

วิจารณ์ผลการทดลอง

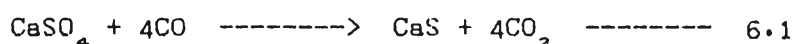
6.1 การเผาไหม้ถ่านหินผสมโดโลไมท์

โดโลไมท์ที่ผสมกับถ่านหินแล้วบ้อนเข้าสู่เบตนั้น นอกจากจะทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ SO_2 แล้วยังช่วยให้อุณหภูมิเบตไม่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นรวดเร็วเกินไป ที่เป็นเช่นนี้เพราะโดโลไมท์ใช้ความร้อนจำนวนหนึ่งจากเบตมาทำให้ตัวเองแตกตัวเป็นออกไซด์ก่อนแล้วจึงจะไปดูดซับ SO_2 ฉะนั้นอุณหภูมิเบตจึงสามารถควบคุมให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ง่ายกว่าในเบตที่ไม่ผสมโดโลไมท์ และการหลอมตัวของถ่านไม่เกิดขึ้น การเผาไหม้จึงกระทำได้อย่างต่อเนื่องดังกราฟของอุณหภูมิเบตเทียบกับเวลา (รูปที่ 5.3, 5.4, 5.14 และ 5.15) และก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้มีกลิ่นฉุนจางลง จึงได้ศึกษาตัวแปรต่างๆที่เกิดขึ้นในเบต อาทิ อุณหภูมิของเบต อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ ความเร็วอากาศ และความสูงของเบต เป็นต้น ดังมีรายละเอียดของผลการทดลองดังต่อไปนี้

6.1.1 อุณหภูมิเบต

ความร้อนที่ได้รับจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่านหิน ทำให้อุณหภูมิของเบตเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้บนเครื่องควบคุมแบบอัตโนมัติ เครื่องนี้ส่งสัญญาณไปยังสวิทช์ของมอเตอร์ให้หยุดทำการบ้อนถ่านหิน ถ่านหินภายในเบตถูกเผาไหม้เหลือจำนวนน้อยลง อุณหภูมิเริ่มลดลง เครื่องควบคุมส่งสัญญาณให้มอเตอร์บ้อนถ่านหินต่อไปดังนี้ตลอดการทดลองดังผลการทดลองดังรูป 5.3, 5.4, 5.14 และ 5.15 ขณะเดียวกันได้เก็บก๊าซตัวอย่างที่เกิดจากการเผาไหม้แล้วมาวิเคราะห์หาปริมาณของ SO_2, NO, O_2, CO_2 และ CO พบว่าปริมาณก๊าซ SO_2 ลดน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่ออุณหภูมิของเบตสูงขึ้นจาก $750-850^{\circ}C$ ทั้งนี้เพราะโดโลไมท์เมื่อสลายตัวแล้วกลายเป็นแคลเซียมออกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติดูดซับ SO_2 ได้ดีที่อุณหภูมิ $750-850^{\circ}C$ (15, 35, 52) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเราเรียกว่า ซัลเฟชัน แต่เมื่ออุณหภูมิของเบตสูงมากขึ้น ปริมาณ SO_2 ที่ทางออกของเบตกลับเพิ่มปริมาณสูงขึ้นดังผลทดลองแสดงในรูปที่ 5.5, 5.16, 5.17 และ 5.18 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Avedesion และ Davidson (15), Abel และคณะ (52) และ Schemai (35) ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นสิ่งที่แปลก นักวิทยาศาสตร์ยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างเด่นชัด (35) มีแต่เพียงข้อเสนอแนะเอาไว้ว่า เมื่ออุณหภูมิในเบตสูงอาจเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (27, 35) โดย CO กลับไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบซัลเฟตใหม่แล้วปล่อยก๊าซ SO_2

ออกมาตั้งสมการ



นอกจากนี้ Westinghouse Research (53) ยังได้แสดงผลการวิจัยไว้ว่า เมื่ออุณหภูมิของเบตสูงขึ้นการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะลดลง โดยมีข้อสมมติฐาน 2 ประการ กล่าวคือ

ประการที่ 1 เกิดปฏิกิริยาระหว่างถ่านหินกับตัวดูดซับเป็นชั้นฟิล์มบางๆ ขวาง

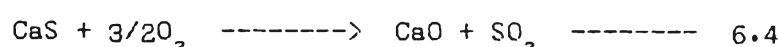
การทำปฏิกิริยาของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ประการที่ 2 เกิดปฏิกิริยาการรีดิวซ์ในวัฏภาคหนาแน่น

ข้อสมมติฐานข้อที่ 2 คล้ายกับข้อเสนอแนะของนักวิทยาศาสตร์หลายท่านที่ได้กล่าวไว้ว่า ปฏิกิริยารีดักชันของ CO_2 และ C atom เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 950°C ซึ่งทั้ง Argonne National Laboratories และ Pope, Evans (54) และ Robbins (55) ก็สนับสนุนสมมติฐานข้อดังกล่าวด้วย ทั้งยังให้เหตุผลประกอบด้วยโดยมีพื้นฐานในการพิจารณาว่า ในระบบฟลูอิดเบต ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเมื่อก๊าซในวัฏภาคฟองแพร่ไปยังผิวของอนุภาค บริเวณเหนือแผ่นกระจายอากาศมีออกซิเจนอยู่ในวัฏภาคหนาแน่นมากทำให้เกิดปฏิกิริยากับถ่านหินอย่างรวดเร็ว ออกซิเจนบริเวณนี้จึงถูกใช้หมดไปทำให้อุณหภูมิบริเวณผิวของถ่านหินสูงมาก ทำให้มีคาร์บอนบางส่วนที่ยังไม่ทันเผาไหม้เกิดปฏิกิริยากับ CO_2 ได้เป็น CO ดังนั้นเมื่อฟองก๊าซลอยตัวสูงขึ้นผ่านเบตไปเรื่อยจะมีการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างวัฏภาคหนาแน่นและวัฏภาคฟอง จึงทำให้ภายในเบตมีออกซิเจนน้อยกว่าบริเวณเหนือเบตเกิดปฏิกิริยาดังนี้



