

การประยุกต์ใช้นิวรอลเน็ตเวิร์คและฟัซซี่ลอจิกในการควบคุมเปลวไฟ

An Application of Neural Networks and Fuzzy-Logics on Flame Control

อภิชาติ ตันตระกูล¹, นิรุธ จิรสวรรณกุล², สุวัฒน์ กุลธนปรีดา³, ปุมยศ วลลิกุล⁴ และ บัณฑิต ฟุ้งธรรมสาร⁵¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ³ศูนย์วิจัยและพัฒนากระบวนการบำบัดของเสีย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ^{4,5}ศูนย์วิจัยการเผาทิ้งของเสีย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ถ. พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทรศัพท์ 0-29132500 ต่อ 8308 โทรสาร 0-5870026

^{2,5}บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ถ. ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10110 โทรศัพท์ 0-24708309-10

Apichart Tuntrakul¹, Nirudh Jirasuwankul², Suwat Kuntanapreeda³, Pumyos Vallikul⁴ and Bundit Fungtammasan⁵¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering³Intelligence System Research and Development Center, Faculty of Engineering^{4,5}Waste Incineration Research Center, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok,

Pibulsongkram Road, Bangsue, Bangkok 10800, Tel. 0-29132500 ext. 8308, Fax. 0-5870026

^{2,5}The Joint Graduate School of Energy and Environment (JGSEE), King Mongkut's University of Technology Thonburi,

Pracha-Uthit Road, Tungkru, Bangkok 10110, Tel. 0-24708309-10

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้นิวรอลเน็ตเวิร์คในการจำลองพฤติกรรมของเปลวไฟของหัวเผาแบบมีเกอร์โดยใช้ข้อมูลสีและขนาดของเปลวไฟจากสัญญาณภาพของกล้อง CCD จากนั้นได้ใช้แบบจำลองในการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก ก่อนที่จะทำการนำไปใช้ควบคุมเปลวไฟจริง โดยจุดประสงค์ของการควบคุมคือ การปรับเปลวไฟให้มีสีและขนาดตามที่ต้องการ ภาพของเปลวไฟที่ถูกถ่ายด้วยกล้อง CCD ถูกส่งไปประมวลผลคุณลักษณะของเปลวไฟในเวลาจริงเพื่อหาค่าสีและขนาดของเปลวไฟ สำหรับใช้เป็นสัญญาณควบคุมป้อนกลับของตัวควบคุม โดยตัวควบคุมทำหน้าที่กำหนดอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงด้วยวาล์วควบคุมอัตราการไหลให้เป็นไปตามกฎการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกที่ออกแบบไว้ ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองนิวรอลเน็ตเวิร์คสามารถช่วยให้การออกแบบตัวควบคุมกระทำได้อย่างรวดเร็วขึ้น และลดอันตรายและความสั่นเปลี่ยนจากการทดลองกับเปลวไฟจริง และผลการทดสอบการควบคุมเปลวไฟจริง พบว่าตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกสามารถควบคุมให้ได้เปลวไฟเป็นไปตามที่ต้องการอย่างน่าพอใจ

คำหลัก นิวรอลเน็ตเวิร์ค, ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก, กล้อง CCD, การควบคุมเปลวไฟ, หัวเผาแบบมีเกอร์

Abstract

This paper proposes an application of ANN to model the premixed flame behaviors on a Meker burner by using flame

image data from CCD camera. The off-line trained ANN model will then be used to test and design a Fuzzy Logic flame controller. The control objective is to force the flame shapes and colors toward set points of the controller. In order to achieve the points, the controller utilizes the online processing flame image as input information and adjusts the flow rate of air and gas by modulates their flow-rate command on mass flow controllers accordingly to the Fuzzy rule bases. It is found that an ANN model can be utilized to speed up in controller design and test with minimization in energy consumption and harmful testing. Finally, the controller can be readily applied to control the real flame and a good result is met satisfactorily.

