บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 คำนำ

จากผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบป้อนกลับในรูปแบบของการมีหรือไม่มีดีคัพเปลอร์ กับการควบคุมแบบจำลองภายในหรือการควบคุมแบบไอเอ็มซีที่มีหรือไม่มีดีคัพเปลอร์ ซึ่งในแต่ละการควบคุมได้แบ่งกรณีศึกษาย่อยต่างๆ กัน เช่นในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ การเปลี่ยนแปลงโหลด และยังได้เปรียบเทียบกับการออกแบบจำลองที่เป็นแนวความคิดใหม่ เช่นการใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก (Weighted Decouplers) หรือการคิดตามหลักการของไอเอ็มซีโดยรวมและไม่รวมค่าเดดไทม์ เป็นต้น ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยภาพรวมแล้วจะพบว่าการควบคุมแบบไอเอ็มซีจะให้ผลการควบคุมกระบวนการที่ดีกว่า แต่จะมีข้อจำกัดอยู่บ้าง เช่น การควบคุมของวาล์ว หรือการควบคุมตัวแปรปรับ ซึ่งจะต้องทำการศึกษาค้นคว้าต่อไป เพื่อให้สอดคล้องกับกระบวนการผลิตจริง

5.2 บทสรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาวิจัยทั้ง 4 แบบการควบคุม ซึ่งได้แก่

- การควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป (Conventional PID)
- การควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเปลอร์ (PID with Decouplers)
- การควบคุมแบบโมเดลภายในที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ (IMC without Decouplers)
- การควบคุมแบบโมเดลภายในที่มีดีคัพเปลอร์ (IMC with Decouplers)

5.2.1 การเปรียบเทียบผลการควบคุมตัวแปรอิสระ

ในงานวิจัยนี้ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมแบบป้อนกลับหรือการควบคุมแบบไอเอ็มซี จะมีตัวแปรอิสระอยู่ 2 ตัวแปรได้แก่การเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์และการเปลี่ยนแปลงโหลด ซึ่งตัวควบคุมของกระบวนการของทั้งสองการควบคุมจะต้องได้รับการจูนก่อน เพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสม จึงจะสามารถควบคุมกระบวนการได้ดี โดยจะพิจารณาจากค่า IAE ที่ต่ำกว่าซึ่งจะทำการจูนเพื่อให้กระบวนการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ โดยทั่วไปค่าพีไอดีของตัวควบคุมแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดจะให้การตอบสนองการควบคุมได้เร็วกว่าค่าพีไอดีจากการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ซึ่งการจูนตัวควบคุมของการควบคุมพีไอดีในการวิจัยนี้จะใช้วิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Z-N) โดยกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์แบบสเต็พ และปรับค่าเกนจนกราฟของกระบวนการแกว่งเป็นไซเคิลด้วยแอมพลิจูดที่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้ทราบค่า K_{cu} และ P_u จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า K_c และ τ_I จากตารางที่ 3.1 จะพบว่าการจูนแบบ Z-N จะให้ผลการควบคุมกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ได้ดีกว่ากระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด เมื่อพิจารณาจากระบบที่มีดีคัพเปลอร์ ทั้งนี้สังเกตจากค่า IAE ของการควบคุมจากการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ของ

กระบวนการมีค่าต่ำกว่า เมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงโหลด (พิจารณาได้จากตารางที่ 4.3) สำหรับการควบคุมแบบ IMC นั้น ค่าความผิดพลาด IAE เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์และโหลด จะให้ค่าที่ไม่แตกต่างกันมาก (ตารางที่ 4.18) แต่ถึงกระนั้นก็ตามค่าความผิดพลาด IAE เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดจะยังคงมีค่าสูงกว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมทั้งสองแบบนี้ จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบ IMC สามารถควบคุมกระบวนการได้ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับที่จูนโดยวิธีการของ Z-N โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาด IAE ของทั้งสองการควบคุม