และส่วนเหนือเบตเกิดปฏิกิริยา





CaO เมื่อถูกซึบ SO_2 เข้าไปแล้วเป็นสารประกอบซัลเฟตอยู่ตามบริเวณผิวของเม็ดแร่ โดโลไมท์ สารประกอบนี้มีขนาดปริมาตรของโมเลกุลใหญ่กว่า CaO เมื่อเกิดขึ้นมาก ๆ จึงทำให้ รุปรุนที่อยู่ในโดโลไมท์เกิดการอุดตันหมดโอกาสที่โมเลกุลของ SO_2 แทรกตัวเข้าไปทำปฏิกิริยากับ ออกไซด์ต่อไปได้ สิ่งเกิดได้อย่างชัดเจนบนเม็ดแร่ที่ทำปฏิกิริยากับ SO_2 แล้วจะเกิดเป็นสิน้ำตาล ของซัลเฟต ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยายังมีสีขาวเหมือนเดิม การคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของ SO_2 Ho และคณะ (56) ได้ลองพยายามใช้แบบจำลอง Grain model สัมพันธ์กับแบบจำลองของ ฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed model) ดังสมการข้างล่างนี้

$$X_{AF} = 1 - C_{AF}/C_{A,0} \quad \text{6.7}$$

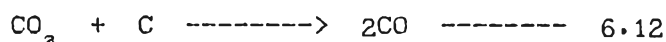
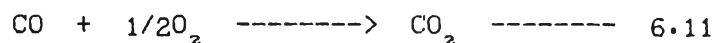
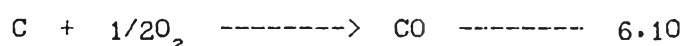
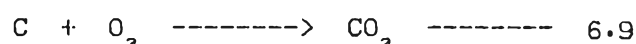
เมื่อ $C_{A,0}$ เป็นความเข้มข้นของ SO_2 ที่เข้า
 C_{AF} เป็นความเข้มข้นของ SO_2 ที่ออก ซึ่งมีค่าเป็น

$$C_{AF} = \{(U-V_B) \times C_{A,0}\} / U + (V_B/U) \times C_{A,bf} \quad \text{6.8}$$

$C_{A,0}, C_{A,bf}$ เป็นความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 ที่ออกจากวัฏภาคหนาแน่นและวัฏภาคฟอง ตามลำดับ จากแบบจำลองที่ Ho (56) สรุปว่าการกำจัด SO_2 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราส่วน Ca/S รวมทั้งความเร็วอากาศ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของ SO_2 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอาจตั้งสมมติฐานได้ว่า CaO จับกับ SO_2 ในลักษณะที่เป็นแบบ chemi-sorption จึงทำให้ปริมาณ SO_2 ที่ปลดปล่อยมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่ายังไม่มีรายงานใดๆ ปรากฏเพื่อยืนยันสมมติฐานข้อนี้ดังนั้น จึงต้องหาข้อมูลต่างๆ เพื่อสนับสนุนสมมติฐานนี้ต่อไป

ในขณะที่กำลังถกเถียงกันในด้านหินถูกออกซิไดซ์เป็น SO_2 ไนโตรเจนที่มีอยู่ในเตาเผาจะทำ ปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เป็น NO จากการทดลองพบว่าปริมาณ NO ที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณมากเมื่อ อุณหภูมิเบตสูงขึ้น ดังรูปที่ 5.6, 5.19 และ 5.20 นักวิทยาศาสตร์พบว่า การเกิดและการสลายตัวของ NO ในฟลูอิไดซ์เบดเป็นอย่างไรยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด (8) แต่พบว่าปริมาณ NO เพิ่มขึ้น ตามอุณหภูมิ (33, 35, 36) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.6, 5.19 และ 5.20 ดังนั้นการเผาไหม้ที่ใช้อุณหภูมิต่ำจึงมีปริมาณ NO ต่ำกว่าระบบการเผาไหม้แบบอื่น ๆ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้พบว่า การเผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลูอิดไธซ์ให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์สังเกตได้จากปริมาณ CO ดังตารางที่ 5.6 และ 5.7 ซึ่งมีค่าต่ำมาก มีค่าไม่เกิน 1.2% โดยปริมาตร จากกราฟรูปที่ 5.7, 5.21, 5.22 และ 5.23 พบว่าเมื่อเบดมีอุณหภูมิสูงขึ้น ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้นด้วย แต่อัตราการเพิ่มขึ้นไม่สูงมากนัก กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 750 ถึง 850 °C ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้นประมาณ 1% เท่านั้น จากกราฟรูปที่ 5.21, 5.22 และ 5.23 สังเกตได้อย่างชัดเจนว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับความเร็วอากาศเป็นอย่างมาก ซึ่งจะได้กล่าวถึงผลของความเร็วอากาศต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่อไป สำหรับผลของอุณหภูมินั้น อาจกล่าวได้ว่า เนื่องจากปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเร็ว มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากมาย ที่สำคัญดังนี้



