

## 5ER-O05: การสร้างระบบจำลองอันดับหนึ่งที่มีเวลาเว้นว่างแบบเรียลไทม์ โดยใช้โปรแกรม WinFACT และบอร์ด ESP-32 Application of WinFACT Software and ESP-32 for Real-Time First Order Plus Dead-Time Simulated System

ปรีชา สาคะรังค์<sup>1\*</sup>

Preecha Sakarung<sup>1\*</sup>

### บทคัดย่อ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แทนกระบวนการในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมาก คือระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเว้นว่าง โดยทั่วไปการควบคุมกระบวนการที่มีลักษณะเป็นระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเว้นว่างนั้น ทำได้โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดี และใช้วิธีปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีโดยทั่วไปซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีเช่น วิธีของ Ziegler-Nichols วิธีของ Chien-Hrones-Reswick เป็นต้น บทความนี้นำเสนอการสร้างระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเว้นว่างแบบเรียลไทม์ โดยใช้โปรแกรม WinFACT และบอร์ด ESP-32 สำหรับใช้เป็นกระบวนการทดลองการควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมพีไอดี บนหลักการทำงานแบบระบบฮาร์ดแวร์อยู่ในลูป (Hardware in the Loop, HIL) ด้วยอัตราการสุ่มต่ำสุด 0.02 วินาที การทดลองมีสองลักษณะคือ 1. หลักการทำงานแบบ HIL ด้วยการใส่ตัวควบคุมพีไอดีที่เป็นแบบแอนะล็อกควบคุมกระบวนการ และ 2. หลักการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียว ด้วยการจำลองตัวควบคุมพีไอดีและกระบวนการด้วยโปรแกรม WinFACT ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงกระบวนการตัวอย่างที่มีค่าคงที่ทางเวลาและค่าเวลาเว้นว่างเท่ากับ 4.3 วินาที และใช้วิธีการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีของ Chien-Hrones-Reswick พบว่าผลการทดลองทั้งสองนั้น มีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกันโดยมีค่าความผิดพลาดที่มีขนาดสูงสุดไม่เกิน 5%

**คำสำคัญ:** ระบบฮาร์ดแวร์อยู่ในลูป ระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเว้นว่างแบบเรียลไทม์ โปรแกรม WinFACT

### Abstract

Most mathematical model representing processes exploited in industries is a real-time first order plus dead-time system generally done by using PID controller by adjusting its gain following Ziegler-Nichols or Chien-Hrones-Reswick, for instance. This article presents an application of WinFACT and Board ESP-32 to create a real-time first order plus dead-time system as a testing process of the control system with PID controller with hardware in the loop functional system at 0.02-second sampling time. The experiment has been completed with 2 different approaches: 1) HIL – with PID controller in analogue control system and 2) Computer Simulation – with PID controller simulated by WinFACT. With Chien-Hrones-Reswick approach in adjusting gain, the proposed real-time first order plus dead-time system, in which the time constant and dead time are both at 4.3 seconds. The study resulted in no significant difference in both shape and size with not exceeding 5% different.

**Keywords:** hardware in the loop, real-time first order plus dead-time system, WinFACT

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

<sup>1</sup> Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

\* Corresponding author. E-mail: preecha.sakarung@gmail.com

### บทนำ

ระบบฮาร์ดแวร์อยู่ในลูป (Hardware in the Loop, HIL) เป็นระบบที่มีทั้งอุปกรณ์จริงและอุปกรณ์จำลองอยู่ในลูปการควบคุมเดียวกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์จริงหรืออุปกรณ์จำลองที่ต้องการในประเด็นต่าง เช่น การจำลองสัญญาณเลียนแบบกระบวนการแบบต่างๆ เพื่อให้ทดสอบการทำงานของตัวควบคุมที่สร้างขึ้นด้วยอุปกรณ์จริง หรือในทำนองกลับกันระบบดังกล่าวก็มีความสามารถจำลองสัญญาณเลียนแบบตัวควบคุมแบบต่าง ๆ เพื่อให้ทดสอบการทำงานของกระบวนการที่สร้างขึ้นด้วยอุปกรณ์จริง การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่อยู่ในลูปควบคุมต้องมีความรวดเร็วแบบเรียลไทม์จึงจะทำให้ระบบฮาร์ดแวร์อยู่ในลูปทำงานได้อย่างสมบูรณ์ (Soriano et al., 2014; Meiqi et al., 2017;)

