

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวที่เหมาะสมสำหรับระบบควบคุมกระบวนการความดัน
ด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้

Optimal SIRM Fuzzy Controller Design for Pressure Process Control System
via Flower Pollination Algorithm

ณธรรม เกิดสำอางค์¹ ชีรยุทธ จันทร์แจ่ม¹ สุธี รุกขพันธุ์² และ เจริญชาย สมประชา²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

1761 ถนนพัฒนาการ แขวงพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250 E-mail: nathum.koe@kbu.ac.th

²สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

96 หมู่ 3 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170 E-mail: suthee.ruk@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวที่เหมาะสมสำหรับระบบควบคุมกระบวนการความดัน ด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ (flower pollination algorithm, FPA) การออกแบบตัวควบคุมนั้นจะประยุกต์ให้เป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข วิธี FPA ได้ทำการหาผลเฉลยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของของค่าระดับความสำคัญพลวัต เพื่อให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุดในส่วนการเฝ้าติดตามค่าเป้าหมายและส่วนการคุมค่าการรบกวน

คำสำคัญ: ตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียว, ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้, ค่าระดับความสำคัญพลวัต

Abstract

This article presents the optimal SIRM fuzzy controller design for pressure process control system via flower pollination algorithm (FPA). The design of the proposed controller is based on the constraint optimization problem. The FPA can find the optimal parameters of the dynamic importance degree (DID) in controller for minimizing the objective function under inequality constraints. As simulation results, the SIRM fuzzy controller designed by the FPA gives a better performance than the conventional fuzzy logic controller in both command-tracking and disturbance-regulating.

Keywords: SIRM fuzzy controller, flower pollination algorithm, dynamic importance degree

1. บทนำ

ในงานอุตสาหกรรมสมัยใหม่ที่มีความซับซ้อนสูง จำเป็นต้องมีการพัฒนาระบบควบคุมแบบใหม่ๆ เพื่อควบคุมระบบที่มีความซับซ้อน ความไม่แน่นอนและความไม่เป็นเชิงเส้น การควบคุมฟัซซี่ลอจิก (fuzzy logic control) เป็นหนึ่งในวิธีการด้านปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence) ซึ่งมาจากแนวคิดของ Lotfi A. Zadeh วิธีการนี้จะอาศัยความรู้และประสบการณ์ของมนุษย์เป็นพื้นฐานในการควบคุม ไม่จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำของระบบในการออกแบบตัวควบคุม ทำให้ประยุกต์กับระบบที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1] อย่างไรก็ตามจำนวนกฎฟัซซี่จะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโพเนนเชียลตามจำนวนอินพุตของฟัซซี่ ทำให้ยากต่อการกำหนดกฎฟัซซี่แต่ละกฎ

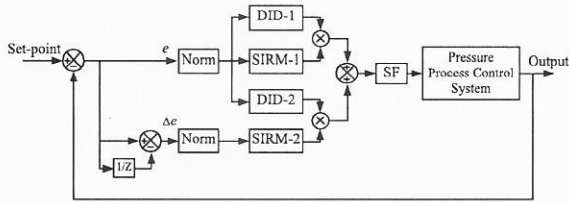
ตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียว (single input rule model, SIRM) จะใช้เพียงหนึ่งอินพุตในการสร้างกฎฟัซซี่ ทำให้สามารถลดจำนวนกฎควบคุมฟัซซี่และช่วยในการกำหนดกฎฟัซซี่ได้ง่ายขึ้น [2] อย่างไรก็ตามตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวต้องอาศัย ค่าระดับความสำคัญพลวัต (dynamic importance degree, DID) ใช้บ่งชี้ความสำคัญอินพุตแต่ละตัว ซึ่งค่าระดับความสำคัญพลวัตที่เหมาะสม จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวที่เหมาะสมสำหรับระบบควบคุมกระบวนการความดัน ด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการศึกษานี้ที่มีประสิทธิภาพสูง [3] ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมนั้นได้พิจารณาให้เป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไข (constraint optimization problem) โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นผลรวมค่าความผิดพลาดสมบูรณัระหว่างค่าเป้าหมายและสัญญาณเอาต์พุตของระบบ FPAทำการหาผลเฉลยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในค่าระดับความสำคัญพลวัต เพื่อให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุดในส่วนการเฝ้าติดตามค่าเป้าหมายและทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟัซซี่แบบดั้งเดิม



2. วงรอบควบคุมแบบฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียว

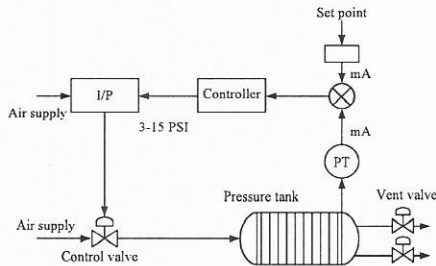
ระบบควบคุมแบบป้อนกลับของระบบควบคุมกระบวนการความดันด้วยตัวควบคุมแบบฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียวแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงรอบควบคุมแบบฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียว

2.1 ระบบควบคุมกระบวนการความดัน

ระบบควบคุมกระบวนการความดันแสดงดังรูปที่ 2 โครงสร้างของระบบประกอบด้วย หน่วยจ่ายลม เพรสเซอร์ทรานสมิตเตอร์ ตัวเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน วาล์วควบคุม ตัวควบคุม และอุปกรณ์อื่นๆ ความดันในถังจะถูกวัดด้วยเพรสเซอร์ทรานสมิตเตอร์และส่งให้ตัวควบคุม ตัวควบคุมจะประมวลผลและส่งสัญญาณควบคุมไปที่ตัวเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันเพื่อควบคุมตำแหน่งวาล์วควบคุม ให้ได้ค่าความดันในถังที่ต้องการตามค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้



รูปที่ 2 แบบไดอะแกรมแผนผังของระบบควบคุมกระบวนการความดัน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมกระบวนการความดันได้ถูกแสดงฟังก์ชันถ่ายโอน ระบบอันดับหนึ่งแบบประวิงเวลา (first-order plus delay time) ดังแสดงในสมการที่ (1) [4] โดยที่ K คือ อัตราขยายระบบ τ คือ ค่าคงตัวทางเวลา และ τ_d คือ ค่าประวิงเวลา

$$G_p(s) = \frac{Ke^{-\tau_d s}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

2.2 ตัวควบคุมฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียว

ฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียว จะนำเพียงอินพุต 1 ตัวแปรมาจัดวางไว้ในส่วนเงื่อนไข (antecedent) ของกฎฟuzzy วิธีการนี้จำนวนกฎฟuzzyลดลง ซึ่งการกำหนดกฎฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียวสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2) โดยที่ $SIRM-i$ คือ SIRM ของอินพุตที่ i , R_j^i คือกฎที่ j ใน $SIRM-i$, x_i คืออินพุตที่ i ในส่วนเงื่อนไขของกฎ, y_i คือเอาต์พุตที่ i ในส่วนผลลัพธ์ของกฎ, A_j^i คือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ x_i ในส่วนเงื่อนไขของกฎที่ j

ของ $SIRM-i$, C_j^i คือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ y_i ในส่วนผลลัพธ์ของกฎที่ j ของ $SIRM-i$, $i=1,2,\dots$ คืออินพุตของ SIRM และ $j=1,2,\dots,m$ คือจำนวนกฎในแต่ละ $SIRM-i$, [2]

$$SIRM - i : \{R_j^i : \text{if } x_i = A_j^i \text{ then } y_i = C_j^i\}_{j=1}^{m_i} \quad (2)$$

ในการอนุมานฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียวของแต่ละอินพุต ผลการอนุมานสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3) และ (4) โดยที่ h_j^i คือค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุต x_i ในฟuzzyเซต A_j^i

$$h_j^i = A_j^i(x_i) \quad (3)$$

$$y_i^0 = \frac{\sum_{k=1}^{m_i} h_k^i \cdot c_k^i}{\sum_{k=1}^{m_i} h_k^i} \quad (4)$$

ค่าระดับความสำคัญพลวัต เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในตัวควบคุมฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียว ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความสำคัญของอินพุตแต่ละตัว ในการหาค่าระดับความสำคัญพลวัตสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5) โดยที่ w_i คือค่าฐาน (base value) และ B_i คือค่าขยาย (breadth value) [2]

$$w_i^D = w_i + B_i \cdot x_i \quad (5)$$

ดังนั้นสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียวเกิดจากการรวมกันของผลคูณ ระหว่างการอนุมานฟuzzyและค่าระดับความสำคัญพลวัตของอินพุตแต่ละตัว ดังแสดงในสมการที่ (6) [2]

