บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 คุณสมบัติของถ่านหินและโดโลไมท์

จากคุณสมบัติถ่านหินที่วิเคราะห์ได้นั้นแสดงว่า ถ่านหินที่ใช้มีคุณภาพต่ำ เนื่องจากมีปริมาณเถ้าสูงและปริมาณคาร์บอนคงตัวน้อย แต่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาแก่ระบบการเผาไหม้ในฟลูอิไดซ์เบด เพราะในระบบมีท่อล้นเพื่อระบายเถ้าที่ได้จากการเผาไหม้และยังเป็นตัวกำหนดความสูงของเบดด้วย ส่วนค่าความร้อนของถ่านหินสามารถบอกได้ว่า ถ่านหินที่ใช้เป็นถ่านหิน Subbituminous C

จากคุณสมบัติของโดโลไมท์พบว่า โดโลไมท์มีแคลเซียมและแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบอยู่สูง ทำให้การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีประสิทธิภาพมากด้วย

5.2 การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบดด้วยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด

การเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบดที่ควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงกว่า 90 % (3) ไม่ทำให้เกิดมลพิษในอากาศเพราะโดโลไมท์สามารถกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟต จากการศึกษาระบบการควบคุมแบบนี้ทราบว่าในการเผาไหม้ถ่านหินจะแบ่งลักษณะการควบคุมได้เป็น 2 ช่วง คือ

5.2.1 ช่วงการควบคุมเริ่มต้น เมื่อเริ่มการจุดเตาจะต้องป้อนถ่านหินเป็นช่วงๆ ให้อุณหภูมิค่อยๆ เพิ่มขึ้นเพื่อให้ปริมาณถ่านหินที่ป้อนกับการเผาไหม้ภายในเบดมีความสัมพันธ์กันจนกว่าจะได้อุณหภูมิตามต้องการ หรือเป็นช่วงที่ต้องควบคุมโดยผู้ควบคุม

5.2.2 ช่วงการควบคุมเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ต้องการแล้ว ผู้ควบคุมสามารถปล่อยให้เครื่องควบคุมทำการควบคุมอุณหภูมิเองตามลักษณะการทำงานของเครื่องควบคุม

ลักษณะอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ควบคุมได้มีการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิสูงอยู่ในช่วง $\pm$ 30 °ซ ดังรูปที่ 4.1 ทั้งนี้เพราะถ่านหินที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งเพื่อทำให้อุณหภูมิภายในเบดมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นช่วงนี้อุณหภูมิในเบดจึงลดลงกว่าที่กำหนดมาก อีกทั้งปริมาณถ่านหินที่ป้อนเข้าจะมีปริมาณมากเพราะเครื่องควบคุมจะหยุดป้อนถ่านหินเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่กำหนด จึงเป็นผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นไปมากกว่าที่ต้องการ การควบคุมโดยเครื่องควบคุมแบบนี้จึงมีการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิมาก ซึ่งถ้าอุณหภูมิเบดมีการเบี่ยงเบนมากจะทำให้อุณหภูมิของฟลูก๊าซไม่คงที่ด้วย เป็นผลให้

ค่าความร้อนที่ได้จากฟลูก๊าซมีค่าไม่แน่นอนก่อให้เกิดปัญหาความยุ่งยากในการนำไปใช้งานได้ ดังนั้นถ้ามีการเปลี่ยนเครื่องควบคุมที่มีรูปแบบการทำงานที่เหมาะกับระบบการเผาไหม้มากขึ้นก็น่าจะสามารถควบคุมให้อุณหภูมิการเผาไหม้ในเบดได้คงที่มากขึ้น ค่าการเบี่ยงเบนน้อยลง

จากการพัฒนาเทคโนโลยีที่เจริญก้าวหน้าไปอย่างมากนั้น เครื่องคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทในงานด้านต่างๆ อย่างมาก ซึ่งคอมพิวเตอร์สามารถทำงานได้หลายลักษณะขึ้นกับตัวโปรแกรมและการประยุกต์ใช้งาน ดังนั้นถ้านำเอาไมโครคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ควบคุมระบบการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบด โดยให้รูปแบบการทำงานของโปรแกรมเป็นแบบเดียวกับเครื่องควบคุมและแก้ข้อเสียของเครื่องควบคุมนั้น การควบคุมด้วยวิธีนี้น่าจะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าใช้เครื่องควบคุมโดยตรง ผู้วิจัยจึงศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบด และผลของตัวแปรต่างๆ ต่อระบบการเผาไหม้ต่อไป

5.3 การพัฒนาโปรแกรมซอฟท์แวร์สำหรับควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบด

จากการทำงานที่ได้ศึกษาในระบบการเผาไหม้ที่ควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด ทำให้ทราบว่าระบบการทำงานในโปรแกรมควรมีส่วนสำคัญอย่างน้อย 2 ส่วน (ในหัวข้อ 4.3) คือ ส่วนควบคุมโดยผู้ควบคุม และส่วนควบคุมแบบอัตโนมัติ แต่ในระบบการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์การนำค่าสัญญาณเข้ามาเปรียบเทียบต้องเหมาะสมกับค่าที่เครื่องกำหนด และค่าสัญญาณที่เครื่องได้รับนั้นเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งต้องมีการเปลี่ยนเป็นค่าตัวเลข เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่กำหนด ดังนั้นในการทำงานของโปรแกรมจึงมีส่วนสำคัญเพิ่มขึ้นอีกส่วน คือ ส่วนที่ใช้สำหรับอ่านค่าอุณหภูมิโดยเครื่องคอมพิวเตอร์จะรับสัญญาณในรูปของกระแสไฟฟ้าจากเทอร์โมคัปเปิลมาขยายสัญญาณให้เหมาะสมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ จากนั้นตัวโปรแกรมจะเปลี่ยนค่าเป็นค่าตัวเลขเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าในการควบคุมต่อไป เมื่อนำมาเขียนเป็นโปรแกรมควบคุมด้วยภาษาที่ใช้สำหรับเครื่อง ซึ่งมีหลายภาษา (36) เช่น ภาษาเบสิก , ภาษาฟอร์แทรน , ภาษาซี และภาษาปาสคาล เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ภาษาเบสิกซึ่งเป็นภาษาพื้นฐานที่ง่าย ใช้ได้กับงานทั่วไป รูปแบบของภาษาไม่ซับซ้อน จึงเหมาะกับงานวิจัยขั้นพื้นฐาน

เมื่อเขียนโปรแกรมตามรูปแบบการทำงานที่วางไว้แล้ว จึงจะนำโปรแกรมนั้นมาทดสอบการควบคุมต่อไป คือ

