

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังที่มีผลต่อกัน

PID Controller Designs for Interacting Water Level Process

เรืองยศ เกตุรักษา* เจษฎาพร สถานทรัพย์ พิเชษฐ นาคหนู และ สุदारัตน์ คำพร

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: ruangyos.k@mutr.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน โดยการนำเครื่องส่งความดัน (Pressure Transmitter) มาเป็นตัวตรวจรู้ระดับของน้ำในถัง ซึ่งจากหลักการวัดค่าผลต่างความดัน จะให้อาชีพุดอยู่ในรูปกระแส 4-20 มิลลิแอมป์ จากนั้นแปลงเป็นแรงดัน 1-5 โวลต์ เข้าสู่ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล 16 บิต สำหรับประมวลผลทางคณิตศาสตร์ผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Mega 2560) เพื่อสร้างสัญญาณตัวควบคุมแบบพีไอดี สำหรับบทความวิจัยนี้ได้เลือกทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วย วิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ (CRA) เพื่อใช้ในการเปิด-ปิดวาล์วควบคุมแบบอัตโนมัติให้กับระดับน้ำในถังแบบมีผลต่อกัน โดยผลการจำลองที่ศึกษาในกรณีต่างๆ พบว่าสามารถให้ผลตอบสนองได้ตามต้องการ

คำสำคัญ : ตัวควบคุมพีไอดี การกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ เครื่องส่งความดัน แบบอัตโนมัติ ระดับน้ำในถังแบบมีผลต่อกัน

Abstract

This paper presents PID controller design for interacting water level process. The pressure transmitter is used to sense the water level. Measurement of the pressure which the output is in the 4-20 mA the voltage is then converted into on 1-5 volt analog signal to digital to digital converter, 16-bit arithmetic processing over board Arduino Mega 2560 to create a PID controller to turn on-off valve automatically. This project use a PID controller design using Characteristic Ratio Assignment method (CRA) for coupled-tank process and use to meet the perfect transient and steady-state response requirement.

Keywords: PID Control, Characteristic Ratio Assignment Method (CRA), Pressure Transmitter, Automatically, Coupled-Tank Process

1. ที่มาและความสำคัญ

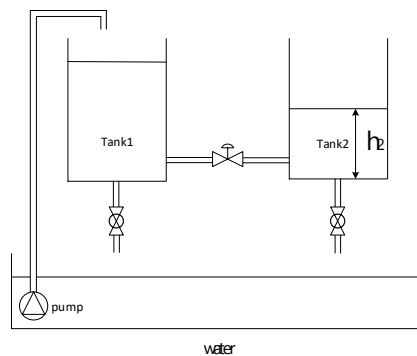
ปัจจุบันในสายงานทางด้านวิศวกรรมการวัดคุมสิ่งทีหลีกเลี่ยงไม่ได้คือ การวัดที่มีประสิทธิภาพจากการทำงานของระบบควบคุมโดยส่วนใหญ่แล้ว จะพิจารณาที่ผลตอบสนองทางเวลาเช่น ค่าพุ่งเกิน (Percent Overshoot), ค่าเวลาในการไต่ระดับ (Rise Time), ค่าเวลาประวิง (Setting Time), ค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (Error Steady State) ฯลฯ แต่มีวิธีการออกแบบตัวควบคุมเพียงไม่กี่วิธีที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมเพื่อทำให้ได้ผลตอบสนองทางเวลาที่ต้องการ อนึ่งการออกแบบตัวควบคุมโดยการกำหนดสมการคุณลักษณะเพื่อให้ได้ผลตอบสนองทางเวลาตามที่ต้องการ เป็นอีกวิธีหนึ่งทีได้รับความนิยมโดยวิธีการออกแบบตัวควบคุมจะทำการกำหนดอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะซึ่งสามารถนำไปออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองทางเวลาตามที่ต้องการ วิธีการนี้สามารถปรับความเร็วผลตอบสนองทางเวลา หรือปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพตามความต้องการ โดยบทความวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษา การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ โดยเลือกทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมกับกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังที่มีผลต่อกัน

2. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทความวิจัยฉบับนี้ศึกษาถึงวิธีการออกแบบระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบที่มีผลต่อกัน โดยใช้วิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ โดยนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบที่มีผลต่อกัน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการแกว่งตัวของระดับน้ำในถังด้วย วิธีการกำหนดอัตราส่วนของคุณลักษณะ สามารถควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบที่มีผลต่อกันได้ โดยการใช้การปรับแต่งพารามิเตอร์ ในการปรับปรุงผลตอบสนองทางเวลาของระบบควบคุมเพื่อให้ได้ ความเร็วผลตอบสนอง ค่าพุงเกิน ตามความต้องการ ซึ่งเป็นการพิสูจน์ให้เห็นถึงความสะดวก และง่ายต่อการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

