

ระบบควบคุมชนิดอิงแบบจำลองของกระบวนการทางเคมีที่มีความล่าช้าของสัญญาณ

MODEL-BASED CONTROL OF CHEMICAL PROCESS WITH TIME-DELAY SYSTEM

กมลพร ขวัญเกิด, กฤตธี ภูละออ

ผศ.ดร.ชรินทร์ ปัญญาพรผล

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร. 02-9428555 ต่อ 1230 และ 1202-4 โทรสาร 02-5614621 E-mail: fengcnp@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ปัญหาความล่าช้าของสัญญาณเนื่องจากการตอบสนองของอุปกรณ์ หรืออุปกรณ์วัดคุมในกระบวนการเคมีที่มีการส่งสัญญาณกลับมายังตัวควบคุม เป็นปัญหาที่มีความสำคัญต่อการทำงานของระบบควบคุม ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและเสถียรภาพของการควบคุม งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบระบบควบคุมสำหรับแก้ปัญหาล่าช้าของสัญญาณที่ตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออกในกระบวนการเคมี โดยใช้เทคนิค Input/output (I/O) linearization ในการสร้างตัวควบคุมร่วมกับตัวทำนายค่าตัวแปรสถานะ ณ เวลาที่เสมือนไม่เกิดความล่าช้า เพื่อส่งค่าให้กับตัวควบคุมและนำค่าที่ทำนายได้มาพิจารณาเทียบกับค่าตัวแปรขาออกที่ออกจากกระบวนการจริง เพื่อทำการชดเชยค่าให้กับกับค่าเป้าหมายที่ใช้ในการคำนวณค่าตัวแปรขาเข้าที่เหมาะสมที่จะป้อนให้กับกระบวนการ โดยทดสอบระบบควบคุมที่ออกแบบไว้กับตัวอย่างกระบวนการเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor, CSTR) ในระบบตัวแปรเดียว พบว่าตัวแปรขาออกของกระบวนการสามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้แม่นยำและรวดเร็ว

คำสำคัญ: Time delay, Input-output linearization, Single-input single-output, Model-based control

Abstract

The problem of time delay due to transportation lags and measurement delays in chemical processes is the significant problem of control system. The problem of time delay has an effect on performance and stability of the control system. This work presents a new control system for handling the chemical process with input and output time delays. The feedback controller is based on the Input/output (I/O)

linearization integrated with the time delay-free state-predictor which used I/O linearization technique to predict the state variables that is compared with output of process value to compensate the set point value that was delayed. The designed control system is tested by applying to the continuous stirred tank reactor which exist time delay in single-input single-output system. The advantage of the designed control system is easy structure in formulation. The results via simulation demonstrate that the designed control system yields good not only performance of quick and accurate setpoint tracking but also yields good regulatory performance.

Keyword: Time-delay, Input-output linearization control, Single-input single-output, Model-based control

1. บทนำ

กระบวนการทางเคมีเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในชีวิตประจำวันที่มีความสำคัญ เช่น กระบวนการผลิตน้ำมัน ปูนซีเมนต์ ยารักษาโรค และอาหารต่างๆ เป็นต้น การดำเนินไปของกระบวนการนั้นส่วนมากนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน ระบบควบคุมได้ถูกนำมาใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตช่วยให้การตอบสนองของกระบวนการที่เกิดขึ้นสามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้รวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น ทำให้การศึกษาและพัฒนากระบวนการควบคุมที่มีความสามารถในการควบคุมกระบวนการทางเคมีให้ตอบสนองต่อค่าเป้าหมายที่ต้องการอย่างแม่นยำขึ้น ได้รับความสนใจมากขึ้น การพัฒนาระบบควบคุมจึงเริ่มต้นจากการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบควบคุมซึ่งมีในแง่มุมต่างๆ หลากปัญหา เช่น ปัญหาล่าช้าของสัญญาณที่ใช้ในระบบควบคุม (Time delay) เกิดจากการที่สัญญาณเดินทางไปยังอุปกรณ์หรือ