5.3.1 ทดสอบการควบคุมของไมโครคอมพิวเตอร์

เมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนระบบการควบคุมใหม่จึงต้องลองทดสอบดูว่าระบบทำงานได้หรือไม่โดยใช้โปรแกรมที่ควบคุมโดยผู้ควบคุม ซึ่งผลการควบคุมที่ได้ไมโครคอมพิวเตอร์สามารถ

ควบคุมกระบวนการเผาไหม้ได้อย่างดี ไม่ทำให้เกิดการหลอมตัวของเถ้า (slag) ภายในเบด สามารถควบคุมระบบให้เข้าสู่สภาวะคงที่และรักษาอุณหภูมิการเผาไหม้ในเบดให้คงที่ได้ตลอดเวลา ทดลองดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิที่ควบคุมได้อยู่ในแนวที่ต้องการ ค่าการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิอยู่ในช่วง $\pm$ 10 °ซ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้เครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด (ค่าการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิอยู่ในช่วง $\pm$ 30 °ซ) ทั้งนี้เพราะการควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์จะมีการป้อนถ่านหินอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา แต่เป็นปริมาณที่มากและน้อยต่างกันตามค่าของอุณหภูมิการเผาไหม้ คือ ถ้าค่าอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิที่ต้องการ ผู้ควบคุมจะทำการลดอัตราการป้อนถ่านหินลงเล็กน้อย หรือเพิ่มอัตราการป้อนเมื่ออุณหภูมิที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าที่ต้องการ ผลการเผาไหม้จึงค่อนข้างคงที่กว่าการป้อนและหยุดของเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด

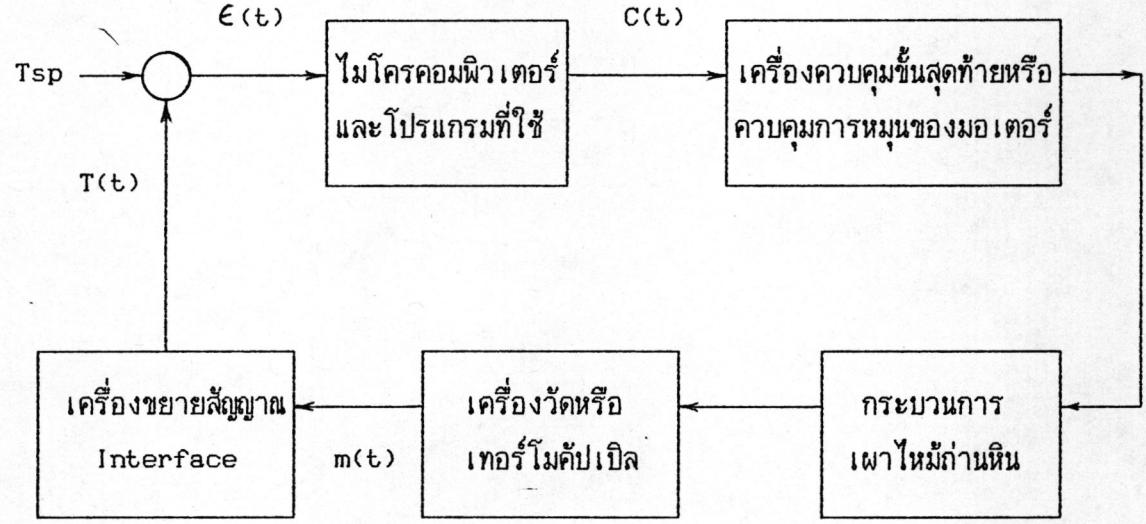
เมื่อไมโครคอมพิวเตอร์สามารถใช้ควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินได้ แต่ยังจำเป็นต้องใช้ผู้ควบคุมทำการควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นถ้าจะนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรมแล้วจะเกิดปัญหาด้านบุคลากรซึ่งจะเสียทั้งค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและเวลา ถ้าไมโครคอมพิวเตอร์สามารถควบคุมกระบวนการได้อย่างอัตโนมัติเองแล้ว จะช่วยให้เกิดความสะดวกและคล่องตัวมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงทดลองหารูปแบบการทำงานของโปรแกรมในส่วนการควบคุมอัตโนมัติเพื่อควบคุมการเผาไหม้ให้ได้ตามต้องการต่อไป

5.3.2 ทดสอบโปรแกรมส่วนควบคุมแบบอัตโนมัติ

จากลักษณะการควบคุมโดยโปรแกรมควบคุมโดยผู้ควบคุมในช่วงที่มีการควบคุมระบบให้อยู่ในสภาวะคงที่หรือค่าอุณหภูมิคงที่นั้น จะมีการปรับค่าอัตราการป้อนถ่านหินเพียงเล็กน้อยก็สามารถควบคุมระบบให้อยู่ในสภาวะคงที่ได้ ดังนั้นรูปแบบการทำงานโปรแกรมควบคุมแบบอัตโนมัติจึงมีลักษณะของความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงของอัตราการป้อนถ่านหินกับอุณหภูมิให้สอดคล้องกับการควบคุมที่ผ่านมา คือ ให้มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการป้อนน้อย ซึ่งความสัมพันธ์เริ่มแรกที่ใช้ไม่สามารถควบคุมระบบการเผาไหม้ให้อยู่ในสภาวะคงที่ได้ดังรูป 4.3 เพราะเริ่มแรกของการควบคุมแนวโน้มของอุณหภูมิอยู่ในแนวที่ต้องการ เมื่อทำการควบคุมไปได้สักครู่ค่าอุณหภูมิจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะคอมพิวเตอร์มีความสามารถในการทำงานสูง จึงมีการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิเพื่อนำมาปรับค่าอัตราการป้อนถ่านหินถี่เกินไป ทำให้ค่าความสัมพันธ์ที่คิดว่าเหมาะสมเปลี่ยนเป็นค่าที่มากเกินไป ทำให้โปรแกรมนี้ไม่สามารถรักษาสภาวะการเผาไหม้ภายในเตาให้คงที่ได้ ดังนั้นจึงทำการทดลองโดยเปลี่ยนความสัมพันธ์ให้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนถ่านหินน้อยลง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 ซึ่งการควบคุมนี้มีลักษณะการควบคุมคล้ายกับโปรแกรมเก่าแต่จะสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในแนวที่ต้องการได้นานกว่าโปรแกรมเดิม ทั้งนี้เพราะค่าความสัมพันธ์การเปลี่ยน

แปลงที่ใช้น้อยกว่าโปรแกรมเดิม แต่ก็ยังไม่สัมพันธ์กับความสามารถในการทำงานของคอมพิวเตอร์