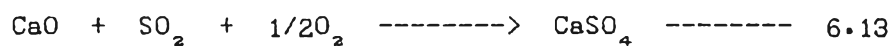
พบว่าปฏิกิริยาที่ 6.9 และ 6.10 เกิดได้ดี และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (800-1200 °C) คาร์บอนมอนอกไซด์จะถูกออกซิไดซ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ นอกจากนี้ Basu และผู้ร่วมงาน (23) ยังพบอีกว่าปฏิกิริยาที่ 6.12 ไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลย ดังนั้นการเผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบดซึ่งมีอุณหภูมิเบด 750-900 °C มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง

6.1.2 อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์

อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์โดยน้ำหนักพิจารณาในรูปของอัตราส่วนของแคลเซียมในโดโลไมท์ต่อกำมะถันในถ่านหินโดยโมล ผสมกันโดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านหินคิดเป็นร้อยละตั้งแต่ 50-85 หรือโดยโมลเท่ากับ 2.25-8.49 โดยประมาณ เมื่อนำเอาถ่านหินผสมโดโลไมท์ในสัดส่วนต่างๆกันมาทำการเผาไหม้และวัดปริมาณ SO_2 ปรากฏว่าเมื่ออัตราส่วน



Ca/S เพิ่มขึ้น ปริมาณ SO_2 จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 5.8, 5.24, 5.25 และ 5.26 เมื่อพิจารณารูปเหล่านี้พบว่าถ้าปริมาณ Ca/S อยู่ในช่วง 2-3 ปริมาณ SO_2 จะลดลงอย่างรวดเร็วถ้าหากเพิ่ม Ca/S ขึ้นอีกจนมากกว่า 5 พบว่าปริมาณ SO_2 ที่ปลดปล่อยมีปริมาณเกือบคงที่จะเห็นได้ว่าปริมาณ Ca/S ที่ใช้มากกว่า 1 เมื่อพิจารณาจากสมการรวมของการกำจัดกำมะถันดังนี้



แคลเซียมจะทำปฏิกิริยาพอดีกับกำมะถันมีอัตราส่วนเป็น 1:1 โมล แต่เนื่องจากปฏิกิริยานี้ให้ CaSO_4 ไปอุดตันและขัดขวางการทำปฏิกิริยาของ SO_2 ทำให้ CaO ที่อยู่ในถังยังทำปฏิกิริยาไม่หมด จึงต้องใช้ปริมาณแคลเซียมมากกว่าปริมาณมวลสารสัมพันธ์ดังกล่าว เมื่อนำถ่านที่อยู่ในเบดออกมาพบว่าในกรณีที่มีปริมาณ SO_2 ที่ปลดปล่อยออกมาน้อยถ่านจะมีสีน้ำตาลเป็นส่วนมากเห็นได้ชัดเจน และเมื่อนำมาบดปรากฏว่าสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นบนเม็ดถ่านดูดซับแต่ละเม็ดนั้นจะเคลือบอยู่ที่ผิวเท่านั้น ภายในยังคงมีสีขาวและเปราะ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการกำจัด SO_2 ของโดโลไมท์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ผิว สมมติฐานนี้สอดคล้องกับการทดลองของนักวิทยาศาสตร์หลายๆท่าน (35, 38, 39, 40) และการทดลองนี้ยังสนับสนุนสมมติฐานที่ว่า CaSO_4 ที่เกิดขึ้นจะไปขัดขวางการแพร่ของ SO_2 (5) ทำให้การกำจัด SO_2 ของ CaO เกิดได้ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณ Ca/S จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ดังรูปที่ 5.9, 5.27 และ 5.28 เพราะว่าการเพิ่มปริมาณ Ca/S ซึ่งหมายถึงการเพิ่มโดโลไมท์และลดปริมาณถ่านหินเป็นเพียงการลดเชื้อเพลิงเท่านั้น ระบบการเผาไหม้ซึ่งควบคุมอุณหภูมิเบดโดยการควบคุมการป้อนเชื้อเพลิงให้มีอุณหภูมิตามต้องการเพียงแต่ปรับอัตราการป้อนมากขึ้นเมื่อปริมาณเชื้อเพลิงน้อย ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้เลย

6.1.3 ความเร็วอากาศ

อากาศที่ถูกป้อนเข้าเตาเผาทำหน้าที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรก ช่วยพองเบดให้เกิดการเคลื่อนที่ มีพฤติกรรมเหมือนของไหล (fluidization) และประการที่สองช่วยทำปฏิกิริยาโดยเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาสำคัญๆ เช่น การออกซิไดซ์กำมะถันในถ่านหิน และการเผาไหม้อุณหภูมิคาร์บอน เป็นต้น อากาศจึงมีอิทธิพลต่อปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์และประสิทธิภาพการเผาไหม้

พิจารณารูปต่างๆดังรูปที่ 5.9, 5.10, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 5.33, 5.34 และ

5.35 พบว่าเมื่อความเร็วอากาศสูงขึ้น SO_2 มีปริมาณลดลงและเพิ่มขึ้นมากเมื่อความเร็วอากาศสูงขึ้น จากกราฟรูปที่ 5.29, 5.30, 5.31 และ 5.32 แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วอากาศสูงขึ้นจาก 45.72-56.93 เมตร/นาที ใช้อัตราส่วน Ca/S 5.46, 3.18 ความคุมอุณหภูมิเบต 750 °ซ ให้ประสิทธิภาพการกำจัด SO_2 ดังนี้