ขั้นตอนการสมมติวัตถุดิบเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมยา ฯลฯ ปัญหาที่พบคือเวลาเว้นว่าง เนื่องจากสาเหตุหลักดังนี้ (Bequette, 2002) สาเหตุที่เกิดจากปัจจัยภายนอก เช่น การเคลื่อนที่ของวัตถุดิบผ่านท่อที่มีระยะทางไกล สาเหตุที่เกิดจากปัจจัยภายใน เช่น ความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์สั่งการสุดท้าย (final control element) เมื่อกระบวนการมีเวลาเว้นว่างจะทำให้การควบคุมทำได้ยาก และมีแนวโน้มที่จะขาดเสถียรภาพได้ง่าย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเว้นว่าง (first order plus dead-time system, FOPDT) ถูกใช้ประมาณแทนกระบวนการที่มีเวลาเว้นว่างในอุตสาหกรรม ทั้งนี้โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ฝึกพนักงานควบคุมให้มีประสบการณ์ในการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุม (Korsane et al, 2014)

บทความนี้นำเสนอตัวอย่างการจำลองสัญญาณเพื่อเลียนแบบกระบวนการที่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเว้นว่าง โดยใช้โปรแกรม WinFACT และบอร์ด ESP-32 ซึ่งมีการทำงานแบบเรียลไทม์

### วิธีการศึกษา

โครงสร้างการทำงานของระบบฮาร์ดแวร์อยู่ในลูปที่นำเสนอในบทความนี้แสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งมีองค์ประกอบหลักอยู่สองส่วนคือ 1. Real PID Controller คือตัวควบคุมพีไอดีที่เป็นอุปกรณ์จริงซึ่งใช้เป็นตัวควบคุมในลูปควบคุมป้อนกลับ 2. Simulated FOPDT คือระบบที่นำเสนอซึ่งประกอบด้วยโปรแกรม WinFACT และบอร์ด ESP-32 โดยทำหน้าที่สร้างสัญญาณจำลองของระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเว้นว่างเมื่อ A คือ อัตราขยายไฟตรง L คือเวลาเว้นว่าง และ T คือค่าคงที่ทางเวลาของระบบอันดับหนึ่ง

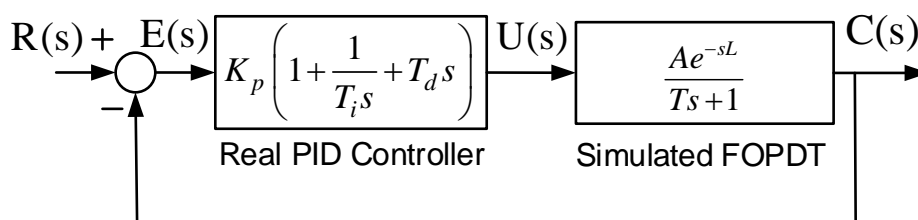


Figure 1 a closed loop controller with HIL technique

### การติดตั้งบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP-32 เชื่อมต่อกับโปรแกรม WinFACT

โปรแกรม WinFACT (WinFACT, 2020) ได้แสดงตัวอย่างการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP-32 ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นของบอร์ด คือ ความเร็วในการรับส่งสูง (baudrate เท่ากับ 256000) และมีเอาต์พุตที่เป็นสัญญาณอนาล็อก (D/A) จากรูปที่ 2 แสดงบล็อก ESP-32 และหน้าต่างการกำหนดค่าให้กับบอร์ดเพื่อเชื่อมต่อกับโปรแกรม WinFACT โดยมีช่องต่อที่อยู่ทางด้านซ้ายและด้านขวาของบล็อก ESP-32 ซึ่งก็คือช่องสัญญาณเอาต์พุตและช่องสัญญาณอินพุตตามลำดับ รายละเอียดของช่องว่าทำหน้าที่อะไรพร้อมหมายเลขของขาแสดงได้ในหน้าต่างการตั้งค่าที่อยู่ในรูปที่ 2

