

**การออกแบบและเปรียบเทียบระบบควบคุมแบบฟuzzy กับแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ
ในการควบคุมแรงกดของเครื่องกดอัดเม็ดยาแบบกระบอกสูบไฮดรอลิกส์**
**Designed and Comparison of PID Controller and Fuzzy Logic Controller for
Pressing Force Control of Hydraulically Actuated Tableting Machine**

ณัฐภูมิ เตไพบา¹, อุณหัต พินโสภณ¹, ปิจิราวุธ เวียงจันทา¹ และ นเร็น ชัยธานี²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

²สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีไทย – ญี่ปุ่น กรุงเทพฯ 10250

* ผู้ติดต่อ : E-mail: kdnattaw@kmitl.ac.th , โทรศัพท์: (662) 326-4197, โทรสาร: (662) 326-4198

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องกดอัดเม็ดยาโดยใช้ระบบไฮดรอลิกส์แบบควบคุมแรงกด ภายใต้ความร่วมมือกับนักวิจัยด้านเภสัชกรรม ตัวควบคุมแบบฟuzzy และตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือถูกพัฒนาและใช้ในการทดสอบในการศึกษาในครั้งนี้ เทคนิคการปรับจูนแบบ Ziegler-Nicolas ถูกนำมาใช้ในการจำลองและการทดสอบเพื่อปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบฟuzzy ค่าพารามิเตอร์นี้ ขั้นแรกได้มาจากการจำลองในคอมพิวเตอร์และถูกปรับจูนในขั้นสุดท้ายในการทดสอบกับระบบจริง ตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือได้เลือกค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวและอัตราความผิดพลาดในสถานะคงตัวเป็นตัวแปรอินพุตสำหรับตัวควบคุม และมีจำนวนสมาชิก 7 สมาชิกในแต่ละฟังก์ชันชั้นความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต ประสิทธิภาพของการควบคุมของทั้งสองตัวควบคุมจะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน ตัวควบคุมทั้งสองแบบถูกออกแบบให้มีเวลาการลู่เข้าสู่สถานะคงตัว (settling time) ที่ประมาณ 3.0 – 4.0 วินาที ตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือให้ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวที่ดีกว่าเล็กน้อย ตัวควบคุมแบบฟuzzy ต้องได้รับการปรับแต่งในทุกการควบคุมแรงที่ต้องการ ในขณะที่ตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือนั้น จะมีช่วงการทำงานที่กว้างกว่าในการปรับแต่งแต่ละครั้ง

คำสำคัญ: ระบบอิเล็กทรอนิกส์-ไฮดรอลิกส์, ตัวควบคุมฟuzzy, ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ

Abstract

A hydraulically actuated tableting machine with an ability of pressing force control was developed under collaboration with researchers from a pharmacy school in Thailand. PID controller and Fuzzy logic force controller was developed and tested in the study. Ziegler-Nicolas tuning technique was adopted in both simulations and experiments to obtain the PID gains. The PID gains was first obtained in the computer simulations and later, fine-tuned in the actual experiments. The inputs to fuzzy logic consist of

the force error and the change of force error. Seven membership functions of each input and output were employed. The performance of both controllers was compared. The settling times achieved by both controllers are in the range of the desired value of 3.0-4.0 seconds. Fuzzy logic controller yields a slightly better steady state error. The PID controller needs an appropriate tuning for each desired pressing force. However, the fuzzy logic control, once fine-tuned, could work under a wider range of desired pressing forces.

