



การพัฒนาชุดทดลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำ Development of Water Level Control System Apparatus

ธนยศ อริสริยวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

ติดต่อ: Tanayos.Swu@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาชุดทดลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำเพื่อใช้เป็นชุดฝึกปฏิบัติการในรายวิชา วิศวกรรมการควบคุม โดยการทำงานของชุดทดลองเริ่มจากระดับน้ำในถังทดลอง จะถูกวัดโดยเซ็นเซอร์วัดระดับ แล้วส่งค่าที่วัดได้ไปยังการ์ดดาต้าแอคควิซิชัน (Data Acquisition Card) เพื่อประมวลผลและแสดงค่าตัวแปรบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมแล็บวิว (LabVIEW) จากนั้นค่าสัญญาณควบคุมที่คำนวณได้จะถูกส่งกลับไปยังการ์ดดาต้าแอคควิซิชัน เพื่อไปควบคุมอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำโดยผ่านอินเวอร์เตอร์ ส่งผลให้น้ำจากถังพักถูกสูบเข้าไปยังถังทดลองจนได้ระดับตามที่ต้องการ โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย โปรแกรมคำนวณสมการปรับเทียบและค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์วัดระดับ โปรแกรมคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ และ โปรแกรมคำนวณค่าเกนตัวควบคุมแบบพีไอดี จากผลการทดลองพบว่าชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ และสามารถทำให้ผู้เรียนเข้าใจในเนื้อหาเกี่ยวกับระบบควบคุมอัตโนมัติได้ดียิ่งขึ้น

คำหลัก: ชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำ, แล็บวิว, ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ, พีไอดี

Abstract

This paper describes the development of a water level control system apparatus for using in control engineering laboratory. The apparatus starts by measuring the water level in the experimental tank using a level sensor. After that the measured value will be sent to the data acquisition card for processing and the process variables show on a computer by the LabVIEW program. The control signal is sent back to the data acquisition card in order to control the pump flow rate by inverter and then the water is sent to the experimental tank until the water level as needed. The developed programs consist of the level sensor calibration and error calculation, determination of system transfer function and determination of the PID controller gains. The result showed that the developed apparatus is function as designed and can help the students to understand the contents of the automatic control system better.

Keywords: Level Control, LabVIEW, Transfer Function, PID.

1. บทนำ

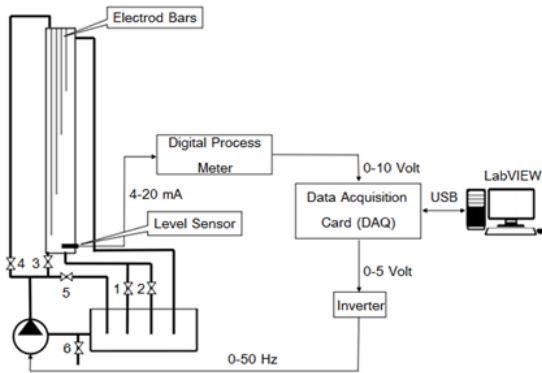
ในการศึกษาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์จะประกอบไปด้วยสองส่วนคือ ภาคทฤษฎี และ ภาคปฏิบัติ เพื่อต้องการให้ผู้เรียนสามารถประยุกต์แนวคิดทางทฤษฎีไปสู่ภาคปฏิบัติได้อย่างถูกต้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสาขาวิศวกรรมการควบคุมซึ่งต้องใช้ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงเป็นหลักในการเรียนการสอน ดังนั้นการศึกษาในภาคปฏิบัติจึงมีความสำคัญอย่างมาก [1-2] โดยทั่วไปในส่วนของภาคปฏิบัติชุดทดลองและเครื่องมือวัดทั้งหมดจะเป็นฮาร์ดแวร์ที่มีขนาดใหญ่ ราคาแพง [3-4] ทำให้ไม่สามารถจัดหาชุดทดลองมาได้อย่างพอเพียงกับผู้เรียน การเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมการควบคุมหรือสาขาที่เกี่ยวข้องจึงทำได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ต่อมาได้มีการพัฒนาชุดทดลองกระบวนการควบคุมที่มีขนาดเล็กลงใช้เทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยเพื่อลดต้นทุนของชุดทดลอง [5-7] โดยส่วนใหญ่จะใช้วงจรไฟฟ้าแทนกระบวนการจริงหรือสร้างกระบวนการเสมือนขึ้นมาจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งอาจได้ผลดีทางทฤษฎีแต่ก็ยังไม่สามารถจำลองได้เหมือนกระบวนการจริง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาชุดทดลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำซึ่งเป็นกระบวนการที่พบได้บ่อยในอุตสาหกรรม เพื่อที่จะใช้เป็นชุดฝึกปฏิบัติการในรายวิชาวิศวกรรมการควบคุมและรายวิชาที่เกี่ยวข้อง โดยมุ่งเน้นให้ใช้วัสดุภายในประเทศ สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการทดลองได้หลากหลาย อุปกรณ์ที่นำมาใช้จะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม เพื่อให้ผู้เรียนสามารถนำความรู้ไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ

