

การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกร่วมกับตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้
สำหรับระบบควบคุมกระบวนการอุณหภูมิแบบการพา

Application of Fuzzy Logic Controller with Adaptive Integral Control Action for
Convection Temperature Process Control System

ยงยุทธ์ พัฒนพงศ์* และ ชัชวาล พรพัฒน์กุล

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
833 ถนนพระราม 1 เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 E-mail: yongyut@pit.ac.th

Yongyut Pattanapong* and Chatchaval Pornpatkul

Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering,
Pathumwan Institute of Technology

833 Rama I Road, Pathumwan, Bangkok 10330, THAILAND. E-mail: yongyut@pit.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกร่วมกับตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้สำหรับระบบควบคุมกระบวนการอุณหภูมิแบบการพา ตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก อัตราการขยายตัวควบคุมอินทิกรัลเป็นฟังก์ชันสมการเส้นตรง ซึ่งจะแปรผันตรงตามค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิ ผลจากการทดสอบตัวควบคุมพิสูจน์ได้ว่า ตัวควบคุมดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบควบคุมกระบวนการอุณหภูมิได้ดี มีช่วงเวลาไต่ขึ้น (rise time) ที่เร็วกว่าตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก อีกทั้งยังรักษาเสถียรภาพของระบบในสภาวะคงตัวได้ดี มีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวของอุณหภูมิไม่เกินค่าขอบเขตซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ $\pm 2\%$ และได้ผลลัพธ์อย่างเป็นที่น่าพอใจ

คำสำคัญ: การควบคุมอุณหภูมิ, ฟัซซี่ลอจิก, ตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้

Abstract

This paper aims to apply fuzzy logic controller with adaptive integral control action based on convection temperature process control system. The adaptive integral controller was used for enhancing the fuzzy logic controller. The integral gain is the linear equation form which varies directly with the temperature error value. The experimental results of controller performance confirmed that the use of

the fuzzy logic controller with adaptive integral control action can enhance performance of temperature process control system as the rise time of the integrated controller is faster than that of the conventional fuzzy logic controller and maintain the stability of control system satisfactorily with the steady state error of $\pm 2\%$.

Keywords: Temperature Process Control, Fuzzy Logic, Adaptive Integral Controller

1. บทนำ

ระบบควบคุมกระบวนการอุณหภูมิแบบการพาเป็นระบบหนึ่งที่พบเห็นกันอย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านอุตสาหกรรม ด้านการแพทย์ หรือแม้แต่ด้านเกษตรกรรม ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการอบวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ โรงเรือนเพาะพันธุ์พืช โรงเรือนเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น จากที่ได้กล่าวมาพบว่า ระบบควบคุมกระบวนการอุณหภูมิแบบการพาเป็นระบบควบคุมกระบวนการขั้นพื้นฐานแบบหนึ่ง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วระบบกระบวนการอุณหภูมิส่วนใหญ่เป็นระบบอันดับหนึ่งหรืออาจจะเป็นระบบอันดับสูงก็ได้ และแน่นอนว่าระบบดังกล่าวจะมีผลตอบสนองไวเวลาร่วมอยู่ด้วย ตัวควบคุมพีไอดีเป็นตัวควบคุมชนิดหนึ่งที่ถูกเลือกนำมาใช้แก้ปัญหาคอมพิวเตอร์ควบคุมกระบวนการอุณหภูมิ [1, 2] เป็นอันดับต้น ๆ เนื่องจากตัวควบคุมพีไอดีเป็นตัวควบคุมเชิงเส้น การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไม่ซับซ้อน และแม้ว่าการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์จะมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน [3, 4] แต่ก็ยังขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบนั้น ๆ ยิ่งถ้าระบบมีความไม่มีความเป็นเชิงเส้น การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ก็ยิ่งเพิ่มความซับซ้อนและกระทำได้ยากเช่นเดียวกัน

เป็นระยะเวลากว่า 50 ปีที่ตัวควบคุมพีซีลอจิกยังคงได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาในระบบควบคุมกระบวนการอุณหภูมิ เนื่องจากตัวควบคุมพีซีลอจิกมีจุดเด่นตรงที่ไม่จำเป็นต้องมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และมีความเหมาะสมกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการอุณหภูมิสำหรับเตาอบและเครื่องฟอกไข่ พบว่าตัวควบคุมพีซีลอจิกมีช่วงเวลาที่ไต่ขึ้น (rise time) ของอุณหภูมิที่รวดเร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี [5, 6] Dong และคณะ [7] ได้นำเสนอวิธีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีด้วยพีซีลอจิก โดยทดสอบกับระบบควบคุมกระบวนการอุณหภูมิสำหรับเตาหลอม เนื่องจากระบบดังกล่าวมีข้อจำกัดในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ผลจากการทดสอบพบว่า ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (overshoot) น้อยกว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีเพียงอย่างเดียว Zhen และ Yan [8] ได้นำเสนอวิธีการดังกล่าวร่วมกับกระบวนการอุณหภูมิสำหรับเครื่องฉีดพลาสติก จากการทดสอบพบว่า ตัวควบคุมพีไอดีที่มีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยพีซีลอจิกมีผลตอบสนองที่ทนต่อการถูกรบกวนในสภาวะคงตัวได้ดีกว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวและเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินมีค่าที่น้อย แต่ระบบควบคุมยังมีข้อจำกัด อาทิเช่น เมื่อใดก็ตามที่ระบบถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อม การรักษาเสถียรภาพของระบบให้ผลลัพธ์ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ อีกทั้งการปรับแต่ง

