

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การออกแบบรูปแบบการควบคุมสำหรับถังหมักก๊าซชีวภาพแบบกวนผสมบูรณ์

Control Strategy for Biogas's Continuous Stirred Tank Reactor

ธนากร ปาบุ่ง*, ชัชวาลย์ ชัยชนะ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Email: tingly158@hotmail.com , โทรศัพท์: (662) 4708309-10, โทรสาร: (662) 8729805

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ การวิเคราะห์ผลตอบสนองของอุณหภูมิภายในของถังผสมถ่ายเทความร้อนแบบกวนผสมบูรณ์ (Continuous Stirred Tank Reactor) ขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งใช้เป็นถังหมักก๊าซชีวภาพ (Biogas) ซึ่งแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกควบคุมอุณหภูมิในถังให้คงที่ (Regulation problem) เมื่อมีการรบกวน (Disturbance) จากการถ่ายเทมวลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเข้าสู่ถังและมีการถ่ายเทมวลออกจากถัง และกรณีที่สองการติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าควบคุม (Tracking problem) โดยใช้รูปแบบการควบคุม 3 รูปแบบ ได้แก่ การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feed forward control) และการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับ (Combined feedforward - feedback control) โดยทำการจำลองผลตอบสนองของระบบด้วยโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิภายในถังให้คงที่ที่ 50 °C จากผลการศึกษาพบว่าสำหรับปัญหาการก่อกำจัดตัวแปรรบกวน (Regulation problem) การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับให้ผลการตอบสนองต่อการรบกวนที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าเพียงอย่างเดียวและการควบคุมแบบป้อนกลับให้ผลการตอบสนองที่แย่ที่สุด สำหรับปัญหาการติดตามค่าควบคุม (Tracking problem) พบว่าการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับและการควบคุมแบบป้อนกลับเพียงอย่างเดียวให้ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าควบคุมที่เหมือนกัน และการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าให้ผลการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตามค่าควบคุม

คำหลัก: ก๊าซชีวภาพ, ถังผสมถ่ายเทความร้อนแบบกวนผสมบูรณ์, การควบคุม

Abstract

This article presented the analysis of temperature reaction in a 1-cubic meter Continuous Stirred Tank Reactor used for biogas fermentation. The examination was divided into 2 cases which are regulation problem caused by disturbance from transferring lower-temperature mass into the tank and out of the tank and tracking problem, based on 3 forms of control, these being: feedback control, feed forward control, and combined feed forward - feedback control. The system was modeled by using matlab program which maintained the temperature in the tank at 50 °C through the flow rate of constant high-temperature water that went through a heat exchanger. The results of the regulation problem analysis showed that the combined feed forward - feedback control produced a reaction to disturbance better than the feed forward control did alone, while the feedback control caused the worst reaction. For the tracking

problem, the experiment found that the combined feed forward - feedback control and feedback control produced a similar reaction to the change of controlled value, and the feed forward control showed the best reaction for this case.

Keywords: Biogas, Continuous Stirred Tank Reactor, Control

1. บทนำ

จากสถานะการพลังงานที่มีความผันผวนและมีแนวโน้มความต้องการที่สูงขึ้น พลังงานทดแทนจึงเป็นพลังงานทางเลือกที่ได้รับความสนใจ โดยพลังงานทดแทนที่ได้จากวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตร ที่รู้จักกันดีคือ ก๊าซชีวภาพ (Biogas) และการที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ก๊าซชีวภาพจึงเป็นพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นอย่างยิ่ง โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะระบุวาระบบผลิตก๊าซชีวภาพช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) อุณหภูมิประมาณ $50-60^{\circ}\text{C}$ มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซที่ดีที่สุด โดยการหมักก๊าซชีวภาพในช่วงเทอร์โมฟิลิกนั้น นิยมหมักในบ่อหมักแบบไม่ใช้อากาศแบบกวนสมบูรณ์ (Continuous Stirred Tank Reactor : CSTR) ซึ่งเป็นถังที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่คงที่ และเนื่องจากแบคทีเรียจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซหรือแม้กระทั่งส่งผลต่อความล้มเหลวของระบบได้ ดังนั้นการรักษอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

โดยวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตรที่นำมาหมักในถังกวนสมบูรณ์ส่วนใหญ่มีแบบจำลองคณิตศาสตร์เป็นกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเวลาเฉื่อย (First order plus dead time process:FOPDT) ซึ่งเมื่อต้องการควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในถังอาจใช้ระยะเวลานาน และอาจมีสมรรถนะในการควบคุมที่ไม่ดีนักต่อการรบกวนจากตัวแปรรบกวนต่างๆ หรือแม้แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าควบคุม (Set point) ส่งผลให้อุณหภูมิภายในถังกวนสมบูรณ์ไม่ได้ตามเป้าหมายควบคุมเป็นเหตุให้ระบบหมักก๊าซชีวภาพเกิดการล้มเหลวในที่สุด สำหรับประเทศไทยยังไม่พบการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอุณหภูมิภายใน

บ่อหมักโดยไม่ใช้อากาศแบบกวนสมบูรณ์ ในช่วงเทอร์โมฟิลิกจึงเป็นที่มาของการศึกษาในครั้งนี้

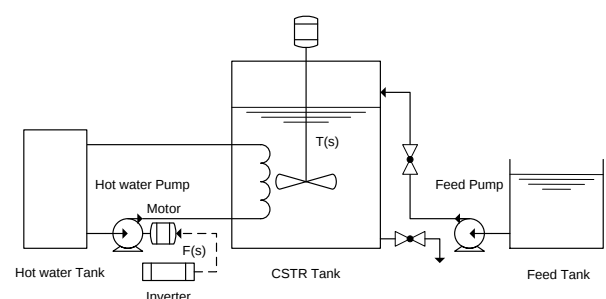
2. ทฤษฎีการทดลอง

2.1 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธีการทดลอง

การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ ทำได้โดยการป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได (step input) ให้กระบวนการของถัง CSTR โดยกระบวนการแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

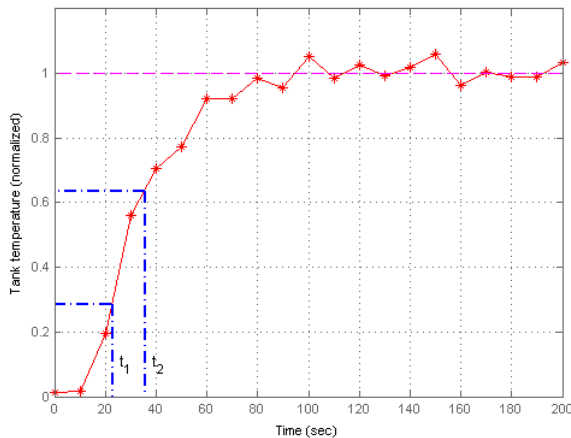
1. ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน (Heatexchanger) ประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำร้อน (Hot water pump) ที่ถูกควบคุมอัตราการไหลด้วยความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งแปรผันตามสัญญาณความถี่จากอินเวอร์เตอร์ ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และชุดเครื่องทำน้ำร้อนด้วยฮีทเตอร์ไฟฟ้า

2. ส่วนเติมสารหมักซึ่งถือเป็นตัวแปรรบกวน (Disturbance) ของระบบ ประกอบด้วย เครื่องสูบลำหมัก วาล์วควบคุมอัตราการไหล และวาล์วระบายสารหมักเพื่อควบคุมปริมาตรของถังให้คงที่ โดยรายละเอียดของถัง CSTR แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงแผนผังของถังผสมถ่ายเทความร้อนแบบกวนสมบูรณ์

ซึ่งสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดในที่นี้คือ การป้อนสัญญาณความถี่ควบคุม $F(s)$ 50 Hz ให้แก่อินเวอร์เตอร์ที่ต่อกับเครื่องสูบน้ำร้อน (Hot water pump) และวัดอุณหภูมิของกระบวนการ $T(s)$ จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะที่อุณหภูมิคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการหาทรานสเฟอว์ฟังก์ชันของกระบวนการด้วยวิธีการป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับกระบวนการ

ซึ่งค่าคงที่ของกระบวนการจะเป็นไปตามสมการที่ (2) และสมการที่ (3) ดังนี้

$$\tau_t = \frac{3}{2}(t_1 - t_2) \quad (2)$$

$$\tau_{dt} = t_2 - \tau_{tp} \quad (3)$$

เมื่อ

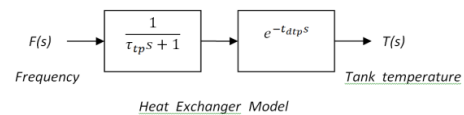
t_1 คือ เวลาที่ 63.2% ของค่าสุดท้าย

t_2 คือ เวลาที่ 28.3% ของค่าสุดท้าย

τ_t คือ time constant

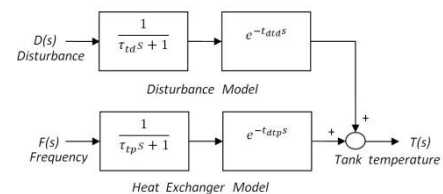
τ_{dt} คือ dead time

ซึ่งกระบวนการของถัง CSTR ถูกพิจารณาให้ประกอบไปด้วย 2 กระบวนการย่อย ได้แก่ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) และกระบวนการของตัวแปรรบกวน (Disturbance) ในที่นี้คือการถ่ายเทมวลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเข้าสู่ระบบโดยเมื่อได้ค่าคงที่ของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถแสดงระบบในรูปแบบของบล็อกไดอะแกรมดังแสดงใน รูปที่ 3



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมระบบถึงผลสมถ่ายเทความร้อนแบบกวนสมบูรณ์

เช่นเดียวกันการหาค่าคงที่ของตัวแปรรบกวน $D(s)$ สามารถทำได้เช่นเดียวกันกับการหาค่าคงที่ของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งในที่สุดก็จะได้ทรานสเฟอว์ฟังก์ชันของถัง CSTR ทั้งระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4



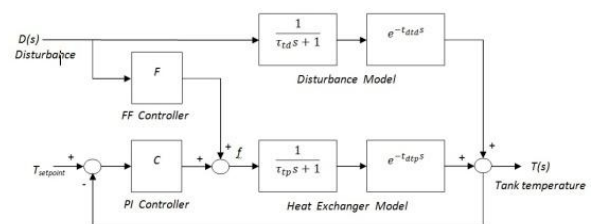
รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมระบบถึงผลสมถ่ายเทความร้อนแบบกวนสมบูรณ์เมื่อมีตัวแปรรบกวน

2.2 การควบคุมอุณหภูมิของถัง CSTR

รูปแบบของการควบคุมที่ถูกเลือกใช้ในการศึกษาผลตอบสนองของระบบ (Response) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าควบคุม และผลตอบสนองของระบบเมื่อมีตัวแปรรบกวน มีดังนี้

1. การควบคุมแบบป้อนกลับ
2. การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า
3. การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับ

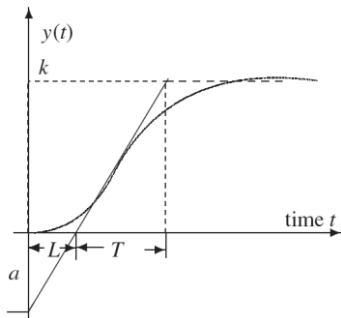
เมื่อนำการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับมาใช้ควบคุมระบบถึงผลสมถ่ายเทความร้อนแบบกวนสมบูรณ์แสดงได้ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมระบบถึงผลสมถ่ายเทความร้อนแบบกวนสมบูรณ์เมื่อใช้การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับ

2.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี

การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี จะใช้วิธีป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได ให้กับกระบวนการแสดงดังรูปที่ 6 จากนั้นจึงหาค่าคงที่ต่างๆ เพื่อนำไปหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมซึ่งถูกแนะนำโดย Ziegler-Nichols โดยตารางการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 1



