บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 คำนำ

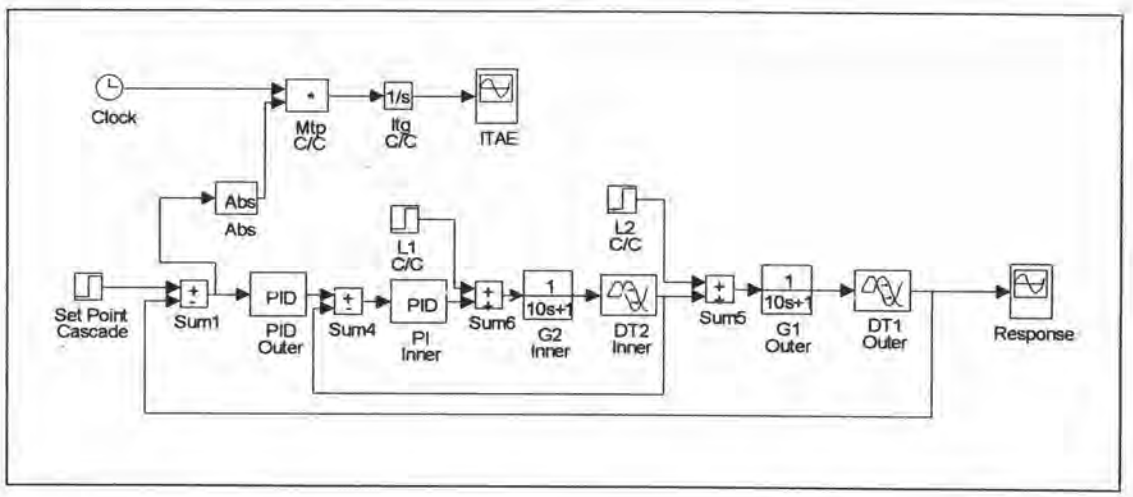
ถึงแม้ว่า โดยทั่วไปแล้วการควบคุมแบบคาสเคดจะให้การควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับก็ตาม แต่เนื่องจากลักษณะของกระบวนการผลิตที่มีความแตกต่างกันออกไป เช่น ความแตกต่างในเรื่อง อันดับของกระบวนการ เวลาของกระบวนการ เดดไทม์ เกนของกระบวนการแต่ละกระบวนการ การสร้างแบบจำลองการควบคุมโดยสามารถปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรคุณลักษณ์ของกระบวนการออกไปจะช่วยให้สามารถชี้บอกได้ว่า การควบคุมแบบคาสเคดให้ผลการควบคุมดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับหรือไม่ มากน้อยเพียงใด มีความคุ้มค่าเพียงใดที่ยกเลิกการควบคุมแบบป้อนกลับและใช้การควบคุมแบบคาสเคดเข้ามาแทน เป็นต้น ในการศึกษาแบบจำลองการควบคุมแบบคาสเคดและการควบคุมแบบป้อนกลับในครั้งนี้จะมีลักษณะที่แตกต่างกันเพียงว่า ในลูพในของการควบคุมแบบป้อนกลับจัดให้เป็นการควบคุมแบบลูพเปิด แทนการควบคุมแบบลูพปิดแบบคาสเคด การวิเคราะห์ผลจะใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของไอทีเออีและกราฟการตอบสนองของการควบคุม

4.2 วิธีการทดลอง

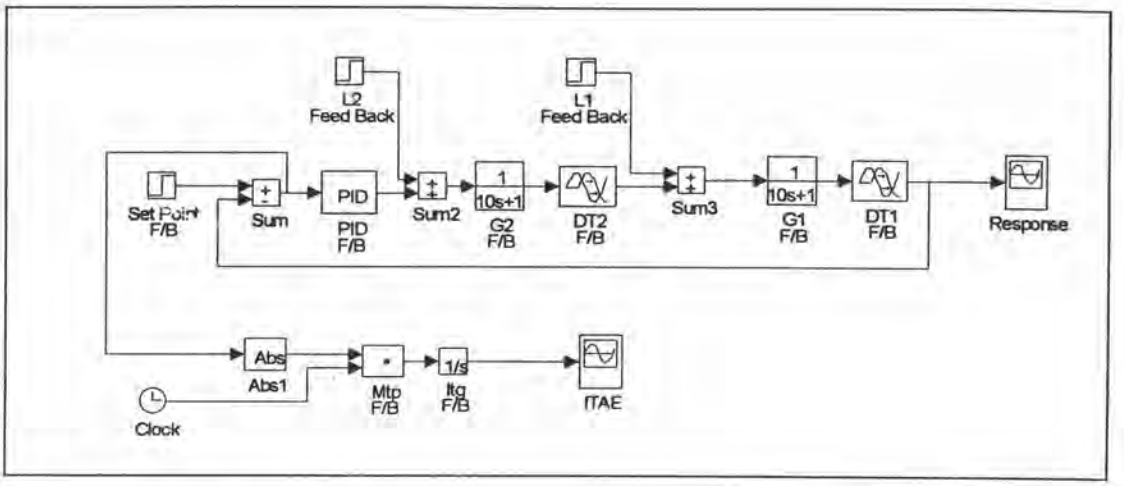
วิธีการทดลองสามารถแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ ได้ดังนี้

4.2.1 การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองเป็นส่วนที่สำคัญมากที่สุดของการศึกษาทดลองในครั้งนี้ โปรแกรม Simulink จะมีห้องสมุดความจำที่สามารถนำบล็อคไดอะแกรมต่างๆ มาใช้งานได้โดยสะดวก โดยการควบคุมจากเมาส์ เช่น ลักษณะของอินพุทในลักษณะของเสต็พจะอยู่ใน "Source" ทรานสเฟอร์ฟังชันของกระบวนการทั้งแบบต่อเนื่องและแบบดีสครีตจะอยู่ใน "Linear" และ "Discrete" ตามลำดับ กราฟแสดงผลทั้งแบบเสกลอัตโนมัติและแมนวลจะอยู่ใน "Sinks" ตัวควบคุมพีไอดีจะอยู่ใน "Extras" เป็นต้น การใช้งานจะเริ่มจากการเรียกใช้โปรแกรม Matlab ก่อนและใช้คำสั่ง "simulink" เพื่อเรียกใช้งานโปรแกรม Simulink จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองการควบคุม รูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 เป็นแบบจำลองของการควบคุมแบบคาสเคดและการควบคุมแบบป้อนกลับตามลำดับ โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นจะมีการแสดงผลเป็น 2 ลักษณะด้วยกัน คือ กราฟแสดงผลการตอบสนองของเอาท์พุท และกราฟแสดงค่าไอทีเออี