Ca/S (โดยโมล)	ความเร็วอากาศ (เมตร/นาที)	SO_2 (ppm)	η_s (%)
5.46	45.72	9.5	82.68
	48.88	3.7	91.40
	56.93	7.5	87.79
3.18	45.72	7.8	85.52
	48.88	2.4	95.17
	56.93	6.2	87.82
	60.40	13.7	72.53

เนื่องจากความเร็วอากาศทำให้การถ่ายเทมวลสารเปลี่ยนแปลงไป โดยการถ่ายเทมวลสารแสดงในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลโดยสัมพันธ์กับค่าของเซอรันด์ดังนี้

$$N_{sH} = R_m d / D_m \quad \text{-----} \quad 6.14$$

ค่าของเซอรันด์มีสมการความสัมพันธ์ต่างๆมากมายดังในตารางที่ 2.1 ซึ่งสรุปได้ว่า

$$N_{sH} \quad \text{เป็นฟังก์ชันกับ} \quad Re \quad \text{และ} \quad Sc$$

โดยที่ค่าของ Schmidt (Sc) เป็นค่าที่แสดงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหล(อากาศ)ที่ความดันและอุณหภูมิหนึ่งๆ มีค่าเท่ากับ $\mu / \rho D_m$ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักทำให้ค่าของเซอรันด์หรือ

การถ่ายเทมวลสารในฟลูอิดที่เบดขึ้นกับค่าของเรโนลด์ (Re) ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วอากาศเป็น $U d \rho / \mu$ ดังนั้นการถ่ายเทออกซิเจนจากวัฏภาคของไปยังวัฏภาคนาแนแนจึงเกิดได้ดีเมื่อความเร็วอากาศสูง ทำให้ SO_2 ทำปฏิกิริยากับ CaO ได้ง่าย แต่เนื่องจากว่าเมื่อความเร็วอากาศสูงจะทำให้เบดมีขนาดของฟองก๊าซโตขึ้นและภายในเบดอาจเกิดการไหลของอากาศเป็นช่อง (channeling) ทำให้พื้นที่การถ่ายเทมวลสารระหว่างวัฏภาคทั้งสองลดลง รวมทั้งธรรมชาติของปฏิกิริยาของ SO_2 กับ CaO ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบเนื้อผสม จึงทำให้ปริมาณ SO_2 สูงขึ้นเมื่อความเร็วอากาศสูงขึ้นมา

ในทำนองเดียวกันเมื่อความเร็วอากาศสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นและจะลดลงอย่างทันทีทันใดเมื่อความเร็วอากาศสูงขึ้น ดังรูปที่ 5.12, 5.13, 5.38, 5.39 และ 5.40 เนื่องจากปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเร็วมาก จึงทำให้อัตราผลของความเร็วอากาศต่อการถ่ายเทมวลไม่เด่นชัด โดยเฉพาะในระบบฟลูอิด และเมื่อถ่านหินถูกเผาไหม้อุณหภูมิจะมีขนาดเล็กลง (shrinkage) ตลอดเวลาจนกระทั่งมีขนาดวิกฤตจึงถูกพัดพาออกจากเบด ทำให้คาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดเกิดการสูญเสียทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง สังเกตจากตารางที่ 5.7 จากจำนวนถ่านที่ปลิวหลุดทางไซโคลนเพิ่มขึ้น ดังนั้นในระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดเซชันซึ่งให้การเผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์ คือมีปริมาณ CO เพียงเล็กน้อย (ไม่เกิน 1.2%) มีการสูญเสียประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยการปลิวหลุดของอนุภาคนขนาดเล็กตั้งแต่ 0-6% (จากสมดุลมวลสารและพลังงาน) ดังนั้นเพื่อลดการสูญเสียอนุภาคคาร์บอนที่เผาไหม้ยังไม่หมดจากการปลิวหลุดนี้ จึงทำการขยายพื้นที่หน้าตัดและความสูงของฟริบอร์ค เพื่อลดความเร็วอากาศตรงบริเวณเหนือเบดทำให้อนุภาคนขนาดเล็กที่ปลิวหลุดออกจากเบดเกิดการเผาไหม้ต่อจนสมบูรณ์ก่อนที่จะปลิวหลุดออกจากเตาเผาทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น ดังตารางที่ 5.6 ซึ่งเป็นเตาเผาที่มีระยะฟริบอร์คน้อยๆ ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยเฉลี่ยตลอดการทดลอง 82.54% เมื่อใช้ความเร็วอากาศ 37.34-47.52 เมตร/นาทิต (1.1-1.4 เท่าของความเร็วต่ำสุด) และตารางที่ 5.7 ซึ่งเป็นเตาเผาที่มีระยะฟริบอร์คสูงๆ ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เฉลี่ย 95.45% ที่ความเร็วอากาศ 45.72-60.40 เมตร/นาทิต (1.5-2.0 เท่าของความเร็วต่ำสุด) และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.7 พบว่าน้ำหนักถ่านและปริมาณคาร์บอนคงตัวในถ่านจากไซโคลนมีค่าน้อยลงเมื่อขยายฟริบอร์ค และจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกอิสระ (terminal velocity, U_t) ของอนุภาคทรงกลมขนาดเล็ก (fine solid)

