



บทที่ 2

การเผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้ในฟลูอิดไชน์เบด

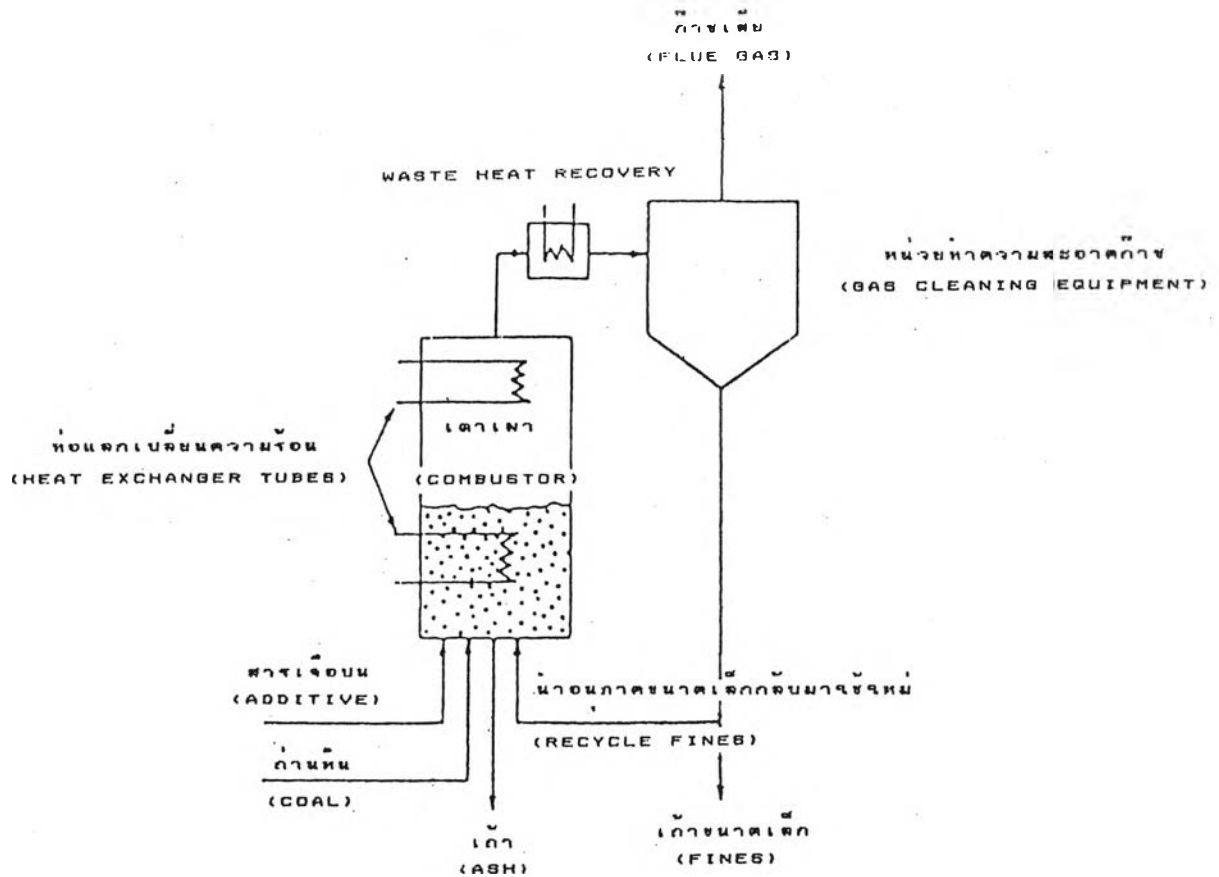
ฟลูอิดไอเซชันเป็นเทคนิคที่ทำให้อนุภาคของของแข็งที่บรรจุในคอลัมน์ซึ่งเรียกว่า เบด (bed) เกิดการเคลื่อนที่ลอยตัวอย่างอิสระ โดยอาศัยความเร็วของของไหลที่ผ่านแผ่นกระจายทางด้านล่าง อนุภาคของของแข็งเหล่านี้จะเกิดการผสมผสานอย่างสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันตลอด สามารถแลกเปลี่ยนมวลสารและพลังงานได้เป็นอย่างดี (4) จึงถูกนำมาใช้ออกแบบเป็นเตาเผาหรือเตาปฏิกรณ์เคมีมากมาย

การเผาไหม้ถ่านหินจึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่เทคนิคฟลูอิดไอเซชันถูกนำมาใช้ ซึ่งพบว่าสามารถเผาไหม้ถ่านหินหรือเชื้อเพลิงแข็งที่มีคุณภาพต่ำ และมีปริมาณกำมะถันประกอบอยู่เกินกว่าร้อยละ 1 โดยสามารถควบคุมปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้โดยการเติมหินปูนหรือโดโลไมท์ลงไปในเตาเผาพร้อมกับถ่านหินเพื่อช่วยกำจัดมลพิษจากก๊าซดังกล่าว และด้วยเหตุที่อุณหภูมิที่ใช้เผาไหม้ของเตาเผาลักษณะนี้ต่ำ (ประมาณ 750-900 °C) (5) ซึ่งต่ำกว่าระบบการเผาไหม้แบบอื่นๆ จึงทำให้ปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่ปลดปล่อยออกมาขณะเผาไหม้ต่ำด้วย