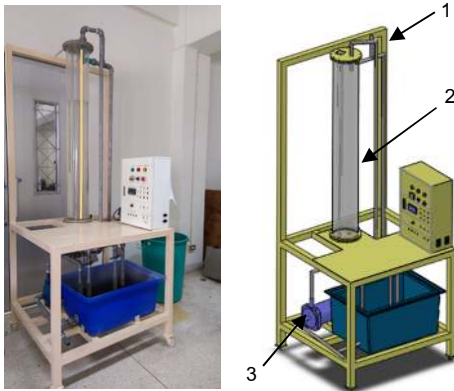
2. การออกแบบฮาร์ดแวร์ชุดทดลอง

ชุดทดลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำมีไดอะแกรมการทำงานดังรูปที่ 1 ขั้นตอนการทำงานของชุดทดลองเริ่มจากระดับน้ำในถังทดลองจะถูกวัดโดยเซ็นเซอร์วัดระดับ (Level Sensor) แบบใช้หลักการวัดความดันซึ่งให้เอาท์พุทเป็นกระแสไฟฟ้า 4-20 mA เนื่องจากการดัดด้า

แอ็คควิซิชัน (Data Acquisition Card) รับส่งสัญญาณเป็นแรงดันไฟฟ้าในหน่วยโวลต์ ดังนั้นสัญญาณที่ออกจากเซ็นเซอร์วัดระดับจะถูกส่งไปแสดงผลและแปลงสัญญาณไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ดิจิตอลโพรเซสเซอร์ (Digital Process Meter) ให้อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้า 0-10 Volt และส่งสัญญาณต่อไปยังการดัดด้าแอ็คควิซิชันเข้าสู่คอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตยูเอสบี (USB) เพื่อประมวลผลและแสดงค่าตัวแปรของกระบวนการด้วยโปรแกรมแลบวิว (LabVIEW) [8] และจะส่งค่าสัญญาณควบคุมที่คำนวณได้จากคอมพิวเตอร์ออกไปทางการดัดด้าแอ็คควิซิชันเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0-5 Volt เพื่อไปควบคุมอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำโดยผ่านอินเวอร์เตอร์ ส่งผลให้น้ำในถังถูกสูบเข้าไปยังถังทดลองจนได้ระดับตามที่ผู้ทดลองต้องการโดยการสูบน้ำเข้าถังทดลองสามารถทำได้สองวิธีคือสูบน้ำเข้าทางด้านล่างถึงผ่านวาล์วหมายเลข 3 หรือสูบน้ำเข้าทางด้านบนถึงผ่านวาล์วหมายเลข 4 ส่วนก้านอิเล็กโทรด (Electrode Bars) มีไว้ใช้ในกรณีที่ต้องการทดลองควบคุมระดับน้ำแบบ เปิด-ปิด (On-Off Control) โครงสร้างของชุดทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 โดยหมายเลข 1 คือ โครงสร้างทำมาจากเหล็กมีขนาด 1000 mm x 1000 mm x 2500 mm (กว้าง x ยาว x สูง) หมายเลข 2 คือ ถังน้ำทดลองซึ่งเป็นท่อโสมมีความสูง 1500 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 200 mm ความหนา 3 mm และ หมายเลข 3 คือ เครื่องสูบน้ำที่ใช้มีขนาด 1 HP