รูปที่ 4.1 แบบจำลองการควบคุมแบบคาสเคด



รูปที่ 4.2 แบบจำลองการควบคุมแบบป้อนกลับ

4.2.2 การกำหนดค่าตัวแปร

จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นจะเห็นว่ามีตัวแปรอยู่ 2 ประเภท คือ ตัวแปรของกระบวนการ ซึ่งได้แก่ เกนของกระบวนการซึ่งในการทดลองในครั้งนี้กำหนดให้มีค่าเป็นหนึ่ง เนื่องจากเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าเกนนี้แล้ว ค่าเกนของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนเดียวกับการเปลี่ยนแปลงนั้น โดยที่เกนของกระบวนการจะเป็นตัวหารค่าเกนของตัวควบคุม เวลาของกระบวนการในลูพนอกและลูพใน (τ_1 และ τ_2) เดดไทม์ของลูพนอกและลูพใน (θ_1 และ θ_2) และตัวแปรอิสระได้แก่ เซทพอยท์ของลูพนอก โหลดของลูพนอกและลูพใน (R_1, L_1 และ L_2 ตามลำดับ) ในการศึกษาทดลองกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่า (τ_1 และ τ_2) รวมทั้งสิ้น 3 ชุด คือ ที่ $\tau_1 = 10$ กับ $\tau_2 = 5$ วินาที, $\tau_1 = 10$ กับ $\tau_2 = 10$ วินาที และ $\tau_1 = 10$ กับ $\tau_2 = 15$ วินาที เปลี่ยนแปลงค่า θ_1 และ θ_2 อีกตัวแปรละ 5 ค่า โดยสลับการจับคู่จนครบทุกค่าที่สามารถสลับได้โดยไม่ซ้ำ เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของกระบวนการให้แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรอิสระ R_1, L_1 และ L_2 โดยกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบสเต็พ

4.2.3 การจูนตัวควบคุม

ในการจูนตัวควบคุมของกระบวนการควบคุมแบบป้อนกลับ ในการวิจัยทดลองในครั้งนี้ได้กำหนดหมวดการควบคุมเป็นพีไอ และเนื่องจากลูพควบคุมของแบบจำลองมีอันดับเป็น 2 ทำให้ผู้ทำการวิจัยเลือกใช้วิธีการลองผิดลองถูกตามวิธีการที่ได้กล่าวไว้ในตอนที่ 2.3.4 ข้อ ค. ซึ่งการจูนนี้จะทำทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการ

ในการจูนตัวควบคุมของกระบวนการควบคุมแบบคาสเคด จะแบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ การจูนลูพในและการจูนในลูพนอก ในการวิจัยทดลองในครั้งนี้ได้กำหนดหมวดการควบคุมลูพในเป็นแบบพีและพีไอเพื่อเปรียบเทียบผลการวิจัย โดยในการควบคุมแบบพีนั้น ค่า k_c จะคำนวนจากสมการที่ 2.1 ส่วนในการกำหนดการควบคุมเป็นพีไอจะใช้วิธีการจูนโดยไอทีเออีต่ำสุด ตามวิธีการที่ได้กล่าวไว้ในตอนที่ 2.3.4 ข้อ ง. โดยพิจารณาคำนวนทั้งในกรณีการเปลี่ยนแปลงของเซทพอยท์และการเปลี่ยนแปลงที่โหลด โดยใช้สมการที่ 2.24 และ 2.25 และค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องในตารางที่ 2.1 ส่วนการควบคุมในลูพนอกนั้นได้กำหนดการควบคุมและวิธีการจูนเช่นเดียวกับการควบคุมป้อนกลับคือ เป็นการควบคุมแบบพีไอ และจูนโดยวิธีลองผิดลองถูก และทำการจูนกำหนดค่าพีไอให้แก่ตัวควบคุมทั้งของลูพในและลูพนอกทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนค่าตัวแปร

4.2.4 การเปรียบเทียบผลการทดลอง

จากแบบจำลองของการควบคุมทั้ง 2 แบบ มีการแสดงผลออกมาใน 2 ลักษณะ คือ แสดงในรูปของกราฟแสดงการตอบสนองของเอาท์พุทและกราฟแสดงค่าไอทีเออีตามเวลาต่างๆ ที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะนำมาใช้ในการเปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบป้อนกลับและ

การควบคุมแบบคาสเคดโดยจะเปรียบเทียบลักษณะของกราฟการตอบสนองของเอาท์พุท และเปรียบเทียบอัตราส่วนของไอทีเออีของการควบคุมแบบป้อนกลับต่อการควบคุมแบบคาสเคดโดยพิจารณาร่วมกับการเปลี่ยนแปลงของเดดไทม์ของลูพในและลูพนอก

4.3 ผลการทดลอง

ในการศึกษาทดลองในครั้งนี้ได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 10 กรณี ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

4.3.1 ผลการศึกษากรณีที่ 1

เป็นการศึกษาเปรียบเทียบผลการจูนตัวควบคุมของกระบวนการควบคุมแบบป้อนกลับโดยวิธีของ Zigler-Nichol เปรียบเทียบกับการจูนแบบลองผิดลองถูก เพื่อเลือกวิธีการจูนที่จะใช้ในการศึกษาวิจัยโดยกำหนดแบบจำลองที่ใช้เป็นตัวแทนของการศึกษาวิจัยตามรูปที่ 4.2 และเปรียบเทียบผลการควบคุมโดยไอทีเออี โดยกำหนดให้ $\theta_1 = 10$, $\tau_1 = 1$, $\theta_2 = 10$ และ $\tau_2 = 1$ เป็นการทดลองในครั้งแรก ซึ่งจากการจูนตามวิธีการทั้งสองแบบ พบว่า การจูนโดยวิธี Z-N ให้ผลการควบคุมที่ไม่แตกต่างจากการจูนโดยการลองผิดลองถูก เมื่อเพิ่มค่าเดดไทม์ของลูพนอกให้เพิ่มมากขึ้นจะพบว่า การจูนแบบลองผิดลองถูกให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า Z-N อย่างเห็นได้ชัด และเช่นเดียวกันเมื่อเพิ่มค่าเดดไทม์ของลูพในให้เพิ่มมากขึ้น ผลการจูนแบบลองผิดลองถูกยังคงให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าเช่นกัน ตามตารางแสดงผลเปรียบเทียบในภาคผนวกที่ 2 ตารางที่ 7.2.1 ซึ่งจากผลการศึกษาในครั้งนี้ จึงมีข้อสรุปว่า จะเลือกใช้การจูนแบบลองผิดลองถูกเป็นวิธีการจูนระบบควบคุมแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

4.3.2 ผลการศึกษากรณีที่ 2

เนื่องจากโปรแกรม Simulink จัดให้มีวิธีการในการวิเคราะห์การทำการเลียนแบบ หรือการแก้สมการทรานสเฟอร์ฟังชันออกเป็นหลายวิธีตามที่ได้กล่าวไว้ในตอนที่ 3.3.1 ข้อ ข. ดังนั้นเพื่อเลือกวิธีการที่จะนำมาใช้ในการทดลองในครั้งนี้ จึงจัดการทดลองทดสอบวิธีการโดยกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการที่มีเงื่อนไขของระบบเดียวกัน คือ τ_1 = 10 วินาที τ_2 = 10 วินาที θ_1 = 1 วินาที θ_2 = 1 วินาที และค่าควบคุมพีไอที่เท่ากัน ทำการเปรียบเทียบ กราฟการตอบสนองของเอาท์พุท (C_1)ดังแสดงตามกราฟในภาคผนวกที่ 2 รูปที่ 7.2.1 - 7.2.5 จะเห็นว่า วิธีการไดนามิคเชิงเส้น วิธีการของเกียร์ และการทำนายค่าและแก้ค่าของอดัมส์ แสดงผลการควบคุมที่คล้ายคลึงกัน แสดงให้เห็นว่า ระบบมีความเสถียร ส่วนวิธีการของรังจ์-กัตตา อันดับที่ 3 และ รังจ์-กัตตา-เฟลเบอร์ก อันดับที่ 5 ให้ผลการทำเลียนแบบที่ไม่เสถียรและเกิดการแกว่งอย่างมากในวิธีสุดท้าย ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกวิธีการไดนามิคเชิงเส้น เป็นวิธีการในการทำการเลียนแบบในครั้งนี้ เนื่องจากวิธีการของเกียร์และอดัมส์ใช้เวลาในการคำนวนที่นานกว่า