$$y = \sum_{i=1}^n w_i^D \cdot y_i^0 \quad (6)$$

3. ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้

ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ นั้นเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดวิธีหนึ่งที่ได้แรงบันดาลใจมาจากการผสมเกสรดอกไม้ถูกพัฒนาโดย Xin-She Yang [3] ขั้นตอนการหาผลเฉลยด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้แสดงดังรูปที่ 3 เริ่มต้มนด้วยการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$, กำหนดจำนวนเกสรดอกไม้ (ผลเฉลย) และกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการสับเปลี่ยน (switch probability) $p \in [0, 1]$ เพื่อใช้สำหรับการเลือกรูปแบบการผสมเกสร ถ้าค่าที่สุ่มได้น้อยกว่า p เป็นจริง การค้นหาผลเฉลยใหม่ในกรณีนี้ใช้การผสมเกสรแบบวงกว้างตามสมการที่ (7) โดยที่ x_i^t คือผลเฉลยที่เวลา t , L คือค่าสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเลวี (Lévy distribution) และ g^* คือผลเฉลยที่ดีที่สุดที่ถูกรับ [3]

$$x_i^{t+1} = x_i^t + L(g^* - x_i^t) \quad (7)$$

แต่ค่าที่สุ่มได้น้อยกว่า p เป็นเท็จ การค้นหาผลเฉลยใหม่ใช้การผสมเกสรแบบเฉพาะที่ตามสมการที่ (8) โดยที่ x_j และ x_k คือ 2 ค่าผล

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



ผลที่ได้จากการสุ่มจากกลุ่มประชากรเดียวกับ x_i และ ϵ คือค่าสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป (uniform distribution)[3]

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \epsilon(x_j^t - x_k^t) \quad (8)$$

จากนั้นประเมินผลเฉลยใหม่และผลเฉลยผลเฉลยที่ดีที่สุด g^* ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ ผลเฉลยผลเฉลยที่ดีที่สุด g^* จะถูกปรับค่าใหม่ด้วยผลเฉลยที่ดีกว่า กระบวนการค้นหาจะดำเนินไปจนกว่าเกณฑ์สิ้นสุดการค้นหาเป็นจริง [3]

```

begin
Objective min or max f(x) of solution x = (x1, ..., xn)
Initial a population of n flower/pollen gametes with random solutions
Find the best solution g* in initial population
Define a switch probability p ∈ [0,1]
while (Gen < Max_Gen) or (stop criterion)
for i = 1:n (all n flowers in the population)
if rand < p,
Draw a (d-dimensional) step vector L which obey a Lévy distribution
Global pollination via (7)
else
Draw ε from a uniform distribution in [0,1]
Randomly choose j and k among all the solutions
Local pollination via (8)
end if
Evaluate new solutions
If new solutions are better, update them in the population
end for
Find the current best solution g*
end while
end
    
```

รูปที่ 3 ขั้นตอนการหาผลเฉลยด้วยวิธีการผสมเกสรดอกไม้ [3]

4. การออกแบบตัวควบคุม SIRM และผลการจำลอง

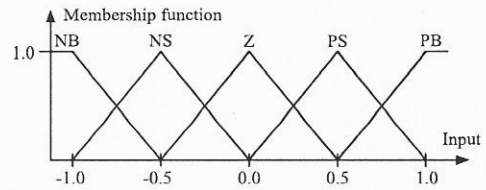
การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียวสำหรับระบบควบคุมกระบวนการความดัน โดยบทความนี้จะใช้ 2 ตัวแปรเป็นอินพุตให้ SIRM คือ ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าเป้าหมายและค่าความดันเอาต์พุต (x_1) และค่าความเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด (x_2)

4.1 การกำหนดกฎฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียว

การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตแต่ละตัวใน SIRM แสดงดังรูปที่ 4 ประกอบด้วย 5 ฟuzzyเซต NB(Negative Big) NS(Negative Small) Z(Zero) PS(Positive Small) และ PB(Positive Big) ส่วนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตกำหนดเป็นจำนวนจริงเดี่ยว (Singleton) การกำหนดกฎฟuzzyที่สามารถแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งมีกฎฟuzzyทั้งหมด 10 กฎ

ตารางที่ 1 กฎฟuzzyใน SIRM

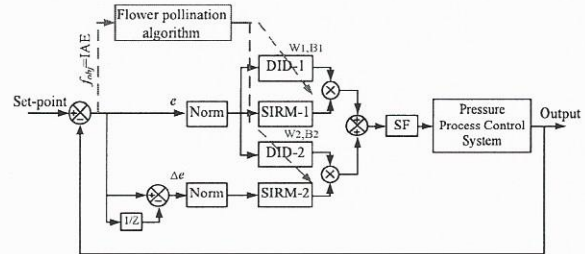
ตัวแปรอินพุต $x_i(i=1,2)$	ตัวแปรเอาต์พุต $y_i(i=1,2)$
NB	-1.0
NS	-0.5
Z	0.0
PS	0.5
PB	1.0