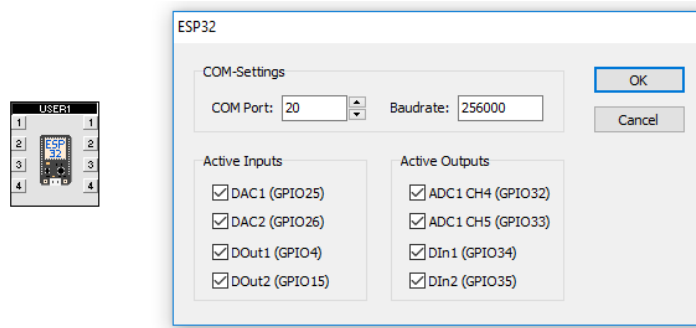


Figure 2 a configuration of ESP-32 on WinFACT

### ตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุมพีไอดีเมื่อต่อแบบขนานจะมีสมการของการสร้างสัญญาณเอาต์พุตดังสมการที่ 1 และเมื่อต่อแบบอนุกรม จะมีสมการของการสร้างสัญญาณเอาต์พุตดังสมการที่ 2 เมื่อ  $u_i(t)$ ,  $u_o(t)$  คือสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตตามลำดับ

$$u_o(t) = (K_p * u_i(t)) + \left( K_i \int_0^t u_i(t) dt \right) + (K_d * (du_i(t)/dt)) \quad (1)$$

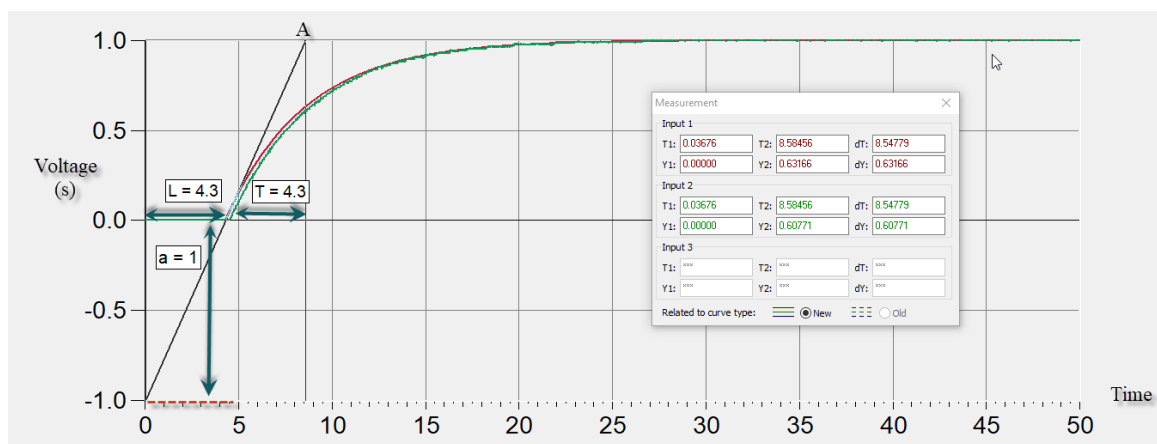
$$u_o(t) = K_p \left( u_i(t) + \frac{1}{T_n} \int_0^t u_i(t) dt + T_v * (du_i(t)/dt) \right) \quad (2)$$

### การปรับค่าอัตราขยายด้วยหลักเกณฑ์ CHR (Chien, Hrones and Reswick)

Chien, Hrones and Reswick (CHR) (ธนิต, 2561) ได้เสนอแนวทางการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีดังตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาเฉพาะสัญญาณอ้างอิงเป็นหลักและไม่ต้องการให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่ง ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ในบทความนี้ได้จากตารางที่ 1 เมื่อทราบค่าตัวแปรของกระบวนการจากผลตอบสนองแบบขั้นของกระบวนการ จากรูปที่ 3 แสดงการหาค่าตัวแปร  $a$ ,  $L$  และ  $T$

**Table 1** Controller gains obtained from CHR method with set point regulation with 0% overshoot

Controllers	parameters	Calculated parameters
P	$K_p = 0.3 / a$	$K_p = 0.3$
PI	$K_p = 0.35 / a$ $T_n = 1.2 * T$	$K_p = 0.35$ $T_n = 5.16$
PID	$K_p = 0.6 / a$ $T_n = T$ $T_v = 0.5 * L$	$K_p = 0.6$ $T_n = 4.3$ $T_v = 2.15$

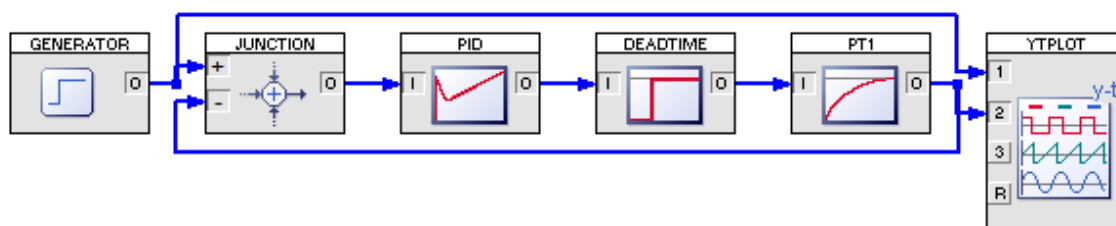
**Figure 3** CHR step response method with parameters