2.1 หลักการและระบบทั่วไปของการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดไชน์เบด

การเผาไหม้ในฟลูอิดไชน์เบดเป็นระบบก๊าซ-ของแข็ง ก๊าซหรืออากาศทำหน้าที่พองของแข็งในเบดเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไอเซชัน การเผาไหม้เริ่มจากการอุ่นเตาด้วยอุปกรณ์จุดเตา (burner) เป็นต้นกำเนิดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดติดไฟของถ่านหินการเผาไหม้จึงเกิดขึ้นเองอย่างต่อเนื่องโดยไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์จุดเตาอีกต่อไป พลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้น และถูกถ่ายเทให้กับน้ำหรือไอน้ำในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ขดอยู่ภายในให้ไอน้ำซึ่งมีอุณหภูมิและความดันสูงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการหมุนกังหัน (turbine) และปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือใช้ในกระบวนการของโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

ระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดไอเซชันสามารถเป็นส่วนต่างๆ ที่สำคัญดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะสำคัญของเตาเผาแบบฟลูอิดเซชัน

2.1.1 ห้องเผาไหม้ เป็นบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ ที่ส่วนล่างของห้องเผาไหม้ ประกอบด้วย แผ่นกระจายอากาศ(distributor plate) ทำหน้าที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. รองรับน้ำหนักของสารซึ่งประกอบกันขึ้นเป็นเบด ได้แก่

- วัสดุเชื้อเพลิง ซึ่งมีขนาดพอเหมาะที่สามารถถูกทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ และไม่ปลิวหลุดออกจากเบด โดยทั่วไปขนาดของเชื้อเพลิงที่ใช้จะมีขนาดประมาณ 1-5 มม.

- วัสดุเฉื่อย(inert material)เช่น ทราย และ reactive material เช่น สารประกอบคาร์บอเนต ได้แก่ หินปูน(limestone), โดโลไมท์(dolomite) และ ตัวเร่งปฏิกิริยา(catalysts) พวก inert และ reactive material นี้ทำหน้าที่ช่วยให้เบดมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ และมีการส่งผ่านความร้อนได้ดีขึ้น นอกจากนี้พวก reactive material ยังเป็นตัวช่วยกำจัดก๊าซพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ คือ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์(SO_2)

2. กระจายอากาศช่วยทำให้เบตเกิดฟลูอิดได้อย่างสม่ำเสมอ ทำให้การเผาไหม้เกิดได้สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของเบต

2.1.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิง มีหลายแบบแต่ละแบบมีจุดประสงค์เพื่อป้อนเชื้อเพลิงให้กระจายตลอดผิวหน้าของเบต ปกติใช้ระบบการป้อนแบบสกรู (screw feeder) มีตำแหน่งในการป้อนมีทั้งที่ป้อนเหนือเบต และภายในเบตขึ้นกับการออกแบบและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน

2.1.3 ระบบควบคุม เป็นระบบควบคุมการทำงานของห้องเผาไหม้ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี แต่ทั้งหมดมีวัตถุประสงค์อันเดียวกันก็คือ ให้มีการดำเนินงานของทั้งระบบเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง

2.1.4 ระบบถ่ายเทความร้อน เป็นการดึงเอาพลังงานจากเชื้อเพลิงในรูปพลังงานความร้อนเพื่อให้เกิดไอน้ำหรือกระแสไฟฟ้า ภายในเตาเผาแบบฟลูอิดไอดีเบตจึงมีท่อถ่ายเทความร้อนขดอยู่ในเบตและเฟรียบอร์ด

2.1.5 ระบบกำจัดฝุ่นและระบายเถ้า จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะเหลือของแข็งจากการเผาไหม้ เช่น เถ้า และ ถ่านชาร์ โดยทั่วไปจะแยกเอาของแข็งเหล่านี้ออกโดยใช้ไซโคลน (cyclone) ซึ่งทำหน้าที่แยกเอาของแข็งขนาดเล็กที่ปลิวหลุดออกจากเบต ส่วนเถ้าหรือของแข็งหนักจะแยกโดยผ่านช่องหรือท่อซึ่งอยู่ทางด้านล่างของห้องเผาไหม้

การควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาเป็นสิ่งที่สำคัญ เนื่องจากเถ้าของถ่านหินที่เหลือจากการเผาไหม้และค้างอยู่ในเตา เมื่ออุณหภูมิภายในเตาสูงสามารถหลอมตัวแล้วรวมกันเป็นก้อนใหญ่ (slag) ถ้ามีมากจะทำให้อากาศผ่านได้ลำบากอัตราการเผาไหม้ของถ่านหินลดลง วิธีการควบคุมอุณหภูมิเบตสามารถทำได้หลายวิธี (5, 6, 7, 8) คือ

