บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ตัวแปรและความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบควบคุม

จากข้อมูลการทดลองและผลการทดลองที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเข้าและตัวแปรออกของอุปกรณ์แต่ละหน่วยในระบบควบคุม เพื่อใช้หาความสัมพันธ์รวมทั้งหมดของระบบควบคุมโดยวิธีทดสอบทางกายภาพและการคำนวณเปรียบเทียบกันเพื่อให้ได้ความแม่นยำในการควบคุมระบบการเผาไหม้ก๊าซ การหาความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแจกแจงได้ดังนี้

5.1.1 กระบวนการ

การเผาไหม้ก๊าซเพื่อให้ความร้อนแก่เตาเผาให้ได้อุณหภูมิที่กำหนดเป็นกระบวนการที่ต้องมีการทดสอบหาความสัมพันธ์ของตัวแปรเข้าและตัวแปรออกอย่างละเอียด เพราะตัวแปรเข้าที่สามารถปรับได้ของกระบวนการนี้คือ อัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีและอัตราการไหลของอากาศ ส่วนตัวแปรออกที่ต้องการควบคุมคืออุณหภูมิภายในเตาเผาซึ่งจะเป็นผลมาจากการปรับสัดส่วนการเผาไหม้ระหว่างก๊าซแอลพีจีและอากาศ รูปแบบการเผาไหม้ที่ต้องการควบคุมนั้นจะแบ่งได้เป็นสองแบบคือ การเผาไหม้แบบสมบูรณ์และการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ โดยพื้นฐานของการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกนั้นจะมีข้อกำหนดการเพิ่มอุณหภูมิในรูปแบบและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งข้อกำหนดเหล่านี้ไม่ได้มีแบบแผนการเผาไหม้ของก๊าซเชื้อเพลิงที่แน่นอน ดังนั้นสัดส่วนของการเผาไหม้ระหว่างก๊าซแอลพีจีกับอากาศจะต้องกำหนดให้เหมาะสมโดยใช้สภาพปัจจัย และขีดจำกัดของเตาเผาในการพิจารณาคือ

5.1.1.1 ก๊าซแอลพีจีเผาไหม้แบบสมบูรณ์กับอากาศ เนื่องจากวัสดุทนไฟซึ่งใช้เป็นฉนวนกันความร้อนของเตาเผานั้นเป็นอิฐทนไฟสามารถทนอุณหภูมิได้ไม่เกิน 1500 °C ซึ่งอุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ระหว่างก๊าซแอลพีจีกับอากาศเมื่อเป็นการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ ร้อยละอากาศเกินพอมากกว่า 15 จะมีอุณหภูมิสูงถึง 1900 °C (1) ดังนั้นจึงกำหนดสัดส่วนของการเผาไหม้ให้เป็นแบบสมบูรณ์พอดี เพื่อป้องกันผลเนื่องจากอุณหภูมิ เปลวไฟซึ่งอิฐทนไฟบริเวณรอบ ๆ หัวเตาเผาจะได้รับผลกระทบนี้ และอีกเหตุผลหนึ่งคือการเผาไหม้จะเกิดที่หัวเตาเผาได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิรอบ ๆ หัวเตาเผาสูงพอที่จะทำให้ก๊าซแอลพีจีเกิดการลุกไหม้ได้ด้วยตัวเอง เพราะหัวเตาเผาที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิไม่สามารถจุดได้โดยตรงและไม่มีอุปกรณ์ช่วยในการจุดไฟติดตั้งไว้ ดังนั้นหากกำหนดให้สัดส่วนของการเผาไหม้มีอากาศเกินพอมากไปอาจจะทำให้เปลวไฟดับได้ ผลจากการคำนวณและทดสอบจึงเลือกใช้อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีต่ออัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 39:1 เมื่อทดสอบการเผาไหม้และคำนวณเปรียบเทียบจะได้อากาศเกินพอไม่เกินร้อยละ 10

