บทที่ 5

การออกแบบและการทดสอบตัวควบคุมฟัซซี

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลของระบบถังทรงกลม ซึ่งคุณลักษณ์ของกระบวนการไม่คงที่เปลี่ยนไปตามย่านของสภาวะปฏิบัติการ โดยที่ค่าเกนของกระบวนการมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนจุดปฏิบัติการ ตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลสามารถออกแบบได้โดยใช้แบบจำลองผกผัน หลังจากนั้นเป็นการกล่าวถึงผลการปรับจูนตัวควบคุมที่ใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะกับตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบกำหนดค่าเกนต่างๆ กัน และตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ออกแบบโดยใช้กฎการควบคุมในงานวิจัยของนฤพนธ์ (2539) สุดท้ายเป็นการกล่าวถึงผลการทดสอบการควบคุมในด้านของสมรรถนะและความทนทานของตัวควบคุมทั้งหมด

5.1 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลของระบบถังทรงกลม

งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้น สามารถออกแบบได้จากแบบจำลองฟัซซี โดยทำการผกผันแบบจำลองฟัซซีที่ระบุได้ในบทที่ 4 อัลกอริธึมในการออกแบบแสดงไว้ในหัวข้อ 3.11 โครงสร้างการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล มีลักษณะคล้ายการควบคุมแบบใช้โมเดลภายใน (Internal model control) ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการ แบบจำลอง ตัวกรอง และตัวควบคุม โครงสร้างการควบคุมแบบนี้ต้องมี

การปรับค่าพารามิเตอร์ในตัวกรองเพื่อให้ได้ผลการควบคุมเป็นไปตามค่าที่ต้องการและให้ระบบมีเสถียรภาพ

ผลจากการระบุหาแบบจำลองฟัซซีในบทที่ 4 พบว่าแบบจำลองฟัซซีที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการสร้างตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล คือแบบจำลองที่ระบุได้จากกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งมีจำนวนกฎฟัซซีเท่ากับ 10 กฎ จากอัลกอริธึมของการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลในหัวข้อ 3.11 สามารถเขียนกฎการควบคุมของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังทรงกลมได้ดังนี้

$$Q_i(k) = \frac{r(k+1) - \sum_{i=1}^{m} \lambda_i(h(k))(p_2^i h(k) + p_0^i)}{\sum_{i=1}^{m} \lambda_i(h(k)) p_1^i} \tag{5.1}$$

โดยที่

$$\lambda_i(k) = \frac{\mu_{A_i}(h(k))}{\sum_{j=1}^{m} \mu_{A_j}(h(k))} \tag{5.2}$$

p_0^i, p_1^i, p_2^i เป็นค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นในส่วนผลสรุปของกฎที่ i ของแบบจำลองฟัซซีของกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งมีค่าตามตารางที่ 5.2

μ_{A_i} เป็นค่าระดับความเป็นสมาชิกของระดับความสูงของน้ำในฟัซซีเซต A_i ของกฎข้อที่ i

ผลการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวกรอง แสดงได้ดังนี้

O_{sf} = 0 และ O_{cr} = 0.9

5.2 ผลการปรับจูนตัวควบคุมที่ใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุม

ตัวควบคุมที่จะใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะกับตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล ประกอบด้วยตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบกำหนดค่าเกนต่างๆ กัน และตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ออกแบบโดยใช้กฎการควบคุมในงานวิจัยของนฤพนธ์ (2539)

5.2.1 ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ออกแบบโดยนฤพนธ์ (2539)

ตัวควบคุมนี้ออกแบบโดยใช้ความรู้และประสบการณ์ ซึ่งใช้กลยุทธ์ของการแบ่งย่านการควบคุมออกเป็นย่านเกนสูงและย่านเกนต่ำ ดังนั้นจึงมีกฎที่ใช้เฉพาะในแต่ละย่าน สามารถที่จะเลือกออกแบบหรือกำหนดลักษณะของสัญญาณเอาท์พุทให้มีค่าที่สอดคล้องกับย่านของเกนของกระบวนการต่างๆ ได้ เช่นการทำงานในย่านเกนสูงลักษณะของสัญญาณเอาท์พุทจะเป็นแบบนุ่มนวลค่อยเป็นค่อยไป แต่สำหรับย่านเกนต่ำเอาท์พุทจะเป็นแบบเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

ตัวแปรอินพุทในกฎการควบคุมประกอบด้วย ความผิดพลาด e อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด ce และ ตัวแปรช่วย AV ซึ่งจะเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ย่านปฏิบัติการภายในกระบวนการ ตัวแปรเอาท์พุทคือ Δu สมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ แสดงได้ดังนี้

$$\Delta u = f(e, ce, AV) \tag{5.3}$$

โดยที่ f เป็นการแสดงความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

ตัวแปรทั้งหมดจะถูกสเกลค่าให้อยู่ในช่วงเอกภพ [-1, 1] ค่าของแต่ละตัวแปรจะถูกปรับให้มีช่วงกว้างหรือแคบซึ่งกำหนดโดยแฟคเตอร์การสเกล การสเกลค่าตัวแปรต่างๆจะแสดงได้ดังนี้

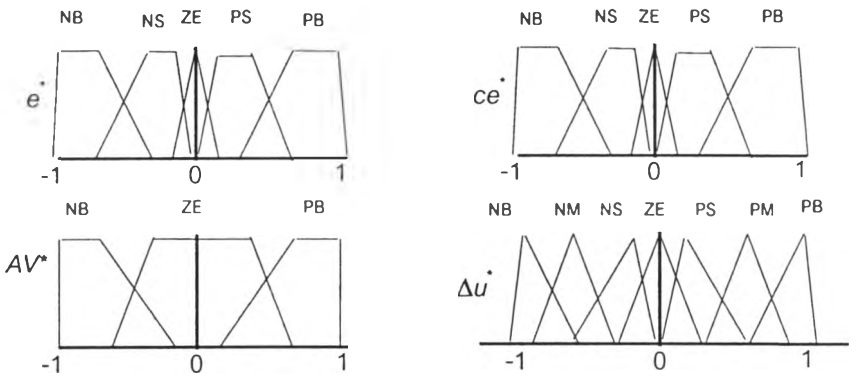
$$e^{\cdot} = e/S_e \tag{5.4}$$

$$ce^{\cdot} = ce/S_{ce} \tag{5.5}$$

$$\Delta u^{\cdot} = \Delta u/S_{\Delta u} \tag{5.6}$$

โดย S_e, S_{ce} และ S_{Δ_u} คือแฟคเตอร์การสเกลของ e, ce และ Δu ตามลำดับ

ฟังก์ชันสมาชิกของจำนวนฟัซซีเซตที่นิยามสำหรับตัวแปรต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.1 ฟัซซีเซ็ต