ตำแหน่งเป้าหมายล่าช้า ซึ่งเกิดได้ทั้งในกรณีจากตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออก การล่าช้าของสัญญาณของตัวแปรขาเข้า (Input delay) เกิดจากเมื่อเราส่งสัญญาณเข้าไปเพื่อทำการเปิดหรือปิดวาล์วในการควบคุมอัตราไหลของสาร วาล์วนั้นมีความเฉื่อยทำให้มีการตอบสนองที่ล่าช้า ทำให้เกิดการล่าช้าของสัญญาณที่ตัวแปรขาเข้าขึ้น ส่วนการล่าช้าของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ตัวแปรขาออก (Output delay) อาจเกิดจากตัวควบคุมการอ่านเซ็นเซอร์มีรอบเวลาในการรับสัญญาณทำให้ต้องรอเวลาในการที่จะส่งสัญญาณจึงเกิดการล่าช้า การล่าช้าของสัญญาณนั้นส่งผลให้ระบบควบคุมมีประสิทธิภาพลดน้อยลงและบางครั้งก่อให้เกิดความไม่เสถียรในระบบควบคุม

ปัญหาการล่าช้าของสัญญาณนั้นเกิดได้จากทั้งสัญญาณของตัวแปรขาเข้าหรือสัญญาณของตัวแปรขาออก แต่การแก้ปัญหาการล่าช้าของสัญญาณโดยสนใจปัญหาสัญญาณล่าช้าที่ตัวแปรขาเข้าหรือตัวแปรขาออกเพียงอย่างเดียว การแก้ไขปัญหาล่าช้าของสัญญาณของตัวแปรขาเข้าทำได้หลากหลายวิธีดังเช่นในงานวิจัยของ Hu และ Rangaiyah (1999) ใช้เทคนิคของ Internal model control ในการแก้ปัญหาล่าช้าของสัญญาณ Henson และ Seborg (1994) การใช้เทคนิคของ แบบจำลองในการทำนายโดยใช้หลักการของ Global linearization control (GLC) ส่วนการแก้ไขปัญหาล่าช้าของสัญญาณในตัวแปรขาออก หลักการจะมีความคล้ายคลึงกันกับการล่าช้าในตัวแปรขาเข้า แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวพิจารณาปัญหาล่าช้าของสัญญาณจากตัวแปรขาเข้าหรือตัวแปรขาออกเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยทั่วไปในระบบอาจเกิดปัญหาล่าช้าของสัญญาณพร้อมกันได้ทั้งจากตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออกพร้อมๆกัน ทำให้ระบบควบคุมสามารถดำเนินการหรือตอบสนองได้ไม่ดี ส่งผลให้ต้องมีการศึกษาในการแก้ปัญหาดังกล่าวเพิ่ม ซึ่งงานวิจัยในเรื่องระบบควบคุมที่ตอบสนองต่อระบบที่มีการล่าช้าของสัญญาณทั้งขาเข้าและขาออกได้นั้นยังไม่ได้มีการสนใจและยังไม่มีการศึกษาอย่างแพร่หลายมากนัก ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Kravaris และ Wright (2003) ที่ได้ทำการศึกษาในเรื่องนี้

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบควบคุมที่ตอบสนองต่อระบบที่เกิดทั้งการล่าช้าของสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกที่เกิดขึ้นพร้อมๆกัน โดยผสมผสานเทคนิค I/O Linearization ร่วมกับการใช้ตัวประมาณค่าทำนายค่าตัวแปรสถานะในอนาคตเพื่อใช้คำนวณค่าตัวแปรขาเข้าที่ส่งให้กับระบบ ประกอบกับการพิจารณาการล่าช้าของสัญญาณในตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออกเป็นค่าการล่าช้ารวม เพื่อเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายที่เวลาอดีต เพื่อให้ค่าที่อ่านได้กับค่าที่ต้องการเป็นค่าที่เวลาเดียวกันแล้วนำค่าต่างๆที่ได้ไปใช้คำนวณในตัวควบคุมเพื่อคำนวณค่าตัวแปรค่าเข้าที่เหมาะสมที่จะส่งให้กับกระบวนการ ทำให้ระบบควบคุมควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพและตอบสนองได้รวดเร็ว จึงเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบควบคุมในกระบวนการทางอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

การนำเสนอบทความนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ในส่วนแรกจะกล่าวถึงชนิดของตัวควบคุมและทฤษฎีที่ใช้ในการสร้างตัวควบคุม ตามด้วยการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการที่มีการล่าช้าของสัญญาณในส่วนที่สอง และในส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงผลการจำลองกระบวนการ

2. การออกแบบระบบควบคุม

2.1 การออกแบบตัวควบคุมชนิดอินพุทเอาต์พุทลิเนียร์ไรเซชัน (Input/output linearization control)

ระบบควบคุมชนิดอินพุทเอาต์พุทลิเนียร์ไรเซชันเป็นหนึ่งในระบบควบคุมที่ใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลจีโอเมตริก (Differential geometric control) เมื่อพิจารณาสมการระบบไม่เป็นเชิงเส้นของระบบที่มีการล่าช้าของสัญญาณที่ตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออกดังสมการ

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t))u(t-p) \\ y(t) &= h(x(t-q)) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

โดยกำหนดการเคลื่อนที่ของตัวแปรขาออกภายใต้ระบบควบคุมตอบสนองในรูปแบบของสมการ

$$(\varepsilon D + 1)^r y = y_{sp} \quad (2)$$

เมื่อ D คือ Differential operator ($D \triangleq \frac{d}{dt}$), ε คือตัวแปรปรับ (Tuning parameter), r คืออันดับของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Relative order) ในที่นี้ค่า $r = 1$ และ y คือค่าตัวแปรขาออกของกระบวนการ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับสมการ (1) และ (2) จะได้แบบจำลองในการควบคุมของตัวควบคุมดังนี้

$$u(t-p-q) = \psi(x(t-q), y_{sp}) \quad (3)$$

เมื่อคำนวณหาของสมการเป็นค่าที่เวลา t สมการข้างต้นสามารถเขียนได้เป็น

$$u(t) = \psi(x(t+p), y_{sp}) \quad (4)$$

ตัวประมาณค่าสถานะสร้างโดยพิจารณาจากแบบจำลองของกระบวนการที่เวลาเสมือนว่าไม่เกิดการล่าช้าของสัญญาณ จากสมการที่ (1) สามารถเขียนได้เป็น

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}^*(t) &= \tilde{f}(x^*(t), u(t)) \\ y^*(t) &= \tilde{h}(x^*(t)) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการข้างต้นกับสมการ (1) จะเห็นว่า

$$x^*(t) = x(t+p) \quad (6)$$

ตัวประมาณค่าจึงเหมือนเป็นการประมาณค่าที่เวลาอนาคตเพื่อนำ

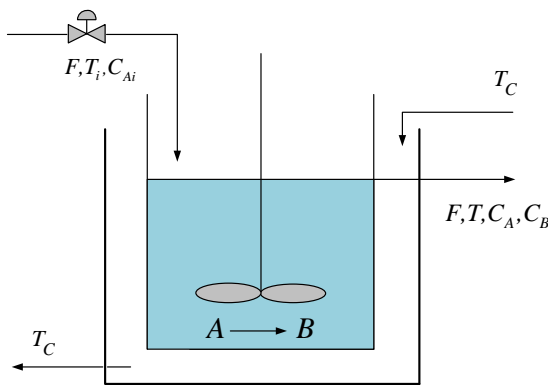
ค่าตัวแปรสถานะที่ได้ไปใช้ในการคำนวณของตัวควบคุมต่อไป

จากการรวมตัวควบคุมแบบป้อนกลับร่วมกับตัวประมาณค่าและตัวชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนในออกแบบเป็นระบบควบคุม จะได้ระบบควบคุมดังแสดงในรูปที่ 1

3. การทดสอบประสิทธิภาพระบบควบคุมกับกรณีศึกษาของเครื่องปฏิกรณ์กวนแบบต่อเนื่อง

ระบบควบคุมที่ออกแบบไว้ถูกนำมาทดสอบกับเครื่องปฏิกรณ์กวนแบบต่อเนื่องที่เป็นระบบตัวแปรเดี่ยว ซึ่งในถึงปฏิกรณ์กวนแบบต่อเนื่องเกิดปฏิกิริยาจาก $A \rightarrow B$ ดังแสดงในรูปที่ 2