รูปที่ 1 ไดอะแกรมการทำงานของชุดทดลอง



รูปที่ 2 โครงสร้างของชุดทดลอง

3. การออกแบบโปรแกรมชุดทดลอง

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW ในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับใช้กับชุดทดลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำเนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์ที่มีการเขียนโปรแกรมเชิงกราฟิกทำให้ง่ายต่อการพัฒนาและมีเครื่องมือทางวิศวกรรมที่จำเป็นไว้ให้ใช้อย่างครบถ้วน โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยโปรแกรมคำนวณสมการเปรียบเทียบและค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์วัดระดับ โปรแกรมคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ และ โปรแกรมคำนวณค่าเกณฑ์ควบคุมแบบพีไอดี

3.1 โปรแกรมคำนวณสมการเปรียบเทียบและค่าความ

ผิดพลาดของเซ็นเซอร์วัดระดับ

การทำงานของโปรแกรมเริ่มจากการกำหนดอัตรา การไหลของเครื่องสูบน้ำที่ต้องการจากนั้นคลิกที่ปุ่ม Start/Stop หนึ่งครั้งที่โปรแกรมเพื่อสั่งให้เครื่องสูบน้ำทำการสูบน้ำเข้าถังทดลองเมื่อถึงระดับที่ต้องการโดยดูจากแถบสเกลที่ติดไว้ที่ถังทดลองแล้วคลิกที่ปุ่ม Start/Stop อีกครั้งหนึ่งเพื่อสั่งให้เครื่องสูบน้ำหยุดทำงาน จากนั้น โปรแกรมจะทำการบันทึกสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งมาจากเซ็นเซอร์วัดระดับและแสดงผลที่หน้าโปรแกรมในลักษณะตารางเมื่อทำการทดลองจนครบทุกระดับความสูงที่กำหนดไว้ โปรแกรมจะทำการคำนวณหาสมการเปรียบเทียบและค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์วัดระดับ ซึ่งค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์วัดระดับที่คำนวณได้จะประกอบไปด้วย ค่าความผิดพลาดเชิงเส้น (Linearity Error) และ ค่าความผิดพลาดฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Error) [11] ค่าที่ได้นี้สามารถนำไปตรวจสอบความถูกต้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณของผู้เรียน หน้าต่างโปรแกรมและโค้ดของโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3

3.2 โปรแกรมคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ

การทำงานของโปรแกรมเริ่มจากการกำหนดอัตรา การไหลของเครื่องสูบน้ำที่ต้องการจากนั้นคลิกที่ปุ่ม Start/Stop หนึ่งครั้งที่โปรแกรมเพื่อสั่งให้เครื่องสูบน้ำทำการสูบน้ำเข้าถังทดลองสังเกตการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในถังทดลองจากกราฟในหน้าต่างโปรแกรมเมื่อระดับน้ำคงที่ให้คลิกที่ปุ่ม Start/Stop อีกครั้งหนึ่งเพื่อหยุดโปรแกรมจากนั้นทำการบันทึกกราฟที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการที่ (1) [9]

$$G(s) = \frac{k \times e^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (1)$$

โดย $G(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ

T คือ Time Constant (s)

τ คือ Time Delay (s)

k คือ ค่าเกณฑ์ของระบบ

หน้าต่างโปรแกรมและโค้ดของโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4

3.3 โปรแกรมคำนวณค่าเกนตัวควบคุมแบบพีไอดี

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะใช้วิธีการหาค่าเกนตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยวิธีการซีเกลอร์-นิโคลส์ แบบปฏิกิริยาของกระบวนการ [10] โดยหน้าต่างโปรแกรมและโค้ดของโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งวิธีการของเกลอร์-นิโคลส์กล่าวไว้ว่าเมื่อระบบได้รับอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้น ระบบจะตอบสนองออกมาเป็นกราฟในลักษณะรูปตัว S ให้ทำการวัดค่าตัวแปรต่างๆจากกราฟแล้วนำค่าที่ได้ไปแทนในตารางเพื่อหาค่าเกนตัวควบคุมต่อไปดังรูปที่ 6 ส่วนตารางที่ 1 เป็นตารางการหาค่าเกนตัวควบคุมแบบ พี ไอ ดี และ สมการตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2)$$