ระบบฐานกฎของฟuzzyลอจิกกระทำไ้ยากเพราะต้องอาศัยประสบการณ์หรือความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน เช่นเดียวกัน Pattanapong และ Deelertpaiboon [9] ได้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกร่วมกับตัวควบคุม อินทิกรัลแบบปรับตัวได้ เพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดและลดระยะเวลาสำหรับการปรับแต่งระบบฐานกฎของฟuzzy ลอจิก โดยอัลกอริทึมนี้ถูกทดสอบกับระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนแผ่นระนาบ ผลการทดสอบพบว่าในด้านการรักษาเสถียรภาพและการลดค่าความผิดพลาดในระบบที่เกิดขึ้นได้ผลลัพธ์อย่างเป็นที่น่าพอใจ ทั้งนี้แนวคิด ดังกล่าวมาพบว่ายังไม่มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการอุณหภูมิแบบการพาแต่อย่างไร

งานวิจัยนี้จึงได้นำแนวคิดการควบคุมระบบโดยใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกร่วมกับตัวควบคุมอินทิกรัลแบบ ปรับตัวได้มาทดสอบกับระบบควบคุมกระบวนการอุณหภูมิ เนื่องจากหลักการดังกล่าวง่ายต่อการออกแบบตัว ควบคุม อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มขีดความสามารถของตัวควบคุมในการรักษาเสถียรภาพของระบบในสภาวะคงตัวอีก ด้วย ทั้งนี้การทดสอบแนวคิดการควบคุมดังกล่าวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับการควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก เพียงเดียว โดยมีผลการทดสอบผลตอบสนองของอุณหภูมิ เพื่อยืนยันความถูกต้องของหลักการที่ได้นำเสนอ

2. โครงสร้างของชุดกระบวนการควบคุมอุณหภูมิแบบการพา

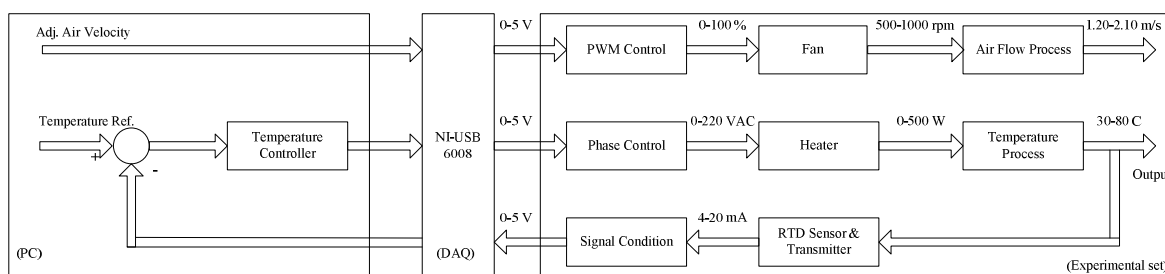
ในหัวข้อนี้เป็นการออกแบบและสร้างชุดกระบวนการควบคุมอุณหภูมิแบบการพา โดยจะอธิบาย รายละเอียดของของโครงสร้างพอสังเขปได้ดังนี้



รูปที่ 1 ชุดทดลองกระบวนการควบคุมอุณหภูมิแบบการพา

ชุดกระบวนการควบคุมอุณหภูมิแบบการพาถูกออกแบบและสร้างขึ้น มีลักษณะเป็นท่ออะคริลิกโปร่งใส รูปทรงสี่เหลี่ยม เพื่อใช้เป็นทางเดินของการส่งผ่านความร้อน ภายในของชุดโครงสร้างประกอบไปด้วยขดลวดความต้านทานสูงขนาด 500 วัตต์ ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน โดยปริมาณความร้อนที่กำเนิดขึ้นจะถูกควบคุม ด้วยวงจรควบคุมเฟสไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิ เลือกใช้ตัว