Key words: Electro – Hydraulic system, PID – controller, Fuzzy logic controller

1. บทนำ

ระบบไฮดรอลิกส์เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายไม่ว่าจะในโรงงานอุตสาหกรรม และในชีวิตประจำวันมากมายหลายอย่าง เช่น ระบบกันสะเทือนของรถยนต์ รถตักดิน หรือ โปลิสติก เนื่องจากอุปกรณ์ไฮดรอลิกส์นั้นให้กำลังที่สูงเมื่อเทียบกับขนาดและน้ำหนักของอุปกรณ์เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ชนิดอื่น ความยืดหยุ่นในการปรับแต่งความเร็ว แรง แรงบิด หรือ การควบคุมที่มีความแม่นยำสูง แต่การที่จะทำการควบคุมระบบไฮดรอลิกส์นั้นเป็นสิ่งที่ซับซ้อน เนื่องจากเป็นระบบที่ซับซ้อน มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง และยากที่จะสร้างแบบจำลองให้มีความถูกต้อง

ในการศึกษาระบบควบคุมระบบอิเล็กทรอนิกส์ – ไฮดรอลิกส์ที่ผ่านมาเป็นที่สนใจของนักวิจัยทั้งหลาย ไม่ว่าจะเป็นระบบควบคุมแบบพื้นฐาน (Classical control) [1], ระบบควบคุมแบบ adaptive control [2] [3], ระบบควบคุมแบบ predictive control [4], ระบบควบคุมแบบ neural network [5] และระบบควบคุมแบบอื่นๆอีกมากมาย Kanai et al.[6] ได้นำเสนอการใช้ควบคุมระบบอิเล็กทรอนิกส์ – ไฮดรอลิกส์แบบควบคุมที่แรงกดเปรียบเทียบกับแรงกดที่อัตราการไหลของน้ำมันในเครื่องบดที่มีความแม่นยำสูง โดยการความเร็วในการป้อนแรงที่ 200 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 1 nm/step แต่อย่างไรก็ตามระบบแบบนี้จะมีความแม่นยำที่ความยาวของกระบอกสูบไม่เกิน 20 มิลลิเมตร

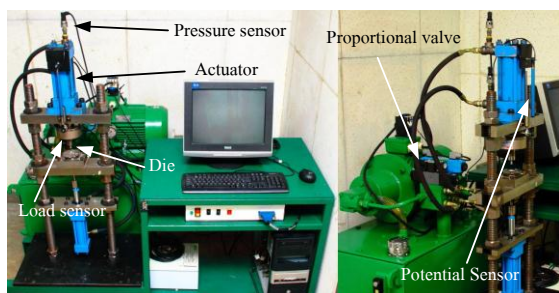
ระบบควบคุมหลายประเภทได้ถูกวิจัยและทดสอบกับระบบไฮดรอลิกส์ในอดีตที่ผ่านมา [7] ระบบควบคุมฟัซซี่ลอจิกเป็นหนึ่งในระบบควบคุมที่ได้รับความสนใจ

ในการประยุกต์ใช้กับระบบไฮดรอลิกส์ [7] [8] [9] [10] เนื่องจากระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกสามารถพัฒนาขึ้นโดยผู้ที่ออกแบบไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางพลศาสตร์ แต่จะพิจารณาบนพื้นฐานพฤติกรรมของระบบที่จะควบคุม ทำให้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกมีความคล้ายคลึงกับการตัดสินใจของมนุษย์ [11] แต่การออกแบบระบบควบคุมฟัซซี่ลอจิกนั้นกระทำได้ไม่ถนัดนักเนื่องจากต้องใช้ความชำนาญในการกำหนดเงื่อนไขและกฎการควบคุมฟัซซี่ ผลการควบคุมแรงกดของระบบไฮดรอลิกส์ด้วยฟัซซี่ลอจิกจะถูกเปรียบเทียบกับผลการควบคุมด้วยระบบควบคุมพีไอดี