$$U_t = \sqrt{g(\rho_p - \rho_g)d_p/18} \quad \text{-----} \quad 6.15$$

อนุภาคที่ปลิวหลุดออกมามีดังตารางที่ 5.7 จะมี U_t ดังนี้

Ca/S (โดยโมล)	air vel. ม/นาทึ	เก็บจากไซโคลน			U _c ม/นาทึ
		นน., กรัม	FC, %	ขนาด, มม.	
4.79	37.34	27.98	32.59	0.1547	20.59
4.79	40.73	24.81	35.07	0.1777	26.34
4.79	44.13	31.05	31.82	0.1801	26.32
4.79	47.52	38.96	30.12	0.2773	60.39
5.88	37.34	30.82	29.61	0.1533	19.07
5.88	40.73	27.45	28.71	0.1562	19.79
5.88	44.13	32.78	32.03	0.2034	33.56
5.88	47.52	54.54	30.11	0.1992	32.20
3.18	45.72	10.20	27.53	0.1083	9.52
3.18	48.88	7.10	9.96	0.1548	19.44
3.18	56.93	6.20	8.05	0.1518	18.70
3.18	60.40	24.00	32.61	0.1671	22.66
5.46	45.72	9.20	27.82	0.1082	9.50
5.46	48.88	6.20	11.05	0.1313	13.99
5.46	56.93	8.10	10.70	0.1410	16.13

จากตารางนี้พบว่าเมื่อขยายความสูงและพื้นที่หน้าตัดของฟริบอร์ตทำให้สามารถลดความเร็วของอากาศได้ จึงทำให้อุณหภูมิปลิวหลุดมีขนาดเล็กลงและให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นดังกล่าว การทดลองนี้คล้ายกับการทดลองของ Corella และผู้ร่วมงาน(57) ซึ่งทดลองกับเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไอเซชันเมื่อยังไม่ขยายและขยายความกว้างของฟริบอร์ต เตาที่ขยายความกว้างของฟริบอร์ต จะช่วยลดการสูญเสียอุณหภูมิและทำให้ปฏิกิริยาต่างๆเกิดขึ้นได้ดี

6.1.4 ความสูงของเบด

ความสูงของเบดในที่นี้คือระยะนับจากแผ่นกระจายอากาศถึงผิวหน้าของของแข็งบรรจุ (เบด) ซึ่งควบคุมได้จากการปรับที่ระบายแก๊สภายใน ให้มีความสูงตามต้องการ การเพิ่มความสูงของเบดเป็นการเพิ่มเวลาของการสัมผัสของแก๊สและของแข็งในเบดให้มากขึ้น ทำให้โอกาสที่สารตั้งต้นในปฏิกิริยาทำปฏิกิริยากันนานขึ้น ดังนั้นการกำจัด SO_2 เมื่อเบดสูงขึ้นจึงทำให้ SO_2 ลดลง ดังรูปที่ 5.41 เมื่อใช้อัตราส่วน Ca/S 3.18 ความเร็วอากาศ 48.88 เมตร/นาที อุณหภูมิเบด 850 °C

ความสูงเบด (ซม.)	SO_2 (ppm)	η_s (%)
25	49.5	39.19
35	28.7	57.39
45	19.7	65.66
60	11.4	68.18

และเมื่อเบดสูงขึ้นประสิทธิภาพการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อเบดสูงกว่า 45 ซม. ดังรูปที่ 5.43 ซึ่งมีข้อมูลดังนี้

ความสูงเบด (ซม.)	η_c (%)	อัตราการสูญเสียอนุภาคขนาดเล็ก (กรัม/นาท)
25	94.43	8.0
35	96.60	5.5
45	97.27	7.1
60	94.50	17.2

ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเบดสูงชันมากการสูญเสียอนุภาคจากการปลิวหลุดเพิ่มขึ้น เพราะเกิดการแตกของฟองที่ผิวหน้าของเบดอย่างรุนแรงซึ่งอยู่ใกล้ทางออกของ flue gas มากกว่า ทำให้โอกาสที่อนุภาคขนาดเล็กปลิวหลุดออกไปได้ง่ายกว่า และจุดบ่อนถ่านหินอยู่ใกล้กับผิวหน้าของเบดจึงทำให้อนุภาคถ่านหินที่บ่อนเข้าเตาเผาก่อนที่จะตกลงเบดเกิดการเผาไหม้ก่อนมีขนาดเล็กลงอย่างรวดเร็วจึงถูกอากาศพัดพาออกไป ดังนั้นการเพิ่มความสูงของเบดที่เหมาะสมจะทำให้การเผาไหม้ประสิทธิภาพดีขึ้น

6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดไบล์เบด

อากาศที่บ่อนเข้าสู่เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไบล์เซชันควรมีความเร็วอากาศสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่จะทำให้ถ่านหินเกิดเป็นฟลูอิดไบล์เซชัน ดังนั้นเบดจะเป็นชนิด 2 วัฏภาคคือ ฟองอากาศและเบดหนาแน่นตามข้อเสนอแนะของ Davidson และ Harrison (8,9) เมื่อพิจารณาทิศทางการเคลื่อนที่รวมของอากาศทั้งสองวัฏภาค อาจกล่าวได้ว่าเป็นการเคลื่อนที่แบบ Plug flow (เคลื่อนที่ไปข้างหน้าพร้อมๆกัน) ครั้นภายในเบดเกิดปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับเม็ดของแข็งความเข้มข้นของออกซิเจนในฟองย่อมสูงกว่าในเบดหนาแน่น ดังนั้นออกซิเจนจากฟองก็จะแพร่กระจายทั้งในแนวรัศมีและแนวแกนไปสู่เบดหนาแน่น การคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของถ่านหินหรือสัดส่วนของการเผาไหม้ของถ่านหินเท่ากับ X (solid conversion) Fane และ Wen (11) ได้เสนอว่า ตัวแปรที่สัมพันธ์กับ X มีอยู่หลายตัวแปร อาทิ ความสูงของเบด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดถ่านหิน ความเร็วอากาศ เป็นต้น ดังนั้นสมการของความสัมพันธ์เพื่อหาการเปลี่ยนแปลง