ก. ควบคุมระดับความสูงของเบต โดยมีท่อระบายส่วนเกินของเชื้อเพลิง (overflow tube)

ข. ควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิง โดยการปรับอัตราเร็วของระบบการป้อน เช่น อัตราการหมุนของสกรู

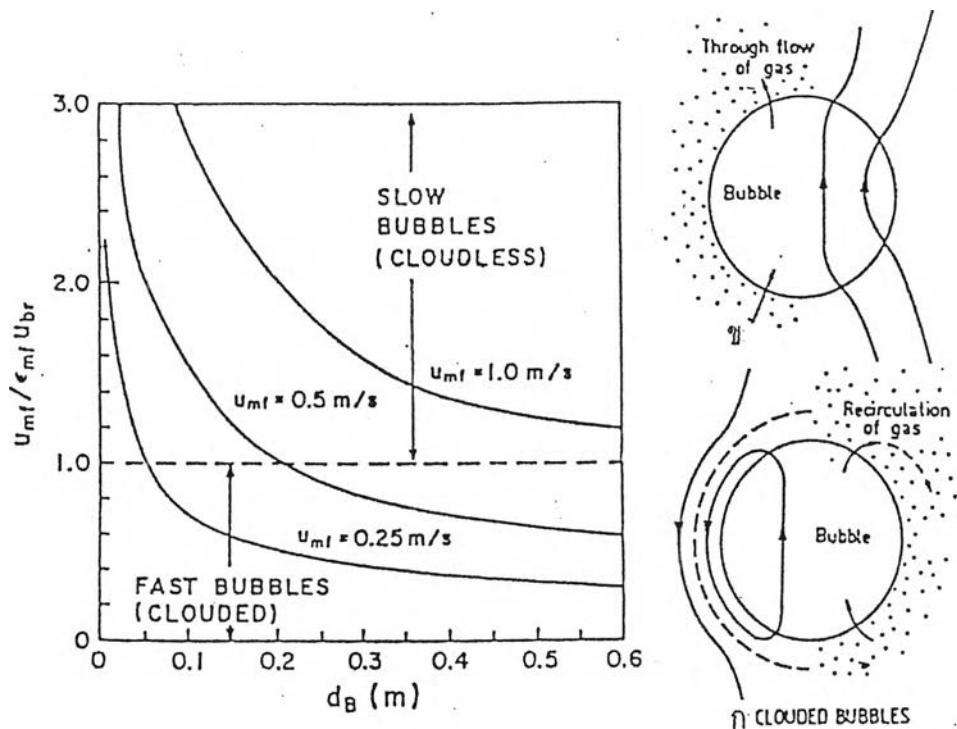
ค. ควบคุมอัตราเร็วของอากาศและปริมาณอากาศ โดยผ่านอากาศที่มากเกินไปต้องการ (excess air) เพื่อดึงเอาความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนออกจากเตาเผา

ง. ควบคุมโดยผ่านท่อถ่ายเทความร้อน (heat exchanger) โดยใช้ท่อโลหะขดเป็นรูปต่างขวางอยู่ในเบต บริเวณเฟรียบอร์ดหรือบริเวณอื่นของเตาโดยมีน้ำหรือไอน้ำไหลผ่านด้วยความเร็วพอเหมาะ

2.2 ไฮโดรไดนามิกในเตาเผาแบบฟลูอิดไอเซชัน (Fluidized Bed Combustor hydrodynamic)

