บทที่ 4

การเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบด

4.1 หลักการและรายละเอียดของการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาฟลูอิไดซ์เบด

หลักการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาฟลูอิไดซ์เบดเกิดขึ้นจากการนำเทคนิคฟลูอิไดเซชันมาใช้กับขบวนการเผาไหม้นั่นเอง จึงทำให้เชื้อเพลิงที่กำลังเผาไหม้ในเตาเผาไม่อยู่นิ่งเหมือนกับการเผาไหม้ระบบสโตกเกอร์ อีกทั้งไม่แขวนลอยไปกับอากาศดังเช่นการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบพัลเวอร์ไรซ์[27] การเคลื่อนที่หมุนเวียนอยู่ตลอดเวลาของเชื้อเพลิงที่กำลังลุกไหม้ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สม่ำเสมอโดยทั่วกันตลอดทั้งเบด โดยทั่วไปเชื้อเพลิงที่กำลังลุกไหม้ในเบดจะมีปริมาณเพียง 5% โดยน้ำหนักของน้ำหนักเบดทั้งหมด ส่วนที่เหลือจะเป็นสารเฉื่อยต่าง ๆ (Inert Materials) เช่น ทราย และเถ้าของเชื้อเพลิง เป็นต้น ในเบดของเชื้อเพลิงที่กำลังลุกไม้อาจเติมสารบางตัว เช่น หินปูน (Limestone) หรือโดโลไมท์ (Dolomite) เพื่อลดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นี้สามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับหินปูน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะคายความร้อน (Exothermic Reaction) ดังสมการ

$$CaCO_3 + SO_2 + \tfrac{1}{2}\, O_2 \longrightarrow CaSO_4 + CO_2$$

แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินกว่าอุณหภูมิสมดุลย์ ซึ่งขึ้นกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยา แคลไซเนชันซึ่งดูดความร้อน (Endothermic Calcination Reaction) หินปูนจะสลายตัวได้ แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อไปดังสมการ[28]

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$$

$$2CaO + 2SO_2 + O_2 \longrightarrow 2CaSO_4$$

อัตราส่วนเชิงโมลของ แคลเซียม/ซัลเฟอร์ (Ca/S) อุณหภูมิการเผาไหม้และระยะเวลาที่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ภายในเบดซึ่งขึ้นกับความเร็วของอากาศ เป็นตัวแปรที่สำคัญ

ในการดูดจับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในเบด ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับหินปูนในการดูดจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ระหว่าง 790 - 850° (28) ซึ่งอุณหภูมินี้ต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมละลายของเถ้า จึงสามารถหลีกเลี่ยงการหลอมรวมตัวของเถ้าในระหว่างการไหม้ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาฟลูอิไดซ์เบดกับเตาระบบอื่นแล้วพบว่าไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากเตาฟลูอิไดซ์เบดมีปริมาณต่ำกว่า (29)