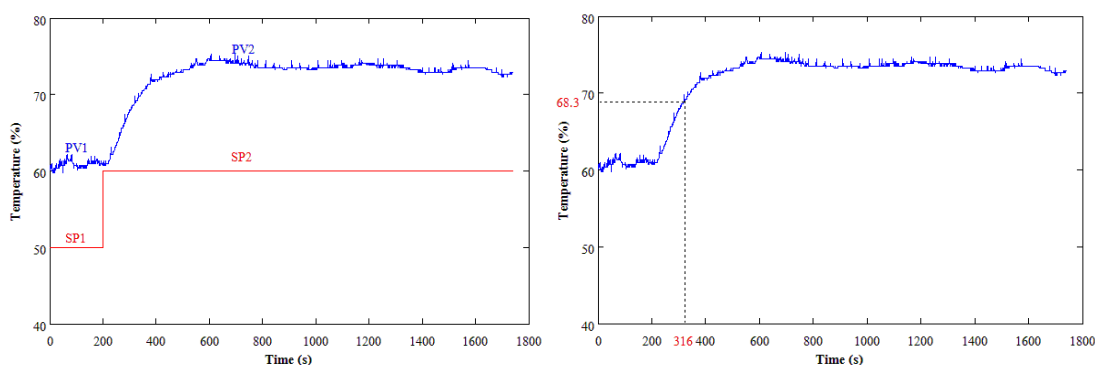
ด้านทานแปรเปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิแบบเชิงเส้น ซึ่งต่อร่วมกับอุปกรณ์ทรานสมิตเตอร์แล้วผ่านวงจรแปลงสภาพสัญญาณ 0-5 โวลต์ การเคลื่อนตัวของลมร้อนจะใช้พัดลมไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับความเร็วลมได้เป็นตัวขับเคลื่อน ส่วนถัดมาผู้วิจัยได้นำโฟโตเซนเซอร์มาประยุกต์ใช้ในการวัดความเร็วของลมร้อนโดยเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับไฟโรมิเตอร์ ในส่วนสุดท้าย การติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์กับชุดทดลองกระบวนการอุณหภูมิแบบการพาถูกเชื่อมโยงผ่านอุปกรณ์ DAQ (Data Acquisition) และใช้โปรแกรมการวัดและควบคุมเสมือน [10] ในการควบคุมและแสดงผล เพื่อใช้สำหรับทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม สำหรับโครงสร้างไดอะแกรมการเชื่อมโยงของชุดควบคุมกระบวนการอุณหภูมิแบบการพาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ไดอะแกรมการเชื่อมโยงของชุดควบคุมกระบวนการควบคุมอุณหภูมิแบบการพา

3. การออกแบบตัวควบคุมพีซีลอจิกร่วมกับตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้

โดยทั่วไปแล้วการออกแบบระบบควบคุมนั้นจำเป็นที่จะต้องทราบช่วงของการควบคุมเพื่อที่จะได้กำหนดจุดทำงานของระบบควบคุมแล้วจึงทำการออกแบบตัวควบคุม สำหรับระบบควบคุมกระบวนการอุณหภูมิแบบการพา นี้ ได้กำหนดจุดทำงานไว้ที่ 50 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากพบว่าเป็นจุดทำงานที่มีอัตราการขยายของระบบมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงอื่น ๆ ดังนั้นเราสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายด้วยวิธีการทดสอบผลตอบสนองแบบลูเปิด [11] เพื่อให้ได้มาซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ แล้วนำมาเขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมในลำดับถัดไป



รูปที่ 3 ผลตอบสนองแบบลูเปิดของระบบควบคุมกระบวนการอุณหภูมิแบบการพา

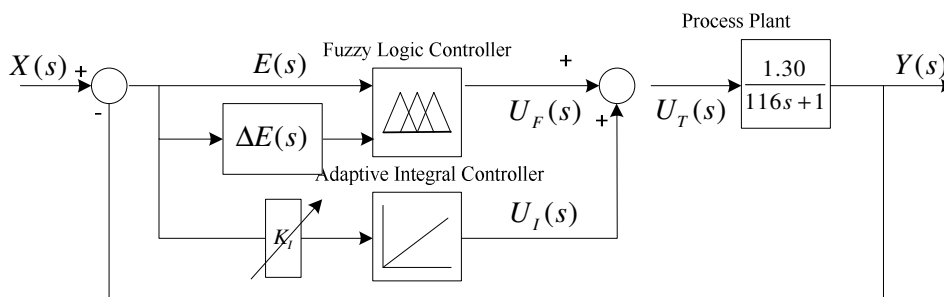
จากผลการทดสอบการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งประมาณได้ว่าระบบควบคุมกระบวนการอุณหภูมินี้เป็นระบบอันดับหนึ่งและมีผลตอบสนองไ่วเวลาพร้อมอยู่ จากนั้นนำมาเขียนเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบได้ดังนี้

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1.30e^{-15s}}{116s+1} \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) พบว่าค่าผลตอบสนองไ่วเวลามีค่าน้อยมาก ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ เพราะฉะนั้นจะไม่ขอพิจารณาผลตอบสนองไ่วเวลา ดังนั้นสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบใหม่ได้เป็น

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1.30}{116s+1} \quad (2)$$

สำหรับโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมดังแสดงในรูปที่ 4 อธิบายได้ว่าสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้จะถูกนำมาพร้อมกับสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก เพื่อเป็นการปรับแต่งสัญญาณควบคุมสำหรับลดค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะที่ระบบอยู่ในสภาวะคงตัว



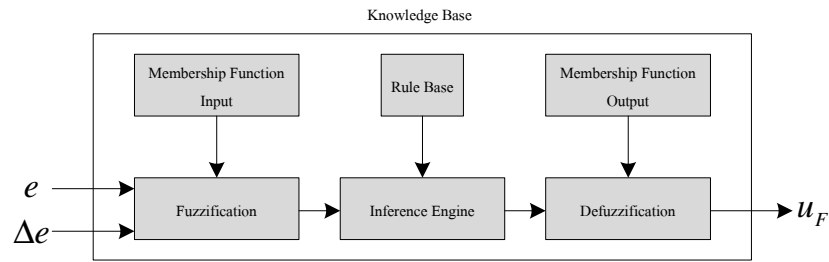
รูปที่ 4 โครงสร้างของระบบควบคุมกระบวนการอุณหภูมิแบบการพา