5.1.1.2 ก๊าซแอลพีจีเกิดการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์กับอากาศ สัดส่วนของการเผาไหม้รูปแบบนี้จะถูกกำหนดโดยสีของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผาในบรรยากาศคาร์บอนมอนอกไซด์ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน จากการทดลองเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยควบคุมความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ค่าต่าง ๆ กัน แล้วนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ให้ผู้เชี่ยวชาญของทางภาควิชาวัสดุศาสตร์ตรวจดู พบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกควรอยู่ในช่วง 200-250 ppm จากผลการทดสอบจึงเลือกใช้อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีต่ออัตราการไหลของอากาศ เท่ากับ 30:1 โดยอากาศเกินพอไม่เกินร้อยละ 4

จากเหตุผลดังกล่าวทำให้สามารถลดตัวแปรเข้าของกระบวนการเหลือเพียงตัวเดียวได้ โดยในงานวิจัยได้เลือกอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีเป็นตัวแปรเข้าที่ควบคุม เพราะสามารถควบคุมแรงดันและอุณหภูมิได้โดยให้ก๊าซไหลผ่านเครื่องอุ่นก๊าซ การควบคุมอัตราการไหลของอากาศนั้นจะเป็นสัดส่วนขึ้นกับรูปแบบการเผาไหม้ เมื่อกำหนดข้อมูลดังกล่าวได้ทำให้กระบวนการที่ศึกษามีตัวแปรเข้าตัวเดียวคืออัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี และตัวแปรออกเพียงตัวเดียวคืออุณหภูมิภายในเตาเผา การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองนี้ทำโดยการทดสอบด้วย step ซึ่งข้อมูลที่ทำการทดสอบมี 7 ชุด สามารถแบ่งออกเป็นช่วงอุณหภูมิได้ 4 ช่วงดังผลการทดลอง และเพื่อเป็นการพิสูจน์ถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรเข้าและออกจึงทำการทดสอบกระบวนการด้วย pulse แล้วนำข้อมูลการทดลองที่ได้มาคำนวณและวิเคราะห์ผลด้วยการตอบสนองเชิงความถี่อีก 5

ชุดข้อมูล ผลการทดลองทั้ง 5 ชุดสามารถยืนยันได้ว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรเข้าและออกของกระบวนการนี้มีความสัมพันธ์เป็นสมการอันดับ 1

5.1.2 อุปกรณ์วัดสัญญาณ

Thermocouple เมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะแปลงพลังงานความร้อนนี้ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งสัญญาณนี้มีค่าต่ำ ก่อนที่จะส่งสัญญาณเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์จึงต้องมีการขยายสัญญาณ และเมื่อคอมพิวเตอร์รับทราบสัญญาณที่ผ่านการขยายนี้แล้วจะแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนี้ให้เป็นค่าอุณหภูมิ โดยสมการความสัมพันธ์ที่ได้สร้างและถูกบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์

5.1.3 อุปกรณ์แปลงสัญญาณ digital เป็น analog และอุปกรณ์แปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นแรงดันลม

อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้สามารถหาความสัมพันธ์ของตัวแปรเข้าและออกได้โดยตรงจากการทดลองปรับและวัดค่า เพราะผลการตอบสนองของอุปกรณ์ทั้งสองนี้รวดเร็วมาก ค่าขอบเขตที่ได้ในผลการทดลองเป็นข้อกำหนดของอุปกรณ์แต่ละตัว

5.1.4 อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย

วาล์วควบคุมแบบนิวแมติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะให้ผลของตัวแปรเข้าและตัวแปรออกในรูปของสมการเส้นตรง ดังที่กล่าวมาแล้วว่าวาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศจะถูกควบคุมโดยอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี ความสัมพันธ์ของตัวแปรหาได้โดยการทดลองปรับและคำนวณอัตราการไหลจากแรงดันตกที่เกิดคร่อมวาล์ว เทียบกับอัตราการไหลที่วัดได้จริง