4.3.3 ผลการศึกษากรณีที่ 3

จะเป็นการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบคาสเคดกับการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้คือ τ_1 = 10 วินาที τ_2 = 10 วินาที และกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่า θ_1 ระหว่าง 1-10 วินาที และ θ_2 ระหว่าง 1-10 วินาที โดยค่าพีไอของการควบคุมแบบป้อนกลับได้จากการจูนแบบลองผิดลองถูก ส่วนค่าพีไอของการควบคุมแบบคาสเคด คำนวนจากวิธีการไอทีเออีแบบมีการเปลี่ยนแปลงเซทพอยท์ และค่าพีไอของลูพนอกได้มาจากการจูนแบบลองผิดลองถูก ทำการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของเอาท์พุท พบว่า ที่กระบวนการที่มีเดดไทม์น้อยๆ การควบคุมแบบคาสเคดให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบ

ป้อนกลับอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเดดไทม์ค่อยๆ เพิ่มมากขึ้น การควบคุมแบบคาสเคดจะให้ผลการตอบสนองของเอาท์พุทที่แย่ลงเรื่อยๆ จนกระทั่งให้ผลการควบคุมเกือบไม่มีความแตกต่างไปจากการควบคุมแบบป้อนกลับแต่อย่างใด ดังปรากฏในผลการเปรียบเทียบตามกราฟในภาคผนวกที่ 2 รูปที่ 7.2.6 - 7.2.10 จากกราฟในรูปที่ 7.2.6 จะพบว่า เอาท์พุทของการควบคุมแบบคาสเคดของกระบวนการที่ $\tau_1 = 10$ $\tau_2 = 10$ $\theta_1 = 1$ และ $\theta_2 = 1$ วินาที จะเข้าสู่ภาวะสมดุลย์ได้เร็วกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับอย่างชัดเจน และเมื่อเดดไทม์ของลูพในและลูพนอกเพิ่มมากขึ้นเอาท์พุทของการควบคุมแบบคาสเคดจะเข้าสู่ภาวะสมดุลย์ช้าลง ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในกราฟในรูปที่ 7.2.10 เอาท์พุทของการควบคุมแบบคาสเคดของกระบวนการที่ $\tau_1 = 10$ $\tau_2 = 10$ $\theta_1 = 10$ และ $\theta_2 = 10$ วินาที จะเข้าสู่ภาวะสมดุลย์ได้ช้าลงและไม่แตกต่างมากนักจากเอาท์พุทของการควบคุมแบบป้อนกลับ

4.3.4 ผลการศึกษากรณีที่ 4

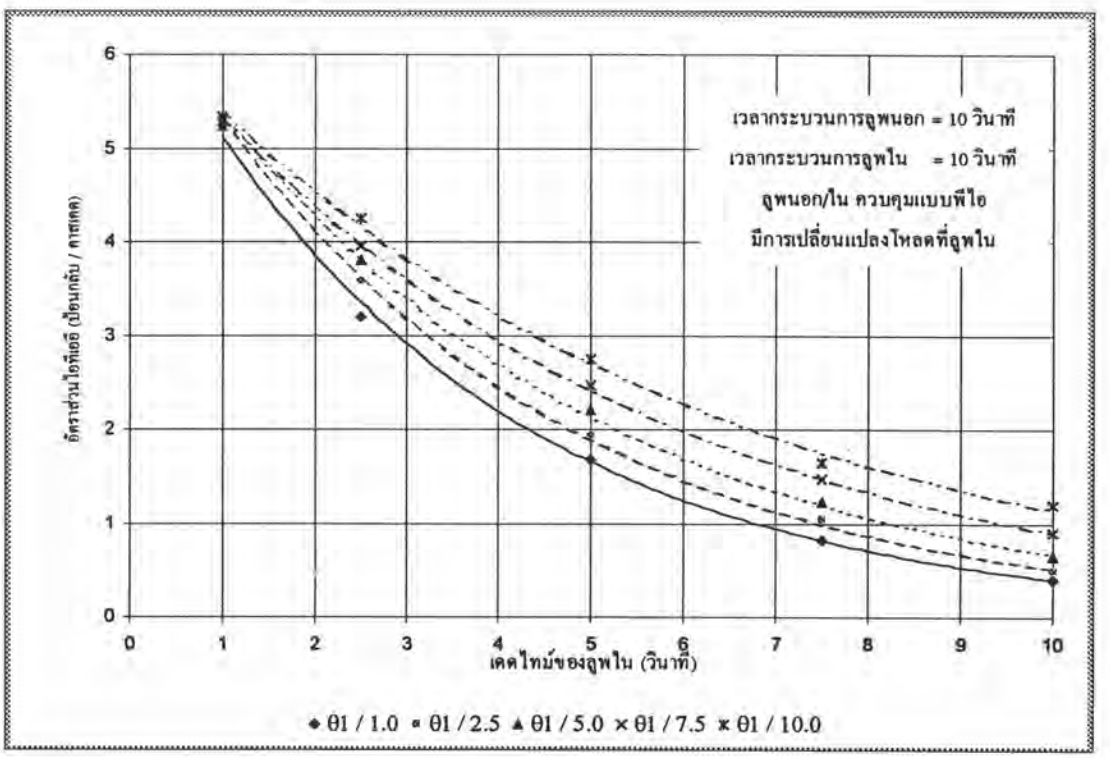
จะเป็นการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบคาสเคดกับการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยเงื่อนไขการทดลองเป็นไปเช่นเดียวกับการศึกษาในกรณีที่ 3 ในข้อ 4.3.3 จะแตกต่างเพียงวิธีการจูนลูพการควบคุมลูพในด้วยวิธีการไอทีเออีที่แตกต่างกันเท่านั้น กล่าวคือ วิธีการจูนอันดับแรกเป็นการคำนวนค่าพีไอโดยใช้สมการที่ 2.24 ในกรณีที่มีการเปลี่ยนเซทพอยท์ ส่วนในอันดับที่ 2 เป็นการคำนวนค่าพีไอโดยใช้สมการที่ 2.24 และ 2.25 เพื่อหาค่า τ_I โดยกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลด เพื่อเปรียบเทียบผลการควบคุม จากผลการทดลองที่แสดงในภาคผนวกที่ 2 ตารางที่ 7.2.2 - 7.2.3 และกราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนไอทีเออีในรูปที่ 7.2.11-7.2.12