โดยตัวแปรควบคุมคือความเข้มข้นขาออกของสาร A (C_A) และอุณหภูมิขาออก (T) ตัวแปรปรับคืออุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (T_C) ตัวแปรสถานะคือความเข้มข้นขาเข้าของสาร A (C_{Ai}) ความเข้มข้นขาออกของสาร B (C_{Bi}) และอุณหภูมิของสายสารขาเข้า (T_i)



รูปที่ 1 ถึงปฏิกรณ์กวนแบบต่อเนื่อง (CSTR)

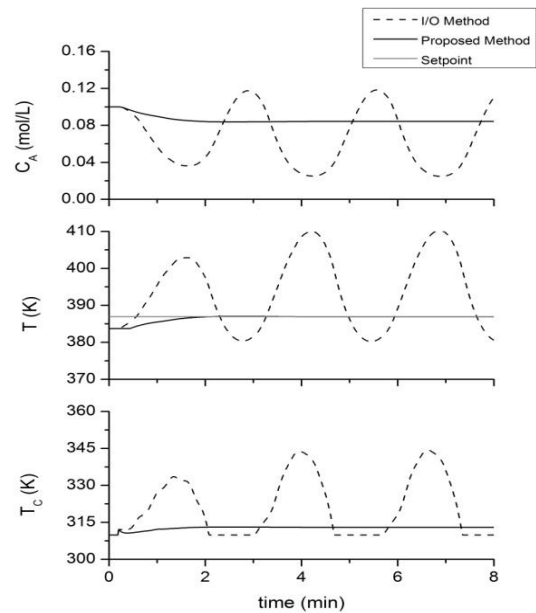
สมการการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นและอุณหภูมิในถึงปฏิกรณ์กวนแบบต่อเนื่องที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC_A}{dt} &= \frac{F}{V}(C_{Af} - C_A) - k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)C_A \\ \frac{dT}{dt} &= \frac{F}{V}(T_f - T) + \frac{(-\Delta H)}{\rho C_P} k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)C_A + \frac{UA}{V\rho C_P}[T_C(t-p) - T] \\ y &= T(t-q) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

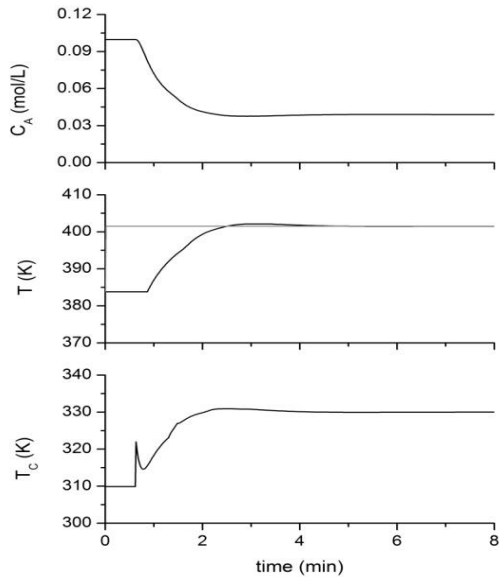
โดย T_C คือตัวแปรขาเข้าหรือตัวแปรปรับ (u), p คือการล่าช้าของเวลาที่ตัวแปรขาเข้า (T_C) และ q คือการล่าช้าของเวลาที่ตัวแปรขาออก (T) และค่าของตัวแปรต่างๆดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรของกระบวนการ (Hu และ Rangaiah, 1999)

ตัวแปร	ค่า	ตัวแปร	ค่า
F	100 L/min	k_0	7.2×10^{10} 1/min
C_{Af}	1 mol/L	E/R	8750 K
T_f	300 K	$-\Delta H$	5×10^4 J/mol
V	100 L	ρ	1000 g/L
UA	5×10^4 J/min.K	C_P	0.239 J/g.K



รูปที่ 2 การตอบสนองของความเข้มข้นของสาร A, อุณหภูมิและอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ของตัวควบคุมต่อกระบวนการที่เกิดการล่าช้าของสัญญาณที่ตัวแปรขาเข้าและขาออก