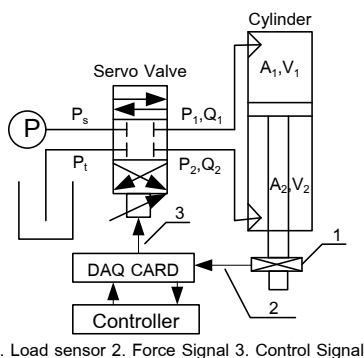
2. อุปกรณ์ทดลอง

รูปที่ 1 แสดงเครื่องกดอัดเม็ดยาที่พัฒนาขึ้นในบทความนี้ โดยใช้น้ำมันไฮดรอลิกส์แบบอัตราไหลคงที่ขนาด 1.81 ลบ.ซม.ต่อรอบส่งเข้าสู่กระบอกสูบที่มีช่วงชัก 10 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 63 เซนติเมตรโดยการไหลถูกควบคุมโดยพรอพเพอร์ชั่นนัลวาล์ว Tokimec COM-3-2C-30-CH-11 ที่มีอัตราการไหลสูงสุด 30 ลิตรต่อนาที ไหลดเซลถูกใช้ในการตรวจรับรู้แรงที่เกิดจากการกดลงบนเม็ดยาโดยตรง ระยะการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบถูกวัดโดยอุปกรณ์วัดระยะ (Position sensor) ตัว ตัวรับรู้ความดัน (Pressure transducer) ถูกติดตั้งไว้เพื่อวัดความดันของปั๊ม กระบอกสูบด้าน Head-end และ กระบอกสูบด้าน Rod-end ตัวควบคุมถูกโปรแกรมและทำงานบนคอมพิวเตอร์ด้วยการส่งสัญญาณเข้าและขาออกผ่าน Nation Instrument PCI 6221 DAQ card.

ไดอะแกรมของระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบควบคุมแรงถูกแสดงในรูปที่ 2 โดยแรงกดจะถูกตรวจวัดโดยตัวรับรู้แรง (Load Cell) ซึ่งถูกติดตั้งที่ปลายของกระบอกสูบและส่งสัญญาณเข้าคอมพิวเตอร์ผ่านทาง DAQ การ์ด ตัวควบคุมจะถูกคำนวณและส่งสัญญาณควบคุมไปยังพวพเพอร์ซันนอลวาล์ว ตัวรับรู้ความดันและระยะจะถูกตรวจวัดแต่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการควบคุมแต่ถูกนำมาใช้ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 1 เครื่องกดอัดเม็ดยา



1. Load sensor 2. Force Signal 3. Control Signal

รูปที่ 2 แผนภาพอธิบายการทำงานของเครื่องอัดเม็ดยา

3. การออกแบบระบบควบคุม

ในการศึกษาในครั้งนี้ทำการออกแบบตัวควบคุม 2 ระบบเพื่อเปรียบเทียบกัน เพื่อหาความเหมาะสมของระบบควบคุมที่จะนำมาใช้กับระบบอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องกดอัดเม็ดยา คือ ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) และ ระบบควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy logic Controller)

ในการศึกษาในครั้งนี้ แรงกดที่มีค่าคงที่ใช้เป็นแรงอ้างอิงในการสั่งงานเครื่องกดอัดเม็ดยา ความสามารถ

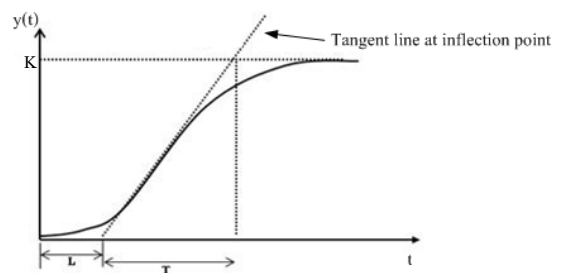
ของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมทั้งตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือถูกออกแบบให้ระบบมีเวลาในการเข้าสู่สถานะคงตัว (settling time) ในเวลาประมาณ 3.0 – 4.0 วินาที โดยค่าความสามารถของระบบนี้ถูกเลือกโดยนักวิจัยเภสัชกรรม ซึ่งเป็นผู้ใช้เครื่องกดอัดเม็ดยานี้เพื่อใช้ในการทดลองเกี่ยวกับแรงที่มีผลต่อเม็ดยา โดยระดับแรงกดถูกออกแบบที่ 500, 1000 และ 1500 กิโลกรัม – แรง

3.1 ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)

ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) เป็นระบบควบคุมที่ใช้กันแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมทั่วไปเพราะเป็นระบบที่มีความง่ายและต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับระบบควบคุมแบบอื่นๆ พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี แสดงในสมการที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ 3 พารามิเตอร์ คือ K_p , K_i และ K_d

$$U(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (1)$$

ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) ต้องทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ K_p , K_i และ K_d ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการออกแบบและปรับแต่งตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยวิธี Ziegler – Nichols โดยออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่จุดการทำงานที่ 500, 1000 และ 1500 กิโลกรัม – แรง ในขั้นแรกค่าพารามิเตอร์ K_p , K_i และ K_d นี้ได้มาจากการจำลองในคอมพิวเตอร์และมีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองจากการทดลองจริงในระบบเครื่องกดอัดเม็ดยา



รูปที่ 3 ผลการตอบสนองของการออกแบบโดยวิธี Ziegler – Nichols

3.2 ระบบควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy logic Controller)

ตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือถูกแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย ฟัซซี่ฟิเคชัน (Fuzzification) กฎการควบคุม (Rule base) และ ดีฟัซซี่ฟิเคชัน (Defuzzification) โดยแรงกด (*output*, $y(t)$) จะถูกตรวจวัดโดยตัวรับรู้แรง (Load cell) ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (Error, $e(t)$) ถูกนิยามในเป็นความแตกต่างระหว่างแรงกดที่ต้องการกับค่าที่ตรวจวัดได้ (แสดงในสมการที่ 2) และอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (Change of error, $de(t)$) ถูกนิยามในเป็นความแตกต่างระหว่างค่าสัญญาณของแรงกดในรอบปัจจุบัน (Current sample) กับ รอบที่ผ่านมา (Previous sample) (แสดงในสมการที่ 3)

$$e(k) = f_o(k) - f(k) \quad (2)$$

$$de(k) = f(k) - f(k-1) \quad (3)$$

โดยที่ $f(k)$ และ $f(k-1)$ เป็นค่าสัญญาณของแรงกดในรอบปัจจุบัน (Current sample) และ รอบที่ผ่านมา (Previous sample) $f_o(k)$ เป็นแรงกดที่ต้องการแบบสัญญาณขั้นบันได จากไดอะแกรมควบคุมในรูปที่ 4 ระบบควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือนี้มีลักษณะเหมือนกับตัวควบคุมแบบพีดี (PD Controller)

ตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือนี้ได้ออกแบบและปรับปรุงโดยพื้นฐานจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากข้อผิดพลาดของการสร้างแบบจำลอง ความไม่แน่นอนและความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบนั้น ตัวควบคุมนี้จึงถูกต้องปรับปรุงโดยการทดลองจริง

ในการออกแบบตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือนี้ได้เลือกใช้ ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (Error, $e(t)$) และ อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (Change of error, $de(t)$) เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุต โดยทั่วไปจำนวนสมาชิกใน

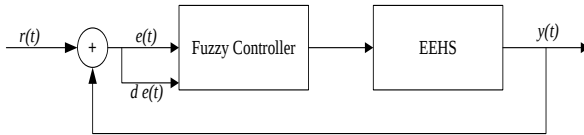
ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะประกอบด้วยสมาชิกประมาณ 3-7 สมาชิกต่อฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้จำนวนสมาชิกจำนวน 7 สมาชิกในแต่ละฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกอินพุตและเอาต์พุต (แสดงในรูปที่ 5 – 7) ในงานวิจัยนี้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (Error, $e(t)$) มีค่าระหว่าง -10 ถึง 10 โวลต์ เทียบเท่ากับ -5000 ถึง 5000 กิโลกรัม-แรง อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (Change of error, $de(t)$) มีค่าระหว่าง -2 ถึง 2 โวลต์ เทียบเท่ากับ -1000 ถึง 1000 กิโลกรัม-แรง และ เอาต์พุตสัญญาณควบคุม มีค่าระหว่าง -2 ถึง 2 โวลต์ โดยทั้งสามของสมาชิกจะเลือกใช้รูปแบบ Gaussian membership functions ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกขั้นแรกออกแบบโดยการจำลองในคอมพิวเตอร์จากนั้นปรับแต่งโดยการทดลองจริง

กฎการควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยชุดของภาษาศาสตร์ IF – THEN ของ 2 เหตุสำหรับค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวและอัตราความผิดพลาดในสถานะคงตัว และ 1 ผลสำหรับสัญญาณสั่งการ ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

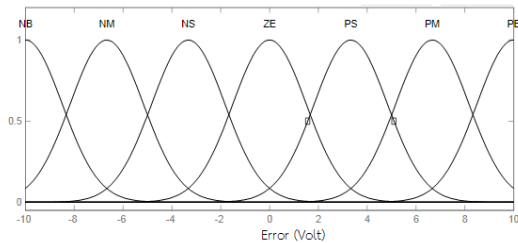
$$R_{ij} : \text{IF } e \text{ is } A_i \text{ and } de \text{ is } B_j \text{ THEN } Cl \text{ is } C_{ij}$$

เมื่อ A_i , B_j และ C_{ij} คือ ตัวแปรทางภาษาของค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (Error, $e(t)$), อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (Change of error, $de(t)$) และ สัญญาณการสั่งการตามลำดับ และ $1 \leq i, j \leq 7$. ดังนั้นกฎการควบคุมจะประกอบด้วยกฎจำนวนทั้งหมด 49 กฎเช่นเดียวกัน กฎการควบคุม ขั้นแรกออกแบบโดยการจำลองในคอมพิวเตอร์จากนั้นปรับแต่งโดยการทดลองจริง

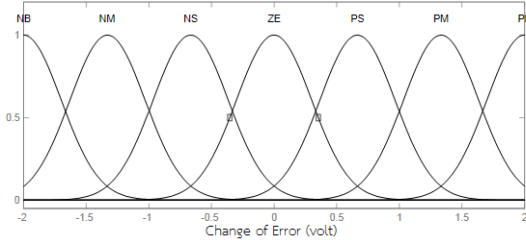
ในส่วนของ ดีฟัซซี่ฟิเคชัน (Defuzzification) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ วิธีการค่ากลางของพื้นที่ (Center of Area (COA) method) รูปที่ 8 แสดงภาพกราฟิกของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตของการออกแบบตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ



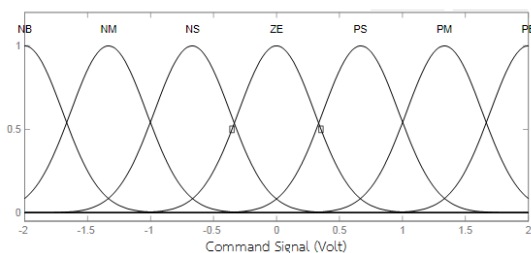
รูปที่ 4 แผนภาพแสดงระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ



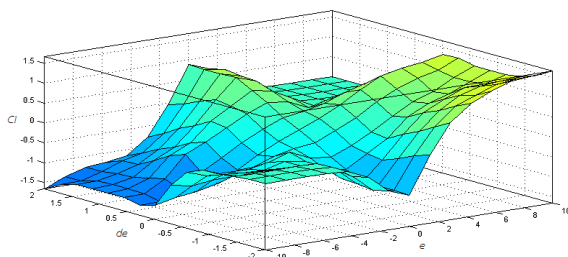
รูปที่ 5 แสดงฟังก์ชันสมาชิกของ $e(t)$



รูปที่ 6 แสดงฟังก์ชันสมาชิกของ $de(t)$



รูปที่ 7 แสดงฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต



รูปที่ 8 แสดงภาพกราฟิกของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุต

ตารางที่ 1 แสดงกฎการควบคุม

U	de							
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e	NB	ZE	ZE	ZE	NB	NM	NM	NB
	NM	ZE	ZE	ZE	NM	NS	NM	NM
	NS	ZE	ZE	ZE	NS	ZE	NS	NM
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	PS	PM	PS	ZE	PS	ZE	ZE	ZE
	PM	PB	PM	PS	PM	ZE	ZE	ZE
	PB	PB	PM	PM	PB	ZE	ZE	ZE