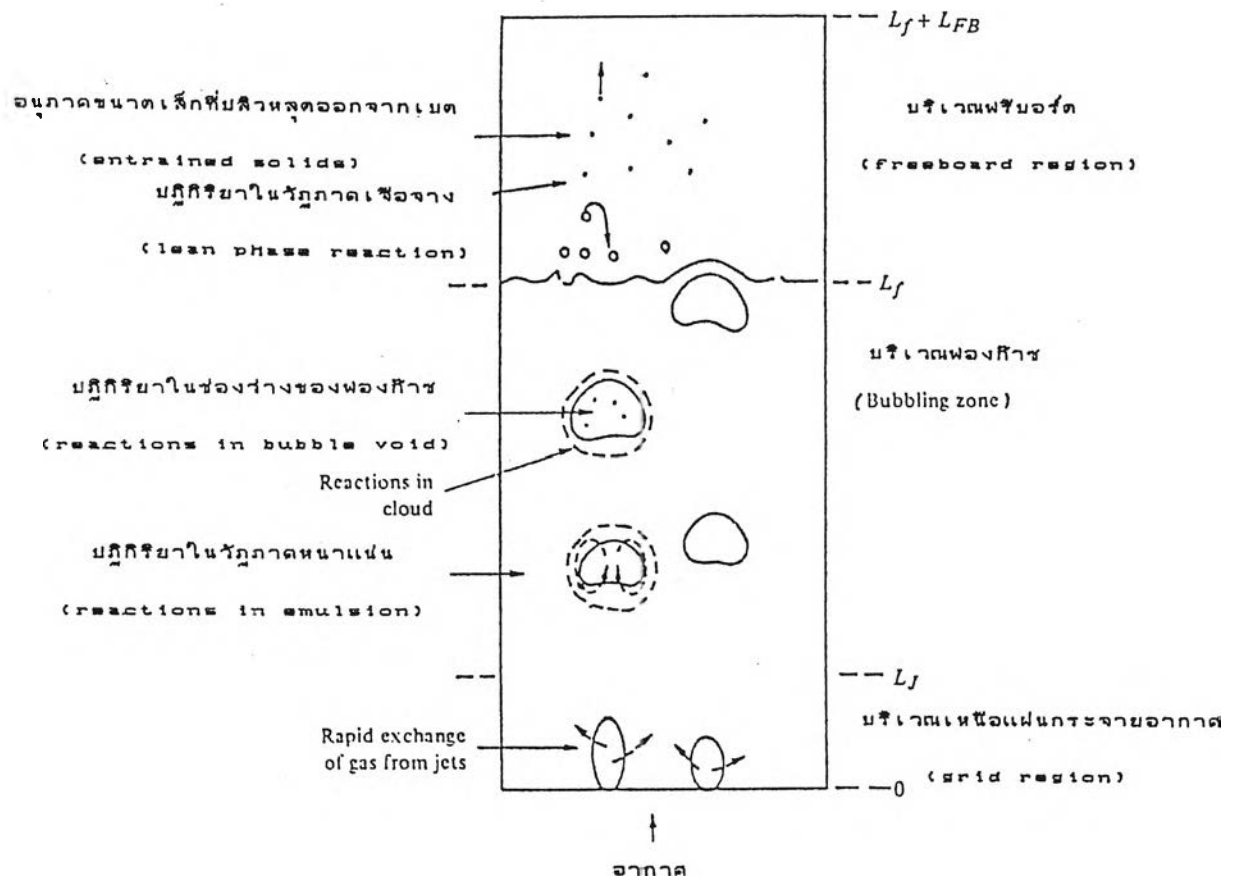
ฟลูอิดไอเซชันเกิดจากก๊าซมีความสลับซับซ้อนขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซที่ไหลผ่านเข้าไปในเบด และขนาดของเม็ดของแข็งที่ใช้เป็นเบด กล่าวคือ ในระบบของก๊าซฟลูอิดไอเซชันจะมีฟองก๊าซเกิดขึ้น เนื่องจากอากาศที่ป้อนเข้าบางส่วนรวมตัวกันก่อตัวเป็นฟองก๊าซแขวนลอยปะปนอยู่ในเบดทำให้เบดประกอบด้วย 2 วัฏภาค (two phases theory) (4,8,9) คือ วัฏภาคฟองก๊าซ (bubble phase หรือ dilute phase) และวัฏภาคหนาแน่น (dense phase หรือ emulsion phase) ภายในเบดจึงเกิดช่องว่างขึ้น 2 ประเภท ๓แรกเป็นช่องว่างที่อยู่ระหว่างเม็ดของแข็ง และประเภทที่สอง เป็นช่องว่างที่มีเม็ดของแข็งล้อมรอบอยู่หรือฟองก๊าซนั่นเอง ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีคุณลักษณะสำคัญ 3 ประการ (ตามสมมติฐานของ Davidson) คือ ภายในฟองก๊าซจะไม่มีเม็ดของแข็งอยู่เลย ฟองก๊าซจะวิ่งขึ้นสู่เบื้องบนของเบด และความดันภายในฟองก๊าซจะสม่ำเสมอ

การเคลื่อนที่ของฟองก๊าซจะมีลักษณะอย่างไรขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ของฟองก๊าซ (ความเร็วของฟองก๊าซเมื่อเทียบกับวัฏภาคหนาแน่น) (U_{br}) และความเร็วของก๊าซในเบดหนาแน่นที่สภาวะเริ่มต้นของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ($U_f = U_{mf} / \epsilon_{mf}$) เมื่อฟองก๊าซเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากกว่าความเร็วของก๊าซในเบดหนาแน่น ($U_{mf} / \epsilon_{mf} U_b < 1$) การไหลของก๊าซในเบดจึงเสมือนว่าไหลสวนทางกับฟองก๊าซ โดยไหลวกกลับเข้าทางด้านล่างและออกทางด้านบนของฟองก๊าซ ทำให้เกิดการปกคลุมของอนุภาครอบๆ ฟองก๊าซคล้ายหมอก (cloud) ดังรูป 2.2 ก ถ้าหากฟองก๊าซเคลื่อนที่ช้า ซึ่งหมายถึงความเร็วของฟองก๊าซมีค่าน้อยกว่าความเร็วของก๊าซในเบดหนาแน่น ($U_{mf} / \epsilon_{mf} U_b > 1$) ก๊าซในเบดหนาแน่นจะไหลผ่านฟองก๊าซจากทางด้านล่างออกทางด้านบน ทำให้ฟองก๊าซปราศจากหมอกปกคลุมดังรูป 2.2 ข (8,10) ลักษณะของฟองก๊าซดังที่กล่าวแล้วว่าจะขึ้นกับความเร็วของก๊าซในเบดหนาแน่น ยิ่งขึ้นกับขนาดของอนุภาคในเบด เนื่องจาก U_{mf} ซึ่งเป็นความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันเป็นฟังก์ชันกับขนาดหรือมวลของแต่ละอนุภาค การเผาไหม้ถ่านหินในขณะเริ่มต้นของการทำงาน (operate) จะเกิดฟองก๊าซชนิดเคลื่อนที่ช้าหรือฟองก๊าซที่ปราศจากหมอกปกคลุม (cloudless bubble region) และจะเร่งอยู่ในลักษณะฟองก๊าซอิสระ (free bubble region) เป็นฟองก๊าซเคลื่อนที่เร็ว เนื่องจากการเผาไหม้ ขนาดของอนุภาคจะมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นในการทดลองของระบบฟลูอิดไอเซชันความเร็วของอากาศปกติจึงอยู่ในระหว่าง (transition) ขอบเขตของฟองก๊าซเคลื่อนที่ช้าและเร็ว (10)



รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของฟองก๊าซเคลื่อนที่ช้าเป็นฟองก๊าซเคลื่อนที่เร็ว (10)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจึงเกิดในส่วนต่างๆ ของเบด มีแบบจำลองของปฏิกิริยาในเตาแบบฟลูอิดไอเซชันในอุดมคติ (idealized fluid bed) (11) ดังรูปที่ 2.3 แบ่งขอบเขตของการเกิดปฏิกิริยาเป็น 3 บริเวณคือ บริเวณเหนือแผ่นกระจายอากาศ (grid region) ประกอบด้วยฟองก๊าซขนาดเล็กที่เริ่มก่อตัวขึ้นมา บริเวณที่สองอยู่ถัดจากส่วนแรกขึ้นมาประกอบด้วยฟองก๊าซขนาดใหญ่มากมาย จึงเรียกบริเวณนี้ว่า bubbling region บริเวณสุดท้ายเป็นบริเวณเหนือเบดมีอนุภาคขนาดเล็กแขวนลอยอยู่เรียก freeboard region ปฏิกิริยาการเผาไหม้ในแต่ละส่วนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซ กรณีที่อัตราของปฏิกิริยามากไฮโดรไดนามิกในเบดได้แก่ คุณสมบัติของฟองจะเป็นส่วนสำคัญในกรณีปฏิกิริยาช้าระยะเวลาที่ก๊าซอยู่ในเบด (residence time) จะเป็นส่วนสำคัญ



รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาในส่วนต่างๆ ของฟลูอิดไรซ์เบดในอุดมคติ (11)

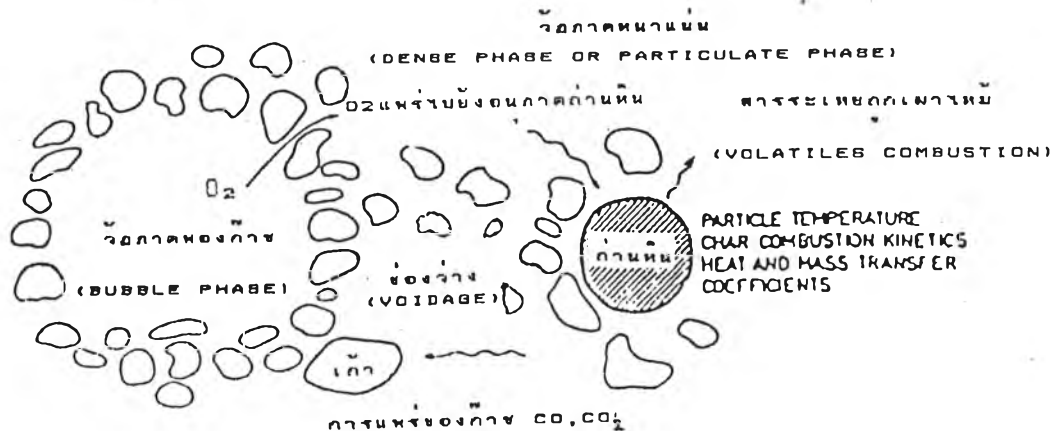
2.3 กลไกการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดไรซ์เบด

ถ่านหินเมื่อป้อนเข้าเตาเผาซึ่งมีอุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาทั้งอย่างสม่ำเสมอ (homogeneous

reaction) และปฏิกิริยาแบบเนื้อผสม (heterogeneous reaction) สามารถแบ่งขั้นตอนอย่างหยาบๆ ได้ดังนี้