Keywords: Artificial Neural Network, Fuzzy Logic Controller, CCD Camera, Flames Control, Meker Burner

1. บทนำ

การศึกษาและวิจัยด้านการสันดาปของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แนวทางหลักคือ การศึกษาในเชิงทฤษฎีด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสันดาป(Direct Numerical Simulation) และการศึกษาการสันดาปในเชิงการทดลอง(Experimental Study) [1] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้แนวทางที่สองโดยอาศัยผลจากปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์เชิงแสงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการเผาไหม้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบสร้างตัวควบคุมหัวเผจากการวัดค่าความเข้มสีของแสงและ

ขนาดของเปลวไฟที่เกิดขึ้น สำหรับเทคนิคของการควบคุมในแนวทางของกระบวนการเผาไหม้นั้นสามารถจำแนกออกตามวัตถุประสงค์ได้เป็นสองประเภทคือ การควบคุมแบบจุดดำเนินการ (Operating Point Control) [2] และการควบคุมแบบรักษาเสถียรภาพ (Active Combustion Control) [3],[4] โดยทั่วไปแล้วการควบคุมการเผาไหม้สามารถกระทำได้อย่างจำกัดเนื่องจากความซับซ้อนและความไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามเทคนิคของระบบควบคุมแนวใหม่ที่ได้รับการพัฒนาขึ้น ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับการควบคุมการเผาไหม้ ทดแทนระบบควบคุมแบบดั้งเดิมในทางปฏิบัติที่มีข้ออยู่ในงานอุตสาหกรรมปัจจุบันได้[5],[6] นอกจากนั้นการสังเกตการณ์ของกระบวนการเผาไหม้ด้วยการวัดยังสามารถทำได้หลายวิธี[7] การใช้ภาพเปลวไฟที่เป็นผลสืบเนื่องจากการบวนการเผาไหม้นั้นเป็นเทคนิคใหม่ที่ได้รับ ความสนใจมากขึ้น และเริ่มมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มขึ้นเช่น การควบคุมเตาเผาขยะ[8], การจับภาพการจุดระเบิดภายในห้องสันดาปของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนและดีเซล [9] เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการเผาไหม้เป็นต้น สำหรับในการศึกษานี้เป็นงานวิจัยที่ต่อเนื่องมาจาก [10] และ[11] โดยจะทำการสร้างตัวควบคุมการเผาไหม้ของหัวเผาก๊าซแบบมีเกอรัด้วยวัตถุประสงค์ Operating Point Control เพียงอย่างเดียว ด้วยการวัดสัญญาณภาพของเปลวไฟจากกล้อง CCD เป็นข้อมูลอินพุตสำหรับตัวควบคุมชนิดฟัซซี่ลอจิก ในการออกแบบสร้างตัวควบคุมนั้นจะใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการจำลองพฤติกรรมของเปลวไฟ เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับนำไปใช้กำหนดกฎเกณฑ์การควบคุมแบบฟัซซี่ โดยในการจำลองพฤติกรรมของเปลวไฟนั้นจะใช้ข้อมูลการวัดสัญญาณภาพเปลวไฟจากกล้อง CCD ที่ผ่านการวิเคราะห์และแยกค่าความเข้มของสีและขนาดของเปลวไฟแล้วนำไปใช้เป็นข้อมูลอินพุตเพื่อฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบ Off-line learning หลังจากนั้นจะได้แบบจำลองเปลวไฟสำหรับใช้ทดสอบและปรับปรุงการออกแบบกฎเกณฑ์การควบคุมแบบฟัซซี่ต่อไปดังมีรายละเอียดและการทดลองต่อไปนี้

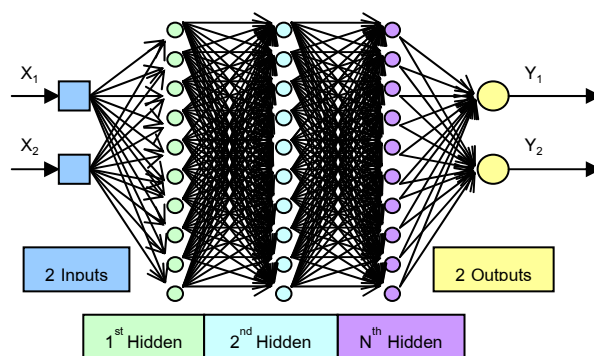
2.การวัดและวิเคราะห์สัญญาณภาพเปลวไฟจากกล้อง CCD