ของถ่านหินจึงต้องทราบความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของก๊าซ, X_A ดังนี้

$$X_A = 1 - \exp(-N_R \{N_M/N_R [(1-Y_{in})/(N_M/N_R + (1-Y_{in}))] + Y_{in}\}) \quad \text{----- 2.31}$$

เนื่องจากเทอม Y_{in} คือสัดส่วนของเม็ดของแข็งที่อยู่ในฟองอากาศซึ่งมีปริมาณน้อยมาก ($Y_{in} \rightarrow 0$) ดังนั้นสมการ 2.31 จึงเหลือเพียง

$$X_A = 1 - \exp(-N_R \{N_M/N_R [1/(N_M/N_R + 1)]\}) \quad \text{----- 6.16}$$

การเปลี่ยนแปลงของถ่านหินในสมการ 6.16 จำเป็นต้องรู้ค่าตัวแปรไร้หน่วย 2 เทอม คือ N_M (number of transfer unit) และ N_R (number of reaction unit)

เทอม N_M มีค่าดังนี้

$$N_M = F_{b,0} \epsilon_b L/U \quad \text{----- 2.26}$$

$$N_R = kL_{mf}/U \quad \text{----- 2.27}$$

ค่า N_R ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ไม่ทราบค่า $F_{b,0}$ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างฟองกับเบคหนาแน่นซึ่งมีค่าเท่ากับ $11/d_b$ โดยประมาณ และเทอม ϵ_b ซึ่งเป็นสัดส่วนช่องว่างในฟองมีค่าดังนี้

$$\epsilon_b = (L - L_{mf})/L \quad \text{----- 6.17}$$

ส่วนขนาดของฟอง Kato และ Wen (58) ได้เสนอไว้ว่า ขนาดของฟองก๊าซ, d_b มีความสัมพันธ์กับความเร็วของอากาศและความสูงของเบคดังนี้

$$d_b = 1.4 \rho_g d_g U/U_{mf} L_{mf}/2 + d_{b,0} \quad \text{----- 6.18}$$

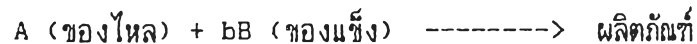
เมื่อ $d_{b,0}$ เป็นขนาดของฟองก๊าซเริ่มก่อตัวขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของตัวกระจาย



อากาศ การทดลองนี้ใช้ตัวกระจายอากาศแบบแผ่นเหล็กเจาะรู (perforated plate) สองแผ่นวางซ้อนกัน ค่า d_{bo} จึงมีค่า

$$d_{bo} = 0.00376(U - U_{mf})^2 \quad \text{-----} \quad 6.19$$

ดังนั้น N_u ซึ่งเป็นตัวแปรไร้หน่วยที่บอกถึงการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างสองวัฏภาคสัมพันธ์กับปรากฏการณ์ในเบตสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ต่างๆ ดังกล่าว ส่วน N_u ซึ่งเป็นตัวแปรไร้หน่วยที่บอกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของปฏิกิริยา ซึ่งขึ้นกับจลศาสตร์ของปฏิกิริยาเป็นค่าสัมประสิทธิ์ (ค่าคงที่) ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งต่อปริมาตรของเบตหนึ่ง, k สัมพันธ์กับค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ผิวของอนุภาค, k_c และอัตราการเปลี่ยนแปลงของถ่านหิน, X_B สามารถพิจารณาได้จาก Shrinking core model (59) ของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซและของแข็งดังนี้



โดยของแข็งมีขนาดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (shrinkage) พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของของแข็งและก๊าซโดยสมมติให้ อนุภาคถ่านหินเป็นทรงกลม ก๊าซ A เข้าทำปฏิกิริยาที่แกนในที่มีขนาดอนุภาคคงที่ และปฏิกิริยาเป็นแบบไม่ผันกลับ (irreversible) และผลต่างของความเข้มข้นของก๊าซทั้งในวัฏภาคก๊าซและที่ผิวของอนุภาคเท่ากัน ดังนั้นจะได้ว่า

$$dN_B = b dN_A \quad \text{-----} \quad 6.20$$

มีปฏิกิริยาต่อพื้นที่ของของแข็งเป็น

$$- 1/4 r^3 dN_B/dt = - b/4 r^3 dN_A/dt = b k_c (C_{A_g} - C_{A_s}) = b k_c C_{A_g} \quad \text{----} \quad 6.21$$

$$\text{หรือ} \quad - dN_A/dt = 4 r^2 k_c C_{A_g} \quad \text{-----} \quad 6.22$$

และ r เป็นรัศมีของ unreacted core มีค่า $= d_u (1 - X_B)^{1/3} / 2$ ดังนั้นสมการที่ 6.22 เป็น

$$-(1-\epsilon_{mf})/V_p \, dN_A/dt = [6(1-X_B)^{2/3}(1-\epsilon_{mf})k_c]C_A/d_m \quad \text{-----} \quad 6.23$$