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาระบบที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมแบบ PID หรือแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์คือระบบยังมีอินเตอร์แอกชันกันอยู่ จะพบว่าค่าความผิดพลาด IAE ที่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ เช่นตารางที่ 4.12 และ 4.16 หรือตารางที่ 4.2 และ 4.6 แต่ถึงกระนั้นก็ตาม ค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบ IMC ยังคงมีค่าน้อยกว่าการควบคุมแบบ PID นั่นหมายความว่าการควบคุมแบบ IMC สามารถควบคุมกระบวนการได้ดีกว่าการควบคุมแบบ PID

5.2.2 การเปรียบเทียบผลการควบคุมแบบ PID ทั่วไปกับที่มีดีคัพเปลอร์

เมื่อมีการเปรียบเทียบผลการควบคุม PID แบบที่มีดีคัพเปลอร์ คือ ลดอินเตอร์แอกชันของกระบวนการจะพบว่าการควบคุมโดยวิธีการออกแบบนี้จะให้ผลที่ดีกว่าเมื่อกระบวนการยังมีอินเตอร์แอกชันกันอยู่ คือไม่มีดีคัพเปลอร์ (Conventional) โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาด IAE ที่ต่ำกว่า ไม่ว่าจะเป็นการจูนตัวควบคุมแล้วหรือยังไม่มีการจูน (ตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.14)

5.2.3 การเปรียบเทียบผลการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์และมีดีคัพเปลอร์

จะพบว่าผลการควบคุมแบบ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์จะให้ผลการตอบสนองที่แย่กว่าการควบคุมที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ (ตารางที่ 4.7) นั่นคือการควบคุมแบบ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์จะให้ผลการตอบสนองต่อเซ็ทพอยท์ที่ดีที่สุดในค่าหนึ่งค่าใดเท่านั้น นั่นคือ อีกค่าหนึ่งจะมีความผิดพลาดมาก หรือกล่าวได้ว่าจะมุ่งไปที่ค่าหนึ่งค่าใดเท่านั้น ขณะที่การควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์นั้นจะให้ค่าความผิดพลาดที่ค่อนข้างสมดุลกัน (ตารางที่ 4.5) และจะต้องทำการทดลองต่อไป หรือหาวิธีการออกแบบแนวใหม่มาช่วยลดปัญหานี้ วิธีการออกแบบแนวใหม่ที่ว่านี้เรียกว่า "ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก (Weighted Decouplers)" ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีออกแบบแนวใหม่นี้จะพบว่าได้ผลการตอบสนองที่ดีกว่า โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาด IAE (ตารางที่ 4.6 และ 4.10) หรือตารางที่ 4.16 และ 4.18

5.2.4 การเปรียบเทียบผลการควบคุมแบบ PID ทั่วไป กับแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์

เป็นการเปรียบเทียบการควบคุมแบบ PID ทั่วไปกับแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ จะพบว่าการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ จะให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าการควบคุมแบบ PID ทั่วไป โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาด IAE ที่น้อยกว่าหลังจากการจูนแล้ว (ตารางที่ 4.2 และตาราง 4.6) โดยการจูนค่า τ_f ของการควบคุมแบบ IMC นั้นจะต้องดูความเหมาะสมด้วย เช่นค่า IAE และกราฟการตอบสนองการควบคุมของวาล์ว (Control Action) นั่นคือ เมื่อให้ค่า τ_f ลดลงมากกว่า 7 เท่าจะทำให้ค่า IAE 2 ของการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 1, y_2 = 0$ เริ่มที่จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ขณะที่ค่า IAE อื่นๆ ลดลง

5.2.5 การเปรียบเทียบผลการควบคุมแบบ PID ทั่วไปกับแบบ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์

จากผลการทดลองถ้ามองในแง่ของการเปลี่ยนโหลดจะพบว่า การควบคุมแบบ PID ทั่วไป จะให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่า โดยพิจารณาจากค่า IAE ที่ต่ำกว่า แต่ถ้ามองในแง่ของการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์แล้ว จะพบว่าการควบคุมแบบ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์จะเข้าสู่เซ็ทพอยท์สำหรับค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น ขณะที่การควบคุมแบบ PID ทั่วไปจะเข้าสู่เซ็ทพอยท์ที่ค่อนข้างสมดุลกัน (ตารางที่ 4.2 และ 4.7)

5.2.6 การเปรียบเทียบผลการควบคุมแบบ PID ที่มีดีคัพเปลอร์กับแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์

จากตารางที่ 4.3 และ 4.6 ถ้ามองในแง่ของการเปลี่ยนแปลงโหลดจะเห็นว่าค่าความผิดพลาด IAE สำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์จะมีค่าน้อยกว่าการควบคุมแบบ PID ที่มีดีคัพเปลอร์ นั่นคือการควบคุมแบบ IMC จะควบคุมกระบวนการได้ดีกว่า และถ้ามองในแง่การเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์แล้ว จะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะเห็นว่าค่าความแตกต่างของค่า IAE ของการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์จะมีความแตกต่างกันน้อยกว่าค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID ที่มีดีคัพเปลอร์ นั่นหมายความว่าการควบคุมแบบ IMC จะควบคุมกระบวนการได้ดีกว่าการควบคุมแบบ PID ที่มีดีคัพเปลอร์

5.2.7 การเปรียบเทียบผลการควบคุมแบบ PID ที่มีดีคัพเปลอร์กับแบบ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์

จะเห็นว่าการควบคุมแบบ PID ที่มีดีคัพเปลอร์ จะให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าการควบคุมแบบ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์ (ตารางที่ 4.3 และ 4.7) ทั้งในแง่การเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ และการเปลี่ยนแปลงโหลด แต่ถ้าเป็นการควบคุมแบบ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนักเข้ามาช่วย จะพบว่าจะให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าการควบคุมแบบ PID ที่มีดีคัพเปลอร์

5.2.8 การเปรียบเทียบตัวควบคุม, G_c^* ในการควบคุมแบบ IMC

ในการควบคุมแบบ IMC นี้ ซึ่งเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันอันดับหนึ่ง มีเดดไทม์จะมีการคำนวณหา G_c^* อยู่สองลักษณะคือ G_c^* ที่รวมเดดไทม์และ G_c^* ที่ไม่รวมเดดไทม์ ผลการทดลองสรุปได้ว่า ค่าความผิดพลาด IAE สำหรับการหาตัวควบคุมที่ไม่รวมเดดไทม์จะมีค่าน้อยกว่าที่รวมเดดไทม์ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยด์หรือการเปลี่ยนแปลงโหลด นั่นหมายความว่าการหาตัวควบคุมที่ไม่รวมเดดไทม์จะให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่า (ตารางที่ 4.4 และ 4.5)

5.2.9 สรุปและวิจารณ์ผลการใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก (Weighted Decouplers)

เมื่อเปรียบเทียบผลการควบคุมทั้ง 4 แบบ พิจารณาจากรูปที่ 51 ไม่ว่าจะเป็นกรณีที่มีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์ที่ $y_1 = 1$ และ $y_2 = 0$ หรือการเปลี่ยนโหลด (รูปที่ 5.2) ของการทดลองที่ 1 พบว่าการควบคุมแบบแนวความคิดใหม่ที่ใช้ลูพหมู่แบบดัดแปลง ซึ่งมีดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนักเข้ามาเกี่ยวข้องนั้นจะให้ผลการการตอบสนองที่ดีกว่าการควบคุมในสามแบบที่เหลือ ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเปลอร์ หรือการควบคุมแบบพีไอดี โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาด

IAE และกราฟการตอบสนอง สำหรับการทดลองที่ 2 จะได้ผลสรุปเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 พิจารณาจากรูปที่ 5.3 และ 5.4

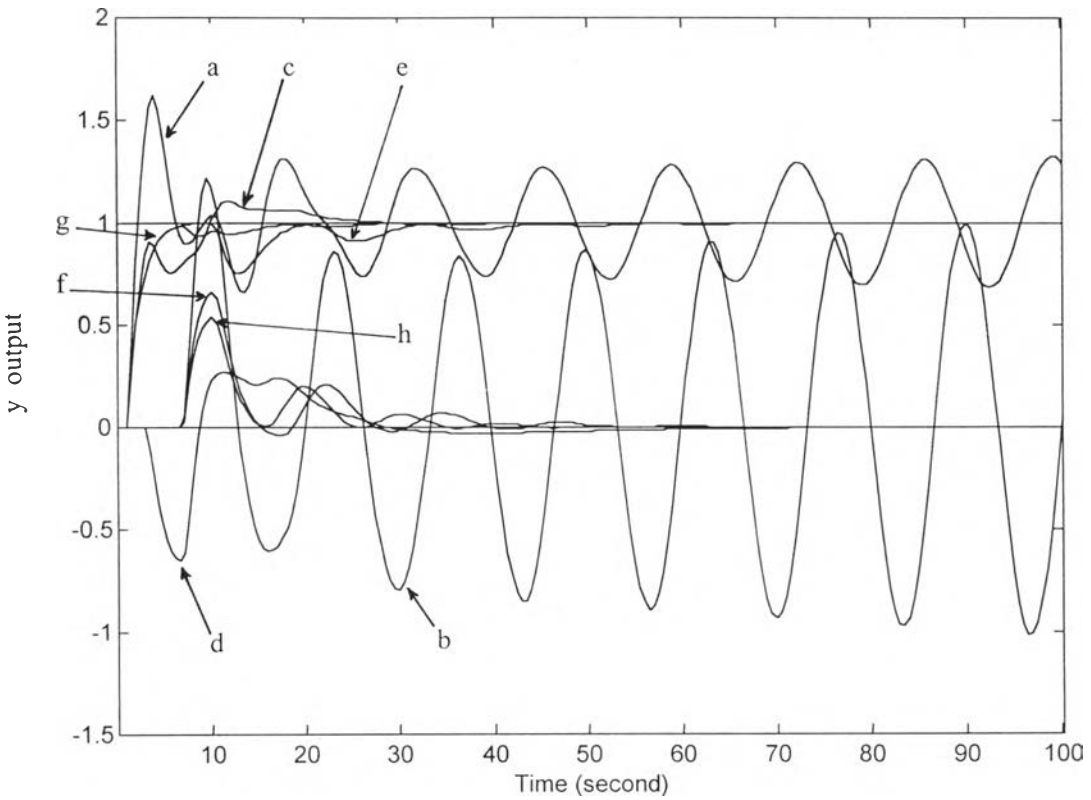
ข้อดีของการใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก

- เข้าสู่เซ็ทพอยท์ได้เร็วขึ้น
- ไม่เกิดโอเวอร์ชูต (Overshoot)
- ค่าความผิดพลาด IAE ที่ได้จะไม่มากไปข้างใดข้างหนึ่ง คือจะให้ค่าความผิดพลาดที่ค่อนข้างสมดุลกันที่ $y_1 = 1$ และ $y_2 = 0$ ซึ่งถ้าเป็นการใช้ดีคัพเปลอร์แบบบางส่วนจะให้ค่าความผิดพลาดที่ค่อนข้างมากสำหรับข้างใดข้างหนึ่ง

ขีดจำกัดของการใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก

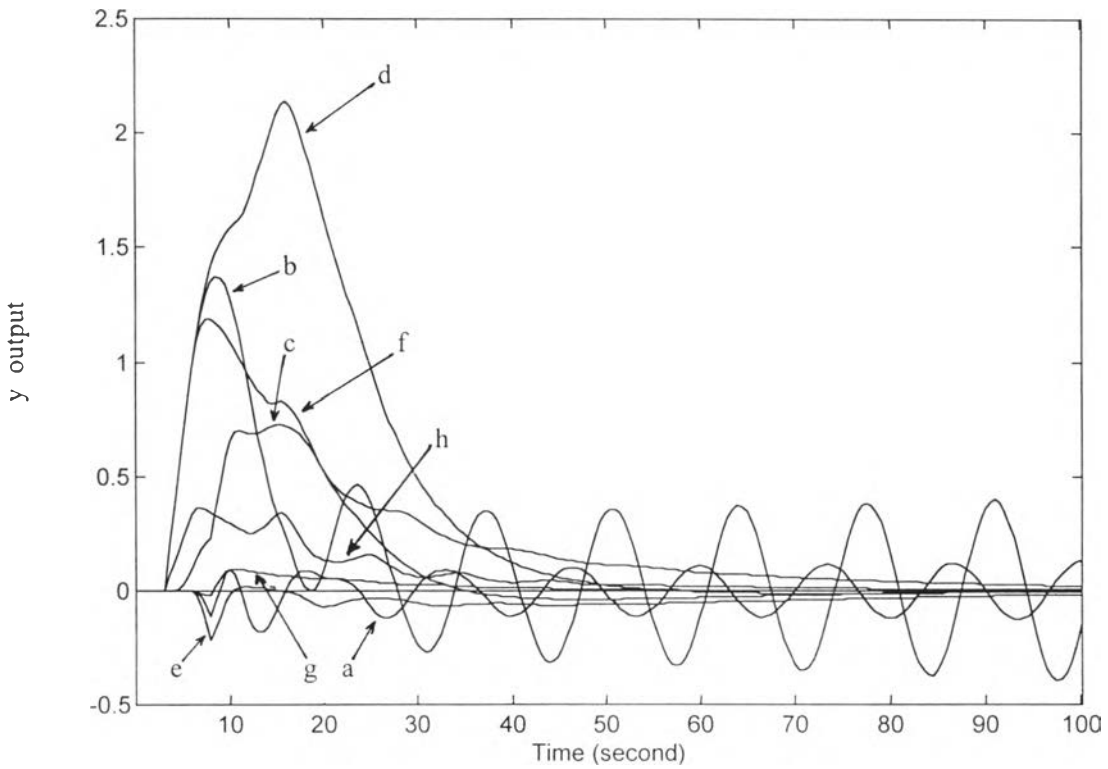
- จะมีข้อจำกัดของการใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนัก คือถ้าเป็นระบบ 2 x 2 ซึ่งมีดีคัพเปลอร์สองตัว สัดส่วนของค่า f_1 และ f_2 จะเป็นผลรวมที่ไม่ควรเกิน 1 ถ้าเป็นระบบ 3 x 3 ซึ่งมีดีคัพเปลอร์หกตัว ผลรวมของ f_1 และ f_2 ก็ไม่ควรเกิน 3 นั่นคือควรจะมีค่าครึ่งหนึ่งของจำนวนดีคัพเปลอร์ $f_1 + f_2 = \frac{1}{2}$ (จำนวนของดีคัพเปลอร์)
- ถ้ามีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์ที่ $y_1 = 1$ และ $y_2 = 0$ ควรจะให้ค่า f_1 มีค่าน้อยๆ หรือ ถ้ามีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์ที่ $y_1 = 0$ และ $y_2 = 1$ ควรจะให้ค่า f_1 มีค่ามากๆ นั่นคือ