จากโปรแกรมทั้งสองที่ผ่านมาไม่สามารถควบคุมกระบวนการเผาไหม้ได้นานเท่าที่ต้องการ ความสัมพันธ์ที่ใช้เป็นการคาดเดาและสมมุติขึ้นซึ่งยังไม่เหมาะสมกับระบบ จึงต้องหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมใหม่ ความสัมพันธ์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ ความสัมพันธ์ตามหลักการของการควบคุมกระบวนการทางเคมี (29,32) ซึ่งมีความสัมพันธ์ของการควบคุมหลายรูปแบบให้เลือก การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) เป็นรูปแบบหนึ่งของการควบคุมที่เหมาะสมกับงานวิจัยที่ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุม มีลักษณะการควบคุมคือ สัญญาณค่าอุณหภูมิการเผาไหม้ซึ่งเป็นตัวแปรป้อนออกที่วัดค่าได้ของระบบถูกนำกลับมาใช้พิจารณาปรับค่าอัตราการป้อนถ่านหินซึ่งเป็นตัวแปรป้อนเข้าที่สามารถปรับค่าได้ แสดงแผนผังได้ดังนี้



ชนิดของตัวแปรในระบบการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบด คือ

- ตัวแปรป้อนเข้าปรับค่าได้ ได้แก่ อัตราการป้อนถ่านหินและอากาศ ซึ่งสามารถปรับค่าได้จากความเร็วในการหมุนของมอเตอร์และการเปิดปิดวาล์วควบคุมการป้อนอากาศ
- ตัวแปรป้อนเข้าคงที่ ได้แก่ องค์ประกอบของถ่านหิน, โดโลไมท์ และอากาศที่ใช้ขณะทำการทดลอง ซึ่งค่าองค์ประกอบเหล่านี้ไม่สามารถควบคุมได้ขณะทำการเผาไหม้
- ตัวแปรป้อนออกวัดค่าได้ ได้แก่ อุณหภูมิของการเผาไหม้และของฟลูก๊าซวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล องค์ประกอบของฟลูก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้วัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ และปริมาณเถ้าจากท่อล้นและไซโคลน

- ตัวแปรป้อนออกวัดค่าไม่ได้ ได้แก่ ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ ปริมาณความร้อนสูญเสีย ซึ่งเป็นค่าที่ต้องคำนวณหาจากข้อมูลที่ทดลองได้

ตัวแปรแต่ละตัวในระบบจะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน เมื่อหาสมการความสัมพันธ์จึงควรยึดตัวแปรตัวหนึ่งเป็นหลัก ในที่นี้ใช้ค่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่ต้องการซึ่งตัวแปรป้อนเข้าทุกตัวมีผลต่อค่าอุณหภูมิ แต่ตัวแปรที่ควบคุมได้ คือ ปริมาณถ่านหินและอากาศ ในงานวิจัยนี้ให้ปริมาณอากาศในการเผาไหม้มีค่าคงที่ เพื่อปรับเฉพาะค่าปริมาณถ่านหินจะช่วยทำให้รูปแบบความสัมพันธ์ในการควบคุมง่ายขึ้น การหาค่าความสัมพันธ์ของระบบสามารถหาได้ 2 วิธีคือ หาจากการคำนวณทางทฤษฎี หรือหาจากการทดลอง ซึ่งงานวิจัยนี้มีเครื่องมือที่สามารถทำการทดลองได้แล้วจึงเลือกหาค่าความสัมพันธ์ของระบบจากการทดลอง ทั้งนี้เพราะให้ความแน่นอนมากกว่าทางทฤษฎี โดยทำการทดลองเพิ่มค่าอัตราการป้อนถ่านหินจากเดิมที่สภาวะการเผาไหม้คงที่ไปเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งรอจนกระทั่งสภาวะการเผาไหม้คงที่อีกครั้งที่ปริมาณอากาศคงที่ จะได้ค่าคงที่ของระบบและค่าคงที่ของเครื่องควบคุมตามสมมุติฐานของ Cohen & Coon ดังในหัวข้อ 4.2 ซึ่งค่าคงที่เหล่านี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการของระบบและตัวแปรป้อนเข้าที่มีผลต่อระบบ (29,34) การเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบดมีสภาวะการติดไฟไม่เหมือนกันในแต่ละครั้งของการทดลอง ทำให้ค่าคงที่ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่ได้เล็กน้อย

ในการใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมกระบวนการต่างๆ นั้นส่วนสำคัญคือ โปรแกรมที่ใช้ซึ่งเปรียบเสมือนกับการทำงานของเครื่องควบคุม เครื่องควบคุมสำหรับการควบคุมแบบป้อนกลับนั้นมีหลายแบบซึ่งมีข้อดีและข้อเสียต่างกันไปคือ -

- เครื่องควบคุมแบบ P (Proportional) เครื่องควบคุมแบบนี้จะทำให้เกิดค่า offset ของการควบคุม

- เครื่องควบคุมแบบ PI (Proportionl Integral) เครื่องควบคุมแบบนี้สามารถกำจัดค่า offset แต่จะเกิดการแกว่งของอุณหภูมิที่ควบคุมมาก

- เครื่องควบคุมแบบ PID (Proportionl Integral Derivative) เครื่องควบคุมแบบนี้สามารถกำจัดค่า offset และลดค่าการแกว่งของอุณหภูมิ ซึ่งเป็นเครื่องควบคุมที่ดีที่สุดตามทฤษฎี แต่ถ้าสัญญาณที่ส่งผ่านในการควบคุมมีความผิดพลาดไปแม้เพียงเล็กน้อยจะทำให้ผลการควบคุมที่ได้ผิดพลาดไปมาก (29) เพราะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณการควบคุมขึ้นกับค่าความสัมพันธ์หลายตัวจึงทำให้ผลที่คำนวณได้มีโอกาสผิดพลาดได้มากกว่าเครื่องควบคุมแบบอื่น

แต่การใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ในการควบคุมโดยเขียนโปรแกรมควบคุมให้ทำงานตามแบบเครื่องควบคุมที่ต้องการและยังสามารถพัฒนาโปรแกรมแก้ไขข้อบกพร่องของเครื่องควบคุมนั้นได้ตาม

ความเหมาะสม ดังในการทดลองกับโปรแกรมที่พัฒนาต่อไป

5.4 การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบดด้วยโปรแกรมแบบ P, PI, PID

โปรแกรมควบคุมแบบอัตโนมัติจากความสัมพันธ์เดิมนั้น ไม่สามารถควบคุมการเผาไหม้ให้อยู่ในสภาวะคงที่ได้ จึงทดลองใช้โปรแกรมในรูปแบบการควบคุมตามหลักของการควบคุมกระบวนการทางเคมี โดยกำหนดเวลาในการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพื่อให้สัมพันธ์กับการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลการทดลองควบคุมเพื่อหาโปรแกรมที่เหมาะสมต่อไปดังนี้