ภาพเปลวไฟที่ได้จากการจับภาพด้วยกล้อง CCD นั้นเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative data) ที่แสดงถึงสถานะของกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของก๊าซ ปฏิกริยาเคมี อุณหภูมิ สภาวะการไหลและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเป็นต้น ในงานวิจัยนี้ใช้ก๊าซหุงต้ม (LPG) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็น Propane (C_3H_8) และ Butane (C_4H_{10}) เป็นเชื้อเพลิงและกำหนดรูปแบบของการเผาไหม้เป็นแบบเปลวไฟชนิดผสมมาก่อน (Premixed Combustion) ด้วยการใชหัวเผาแบบบุนเซนและตะแกรงรังผึ้ง(Meker) ทำให้ได้ลักษณะเปลวไฟแบบราบเรียบ (Laminar Flames) นอกจากนั้นข้อมูลเชิงคุณภาพที่สามารถสังเกตการณ์ได้ง่ายจากกล้อง CCD ได้แก่ค่าความเข้มและขนาดของเปลวไฟ ซึ่งในที่นี้จะใช้ข้อมูลดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative data) โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ (Digital Image Processing) ในการแยกปริมาณค่าความเข้มของสีเปลวไฟออกเป็น 2 สีคือสีฟ้าและสีส้ม [10], [11] ส่วนขนาดของเปลวไฟกำหนดจากค่าเฉลี่ยของความเข้ม ซึ่งข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้จะเป็นค่าความเข้ม

แสงแบบสัณพัทธ์ (0-255 ระดับ) ของทั้งสองสี และใช้ข้อมูลจำนวน 73 ชุด (รูปแบบ) จากการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง จากนั้นจะถูกป้อนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้สอนแบบ Off-line ต่อไป

3.การจำลองพฤติกรรมของเปลวไฟด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

ในการจำลองพฤติกรรมของเปลวไฟให้ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการวัดจริงนั้น ได้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multilayer Perceptrons) จำลองพฤติกรรมแบบ Static Model และไม่รวมผลของ Dynamic Model อันเนื่องมาจากเวลาหน่วงของเปลวไฟที่เกิดจากการเดินทางของเชื้อเพลิงกับอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยได้กำหนดโครงสร้างและพารามิเตอร์ตามตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากนั้นผลลัพธ์ของการสอนโครงข่ายประสาทเทียมจากการใช้ข้อมูลในข้อ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของตัวโมเดลของเปลวไฟจำลองด้วยการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างแบบ RMS ของผลลัพธ์จากการจำลองกับข้อมูลจริง แสดงดังรูปที่ 2



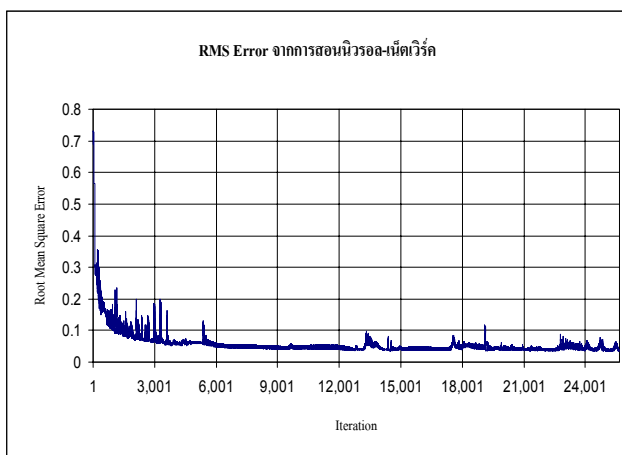
รูปที่ 1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

ตารางที่ 1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม	
Type	Multilayer Perceptron
Input	2 Nodes
Hidden layer 1	20 Nodes
Hidden layer 2	20 Nodes
Hidden layer 3	20 Nodes
Hidden layer 4	20 Nodes
Output	2 Nodes
Activation Function	$Y = \tanh(x)$

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียม

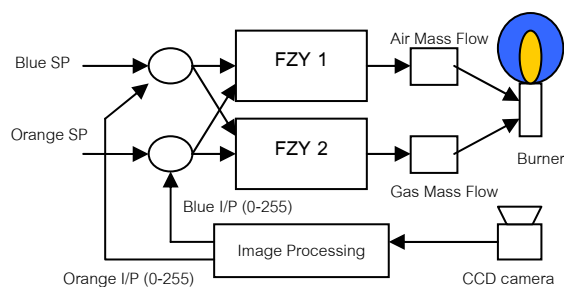
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียม	
Number of pattern data	73
Learning rate	0.100000
Momentum coefficient	0.850000
Scaling	ทุกข้อมูลปรับมาอยู่ในช่วงตั้งแต่ -1 ถึง 1
Error Level for exit from iteration	0.035