$$f_1 \alpha \frac{1}{y_1}$$



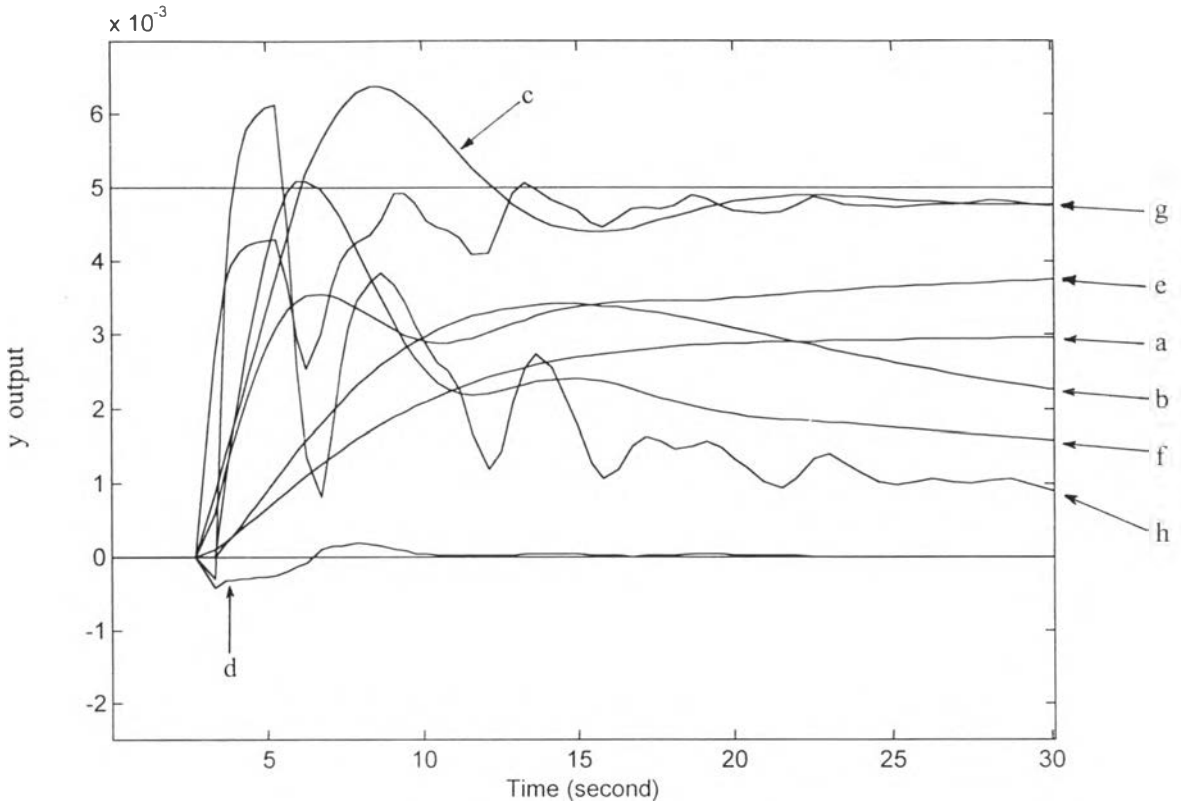
Conventional PID at $y_1 = 1$	a
Conventional PID at $y_2 = 0$	b
PID With Decouplers at $y_1 = 1$	c
PID With Decouplers at $y_2 = 0$	d
IMC Without Decouplers at $y_1 = 1$	e
IMC Without Decouplers at $y_2 = 0$	f
IMC With Weighted Decouplers at $y_1 = 1$	g
IMC With Weighted Decouplers at $y_2 = 0$	h

รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบการควบคุมทั้ง 4 แบบ กรณีเปลี่ยนเซ็ทพอยท์ที่ $y_1 = 1$, $y_2 = 0$ ของการทดลองที่ 1