เพราะว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้มีอันดับของปฏิกิริยาเป็นหนึ่ง และจากสมการที่ 6.23 จะได้ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ของปฏิกิริยาดังนี้

$$k = 6(1-X_B)^{2/3}(1-\epsilon_{mf})k_c/d_m \quad \text{-----} \quad 6.24$$

สมการที่ 6.24 ค่า ϵ_{mf} ประมาณได้จากขนาดถ่านหินที่ใช้ซึ่งมีขนาด 1.11 มม. มีค่าเท่ากับ 0.45 ค่า k_c ได้จากการแทนค่า X_B ซึ่งได้จากสมการมวลสารและพลังงานในแต่ละการทดลองแทนลงในสมการที่ 6.24 โดยให้ค่า k ประมาณ 5 วินาที⁻¹ จะได้ค่า k_c เฉลี่ยเท่ากับ 1.2 ซม./วินาที ในทำนองกลับกันสมการที่ 6.24 จะใช้ในการคำนวณค่า k ของแบบจำลองเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของถ่านหินโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. สมมติค่า X_B แทนลงในสมการที่ 6.24 โดยมีค่า k_c เท่ากับ 1.2 ซม./วินาที ได้ค่า k แทนลงในสมการที่ 2.27

2. จากค่า N_r ที่ได้จากข้อ 1 นำไปแทนลงในสมการที่ 6.16 หาค่า X_A ต่อไป แต่เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับเม็ดของแข็งเกิดขึ้นทั้งในส่วนที่เป็นวัฏภาคหนาแน่นและบางส่วนของวัฏภาคฟอง คือส่วนที่เป็นหมอกปกคลุม (clouds) และส่วนที่เป็น wake ดังนั้นความเข้มข้นของก๊าซ, C_A ในแต่ละวัฏภาคมีผลแตกต่างกันดังสมการ

$$C_A = \gamma_c C_b + (1-\gamma_c)C_m \quad \text{-----} \quad 6.25$$

เพราะว่า $\gamma_c \rightarrow 0$ ดังนั้นสมการ 6.25 จึงทำให้ $C_A = C_m$ เมื่อ C_b และ C_m เป็นความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซในวัฏภาคฟองและวัฏภาคหนาแน่น มีค่าดังนี้

$$C_b = C_{A,0} X_A / \ln(1-X_A)^{-1} \quad \text{-----} \quad 6.26$$

$$C_m = C_b / [1 + (N_r/N_m)(1-\gamma_c)] \quad \text{-----} \quad 6.27$$

ในทำนองเดียวกันสมการที่ 6.27 จึงมีค่า

$$C_u = C_b / (1 + (N_r / N_m)) \quad \text{----- 6.28}$$

3. จากสมการที่ 6.26 และ 6.28 จึงหาค่า C_u ได้โดยแทนค่า X_u ที่ได้จากข้อ 2
4. เนื่องจากใน Shrinking core model มีกลไกควบคุมปฏิกิริยา 3 แบบคือ
 - 4.1 ขั้นตอนการควบคุมด้วยการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (fluid film control) ไปยังผิวของถ่านหิน
 - 4.2 ขั้นตอนการควบคุมด้วยปฏิกิริยาเคมี (chemical reaction control)
 - 4.3 ขั้นตอนการควบคุมด้วยการแพร่ผ่านชั้นเถ้า (ash diffusion control)

ซึ่ง Levenspiel (59) และ Wen (60) ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

- fluid film control เป็นขั้นตอนการควบคุมด้วยการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม โดยพิจารณาว่าอนุภาคถ่านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาจะถูกล้อมรอบด้วยชั้นฟิล์มของก๊าซปกคลุมอยู่ มีสมการแสดงความสัมพันธ์ของเวลากับที่ของแข็งทำปฏิกิริยากับก๊าซจนสมบูรณ์, t^* ดังนี้

$$t^* = d_{em}^2 / 6bk_f C_A \quad \text{----- 2.41}$$

- chemical reaction control เป็นขั้นตอนการควบคุมด้วยปฏิกิริยาเคมีในทำนองเดียวกันจะได้สมการดังนี้

$$t^* = d_{em}^2 / 2bk_r C_A \quad \text{----- 2.42}$$

- ash diffusion control เป็นขั้นตอนการควบคุมด้วยการแพร่ผ่านชั้นเถ้าที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการเผาไหม้

$$t^* = d_{em}^2 / 24b \delta_f C_A \quad \text{----- 2.43}$$

5. จากความสัมพันธ์ต่างๆ ดังกล่าวนี้เมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณการเปลี่ยนแปลงของของแข็ง, X_B จากสมการดังนี้



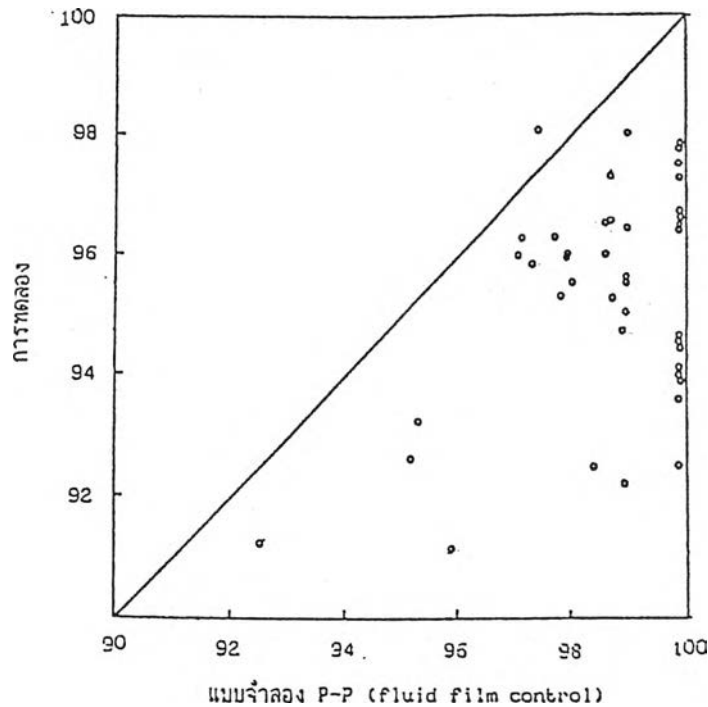
$$X_{\beta} = 1 - 0.25\beta + 0.05\beta^2 - 0.0083\beta^3 \quad (\beta < 1) \quad \text{-----} \quad 6.29$$