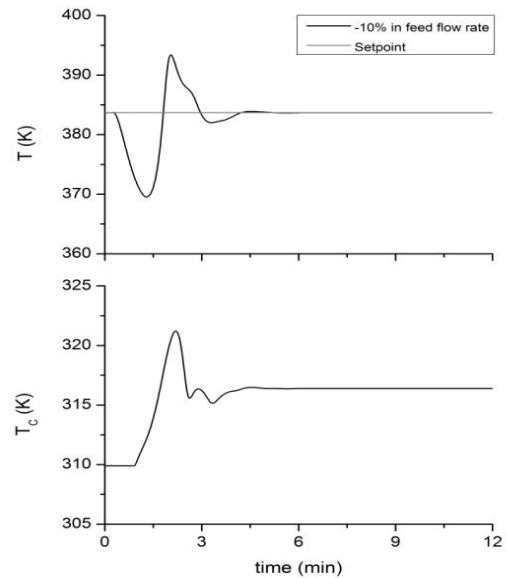
รูปที่ 3 การตอบสนองต่อการทดสอบของการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายของระบบควบคุมที่ออกแบบกับกระบวนการที่มีการล่าช้าของสัญญาณจากตัวแปรขาเข้า (p) และขาออก (q)

รูปที่ 2 เป็นการทดสอบกระบวนการที่มีทั้งความล่าช้าของทั้งสัญญาณขาเข้า (p) เท่ากับ 12 วินาที และ สัญญาณขาออก (q) เท่ากับ 15 วินาที การตอบสนองของความเข้มข้นของสาร A ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงแบบแปรผกผันกับอุณหภูมิของสารขาออกของระบบและอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น การใช้ระบบควบคุมที่เสนอจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าการควบคุมแบบ I/O linearization เพราะการควบคุมแบบที่นำเสนอให้ค่าที่ไม่แกว่งไปมารอบค่าเป้าหมาย

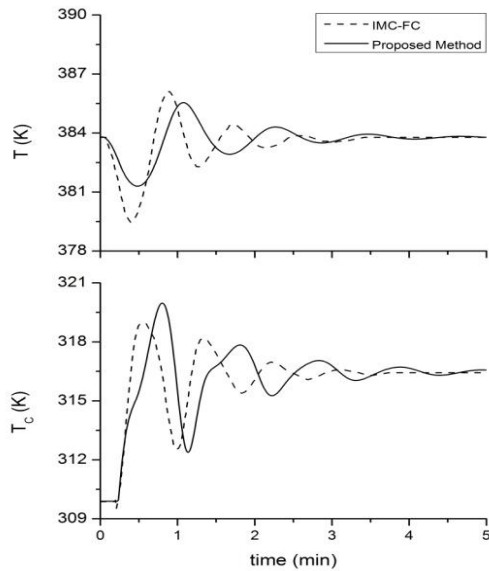
ทดสอบความสามารถในการเข้าสู่ค่าเป้าหมายของระบบควบคุม โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายไปเป็น $401.5 K$ โดยกระบวนการมีการล่าช้าของสัญญาณทั้งจากตัวแปรขาเข้า (p) เท่ากับ 12 วินาทีและตัวแปรขาออก (q) เท่ากับ 15 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในระบบควบคุมตัวควบคุมจะมีการคำนวณค่าตัวแปรขาเข้าให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากค่าที่สภาวะเสถียรเดิมควบคุมอุณหภูมิขาออกของสาร (T) ให้สามารถตอบสนองโดยการเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ดี

ทดสอบความคงทนของระบบควบคุม โดยการเพิ่มตัวรบกวนลงไปที่ค่าอัตราการไหลของสารให้ลดลง 10% โดยที่กระบวนการมีการล่าช้าของสัญญาณจากตัวแปรขาเข้าเท่ากับ (p) เท่ากับ 12 วินาทีและตัวแปรขาออก (q) เท่ากับ 15 วินาที การตอบสนองต่อการควบคุมของระบบควบคุมได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่ออัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นมีค่าลดลงทำให้

ถ้าจะต้องการควบคุมอุณหภูมิของสารในระบบให้มีค่าเท่าเดิมนั้นค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่คำนวณได้จากตัวควบคุมจึงต้องมีการปรับตัวสูงขึ้นเพื่อชดเชยกับปริมาณของน้ำที่เสียไปจากอัตราการไหลที่ลดลง อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นจึงมีการปรับตัวเพิ่มขึ้นในตอนแรกแล้วปรับตัวจนนิ่งที่ค่าหนึ่งทำให้อุณหภูมิจึงมีการปรับตัวเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมได้