รูปที่ 2 ค่า RMS Error ของเปลวไฟจำลองที่ได้จากการสอนนิวรอลเน็ตเวิร์ค

4.การออกแบบสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก

โครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟัซซี่แสดงดังรูปที่ 3 และนิยามของ Linguistic Variable สำหรับค่าตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตแสดงโดยสมการที่ 1-4 โดยเลือกใช้ฟังก์ชันสมาชิกของตัวนิยามกฎเกณฑ์ฟัซซี่ (Inference Engine) เป็นแบบสามเหลี่ยมทำให้ได้กฎเกณฑ์ควบคุมการปรับอัตราการไหลของอากาศและก๊าซ(Fuzzy Rule Base) ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างของระบบควบคุม

สมาชิกของฟัซซี่เซตด้านอินพุตได้แก่

$$U_{Mean_Orange} = \{ ZE, PS, PL \} \quad (1)$$

$$U_{Mean_Blue} = \{ NL, NZ, ZE, PS, PL \} \quad (2)$$

โดยที่ N, Z, P หมายถึง Negative, Zero และ Positive ตามลำดับ S, L หมายถึง Small และ Large ตามลำดับ ส่วนด้านเอาต์พุตได้แก่

$$Y_{GAS} = \{ DE, SD, ZE, SI, IN \} \quad (3)$$

$$Y_{AIR} = \{ DE, SD, ZE, SI, IN \} \quad (4)$$

โดยที่ DE, SD, ZE, SI และ IN หมายถึง Decrease, Slightly Decrease, Zero, Slightly Increase และ Increase ตามลำดับ

ตารางที่ 3 Fuzzy Rule Base สำหรับการปรับFlow (AIR และ GAS)

		AIR					
Orange	Blue	ZE	SI	ZE	ZE	SD	DE
		PS	SI	SI	SI	SI	SI
		PL	IN	IN	IN	IN	IN
			NL	NS	ZE	PS	PL
		GAS					
Orange	Blue	ZE	IN	SI	ZE	SD	DE
		PS	SI	ZE	ZE	ZE	SD
		PL	SI	ZE	ZE	ZE	SD
			NL	NS	ZE	PS	PL

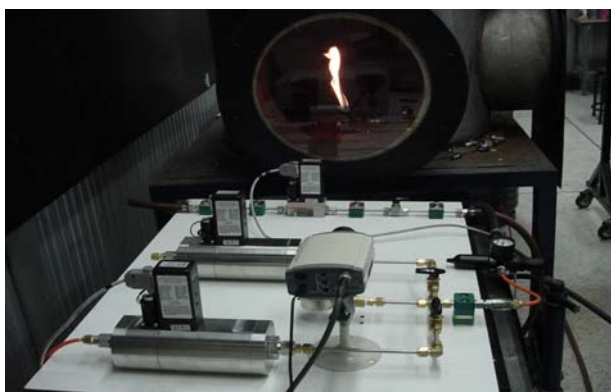
ในท้ายที่สุด ปริมาณของเอาต์พุตที่ได้จาก Fuzzy Rule Base ทั้งของก๊าซและอากาศนั้นจะถูกแปลงกลับ(Defuzzified)จากโดเมนของฟัซซี่ไปเป็นปริมาณจริงในโดเมนของค่าสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง [0, 255] แล้วป้อนเข้าสู่อุปกรณ์ Mass Flow Meter เพื่อปรับอัตราการไหลของอากาศและก๊าซตามคำสั่งของตัวควบคุม ซึ่งเทคนิคการแปลงค่ากลับนั้นได้ใช้วิธีแบบ Singleton Output