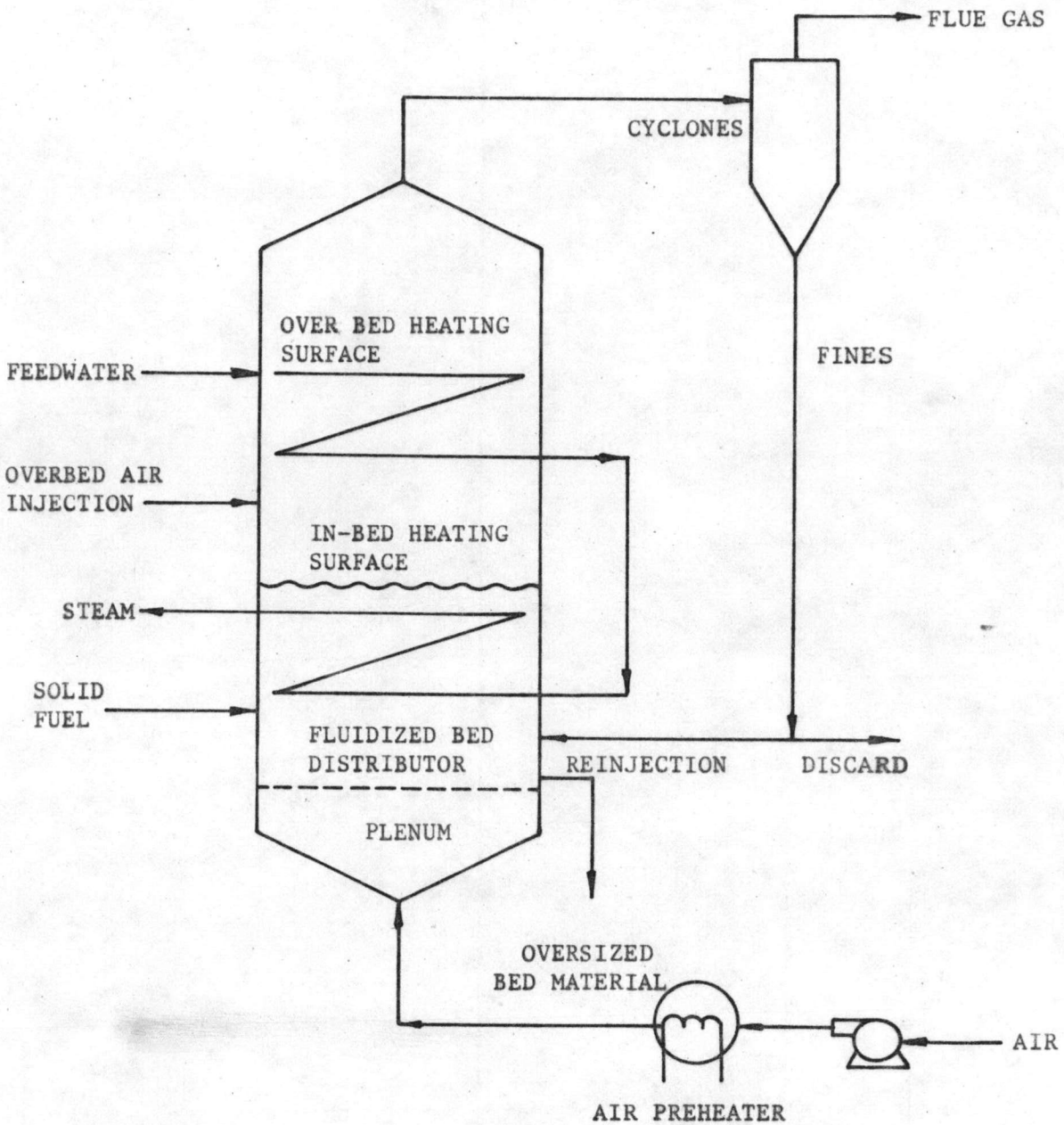
4.2 <u>ส่วนประกอบของระบบการเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบด</u>

รูปร่างลักษณะของเตาเผาฟลูอิไดซ์เบดก็คล้ายกับเตาเผาทั่ว ๆ ไปที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน คือประกอบด้วย ห้องเผาไหม้ และระบบสนับสนุนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 สำหรับระบบการเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดสามารถแบ่งออกได้เป็นระบบย่อยดังต่อไปนี้คือ

1. ห้องเผาไหม้
2. ระบบป้อนเชื้อเพลิง
3. ระบบควบคุม
4. ระบบถ่ายเทความร้อน
5. ระบบจุดเตา และ
6. ระบบกำจัดฝุ่นละอองและระบบระบายเถ้า

ห้องเผาไหม้โดยทั่วไปเป็นบริเวณที่เชื้อเพลิงเกิดการสันดาป แต่สิ่งหนึ่งที่ทำให้ห้องเผาไหม้ในระบบนี้แตกต่างไปจากห้องเผาไหม้ทั่วไปก็คือ ที่ส่วนล่างของห้องเผาไหม้มีแผ่นกระจายอากาศติดตั้งอยู่ แผ่นกระจายอากาศนี้ทำหน้าที่สำคัญสองประการ คือ รองรับมวลสารทั้งหมดที่ประกอบกันเป็นเบด และ กระจายอากาศที่ช่วยในการสันดาปและทำให้เกิดสภาพฟลูอิไดซ์เบดให้สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของห้องเผาไหม้ แผ่นกระจายอากาศนี้ต้องสามารถทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ ปัญหาในการออกแบบแผ่นกระจายอากาศก็คือ ปัญหาการโก่งงอและปัญหาการเปลี่ยนรูปเนื่องจากความร้อน อีกทั้งรูบนแผ่นกระจายอากาศอาจเกิดการอุดตัน (14)