2.1 กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

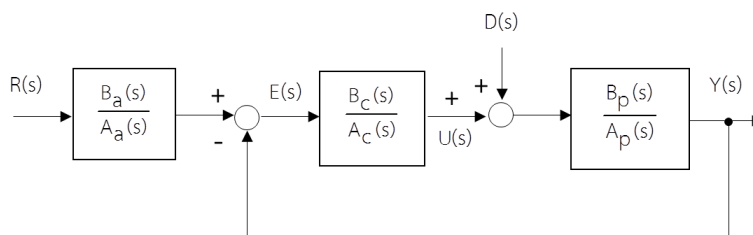
พิจารณากระบวนการระดับน้ำสองถัง แบบมีผลต่อกันในรูปที่ 1 โดยเป้าหมายการควบคุมกระบวนการ คือระดับน้ำในถังที่ 2 ด้วยการควบคุมคอนโทรลลอร์ที่จ่ายน้ำให้ถังที่ 2



รูปที่ 1 กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

2.2 วิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ

ศาสตราจารย์ วาย ซี คิม (Y.C. Kim), 2003 ได้เสนอวิธีการกำหนดวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ (Characteristic Ratio Assignment Method : CRA) เป็นวิธีการออกแบบแบบพีซีชนิด ซึ่งการออกแบบนั้นอยู่บนพื้นฐานขนาดที่สัมพันธ์กันของค่าสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะ (Characteristic Polynomial) วัตถุประสงค์ในการออกแบบคือต้องการสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) ที่เหมาะสมวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ (CRA) จะใช้สมการพหุนามแสดงแทนระบบโดยส่วนเศษ (Numerator) และส่วน (Denominator) ของฟังก์ชันถ่ายโอนจะพิจารณาแยกกัน ในการออกแบบตัวควบคุมนั้น ทำได้โดยการกำหนดสมการคุณลักษณะ หรือสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด โดยพิจารณาข้อกำหนดด้านสมรรถนะ (Performance Specification) ของระบบควบคุม และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ (CRA) จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากตัวควบคุม และกระบวนการเพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่อไป



รูปที่ 3 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CRA

เพื่อความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งาน โครงสร้างระบบควบคุมสามารถทำให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายได้โดยให้ $A_a(s)=B_c(s)$ แสดงได้ดังภาพที่ 2-2 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบนี้เรียกว่าโครงสร้างระบบควบคุมแบบ 2 องศาอิสระ (Two Degree of Freedom : 2DOF) ระบบควบคุมแบบ 2 องศาอิสระนั้นเป็นระบบควบคุมที่มีควบคุม 2 ตัวที่อิสระต่อกันเพื่อให้สามารถปรับปรุงระบบควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบเป็นตามข้อกำหนด ซึ่งโครงสร้างระบบควบคุมแบบ 2 องศาอิสระ (Two Degree of Freedom : 2DOF) ดังภาพ 2-2 นั้นเป็นโครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CRA สำหรับกระบวนการหนึ่ง อินพุต-หนึ่งเอาต์พุต (Single Input-Single Output : SISO) โดย $B_p(s)$ และ $A_p(s)$ คือสมการพหุนามของกระบวนการ $B_c(s), A_c(s)$ และ $B_a(s), A_a(s)$ คือสมการพหุนามของตัวควบคุม โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการพหุนามได้ดังนี้

$$A_p(s) = p_k s^{k-1} + \dots + p_1 + p_2 \quad (1)$$

$$B_p(s) = q_m s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \dots + q_1 + q_2 \quad (2)$$

และสมการพหุนามของตัวควบคุมคือ

$$A_c(s) = l_\psi s^\psi + l_{\psi-1} s^{\psi-1} + \dots + l_1 + l_0 \quad (3)$$

$$B_c(s) = j_\psi s^\psi + j_{\psi-1} s^{\psi-1} + \dots + j_1 + j_0 \quad (4)$$

$$B_a(s) = p_\psi s^\psi + \dots + p_1 + p_0 \quad (5)$$

โดย $\psi < K$ และ $m < K$ และเอาต์พุตของระบบควบคุมดังรูปที่ 1 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y(s) = \frac{B_p(s)[B_a(s)R_s - B_c(s)N(s) + A_c(s)D(s)]}{A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)} \quad (6)$$