รูปที่ 5.1 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

โดยที่ PB = Positive Big PM = Positive Medium

PS = Positive Small ZE = Zero

NS = Negative Small NM= Negative Medium

NB = Negative Big

จำนวนกฎที่เป็นไปได้ทั้งหมดของทั้ง 3 ย่านการทำงานจะมีจำนวน 75 กฎ หลังจากทำการตัดกฎที่ไม่จำเป็นออกแล้วจะเหลือจำนวนกฎที่ใช้ทั้งหมด 57 กฎ ลักษณะของกฎฟัซซีที่ใช้ทั้งหมด แสดงในตาราง ที่ 5.1-5.3 สามารถเขียนกฎการควบคุมในรูปแบบทั่วไปได้ยกตัวอย่างเช่น

พิจารณาตารางที่ 5.2 (ย่านการทำงานที่ 2)

คู่ลำดับ e = PB, ce = NB

IF e is PB AND ce is NB AND AV is ZE THEN CO is PB (5.7)

คู่ลำดับ e = PS, ce = NB

IF e is PS AND ce is NB AND AV is ZE THEN CO is NM (5.8)

ตารางที่ 5.1 กฎฟัซซีในย่านการทำงานที่ 1 (*AV is PB*)

$ce^{\cdot}$ \ $e^{\cdot}$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	**NB**	**NM**	**NS**	**NB**	**PB**
NS		**NS**	**NS**	**PS**	
ZE		**NS**	**ZE**	**PS**	
PS		**PS**	**PS**	**PS**	
PB	**NB**	**PM**	**PS**	**PM**	**PM**

ตารางที่ 5.2 กฎฟัซซีในย่านการทำงานที่ 2 (*AV is ZE*)

$ce^{\cdot}$ \ e	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	**NB**	**NB**	**NM**	**NM**	**PB**
NS		**NS**	**NS**	**PS**	
ZE		**NS**	**ZE**	**PS**	
PS		**NS**	**PS**	**PM**	
PB	**NB**	**PS**	**PM**	**PB**	**PB**

ตารางที่ 5.3 กฎฟัซซีในย่านการทำงานที่ 3 (*AV is NB*)

ce \ e	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	**NB**	**NM**	**NS**	**PS**	**PB**
NS		**NS**	**NS**	**PM**	
ZE		**NS**	**ZE**	**PM**	
PS		**PS**	**PS**	**PB**	
PB	**NB**	**PM**	**PS**	**PB**	**PB**

ค่าพารามิเตอร์ปรับจูนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทดลองนี้คือ

$$S_e = 40 \quad S_{ce} = 5 \quad S_{\Delta u} = 50$$

5.2.2 ตัวควบคุมพีไอ

ตัวควบคุมพีไอจะปรับค่าโดยใช้วิธีการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Continuous cycling method) ของซีลเกอร์นิคโคลส์ (Seborg et al.,1989) การปรับค่าทำที่ระดับความสูงปฏิบัติการ 50% ซึ่งใช้เป็นระดับปฏิบัติการที่สภาวะปกติของกระบวนการ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับค่าแสดงได้ดังนี้

$$K_c = 2.11 \qquad \tau_i = 0.84$$

5.2.3 ตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน

การปรับค่าตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กันทำการค่าในลักษณะที่คล้ายกับการปรับค่าตัวควบคุมพีไอแบบทั่วไป แต่การปรับค่า K_c และ τ_i จะทำที่ระดับความสูงต่างๆ กัน ในที่นี้แบ่งเป็น 3 จุดปฏิบัติการ ผลการปรับค่าในแต่ละจุดปฏิบัติการแสดงได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ปรับจูนของตัวควบคุมแบบกำหนดค่าเกนต่างๆ กัน

ระดับความสูงปฏิบัติการ (%)	K_c	τ_i
80	1.68	0.72
50	2.11	0.84
30	1.61	0.70

5.3 ผลการทดสอบตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล

การทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบใช้โมเดล กระทำโดยการเปรียบเทียบกับผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน และตัวควบคุมตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ออกแบบโดยใช้กฎการควบคุมในงานวิจัยของนฤพนธ์ การทดสอบทำโดยทดสอบการตอบสนองของกระบวนการเมื่อมีการเปลี่ยนของค่าเป้าหมายแบบขั้น การเปลี่ยนแปลงของตัวรบกวนการเปลี่ยนย่านการทำงานและเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการผิดพลาดไปจากเดิม โดยใช้เวลาการสุ่มตัวอย่างเท่ากันสำหรับทุกกรณี ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.05 นาที

เกณฑ์การตัดสินสมรรถนะการทำงานของตัวควบคุมทั้งหมดจะใช้หลักการของอินทีกรัลของความผิดพลาด (Integral error) วิธีที่เลือกใช้คืออินทีกรัลของความผิดพลาดสัมบูรณ์ (IAE) ในช่วงเวลาปฏิบัติการ สมการของอินทีกรัลความผิดพลาดสัมบูรณ์คือ

$$IAE = \int_{t_0}^{t} |e(t)|dt \qquad (5.9)$$

เมื่อ t_0 เป็นเวลาเริ่มต้นการอินทีเกรต

t เป็นเวลาสิ้นสุดการอินทีเกรต

$e(t)$ เป็นค่าความผิดพลาดขณะเวลาใดๆ

5.3.1. การทดสอบการตอบสนองของระบบต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้น

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อดูถึงสมรรถนะของการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล ซึ่งทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน และตัวควบคุมฟัซซีลอจิกในแบบงานวิจัยของนฤพนธ์ ซึ่งตัวควบคุมที่ดีนั้นควรจะให้ผลการควบคุมที่สามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายใหม่ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำในกรณีที่มีการเปลี่ยนค่าเป้าหมาย หรือนำกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมายให้เร็วที่สุดเมื่อมีการรบกวนเกิดขึ้นกับระบบ ขั้นตอนการทดสอบแสดงดังนี้

(1) ทำการควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซีที่ระดับความสูงปฏิบัติการค่าเป้าหมาย 50%

(2) ปรับเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้นขึ้น-ลงภายในช่วงเวลา 50 นาทีด้วยค่าการเปลี่ยนแปลง 10 และ 20% บันทึกผลการควบคุมที่ได้

(3) เปลี่ยนเป็นตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน และตัวควบคุมฟัซซีในแบบของงานวิจัยของนฤพนธ์ ตามลำดับ แล้วทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 และ 2

(4) เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมทั้งหมดด้วยเกณฑ์อินทีกรัลความผิดพลาดสัมบรูณ์ ตัวควบคุมที่มีสมรรถนะดีที่สุดจะให้ค่าอินทีกรัลนี้ต่ำที่สุด

ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.2 - 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลการควบคุมระดับความสูงของน้ำต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้น ที่ระดับปฏิบัติการความสูง 50 %

ชนิดของตัวควบคุม	*IAE*
ตัวควบคุมพีไอ	53.2307
ตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน	53.2307
ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (นฤพนธ์)	41.5230
ตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล	30.0017

5.3.2. การทดสอบการตอบสนองของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวรบกวน

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อเปรียบเทียบค่าสมรรถนะของการควบคุมกระบวนการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของตัวรบกวนจากภายนอก ตัวแปรรบกวนเป็นอัตราการไหลของน้ำอีกสายที่ผ่านเข้าระบบ ขั้นตอนการทดสอบแสดงได้ดังนี้