5.4.1 <u>โปรแกรมควบคุมแบบ P</u>

ผู้วิจัยเลือกใช้การควบคุมแบบนี้ก่อนเพราะมีรูปแบบความสัมพันธ์ที่ง่ายที่สุด คือ

อัตราการป้อนถ่านหิน = Kc(อุณหภูมิที่กำหนด - อุณหภูมิที่วัดได้) + อัตราการป้อนถ่านหินที่สภาวะเดิม

....(5.1)

ในการทำงานของโปรแกรมกำหนดช่วงของอุณหภูมิที่ยอมรับได้ว่าสภาวะการเผาไหม้คงที่ = $\pm$ 5 °ซ เมื่อทดลองใช้โปรแกรมใหม่นี้ควบคุมโดยใช้ค่าคงที่ Kc = 40 step/ °C ตามสมมุติฐานของ Cohen & Coon เวลาในการเปรียบเทียบ = 10 วินาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าแนวโน้มของอุณหภูมิไม่อยู่ในสภาวะคงที่เพราะอุณหภูมิมีการแกว่งเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราการป้อนถ่านหินมีการเปลี่ยนแปลงมากเกินไป ซึ่งตรงกันข้ามกับสภาวะความเป็นจริงในการควบคุมให้ระบบการเผาไหม้คงที่ อัตราการป้อนถ่านหินจะต้องเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในระบบที่คงที่เดิมอยู่แล้ว ดังนั้นค่าคงที่ Kc จึงน่าจะมีค่าน้อยด้วย ทั้งนี้ได้ทำการทดลองสนับสนุนผลการทดลองที่ได้โดยเปลี่ยนค่าเวลาในการเปรียบเทียบไปเป็น 15 วินาที ก็ยังไม่สามารถควบคุมระบบให้อยู่ในสภาวะคงที่ได้เหมือนเดิม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาค่า Kc จากความสัมพันธ์อื่นต่อไป

จากการหาค่าคงที่ของกระบวนซึ่งมีสมการความสัมพันธ์ คือ

ผลต่างของ step = (1/Kp)(ผลต่างของอุณหภูมิ) ....(5.2)

เมื่อเทียบกับสมการความสัมพันธ์แบบ P จะได้

Kc = 1/Kp = 12 step/ °C ....(5.3)

ซึ่งค่า Kc ใหม่นี้มีค่าน้อยกว่าค่าเดิม ดังนั้นจึงทดลองควบคุมโดยใช้ค่า Kc ใหม่ และหาเวลาในการเปรียบเทียบที่เหมาะสม เนื่องจากในระบบการเผาไหม้จริงนั้นการเพิ่มอุณหภูมิของการเผาไหม้ต้องใช้เวลานานกว่าการลดอุณหภูมิ ในโปรแกรมที่พัฒนามานี้จึงเขียนให้มีลักษณะการทำงานที่สอดคล้องคือ ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าที่กำหนดโปรแกรมจะส่งสัญญาณไปเพิ่มอัตราการป้อนถ่านหินแล้วโปรแกรมจะรอให้เวลาผ่านไปตามที่ผู้ควบคุมกำหนด จึงจะนำค่าอุณหภูมิมาเปรียบเทียบอีกครั้ง ซึ่งกำหนดค่าได้จากจำนวนการวนรอบ ผลของการหาช่วงเวลาที่เหมาะสมมีดังนี้ คือ

ควบคุมโดยใช้ค่าคงที่ Kc = 12 step/°C เวลาในการเปรียบเทียบ = 25 วินาที จำนวนการวนรอบ = 7 สมการความสัมพันธ์ที่ใช้คือ

อัตราการป้อนถ่านหินใหม่ = Kc(อุณหภูมิที่กำหนด - อุณหภูมิที่วัดได้) + อัตราการป้อนถ่านหินเดิม

....(5.4)

ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 ซึ่งแนวโน้มของอุณหภูมิที่ได้แกว่งอยู่ในแนวที่ต้องการเป็นลักษณะลูกคลื่นค่อนข้างคงที่ แสดงว่าค่า Kc ใหม่นี้เหมาะสมกับระบบการเผาไหม้มากกว่าค่า Kc เดิม แต่ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิยังไม่เหมาะสมโดยจะเห็นได้จากลักษณะกราฟที่ยังเป็นลูกคลื่นอยู่ ดังนั้นจึงทดลองลดเวลาในการเปรียบเทียบลงเป็น 15 วินาที จำนวนการวนรอบ = 7 ได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ผลการทั้งสองสามารถรักษาค่าอุณหภูมิให้อยู่ในแนวที่ต้องการได้ดีกว่าเมื่อใช้เวลาในการเปรียบเทียบเป็น 25 วินาที แต่สภาวะการควบคุมได้ดีไม่เหมือนกัน คือ จากผลการทดลองในรูปที่ 4.7 จะมีการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิมากกว่าการทดลองครั้งต่อมาในรูปที่ 4.8 ทั้งนี้เพราะสภาวะการติดไฟเริ่มต้นของถ่านหินไม่เหมือนกันแต่อุณหภูมิที่ได้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้นค่าเวลาในการเปรียบเทียบ = 15 วินาที จึงเป็นค่าที่เหมาะกับกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบด แต่เมื่อทดลองเปลี่ยนช่วงเวลาเป็น 10 วินาที จำนวนการวนรอบ = 8, 7 และ 6 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9, 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในแนวที่ต้องการได้ดีเหมือนกับเมื่อใช้เวลาในการเปรียบเทียบ 15 วินาที แต่ที่จำนวนการวนรอบ = 6 จะมีการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิมากที่สุดและที่สภาวะเดียวกันนี้เปลี่ยนเวลาการเปรียบเทียบเป็น 15 วินาที จำนวนการวนรอบ = 7 อุณหภูมิที่ได้มีการเบี่ยงเบนมากในช่วงแรกแล้วการเบี่ยงเบนค่อยๆ ลดลง ดังนั้นช่วงเวลาที่เหมาะสมนั้นขึ้นกับสภาวะการเผาไหม้ขณะนั้นๆ ด้วย แต่อยู่ในช่วง 10-15 วินาที

จากการทดลองที่ผ่านมาโดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่ จะมีการเบี่ยงเบนมากถ้าเวลาใน

การเปรียบเทียบไม่เหมาะสมหรือสัญญาณมีความผิดพลาด เพราะค่าอัตราการป้อนถ่านหินจะเปลี่ยนไปเรื่อยๆ จากค่าเดิม ดังนั้นผู้วิจัยจึงเปลี่ยนสมการความสัมพันธ์ใหม่เป็น