### ผลการศึกษา

การทดลองมีสองลักษณะคือ 1. หลักการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียว ด้วยการจำลองตัวควบคุมพีไอดีและกระบวนการด้วยโปรแกรม WinFACT และ 2. หลักการทำงานแบบ HIL ด้วยการใช้อัตว์ควบคุมพีไอดีที่เป็นแบบแอนะล็อกควบคุมกระบวนการที่เป็นระบบที่นำเสนอ

### หลักการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียว

การต่อลูปควบคุมป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเวลาเว้นว่าง โดยใช้โปรแกรม WinFACT แสดงได้ดังรูปที่ 4 เมื่อพิจารณากระบวนการตัวอย่างที่มีค่าคงที่ทางเวลาและค่าเวลาเว้นว่างเท่ากับ 4.3 วินาที

**Figure 4** Computer simulation of a feedback control loop

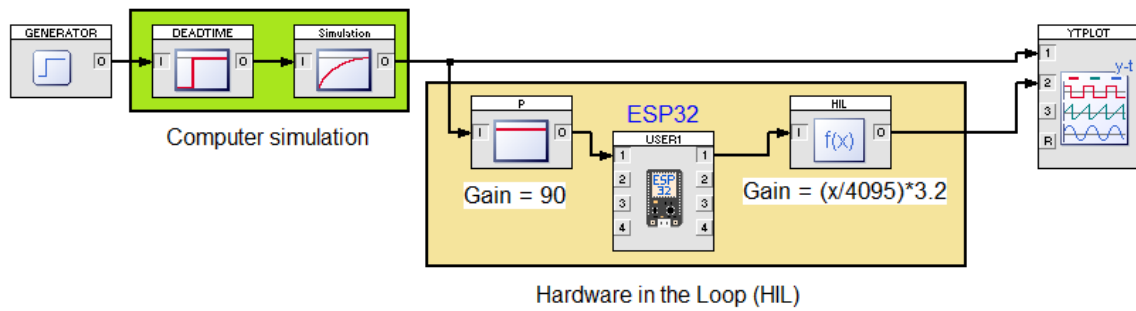


Figure 5 Computer simulation and hardware in the loop on WinFACT

### หลักการทำงานแบบ HIL

การสร้างกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเวลาเว้นว่างด้วยโปรแกรม WinFACT และบอร์ด ESP-32 แสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งได้ผลการทำงานเปรียบเทียบกันระหว่างการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และระบบที่นำเสนอ ดังรูปที่ 6 หลังจากนั้นต่อดังรูปที่ 1 ซึ่งทำการทดลอง 3 ครั้งคือ 1. ใช้ตัวควบคุมพี 2. ใช้ตัวควบคุมพีไอ 3. ใช้ตัวควบคุมพีไอดี ควบคุมในลูปป้อนกลับ ผลการทดลองทั้งสามครั้งแสดงได้ดังรูปที่ 7 – 9 ตามลำดับ