2.3.1 กลไกการเผาไหม้ของสารระเหย ขณะที่เม็ดถ่านหินเข้าสู่เบด ความร้อนส่วนหนึ่งจากเบดทำให้อุณหภูมิถ่านหินมีอุณหภูมิสูงขึ้น สารระเหยเริ่มแพร่ออกมาอยู่บริเวณรอบๆ เม็ดถ่านหินหลังจากนั้นสารระเหยเริ่มติดไฟ อุณหภูมิถ่านหินที่เหลืออยู่มีสีดำเป็นถ่านชาร์ (char) กลไกการเผาไหม้ของสารระเหยยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างแน่ชัด (12,13) เนื่องจากการแตกต่างของผลิตภัณฑ์ (yield) องค์ประกอบของถ่านหิน และเวลาที่ใช้ในการระเหย (devolatilization time) มีค่าน้อยมาก Gregory และ Littlejohn (14) ได้เสนอว่าปริมาณของสารระเหยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณสารระเหยในถ่านหิน ซึ่งมีอัตราการระเหยของสารระเหยเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ทั้งนี้จะต้องไม่เกิดการเผาไหม้ของสารระเหย (La Nauze) (13) นอกจากนี้ยังพบว่ามีการถ่ายเทมวลสารและพลังงานทั้งภายในและภายนอกอนุภาคมีผลต่อการระเหยด้วย

2.3.2 กลไกการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอน หลังจากที่สารระเหยระเหยออกไปและถูกเผาไหม้แล้ว เมื่ออุณหภูมิในเบดสูงขึ้นถ่านชาร์เกิดการเผาไหม้ลุกแดงทั่วทั้งเบด กลไกการเผาไหม้เกิดจากการแพร่ของออกซิเจนจากวัฏภาคฟองก๊าซผ่านวัฏภาคหนาแน่น ไปยังผิวของถ่านชาร์ดังรูปที่ 2.4 (13,14)



รูปที่ 2.4 กระบวนการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอนในฟลูอิดไรซ์เบด (15)

เนื่องจากอนุภาคคาร์บอนเป็นสารที่มีรูพรุน ก๊าซออกซิเจนบางส่วนจะทำปฏิกิริยาที่ผิวและบางส่วนแพร่เข้าไปในรูพรุนทำปฏิกิริยากับพื้นผิวภายในรูพรุนของคาร์บอน โดยมีอัตราของการเกิดปฏิกิริยารวมหรืออัตราการเผาไหม้ (combustion rate) ซึ่งมีอยู่ 2 ชั้นคือ

ชั้นที่ 1 ก๊าซออกซิเจนแพร่จากภายนอกมาที่ผิว

ชั้นที่ 2 ก๊าซออกซิเจนทำปฏิกิริยาเคมีกับคาร์บอน

ที่สภาวะคงที่ (Steady state) อัตราเร็วทั้งสองชั้นจะเท่ากันดังนั้น

อัตราการเผาไหม้ , w_c' = อัตราการถ่ายเทของก๊าซออกซิเจนมาที่ผิวของอนุภาค
= อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ผิวของอนุภาค

$$w_c' = \Delta R_m (C_o - C_{oc}) = R_c C_o^n \quad \text{-----} \quad 2.1$$

พบว่าที่อุณหภูมิต่ำอัตราการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอนขนาดเล็กในฟลูอิดไธซ์เบดไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ของออกซิเจน แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราของการเกิดปฏิกิริยา (kinetic controlled) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วมาก ทำให้การแพร่ของออกซิเจนจากภายนอกเป็นส่วนควบคุมอัตราการเผาไหม้ (rate determining step) สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ Field , Malcahy (16) พบว่าอัตราการเผาไหม้ถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ของออกซิเจนไปยังผิวของถ่านจะเห็นได้ว่าการถ่ายเทก๊าซออกซิเจนเป็นตัวที่บอกลถึงอัตราการเผาไหม้ แต่ไม่ได้แสดงให้เห็นถึงอัตราการสูญเสียอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดเพราะมวลสารเกิดการสูญเสียไป เนื่องจากปฏิกิริยาและการขจัดสี (fragmentation และ attrition) ทำให้อนุภาคถ่านหินมีขนาดเล็กจนกระทั่งถึงขนาดวิกฤตถูกพัดพาออกจากเบดในที่สุด

จากสมการ 2.1 เทอม C_{oc} สามารถแทนได้ดังนี้

$$w_c' = R_c (1 - X)^n C_o^n \quad \text{-----} \quad 2.2$$

$$\text{เมื่อ } X = w_c' / w_m$$

$$\text{และ } w_m = \Delta R_m C_o$$

เมื่อปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเร็วจนกระทั่งความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่ผิวของอนุภาค (C_{p2}) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และอัตราการเผาไหม้ถูกควบคุมโดยการถ่ายเทมวลสารของออกซิเจนไปยังผิวของอนุภาคอย่างเดียวนั้น จะได้ว่า w'_c ก็คืออัตราการเผาไหม้ที่มากที่สุดที่เป็นไปได้นั่นเอง จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ Smith (17) ได้พบความสัมพันธ์ของสัดส่วนของการควบคุมการถ่ายเทมวลสาร, X ต่ออันดับของปฏิกิริยา, n ดังนี้

$$X / (1 - X)^n = R_c C_p^n / W_m = R_c C_p^{n-1} / \Delta R_m \quad \text{-----} \quad 2.3$$