3.1 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

ปีคริสต์ศักราช 1965 ทฤษฎีฟัซซีลอจิกถูกกล่าวขึ้นครั้งแรกโดย Zadeh [12] หลังจากนั้นฟัซซีลอจิกถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือสำหรับวิศวกรเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาสำหรับระบบควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากมีข้อดีตรงที่ว่าไม่จำเป็นต้องหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การออกแบบอยู่บนพื้นฐานตรรกะของเหตุและผล ถ้าแล้วและตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเป็นตัวควบคุมหนึ่งที่สามารถกำหนดตัวแปรด้านอินพุตและด้านเอาต์พุตได้หลายตัวแปร (Multi Input & Multi Output) ด้วยเหตุนี้ฟัซซีลอจิกจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ผู้วิจัยได้นำมาประยุกต์ใช้สำหรับควบคุมกระบวนการอุณหภูมิแบบการพา ซึ่งโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแสดงได้ดังรูปที่ 5

ในบทความวิจัยนี้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกมีจำนวนตัวแปรอินพุตอยู่ด้วยกัน 2 อินพุต โดยที่อินพุตแรกเป็นตัวแปรค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิ ($e(k)$) โดยกำหนดได้ดังนี้

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (3)$$



รูปที่ 5 โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

เมื่อ $y(k)$ เป็นผลตอบสนองของอุณหภูมิ และ $r(k)$ เป็นอุณหภูมิอ้างอิง ส่วนตัวแปรอินพุตถัดมาเป็นตัวแปรอนุพันธ์ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิ ($\Delta e(k)$) โดยกำหนดได้ดังนี้

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (4)$$

เมื่อ $e(k-1)$ เป็นค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ผ่านมา สำหรับตัวแปรเอาต์พุตมีจำนวน 1 เอาต์พุตเป็นค่าสัญญาณควบคุมที่ได้จากกระบวนการสรุปหาเหตุผล (Defuzzification) ด้วยวิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วง (Central of gravity : COG) ตามสมการที่ (5)

$$COG = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i w_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) ได้กำหนดค่าของสมการได้ดังนี้

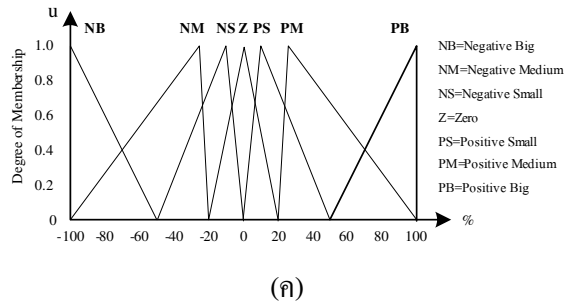
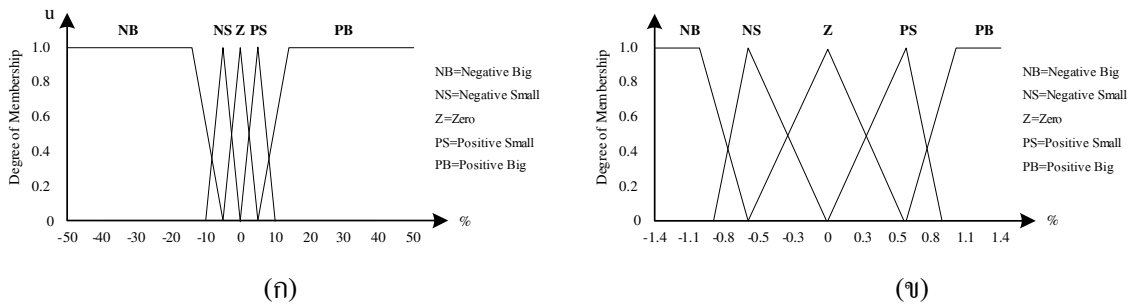
COG คือ ค่าของจุดศูนย์กลางถ่วง (Central of gravity)

N คือ ค่าฟัซซีตำแหน่งที่ 1 ถึง ตำแหน่งที่ i

α_i คือ ค่าฟัซซีของเอาต์พุตในเซตฟัซซีตำแหน่งที่ i

w_i คือ พื้นที่ใต้โค้งของเซตฟัซซีตำแหน่งที่ i

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรทั้ง 3 ตัวเลือกใช้เป็นฟังก์ชันสามเหลี่ยมเนื่องจากเป็นฟังก์ชันดั้งเดิมอย่างง่ายและมักใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยที่จำนวนอินพุตของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกมีอยู่ด้วยกัน 2 อินพุต ซึ่งแต่ละอินพุตมีจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 5 สมาชิก ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6 ดังนั้นจำนวนกฎของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกจึงมีค่าเท่ากับ 25 กฎ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 7 สำหรับกระบวนการควบคุมการตัดสินใจ (Inference Engine) เลือกใช้วิธีของ Mamdani (Max-Min Method)