(1) ทำการควบคุมที่ระดับความสูงปฏิบัติการค่าเป้าหมาย 50%

(2) ใส่ตัวแปรรบกวนที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นขึ้นลงอย่างละ 50% ในช่วงเวลา 50 นาที บันทึกผลการควบคุมที่ได้

(3) เปลี่ยนเป็นตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน และตัวควบคุมฟัซซีในแบบงานวิจัยของนฤพนธ์ตามลำดับ แล้วทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 และ 2

(4) เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมทั้งหมดด้วยเกณฑ์อินทีกรัลของความผิดพลาดสัมบรูณ์ ตัวควบคุมที่ดีจะให้ค่าอินทีกรัลความผิดพลาดสัมบรูณ์ต่ำที่สุด

ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.6 - 5.9

ตารางที่ 5.6 ผลการควบคุมระดับน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวนที่ระดับปฏิบัติการความสูง 50 %

ชนิดของตัวควบคุม	*IAE*
ตัวควบคุมพีไอ	1.1359
ตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน	1.1359
ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (นฤพนธ์)	2.5646
ตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล	0.6360

5.3.3 การทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนย่านปฏิบัติการ

การทดสอบนี้เป็นการดูถึงความทนทานต่อการเปลี่ยนย่านปฏิบัติการ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนเกนของกระบวนการจากย่านเกนต่ำไปสู่ย่านเกนสูง ในขั้นตอนนี้จะดูถึงผลของเกนกระบวนการที่มีอิทธิพลต่อการควบคุม ซึ่งตัวควบคุมที่ดีจะต้องสามารถให้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกับการควบคุมในย่านปฏิบัติการปกติมากที่สุด ขั้นตอนการทดสอบแสดงได้ดังนี้

(1) ทำการควบคุมที่ระดับความสูงปฏิบัติการ 80%

(2) เปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้นขึ้น-ลง เช่นเดียวกันกับหัวข้อ 5.3.1

(3) เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมทั้งหมดด้วยเกณฑ์อินทีกรัลของความผิดพลาดสัมบรูณ์

(4) เปลี่ยนย่านปฏิบัติการลงมาที่ระดับความสูง 30% แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 2 และ 3

ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 5.7-5.8 และรูปที่ 5.10-5.17 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้น เมื่อเปลี่ยนจุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 80%

ชนิดของตัวควบคุม	***IAE***
ตัวควบคุมพีไอ	70.4699
ตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน	65.6960
ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (นฤพนธ์)	61.7824
ตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล	49.7215

ตารางที่ 5.8 แสดงผลการทดสอบความทนทาน ต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้น เมื่อเปลี่ยนจุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 30%

ชนิดของตัวควบคุม	***IAE***
ตัวควบคุมพีไอ	50.6314
ตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน	42.2838
ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (นฤพนธ์)	32.2342
ตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล	22.0804

5.3.4 การทดสอบความทนทานของตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลเมื่อค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการมีความผิดพลาด

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อศึกษาถึงความทนทานของตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการมีความผิดพลาดไปจากค่าเดิม พารามิเตอร์ที่ผิดพลาดคือค่าคงที่ของวาล์วขาออก (C_v) ขั้นตอนการทดสอบแสดงได้ดังนี้

(1) ทำการควบคุมที่ระดับความสูงปฏิบัติการ 50%

(2) กำหนดค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผิดพลาดไปจากเดิม +30%

(3) เปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้นขึ้น-ลง เช่นเดียวกับหัวข้อ 5.3.1

(4) ทำการทดสอบเช่นเดียวกันกับตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน และตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (นฤพนธ์) แล้วเปรียบเทียบผลการควบคุม

(5) ทำซ้ำในหัวข้อ 3 และ 4 โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเป็น -30% ตามลำดับ

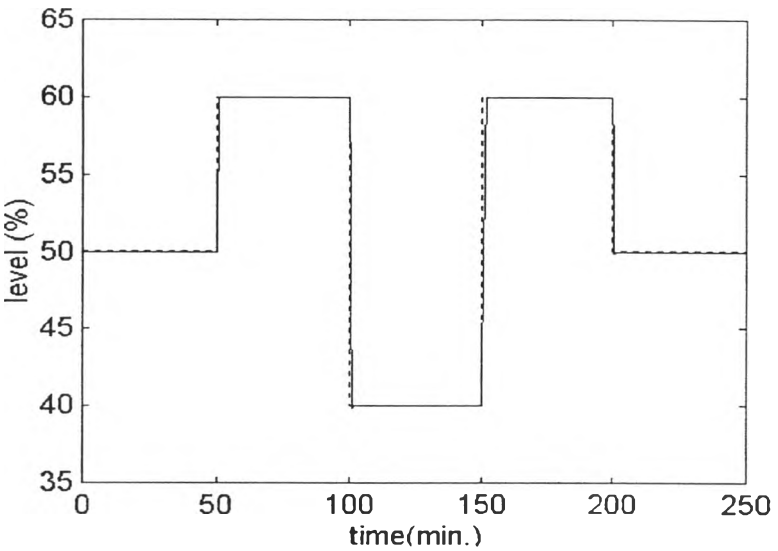
ผลการทดสอบความทนทานต่อความผิดพลาดของพารามิเตอร์ในแบบจำลองแสดงในตารางที่ 5.9-5.10 และรูปที่ 5.14 - 5.20

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการมีความผิดพลาดไป +30 %

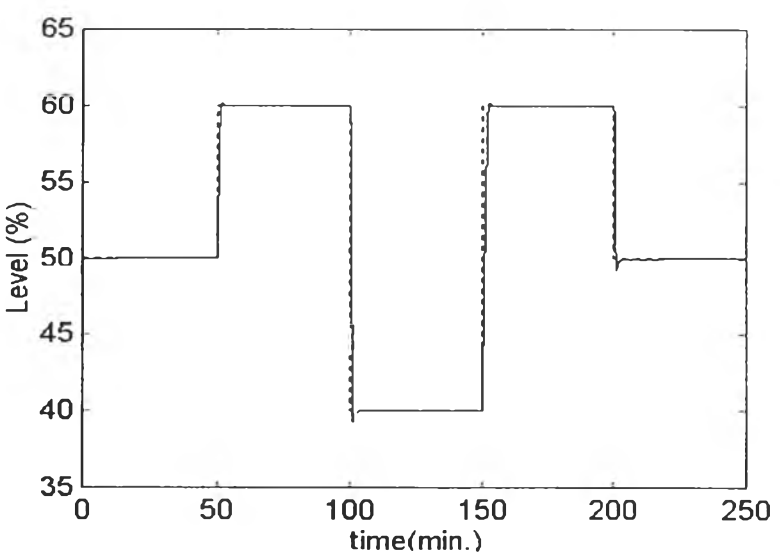
ชนิดของตัวควบคุม	*IAE*
ตัวควบคุมพีไอ	74.1713
ตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน	74.1713
ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (นฤพนธ์)	65.7187
ตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล	54.5588

ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการมีความผิดพลาดไปจากเดิม -30 %