เมื่อพิจารณาในกรณีแรก คือ การจูนลูพในด้วยไอทีเออีแบบการเปลี่ยนแปลงเซทพอยท์เทียบกับการควบคุมแบบป้อนกลับ จะพบว่า ในกรณีที่เดดไทม์ของลูพนอกและลูพในมีค่าต่ำๆ เช่น $\theta_1 = 1$ และ $\theta_2 = 1$ วินาที การควบคุมแบบคาสเคดจะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการ

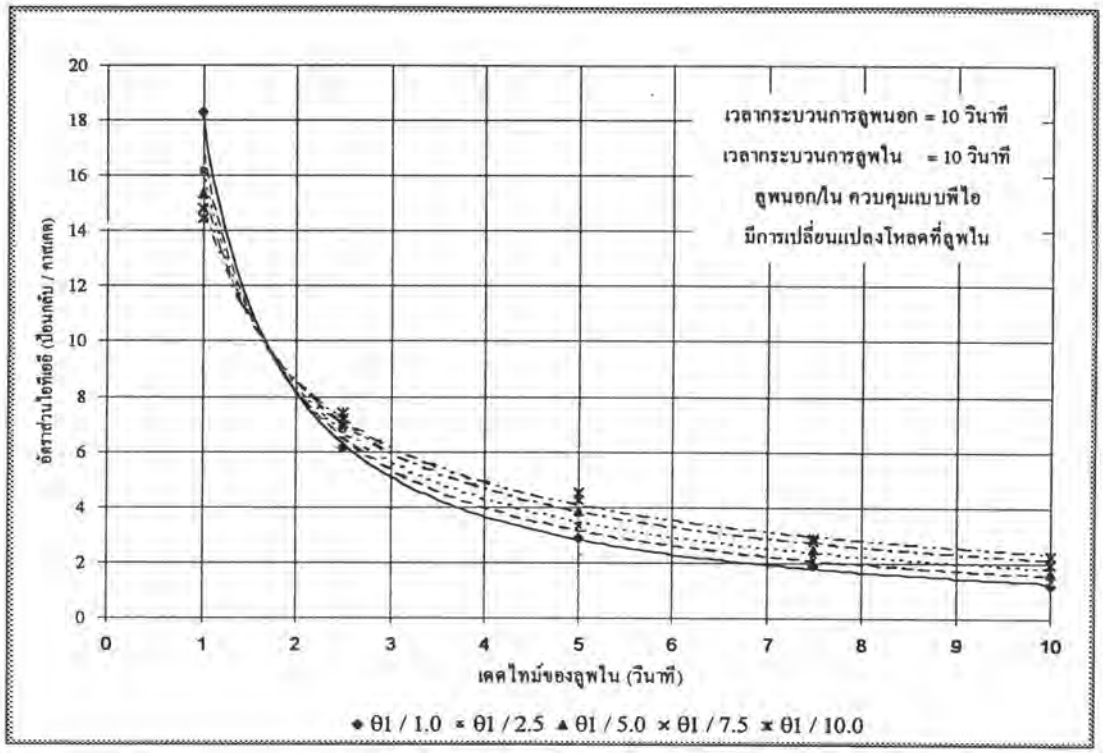
ควบคุมแบบป้อนกลับประมาณ 5.25 เท่า และเมื่อเดดไทม์ของลูพในเพิ่มมากขึ้น การควบคุมแบบคาสเคดจะให้ผลการควบคุมที่ไม่แตกต่างจากการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนไอทีเออีระหว่างการควบคุมแบบป้อนกลับต่อการควบคุมแบบคาสเคดเป็น 1:1 เป็นเกณฑ์ที่บอกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับและการควบคุมแบบคาสเคดไม่มีความแตกต่างกัน อัตราส่วนที่มากกว่า 1 จะหมายถึง การควบคุมแบบคาสเคดให้การควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับ เช่น ในกรณีที่ $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 10$, $\theta_1 = 1$ และ θ_2 ตั้งแต่ 7 วินาทีขึ้นไปให้ค่าอัตราส่วนไอทีเออีดังกล่าวต่ำกว่า 1 ซึ่งแสดงว่า ผลการควบคุมแบบคาสเคดที่กำหนดค่าพีไอโดยวิธีนี้ให้ผลการควบคุมได้ไม่ดีเท่ากับการควบคุมแบบป้อนกลับ และเมื่อพิจารณาในกรณีที่เดดไทม์ของลูพนอกเพิ่มมากขึ้น จะพบว่า อัตราส่วนของไอทีเออีของการควบคุมแบบป้อนกลับส่วนการควบคุมแบบคาสเคดจะให้อัตราส่วนที่มีค่าไม่มาก ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การจูนการควบคุมแบบคาสเคดด้วยวิธีนี้ให้การตอบสนองที่ช้าจนทำให้การควบคุมแบบคาสเคดทำได้ไม่ดีเท่าที่ควร ตามรูปที่ 4.3 a

เมื่อพิจารณาอีกกรณี คือ การคำนวนค่าพีไอด้วยไอทีเออีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบป้อนกลับ จะเห็นว่าในกรณีที่เดดไทม์ของลูพในมีค่าต่ำๆ เช่นที่ $\tau_1 = 10$ $\tau_2 = 10$ $\theta_2 = 1$ และ $\theta_1 = 1$-10 วินาที การควบคุมแบบคาสเคดสามารถควบคุมกระบวนการได้ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับระหว่าง 18-14 เท่า และมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกันเมื่อเดดไทม์ของลูพในเพิ่มขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนนี้จะเริ่มน้อยลงเมื่อค่าเดดไทม์ของลูพในมีค่ามากๆ ส่วนการเพิ่มขึ้นของเดดไทม์ลูพนอกมีส่วนเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของไอทีเออีดังกล่าวไม่เด่นชัด แต่ยังอาจกล่าวได้ว่า การควบคุมแบบคาสเคดยังให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับ ตามรูปที่ 4.3b ดังนั้น หากพิจารณากรณีศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า การจูนด้วยไอทีเออีของลูพในแบบมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดจะให้ผลการตอบสนองได้รวดเร็วกว่าการ

จูนโดยกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงของเซทพอยท์ เนื่องจากให้ผลการคำนวนที่ให้ค่า k_c แก่ตัวควบคุมของลูพในที่สูงกว่าการจูนโดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของเซทพอยท์โดยประมาณ 1.68-1.49 เท่า และเมื่อพิจารณาผลการควบคุมแบบคาสเคดของการจูนทั้งสองกรณี จะพบว่า การจูนลูพในโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดจะให้ค่าไอทีเออีที่ต่ำกว่า เช่นที่กระบวนการ $\tau_1 = 10$ $\tau_2 = 10$ $\theta_1 = 1$ และ $\theta_2 = 1\text{-}10$ วินาที การจูนลูพในโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดจะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าประมาณ 3.5 - 2.8 เท่า และกระบวนการที่เดดไทม์ของลูพนอกเพิ่มมากขึ้นคือที่ $\tau_1 = 10$ $\tau_2 = 10$ $\theta_1 = 10$ และ $\theta_2 = 1\text{-}10$ วินาที การจูนลูพในโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดจะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าประมาณ 3.1-1.9 เท่า และจากสรุปผลการศึกษาเปรียบเทียบนี้ จึงเลือกใช้วิธีการจูนกำหนดค่าพีไอให้แก่ตัวควบคุมลูพในของการควบคุมแบบคาสเคดโดยไอทีเออีจากการเปลี่ยนแปลงโหลดในการศึกษาในกรณีต่อๆ ไป