รูปที่ 4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตแต่ละตัวใน SIRM

4.2 การออกแบบค่าระดับความสำคัญพลวัตที่เหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้

การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียวที่เหมาะสมด้วย FPA แสดงดังรูปที่ 5 โดยปัญหาการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียวให้เป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไข แสดงในสมการที่ (9)



รูปที่ 5 การออกแบบฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียวที่เหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } f_{obj}(W_1, B_1, W_2, B_2) = \sum_{i=1}^N |R_i - C_i| \\
 & \text{subject to } t_r \leq 2.0s, \quad M_p \leq 10\%, \\
 & \quad t_s \leq 4.0s, \quad e_{ss} < 1\%, \\
 & \quad 0.01 < W_1 \leq 5.0, \quad 0.01 < B_1 \leq 5.0, \\
 & \quad 0.01 < W_2 \leq 2.0, \quad 0.01 < B_2 \leq 2.0
 \end{aligned} \quad (9)$$

จากสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_{obj} กำหนดให้เป็นผลรวมค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ (IAE) ระหว่างค่าเป้าหมาย (R) กับค่าความดันเอาต์พุต (C) ภายใต้เงื่อนไขของสมการประกอบด้วย เวลาขึ้น (rise time: t_r), การพุ่งเกินสูงสุด (maximum overshoot: M_p), เวลาเข้าที่ (settling time: t_s) และ ความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (steady-state error: e_{ss}) FPA จะค้นหาค่าพารามิเตอร์ W_1 และ B_1 ใน DID-1 และค่าพารามิเตอร์ W_2 และ B_2 ใน DID-2 ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดให้เป็นปริภูมิการค้นหาเพื่อทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_{obj} มีค่าน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขการออกแบบ

4.3 ผลการจำลอง

การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyชนิดกฎอินพุตเดียวที่เหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีของ FPA สำหรับระบบควบคุมกระบวนการความดันได้รับการพัฒนาให้เป็นโปรแกรมการค้นหาด้วย MATLAB ในส่วนของค่าพารามิเตอร์ของ FPA นั้นกำหนดตามคำแนะนำของ Xin-She Yang [3] จำนวนเกสรดอกไม้ $n = 25$, ค่าความน่าจะเป็นในการปรับเปลี่ยนระหว่าง

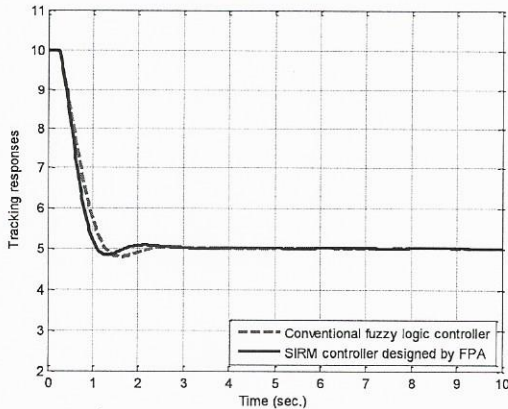


การผสมเกสรแบบวงกว้างและการผสมเกสรแบบเฉพาะที่ $p = 0.8$ จำนวนรอบการค้นหาสูงสุด $Max_Gen = 1000$ สำหรับการค้นหาผลเฉลย และยังได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวที่ออกแบบกับตัวควบคุมฟัซซี่แบบดั้งเดิมซึ่งมีกฎฟัซซี่ 25 กฎ

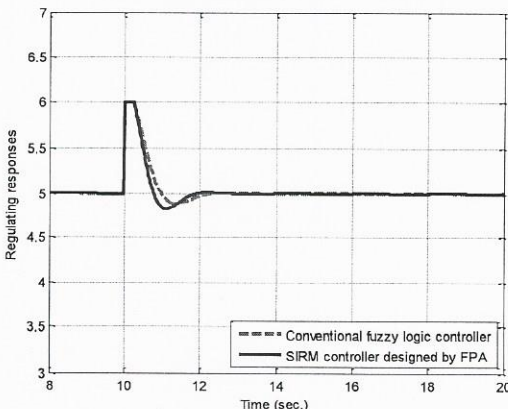
โดยพลานต์ภายใต้ตัวควบคุมคือ ชุดฝึกปฏิบัติการระบบควบคุมกระบวนการความดันของ บริษัท Feedback Instrument จำกัด ระบบดังกล่าวได้รับการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในสมการที่ (10)

$$G_p(s) = \frac{-3.601e^{-0.25s}}{0.54s+1} \quad (10)$$

การหาผลเฉลยด้วย FPA ในปัญหาการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวที่เหมาะสมสำหรับระบบควบคุมกระบวนการความดัน สามารถรู้ค่าหาผลเฉลยที่ $W_1 = 0.6586$, $B_1 = 0.2355$, $W_2 = 0.5992$ และ $B_2 = 0.2869$ ตามลำดับ