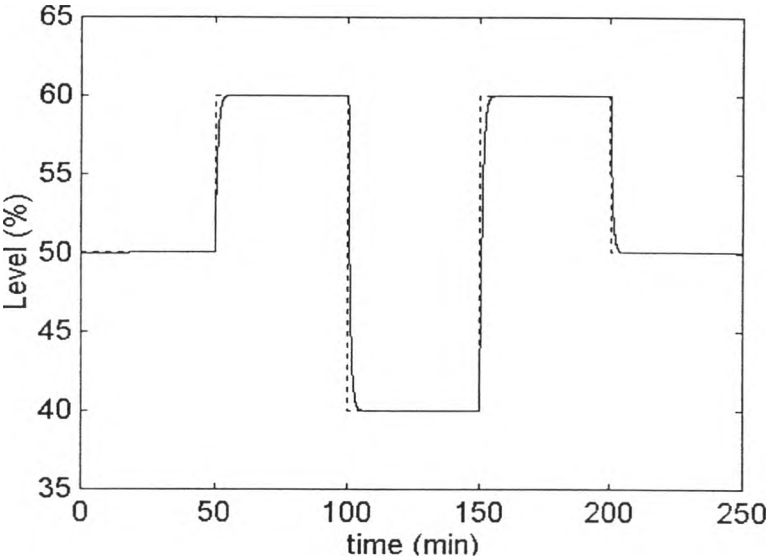
ชนิดของตัวควบคุม	*IAE*
ตัวควบคุมพีไอ	51.9471
ตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน	51.9471
ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (นฤพนธ์)	38.3894
ตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดล	27.6285



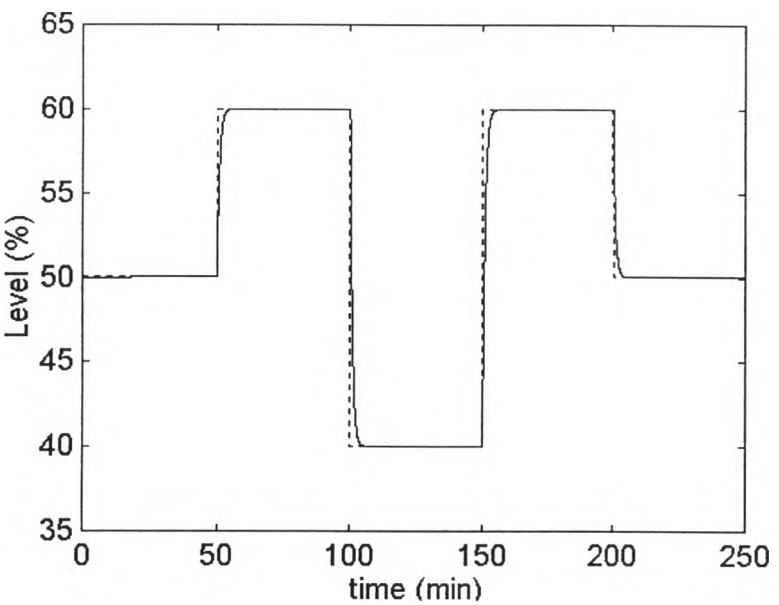
รูปที่ 5.2 ผลการควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้นที่ระดับปฏิบัติการความสูง 50%



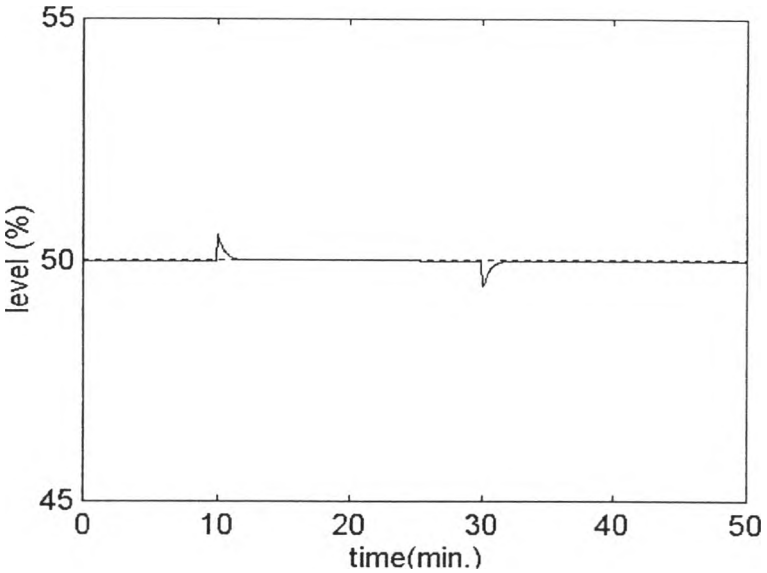
รูปที่ 5.3 ผลการควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (นฤพนธ์) ต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้นที่ระดับปฏิบัติการความสูง 50%



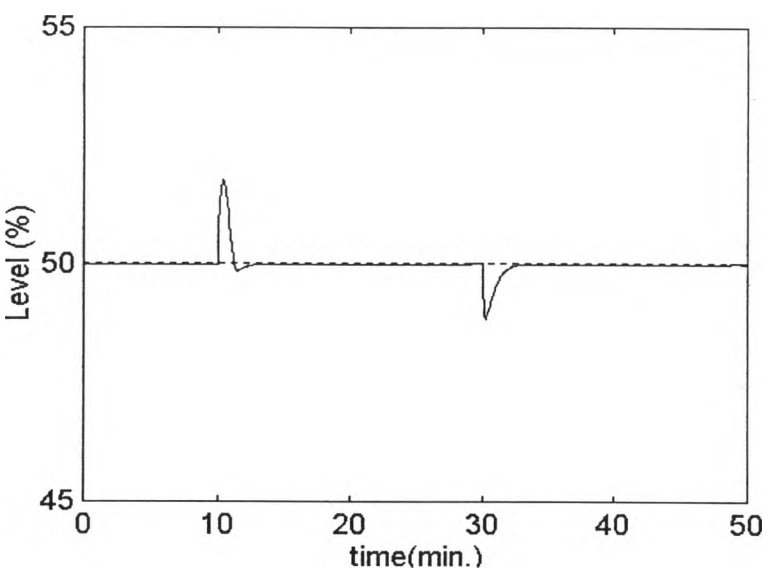
รูปที่ 5.4 ผลการควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน ต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้นที่ระดับปฏิบัติการความสูง 50%