อัตราการป้อนถ่านหินใหม่ = Kc(อุณหภูมิที่กำหนด - อุณหภูมิที่วัดได้) + อัตราการป้อนถ่านหินที่สภาวะคงที่

....(5.5)

ซึ่งค่าอัตราการป้อนถ่านหินที่สภาวะคงที่นี้จะมีค่าคงที่ โปรแกรมใหม่นี้มีรูปแบบการทำงานดังรูปที่ 4.12 ผลการควบคุมที่ได้เมื่อใช้สมการความสัมพันธ์นี้ ค่าคงที่ Kc = 12 เวลาในการเปรียบเทียบเป็น 10 วินาที จำนวนการวนรอบ = 2 สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ดีกว่าสมการความสัมพันธ์เดิมดังรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าแนวโน้มของอุณหภูมิคงที่มากกว่าการควบคุมที่ผ่านมา จำนวนการวนรอบที่ใช้มีค่าลดลง ช่วงเวลาที่เหมาะสำหรับกระบวนการมีมากขึ้น คือ สามารถใช้เวลาในการเปรียบเทียบเป็น 10-15 วินาทีก็ได้ เพราะปริมาณการเปลี่ยนแปลงของถ่านหินที่ได้จะอยู่ใกล้เคียงค่าที่ทำให้ระบบมีสภาวะคงที่อยู่เดิมจึงทำให้แนวโน้มของอุณหภูมิมีค่าคงที่ยิ่งขึ้น แต่ค่าอุณหภูมิที่คงที่นั้นไม่ใช่ค่าต้องการแต่จะต่างจากค่าอุณหภูมิที่ต้องการประมาณ 10 °ซ ทั้งนี้เพราะโปรแกรมควบคุมเป็นแบบ P ซึ่งมีข้อเสียคือ จะเกิดค่า offset หรือช่องว่างระหว่างค่าที่ควบคุมได้กับค่าที่กำหนด(29,34) ดังนั้นจึงมีผู้ศึกษาเครื่องควบคุมชนิดใหม่เพื่อลดค่า offset ที่เกิดขึ้น คือ เครื่องควบคุมแบบ PI ดังนั้นเราจึงทดลองเครื่องควบคุมแบบนี้ต่อไป

5.4.2 <u>โปรแกรมควบคุมแบบ PI</u>

เนื่องจากโปรแกรมควบคุมแบบ P เมื่อใช้ควบคุมจะเกิดค่า offset ซึ่งตามทฤษฎีแล้วสามารถแก้ไขได้โดยใช้เครื่องควบคุมแบบ PI เพราะสามารถกำจัดค่า offset ลงได้ทั้งหมด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเขียนโปรแกรมควบคุมแบบ PI และใช้ทดลองควบคุมการเผาไหม้ โดยความสัมพันธ์ที่ใช้ คือ

อัตราการป้อนถ่านหินใหม่ = Kc(อุณหภูมิที่กำหนด - อุณหภูมิที่วัดได้) + (Kc/τ_I)(พื้นที่ใต้กราฟระหว่างค่าผลต่างของอุณหภูมิกับเวลา) + อัตราการป้อนถ่านหินที่สภาวะคงที่

....(5.6)

โปรแกรมการควบคุมแบบนี้มีรูปแบบการทำงานดังรูปที่ 4.14 ผลการควบคุมสามารถลดค่า offset ลงได้ทั้งหมด แต่จะเกิดการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิในแนวแกนดังรูปที่ 4.15 เมื่อใช้ค่าคงที่ Kc = 12, τ_I = 1.2 นาที ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบเป็น 15 วินาที ในสภาวะการเผาไหม้นี้ค่าการ

วนรอบ = 1 จะเหมาะกว่าค่าการวนรอบ = 2 เนื่องจากการควบคุมแบบนี้ทำให้เกิดการแกว่งของอุณหภูมิมีลักษณะคล้ายลูกคลื่น แต่ค่าการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิยังน้อยกว่าเมื่อควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด เนื่องจากการควบคุมแบบนี้เกิดการแกว่งของอุณหภูมิสูงเป็นไปตามทฤษฎีจริงแล้ว เราสามารถแก้ไขการควบคุมแบบนี้ให้มีค่าการเบี่ยงเบนลดลงนั่นคือ ใช้เครื่องควบคุมแบบ PID ควบคุมแทนต่อไป

5.4.3 <u>โปรแกรมควบคุมแบบ PID</u>

โปรแกรมควบคุมแบบนี้สามารถช่วยลดค่าการแกว่งของอุณหภูมิที่เกิดจากการควบคุมแบบ PI ได้ ดังนั้นเมื่อนำโปรแกรมควบคุมแบบ PID ที่มีความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลง คือ

อัตราการป้อนถ่านหินใหม่ = K_c(อุณหภูมิที่กำหนด - อุณหภูมิที่วัดได้) + (K_c/τ_I)(พื้นที่ใต้กราฟระหว่างค่าผลต่างของอุณหภูมิกับเวลา) + $K_c\tau_D$ (ความชันของกราฟ) + อัตราการป้อนถ่านหินที่สภาวะคงที่

....(5.7)

โปรแกรมการควบคุมแบบนี้มีรูปแบบการควบคุมดังรูป 4.16 ผลการควบคุมที่ได้ยังมีการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิอยู่แต่ไม่ถี่เท่าโปรแกรมควบคุมแบบ PI ดังรูปที่ 4.17 เมื่อใช้ค่าคงที่ K_c = 12 , τ_I = 1.2 และ τ_D = 0.5 นาที ค่าเวลาในการเปรียบเทียบ = 15 วินาที จำนวนการวนรอบ = 1 ซึ่งการควบคุมแบบนี้ยังมีการเบี่ยงเบนอยู่เนื่องจากสมการความสัมพันธ์ขึ้นอยู่ค่าคงที่หลายค่า ถ้าค่าคงที่ที่ใช้ไม่เหมาะสมจะทำให้ผลการควบคุมไม่สามารถรักษาระบบให้คงที่ได้ดีพอ และถ้าค่าสัญญาณที่ส่งเข้ามามีความผิดพลาดแม้เพียงเล็กน้อยจะทำให้การควบคุมของเครื่องควบคุมแบบนี้ผิดพลาดไปมากกว่าที่ควรจะเป็น (29) ดังผลการทดลองรูปที่ 4.18 ซึ่งมีการผิดพลาดของการส่งสัญญาณค่าอุณหภูมิการเผาไหม้มายังเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำให้ผลการควบคุมผิดพลาดไปจากที่กำหนด แต่โปรแกรมจะสามารถควบคุมให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ได้ดังเดิมเมื่อค่าสัญญาณของอุณหภูมิถูกต้องแล้ว

ในระบบการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบดมีการส่งสัญญาณค่าอุณหภูมิไปตามสายของเทอร์โมคัปเปิล ผ่านเครื่องขยายสัญญาณเพื่อแปลงสัญญาณส่งเข้าไมโครคอมพิวเตอร์ ทำให้มีโอกาสเกิดการผิดพลาดของสัญญาณได้มาก ดังนั้นผู้วิจัยคิดว่าโปรแกรมควบคุมแบบ PID ที่ใช้ค่า K_c, τ_I และ τ_D ตามการทดลองไม่เหมาะที่จะใช้กับสภาวะการเผาไหม้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งโปรแกรมที่ผู้วิจัยคิดว่าเหมาะสมในงานวิจัยนี้ คือ โปรแกรมควบคุมแบบ P และ PI แต่โปรแกรมควบคุมแบบ P มีรูปแบบสมการการควบคุมที่ง่ายกว่า ซึ่งถ้าสามารถปรับปรุงให้แก้ปัญหาเรื่องค่า offset ที่เกิดขึ้นในการควบคุมได้แล้วโปรแกรมแบบนี้จะมีความเหมาะสมมากกว่าโปรแกรมแบบ PI เพราะค่าการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า และการควบคุมทำได้ง่ายกว่าด้วย

5.4.4 โปรแกรมควบคุมแบบ P ที่พัฒนาใหม่

เนื่องจากโปรแกรมควบคุมแบบ P เดิมนั้นจะเกิดค่า offset ในการควบคุม แต่ค่าการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิมีค่าน้อยที่สุดในโปรแกรมที่ควบคุมทั้ง 3 แบบ ดังนั้นถ้านำโปรแกรมแบบนี้มาพัฒนาให้การทำงานของโปรแกรมสามารถแก้ไขให้การควบคุมไม่มีค่า offset ได้ โปรแกรมนี้ก็คงจะเหมาะสมกับระบบการเผาไหม้แบบนี้มากที่สุด ซึ่งรูปแบบการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาใหม่นี้เป็นดังรูปที่ 4.19 คือ โปรแกรมจะมีการเปลี่ยนค่าอัตราการป้อนถ่านหินที่สภาวะคงที่เดิม เป็นอัตราการป้อนถ่านหินที่เปลี่ยนแปลงไปแล้วขณะนั้น เพื่อให้ค่าอัตราการป้อนถ่านหินพอเหมาะกับค่าอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ให้อยู่ในแนวของค่าที่กำหนดได้ไม่มีค่า offset เกิดขึ้นในการควบคุม และมีค่าการเบี่ยงเบนน้อยดังรูปที่ 4.20 เมื่อใช้ค่าคงที่ Kc = 12 เวลาในการเปรียบเทียบ = 15 วินาที จำนวนการวนรอบ = 2

ดังนั้นโปรแกรมควบคุมแบบอัตโนมัติที่ผู้วิจัยคิดว่าเหมาะสมกับกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบด คือ โปรแกรมควบคุมแบบ P ที่พัฒนาใหม่นี้เพราะสามารถแก้ปัญหาค่า offset ที่เกิดจากการควบคุมได้ ผู้วิจัยจึงใช้โปรแกรมนี้ในการควบคุมระบบการเผาไหม้เพื่อศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆ ที่มีต่อการเผาไหม้ต่อไป

5.5 ผลของตัวแปรที่มีต่อการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบดที่ควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์

การเผาไหม้ถ่านหินนอกจากจะให้พลังงานความร้อนแล้ว ยังให้ผลิตภัณฑ์อื่นๆ อีกเช่น เถ้าถ่านหิน และฟลูก๊าซ ซึ่งฟลูก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินมีองค์ประกอบอยู่หลายชนิด บางชนิดอาจก่อให้เกิดปัญหามลภาวะในอากาศ เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2), และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO) แต่สามารถกำจัดก๊าซเหล่านี้ได้หลายวิธี ในงานวิจัยนี้ใช้โดโลไมท์ผสมกับถ่านหินในการเผาไหม้ เพื่อกำจัดก๊าซ SO_2 ให้อยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟต แต่การผสมโดโลไมท์ในการเผาไหม้นี้จะทำให้มีปริมาณเถ้าสูงกว่าเมื่อใช้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว จึงใช้เทคนิคฟลูอิไดเซชันเข้าช่วยในการเผาไหม้ซึ่งในระบบนี้จะมีท่อล้นเพื่อเป็นตัวกำหนดความสูงของเบด และยังช่วยในการระบายเถ้าออกจากเบดอีกด้วย ดังนั้นด้วยเทคนิคนี้ปริมาณเถ้าจึงไม่มีผลต่อระบบการเผาไหม้ การเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบดมีตัวแปรที่ต้องควบคุมหลายตัวแปรเพื่อจะให้ได้พลังงานจากถ่านหินมากที่สุด ในงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ และปริมาณก๊าซ SO_2 และ NO ในฟลูก๊าซเมื่อการเผาไหม้ควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ ผลของการควบคุมเมื่อแบ่งตามตัวแปรได้ดังนี้

5.5.1 ความเร็วอากาศ

อากาศเป็นตัวแปรสำคัญที่จะทำให้การเผาไหม้เกิดได้สมบูรณ์ ดังนั้นปริมาณอากาศส่วนใหญ่ที่ป้อนเข้าสู่เบดจะมีปริมาณมากเกินพอ (excess air) และในระบบฟลูอิไดเซชันความเร็วอากาศจะเป็นตัวกำหนดให้ระบบเกิดการฟลูอิไดซ์ เมื่อความเร็วอากาศที่ใช้สูงกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิไดซ์ สภาวะการเผาไหม้ในเบดจะเป็นลักษณะฟลูอิไดซ์ช่วยให้การถ่ายเทมวลสารเกิดได้ดี แต่ถ้าความเร็วอากาศสูงเกินไปจะทำให้เกิดการปลิวหลุดของอนุภาคขนาดเล็กมากขึ้นด้วย (1) ซึ่งผลการปลิวหลุดนี้จะมีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กที่ปลิวหลุดออกมาจะมีถ่านหินขนาดเล็กที่เกิดจากการแตกหัก กับถ่านหินที่เผาไหม้ไม่หมดแต่เหลือขนาดเล็กจนสามารถถูกพัดพาออกมาได้ (ขนาดวิกฤต) จึงทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ขึ้นกับความเร็วอากาศดังกราฟรูปที่ 4.21 เห็นว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงอีกครั้งเมื่อความเร็วอากาศสูงเกินกว่า 43.88 เมตร/นาที ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องจากการปลิวหลุดของอนุภาคมีมากขึ้นเมื่อความเร็วอากาศสูงขึ้น เพราะประสิทธิภาพการเผาไหม้ขึ้นกับความร้อนที่สูญเสียจากการปลิวหลุดและการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (17) ตามสมการ

$$\eta_c = 100\left(1 - \frac{\text{ความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากการปลิวหลุดและท่อไหลล้น}}{\text{ความร้อนของถ่านหินที่ป้อนเข้าเตาเผาทั้งหมด}}\right) \quad \ldots.(5.8)$$