โดย $R(s)$ คือสัญญาณอินพุตอ้างอิง, $Y(s)$ คือสัญญาณเอาต์พุตของระบบควบคุม, $D(s)$ คือสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบควบคุม และ $N(s)$ คือสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่อุปกรณ์วัด เมื่อไม่คิดถึงผลกระทบจากสัญญาณ $D(s)$ และ $N(s)$ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมทั้งหมดจะกลายเป็น

$$G_{cl}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{B_a(s)B_p(s)}{A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)} \quad (7)$$

2.3 การเลือกพารามิเตอร์ของวิธี CRA

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA สามารถทำได้โดยทำการกำหนดค่า τ และค่า α_i ตามที่ต้องการ โดยค่า α_i จะเป็นสิ่งที่กำหนดถึงอัตราการหน่วงของระบบควบคุมซึ่งในการกำหนดค่า α_i จะต้องกำหนดตามเงื่อนไขของ Lipatov และ Sokolov แสดงดังนี้

$$\sqrt{\alpha_i \alpha_{i+1}} > 1.4656 \quad \text{สำหรับ } i = 1, 2, \dots, n-2 \quad (8)$$

$$\alpha_i \geq 1.12374 \alpha_i^* \quad \text{สำหรับ } i = 1, 2, \dots, n-2 \quad (9)$$

$$\alpha_i^* = \frac{1}{\alpha_{i+1}} + \frac{1}{\alpha_{i-1}} \quad \text{โดย } \alpha_n = \alpha_0 = \infty \quad (10)$$

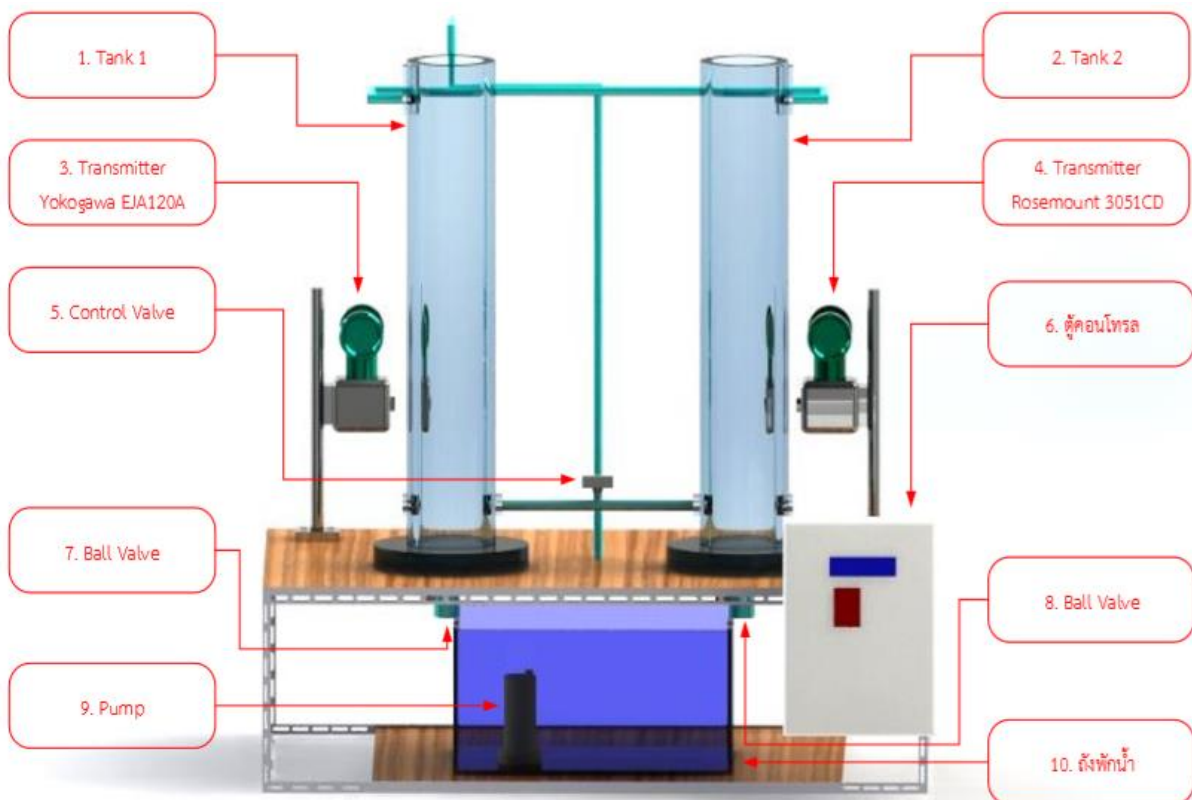
ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA ค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะกำหนดให้ $\alpha_1 = 2.5$ และ $\alpha_2 = \alpha_3 = 2$ นั้นเป็นเพียงเงื่อนไขเบื้องต้นเพื่อให้ระบบได้ตอบสนองตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามไม่จำเป็นต้องกำหนดให้ $\alpha_4 \sim \alpha_{n-1} = 2$ โดยสามารถแปลงค่าได้ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