ซึ่ง Young และ Smith (18) ได้ใช้คำนวณอันดับของปฏิกิริยาของระบบ นอกจากนี้ La Nauze และ Jung (19) ได้ใช้สมการ 2.3 คำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของการเผาไหม้ในฟลูอิดซ์เบดในรูปของ Sherwood number จากสมการที่ 2.2 เมื่อทราบค่าอันดับของปฏิกิริยาสามารถคำนวณหาอัตราการเผาไหม้ได้ดังนี้

กรณีเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1

$$w'_c = C_p / (1/R_m + 1/R_c) \quad \text{-----} \quad 2.4$$

กรณีเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1/2

$$w'_c = -R_c^2 / 2\Delta R_m + 1/2 (R_c^4 / \Delta^2 R_m^2 + 4R_c^2 C_p)^{1/2} \quad \text{-----} \quad 2.5$$

และกรณีเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 0

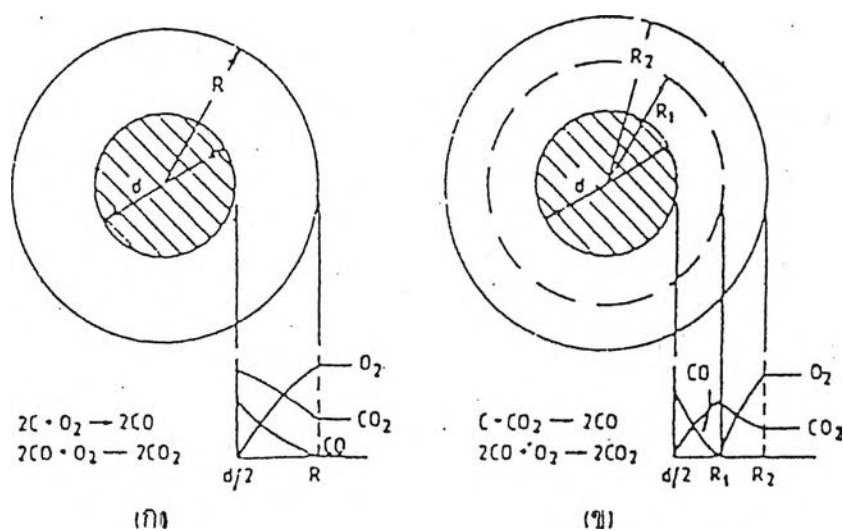
$$(w'_c - \Delta R_m C_p)(w'_c - R_c) = 0 \quad \text{-----} \quad 2.6$$

2.4 โมเดลการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเม็ดถ่านหิน (5, 10, 13, 15)

จากกลไกการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอนแสดงให้เห็นว่าอัตราการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับ การถ่ายเทก๊าซออกซิเจนไปยังผิวคาร์บอน การถ่ายเทถูกต้านทาน (external mass transfer

resistance) จากวัฏภาคฟองก๊าซไปยังวัฏภาคหนาแน่น และจากวัฏภาคหนาแน่นไปยังผิวหรือ
 รุพุนของอนุภาคคาร์บอน มีแบบจำลองที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซรอบอนุภาคที่
 กำลังเผาไหม้ 2 แบบ โดยการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซรอบๆ อนุภาคที่เผา
 ไหม้จากการทำสมดุลมวลสารและพลังงานที่สภาวะหนึ่งๆของการเผาไหม้

Water (20), Caram และ Amundson (21) และ Calleja และผู้ร่วมงาน (22)
 ได้วิเคราะห์กลไกพื้นฐานของการเผาไหม้ และเสนอแบบจำลองของแผ่นฟิล์มเชิงเดี่ยว (single
 film model) โดยอธิบายว่าคาร์บอนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับก๊าซออกซิเจนอย่างรวดเร็ว เกิด
 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ (รูปที่ 2.5ก)



รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซต่างๆ ตามแนวรัศมีของอนุภาค
 ถ่านหินที่กำลังเผาไหม้ภายในขอบเขตการแพร่ (diffusion controlled
 region) ก. แผ่นฟิล์มเชิงเดี่ยว ข. แผ่นฟิล์มเชิงคู่ (5)

Avedesian และ Davidson (15) เสนอแบบจำลองแบบแผ่นฟิล์มเชิงคู่ (Double
 film model) เพื่ออธิบายปฏิกิริยารอบอนุภาคคาร์บอนโดยตั้งสมมติฐานว่า

- ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนที่ก๊าซออกซิเจน
 จะแพร่ไปยังผิวของอนุภาคคาร์บอน
- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในเขตสามารถแพร่ได้ 2 ทิศทางคือ แพร่ออกจากผิว

ของคาร์บอนและส่วนหนึ่งจะแพร่เข้าหาผิวของคาร์บอน เกิดปฏิกิริยารีดักชันต่อไปนี้ดังนี้



ทำให้มีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่บริเวณใกล้ผิวของอนุภาคมากขึ้น ซึ่งก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะแพร่ออกจากอนุภาคทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 2.5