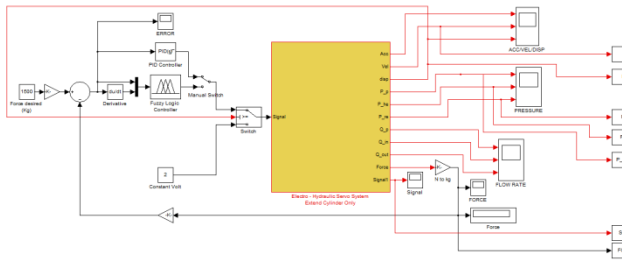
4. การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองเพื่อทดสอบความสามารถของระบบควบคุมทั้งสองแบบกระทำโดยการควบคุมแรงที่กระบอกสูบทดลองบนเม็ดยา โดยนำมาเปรียบเทียบกับทั้งสองระบบเพื่อประเมินหาระบบควบคุมที่ดีที่สุดที่จะนำมาใช้ในการควบคุมเครื่องอัดเม็ดยา โดยระบบควบคุมพีไอดีจะถูกปรับแต่งค่าเกณฑ์ให้มีผลการทดลองที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด

โปรแกรม MatLab/Simulink ถูกนำมาใช้เพื่อการจำลองในคอมพิวเตอร์ (แสดงในรูปที่ 9) สมการ bulk modulus ถูกนำมาพิจารณาเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบและระหว่างปั๊มกับวาล์ว อัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ผ่านวาล์วถูกพิจารณาโดยสมการการไหลผ่านช่องเปิด (orifice equation) ในการหาคำตอบของสมการในแบบจำลองในโปรแกรม MatLab/Simulink ได้ใช้ฟังก์ชัน ode45 based on Runge – Kutta and Dormand Prince Couple และ MATLAB Simulink Fuzzy Logic Toolbox ถูกนำมาใช้สำหรับการสร้างตัวควบคุมแบบตรรกะคลุมเครือ

การจำลองในคอมพิวเตอร์นั้นจะถูกนำมาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมทั้งสองแบบ และจะมีการปรับจูนตัวควบคุมในขั้นสุดท้ายในการทดลองจริงกับอุปกรณ์ ตัวควบคุมทั้งสองแบบถูกโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Labview ที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

ตัวควบคุมแบบพีไอดีจะถูกปรับจูนให้มีผลการตอบสนองที่ดีที่สุดสำหรับการควบคุมแรงในแต่ละแรงกดที่ต้องการ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในแต่ละแรงกดแสดงในตารางที่ 2 รูปที่10 - 12 แสดงผลการ



รูปที่ 9 แสดงไดอะแกรมการจำลองในคอมพิวเตอร์
โดยใช้โปรแกรม MatLab/Simulink

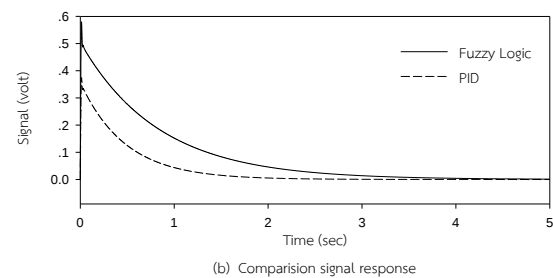
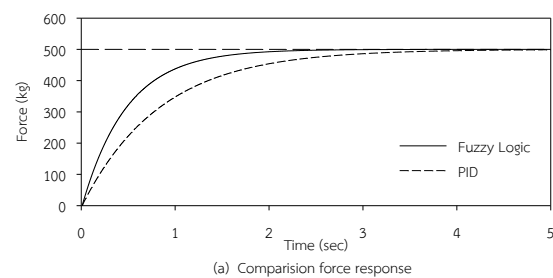
ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี
ในแต่ละแรงกดที่ต้องการ

แรงกด	500	1000	1500
K_p	0.0035	0.0018	0.0013
K_i	0.0002	0.00015	0.00015
K_d	0.00023	0.0002	0.00013