$$\alpha_i > 1.5\alpha_i^* \text{ สำหรับ } i = 4 \sim n-1 \quad (11)$$

ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถออกแบบตัวควบคุมได้อย่างอิสระ อาจจะทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ α_i มีค่าสูงๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการจากเงื่อนไขเสถียรภาพโดย Lipatov ระบบควบคุมจะมีค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ α_i ทุกค่ามีค่ามากกว่า 1.5 โดย Lipatov ได้พิสูจน์ไว้ และถ้าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ α_i ทุกตัวมีค่ามากกว่า 4 โพลของระบบทั้งหมดจะอยู่บนแกนจริง แต่ในบางครั้งเมื่อทำการพิจารณากระบวนการบางกระบวนการแล้วพบว่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ ที่มากกว่าค่ามาตรฐานซึ่งในกรณีนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องลดค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ α_i เพื่อให้เป็นค่าเดียวกับค่ามาตรฐาน

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบโครงสร้าง



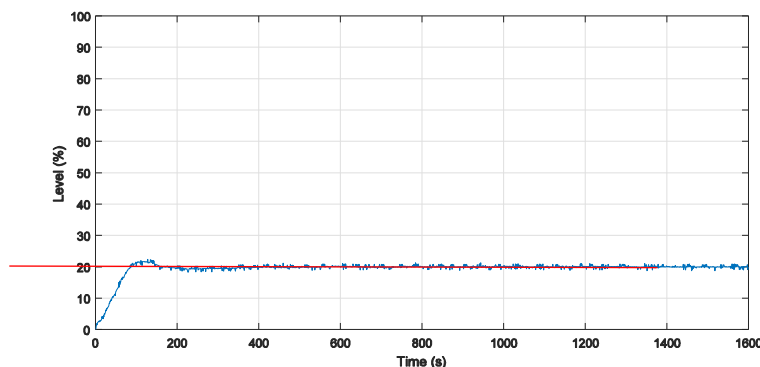
รูปที่ 4 การออกแบบโครงสร้าง

จากรูปที่ 4 แสดงชิ้นส่วน และอุปกรณ์ของชุดกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน ประกอบไปด้วย ตำแหน่งที่ 1 ถึง บรรจุน้ำในถังที่ 1, ตำแหน่งที่ 2 ถึงบรรจุน้ำในถังที่ 2, ตำแหน่งที่ 3 อุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำของ Yokogawa รุ่น EJA120A, ตำแหน่งที่ 4 อุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำของ Rosemount รุ่น 3051CD, ตำแหน่งที่ 5 วาล์วคอนโทรลเพื่อควบคุมระดับน้ำของกระบวนการ, ตำแหน่งที่ 6 ตู้ ควบคุมการทำงาน, ตำแหน่งที่ 7 บอลวาล์วทางน้ำออกของถังน้ำในถังที่ 1 เพื่อถ่วงระบบ, ตำแหน่งที่ 8 บอลวาล์วทางน้ำออกของ ถังน้ำในถังที่ 2 เพื่อถ่วงระบบ, ตำแหน่งที่ 9 ปั๊มน้ำ, และสุดท้ายตำแหน่งที่ 10 ถึงพักน้ำ