รูปที่ 6 ผลตอบสนองการเฝ้าติดตามค่าเป้าหมาย



รูปที่ 7 ผลตอบสนองการคุมค่าการรบกวน

ผลตอบสนองการเฝ้าติดตามค่าเป้าหมายของระบบกระบวนการความดันที่ค่าเป้าหมาย 5 Psi ซึ่งถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซี่แบบดั้งเดิม และตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวที่ออกแบบด้วย

FPA แสดงดังรูปที่ 6 ในกรณีระบบมีตัวควบคุมฟัซซี่แบบดั้งเดิม พบว่าผลตอบสนองวงจรรีบเข้าสู่ค่าเป้าหมาย มีค่า $t_r = 1.0$ s, $M_p = 3.60\%$, $t_s = 2.3$ s และ $e_{ss} = 0.00\%$ และเมื่อพิจารณาในกรณีระบบมีตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวที่ออกแบบด้วย FPA พบว่าผลตอบสนองในการแปรตามคำสั่งจะมีค่า $t_r = 0.92$ s, $M_p = 2.00\%$, $t_s = 2.0$ s และ $e_{ss} = 0.00\%$ ซึ่งพบว่าผลตอบสนองการเฝ้าติดตามค่าเป้าหมายของระบบภายใต้ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวที่ออกแบบด้วย FPA ที่ได้จากการออกแบบสอดคล้องปัญหาที่เหมาะสม ในสมการที่ (9) ยิ่งกว่านั้นพบว่าตัวควบคุมที่ออกแบบ สามารถให้ค่า t_r , M_p และ t_s ที่น้อยกว่าตัวควบคุมฟัซซี่แบบดั้งเดิม

รูปที่ 7 แสดงผลตอบสนองการคุมค่าการรบกวนของระบบกระบวนการความดันรบกวนที่ 1 Psi ซึ่งถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซี่แบบดั้งเดิม และตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวที่ออกแบบด้วย FPA พบว่าผลตอบสนองในการแปรตามคำสั่งจะมีค่าเวลาเข้าที่ของการคุมค่าการรบกวน มีค่า 1.9 s และ 1.7 s ตามลำดับ แสดงให้เห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวที่ออกแบบด้วย FPA สามารถให้เวลาเข้าที่ของการคุมค่าการรบกวนเร็วกว่าตัวควบคุมฟัซซี่แบบดั้งเดิม

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวที่เหมาะสมสำหรับระบบควบคุมกระบวนการความดันด้วย FPA ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมจะถูกกำหนดบนปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข แล้ว FPA จะให้ประสิทธิภาพในการค้นหาผลเฉลยของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของค่าระดับความสำคัญพลวัต จากผลการจำลองผลตอบสนองการเฝ้าติดตามค่าเป้าหมายและการคุมค่าการรบกวนของระบบกระบวนการความดัน พบว่าตัวฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวที่เหมาะสมที่มีกฎฟัซซี่ 10 กฎ สามารถให้สมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมฟัซซี่แบบดั้งเดิมที่มีกฎฟัซซี่ 25 กฎ

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรัตน์ ขวัญอ่อน, ธนดชชัย กุลวรรณิขพงษ์ และสรวิณี สุจิตจร การสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกคัมผผันด้วยตัวควบคุมนิโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยว, *วารสารสงขลานครินทร์ วทท.*, 27(1), 101-121, 2548.
- [2] J. Yi, and N. Yubazaki, "Stabilization fuzzy control of inverted pendulum systems," *Artificial Intelligent in Engineering*, pp.153-163, 2000.
- [3] X. S. Yang, *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, Elsevier Inc, 2014.
- [4] N. Kanagaraj, M. Al-Dhaifalla and K. S. Nisar, "Design of intelligent fuzzy fractional-order PID controller for pressure control application," *in Proc. 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies*, pp. 525-530, 2017.