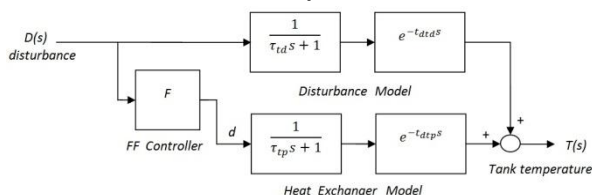
รูปที่ 6 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันได (step respond) ของกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเวลาเฉื่อย (first order plus dead time process) โดยที่

$$a = kL/T$$

ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ พี ไอ และพีไอดี

	K_p	T_i	T_d
P	$1/a$	-	-
PI	$0.9/a$	$3L$	
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$

2.4 การออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า



รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมระบบถึงผสมถ่ายเทความร้อนแบบกวนสมบูรณ์เมื่อใช้การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า

จากรูปที่ 7 เมื่อตัวควบคุมสามารถชดเชยสัญญาณรบกวนได้ทั้งหมดจะได้ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าตามสมการ (4)

$$T(s) = (G_p F(s) + G_d) D(s) = 0$$

$$G_p(s) F(s) + G_d(s) = 0$$

$$\therefore F(s) = \frac{G_d(s)}{G_p(s)} = \frac{\tau_{tp}s + 1}{\tau_{td}s + 1} e^{-(\tau_{td}d - \tau_{td}p)s} \quad (4)$$

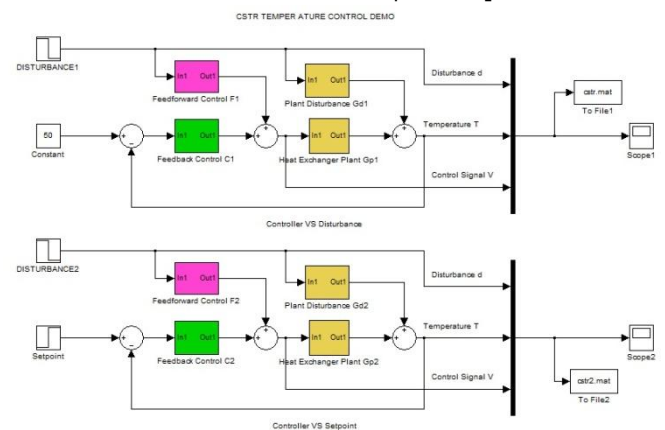
เมื่อ

$G_d(s)$ คือ ทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันของตัวแปรรบกวน

$G_p(s)$ คือ ทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันของส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน

3. การหาผลตอบสนองของระบบ

เมื่อได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของถังผสมถ่ายเทความร้อนแบบกวนสมบูรณ์ ด้วยวิธีการทดลองแล้ว จากนั้นหาผลตอบสนองของระบบโดยใช้โปรแกรม แมทแล็บ (MATLAB) โดยนำค่าคงที่ของระบบป้อนในบล็อกไดอะแกรม ดังแสดงในรูปที่ 8 จากนั้นดูผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้การควบคุมทั้ง 3 รูปแบบ



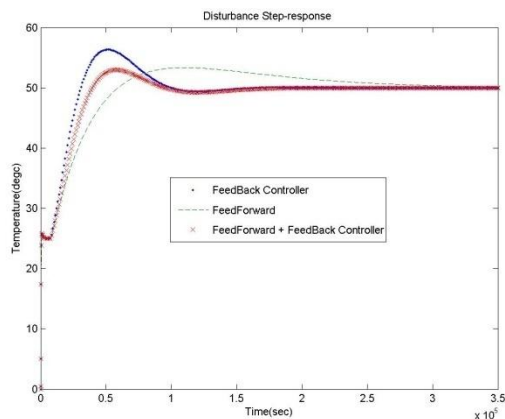
รูปที่ 8 บล็อกไดอะแกรมระบบถึงผสมถ่ายเทความร้อนแบบกวนสมบูรณ์เมื่อใช้การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับเมื่อมีตัวแปรรบกวนและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าควบคุม

4. ผลการทดลอง

ผลตอบสนองแบบขั้นบันได (step response) ของระบบเมื่อมีตัวแปรรบกวนโดยใช้ รูปแบบการควบคุมทั้ง 3 รูปแบบ มีเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกิน (Percent overshoot) และเวลาเข้าที่ (Settling time) แสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 9

ตารางที่ 2 ผลตอบสนองแบบขั้นบันได (step response) ของระบบเมื่อมีตัวแปรปรบกวนโดยใช้รูปแบบการควบคุม 3 รูปแบบ