5.1.5 เครื่องควบคุมและการปรับแต่งค่าคงที่ของเครื่องควบคุม

เมื่อได้ transfer function ของอุปกรณ์แต่ละหน่วยสามารถหา open loop transfer function ได้ จะพบว่า open loop transfer function ที่ได้เป็นกระบวนการอันดับ 1 ซึ่งกระบวนการนี้เมื่อวิเคราะห์ด้วยการตอบสนองเชิงความถี่ มุมเฟสจะมีค่าน้อยที่สุดแค่ -90° การปรับแต่งเครื่องควบคุมด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols ต้องการค่า ultimate period โดยการคำนวณจากความถี่ crossover ดังนั้นในการปรับแต่งจึงมีการเติมค่า dead time เพิ่มเข้าไป 0.5 นาที เสมือนกับว่าระบบควบคุมจะตอบสนองต่อสัญญาณการควบคุมช้าไป 0.5 นาที ทั้งนี้เพราะระบบควบคุมที่มี dead time จะเกิดมุมตามเป็นค่าลบมีค่ามากกว่า -180° ได้ เมื่อเทียบกับค่าเวลาคงที่

ซึ่งเท่ากับ 15.61 นาที จะเห็นว่ามีค่าน้อยมากเหมือนกับว่า dead time ที่เติมเข้าไปมีผลกระทบน้อยมาก ค่าคงที่ของเครื่องควบคุมที่ได้จะเป็นเพียงค่าที่เสนอแนะให้ใช้ในการควบคุมเท่านั้นจึงสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้

5.2 การควบคุมการเผาไหม้ด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ

รูปแบบการควบคุมที่เลือกใช้คือ การควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) มีลักษณะการควบคุมคือ สัญญาณค่าอุณหภูมิจากการเผาไหม้ซึ่งเป็นตัวแปรออกที่วัดค่าได้ของระบบถูกนำกลับมาใช้พิจารณาปรับค่าอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี การพิจารณาตัวแปรโดยรวมของทั้งระบบควบคุมการเผาไหม้ แสดงดังนี้

- ตัวแปรเข้าปรับค่าได้ ได้แก่ อัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีและอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งสามารถปรับได้โดยวาล์วควบคุมแบบนิวแมติก
- ตัวแปรเข้าคงที่ ได้แก่ องค์ประกอบของก๊าซแอลพีจีและอากาศที่ใช้ขณะทำการทดลอง ซึ่งค่าองค์ประกอบเหล่านี้ไม่สามารถควบคุมได้ขณะทำการเผาไหม้
- ตัวแปรออกวัดค่าได้ ได้แก่ อุณหภูมิของการเผาไหม้วัดด้วย thermocouple และองค์ประกอบของฟลูก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้วัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ
- ตัวแปรออกวัดค่าไม่ได้ ได้แก่ ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ ปริมาณความร้อนที่ใช้ไป ปริมาณความร้อนสูญเสีย ซึ่งเป็นค่าที่ต้องคำนวณจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

5.3 การทดสอบการควบคุมการเผาไหม้ด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ

เครื่องควบคุมแบบป้อนกลับทำการทดสอบโดยการควบคุมการเปลี่ยน set point เป็นแบบ step ที่อุณหภูมิ 500, 700, 900 และ 600 ^{o}C ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการชักตัวอย่างเท่ากับ 1 นาที สมการเครื่องควบคุมที่ใช้อยู่ในแบบ velocity form ผลการทดลองควบคุมเพื่อหาแบบการควบคุมที่เหมาะสมแสดงดังนี้