ส่วนที่ความเร็วอากาศต่ำเกินไปอนุภาคที่ปลิวหลุดมีปริมาณน้อย แต่ปริมาณอากาศไม่เหมาะสมกับปริมาณถ่านหินที่ใช้ในการเผาไหม้ ดังนั้นการเผาไหม้จึงเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ประสิทธิภาพที่ได้จึงมีค่าน้อยเมื่อความเร็วอากาศต่ำหรือสูงเกินไป แต่ทั้งนี้ยังมีค่าสูงกว่าการเผาไหม้ด้วยวิธีอื่น (10)

ในระบบฟลูอิไดเซชันการสัมผัสกันระหว่างก๊าซกับของแข็งเป็นไปอย่างทั่วถึงทำให้ประสิทธิ์ภาพการถ่ายเทมวลสาร (K_g) เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น (1,5) ดังสมการ

$$Sh = \frac{K_g d_p Y}{D_g} = 2.0 + 0.6Sc^{1/3} Re_p^{1/2} \quad \ldots.(5.9)$$

ซึ่งในการกำจัดก๊าซ SO_2 ของโดโลไมท์ที่ใช้ในการเผาไหม้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผสมระหว่าง CaO กับ ก๊าซ SO_2 เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศมากขึ้นปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดีสามารถกำจัดก๊าซ SO_2 ได้มากดังการทดลองแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศจาก 36.55 เป็น 38.94

เมตร/นาที ปริมาณก๊าซ SO_2 ที่ปลดปล่อยจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีดังกล่าว แต่เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศจาก 38.94 เป็น 41.81 เมตร/นาที ปริมาณก๊าซ SO_2 ที่ปลดปล่อยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศเป็น 43.88 เมตร/นาที ปริมาณก๊าซ SO_2 เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ผลการทดลองที่ได้เมื่อเพิ่มความเร็วสูงมากๆ นี้ไม่สอดคล้องกับทฤษฎีดังกล่าว แต่สามารถอธิบายได้ด้วยผลการทดลองของ Damronglerd และคณะ (41) พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศสูงมากๆ สภาวะภายในเบดเปลี่ยนไป เบดอาจจะอยู่ในสภาวะที่เรียกว่า เบดเจือจาง (dilute bed) ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารลดลง จึงทำให้การทำปฏิกิริยาระหว่างโดโลไมท์หรือ CaO กับก๊าซ SO_2 เกิดได้น้อยลง อีกทั้งเมื่อความเร็วอากาศสูงโอกาสที่ก๊าซ SO_2 จะถูกจับด้วย CaO จะน้อยลงเพราะก๊าซ SO_2 ถูกพัดพาออกไปเร็วขึ้น จึงทำให้ปริมาณก๊าซ SO_2 ที่ปลดปล่อยออกมาสูงขึ้นด้วย

ก๊าซ NO จะมีปริมาณสูงขึ้นเมื่อความเร็วอากาศสูงขึ้น ดังกราฟรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าปริมาณก๊าซ NO จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นตั้งแต่ค่าความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาที ที่ความเร็วอากาศ 36.55 เมตร/นาที มีปริมาณก๊าซ NO สูงกว่าที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาที ทั้งนี้เพราะการเกิดก๊าซ NO ยังขึ้นกับปริมาณถ่านหินที่ใช้ในการเผาไหม้แต่ละสภาวะด้วย เมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 4.24 จะเห็นว่าปริมาณถ่านหินที่ป้อนเข้าสู่เบดที่ความเร็วอากาศ 36.55 เมตร/นาที จะมากกว่าที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาที สภาวะการเผาไหม้ที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาที มีโอกาสเกิดปริมาณก๊าซ NO น้อยกว่าและมีความเจือจางที่ปริมาณฟลูก๊าซมากกว่า จึงมีปริมาณก๊าซ NO ที่วัดได้น้อยกว่าที่ความเร็วอากาศ 36.55 เมตร/นาที

ผลของความเร็วอากาศต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้และปริมาณก๊าซ SO_2 และ NO เป็นลักษณะเดียวกับเมื่อควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด ดังนั้นเมื่อใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินแทน จึงไม่ส่งผลกระทบให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้และปริมาณก๊าซ SO_2 และ NO มีการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มเมื่อเปลี่ยนความเร็วอากาศ

5.5.2 อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์

ในการทดลองเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ SO_2 และพิจารณาดูว่ามีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้หรือไม่ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ดังผลการทดลองรูปที่ 4.25 และ 4.26 ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ได้ของแต่ละอัตราส่วนที่ใช้มีค่าไม่แน่

นอนไม่สามารถบอกแนวโน้มได้ ทั้งนี้เพราะประสิทธิภาพการเผาไหม้ไม่ขึ้นกับอัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ เนื่องจากว่าอัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์น้อยลงอัตราการป้อนของผสมเข้าสู่เบดจะมากขึ้นเพื่อชดเชยปริมาณที่ขาดไปในสภาวะเดียวกัน ในการทดลองการเผาไหม้ของแต่ละสภาวะจะต้องการปริมาณถ่านหินไม่เท่ากันดังกราฟรูปที่ 4.27 และ 4.28 จะเห็นว่าแต่ละอัตราส่วนของถ่านหินต่อโดโลไมท์ปริมาณถ่านหินที่ป้อนมีค่าไม่แน่นอนต่างกันไป ทั้งที่ในการทดลองมีค่าความเร็วอากาศและอุณหภูมิเดียวกัน จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ไม่แน่นอนดังกล่าวซึ่งค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เฉลี่ยประมาณ 97 %

ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์กับปริมาณก๊าซ SO_2 ที่ปลดปล่อย โดยคิดเฉพาะองค์ประกอบของแคลเซียมในโดโลไมท์กับซัลเฟอร์ในถ่านหินในรูปอัตราส่วนโดยมวล ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.29 และ 4.30 ปรากฏว่าแนวโน้มของปริมาณก๊าซ SO_2 ที่ปลดปล่อยออกมาจะลดลงประมาณ 40 % (เทียบกับค่าสูงสุด) เมื่ออัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์น้อยลงหรือ Ca/S มากขึ้นประมาณ 65 % (เทียบกับค่าต่ำสุด) และจะค่อนข้างคงที่เมื่ออัตราส่วน Ca/S สูงกว่า 5.11 โดยมวล (อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ 3:1 โดยน้ำหนัก) ทั้งนี้เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณโดโลไมท์ที่ป้อนเข้าสู่เบดมากขึ้นจะสามารถกำจัดก๊าซ SO_2 ได้มาก แต่เนื่องจากปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซ SO_2 เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวภายนอกของโดโลไมท์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสังเกตได้จากเถ้าที่อยู่ในเบดหรือจากท่อล้น เม็ดโดโลไมท์จะมีสีน้ำตาลแต่เมื่อนำมาบดจะพบว่าภายในเม็ดโดโลไมท์ยังเป็นสีขาวอยู่ โดยผู้วิจัยหลายท่านได้ให้เหตุผลไว้ว่า ก๊าซ SO_2 ที่ทำปฏิกิริยากับ CaO ดังสมการที่ 5.10

$$CaO + SO_2 + 1/2O_2 \longrightarrow CaSO_4 \quad ....(5.10)$$

แล้วเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าขนาดของรูพรุนของเม็ดโดโลไมท์ดังนั้นสารประกอบ $CaSO_4$ จึงไปอุดตันรูพรุนเหล่านี้ไว้ และเนื่องจากโดโลไมท์เมื่อได้รับความร้อนจะแตกตัวเป็น CaO ที่บริเวณผิวของอนุภาคก่อน ปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นที่ผิวทำให้เกิดสารประกอบ $CaSO_4$ ซึ่งทำให้เกิดการขัดขวางการแพร่ของก๊าซ SO_2 ที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ CaO ภายในอนุภาค ฉะนั้นภายในเม็ดโดโลไมท์จึงยังคงมี CaO เหลืออยู่ และเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ต้องใช้ปริมาณของ Ca/S โดยมวลมากกว่า 1:1 ตามสมการปฏิกิริยา

จากผลการทดลองที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิดได้ผลการทดลองสอดคล้องกัน ดังนั้นการใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อผลที่เกิดจากการเปลี่ยนอัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์แต่อย่างใด

5.5.3 อุณหภูมิเบด

ช่วงอุณหภูมิเบดที่ใช้ศึกษาในการทดลอง คือ 750 - 900 °ซ ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงตามสมมติฐานของ Basu และผู้ร่วมงาน (16) เพราะเนื่องจากก๊าซ CO_2 มีโอกาสน้อยมากที่จะทำปฏิกิริยากับอนุภาคคาร์บอนแล้วได้ก๊าซ CO สำหรับค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ยังขึ้นอยู่กับค่าความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากการปลิวหลุดรวมทั้งการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ คือ เกิดก๊าซ CO จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเบดกับประสิทธิภาพการเผาไหม้เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.31, 4.32 และ 4.33 เห็นได้ว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงกว่า 90 % และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งผลการทดลองที่ได้ต่างจากสมมติฐานและผลงานวิจัยของนักวิทยาศาสตร์หลายท่านรวมทั้งผลงานวิจัยของสมบัติ (3) ด้วย ทั้งนี้อาจเนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการควบคุมการเผาไหม้ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ โปรแกรมที่ใช้ควบคุมเป็นลักษณะของเครื่องควบคุมแบบ P ทำให้มีการป้อนถ่านหินอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาจึงทำให้มีปริมาณถ่านหินที่ปลิวหลุดและระบายออกทางท่อล้นมากกว่าปกติ และถ้าต้องการให้อุณหภูมิของเบดสูงขึ้นต้องป้อนถ่านหินเข้าสู่เบดมากดังกราฟรูปที่ 4.34, 4.35 และ 4.36 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการป้อนถ่านหินจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 50 °ซ อัตราการป้อนถ่านหินจะเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 10 ถึง 20 กรัม/นาที เมื่อปริมาณถ่านหินที่ป้อนสูงแต่ความสูงภายในเบดคงที่ ทำให้มีโอกาสที่เถ้าที่ออกจากท่อล้นมีปริมาณมากขึ้น (ดังผลการทดลองในตารางที่ ค1) และเมื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนในเถ้าจากท่อล้นที่แต่ละอุณหภูมิจะมีค่าความร้อนที่เหลืออยู่ไม่แน่นอน มีค่าอยู่ในช่วงไม่เกิน 50 - 400 แคลอรี/กรัม เมื่อคิดประสิทธิภาพการเผาไหม้จึงทำให้แนวโน้มของประสิทธิภาพการเผาไหม้ส่วนมากมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ในระบบการเผาไหม้ที่ควบคุมแบบเปิด-ปิดนั้นจะทำการป้อนถ่านหินเป็นช่วงๆ เมื่อถ่านหินถูกเผาไหม้เหลือปริมาณน้อยลงแล้วจึงทำการป้อนถ่านหินใหม่ เมื่อปริมาณถ่านหินมากพอที่ต้องการตามค่าอุณหภูมิแล้วจึงหยุดป้อน ดังนั้นโอกาสที่จะสูญเสียปริมาณถ่านหินและเถ้าทางท่อล้นจึงน้อยกว่าเมื่อควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์

ส่วนความสัมพันธ์ของการปลดปล่อยก๊าซ SO_2 กับอุณหภูมิที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.37, 4.38 และ 4.39 จะเห็นว่าปริมาณก๊าซ SO_2 ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลงานวิจัยของนักวิจัยหลายท่าน (10,20) และตามจริงแล้วในช่วงอุณหภูมิ 750 - 850 °ซ ปริมาณก๊าซ SO_2 ที่ถูกปลดปล่อยจะไม่เพิ่มสูงมากเพราะโดโลไมท์สามารถแตกตัวได้ดีที่ช่วงอุณหภูมินี้ ดังผลงานวิจัยของสมบัติ (3) แต่ในการใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมการเผาไหม้จะมีการป้อนถ่านหินมากดังกล่าวแล้ว จึงมีผลให้ปริมาณก๊าซ SO_2

ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีปริมาณก๊าซ SO_2 สูงกว่าปกติเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณก๊าซ NO ที่ปลดปล่อยเป็นดังกราฟรูปที่ 4.40, 4.41 และ 4.42 พบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามค่าอุณหภูมิซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของนักวิจัยที่ผ่านมา (20) ซึ่งการเกิดก๊าซ NO ในการเผาไหม้แบบฟลูอิไดซ์เบดนี้ยังไม่เป็นที่ทราบกลไกการเกิดแน่ชัด แต่พอจะกล่าวได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 50 °ซ ก๊าซ NO จะมีปริมาณมากขึ้นประมาณ 30 - 60 %