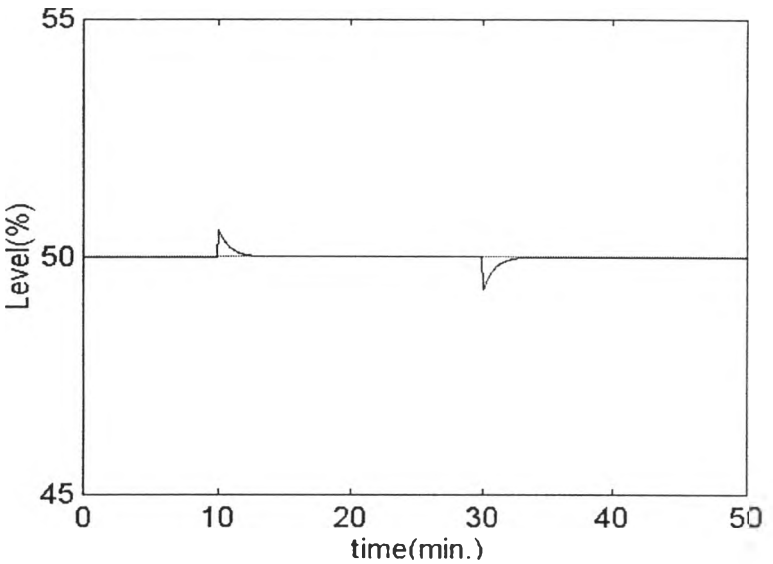
รูปที่ 5.5 ผลการควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ตัวควบคุมพีไอต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้นที่ระดับปฏิบัติการความสูง 50%



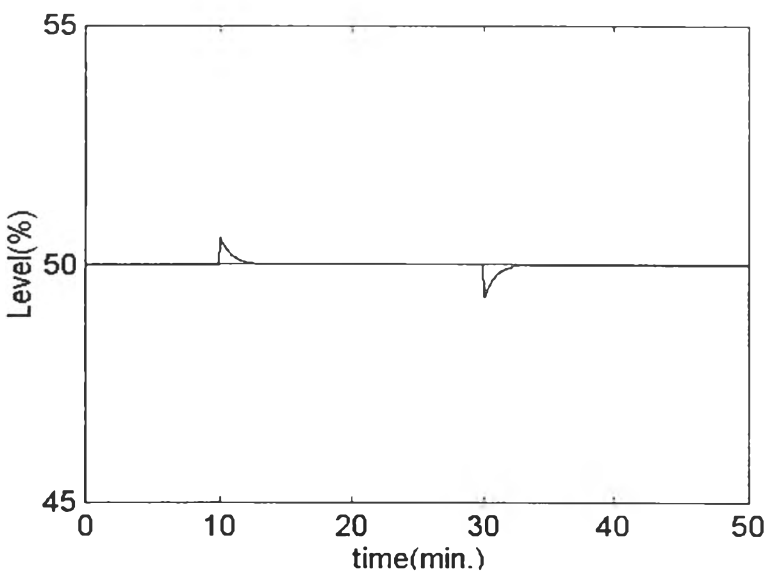
รูปที่ 5.6 ผลการควบคุมระดับของเหลวโดยตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลต่อเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวน



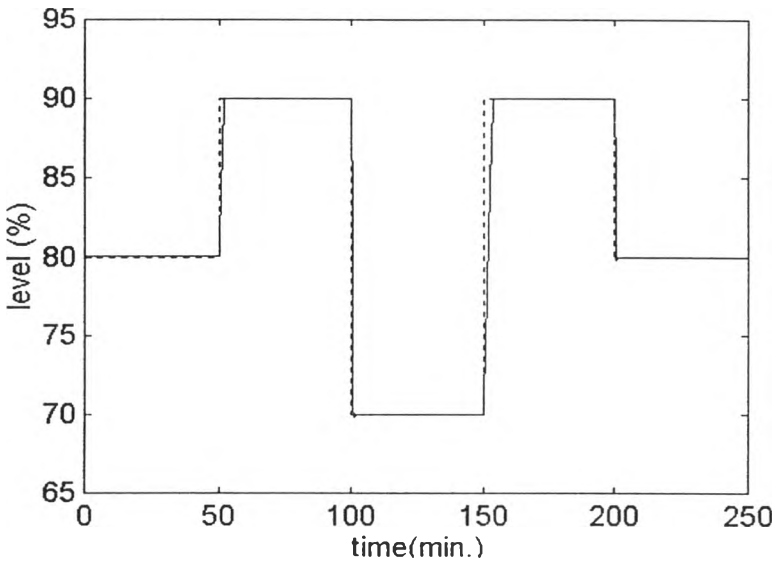
รูปที่ 5.7 ผลการควบคุมระดับของเหลวของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (นฤพนธ์) ต่อการ เปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวน



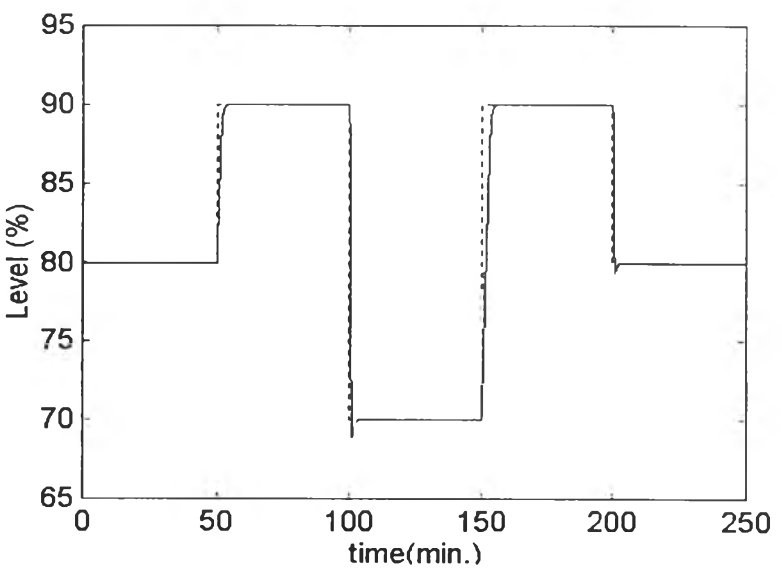
รูปที่ 5.8 ผลการควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวน



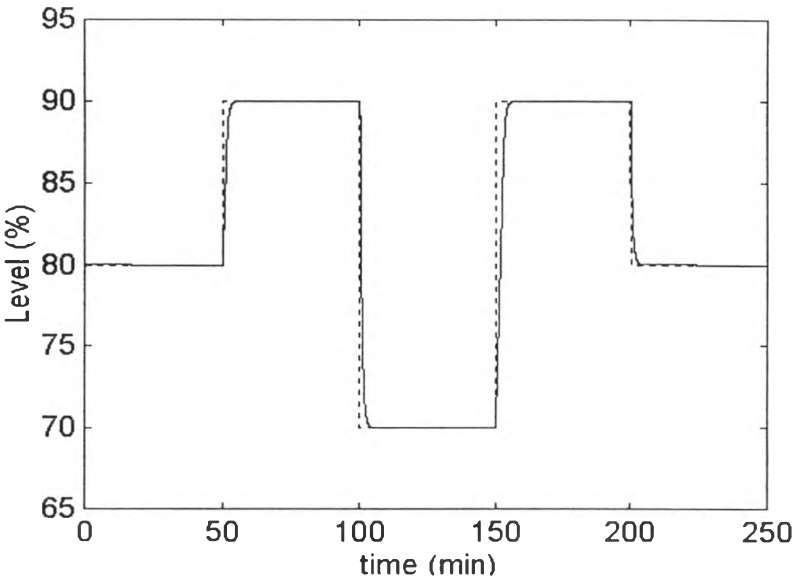
รูปที่ 5.9 ผลการควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ตัวควบคุมพีไอต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวน



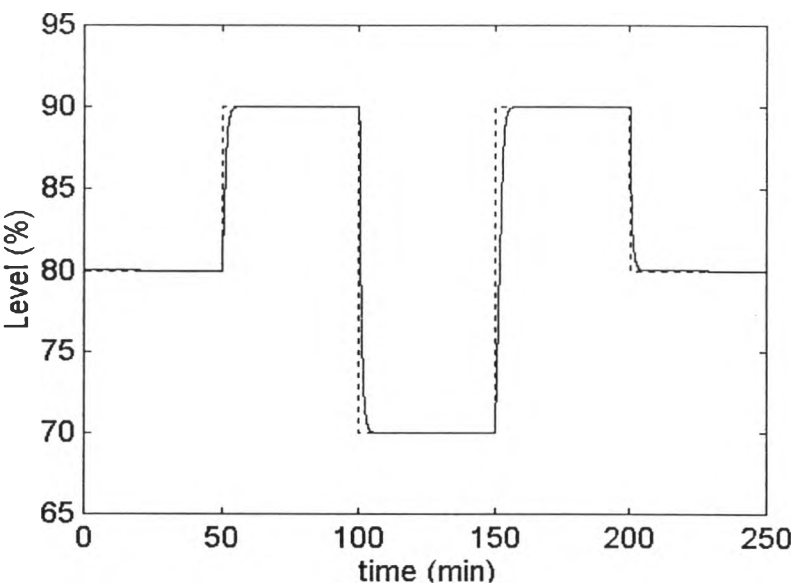
รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลต่อการเปลี่ยนจุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 80%



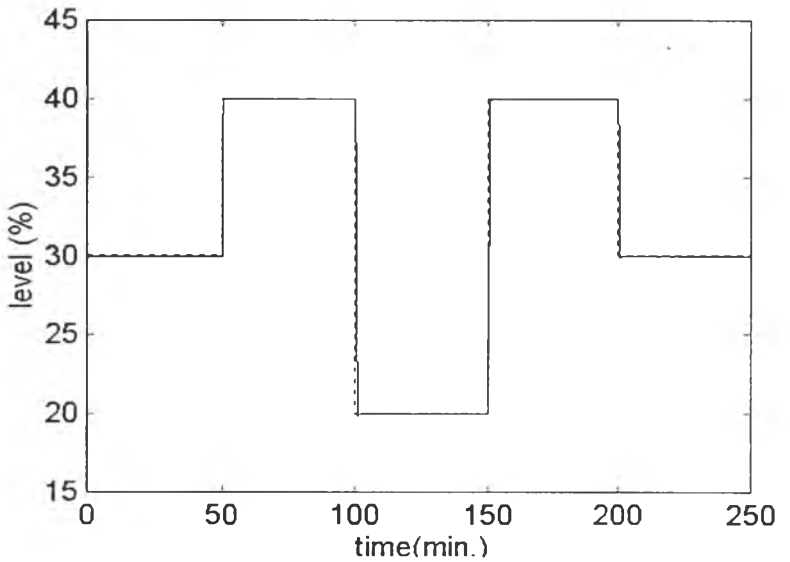
รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (นฤพนธ์) ต่อการเปลี่ยนจุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 80%



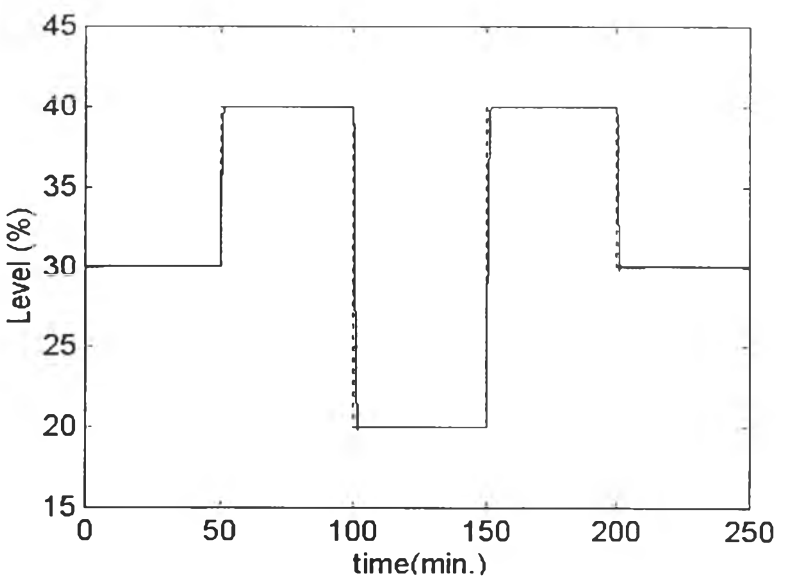
รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน ต่อการเปลี่ยนจุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 80%



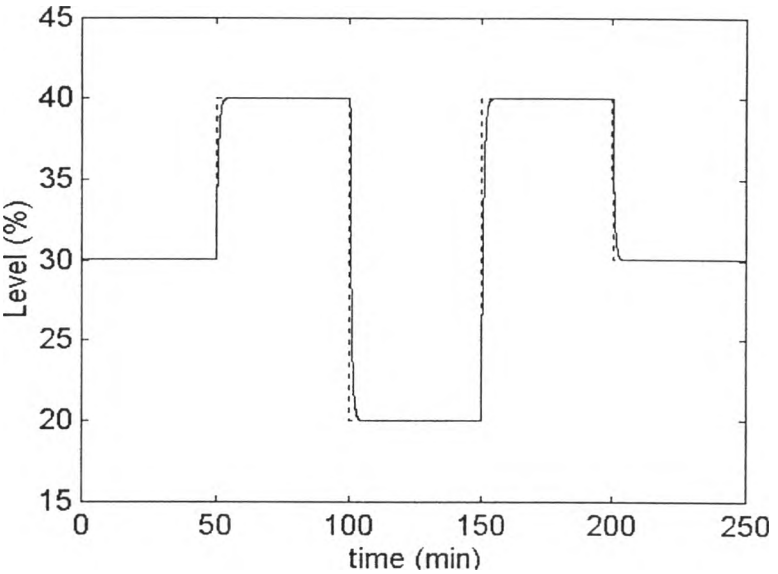
รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบความทนทานของใช้ตัวควบคุมพีไอต่อการเปลี่ยนจุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 80%