5.3.1 เครื่องควบคุมแบบ proportional

ผลการควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบ P จะพบว่าอุณหภูมิภายในเตาเผามีการแกว่งอยู่บนค่า set point ที่ตั้งไว้ และตามทฤษฎีเครื่องควบคุมแบบ P ควรจะเกิด offset ขึ้น แต่ผลจากการทดลองไม่มี offset ปรากฏเพราะว่าระบบควบคุมที่ใช้เป็นแบบ digital control ซึ่งจะมีส่วนของ hold element ในการแปลงค่าสัญญาณควบคุม digital เป็นสัญญาณควบคุม analog เมื่อระบบควบคุมมีส่วนของ hold element เหมือนกับว่ามีส่วน integral เพิ่มขึ้นมา ดังนั้นเมื่อนำเครื่องควบคุมแบบ P ใช้งานกับ digital control จึงกลายเป็นเครื่องควบคุมแบบ PI ทำให้ไม่เกิด offset ส่วนผลการควบคุมเกิดการแกว่งอาจเนื่องมาจากค่า proportional gain ที่ได้จากปรับมีค่าสูงเกินไป แต่แนวโน้มของตัวแปรเข้าในการควบคุมแต่ละช่วงจะแกว่งแบบ amplitude ลดลง จึงอาจคาดเดาได้ว่าในการควบคุมแต่ละช่วงใช้เวลาในการติดตามผลสั้นเกินไป ถ้าติดตามผลนานกว่านี้คาดว่าอุณหภูมิคงจะเลิกแกว่งและเท่ากับ set point ที่ต้องการได้

5.3.2 เครื่องควบคุมแบบ proportional integral

ผลการควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบ PI พบว่าเครื่องควบคุมสามารถควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตาม set point ที่ตั้งไว้ได้ในทุกช่วงโดยไม่มีการแกว่งของอุณหภูมิ อีกทั้งผลของตัวแปรเข้าก็มีลักษณะราบเรียบไม่เกิดการแกว่งอีกด้วย

5.3.3 เครื่องควบคุมแบบ proportional integral derivative

ผลการควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบ PID พบว่า ผลการควบคุมอุณหภูมิจะได้ตาม set point ที่ตั้งไว้เฉพาะที่อุณหภูมิ 500 °C แต่ก็มีการแกว่งของอุณหภูมิอยู่บ้างเล็กน้อย ส่วนอุณหภูมิ set point อื่น ๆ ผลการควบคุมจะแกว่งมาก และเมื่อนำผลของตัวแปรเข้าคืออัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีมาประกอบการวิเคราะห์ พบว่าการปรับตัวแปรเข้าจะเป็นลักษณะอัตราการไหลสูงสุดและต่ำสุดสลับกันไปเหมือนกับว่าระบบอยู่ในสภาวะไม่คงที่ จึงทำการทดลองอีกครั้งโดยปรับลดค่า proportional gain ลงไปเท่ากับเครื่องควบคุมแบบ PI เพราะคาดเดาว่าค่า proportional gain ของเครื่องควบคุมแบบ PID ที่ได้จากการปรับแต่งจากผลการทดลองอาจจะมีค่าสูงเกินไป ผลการทดลองเมื่อลดค่า proportional gain แล้วปรากฏว่าเครื่องควบคุมแบบ PID สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาได้ตรงตาม set point ที่ตั้งไว้ อุณหภูมิการควบคุมไม่เกิดการแกว่ง และเมื่อเทียบผลการควบคุมกับเครื่องควบคุมแบบ PI พบว่าเครื่องควบคุมแบบ PI จะให้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเข้าสู่ set point ได้เร็วกว่าเครื่องควบคุมแบบ PID ที่ปรับลดค่า proportional gain แล้วเล็กน้อย

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงสถิติของเครื่องควบคุมทั้ง 3 แบบ พบว่าเครื่องควบคุมแบบ PI จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด และการใช้ก๊าซแอลพีจีในการควบคุมให้ได้ตาม set point ที่ต้องการมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการใช้งานเครื่องควบคุมสำหรับควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาตามรูปแบบที่ต้องการ เครื่องควบคุมแบบ PI มีความเหมาะสมที่สุด

5.4 การทดลองควบคุมการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผาด้วยเครื่องควบคุมแบบ PI