รูปที่ 4.3a กราฟเปรียบเทียบผลการจูนโดยไอทีเออีกรณีเปลี่ยนเซทพอยท์

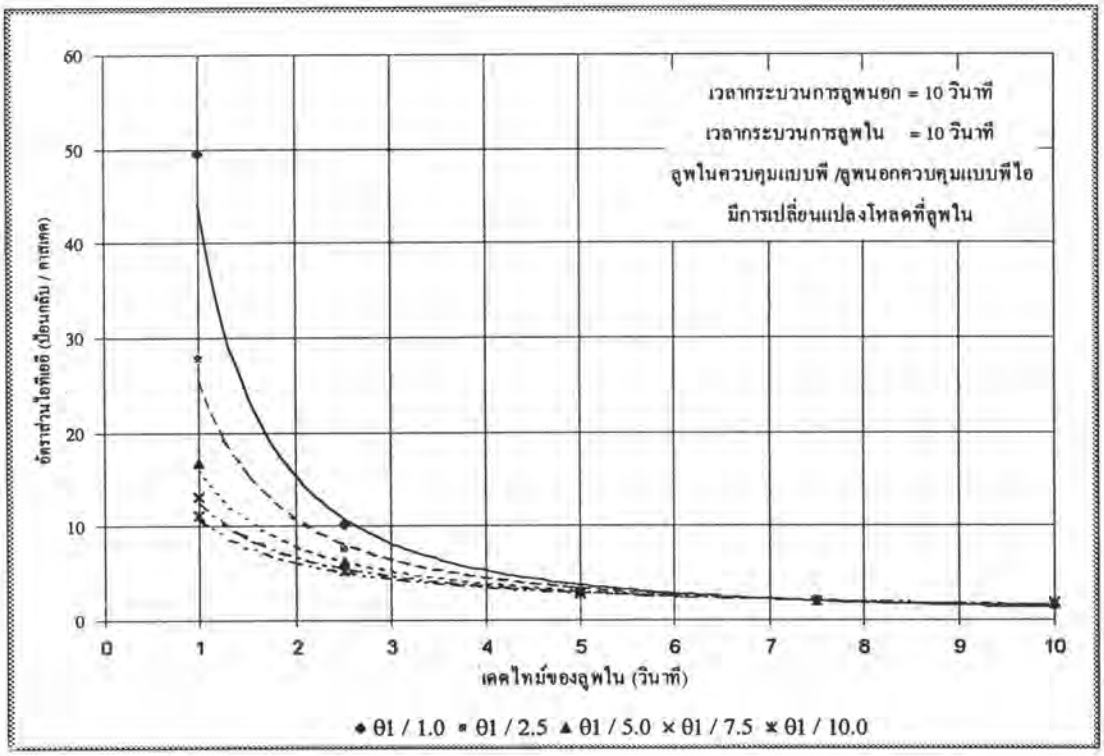


รูปที่ 4.3b กราฟเปรียบเทียบผลการจูนโดยไอทีเออีกรณีเปลี่ยนโหลด

4.3.5 ผลการศึกษากรณีที่ 5

จะเป็นการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบคาสเคดกับการควบคุมแบบป้อนกลับ เมื่อการควบคุมลูพในของการควบคุมแบบคาสเคดมีการควบคุมแบบสัดส่วนเพียงอย่างเดียว โดยเงื่อนไขของการศึกษาเช่นเดียวกับการศึกษากรณีที่ 4 การจูนลูพในของการควบคุมแบบคาสเคดการกำหนดค่า k_c ให้แก่ลูพในทำโดยใช้การคำนวนจากสมการที่ 2.1 ดังผลการทดลองดังแสดงในภาคผนวกที่ 2 ตารางที่ 7.2.4 และกราฟในรูปที่ 7.2.13 ผลการศึกษาพบว่าผลการควบคุมแบบคาสเคดจะดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเคดไทม์มีค่าต่ำๆ เช่น $\tau_1 = 10$ $\tau_2 = 10$ $\theta_2 = 1$ และ θ_1 = 1-10 วินาที การควบคุมแบบคาสเคดจะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับตั้งแต่ 50 - 11 เท่า ซึ่งจะเห็นอิทธิพลของเคดไทม์ของลูพนอกที่เพิ่ม

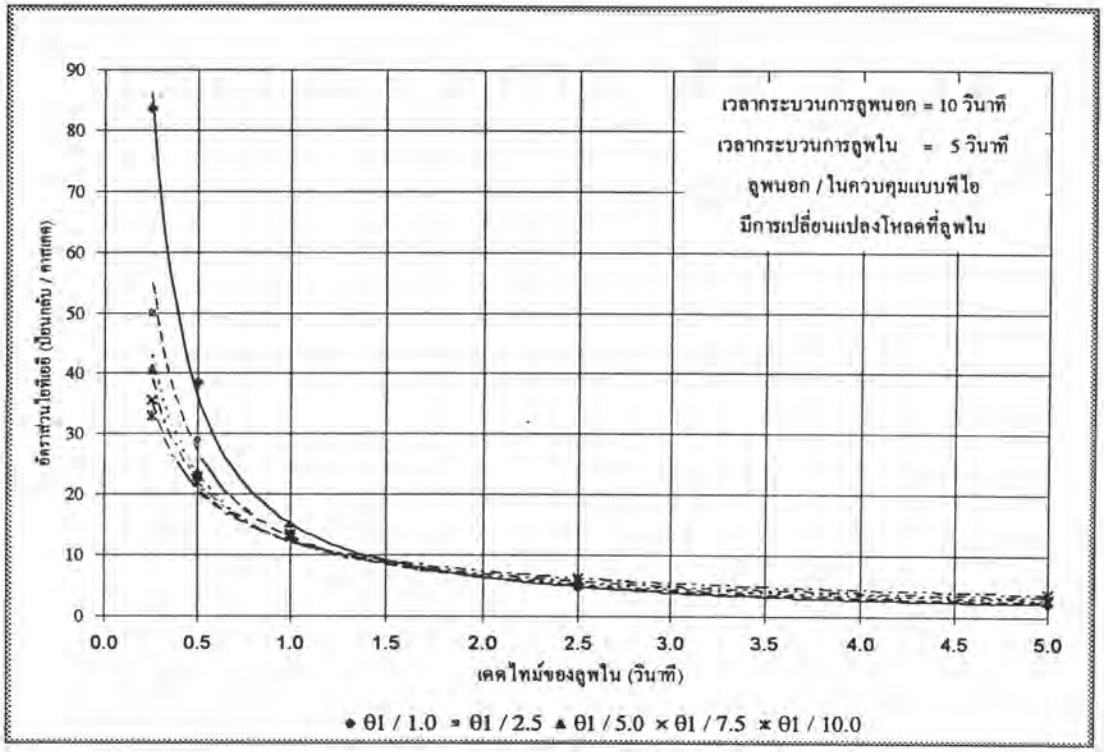
ขึ้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนไอทีเออีของการควบคุมแบบป้อนกลับต่อการควบคุมแบบคาสเคดทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมลูพในแบบสัดส่วนจะให้ค่าออฟเซทที่มากขึ้นเมื่อเดดไทม์ของลูพในมีค่ามากขึ้น ประกอบกับเมื่อเดดไทม์ของลูพนอกเพิ่มมากขึ้นจึงเสริมความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ให้เป็นอย่างชัดเจนมากขึ้น ในกรณีที่ $\tau_1 = 10$ $\tau_2 = 10$ θ_2 เพิ่มขึ้นจาก 5-10 และ θ_1 มีค่าระหว่าง 1-10 วินาที อัตราส่วนไอทีเออีของการควบคุมแบบป้อนกลับต่อการควบคุมแบบคาสเคดจะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลการควบคุมนี้กับการควบคุมแบบป้อนกลับก็ยังคงพบว่าการควบคุมแบบคาสเคดที่มีเดดไทม์ในลูพในเพิ่มมากขึ้นยังคงให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับโดยประมาณตั้งแต่ 2 เท่าขึ้นไป ตามรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลการควบคุมเปรียบเทียบเมื่อลูพในของการควบคุมแบบคาสเคดควบคุมแบบพี