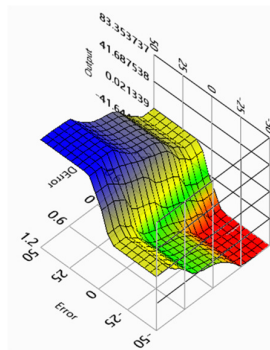


รูปที่ 6 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (ก) ค่าความผิดพลาด (ข) อนุพันธ์ค่าความผิดพลาด (ค) สัญญาณควบคุม

e	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NM	NS	Z
NS	NB	NM	NS	Z	PS
Z	NM	NS	Z	PS	PM
PS	NS	Z	PS	PM	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB

รูปที่ 7 ตารางความจริงพื้นฐานกฎฟัซซี

จากกระบวนการประมวลผลของฟัซซีลอจิกสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตและอินพุตบนพื้นผิวฟัซซีทั้ง 3 ระนาบซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตและอินพุตของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

ประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิก รูปแบบของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และพื้นฐานกฎ (Rule Base) อันเป็นสำคัญ สำหรับเทคนิคในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ยังต้องอาศัยพื้นฐานและประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญในการปรับแต่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งได้จากการสังเกตพฤติกรรมผลตอบสนองของระบบ อันจะส่งผลต่อระยะเวลาในการปรับแต่งตัวควบคุม

3.2 การออกแบบตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้

ถึงแม้ว่าการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก จะถูกปรับแต่งให้เหมาะสมเพียงใด แต่ก็ยังพบว่าในสภาวะคงตัวระบบยังคงมีความผิดพลาดของอุณหภูมิอยู่ในระดับหนึ่ง เนื่องจากการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่เพียงพอต่อการลดความผิดพลาดของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอ้างอิง เพราะฉะนั้นบทความวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้เป็นตัวควบคุมร่วมอีกหนึ่งตัว เนื่องจากตัวควบคุมอินทิกรัลมีเอกลักษณ์ในเรื่องของการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว

โดยปกติแล้วโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีมีรูปแบบสมการมาตรฐาน [13] ในรูปของโดเมนเวลา โดยแสดงได้ดังนี้

$$u_{PID}(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) พิจารณาเฉพาะในเทอมของอินทิกรัล แล้วเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณควบคุมสุดท้ายได้ดังนี้

$$u_T(t) = u_F(t) + u_I(t) \quad (7)$$

เมื่อ

$$u_I(t) = K_I \int |e(t)| dt \quad (8)$$

โดยที่ $u_F(t)$ เป็นสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกและ $u_I(t)$ เป็นสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้

แทนค่าสมการที่ (8) ลงในสมการที่ (7) แล้วเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ในรูปฟังก์ชันของสัญญาณควบคุมสุดท้ายได้เป็น

$$u_T(t) = u_F(t) + K_I \int |e(t)| dt \quad ; K_I = \begin{cases} m \cdot |e(t)| & |e(t)| \leq e_{thres} \\ 0 & |e(t)| > e_{thres} \end{cases} \quad (9)$$

จากฟังก์ชันของสัญญาณควบคุมสุดท้ายตามสมการที่ (9) เป็นฟังก์ชันแบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันแบบไม่ต่อเนื่อง [15] จนได้สมการเป็นดังนี้

$$u_T(k) = u_F(k) + K_I \sum_{k=0}^n e(k) T_s ; K_I = \begin{cases} m \cdot |e(k)| & |e(k)| \leq e_{thres} \\ 0 & |e(k)| > e_{thres} \end{cases} \quad (10)$$

จากสมการที่ (10) ได้กำหนดค่าของสมการได้ดังนี้

$u_T(k)$ คือ ค่าสัญญาณควบคุมสุดท้ายของระบบ

$e(k)$ คือ ค่าความผิดพลาดของระบบ

K_I คือ อัตราการขยายเชิงเส้นของตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้

m คือ ค่าความชันของสมการเส้นตรง (ดัชนีความถี่)

e_{thres} คือ ช่วงขอบเขตของค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว

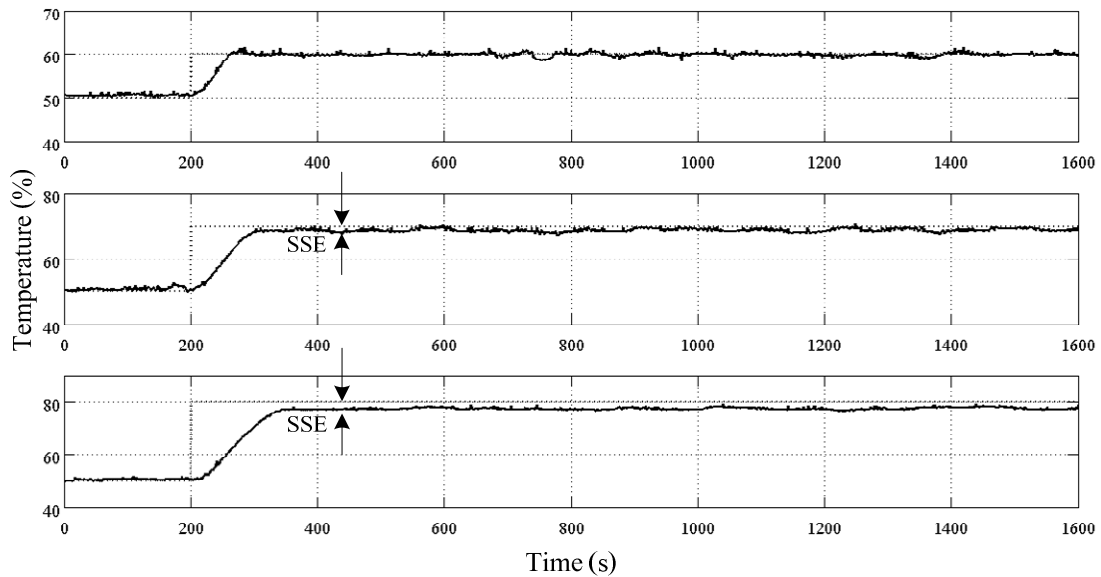
T_s คือ ช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณ

จากสมการที่ (10) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ว่า เมื่อค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในสภาวะคงตัว อยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้ (e_{thres}) ตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้จะสร้างสัญญาณควบคุม ($u_I(t)$) แล้วถูกรวมกับสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมพีชชีลอจิก ($u_F(k)$) เพื่อเป็นการปรับแต่งสัญญาณควบคุมสุดท้าย ($u_T(k)$) ให้เหมาะสม โดยที่การเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้ จะแปรผันตรงตามค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งหากสังเกตในเทอมของอินทิกรัลจะพบว่าฟังก์ชันดังกล่าวเป็นฟังก์ชันสมการเส้นตรงอย่างง่าย ในบทความวิจัยนี้ได้กำหนดช่วงขอบเขตค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิในสภาวะคงตัวที่ 2 เปอร์เซ็นต์ ค่าความชันของสมการเส้นตรง ($m = 1/\tau$) เท่ากับ $0.0086 \approx 0.01$ และช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณเท่ากับ 1 วินาที

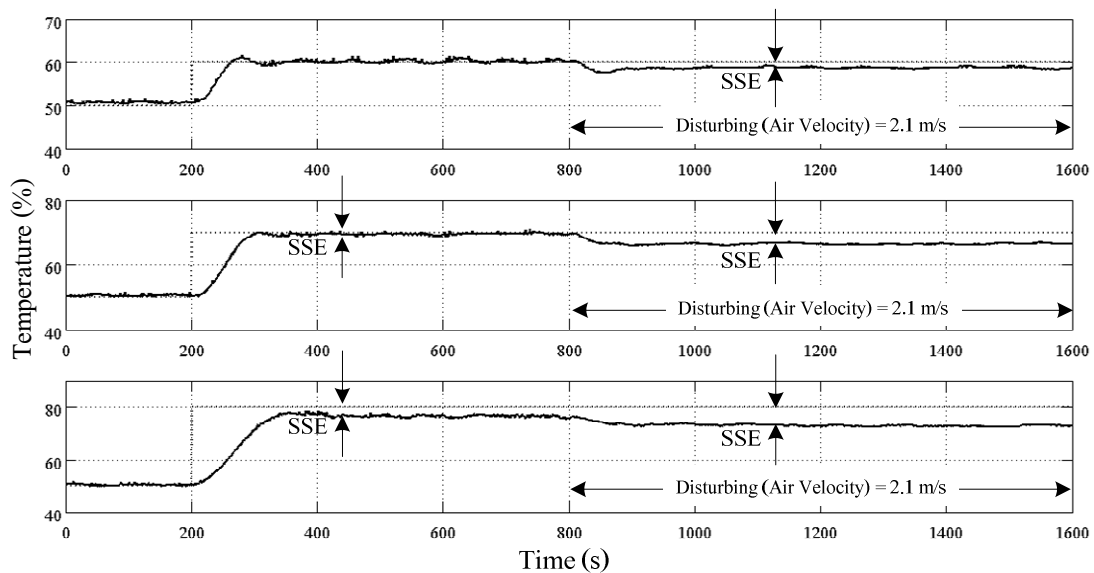
4. ผลการทดสอบ

จากการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิกและตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้ ตัวควบคุมทั้งสองได้ถูกนำมาทดสอบร่วมกับชุดควบคุมกระบวนการอุณหภูมิแบบการพา สำหรับช่วงของการควบคุมจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ (ประมาณ 30-80 องศาเซลเซียส) จุดทำงานกำหนดไว้ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ (ประมาณ 55 องศาเซลเซียส) ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3 และความเร็วลมปกติขณะทดสอบอยู่ที่ประมาณ 1.2 เมตรต่อวินาที