โดย $u(t)$ คือ ค่าที่ส่งออกจากตัวควบคุม

K_p คือ Proportional Gain

T_i คือ Integral Time Constant

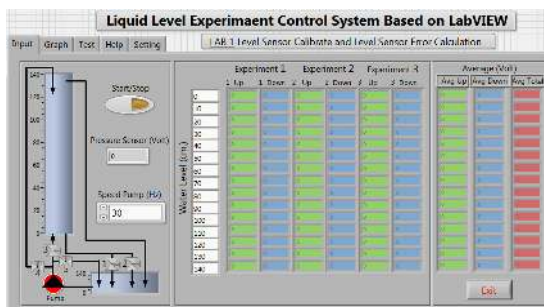
T_d คือ Derivative Time Constant

$e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาด

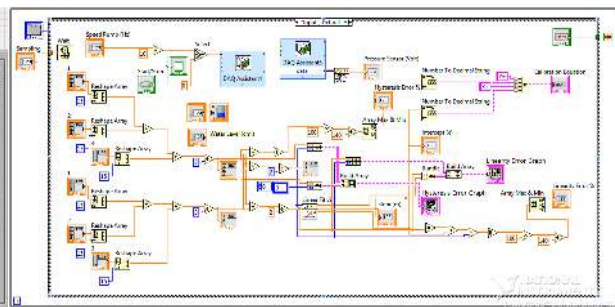
ตารางที่ 1 ค่าเกนตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้วิธีการปฏิกิริยาของกระบวนการ

ชนิดตัวควบคุม	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{P}{RL}$	-	-
PI	$\frac{0.9P}{RL}$	$3.33L$	-
PID	$\frac{1.2P}{RL}$	$2L$	$0.5L$

การทำงานของโปรแกรมเริ่มจากการกำหนดอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำที่ต้องการจากนั้นคลิกที่ปุ่ม Start/Stop หนึ่งครั้งที่โปรแกรมเพื่อสั่งให้เครื่องสูบน้ำทำการสูบน้ำเข้าถังทดลองสังเกตการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในถังทดลองจากกราฟในหน้าต่างโปรแกรมเมื่อระดับน้ำคงที่ให้คลิกที่ปุ่ม Start/Stop อีกครั้งหนึ่งเพื่อหยุดโปรแกรมจากนั้นทำการบันทึกกราฟที่ได้จากการทดลองนำค่าตัวแปรต่างๆจากกราฟดังรูปที่ 6 ไปคำนวณหาค่าเกนตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้ตารางที่ 1

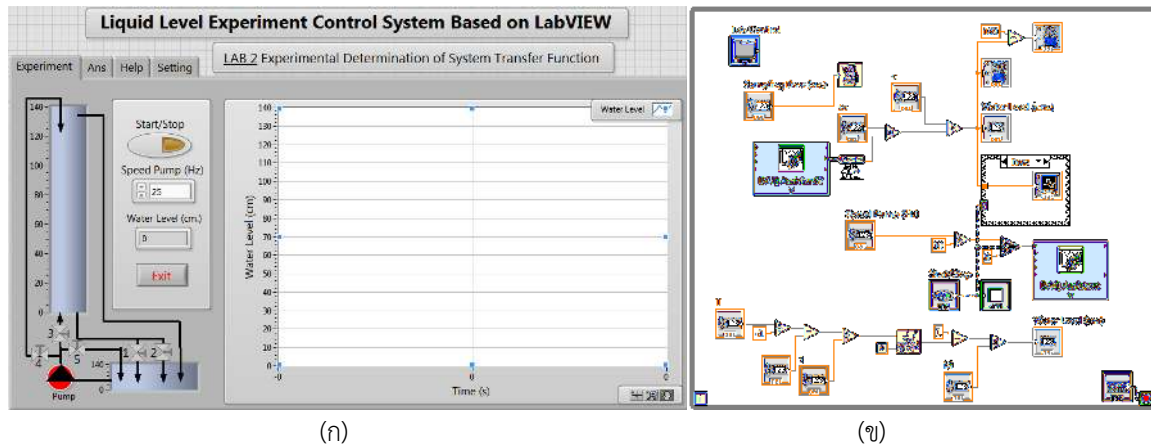


(ก)