	% overshoot (%)	Settling time (sec)
Feedback	11	1.74×10^5
Feedforward	5.2	3.20×10^5
Feedback + Feed forward	5.1	1.83×10^5

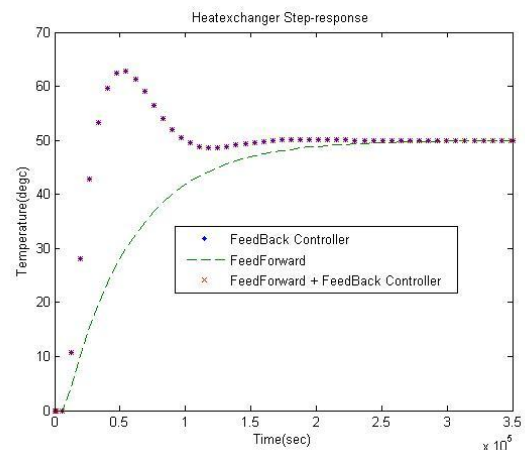


รูปที่ 9 ผลตอบสนองแบบขั้นบันได (step response) ของระบบเมื่อมีตัวแปรปรบกวนโดยใช้รูปแบบการควบคุม 3 รูปแบบ คือ ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ ตัวควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า และตัวควบคุมแบบป้อนกลับร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า

ผลตอบสนองแบบขั้นบันได (step response) ของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าควบคุมโดยใช้รูปแบบการควบคุม 3 รูปแบบ คือ ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ ตัวควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า และตัวควบคุมแบบป้อนกลับร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนล่วงหน้ามีเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกิน (Percent overshoot) และ เวลาเข้าที่ (Settling time) แสดงดังตารางที่ 3 และรูปที่ 10

ตารางที่ 3 ผลตอบสนองแบบขั้นบันได (step response) ของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าควบคุมโดยใช้รูปแบบการควบคุม 3 รูปแบบ

	% overshoot (%)	Rise time (sec)
Feedback	26	2.70×10^5
Feedforward	0	2.65×10^5
Feedback + Feed forward	26	2.70×10^5



รูปที่ 10 ผลตอบสนองแบบขั้นบันได (step response) ของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าควบคุมโดยใช้รูปแบบการควบคุม 3 รูปแบบ คือ ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ ตัวควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า และตัวควบคุมแบบป้อนกลับร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า

5. สรุปผลการทดลอง

ในกรณีที่ที่มีตัวแปรปรบกวนจากภายนอกพบว่าการควบคุมแบบป้อนกลับร่วมกับป้อนล่วงหน้าสามารถเข้าสู่ค่าควบคุมได้เร็วที่สุดและมีค่าพุ่งเกินน้อยที่สุด รองลงมาได้แก่ตัวควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า และการควบคุมแบบป้อนกลับเป็นอันดับสุดท้ายอีกทั้งยังมีค่าพุ่งเกินสูงที่สุด

ในกรณีที่ค่าควบคุม (setpoint) มีการเปลี่ยนแปลงพบว่าการควบคุมแบบป้อนกลับร่วมกับป้อนล่วงหน้าและการควบคุมแบบป้อนกลับมีผลการตอบสนองที่เหมือนกันโดยสามารถเข้าสู่ค่าควบคุมได้เร็วกว่าตัวควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าแต่มีค่าพุ่งเกินสูงกว่าตัวควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า

จากผลการจำลองระบบทำให้ทราบว่าในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (start up) รูปแบบการควบคุมที่เหมาะสม คือ ตัวควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า ส่วนช่วงที่ระบบทำงานแล้วรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสม คือ ตัวควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับ

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจาก บัณฑิต
วิทยาลัยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และสถาบันวิจัยและพัฒนา
พลังงานมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dale E. Seborg., Thomas F. Edgar., Duncan A. Mellichamp, 2004, Process Dynamics and Control, second edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini, 2006, Feedback Control of Dynamic
- [3] J.G. Ziegler and N.B. Nichols, 1942. Optimum Settings for Automatic Controller. ASME Trans., Vol. 64, pp.759-768