ระบบป้อนเชื้อเพลิง มีหลายวิธีด้วยกันที่สามารถป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (14) เช่น ป้อนด้วยสกรู (Screw Feeder) สโตก-สเปรดเดอร์ (Stoke-Spreader) และการป้อนด้วยอากาศ (Pneumatic Feed) เชื้อเพลิงแข็งอาจป้อนเข้าสู่เตาเผาได้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเตาเผาฟลูอิไดซ์เบดขั้นพื้นฐาน

กันเช่น ป้อนที่ด้านข้างของผนังเตาเหนือเบด และใต้เบด หรือติดตั้งหัวฉีดเชื้อเพลิงในเบด

ระบบควบคุม การควบคุมการเผาไหม้ในระบบนี้อาจทำได้โดย ปรับความสูงของเบด ปรับอัตราส่วนของเชื้อเพลิง/อากาศ หรืออาจทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบดเป็นส่วน ๆ ในห้องเผาไหม้

ระบบถ่ายเทความร้อน เอกลักษณ์อันหนึ่งของระบบการเผาไหม้นี้ก็คือ สามารถจัดวางท่อถ่ายเทความร้อนไว้ภายในเบด[14] ส่วนพื้นที่รับความร้อนอื่น ๆ ก็คล้ายคลึงกับระบบทั่ว ๆ ไปคือ จัดวางตามผนังห้องเผาไหม้ และในฟรีบอร์ด (Free board) เหนือเบด

ระบบจุดเตา การจุดเตาสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น ใช้หัวเผาให้ความร้อนหรือผสมอากาศกับก๊าซหุงต้มแล้วจุดเหนือแผ่นกระจายอากาศ หรืออาจใช้อากาศร้อนป้อนผ่านแผ่นกระจายอากาศให้ความร้อนแก่เบด หรือด้วยวิธีการใด ๆ ที่สามารถทำให้เบดมีอุณหภูมิสูงถึงระดับที่ต้องการ

ระบบกำจัดฝุ่นละออง โดยทั่วไปนิยมใช้ไซโคลน (Cyclone) แยกอนุภาคเล็ก ๆ ที่ปลิวมากับก๊าซร้อน และป้อนกลับสู่เตาเผาอีก อาจใช้ Bag Filter House หรือ Electrostatic Precipitator เพื่อกำจัดฝุ่นและอนุภาคที่เล็กมากซึ่งไซโคลนไม่สามารถกำจัดได้ สำหรับเถ้าภายในเตาสามารถระบายออกจากเตาโดยท่อระบาย (Bed Drain Pipe) ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในเบด เนื่องจากเถ้าภายในเตาอยู่ในสภาพฟลูอิไดซ์ด้วย ดังนั้นการระบายเถ้าออกจากเตาเผาผ่านท่อระบายจึงสะดวกมาก

4.3 <u>อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ และการถ่ายเทความร้อนในระบบการเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบด</u>

4.3.1 <u>ขนาดของเชื้อเพลิง</u>

Tatebayashi และผู้ร่วมงาน[30] พบว่าขนาดของถ่านหินมีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ กล่าวคือถ่านหินที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงกว่า เนื่องจากเชื้อเพลิงขนาดเล็กมีโอกาสหลุดลอยจากเบด (Elutriate) ง่ายกว่า ทำให้ปริมาณของคาร์บอนในเชื้อเพลิงบางส่วนสูญเสียไปก่อนถูกเผาไหม้ในเตา

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เป็นที่ยอมรับกันว่าค่าสัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนภายในเบดเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาคในเบดนั้น William, Healey และ Dainton[8] แห่งสถาบัน C.R.E (Coal Research Establishment) พบว่า เมื่อลดขนาดอนุภาคลงต่ำกว่า 60 เมช (B.S.S) สัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นน้อยมาก แต่ในทางตรงข้ามสัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 10 เมช สถาบันวิจัยถ่านหินแห่งประเทศอังกฤษ B.C.U.R.A[8] พบว่าที่อุณหภูมิภายในเบดประมาณ 750 - 800 °ซ. การลดขนาดของเชื้อเพลิงจาก 3.2 - 0.85 มม. ลงเหลือ 0.8 - 0.5 มม. สัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้นจาก 225 - 285 วัตต์/(ม.^{2}-°ซ.) เป็น 320 วัตต์/(ม.^{2}-°ซ.)