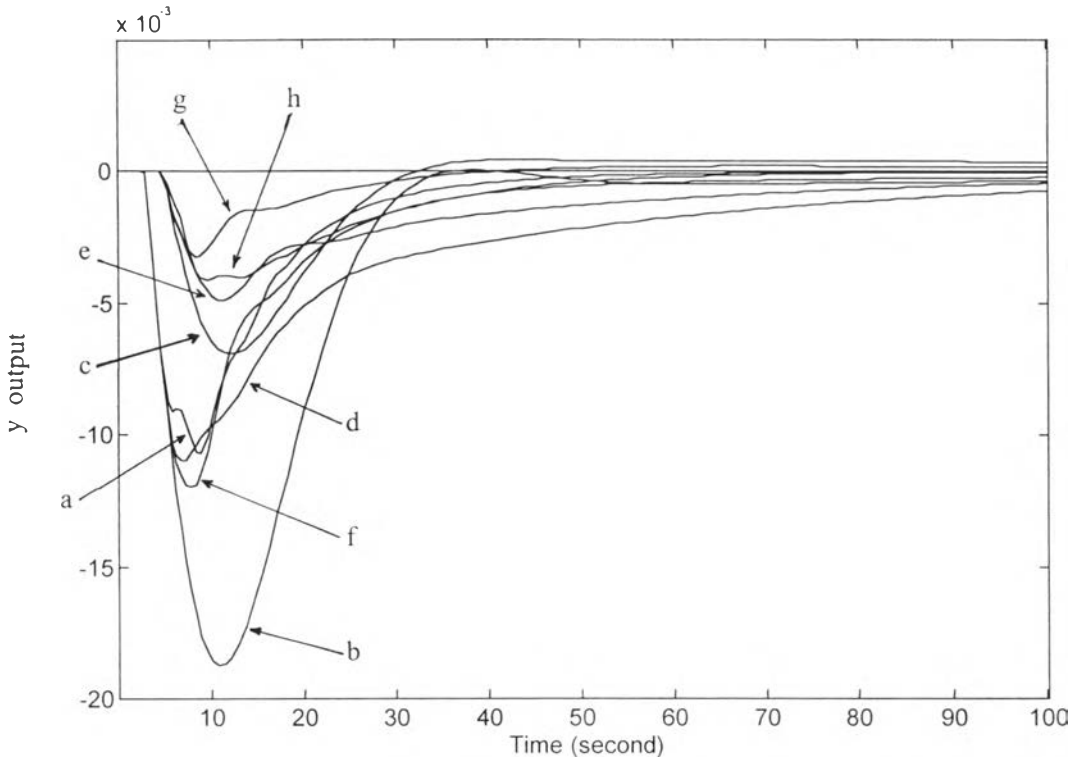
Conventional PID at $y_1 = 1$	a
Conventional PID at $y_2 = 0$	b
PID With Decouplers at $y_1 = 1$	c
PID With Decouplers at $y_2 = 0$	d
IMC Without Decouplers at $y_1 = 1$	e
IMC Without Decouplers at $y_2 = 0$	f
IMC With Weighted Decouplers at $y_1 = 1$	g
IMC With Weighted Decouplers at $y_2 = 0$	h

รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบการควบคุมทั้ง 4 แบบ กรณีเปลี่ยนโหลดของการทดลองที่ 1



Conventional PID at $y_1 = 1$	a
Conventional PID at $y_2 = 0$	b
PID With Decouplers at $y_1 = 1$	c
PID With Decouplers at $y_2 = 0$	d
IMC Without Decouplers at $y_1 = 1$	e
IMC Without Decouplers at $y_2 = 0$	f
IMC With Weighted Decouplers at $y_1 = 1$	g
IMC With Weighted Decouplers at $y_2 = 0$	h

รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบการควบคุมทั้ง 4 แบบ กรณีเปลี่ยนเซ็ทพอยท์ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$ ของการทดลองที่ 2



Conventional PID at $y_1 = 1$	a
Conventional PID at $y_2 = 0$	b
PID With Decouplers at $y_1 = 1$	c
PID With Decouplers at $y_2 = 0$	d
IMC Without Decouplers at $y_1 = 1$	e
IMC Without Decouplers at $y_2 = 0$	f
IMC With Weighted Decouplers at $y_1 = 1$	g
IMC With Weighted Decouplers at $y_2 = 0$	h

รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบการควบคุมทั้ง 4 แบบ กรณีเปลี่ยนโหลดที่ –0.04 ของการทดลองที่ 2