จากการทดลองควบคุมการเผาไหม้ก๊าซเพื่อควบคุมการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมแบบ PI ที่ได้สามารถควบคุมอุณหภูมิและรูปแบบการเผาไหม้ให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ผลการคำนวณสมดุลมวลสารและสมดุลพลังงานในส่วนที่คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้เฉลี่ยต่อเวลาในช่วงที่อุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าคงที่สามารถบ่งชี้ถึงผลการควบคุมที่ได้จริง เช่นช่วงอุณหภูมิคงที่ที่ 800 ^{o}C ของการทดลองเผา compound clay ที่ อุณหภูมิ 800 ^{o}C อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้เฉลี่ยต่อเวลาในช่วงนี้มีค่าเท่ากับ -0.042 ซึ่งตามค่าการควบคุมที่ตั้งไว้ควรมีค่าเป็นศูนย์ และข้อมูลการทดลองในส่วนขององค์ประกอบในฟลูก๊าซจะพบว่าข้อมูลที่บันทึกได้มีการแกว่ง อีกทั้งผลของอุณหภูมิภายในเตาเผาจะมีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก เมื่อคำนวณสมดุลพลังงานและสมดุลมวลสารทำให้ได้ค่าสมดุลมีการแกว่งของค่าตามไปด้วย

5.5 การทดลองเครื่องควบคุมกับระบบควบคุมจำลอง

การทดสอบผลการทดลองที่ได้จากการเผาจริงกับระบบควบคุมจำลองที่สร้างขึ้น จะเห็นได้ชัดเจนว่าระบบควบคุมจำลองที่สร้างขึ้นมีผลการตอบสนองของตัวแปรออกคืออุณหภูมิเหมือนกับผลการทดลองจริง ส่วนผลของตัวแปรเข้าคืออัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีมีลักษณะและแนวโน้มที่คล้ายกันมาก ดังนั้นการวิเคราะห์ระบบควบคุมโดยการทำการทดลองด้วยระบบควบคุมจำลองสามารถนำมาใช้งานได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.5.1 เครื่องควบคุมแบบ proportional integral

เครื่องควบคุมแบบ PI เมื่อให้ τ_I มีค่าคงที่และเปลี่ยนค่า K_c ผลการทดลองแสดงว่าเมื่อมีการเพิ่มค่า K_c ขึ้นระบบควบคุมมีแนวโน้มที่จะเป็นสภาวะไม่คงที่ และเมื่อลด K_c ระบบควบคุมจะมีการตอบสนองที่ช้าลง ส่วนผลการควบคุมเมื่อให้ K_c คงที่ เปลี่ยนค่า τ_I ผลการทดลองแสดงว่าเมื่อมีการเพิ่มค่า τ_I ระบบจะมีแนวโน้มการควบคุมที่แม่นยำขึ้น และเมื่อลดค่า τ_I การควบคุมจะมีแนวโน้มที่จะเป็นสภาวะไม่คงที่

5.5.2 เครื่องควบคุมแบบ proportional integral derivative

ผลการควบคุมเมื่อเปลี่ยนค่า K_c และให้ τ_I และ τ_D คงที่ เมื่อใช้ค่าที่ได้จากการทดลองพบว่าผลการควบคุมจะแกว่งและมีแนวโน้มสภาวะไม่คงที่ แต่เมื่อลดค่า K_c ลงระบบควบคุมสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามต้องการ เมื่อลดค่า K_c ลงไปมากระบบควบคุมจะตอบสนองช้าลง ส่วนผลการเปลี่ยนค่า τ_I และ τ_D เมื่อให้ K_c คงที่นั้น จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มค่า τ_I หรือลดค่า τ_D จะช่วยแก้ไขการเกิดการควบคุมสภาวะไม่คงที่ได้ดีทั้งในช่วงการเปลี่ยน set point แบบ ramp และการรักษาค่า set point ให้คงที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย