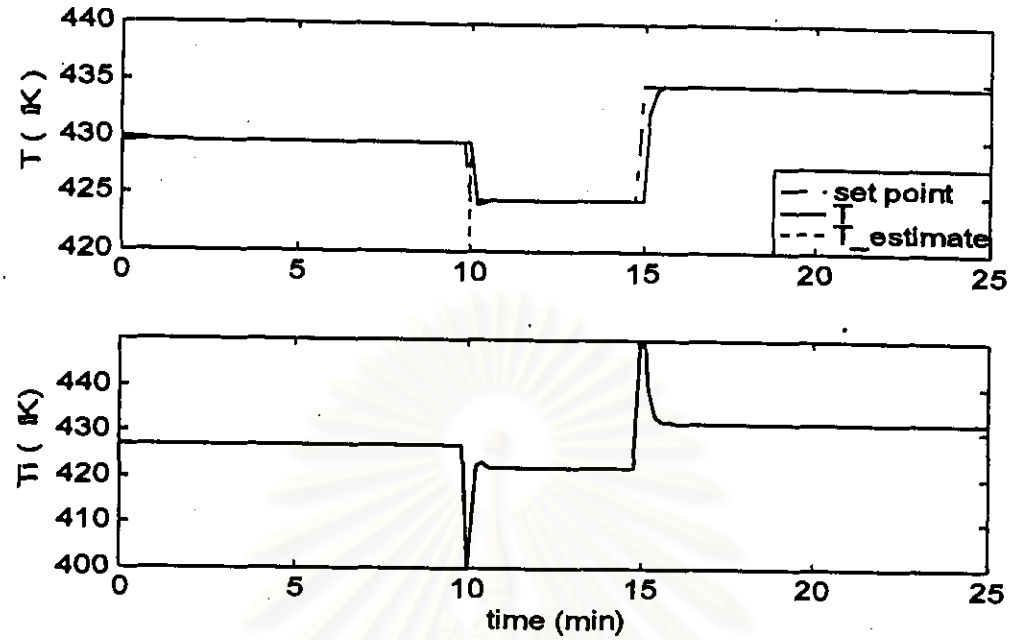
ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์และกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุม พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้น 30 % สำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ แสดงดังรูปที่ 5.10 และ พีไอดี แสดงดังรูปที่ 5.11 และกรณีที่ค่า

คงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30% สำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแสดงดังรูปที่ 5.12 และพีไอดี แสดงดังรูปที่ 5.13 พบว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสามารถควบคุมกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการได้แม้ว่าจะมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการ โดยให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีซึ่งให้ค่าอินทีกรัลสัมบูรณ์ของความผิดพลาดมากกว่า ดังพิจารณาจากตารางที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีความทนทานสูงกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์และมีความผิดพลาดของกระบวนการที่ทำการควบคุม

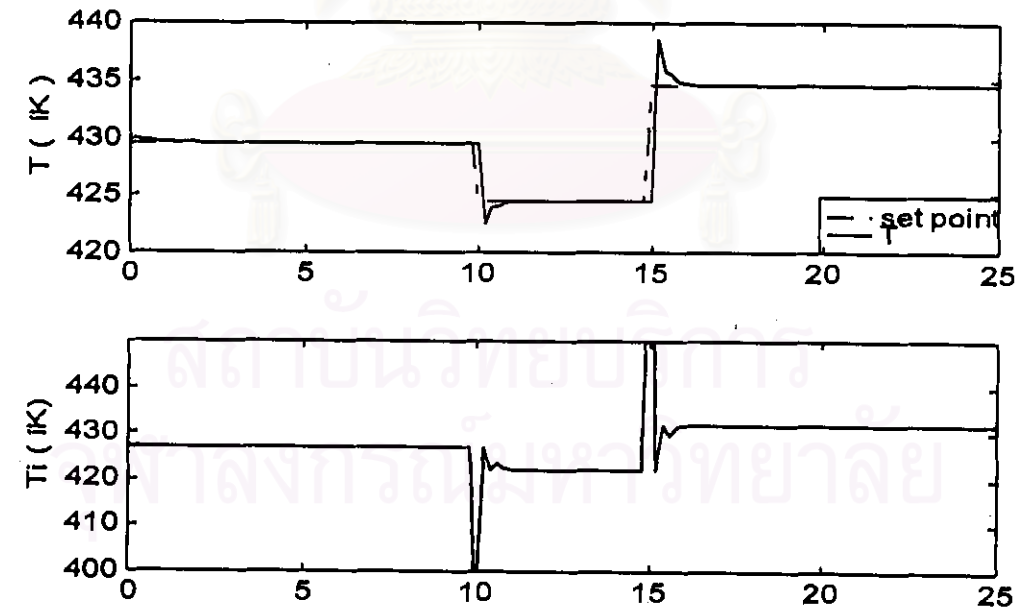
ตารางที่ 5.5 แสดงค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเซ็ทพอยท์มีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ปสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

กรณีการควบคุม	MPC	PID
2. ควบคุมอุณหภูมิเมื่อค่าเซ็ทพอยท์มีการเปลี่ยนแปลง		
2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม	4.2	5.5
2.2 การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุม		
2.2.1 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม		
2.2.1 ก. ΔH เพิ่มขึ้น 30 %	4.2	-
2.2.1 ข. k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30 %	4.2	-
2.2.2 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ		
2.2.2 ก. ΔH เพิ่มขึ้น 30 %	11.1	12.5
2.2.2 ข. k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30 %	5.5	6.8

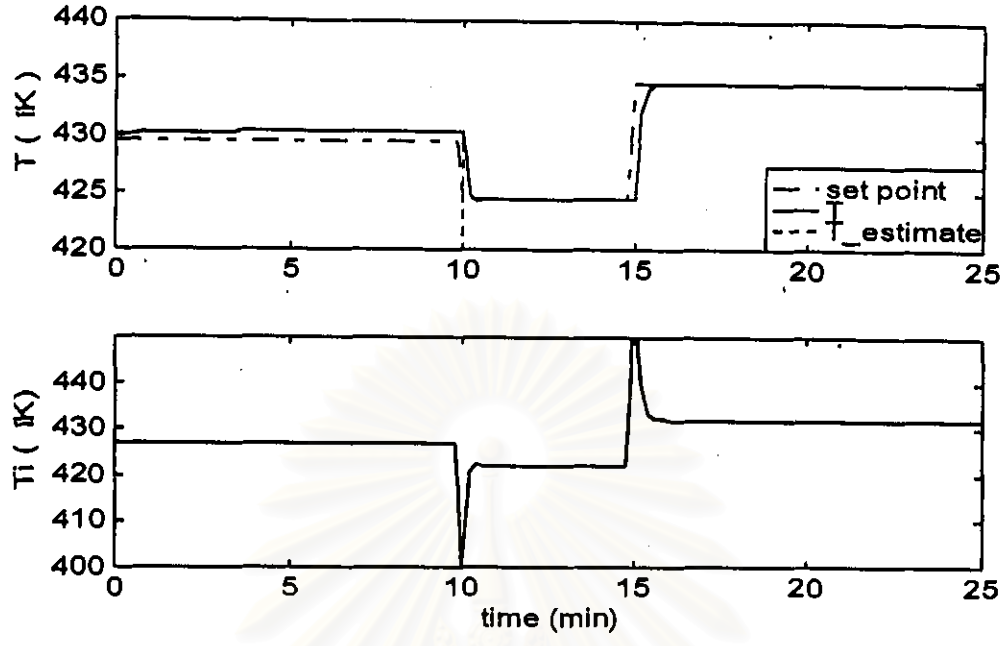
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



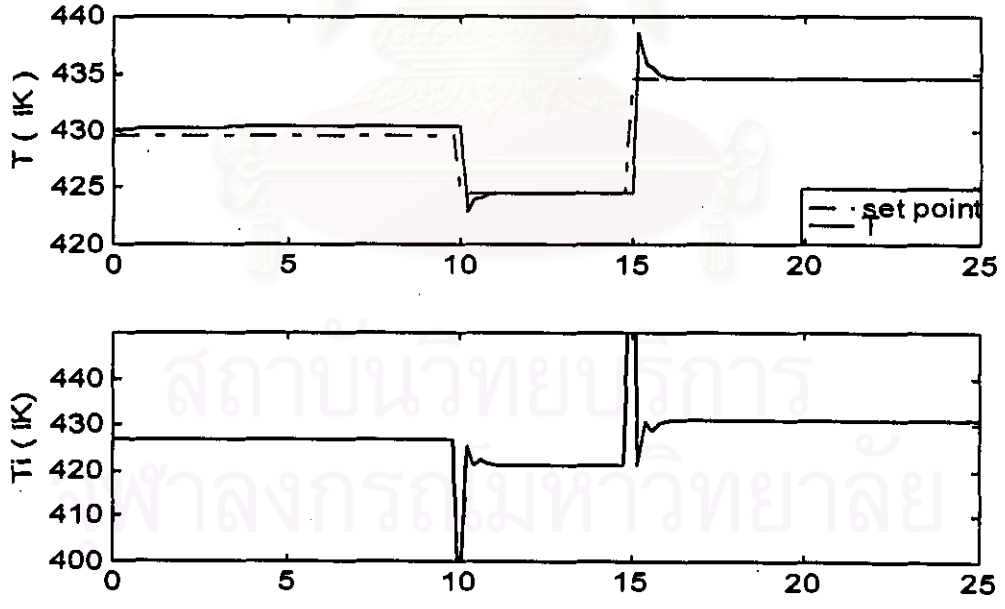
รูปที่ 5.8 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์โดยการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ



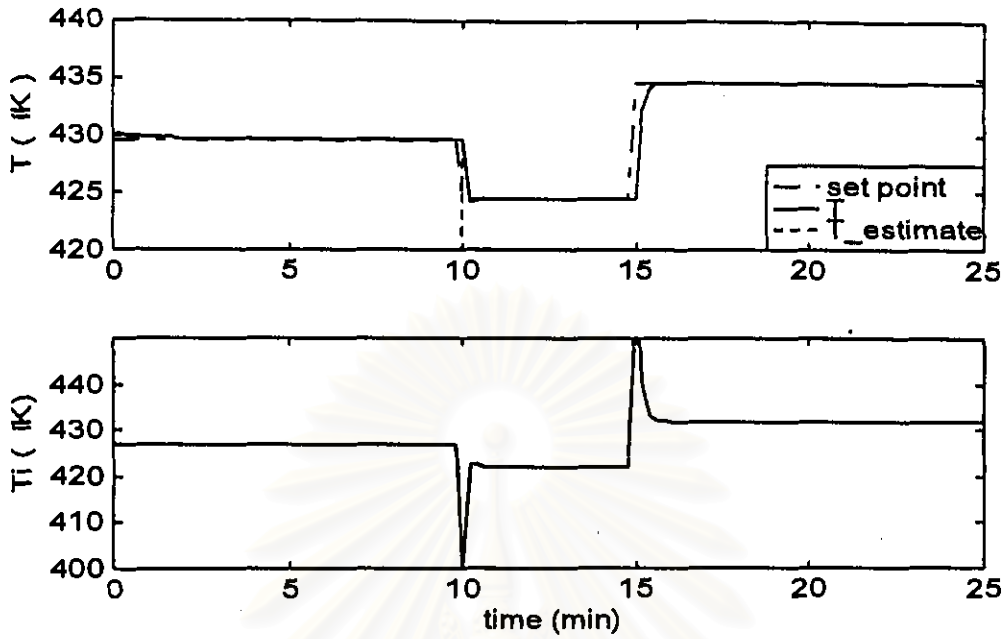
รูปที่ 5.9 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์โดยการควบคุมแบบพีไอดี



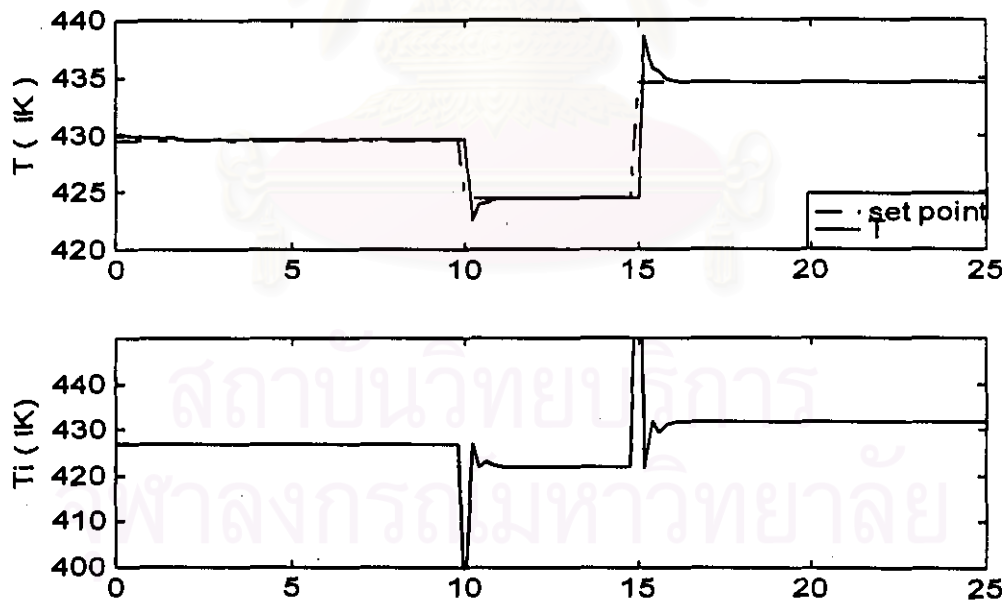
รูปที่ 5.10 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์และมีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้น 30%) โดยการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ



รูปที่ 5.11 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์และมีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้น 30%) โดยการควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 5.12 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์และมีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ(k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30%) โดยการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ



รูปที่ 5.13 ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์และมีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ(k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30%) โดยการควบคุมแบบพีไอดี

5.3.2 การควบคุมความเข้มข้น

ในการควบคุมใช้ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟและคาลมานฟิลเตอร์สำหรับการควบคุมความเข้มข้นแสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟในการควบคุมความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

Controller Parameters	Estimator Parameters
P = 10	Q = diag[10000 1 1 1]
M = 10	R = [1]
Ywt = 10000	
Uwt = 1	

และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนเครื่องควบคุมแบบพีไอดีแสดงดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟในการควบคุมความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

	PID Tunning Parameters	
K_c = 16.5	τ_i = 0.15	τ_d = 0.03

พิจารณาการตอบสนองของกระบวนการสำหรับกรณีต่าง ๆ ในการทดลองดังนี้

1. การควบคุมความเข้มข้นเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ป

1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม

วัตถุประสงค์ในการจำลองการควบคุมคือเพื่อควบคุมความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ให้อยู่ที่ค่าเซ็ทพอยท์ [$B = 0.5054$] ในกรณีที่ค่าตัวแปรรบกวนระบบมีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ป เช่นเดียวกับกรณีการควบคุมอุณหภูมิ พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่อาศัยค่าพารามิเตอร์ปรับจูนในตารางที่ 5.6 แสดงดังรูปที่ 5.14 เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดีที่อาศัยค่าพารามิเตอร์ปรับจูนในตารางที่ 5.7 แสดงดังรูปที่ 5.15 พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระบบเปลี่ยนแปลงไปสู่สภาวะคงตัวค่าใหม่ที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเริ่มทำการควบคุมที่เวลา 15 นาที เครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟจะสามารถปรับสภาพของกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ได้รวดเร็วกว่า ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีการตอบสนองที่ช้าและมีค่าออฟเซ็ทในการควบคุมมาก และพิจารณาได้จากค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 5.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้สมรรถนะที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบ

1.2 การทดสอบความทนทานของการควบคุม

1.2.1 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม

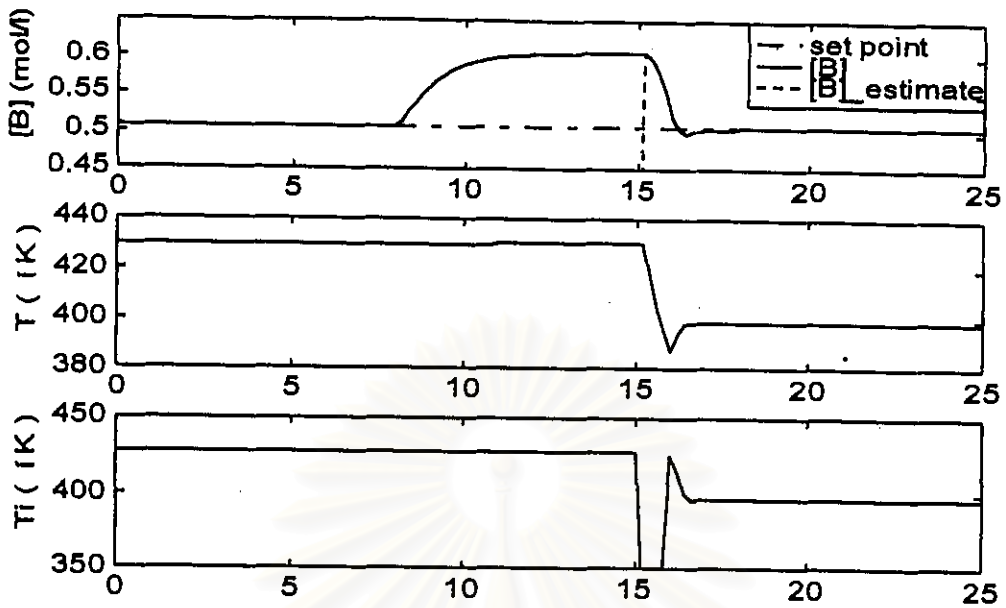
ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ พิจารณาผลการควบคุมของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่อาศัยค่าพารามิเตอร์ปรับจูนจากตารางที่ 5.6 ในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้น 30% แสดงดังรูปที่ ฉ.10 และกรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า, k_1 และค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ, k_{-1} เพิ่มขึ้น 30 % แสดงดังรูป ฉ.11 ในภาคผนวก ฉ. ตามลำดับและพิจารณาค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) ในการควบคุมจากตารางที่ 5.8

เปรียบเทียบกับการควบคุมในกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดดังกล่าว พบว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีความทนทาน สามารถควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุมดังกล่าวได้

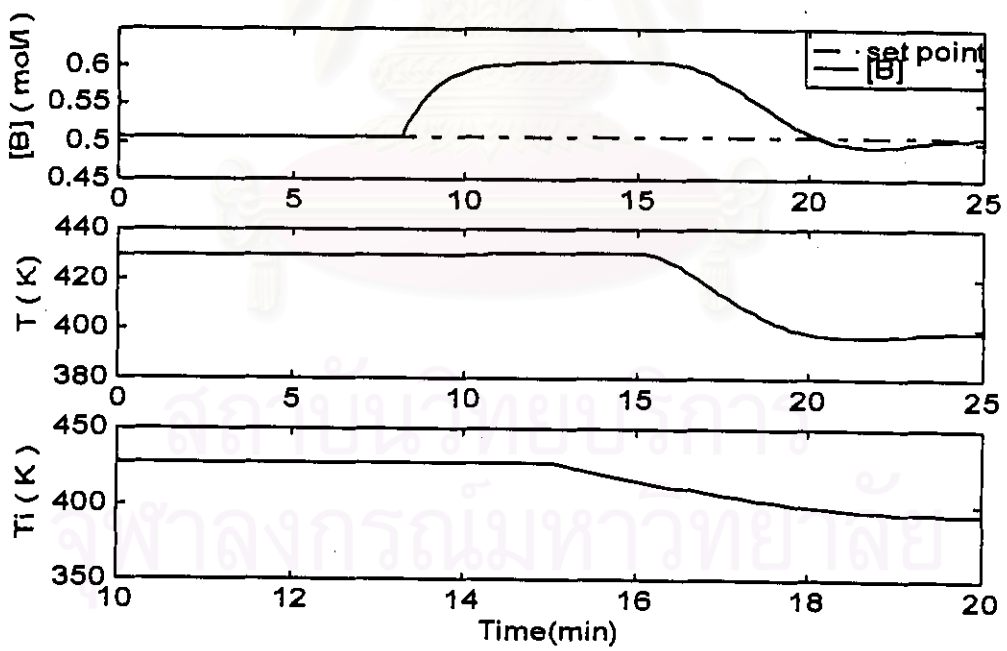
1.2.2 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบ และกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการที่ควบคุม พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้น 30% สำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแสดงดังรูปที่ 5.16 และพีไอดี แสดงดังรูปที่ 5.17 และกรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับ, k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น30 % สำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแสดงดังรูปที่ 5.18 และ พีไอดีแสดงดังรูปที่ 5.19 พบว่าเมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการจะส่งผลให้กระบวนการเปลี่ยนแปลงไปซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีที่มีความผิดพลาดของค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อยังไม่มีการควบคุม จนเริ่มทำการควบคุมพบว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟยังสามารถควบคุมกระบวนการได้ดีเทียบเท่ากับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด และให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีซึ่งจะมีค่าออฟเซ็ทในการควบคุมมากกว่ากรณีที่ไม่มีความผิดพลาด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 5.8 พบว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีความทนทานสูงกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการดังกล่าว

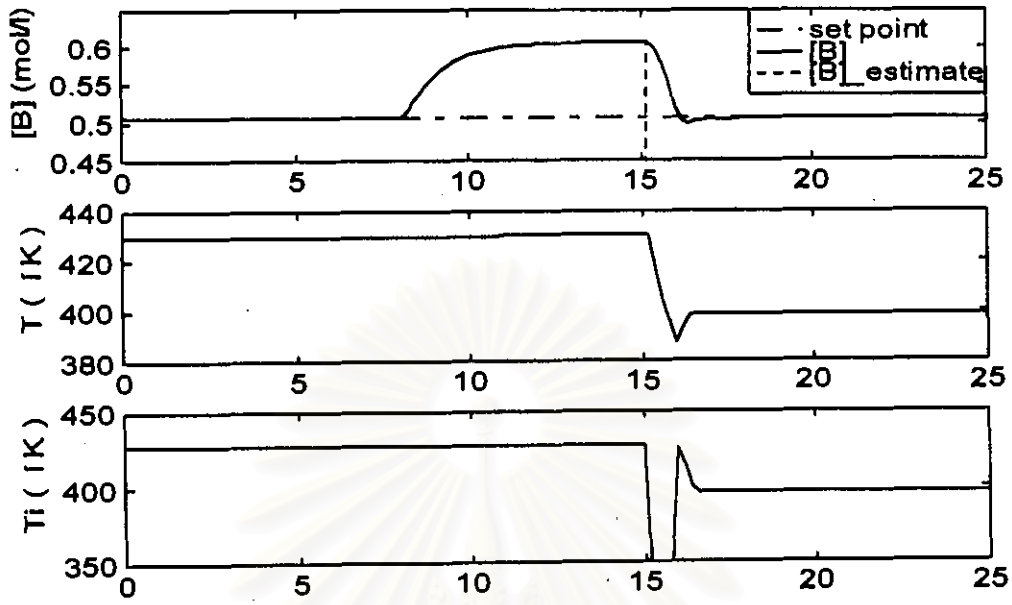
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



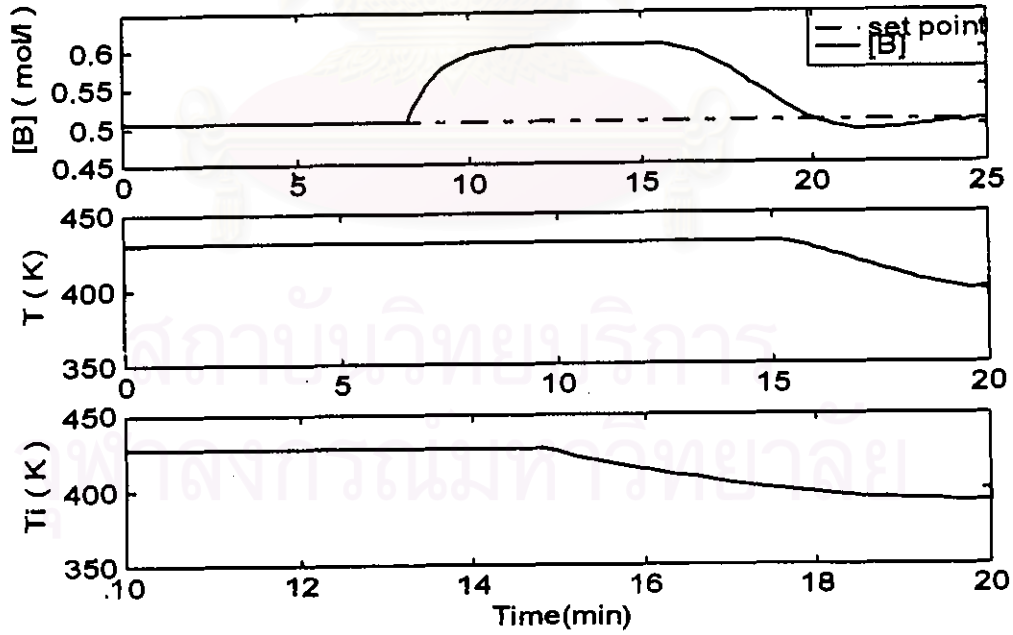
รูปที่ 5.14 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าการรบกวนระบบโดยระบบควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ



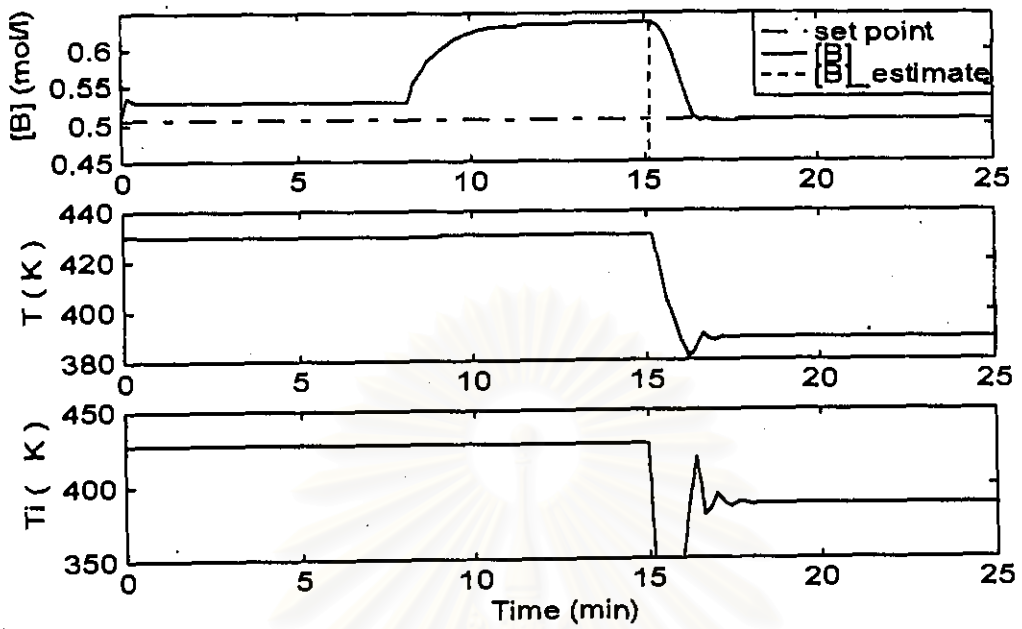
รูปที่ 5.15 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าการรบกวนระบบโดยระบบควบคุมแบบพีไอดี



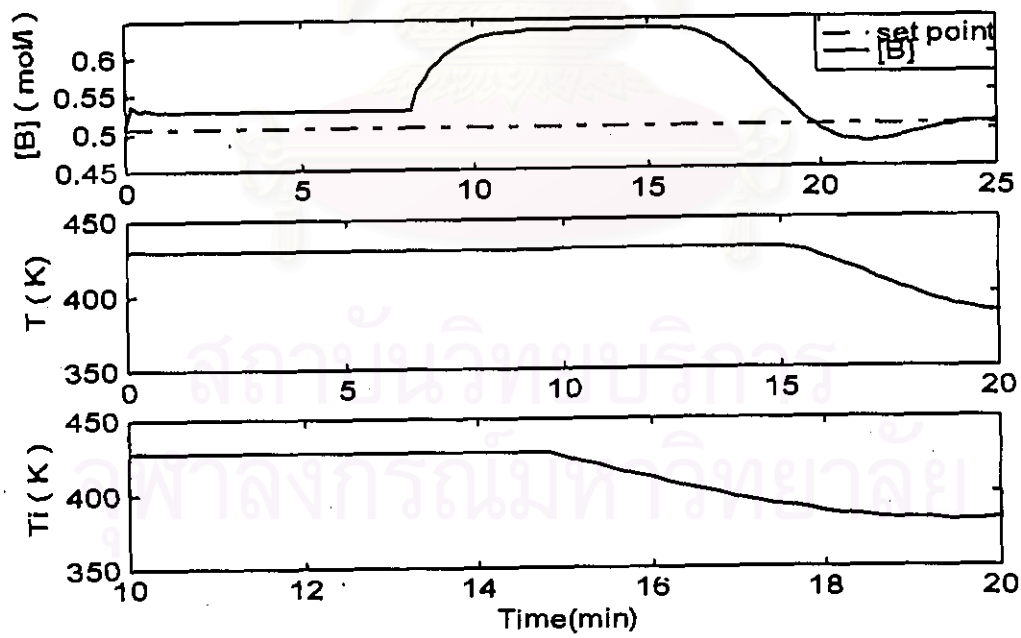
รูปที่ 5.16 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าการรบกวนระบบเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้น 30%) โดยระบบควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ



รูปที่ 5.17 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าการรบกวนระบบเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้น 30%) โดยระบบควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 5.18 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าการรบกวนระบบโดยที่ k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30% โดยระบบควบคุมแบบไมเคลพรีดิกทีฟ



รูปที่ 5.19 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าการรบกวนระบบโดยที่ k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30% โดยระบบควบคุมแบบพีไอดี

ตารางที่ 5.8 แสดงค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมความเข้มข้นเมื่อตัวรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็บสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

กรณีการควบคุม	MPC	PID
1. ควบคุมความเข้มข้นเมื่อตัวรบกวนระบบมีการเปลี่ยนแปลง		
1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม	0.67	0.94
1.2 การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุม		
1.2.1 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม		
1.2.1 ก. ΔH เพิ่มขึ้น 30 %	0.67	-
1.2.1 ข. k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30 %	0.67	-
1.2.2 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ		
1.2.2 ก. ΔH เพิ่มขึ้น 30 %	0.68	0.97
1.2.2 ข. k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30 %	1.10	1.50

2. การควบคุมความเข้มข้นเมื่อค่าเซ็ทพอยท์มีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็บ

2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม

ในการจำลองกำหนดให้เซ็ทพอยท์เปลี่ยนแปลงแบบสเต็บลดลง 10% ที่เวลา 10 นาทีหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวค่าแรก [$B = 0.5054$] แล้วจากนั้นกำหนดให้เซ็ทพอยท์มีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็บเพิ่มขึ้น 10 % พิจารณาการตอบสนองของกระบวนการเป็นเวลา 20 นาที เปรียบเทียบผลการควบคุมในการติดตามค่าเซ็ทพอยท์ สำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่อาศัยค่าพารามิเตอร์ปรับจูนในตารางที่ 5.6 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.20 และการควบคุมแบบพีไอดีที่อาศัยค่าพารามิเตอร์ปรับจูนในตารางที่ 5.7 แสดงดังรูปที่ 5.21 พบว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสามารถควบคุมความเข้มข้นให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการควบคุมได้เป็นอย่างดีทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์ลดลงและเพิ่มขึ้น ในขณะที่เครื่องควบคุมแบบพีไอดีมีการตอบสนองที่ช้า

กว่ามากจนไม่สามารถควบคุมกระบวนการที่ค่าเซ็ทพอยท์แรกในเวลาที่กำหนดก่อนที่ค่าเซ็ทพอยท์จะมีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็บเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งเครื่องควบคุมต้องอาศัยเวลาในการปรับสภาพกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ค่าที่สองโดยยังค่ามีออฟเซ็ทในการควบคุม นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 5.9 พบว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี ในการควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์ในการควบคุม

2.2 การทดสอบความทนทานของการควบคุม

2.2.1 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์ และกำหนดให้มีความผิดพลาดของของเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้น 30 % แสดงดังรูปที่ ฉ.12 และกรณีที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับ, k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น30 % แสดงดังรูปที่ ฉ.13 ในภาคผนวก ฉ. และพิจารณาค่าอินทีกรัลสัมบูรณ์ของความผิดพลาดในตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด พบว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีความทนทาน สามารถควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์และมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมดังกล่าว

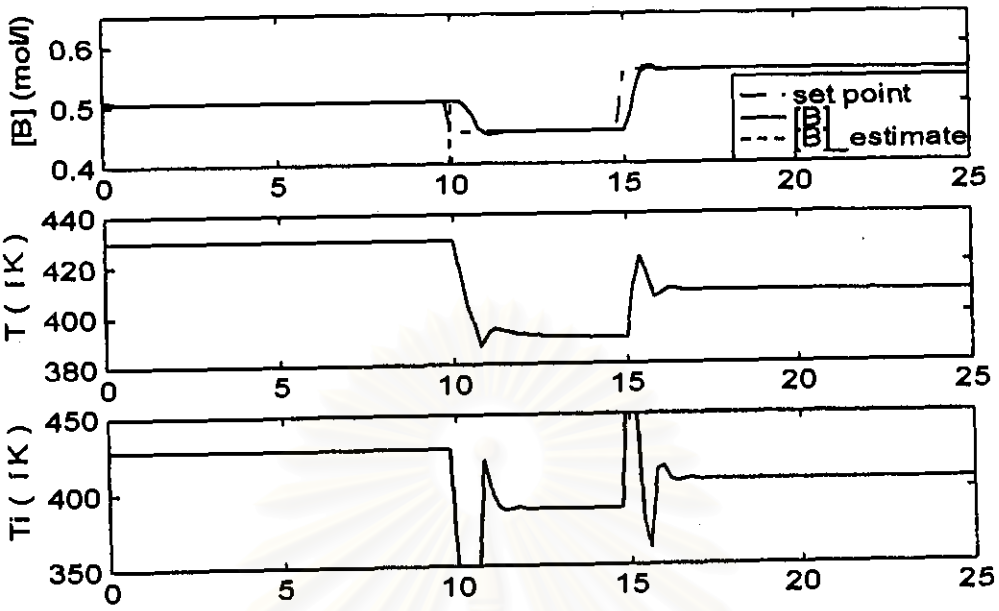
2.2.2 การควบคุมเมื่อมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ

ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์ พิจารณาผลการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยา, ΔH เพิ่มขึ้น 30 % สำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแสดงดังรูปที่ 5.22 และ พีไอดีแสดงดังรูปที่ 5.23 และกรณี

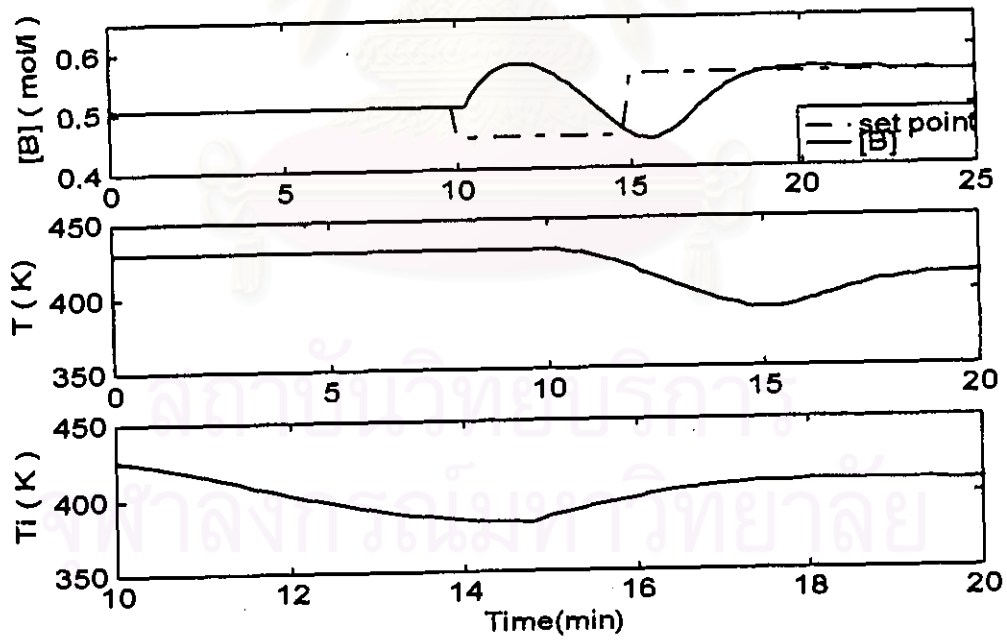
ที่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับ, k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น30 % สำหรับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ แสดงดังรูปที่ 5.24 และพีไอดีแสดงดังรูปที่ 5.25 ตามลำดับพบว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด และให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งไม่สามารถควบคุมกระบวนการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์ลดลงได้และยังใช้เวลาในการปรับตัวเข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่เพิ่มขึ้นช้ากว่า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากตารางที่ 5.9 พบว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้ค่าความผิดพลาดในการควบคุมน้อยกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดี แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีความทนทานสูงกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมความเข้มข้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์และมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการดังกล่าว

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าอินทีกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) จากการควบคุมความเข้มข้นเมื่อค่าเซ็ทพอยท์มีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็บสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถังกวนแบบต่อเนื่องที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้

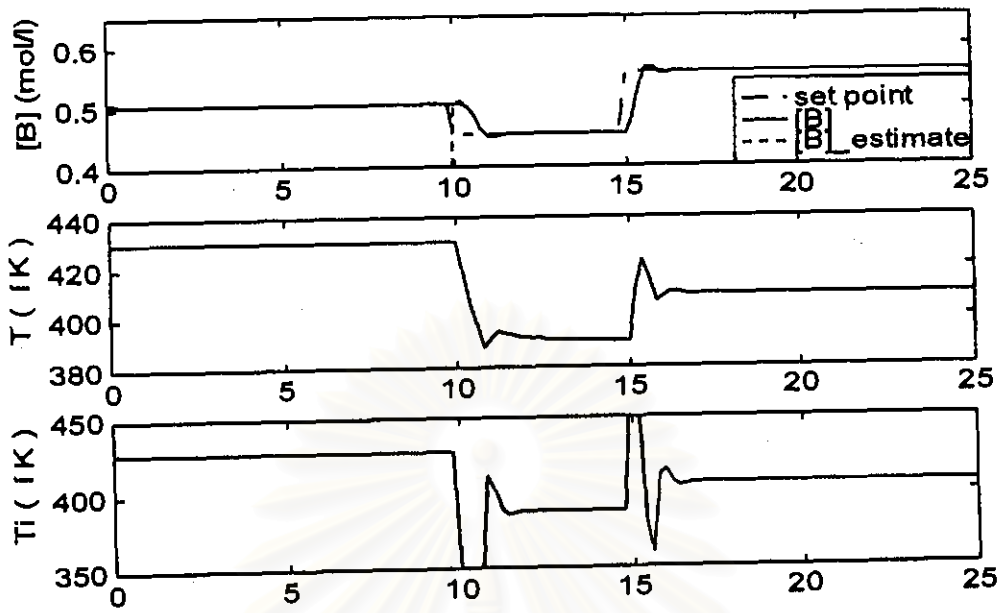
กรณีการควบคุม	MPC	PID
2. ควบคุมความเข้มข้นเมื่อค่าเซ็ทพอยท์มีการเปลี่ยนแปลง		
2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม	0.05	0.35
2.2 การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุม		
2.2.1 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของเครื่องควบคุม		
2.2.1 ก. ΔH เพิ่มขึ้น 30 %	0.05	-
2.2.1 ข. k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30 %	0.05	-
2.2.2 มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ		
2.2.2 ก. ΔH เพิ่มขึ้น 30 %	0.07	0.36
2.2.2 ข. k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30 %	0.31	0.66



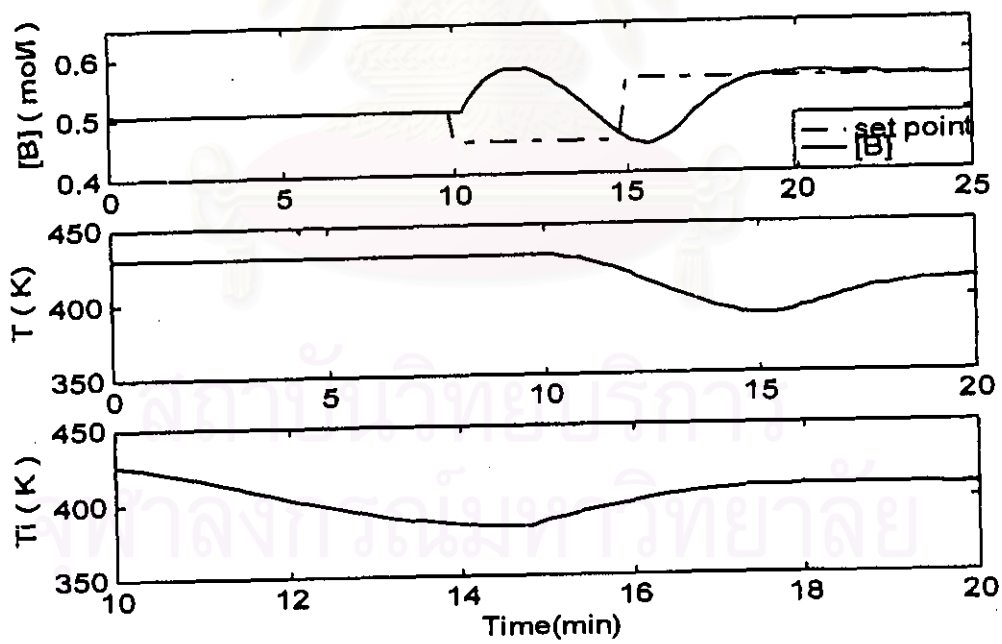
รูปที่ 5.20 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์โดยระบบควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ



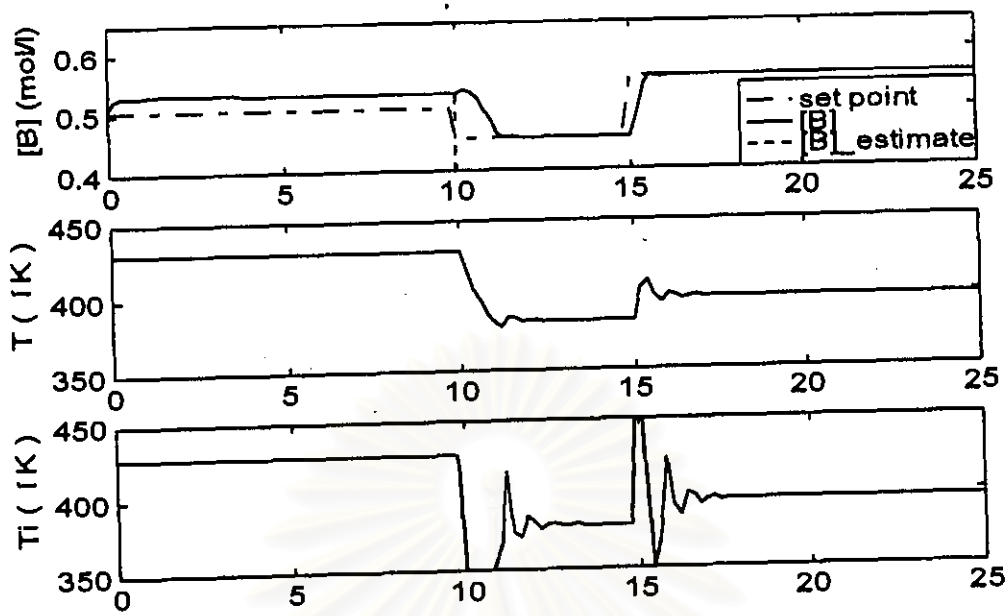
รูปที่ 5.21 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าการรบกวนระบบโดยระบบควบคุมแบบพีไอดี



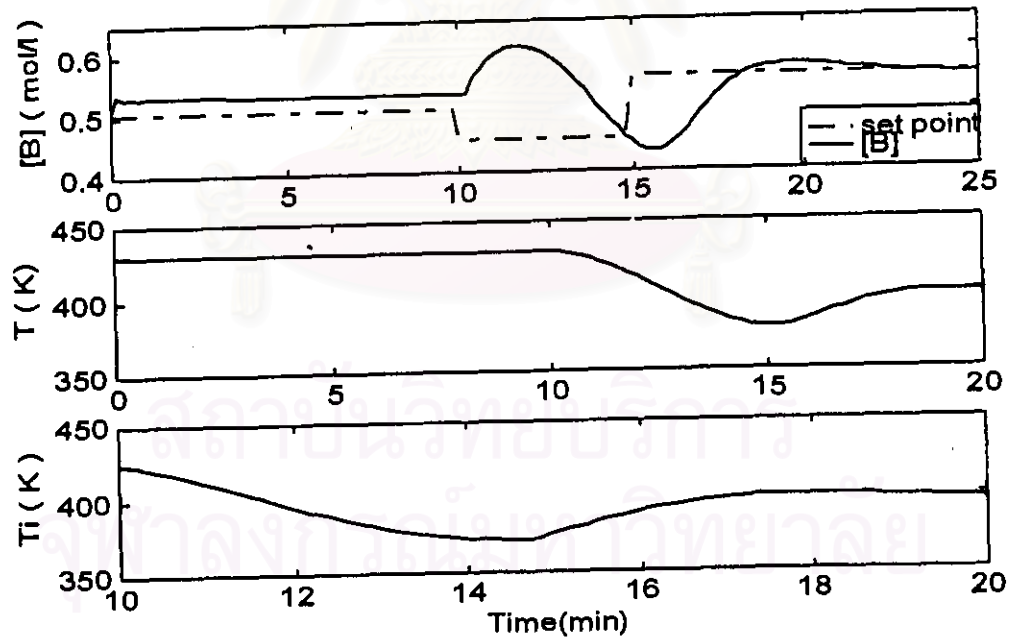
รูปที่ 5.22 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์และมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้น 30%) โดยระบบควบคุมแบบไมเดลพรีดิกทีฟ



รูปที่ 5.23 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์และมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (ΔH เพิ่มขึ้น 30%) โดยระบบควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 5.24 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์และมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30%) โดยระบบควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ



รูปที่ 5.25 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์และมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (k_1 และ k_{-1} เพิ่มขึ้น 30%) โดยระบบควบคุมแบบพีไอดี