4.3.6 ผลการศึกษากรณีที่ 6

จะเป็นการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบคาสเคด ในกรณีที่เวลาของกระบวนการของลูพในลดลงจากการศึกษาในกรณีที่ 4 ครึ่งหนึ่ง คือ $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 5$, θ_1 มีค่าตั้งแต่ 1-10 และ θ_2 มีค่าตั้งแต่ 0.25 - 5 วินาที จากผลการทดลองในภาคผนวกที่ 2 ตารางที่ 7.2.5 และกราฟในรูปที่ 7.2.14 จะพบว่า ที่ค่าเดดไทม์ในลูพในมีค่าน้อย การควบคุมแบบคาสเคดจะให้ผลการควบคุมดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับอย่างชัดเจน เช่นที่ $\tau_1 = 10$ $\tau_2 = 5$ $\theta_2 = 0.25$ วินาที และ $\theta_1 = 1$-10 วินาที การควบคุมแบบคาสเคดให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับในอัตราส่วนตั้งแต่ 82 - 38 เท่า หรือที่ $\tau_1 = 10$ $\tau_2 = 5$ $\theta_2 = 0.5$ วินาที และ $\theta_1 = 1$-10 วินาที การควบคุมแบบคาสเคดให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับในอัตราส่วนตั้งแต่ 38.5 - 22 เท่า เมื่อเดดไทม์ของลูพในเพิ่มมากขึ้นค่าความแตกต่างของอัตราส่วนไอทีเออีนี้จะลดน้อยลง แต่ยังคงสามารถสรุปได้ว่า การควบคุมแบบคาสเคดให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับประมาณตั้งแต่ 4 เท่าขึ้นไป โดยอัตราส่วนของไอทีเออีของการควบคุมแบบป้อนกลับต่อการควบคุมแบบคาสเคดจะไม่แตกต่างกันมากเมื่อเดดไทม์ของลูพในเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 1.5 วินาทีขึ้นไป ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.5

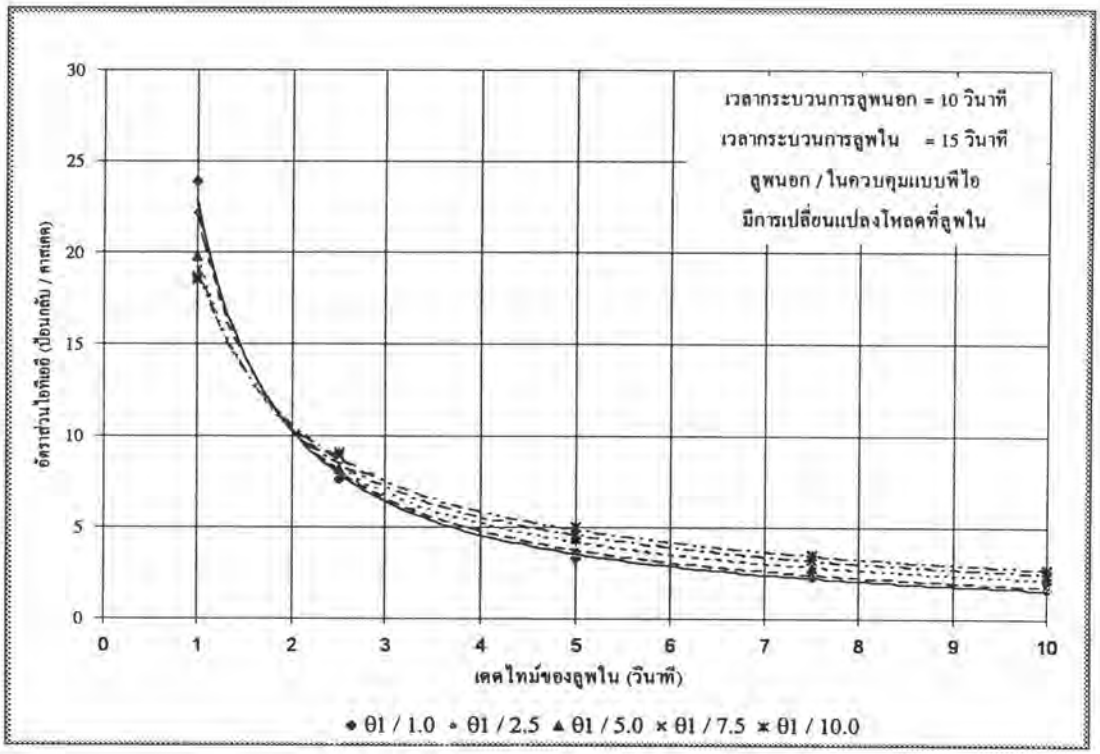


รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบผลการควบคุมเมื่อ τ_2 ลดลงเหลือ 5 วินาที

4.3.7 ผลการศึกษากรณีที่ 7

จะเป็นการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบคาสเคดในกรณีที่ เวลาของกระบวนการของลูพในเพิ่มขึ้นจากการศึกษาในกรณีที่ 4 คือ $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 15$, θ_1 มีค่าตั้งแต่ 1-10 และ θ_2 มีค่าตั้งแต่ 1-10 วินาที จากผลการทดลองในภาคผนวกที่ 2 ตารางที่ 7.2.6 และกราฟในรูปที่ 7.2.15 ยังคงพบว่า การควบคุมแบบคาสเคดยังคงให้ผลการควบคุมดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับเช่นเดิม เช่นที่ $\tau_1 = 10$ $\tau_2 = 15$ $\theta_2 = 1$ และ $\theta_1 = 1$-10 วินาที การควบคุมแบบคาสเคดจะดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับประมาณ 24 - 19 เท่า และพบว่า การเปลี่ยนแปลงของเคดไทม์ในลูพนอกตั้งแต่ 1-10 วินาที มิได้ส่งผลให้เกิดความแตกต่างในผลอัตราส่วนไอทีเออี