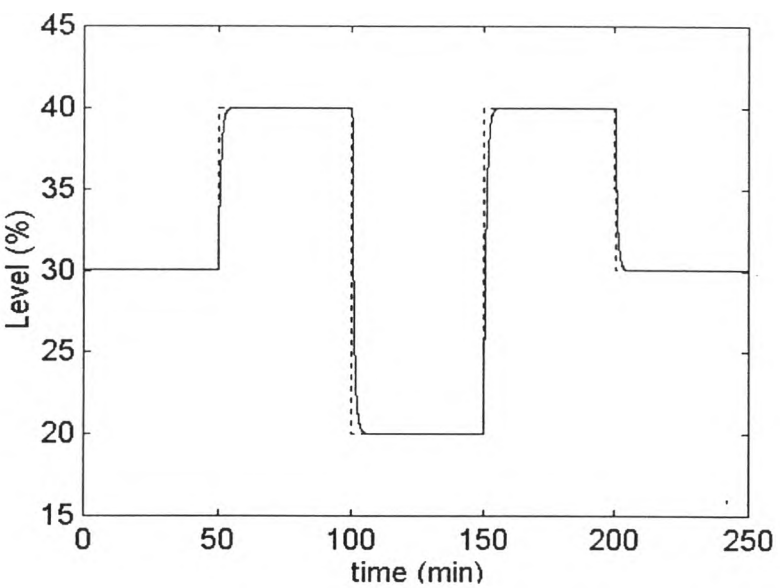
รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลต่อการเปลี่ยนจุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 30%



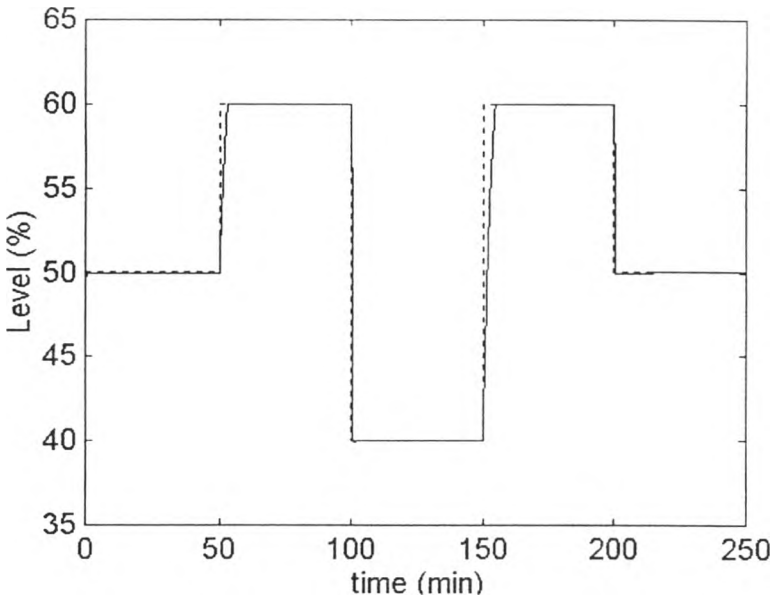
รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (นฤพนธ์) ต่อการเปลี่ยนจุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 30%



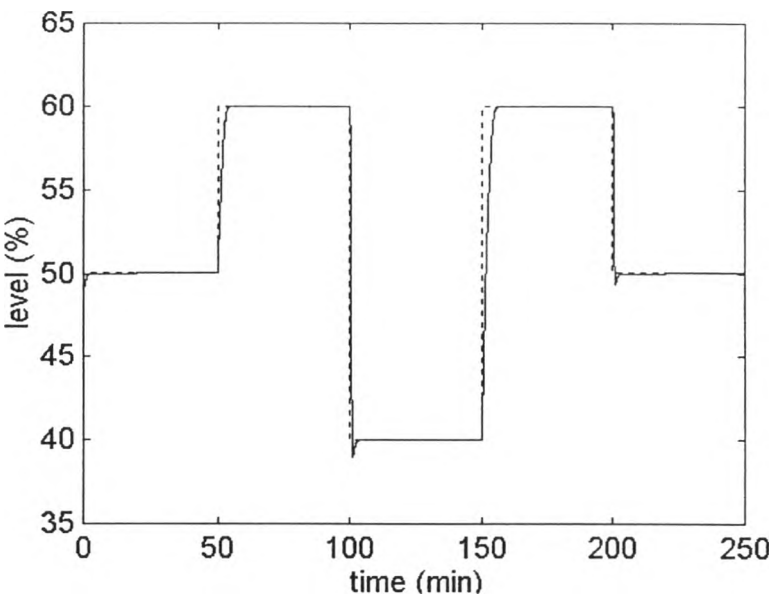
รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน ต่อการเปลี่ยนจุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 30%



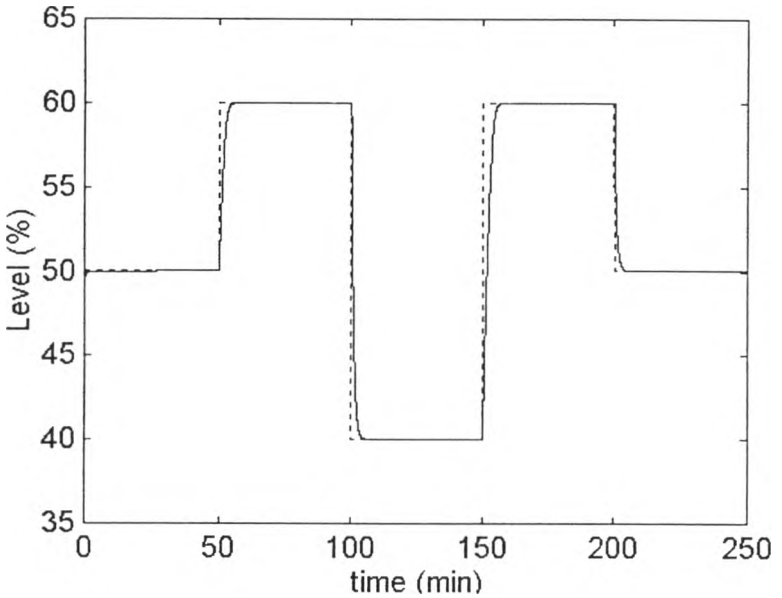
รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมพีไอต่อการเปลี่ยนจุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 30%



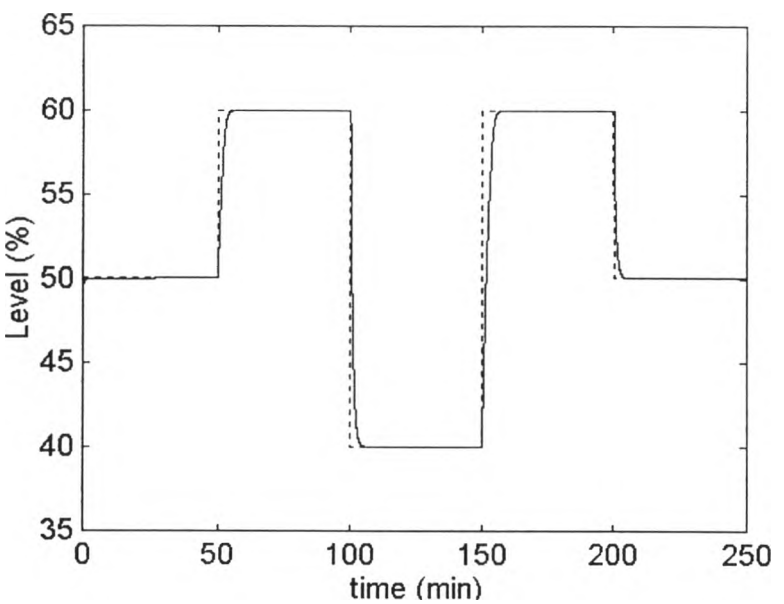
รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลเมื่อค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผิดพลาดไป +30%