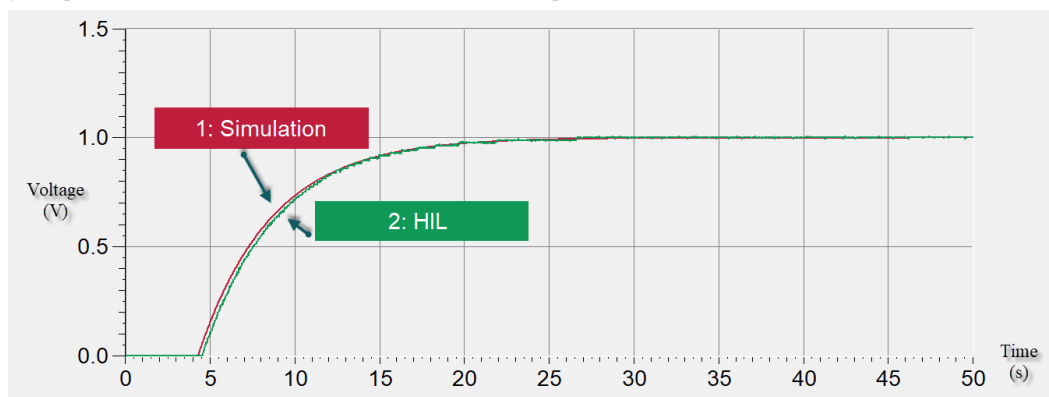


Figure 6 Comparison of simulation and HIL results

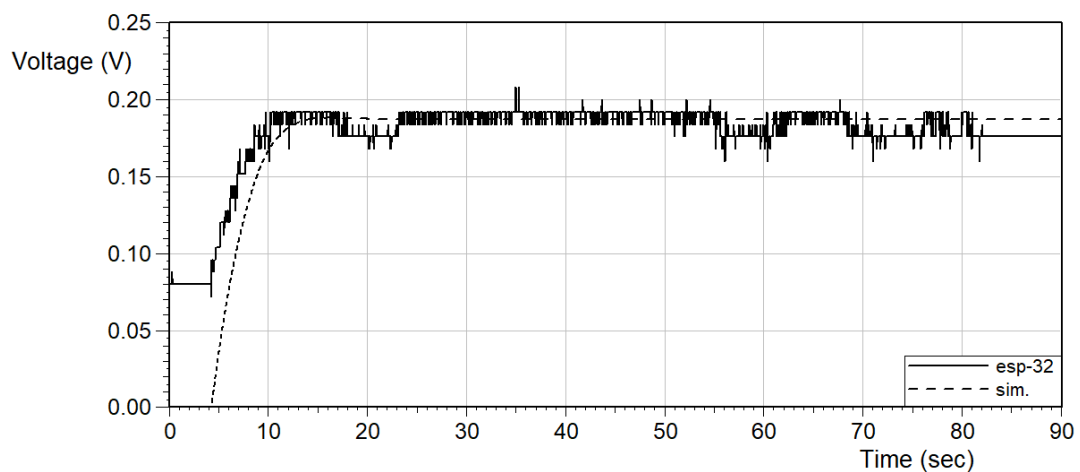


Figure 7 Step response of P controller

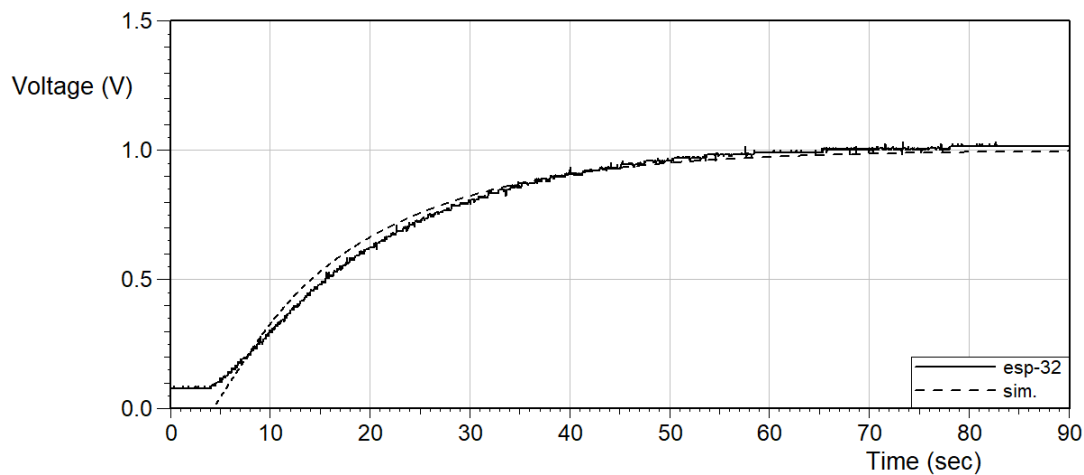


Figure 8 Step response of PI controller

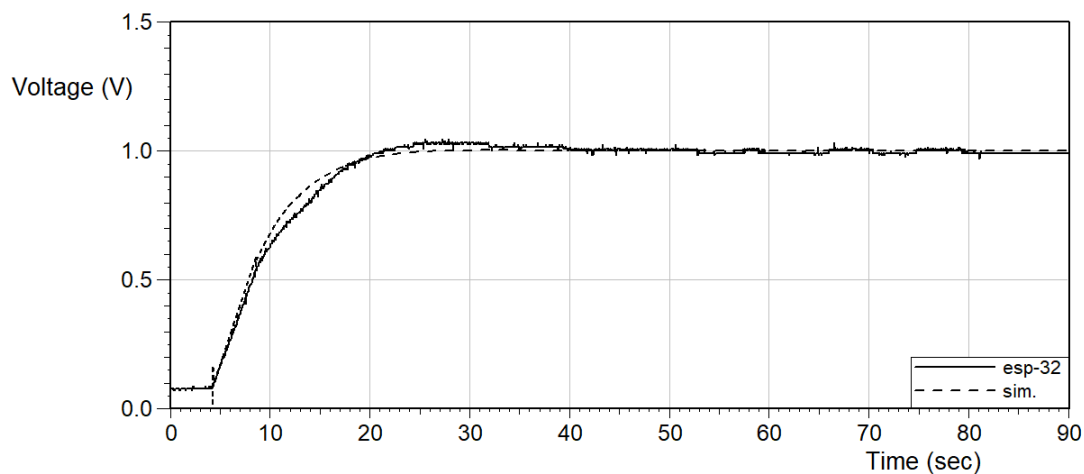


Figure 9 Step response of PID controller

### อภิปรายผล

จากรูปที่ 7 - 9 แสดงผลตอบสนองต่อการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมที่เป็นอุปกรณ์จริง เมื่อกำหนดให้สัญญาณอ้างอิงเป็นฟังก์ชันแบบขั้นหนึ่งหน่วย พบว่าระบบที่นำเสนอสมาารถทำหน้าที่แทนกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเวลาเว้นว่างได้อย่างน่าพอใจ โดยมีค่าความผิดพลาดต่ำกว่า 5 % ในจุดที่มีความแตกต่างของแรงดันมากที่สุดในแต่ละรูป อนึ่งจากข้อจำกัดของบอร์ด ESP-32 ที่ไม่สามารถสร้างสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับศูนย์โวลต์ได้ จึงทำให้ในรูปผลการทดลองทั้งหมด ค่าเริ่มต้นของระบบที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 80 mV ถึงแม้ว่าสัญญาณอ้างอิงจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ระบบที่นำเสนอมีราคาถูก ใช้งานง่าย และสามารถประยุกต์ใช้กับการสร้างสัญญาณในรูปแบบต่างๆ ได้

### สรุป

บทความนี้นำเสนอการสร้างระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเว้นว่างแบบเรียลไทม์ โดยใช้โปรแกรม WinFACT และบอร์ด ESP-32 ซึ่งสามารถใช้เป็นอุปกรณ์จำลองในระบบฮาร์ดแวร์อยู่ในรูปได้ จากการทดลองควบคุมกระบวนการที่นำเสนอด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่เป็นอุปกรณ์จริงในระบบฮาร์ดแวร์อยู่ในรูปด้วยอัตราการสุ่มต่ำสุด 