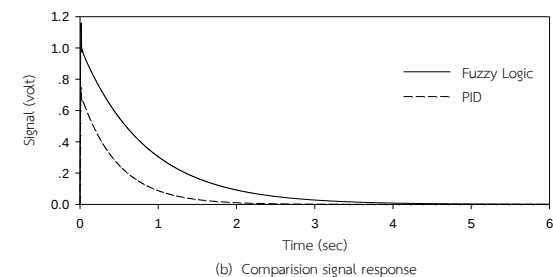
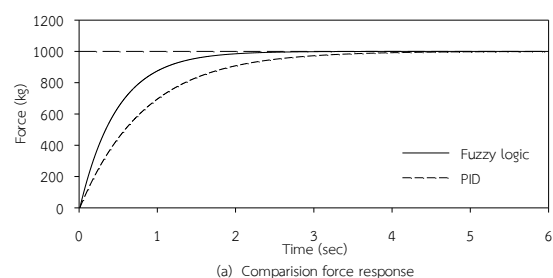
ตอบสนองของระบบเมื่อได้รับการติดตั้งตัวควบคุมทั้งแบบพีไอดีและตรรกะคลุมเครือที่แรงกดที่ต้องการที่ 500, 1000 และ 1500 กิโลกรัม-แรง ตามลำดับ ในรูป (a) ของรูปที่ 10 – 12 แสดงผลการตอบสนองของแรงกด และ รูป (b) ของรูปที่ 10 – 12 แสดงผลการตอบสนองของสัญญาณควบคุม การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุมทั้งสองแบบถูกแสดงในตารางที่ 3

ประสิทธิภาพของการเข้าสู่สถานะคงตัวของระบบที่ได้รับการติดตั้งตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบตรรกะคลุมเครือมีลักษณะคล้ายกัน ที่แรงกดที่ต้องการที่ 500 และ 1000 กิโลกรัม-แรง ตัวควบคุมแบบตรรกะคลุมเครือให้ค่าเวลาการเข้าสู่สถานะคงตัวเร็วกว่าค่าที่ออกแบบไว้ (ค่าที่ใช้ในการออกแบบคือ $T_s = 3.0 - 4.0$ วินาที) แต่แรงกดที่ต้องการที่ 500 และ 1000 กิโลกรัม-แรง ตัวควบคุมแบบพีไอดีให้ค่าเวลาการเข้าสู่สถานะคงตัวช้ากว่าค่าที่ออกแบบไว้ ตัวควบคุมแบบตรรกะคลุมเครือให้ค่าสัญญาณการสั่งการในตอนต้นสูงกว่าและค่าเวลา rise time ที่เร็วกว่าในทุกกรณี และในทุกกรณี ตัวควบคุมแบบตรรกะคลุมเครือให้ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวที่ต่ำกว่าเล็กน้อย

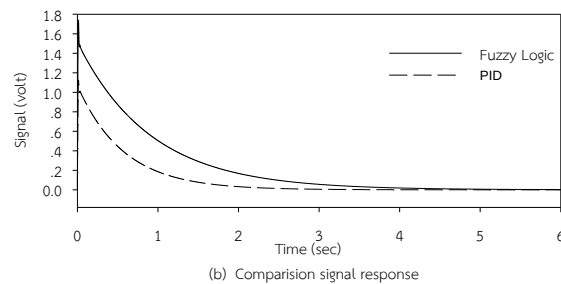
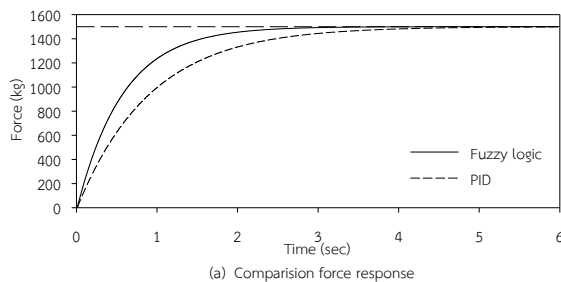
ตัวควบคุมแบบพีไอดีต้องได้รับการปรับแต่งในทุกการควบคุมแรงที่ต้องการ ในขณะที่ตัวควบคุมแบบตรรกะคลุมเครือนั้น จะมีช่วงการทำงานที่กว้างกว่าในงานวิจัยนี้ใช้ค่าการออกแบบและปรับจูนสำหรับเวลาการเข้าสู่สถานะคงตัวที่ 3.0 – 4.0 วินาที และถ้าต้องการเวลาการเข้าสู่สถานะคงตัวที่เวลาอื่นๆ ตัวควบคุมทั้งสองแบบนี้ต้องได้รับการออกแบบและปรับจูนใหม่



รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของ
ระบบที่แรงกดที่ 500 กิโลกรัม-แรง



รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของ
ระบบที่แรงกดที่ 1000 กิโลกรัม-แรง



รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบที่แรงกดที่ 1500 กิโลกรัม-แรง

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุมทั้งสองแบบ

500 kg-force desired pressing force			
Controller	Rise time (sec)	Settling time (sec)	Steady state error (kg-force)
Fuzzy	2	2.5	-2
PID	2.5	4	-2
1000 kg-force desired pressing force			
Fuzzy	2.3	2.8	-1.5
PID	4	4.5	-2
1500 kg-force desired pressing force			
Fuzzy	2	3	-2
PID	3.5	4.5	-3

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลอง พบว่า ระบบควบคุมทั้งสองแบบที่ถูกนำไปควบคุมเครื่องกดอัดเม็ดยา สามารถควบคุมแรงที่กดอัดลงบนเม็ดยาได้อย่างถูกต้องมีประสิทธิภาพตามความต้องการของระบบที่ได้รับการออกแบบไว้ แต่ระบบควบคุมแบบพีไอดียังต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในทุกแรงกดที่ต้องการ แต่ระบบควบคุมแบบตรรกะคลุมเครือนั้น

ช่วงการทำงานที่กว้างกว่าในการออกแบบและปรับแต่งตัวควบคุมในแต่ละครั้ง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Eryilmaz and B. H. Wilson. (2006). *Unified modeling and analysis of a proportional valve*, Journal of the Franklin Institute, vol. 343, January 2006, pp. 48-46.
- [2] Prakob S. (2003). *Mathematical modeling analysis of positional control system for hydraulic cylinder*, Engineering Journal Kasetsart, April 2003, vol. 49, pp. 92-107.
- [3] McCloy D. and Martin H.R. (1980). *Control of Fluid Power Analysis and Design*, Ellis Horwood, Chichester.
- [4] Becan R.M., Kuzucu A. and Kutlu K. (1998). *The realistic model and simulation of hydraulic position control systems*, Turk. J. Eng. Environ. Sci. vol. 22, March 1998, pp.125-130.
- [5] J. Yan, M. Ryan and J. Power. (1994). *Using fuzzy logic: Towards intelligent systems*, Prentice Hall International, Hertfordshire.
- [6] Y.M. Wang, G. Zhou and Sh. G. Wang. (2005). *Design and optimization of electro-hydraulic force servo system based on MATLAB*, Journal Mechanical Transmission, vol. 29(4), April 2005, pp. 46-49.
- [7] K. Edge, "The control of fluid power systems – responding to the future", Proc. of Instn. Mech. Engrs., Part I, Vol. 211, pp. 91-110, 1997.
- [8] Q. Zhang, D. Meinhold, and J. Krone, "Valve Transform Fuzzy Tuning Algorithm for Open-centre Electro-hydraulic Systems", Journal of Agric. Engng. Res. Vol73 331-339, 1999.
- [9] P. Branco and J. Dente, "Design of an electro-hydraulic system using neuro-fuzzy Techniques", Fusion of Neural Networks, Fuzzy Sets & Genetic

Algorithms: Industrial Applications, Chapter 4,
CRC Press, 1999

[10] B. Nicoaus and H. Kiendl, "Evolutionary optimization of industrial hydraulic valve with the help of a fuzzy performance-index", 10th Conference on Fuzzy Systems, December 2001, Melbourne, Australia.

[11] สัญญา มิตรเอม, "หลักการเบื้องต้นของระบบควบคุมแบบฟัซซี่, วารสารสมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย, vol1, no1, pp. 5-22, มีนาคม 2544