ระหว่างการควบคุมแบบป้อนกลับต่อการควบคุมแบบคาสเคดมากนักในแต่ละค่าของเดดไทม์ของลูพในตั้งแต่ 1-10 วินาที ตามรูปที่ 4.6

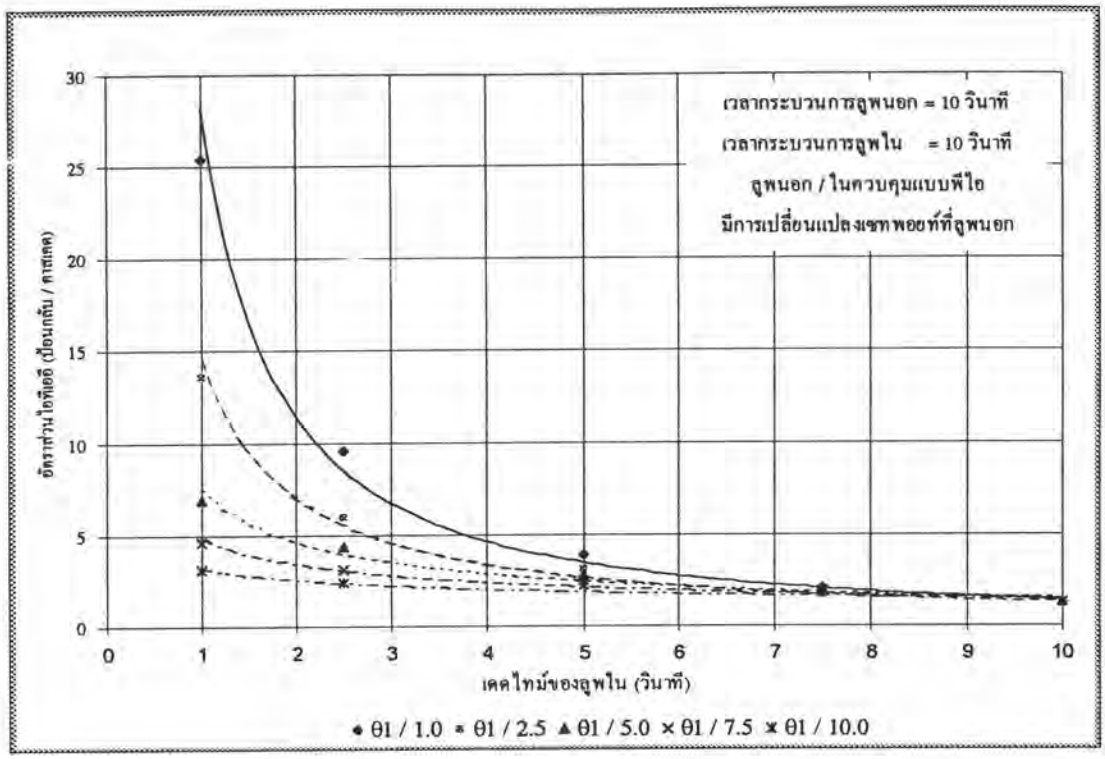


รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบผลการควบคุมเมื่อ τ_2 เพิ่มขึ้นเป็น 15 วินาที

4.3.8 ผลการศึกษากรณีที่ 8

จะเป็นการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบคาสเคดในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของเซทพอยท์ของลูพนอก โดยมิได้เปลี่ยนแปลงค่าพีไอของตัวควบคุมของลูพทั้งสองลูพ เพื่อศึกษาผลการควบคุมแบบคาสเคดว่าจะสามารถตอบสนองหรือควบคุมกระบวนการได้ดีเพียงใดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเซทพอยท์ โดยใช้พื้นฐานแนวความคิดถึงแนวทางปฏิบัติภายในโรงงานว่า ภายหลังจากทำการจูนตัวควบคุมจนได้การควบคุมที่สอดคล้องกับ

กระบวนการแล้วจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพีไอ และปล่อยให้ตัวควบคุมทำหน้าที่ในการควบคุมกระบวนการนั้นๆ ไม่ว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในกระบวนการ เช่น การเปลี่ยนเซทพอยท์ การเปลี่ยนแปลงของโหลดทั้งในลูพในและลูพนอก จนกว่าจะสังเกตเห็นว่า ตัวควบคุมดังกล่าวไม่สามารถควบคุมกระบวนการได้หรือให้การควบคุมที่ไม่ดีไม่สอดคล้องกับความต้องการของการควบคุม โดยใช้เงื่อนไขของกระบวนการที่ศึกษาในกรณีที่ 4 คือ $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 10$, θ_1 และ θ_2 = 1-10 วินาที จากผลการทดลองในภาคผนวกที่ 2 ตารางที่ 7.2.7 และกราฟรูปที่ 7.2.16 จะพบว่าการควบคุมแบบคาสเคดมีการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าแดดไทม์ต่ำๆ เช่น ที่ $\theta_2 = 1$ และ θ_1 มีค่า 1-5 วินาที การควบคุมแบบคาสเคดจะควบคุมดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับประมาณ 25-6.2 เท่า และเมื่อเดดไทม์ของลูพในเพิ่มมากขึ้นการควบคุมแบบคาสเคดยังคงสามารถควบคุมได้ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยที่ความแตกต่างของสัดส่วนไอทีเออีจะลดน้อยลง ส่วนเดดไทม์ของลูพนอกจะมีผลต่อการควบคุมแบบคาสเคดโดยส่งผลความแตกต่างของอัตราส่วนไอทีเออีของการควบคุมแบบป้อนกลับต่อการควบคุมแบบคาสเคดอย่างชัดเจนคือ เมื่อ $\theta_2 = 1$ วินาที และ $\theta_1 = 1$ อัตราส่วนของไอทีเออีจะมีความแตกต่างกันกับเมื่อ $\theta_1 =$ 10 มากถึง 20.5 เท่า แต่เมื่อเดดไทม์ของลูพนอกเพิ่มมากขึ้นความสามารถของการควบคุมแบบคาสเคดจะไม่ต่างกันมากในขณะที่เดดไทม์ของลูพในเพิ่มจากค่าน้อยไปมาก เช่น ที่ $\theta_1 = 10$ และ θ_2 มีค่าจาก 1-10 วินาที อัตราส่วนของไอทีเออีจะมีความแตกต่างกันกันเพียง 2.1 เท่า ตามรูปที่ 4.7 และเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษากรณีที่ 4 จะพบว่า การจูนตัวควบคุมสำหรับการเปลี่ยนแปลงโหลดของลูพในจะควบคุมกระบวนการได้ไม่ดีสำหรับกระบวนการที่เดดไทม์ของลูพนอกมีค่ามากในขณะที่เดดไทม์ของลูพในมีค่าน้อยๆ แต่อย่างไรก็ตามการจูนด้วยวิธีการดังกล่าวยังคงสามารถควบคุมกระบวนการได้