0.02 วินาที และใช้วิธีการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีของ Chien-Hrones-Reswick พบว่าผลการทดลองทั้งสองนั้น มีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกันโดยมีค่าความผิดพลาดที่มีขนาดสูงสุดไม่เกิน 5%

ระบบที่นำเสนอมีความเป็นไปได้ที่จะใช้จำลองตัวควบคุมแบบต่าง ๆ ได้ด้วย ดังนั้นด้วยระบบที่นำเสนอจึงเหมาะต่อการพัฒนาเป็นเครื่องมือหลักเพื่อใช้กับการเรียนการสอนระดับมหาวิทยาลัย โดยเฉพาะรายวิชาระบบควบคุมได้เป็นอย่างดี

### เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนิต มาลากกร, (2561) ระบบพลวัตและการควบคุม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
- [2] Bequette ,W. (2002) Process control: modelling, design and simulation, Prentice Hall
- [3] WinFACT. 2020 [online]. Available: <http://www.kahlert.com>
- [4] Korsane, D., Yadav, V., Raut, K. (2014) PID tuning rules for the first order plus time delay system, Instrumentation control engineer., vol 2, 582-586.
- [5] Meiqi, W., Lie, X., Kui, W., Zedong, Z., Yongdong, Li., Chris, G., He, Z. (2017). Hardware-in-the-loop real-time platform for more electric aircraft. Journal of Engineering, 446–452
- [6] Soriano, A., Marin, L., Valles, M., Valera, A. and Albertos, P. (2014) Low Cost Platform for Automatic Control Education Based on Open Hardware", Proceedings of the 19th World Congress, The International Federation of Automatic Control, Cape Town, South Africa.