4.3.2 <u>ความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบด</u>

Leon[31] พบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงเมื่อความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบดเพิ่มขึ้น สาเหตุสำคัญก็คือเมื่อความเร็วของอากาศสูงขึ้นปริมาณของอนุภาคเชื้อเพลิงที่หลุดลอยออกจากเตาก็เพิ่มขึ้น

Fraas[32] ทำการทดลองหาสัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนในเบดที่อุณหภูมิ 900°ซ. ที่ความเร็วของอากาศ 25 - 65 ซม./วินาที โดยมีอนุภาคขนาด 460 ไมโครเมตร (μm) เป็นเบดพบว่า สัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนจากเบดไปยังท่ออากาศเพิ่มขึ้นจาก 227 วัตต์/(ม.^{2}-°ซ.) ที่ความเร็ว 25 ซม./วินาที เป็น 483 วัตต์/(ม.^{2}-°ซ.) ที่ความเร็ว 50 ซม./วินาที หลังจากความเร็วนี้แล้วสัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนจะลดลง

4.3.3 <u>อุณหภูมิการเผาไหม้</u>

จากการทดลองเผาถ่านลิกไนท์ในเตาฟลูอิไดซ์เบด Rice[33] พบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของคาร์บอนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการเผาไหม้ Mei[5] ทำการทดลองเผาหินน้ำมันอิสราเอลในเตาเผาสองขนาดคือ 6 นิ้ว และ 18 นิ้ว ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับของ Rice ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของคาร์บอนมีค่าสูงกว่า 96% จากเตาทั้งสองตามลำดับ

โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับกันว่าผลของอุณหภูมิภายในเบดที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนนั้นส่วนใหญ่เป็นการแผ่รังสี Keating และ Wright[8] ได้ทำการคำนวณจากข้อมูล

การทดลองที่ได้จากสถาบัน B.C.U.R.A พบว่าที่อุณหภูมิ 800°ซ. อนุภาคในเบดมีขนาด 3.25 - 0.5 มม. ส่วนของการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีสูงถึง 30% Kharchenko[8] พบว่าสัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงอุณหภูมิของเบดระหว่าง 300-1,000°ซ.

4.4 การจำแนกประเภทระบบการเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบด

การจำแนกประเภทระบบการเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบด สามารถจำแนกได้จากความดันในเตาเผาไหม้ และความเร็วของอากาศที่ใช้ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบด นอกจากนี้แล้วยังสามารถจำแนกได้จาก ความลึกของเบด, ลักษณะการใช้งาน, ชนิดของแผ่นกระจายอากาศ[14]

4.4.1 การจำแนกจากความดันในเตาเผาไหม้

ระบบการเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Fluidized Bed Combustion) ระบบนี้ความดันในเตาเผาจะสูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย เนื่องจากอากาศที่อัดผ่านแผ่นกระจายอากาศต้องมีความดันสูงพอเพียงที่ทำให้เกิดสภาพฟลูอิไดซ์ขึ้น ส่วนรายละเอียดต่าง ๆ ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.1 และ 4.2

ระบบการเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดที่ความดันสูง (Pressurized Fluidized Bed Combustion) ความดันในเตาเผาจะสูงกว่าความดันบรรยากาศประมาณ 10 - 15 เท่า[27] ข้อดีของระบบนี้ก็คือ ลักษณะการเกิดฟลูอิไดซ์ดีขึ้น และก๊าซร้อนจากการเผาไหม้สามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเผาไหม้ระบบนี้ยังอยู่ในขั้นพัฒนาเท่านั้น

4.4.2 การจำแนกจากความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบด

ระบบการเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดแบบธรรมดา (Classical Fluidized Bed Combustion) ระบบนี้ความเร็วสัมพัทธ์ของอากาศกับเม็ดเชื้อเพลิงค่อนข้างต่ำ เบดมักมีลักษณะเป็นบับบลิงเบด การหลุดลอยของเม็ดเชื้อเพลิงตามกระแสการไหลของอากาศน้อย

ระบบการเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating หรือ Fast Fluidized Bed Combustion) ความเร็วสัมพัทธ์ของอากาศกับเม็ดเชื้อเพลิงในระบบนี้

ค่อนข้างสูง ทำให้เชื้อเพลิงลอยไปตามกระแสการไหลของอากาศไม่สามารถบ่งบอกระดับของเบดที่แน่นอนได้ ประเภทนี้จำเป็นต้องมีการป้อนเชื้อเพลิงที่หลุดลอยไปกลับเข้าสู่เตาเผาอีก รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระบบการเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดกับการขยายตัวของเบด

4.5 <u>ข้อดีของระบบการเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบด</u>