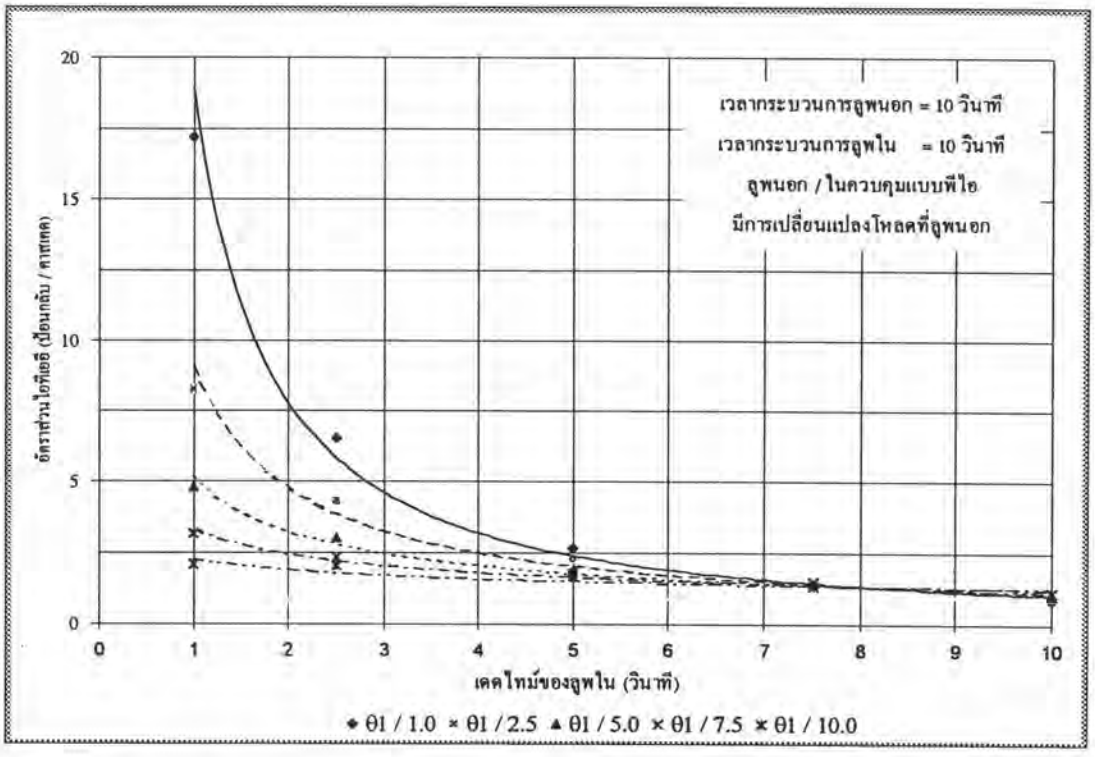


รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบการควบคุมแบบคาสเคดเมื่อเซทพอยท์ลูพนอกเปลี่ยนแปลง

4.3.9 ผลการศึกษากรณีที่ 9

จะเป็นการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบคาสเคดในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดของลูพนอก โดยมิได้เปลี่ยนแปลงค่าพีไอของตัวควบคุมของลูพทั้งสองลูพ เพื่อศึกษาผลการควบคุมแบบคาสเคดในการตอบสนองหรือควบคุมกระบวนการได้ดีเพียงใดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดจากลูพนอก โดยใช้เงื่อนไขเดียวกับการศึกษาในกรณีที่ 8 จากผลการทดลองในภาคผนวกที่ 2 ตารางที่ 7.2.8 และกราฟในรูปที่ 7.2.17 จะพบว่า การควบคุมแบบคาสเคดยังมีการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับอย่างชัดเจนเมื่อค่าเคดไทม์ของลูพในและลูพนอกมีค่าน้อยๆ แต่เมื่อเคดไทม์ของลูพทั้งสองลูพเพิ่มมากขึ้นผลการควบคุมเมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบป้อนกลับเกือบจะไม่แตกต่างกันเลย โดยที่การเพิ่มขึ้นของเคดไทม์ของลูพ

นอกจะส่งผลให้การควบคุมแบบคาสเคดด้อยลงอย่างชัดเจน เช่น ที่ θ_2 = 1 วินาที และ θ_1 = 1-5 วินาที การควบคุมแบบคาสเคดจะดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับประมาณ 17 - 4 เท่า แต่เมื่อ θ_1 เพิ่มขึ้นเป็น 7.5 - 10 วินาที การควบคุมแบบคาสเคดจะควบคุมได้ไม่แตกต่างกับการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยจะควบคุมได้ดีกว่าเพียง 2.7 - 2.1 เท่า เท่านั้น และเมื่อเดดไทม์ของลูพในเพิ่มมากขึ้น ความแตกต่างนี้ยิ่งน้อยลงตามลำดับ ตามรูปที่ 4.8 ซึ่งผลการศึกษากรณีที่ 9 นี้จะคล้ายกับผลของการศึกษาในกรณีที่ 8 จากการศึกษาทั้งกรณีที่ 8 และ 9 จะชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า หากกระบวนการที่ควบคุมแบบคาสเคดที่มีเดดไทม์ลูพนอกที่มีค่ามากๆ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องจูนระบบควบคุมด้วยความระมัดระวัง โดยในการจูนตัวควบคุมลูพนอกจะต้องคำนึงถึงตัวแปรหลักว่า เป็นโหลดจากลูพใน โหลดของลูพนอก หรือจูนเพื่อชดเชยการเปลี่ยนเซทพอยท์ เพื่อให้ผลการควบคุมออกมาดีที่สุด



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบการควบคุมเมื่อโหลดลูพนอกเปลี่ยนแปลง

4.3.10 ผลการศึกษากรณีที่ 10

เป็นการศึกษาเปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบป้อนกลับและการควบคุมแบบคาสเคด เมื่อแบบจำลองหรือกระบวนการที่ต้องควบคุมมีอันดับที่สูงขึ้น โดยในการศึกษาได้กำหนดให้ลูพนอกมีอันดับของกระบวนการเป็น 4 และลูพในมีอันดับของกระบวนการเป็น 1 โดยกำหนดให้มีทรานสเฟอร์ฟังชันตามสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1)^4} \tag{4.1}$$

และกำหนดให้เปลี่ยนค่าเวลาของกระบวนการของลูพในให้มีค่าต่างๆ กัน คือ τ_2 = 5, 10 และ 15 วินาที และกำหนดค่าเดดไทม์ θ_2 = 1 วินาที จากผลการทดลองในภาคผนวกที่ 2 ตารางที่ 7.2.9 จะพบว่า เมื่อเวลาของกระบวนการเพิ่มมากขึ้น ผลการควบคุมแบบคาสเคดให้การควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับมีค่าอยู่ระหว่าง 5.33 - 3.96 เท่า ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า โปรแกรมช่วยวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุม Matlab สามารถจำลองแบบจำลองในลักษณะที่แตกต่างกันออกไปได้ ถึงแม้ว่า จะเป็นที่ยอมรับว่า ในการสร้างแบบจำลองนั้นสามารถจะใช้แบบจำลองอันดับที่ 1 ที่มีเดดไทม์เป็นแบบจำลองแทนกระบวนการที่มีอันดับที่สูงๆ ได้ และผลการควบคุมออกมาได้เช่นเดียวกัน