4. ผลและวิจารณ์

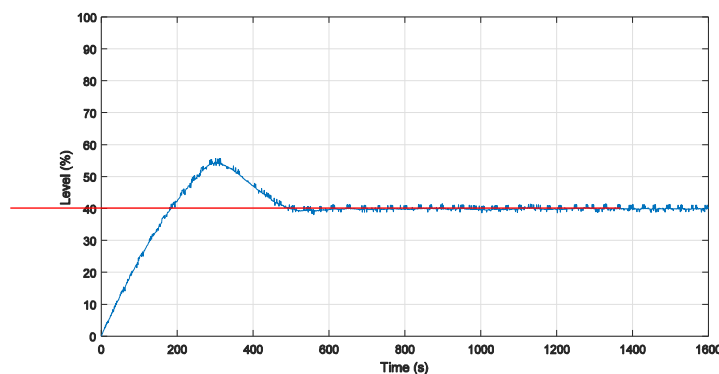
การควบคุมระดับน้ำสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน ด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่ทำการออกแบบด้วยวิธีการ กำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ (CRA) โดยจะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี จากนั้นนำตัวควบคุมที่ได้ทำการออกแบบไปทำการ ทดสอบในการควบคุมระดับน้ำ เริ่มด้วยการนำเพรสเซอร์ทรานสมิตเตอร์ (Pressure Transmitter) มาเป็นเซ็นเซอร์ในการวัดระดับน้ำ ซึ่งให้ค่าเอาต์พุตเป็นกระแสที่ 4-20 มิลลิแอมป์ จากนั้นแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้า 1-5 โวลต์ เข้าสู่ตัวแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 16 บิต ของบอร์ดคอนโทรลเลอร์ (Arduino Mega 2560) จะใช้ค่าดิจิตอลมาประมวลผล และคำนวณสัญญาณควบคุมตามกระบวนการ ควบคุมแบบพีไอดี เพื่อควบคุมขนาดของสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulate) ควบคุมคอนโทรลวาล์ว (Control Valve) ซึ่งใช้ ในการควบคุมระดับน้ำ

4.1 ทดสอบการป้อนสัญญาณระบบควบคุมพีไอดี ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ (CRA) ที่ มีการปรับแต่งค่า และเลือกใช้ค่าที่ดีที่สุด ควบคุมที่ระดับความสูงตั้งแต่ 20% ถึง 80%



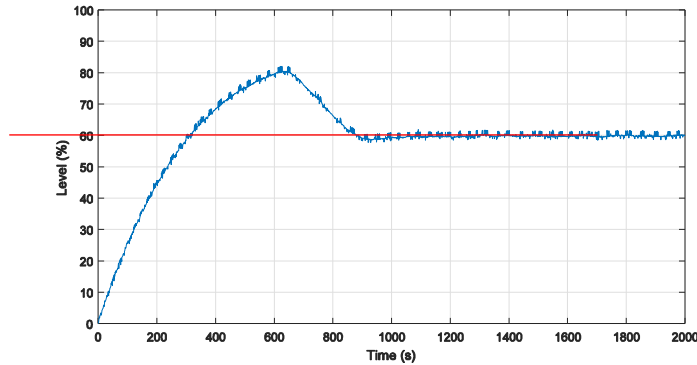
รูปที่ 7 แสดงผลตอบสนองที่ระดับความสูง 20%

จากรูปที่ 7 เป็นการทดสอบการควบคุมกระบวนการด้วยการกำหนดค่าเป้าหมายของระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ระดับความสูง 100% และค่าเป้าหมายระดับน้ำในถังที่ 2 ที่ระดับความสูงตั้งแต่ 0% ถึง 20% ผลตอบสนองที่ได้พบวาระดับน้ำในถังที่ 2 จะพุ่งเกินค่า เป้าหมายเล็กน้อยจากนั้นสังเกตเห็นได้ว่าระดับน้ำค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่ค่าเป้าหมายโดยใช้เวลาประมาณ 4 นาที



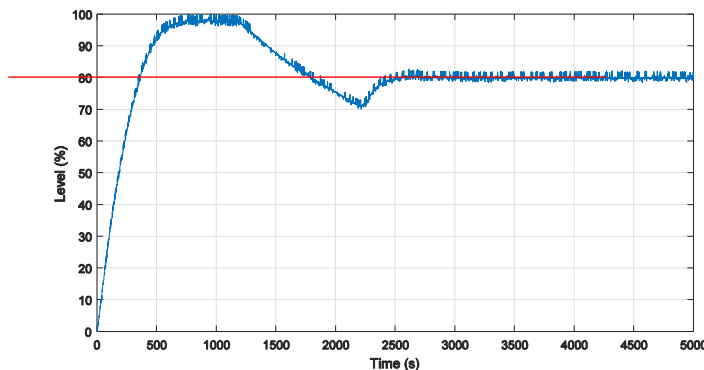
รูปที่ 8 แสดงผลตอบสนองที่ระดับความสูง 40%