5.ชุดทดลองและการทำงานของระบบควบคุม

ชุดทดลองประกอบด้วยระบบคอมพิวเตอร์แบบขนานสำหรับการประมวลผลภาพ (Parallel Computer) รุ่น PCIC81 ซึ่งเป็นการจัดประมวลผลที่ใช้ตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล(DSP-TMS320C81) ติดตั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์พีซี และซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพสำหรับการวิเคราะห์ภาพเปลวไฟ ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกที่เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมหัวเผาไหม้ผ่านอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซและอากาศ (Air and Gas Mass Flow Meters) และซอฟต์แวร์นิวรอลเน็ตเวิร์คทำหน้าที่เป็นเปลวไฟจำลองสำหรับใช้ในขั้นตอนการออกแบบกฎเกณฑ์การควบคุมแบบฟัซซี่ เมื่อทำการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่เสร็จแล้ว ต่อไปทำการทดสอบตัวควบคุมนั้นกับเปลวไฟจริงโดยใช้สัญญาณภาพที่ถูกแยกออกเป็นสีน้ำเงินและสีส้มแบบเวลาจริงจากตัว DSP เป็นข้อมูลอินพุตของตัวควบคุม เมื่อตัวควบคุมได้รับสัญญาณอินพุตแล้วจะทำการประมวลผลและสั่งการควบคุมหัวเผาไหม้ผ่านการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซและอากาศเพื่อให้ได้ขนาดและสีของเปลวไฟเป็นไปตามเป้าหมายของการควบคุม(Set point) เช่นกำหนดขนาดของค่าความเข้มของสีน้ำเงินให้เป็นค่าต่างๆเป็นต้น ระบบต่างๆแสดงดังรูปที่ 4 และ5 ส่วนผลการทดลองนั้นแสดงไว้ในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4 การ์ดประมวลผลภาพที่ใช้ DSP เป็น Parallel Computer



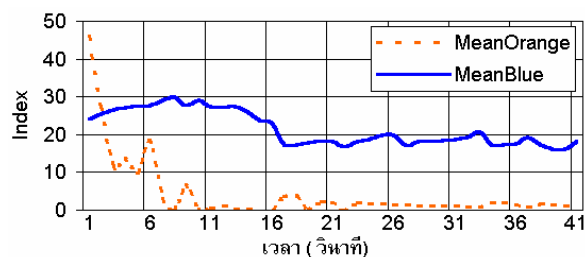
รูปที่ 5 อุปกรณ์ Mass Flow Meters, กล้อง CCD และ Meker Burner

6. ผลการทดลอง

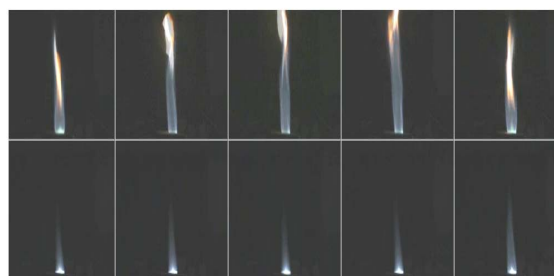
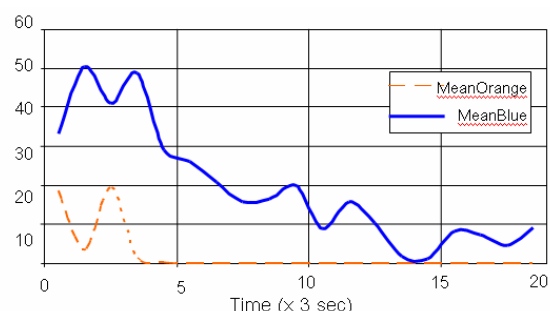
ผลการจำลองพฤติกรรมของเปลวไฟที่ได้ในหัวข้อที่ 3 นั้นจะถูกใช้เป็นโมเดลของเปลวไฟสำหรับทดสอบการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ที่ออกแบบไว้ในครั้งแรก จากนั้นทำการปรับค่าต่างๆของตัวควบคุมให้ได้ผลจนเป็นที่น่าพอใจก่อนนำไปใช้ควบคุมกับเปลวไฟจริง ซึ่งกระบวนการในขั้นตอนนี้กระทำได้โดยการจำลองการทำงานของตัวควบคุมกับโมเดลของเปลวไฟบนคอมพิวเตอร์ โดยแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 6 เป็นการทดสอบตั้งค่า Set point ของสีน้ำเงินเท่ากับ 20 จากนั้นนำไปใช้ควบคุมกับเปลวไฟจริง แสดงผลดังรูปที่ 7, 8 และ 9 สำหรับกรณีการตั้งค่า Set point ของสีน้ำเงินเท่ากับ 10, 30 และสุดท้ายเป็นการปรับค่าจาก 5 เป็น 30 ตามลำดับ

การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของตัวควบคุมกับเปลวไฟจำลองในรูปที่ 6 และผลที่ได้จากการควบคุมกับเปลวไฟจริงในรูปที่ 7-9 จะสังเกตได้ว่าความผันแปร (Oscillation) ของค่าเฉลี่ยของความเข้มสีน้ำเงินของเปลวไฟจริงเกิดขึ้นมากกว่าเมื่อเทียบกับเปลวไฟจำลอง ซึ่งแสดงถึงปัจจัยภายนอกอื่นๆที่อาจมีผลกระทบต่อการควบคุมขณะทำการทดลองกับเปลวไฟจริงและส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากเวลาหน่วง (Delay Time) ที่เกิดจากการเดินทางของเชื้อเพลิงกับอากาศมายังหัวเผาไหม้นั่นเอง นอกจากนั้นแล้วเวลาของการเข้าสู่ Set point ของค่าเฉลี่ยความเข้มสีน้ำเงินจากการทดลองกับเปลวไฟจริงทั้ง 3 กรณีมีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 60 วินาที ในขณะที่การทดลองกับเปลวไฟจำลองนั้นใช้เวลาประมาณ 21 วินาที ซึ่งเวลาที่แตกต่างกันนี้เป็นผลมาจากความเร็วในการตอบสนองต่อคำสั่งควบคุม (Response Time) ของวาล์วควบคุมอัตราการไหลของทั้งก๊าซและอากาศเมื่อทำการทดลองจริงขณะที่

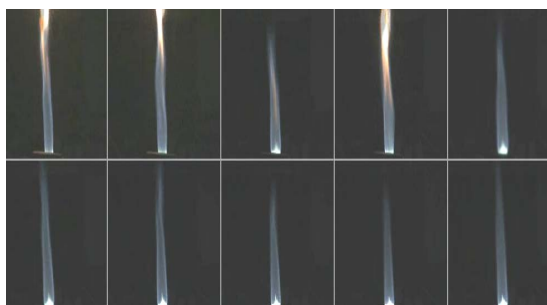
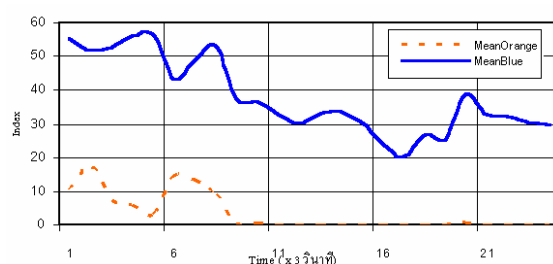
แบบจำลองนั้น ไม่ได้รวมผลของเวลาหน่วงในการตอบสนองต่อคำสั่งควบคุมเข้าไปด้วย



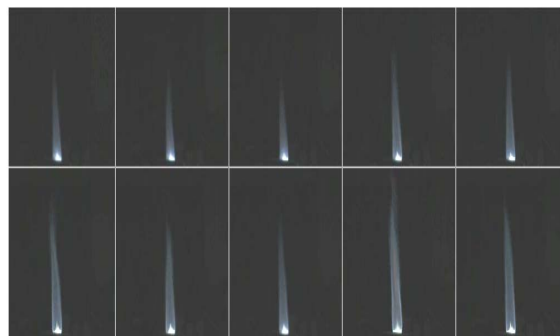
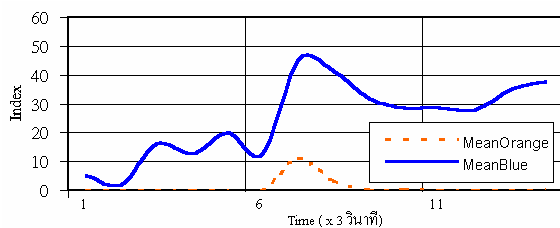
รูปที่ 6 ผลการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซี่กับเปลวไฟจำลอง