5.3 ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ มีปัญหาและอุปสรรคซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาของโปรแกรมช่วย Simulink พอสรุปได้คือการรันโปรแกรมที่ได้จากการทำ Simulink ซึ่งในบางครั้งเราไม่สามารถตั้งค่าเวลาหยุด (Stop time) ของการรันในแบบจำลองนั้นๆ ได้ ถ้ามีการตั้งค่าเวลาหยุดเป็นเลขจำนวนนับ เช่น 100, 200 เป็นต้น ซึ่งปัญหานี้แก้ไขโดยทำการหลอกโปรแกรม โดยการตั้งค่าให้เกินหรือลดไปนิดหน่อย เช่น ถ้าเราจะตั้งเวลาหยุดการรันที่ 100 ให้ตั้งที่ 100.1 หรือจะตั้งเวลาหยุดที่ 200 ให้ตั้งที่ 200.1 คืออย่างน้อยให้มีจุดทศนิยมไว้

5.4 ข้อเสนอแนะในการศึกษาค้นคว้าต่อไป

5.4.1 ศึกษาการแก้ปัญหาของตัวแปรปรับ

จากผลการวิจัยพบว่าการออกแบบตัวควบคุมแบบ IMC ที่ใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนักซึ่งให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าก็จริง คือสามารถจูนเพื่อให้ค่า IAE ต่ำกว่าการออกแบบตัวควบคุมแบบอื่นๆ บางครั้งอาจมีปัญหาได้ถ้ามองในแง่ของการควบคุมตัวแปรปรับหรือการเปิด-ปิดของวาล์วควบคุม นั่นคือ ถ้าค่า IAE ยิ่งต่ำ ก็จะยิ่งทำให้วาล์วทำงานหนักขึ้น สังเกตจากกราฟมีการแกว่งมากขึ้น ดังนั้นควรจะมีการทดลองศึกษาต่อไปว่า ทำอย่างไร เพื่อให้กราฟมีการแกว่งน้อยลง

5.4.2 การนำแนวความคิดใหม่ไปใช้กับรูปแบบจำลองอื่น

เนื่องจากได้มีการนำเอาแนวความคิดใหม่เกี่ยวกับการใช้ดีคัพเปลอร์แบบน้ำหนักมาใช้วิเคราะห์ออกแบบตัวควบคุม (Weighted Decouplers) ในระบบ IMC แทนดีคัพเปลอร์แบบบางส่วน (Partrial Decoupling) โดยยังไม่ได้ทำการทดลองกับระบบแบบจำลองที่ใช้ดีคัพเปลอร์แบบทางเลือก (Alternative Decouplers) ซึ่งน่าจะศึกษาวิจัยในเรื่องนี้ต่อไป

5.4.3 การหาค่า τ_f จากกราฟที่เสนอโดย Ciancone (1993)

เนื่องจากในการวิจัยนี้ค่า τ_f ที่ได้คำนวณมาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเดดไทม์กับค่าคงที่ของเวลาที่ถูกเสนอโดย Ciancone (1993) ซึ่งน่าจะศึกษาการพล็อตที่อาศัยค่าต่างๆ เหล่านี้ เช่นอาจจะใช้ค่าคงที่ของเวลา (Time constant) จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการทั้งสองตัว โดยการใช้สมการที่ 4-4 ซึ่งได้จากการทดลองของ Ciancone (1993) อาจจะต้องตั้งการทดลองขึ้นมา โดยให้ค่าคงที่ของเวลาของกระบวนการหนึ่งคงที่ และทดลองเปลี่ยนค่าคงที่ของเวลาอีกค่าหนึ่งในทางที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ตาม แล้วนำไป พล็อตกราฟระหว่างค่า τ (แกน X) และค่า τ_f (แกน Y) ซึ่งจะได้เส้นกราฟมาหนึ่งเส้น จากนั้นทดลองให้ค่าคงที่ของเวลาของอีกกระบวนการหนึ่งคงที่ แล้วเปลี่ยนค่าไปเรื่อย ๆ ซึ่งจะได้เส้นกราฟอีกหนึ่งเส้น แล้วนำเส้นกราฟทั้งสองมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อจะได้กราฟเส้นเดียวที่ใช้หาค่า τ_f ต่อไป