จากลักษณะของระบบการเผาไหม้นี้ที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 อาจสรุปข้อดีของระบบได้คือ

1. อุณหภูมิการเผาไหม้สม่ำเสมอโดยทั่วกันตลอดทั้งเบด ไม่เกิดจุดร้อน (Hot Spot) ภายในเตา

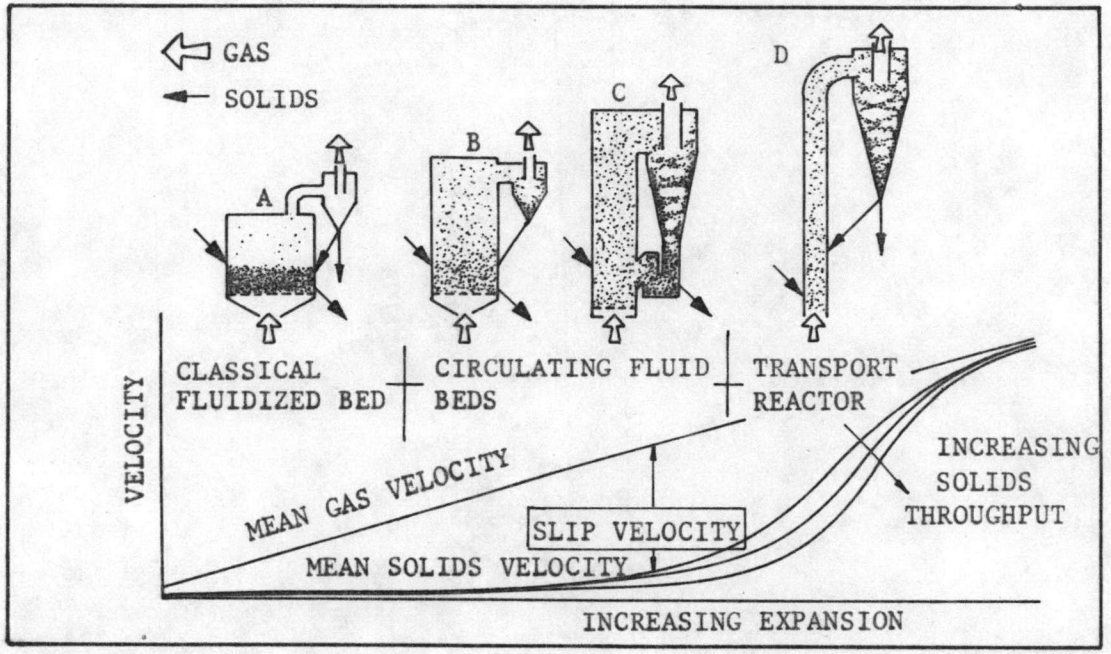
2. สามารถกำจัด ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้อยู่ในปริมาณที่ไม่ทำให้เกิดมลพิษ และขบวนการกำจัดนี้เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิง ไม่จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ภายนอกเพิ่มเติม

3. อุณหภูมิการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำ โดยปกติจะอยู่ระหว่าง 750 - 900°ซ. ซึ่งอุณหภูมิในช่วงนี้ต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมละลายของเถ้า จึงไม่ก่อให้เกิดสแลค (Slag) ภายในเตาเผา และปัญหาการระเหยของสารประกอบอัลคาไลน์ที่จะจับตัวบนผนังเตา หรือบนท่อน้ำยังลดลงอีกด้วย

4. ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่เกิดขึ้นน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการเผาไหม้ระบบอื่น

5. สามารถจัดวางท่อน้ำภายในเบดได้ จากการทดลองพบว่าสัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนภายในเบดสูงกว่าในช่วงฟรีบอร์ดประมาณ 5 เท่า[34] ซึ่งเป็นผลให้ลดพื้นที่ถ่ายเทความร้อนลงได้มาก

6. สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพต่ำ ซึ่งได้แก่เชื้อเพลิงที่มีปริมาณของธาตุซัลเฟอร์, ความชื้น และเถ้า เป็นองค์ประกอบอยู่สูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพราะการสันดาปในเบดเป็นไปอย่างช้า ๆ (Slow Combustion) จึงมีโอกาสเผาคาร์บอนในเม็ดเชื้อเพลิงได้หมดกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการเผาไหม้แบบพัลเวอร์ไรซ์



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระบบการเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดกับการขยายตัวของเบด

($\bar{d}_p$ = 100 μm)