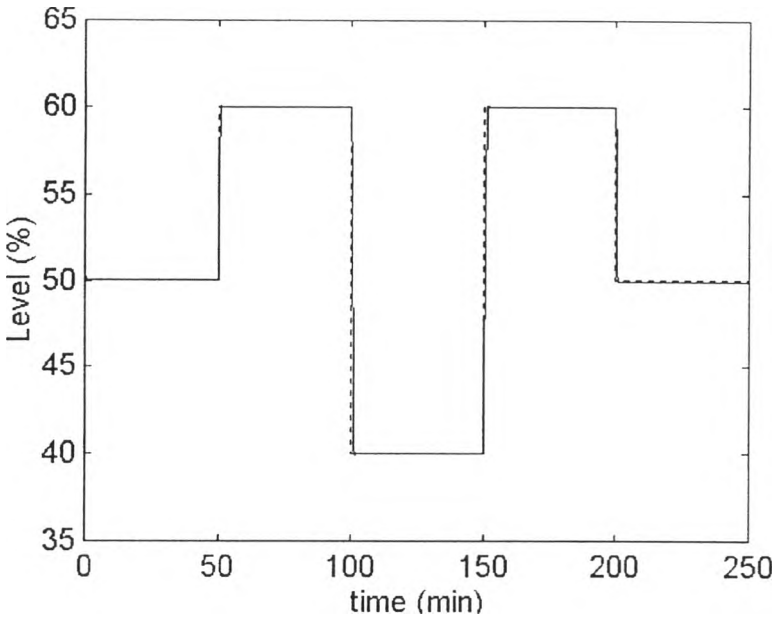
รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (นฤพนธ์) เมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการผิดพลาดไป +30%



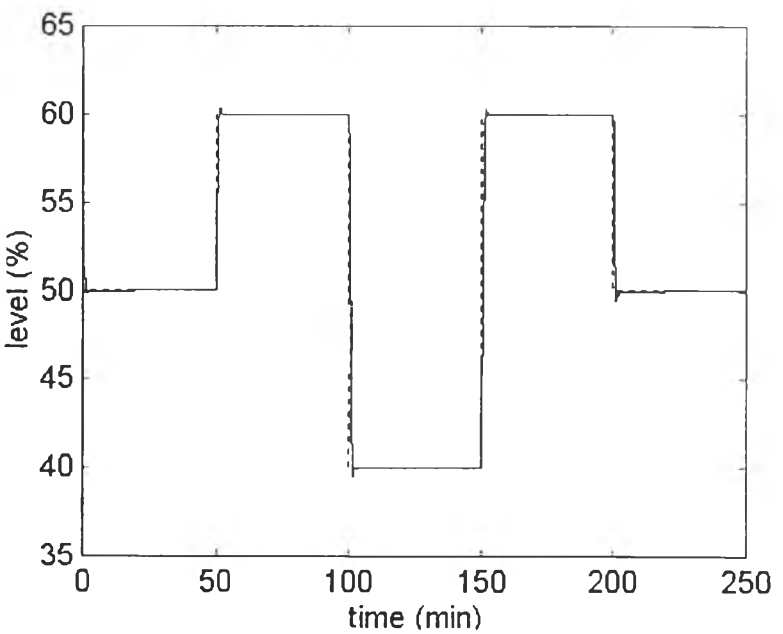
รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบกำหนดค่าเกนต่างๆ กันเมื่อค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผิดพลาดไป +30%



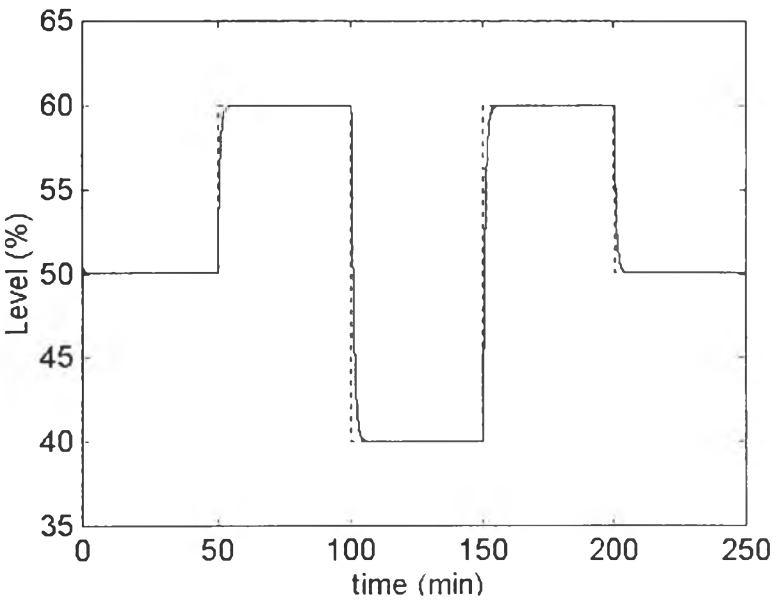
รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอ เมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการ ผิดพลาดไป +30%



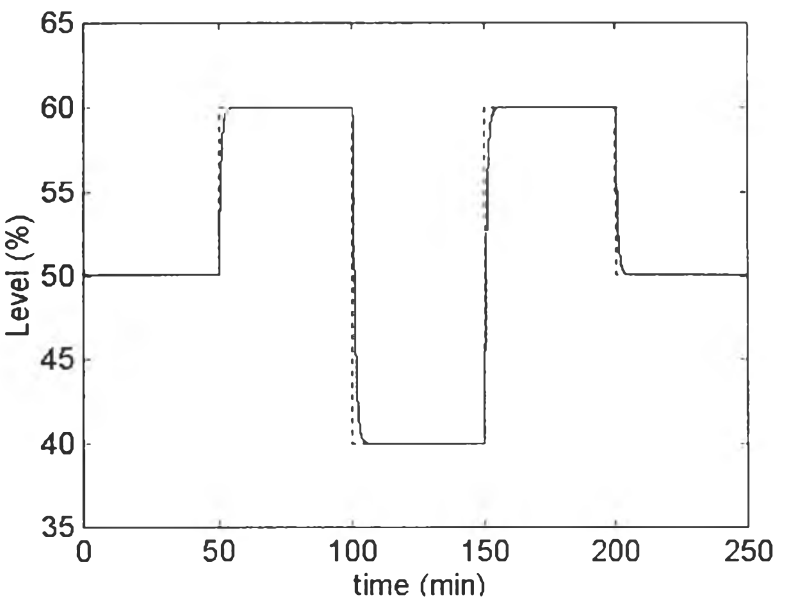
รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลเมื่อค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผิดพลาดไป -30%



รูปที่ 5.23 ผลการทดสอบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (นฤพนธ์) เมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการผิดพลาดไป -30%



รูปที่ 5.24 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบกำหนดค่าเกนต่างๆ กันเมื่อค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผิดพลาดไป -30%



รูปที่ 5.25 ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอ เมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการผิดพลาดไป -30%