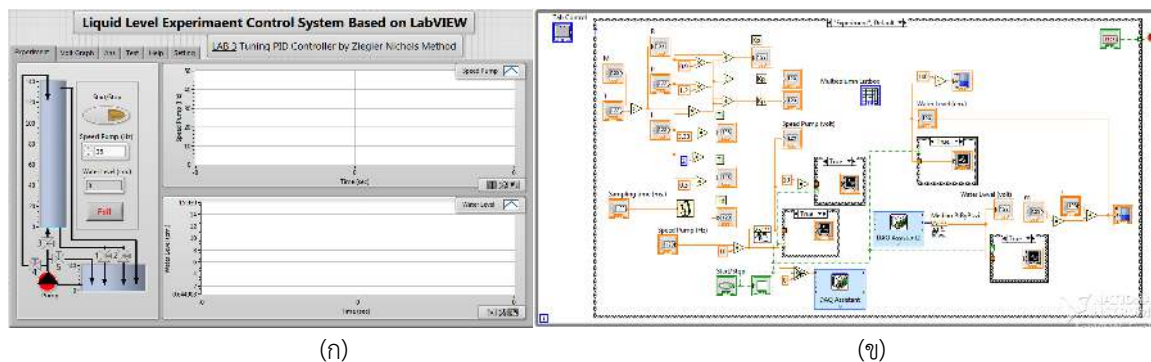


(ข)

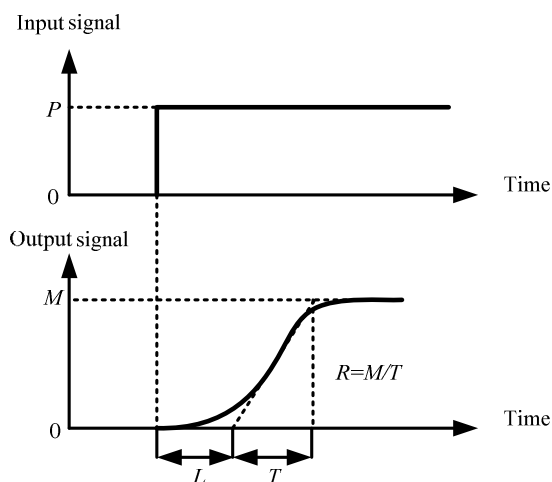
รูปที่ 3 (ก) หน้าต่างโปรแกรม และ (ข) โค้ดของโปรแกรมคำนวณสมการปรับเทียบและค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์วัดระดับ



รูปที่ 4 (ก) หน้าต่างโปรแกรม และ (ข) โค้ดของโปรแกรมคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ



รูปที่ 5 (ก) หน้าต่างโปรแกรม และ (ข) โค้ดของโปรแกรมคำนวณค่าเกณฑ์ควบคุมแบบพีไอดี

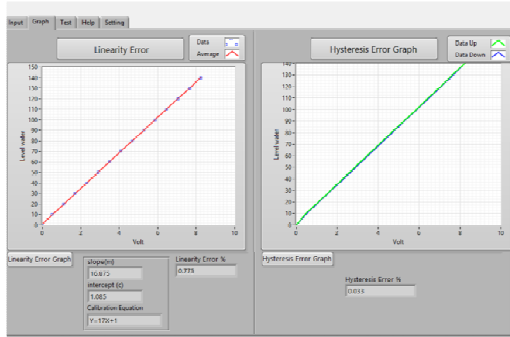


รูปที่ 6 ผลตอบสนองของระบบในการปรับค่าเกณฑ์ควบคุมพีไอดีด้วยวิธีปฏิบัติการกระบวนการ

4. วิธีทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองคำนวณสมการปรับเทียบและค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์วัดระดับ

การทดลองนี้เป็นการทดลองใช้โปรแกรมคำนวณสมการปรับเทียบและค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์วัดระดับ โดยจะให้โปรแกรมสั่งสูบน้ำเข้าถังทดลองครั้งละ 10 cm จนถึง 140 cm จำนวน 3 ครั้ง แล้วมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้โปรแกรมคำนวณหาสมการปรับเทียบและค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์วัดระดับผลการทดลองหาค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์วัดระดับสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 ส่วนสมการปรับเทียบที่โปรแกรมคำนวณได้เป็น $Y = 17X + 1$ จากรูปที่ 7 พบว่าค่าความผิดพลาดเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 0.775% และ ค่าความผิดพลาดฮิสเตอร์ซิสมิค่าเท่ากับ 0.033%