$$\text{เมื่อ } \beta = t^*/t = F_{\alpha} t^*/W$$

ค่า X_{β} จากสมการที่ 6.29 กับค่า X_{β} ที่สมมติในข้อ 1 คาร์มีค่าไม่ต่างกัน ถ้าต่างกัน จะย้อนกลับไปเริ่มต้นคำนวณตั้งแต่ข้อที่ 1 ใหม่จนกว่าจะได้ค่า X_{β} เท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด

6. จากการคำนวณค่า X_{β} โดยแบบจำลอง P-P model มีขั้นตอนการควบคุมปฏิบัติการ ดังข้อที่ 5 ปรากฏว่า

6.1 ปฏิบัติการเผาไหม้มีขั้นตอนการควบคุมด้วยแผ่นฟิล์มให้ค่า X_{β} ต่างๆ เมื่อ นำมา เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ได้จากการทดลองดังกราฟรูปที่ 6.1

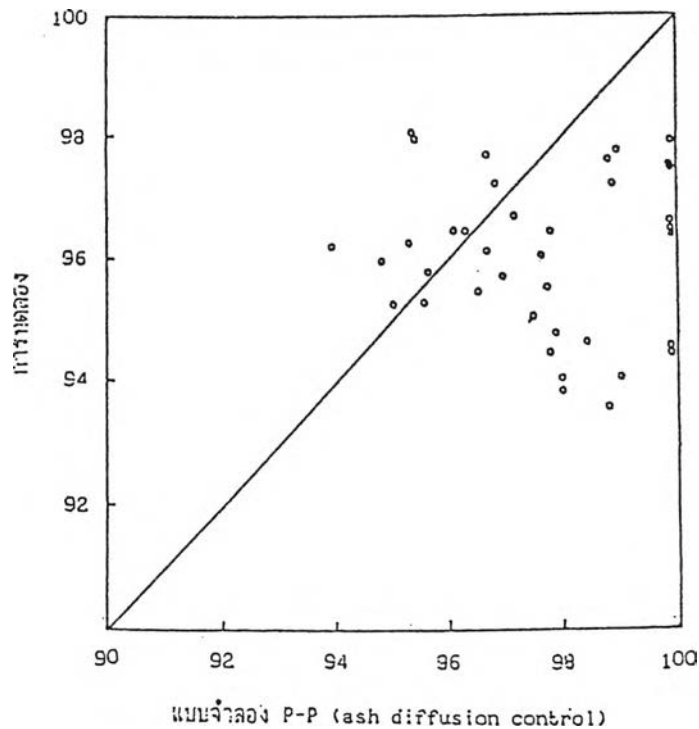


รูปที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้ซึ่งได้จาก P-P model (fluid film control)

จากกราฟพบว่าจุดต่างๆ เบี่ยงเบนไปจากเส้นทแยงมุมมากแสดงว่าขั้นตอนการควบคุมโดยแผ่นฟิล์มนี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาทำนายปฏิบัติการเผาไหม้ในฟลูอิดไธร์เบด เนื่องจากการเผาไหม้

ถ่านหินในฟลูอิไดซ์เบดนั้นถ่านหินถูกทำให้มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระลอยอยู่ในกระแสก๊าซ ซึ่งก๊าซมีความเข้มข้นของออกซิเจนเท่ากันตลอด และพุ่งขึ้นด้วยความเร็วสูง ทำให้เบดประกอบด้วย 2 วัฏภาค ในวัฏภาคหนาแน่นซึ่งมีถ่านหินอยู่มากจะมีก๊าซในปริมาณน้อย ออกซิเจนจะอยู่ในวัฏภาคฟองเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นผลของชั้นฟิล์มต่อการควบคุมปฏิกิริยาจึงมีผลไม่มากนัก

6.2 จากสมการการควบคุมด้วยปฏิกิริยาเคมีพบว่าเมื่อแทนค่าต่างๆลงไปปรากฏว่าได้มีค่ามากกว่า 1 ทุกๆค่าของ X_B และ C_A ของแต่ละการทดลองซึ่งทำให้ค่า X_B จากสมการ 6.29 มีค่าติดลบซึ่งเป็นไปไม่ได้ สอดคล้องกับธรรมชาติของปฏิกิริยาการเผาไหม้ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเร็วมาก



รูปที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้ซึ่งได้จาก P-P model (ash diffusion control)

6.3 ขั้นตอนการควบคุมด้วยการแพร่ผ่านชั้นเถ้า จากสมการ 2.43 δ_{cr} เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซในชั้นของเถ้าเมื่อสมมติให้มีค่าเท่ากับ $6.65 \text{ ซม.}^2/\text{วินาที}$ ทำให้ได้ค่า X_c ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จุดต่างๆดังกราฟรูปที่ 6.2 อยู่ใกล้กับเส้นทแยงมุมมากซึ่งแสดงว่าในปฏิกิริยาการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดไบล์เบดสามารถนำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ P-P model ซึ่งมีจลศาสตร์โดยแบบจำลอง Shrinking core model มีขั้นตอนการควบคุมปฏิกิริยาการแพร่ผ่านชั้นเถ้ามาทำนายประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้อย่างเหมาะสม