จากรูปที่ 8 เป็นการทดสอบการควบคุมกระบวนการด้วยการกำหนดค่าเป้าหมายของระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ระดับความสูง 100% และค่าเป้าหมายระดับน้ำในถังที่ 2 ที่ระดับความสูงตั้งแต่ 0% ถึง 40% ผลตอบสนองที่ได้พบวาระดับน้ำในถังที่ 2 จะพุ่งเกินค่าเป้าหมายไปที่ระดับความสูง 55% จากนั้นสังเกตเห็นได้ว่าระดับน้ำค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่ค่าเป้าหมายโดยใช้เวลาประมาณ 10 นาที



รูปที่ 9 แสดงผลตอบสนองที่ระดับความสูง 60%

จากรูปที่ 9 เป็นการทดสอบการควบคุมกระบวนการด้วยการกำหนดค่าเป้าหมายของระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ระดับความสูง 100% และค่าเป้าหมายระดับน้ำในถังที่ 2 ที่ระดับความสูงตั้งแต่ 0% ถึง 60% ผลตอบสนองที่ได้พบวาระดับน้ำในถังที่ 2 จะพุ่งเกินค่าเป้าหมายไปที่ระดับความสูง 80% จากนั้นสังเกตเห็นได้ว่าระดับน้ำค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่ค่าเป้าหมายโดยใช้เวลาประมาณ 16 นาที



รูปที่ 10 แสดงผลตอบสนองที่ระดับความสูง 80%

จากรูปที่ 10 เป็นการทดสอบการควบคุมกระบวนการด้วยการกำหนดค่าเป้าหมายของระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ระดับความสูง 100% และค่าเป้าหมายระดับน้ำในถังที่ 2 ที่ระดับความสูงตั้งแต่ 0% ถึง 80% ผลตอบสนองที่ได้พบวาระดับน้ำในถังที่ 2 จะพุ่งเกินค่าเป้าหมายไปที่ระดับความสูง 99% จากนั้นสังเกตเห็นได้ว่าระดับน้ำค่อยๆ ลดลงจนค่าพุ่งเกินลดต่ำกว่าค่าเป้าหมายที่ระดับความสูง 70% และเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ระดับความสูง 70% โดยใช้เวลาประมาณ 40 นาที

5. สรุปผล

บทความวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษา และค้นคว้าเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดี สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน เพื่อรักษาระดับน้ำให้มีความคงทนต่อสิ่งรบกวน (Disturbance) โดยจะนำระดับน้ำเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ให้เร็วที่สุด โดยอาศัยหลักการควบคุมพีไอดีมาเป็นตัวควบคุม และรักษาระดับน้ำ จากการทดลองพบว่า ตัวควบคุมพีไอดีที่ทำการออกแบบด้วยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ (CRA) ที่คำนวณโดยโปรแกรม MATLAB นั้นค่าพีไอดีที่ยังไม่มีการปรับแต่งใดๆนั้น ใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ แต่เมื่อทดสอบการปรับแต่งค่า K_i แบบลดลงเป็นสัดส่วน เมื่อค่า K_p และ K_d นั้นคงที่ ผลการทดสอบพบว่าตัวควบคุมพีไอดีที่ได้ทำการปรับแต่งนั้นพบว่า สามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ได้เร็วขึ้น และมีความคงทนต่อสิ่งรบกวนของกระบวนการในการควบคุมระดับน้ำได้เป็นอย่างดี

6. กิตติกรรมประกาศ

ทิมผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ห้องปฏิบัติการระบบควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุมิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ (ศาลายา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการเก็บผลการทดลอง

7. บรรณานุกรม

- จุฑารัตน์ ชาวไร่เงิน, “การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุมิ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549
- สถาพร เสือเทศ, “การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอย่างง่ายด้วยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551
- Lee,Y.,Lee,J., Park, S. “PID Controller tuning for Integrating and Unstable Processes with Time Delay”. Chemical Engineering Science, vol.55, 2000.
- S. Jayasuriya and J.W. Song. 1990, “On the Synthesis of Compensators for Non Overshooting Step Response”. Proceedings American Control Conference. : pp. 683-684
- Y.C. Kim, L.H. Keel and S.P. Bhattacharyya, “Transient Response Control via Characteristic Ratio Assignment” IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 48, No.12, 2003, pp. 2238-2244