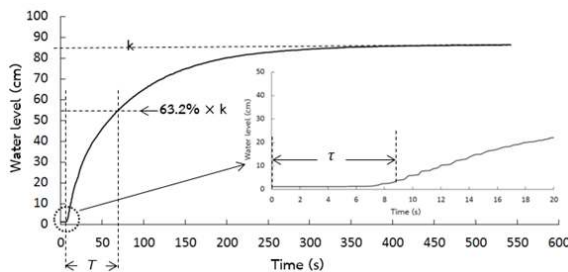


รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์
วัดระดับที่โปรแกรมคำนวณได้

4.2 การทดลองคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของ

กระบวนการ

การทดลองนี้เป็นการทดลองใช้โปรแกรมคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ โดยจะกำหนดอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำด้วยการปรับอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 25 Hz และเปิดวาล์วหมายเลข 1 และ 2 ไว้ให้มีช่องเปิด 50% จากนั้นสั่งรันโปรแกรมรอจนกระทั่งระดับน้ำคงที่แล้วบันทึกผลการทดลอง ผลการตอบสนองของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8

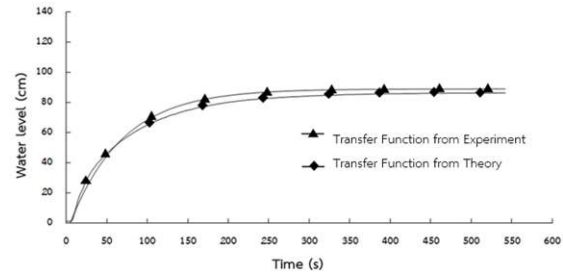


รูปที่ 8 ผลการตอบสนองของระบบในการทดลอง
คำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ

จากรูปที่ 8 ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการจะได้ดังสมการที่ (3)

$$G(s) = \frac{89 \times e^{-5s}}{65(s+1)} \quad (3)$$

เมื่อนำผลการตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนจากสมการที่ (3) ไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 9

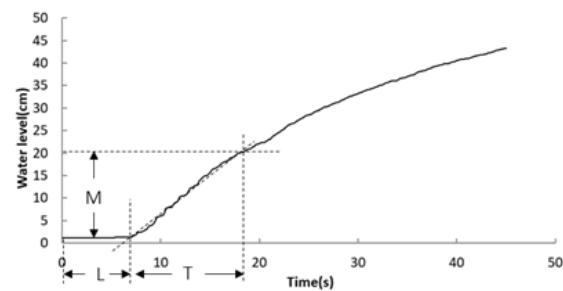


รูปที่ 9 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบที่
ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนกับกระบวนการจริง

จากรูปที่ 9 พบว่าผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ (3) เทียบกับกระบวนการจริงมีความใกล้เคียงกัน ส่วนค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการจริง

4.3 โปรแกรมคำนวณค่าเกนตัวควบคุมแบบพีไอดี

การทดลองนี้เป็นการใช้โปรแกรมเพื่อคำนวณค่าเกนตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยจะกำหนดอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำให้มีค่าเท่ากับ 25 Hz และเปิดวาล์วหมายเลข 1 และ 2 ไว้ให้มีช่องเปิด 50% จากนั้นสั่งรันโปรแกรมรอจนกระทั่งระดับน้ำคงที่แล้วบันทึกผลการทดลอง ผลการตอบสนองของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10



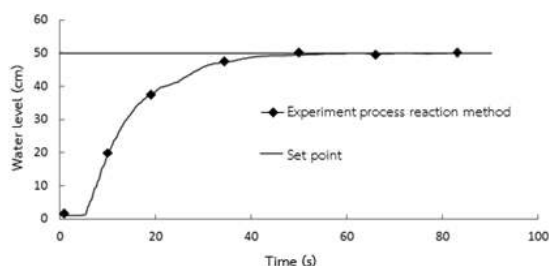
รูปที่ 10 ผลการตอบสนองของระบบในการทดลอง
คำนวณค่าเกนตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากรูปที่ 10 นำค่าตัวแปรจากกราฟที่ได้ไปคำนวณค่าเกนตัวควบคุมแบบพีไอดีจากตารางที่ 1 ซึ่งจะทำได้ค่าเกนตัวควบคุมแบบพีไอดี ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเกนตัวควบคุมแบบพีไอดีที่คำนวณได้
จากการทดลอง