รูปที่ 4 การตอบสนองต่อการทดสอบของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขาเข้าของสารลดลง 10% ของระบบควบคุมที่ออกแบบในกระบวนการที่มีการล่าช้าของสัญญาณจากตัวแปรขาเข้า (p) และขาออก (q)



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบต่อการตอบสนองต่อตัวรบกวนที่อัตราการไหลของสารขาเข้า -10% ระหว่างการใช้วิธี IMC-FC กับวิธีที่ถูกนำเสนอขึ้นมา

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่ออกแบบกับระบบควบคุมแบบ Internal model control with feedback compensator (IMC-FC) จากงานวิจัยของ Henson และ Seborg (1994) โดยใช้ตัวรบกวนที่อัตราการไหลของสารขาเข้าให้ลดลงไป 10 % ในกระบวนการมีผลล่าช้าของสัญญาณที่ตัวแปรขาเข้า (p) เท่ากับ 12 วินาที ดังแสดงในรูป 5 พบว่าระบบควบคุมที่ออกแบบมาควบคุมให้ระบบกลับเข้าสู่สถานะเสถียรได้ช้ากว่าแต่จะเกิดการสั่นของการตอบสนองไม่สูงเท่ากับระบบควบคุมแบบ IMC-FC รวมถึงระบบที่ออกแบบมายังมีรูปแบบในการทำงานที่ง่ายและซับซ้อนน้อยกว่า

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ไปทำการนำเสนอเทคนิคของระบบควบคุมที่ใช้แก้ปัญหาในการควบคุมกระบวนการที่เกิดการล่าช้าของสัญญาณที่ตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออก โดยระบบควบคุมดังกล่าวอาศัยตัวควบคุมแบบ I/O linearization ร่วมกับการใช้ตัวประมาณค่าที่เวลาที่ไม่เกิดการล่าช้าของสัญญาณเพื่อนำค่ามาหาความแตกต่างกับกระบวนการจริงเพื่อคำนวณค่าเป้าหมายและการเลือกใช้ค่าเป้าหมายย้อนหลังส่งให้กับตัวควบคุมเพื่อคำนวณค่าตัวแปรขาเข้าที่ป้อนให้กับระบบ ข้อดีของระบบควบคุมที่

ออกแบบมาคือมีการวางโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนมากและสามารถปรับใช้ได้ง่าย

ตัวควบคุมที่ได้สร้างขึ้นได้ถูกนำมาทดลองกับการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์กวนแบบต่อเนื่องในระบบแบบตัวแปรเดี่ยว พบว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมกระบวนการที่เกิดการล่าช้าทั้งจากตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออกของระบบตัวแปรเดี่ยว เมื่อทดสอบความสามารถในการเปลี่ยนค่าเป้าหมายของระบบควบคุมพบว่าสามารถรับมือกับการเปลี่ยนค่าเป้าหมายได้เป็นอย่างดี และเมื่อทดสอบการทนต่อตัวรบกวนที่เกิดขึ้นในสัญญาณ ระบบควบคุมก็สามารถรับมือกับการรบกวนได้โดยระบบจะปรับตัวเข้าสู่สถานะเสถียรเองได้ ระบบควบคุมที่นำเสนอจึงเป็นทางเลือกใหม่เพื่อปรับปรุงระบบควบคุมเพื่อควบคุมกระบวนการที่เกิดความล่าช้าของสัญญาณทั้งจากตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออก ซึ่งยังผลไปสู่ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยลง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ ผู้ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Henson MA, Seborg DE. 1994. Time Delay Compensation for Nonlinear Processes. **Ind. Eng. Chem. Res.** 33: 1493-1500.
- Hu Q, Rangaiah GP. 1999. A Time Delay Compensation Strategy for Uncertain Single-Input Single-Output Nonlinear Processes. **Ind. Eng. Chem. Res.** 38: 4309-4316.
- Wright RA, Kravaris C. 2003. Nonlinear decoupling control in the presence of sensor and actuator deadtimes. **Chem. Eng. Sci.** 58: 3243 – 3256.