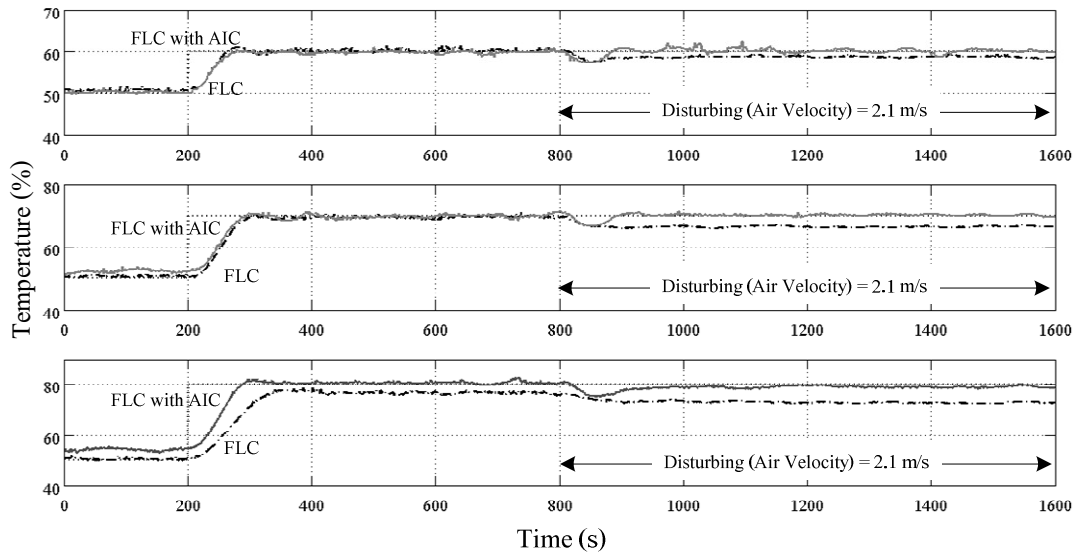
การทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นสภาวะที่ระบบมีตัวควบคุมพีชชีลอจิกเพียงอย่างเดียว ส่วนถัดมาเป็นสภาวะที่ระบบถูกรบกวน (ความเร็วลมถูกสมมติเป็นตัวรบกวน) มีค่าการรบกวนสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 2.1 เมตรต่อวินาที และส่วนสุดท้ายเป็นสภาวะที่ระบบมีตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้ร่วมอยู่ ดังนั้นเพื่อให้เห็นผลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมชัดเจนยิ่งขึ้นทั้ง 3 สภาวะจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอ้างอิงจาก 50 ไปเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ 70 เปอร์เซ็นต์ และ 80 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ผลจากการทดสอบถูกนำมาเปรียบเทียบกันทั้ง 3 สภาวะ



รูปที่ 9 ผลการทดสอบระบบด้วยตัวควบคุมพีชชีลอจิก ก) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอ้างอิงจาก 50% เป็น 60% ข) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอ้างอิงจาก 50% เป็น 70% และค) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอ้างอิงจาก 50% เป็น 80%



รูปที่ 10 ผลการทดสอบระบบด้วยตัวควบคุมพีชชีลอจิกเมื่อระบบถูกรบกวน ก) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอ้างอิงจาก 50% เป็น 60% ข) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอ้างอิงจาก 50% เป็น 70% และ ค) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอ้างอิงจาก 50% เป็น 80%



รูปที่ 11 ผลการทดสอบระบบด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกร่วมกับตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้

ก) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอ้างอิงจาก 50% เป็น 60% ข) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอ้างอิงจาก 50% เป็น 70% และ ค) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอ้างอิงจาก 50% เป็น 80%

ผลจากการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกร่วมกับตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้ทั้ง 3 สถานะพบว่า ในกรณีที่ระบบมีตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเพียงอย่างเดียว ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิจะยังคงมีอยู่ในระดับหนึ่งและจะเห็นได้ชัดที่สุดเมื่อช่วงของอุณหภูมิอ้างอิงเปลี่ยนแปลงจาก 50% เป็น 80% เนื่องจากในการปรับแต่งระบบฐานกฎของฟัซซีลอจิกอาจมีความไม่เหมาะสม และหากมีการเพิ่มความเร็วลม (เพิ่มตัวรบกวน) การรักษาเสถียรภาพของระบบจะเห็นว่า ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่สูง ผลตอบสนองของอุณหภูมิแสดงได้ดังรูปที่ 9 แต่เมื่อมีการใช้ตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้เข้ามาเป็นตัวควบคุมร่วมกับตัวควบคุมฟัซซีลอจิกพบว่า การรักษาเสถียรภาพของระบบทำได้ดี มีค่าความผิดพลาดที่ต่ำ เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวมีจุดเด่นในการแก้ปัญหาเรื่องความผิดพลาดของระบบ ผลตอบสนองของอุณหภูมิแสดงได้ดังรูปที่ 10 จากผลการทดสอบทั้งสองส่วนถูกเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเพียงอย่างเดียวกับกรณีที่ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกร่วมกับตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้ ผลตอบสนองของอุณหภูมิแสดงได้ดังรูปที่

11

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปและแสดงผลได้ดังตารางที่ 1 พบว่าระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกร่วมกับตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้ มีค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวต่ำกว่าระบบควบคุมที่มีตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเพียงอย่างเดียว ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นยังอยู่ในช่วงขอบเขตที่ได้กำหนดไว้เท่ากับ $\pm 2\%$ ทั้งในกรณีถูกรบกวนและไม่ถูกรบกวน ทั้งนี้ไม่เพียงแต่ลดความผิดพลาดของอุณหภูมิ แต่ยังพบว่าช่วงเวลาได้ขึ้น

ของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีลอจิกร่วมกับตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้ มีผลตอบสนองของ
 อุณหภูมิที่รวดเร็วกว่าอีกด้วย

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระหว่างตัวควบคุมพีชชีลอจิกและตัวควบคุมพีชชีลอจิกร่วมกับตัว
 ควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้

Condition Controller	Non-Disturbing System						Disturbing System		
	Rising Time (s)			Steady State Error (%)			Steady State Error (%)		
	Step Response (%)			Step Response (%)			Step Response (%)		
	50-60	50-70	50-80	50-60	50-70	50-80	50-60	50-70	50-80
FLC	47	49	93	+0.1	+2.6	+4.3	+2.4	+4.1	+7.7
FLC with Adaptive Integral Control	44	45	50	+0.3	+0.2	-0.6	+0.2	+0.1	+0.9

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีชชีลอจิกร่วมกับตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้ โดย
 ตัวควบคุมดังกล่าวถูกทดสอบกับชุดทดลองกระบวนการควบคุมอุณหภูมิแบบการพา โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่ม
 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมและเพิ่มขีดความสามารถของตัวควบคุมในการรักษาเสถียรภาพของระบบใน
 สถานะคงตัว ผลจากการทดสอบพบว่าตัวควบคุมอินทิกรัลแบบปรับตัวได้สามารถปรับปรุงสัญญาณควบคุม
 ร่วมกับตัวควบคุมพีชชีลอจิกเพื่อลดค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระบบได้อย่างเป็นที่น่าสนใจ

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Chesaru, C. Dan and M. Bodea, "PID Algorithm for Controller Processors," in *Proc. of int. semiconductor conference.*, vol. 4, pp. 429-432, September 2006.
- [2] H. Li, C. Zhou, S. Zhang and G. Deng, "Design of the Temperature Control System for the Fluid Jet-Dispenser," in *Proc. of the 13th int. conf. on Electronic Packing Technology & High Density Packing.*, pp. 1024-1026, August 2012.
- [3] D. A. R. Wati and R. Hidayat, "Genetic Algorithm-based PID Parameters Optimization for Air Heater Temperature Control," in *Proc. of IEEE int. conf. on Robotics, Biomimetics, Intelligent Computational System.*, pp. 30-34, November 2013.
- [4] Z. M. Yusoff, Z. Muhammad, M. N. N. Nordin, M. H. F. Rahiman and M. N. Taib, "Real Time PID Control for Hydro-diffusion Steam Distillation Essential Oil Extraction System Using Gradient Descent

- Tuning Method,” in *Proc. of IEEE Control and System Graduate Research Colloquium.*, pp. 288-293, July 2012.
- [5] M. Elnour and W. I. M. Taha, “PID and Fuzzy Logic in Temperature Control System,” in *Proc. of int. conf. on Computing, Electrical and Electronic Engineering.*, pp. 172-177, August 2013.
- [6] P. Ramanathan, A. K. C. Sukanya, S. Mishra and S. Ramasamy, “Study on Fuzzy Logic and PID Controller for Temperature Regulation of a System with Time Delay,” in *Proc. of int. conf. on Energy Efficient Technologies for Sustainability.*, pp. 274-277, April 2013.
- [7] Z. Dong, Y. Su and X. Yan, “Temperature Control System of the Thermal Analyzer Based on Fuzzy PID Controller,” in *Proc. of the 9th int. Conf. on Hybrid Intelligent Systems.*, pp. 58-61, August 2009.
- [8] Z. Zhen and G. Yan, “Design of the Fuzzy PID Controller for the Hot Runner Temperature Control System,” in *Proc. of the 32nd Chinese Control Conference.*, pp. 3464-3469, July 2013.
- [9] Y. Pattanapong and C. Deelertpaiboon, “Ball and Plate Position Control based on Fuzzy Logic with Adaptive Integral Control Action,” in *Proc. of IEEE int. Conf. on Mechatronics and Automation.*, pp. 1513-1517, August 2013.
- [10] D. Pamela, T. Jebarajan and B. Baby, “Real Time Implementation of Internal Model Controller for Temperature process,” in *Proc. of IEEE int. Conf. on Renewable Energy and Sustainable Energy.*, pp. 162-165, December 2013.
- [11] M. A. Majid, Z. Janin, A. A. Ishak and M. N. Taib, “Temperature Control Tuning for Over damped Process Response,” in *Proc. of the 5th int. Colloquium on Signal Processing and Its Applications.*, pp. 439-444, March 2009.
- [12] L.A. Zadeh, “Fuzzy Sets,” *Information and Control*, Vol. 8, iss. 3, pp. 338 – 353, June 1965.
- [13] M. Onat and M. Dogruel, “Fuzzy Plus Integral Control of the Effluent Turbidity in Direct Filtration,” *IEEE Trans. Control System Technology.*, Vol. 12, No. 1, pp. 65-74, January 2004.