รูปที่ 7 การควบคุมกับเปลวไฟจริงที่ Set Point ของสีน้ำเงิน=10



รูปที่ 8 การควบคุมกับเปลวไฟจริงที่ Set Point ของสีน้ำเงิน= 30



รูปที่ 9 การควบคุมกับเปลวไฟจริงที่ Set Point ของสีน้ำเงินจาก 5 ไปเป็น 30

6.สรุป

แบบจำลองนิวรอลเน็ตเวิร์คที่ได้จากการสอนโดยใช้ข้อมูลขนาดและความเข้มสีของเปลวไฟสามารถช่วยให้การออกแบบและทดสอบตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกสามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วขึ้น ช่วยลดอันตรายและความเสี่ยงจากการทดลองกับเปลวไฟจริงในขั้นตอนการออกแบบ และเมื่อนำไปใช้ทดสอบการควบคุมกับเปลวไฟจริง พบว่าตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกสามารถควบคุมให้ได้เปลวไฟเป็นไปตามที่ต้องการอย่างน่าพอใจ อย่างไรก็ตามแบบจำลองนิวรอลเน็ตเวิร์คที่ได้นั้นยังมีข้อจำกัดเนื่องจากข้อมูลการทดลองที่ใช้สอนนั้นยังไม่ได้รวมผลของการแปรเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของก๊าซ LPG ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อลักษณะของเปลวไฟ นอกจากนั้นแล้วผลของปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ เช่น การทดลองซึ่งอาจมีผลกระทบกับเปลวไฟ จะต้องได้รับการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อประเมินผล หากมีผลกระทบต่อลักษณะเปลวไฟอย่างชัดเจนแล้วจะต้องรวมเอาปัจจัยแวดล้อมเหล่านั้นเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของแบบจำลองด้วย เพื่อช่วยให้การกำหนดกฎเกณฑ์การควบคุม ทำได้อย่างถูกต้องกับสภาพแวดล้อมการทำงานที่แท้จริงและช่วยให้ตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความสนับสนุนด้านอุปกรณ์การทดลองในส่วนของอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (Mass Flow Meters) ของก๊าซและอากาศ จากบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และได้รับความสนับสนุนสถานที่วิจัยโดยใช้ห้องปฏิบัติการการวัดของไหลด้วยเลเซอร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เอกสารอ้างอิง

- [1] K.T. Walsh, et. Al., " Experimental and Computational Study of CH, CH*, and OH* in an Axis-Symmetric Laminar Diffusion Flame", The 27th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1998, pp. 615-623.
- [2] J.Piere, " The Control of Combustion: A Real Need for the Future" , International Conference on Energy Conservation and Application (ICECA'2001), Wuhan, China, 2001,
- [3] M. Annaswamy and A.F. Ghoniem, "Active Control of Combustion Instability: Theory and Practice", IEEE Control System Magazine, December 2002, pp.37-54.
- [4] B.S. Hong, et.Al., " Robust Feed-Back Control of Combustion Instability with Modeling Uncertainty ", Combustion and Flame, Vol.120, 1999, pp. 91-106.
- [5] T. Slanvetpan, et. Al., "Process Control of a Laboratory Combustor Using Artificial Neural Networks", Computer & Chemical Engineering, 2003, pp.1-12.
- [6] W. Tao and H. Burkhardt, " Vision Guide Flame Control Using Fuzzy Logic and Neural Networks", The 3rd Meeting of the European Concerted Action on Process Tomography (ECAP), Process Tomography-A Strategy for Industrial Exploitation, Oporto, Portugal, 1995, pp.256-265.
- [7] N. Docquier and S.Candel, "Combustion Control and Sensors: A Review ", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 28, 2002, pp.107-150
- [8] D. Manca and M. Rovaglio, " Infrared Thermography Image Processing for the Operation and Control of Heterogeneous Combustion Chamber ", Combustion and Flame, Vol.130, 2002, pp. 277-279.
- [9] N. Chigier, Combustion Measurements: Measurement in Combustion Systems, Hemisphere Publishing Corporation, United States of America. 1991.
- [10] S. Tanchatchawan, et. Al, " Preliminary Study of Flame Control with Image Feedback", 16th ME-NETT conference (ME-NETT-16), Phuket, Thailand. 14-16 October, 2002
- [11] A. Tantrakul and S. Kuntanapreeda, " Image-Based Flame Control of a Premixed Gas Burner Using Fuzzy Logics" , 14th International Symposium, ISMIS 2003, Maebashi, Japan, October 28-31, 2003.