ชนิดตัวควบคุม	K_p	T_i	T_d
P	2.4	-	-
PI	2.16	0.442	-
PID	2.88	0.266	0.0665

ผลการทดลองหลังจากนำค่าเกนตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่ได้จากตารางที่ 2 ไปใส่ในโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11 จากรูปที่ 11 พบว่าค่าเกนของตัวควบคุมแบบ พี ไอ ดี ที่ได้จากวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ แบบปฏิกิริยาของกระบวนการ สามารถควบคุมระดับน้ำให้เข้าสู่ค่าที่ต้องการได้อย่างถูกต้องและราบเรียบ



รูปที่ 11 ผลการทดลองใช้ค่าเกนตัวควบคุมแบบพีไอดี
ที่ได้จากวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์
แบบปฏิกิริยาของกระบวนการ

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าชุดทดลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำที่พัฒนาขึ้นทั้งในส่วนที่เป็นโครงสร้างและโปรแกรมสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ได้เป็นอย่างดี โดยพบว่าค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์วัดระดับแบบเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 0.775% และ ค่าความผิดพลาดฮิสเตอร์ซีสมิ์มีค่าเท่ากับ 0.033% ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากกระบวนการจริงมีค่าเท่ากับ 5.16% ค่าความผิดพลาด ณ สภาวะคงตัว ของการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดีเท่ากับ 0.13% และจากการนำชุดทดลองไปใช้จริงในการเรียน

วิชาวิศวกรรมการควบคุมของนิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ดังรูปที่ 12 พบว่านิสิตมีความสนใจและกระตือรือร้นในการเรียนเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก มีการซักถาม อภิปราย ในการเรียนตลอดเวลา และจากการสอบถามหลังจบการทดลองนิสิตส่วนใหญ่สามารถเข้าใจเนื้อหาเกี่ยวกับรายวิชาวิศวกรรมการควบคุมได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 12 การนำชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการ
เรียนการสอนรายวิชาวิศวกรรมการควบคุม

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปีงบประมาณ 2558

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wellsted P.E., “Teaching control with laboratory scale models”, IEEE Transactions on Education, vol.33, no.3, pp.286, 1990.
- [2] Grega W. and Doughty D., “Open architecture environment for control engineering education”, Computer in Education, Chapman & Hall, London, pp.517-530, 1995.
- [3] Peter Horacek, “Laboratory experiments for control theory courses: a survey”, Annual Reviews in control, Pergamon, vol.24, pp.151-162, 2000.
- [4] Jovan V. and Petrovic J., “Process Laboratory – A necessary resource in control engineering education”, Computer Chem. Engng, vol.20, pp.S1335-S1340, 1996.
- [5] Richard T., O’Brien, Jr. and John M. W., “The Temperature Box: An Introductory Control Systems Project”, The 38th Conference of Decision & Control, USA, 1999.
- [6] Trumbower R.D. and Enderle J.D., “Virtual instruments in undergraduate biomedical engineering laboratories”, Engineering in Medicine and Biology Magazine, Vol.22, pp.101-110, 2003.
- [7] Stegawski M.A. and Schaumann R., “A new virtual-instrumentation-based experimenting environment for undergraduate laboratories with application in research and manufacturing”, IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol.47, pp.1503-1506, 1998.
- [8] กิจไพบูลย์ ชิวพันธุ์ศรี, การสร้างระบบอัตโนมัติด้วย LabVIEW ร่วมกับระบบ Data Acquisition และ Machine Vision สำหรับผู้เริ่มต้น, กรุงเทพฯ, ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2557
- [9] Seed T. and Mahdi T., “Optimal Tuning of pid controllers for first order plus time delay models using dimensional analysis”, The Fourth International Conference on Control and Automation (ICCA’03), 10-12 June, Canada, pp.942-946, 2003.
- [10] สมหวัง อริสริยวงศ์, “เรียนรู้และเข้าใจตัวควบคุมแบบ พี ไอ ดี, Mechanical Technology Magazine, vol.4, no.46, กรกฎาคม, 2548
- [11] Richard S. F. and Donal E. B., “Theory and Design for Mechanical Measurements”, John Wiley & Sons Inc., 2006.