แต่ Basu และผู้ร่วมงาน (23) ได้ชี้แนะว่าอุณหภูมิในเตาเผาแบบฟลูอิดไชน์ไม่สูงพอที่จะทำปฏิกิริยารีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น

2.5 การถ่ายเทมวลสารในฟลูอิดไชน์เบด (13,24)

การถ่ายเทมวลสารในฟลูอิดไชน์เบดแสดงได้ในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (mass transfer coefficient, R_m) หรืออาจแสดงในรูปตัวแปรไร้มิติของค่าของเชอร์วูด ดังนี้

$$N_{gh} = R_m d / D_g \quad 2.8$$

การพิจารณาค่าเชอร์วูดอาจพิจารณาในเทอมของค่าเรโนลด์ ($N_{Re} = Ud\rho/\mu$) โดยพิจารณาการแพร่เข้าสู่อนุภาคทรงกลมเดี่ยวที่อยู่หนึ่งในของไหล ค่าเชอร์วูดจะเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลและขนาดของอนุภาค และเป็นฟังก์ชันของคุณสมบัติของของไหล โดยอยู่ในรูปค่าของชมิตต์ ($N_{Sc} = \mu/\rho D_g$) ดังนี้

$$N_{gh} = 2 + B N_{Re}^{1/2} N_{Sc}^{1/3} \quad 2.9$$

B เป็นค่าคงที่แอมไพริคัล (empirical constant) ปกติมีค่าเท่ากับ 0.69 และจากสมการที่ 2.9 เห็นได้ว่า N_{gh} เป็นฟังก์ชันกับ N_{Re} , N_{Sc} โดยตรง ได้มีนักวิทยาศาสตร์นำไปพัฒนาเพื่อใช้อธิบายในแต่ละระบบ โดยสรุปเป็นตาราง 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของเชอร์วูดเมื่อใช้กับการเผาไหม้ในฟลูอิดไอซ์เบด (13)

รายนามนักวิทยาศาสตร์	สมการค่าของเชอร์วูด, N_{sh}	หมายเหตุ
Avedesian & Davidson	$2D/D_p = 2\epsilon_{mf}$	$N_{sh} =$ คงที่
Gordon & Amundson	2	
Yagi & Kunii	$2 + 0.6N_{Re}^{1/2} N_{Sc}^{1/3}$	ลักษณะของความเร็วจนเพื่อ ค่าเรโนลด์ไม่ได้แสดงไว้
Leung & Smith		
Congalidis & Geogakis	$2 + 0.6(N_{Re}/\epsilon_{mf})^{1/2} N_{Sc}^{1/3}$	$\epsilon_{mf} =$ ช่องว่างต่ำสุด
Chakraborty & Howard	$2 + 0.69N_{Re}^{1/2} N_{Sc}^{1/3}$	$\epsilon =$ ช่องว่างของเบด
Pillai	$2 + 0.69 N_{Re}^{1/2} N_{Sc}^{1/3}$	$\epsilon \sim$ ช่องว่างของเบด=0.7
La Nauze & Jung	$2 + 0.69(N_{Re}/\epsilon)^{1/2} N_{Sc}^{1/3}$	
La Nauze & Jung	$2_{mf} + 0.69(N_{Re}/\epsilon)^{1/2} N_{Sc}^{1/3}$	

Tamarin (25) ได้นำสมการ 2.9 มาประยุกต์โดยใช้ทฤษฎี Laminar Boundary layer สำหรับการไหลผ่านวัตถุทรงกลมที่สภาวะคงที่ ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$N_{sh} = aN_{Re}^{1/2} N_{Sc}^{1/3} \text{ ----- 2.10}$$

และมีความเร็วเฉลี่ยรอบทรงกลมแสดงอยู่ในรูปค่าของเรโนลด์ดังนี้

$$N_{Re, \text{crit}} = (N_{Ar} \bar{\epsilon} / 6 \cdot 10^3)^{2/3} \text{ ----- 2.11}$$

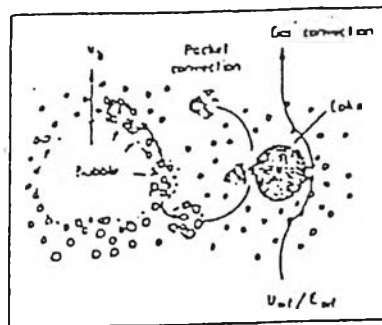
นำสมการ 2.11 แทนในสมการ 2.10 จะได้

$$N_{sh} = 0.248(N_{Sc} N_{Ar})^{1/3} (d/d_p)^{1/2} \text{ ----- 2.12}$$



สมการที่ 2.12 เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของการถ่ายเทมวลสารซึ่งขึ้นกับขนาดของอนุภาคและ อัตราการไหลที่สภาวะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (steady state) เท่านั้น

La Nauze และคณะ (13) ได้เสนอว่าแบบจำลองดังกล่าวมีข้อบกพร่องหลายอย่าง จึงเสนอแบบจำลองของภาวะที่ไม่คงที่แปรเปลี่ยนไปกับเวลา (unsteady state) ของการถ่ายเทมวลสาร โดยจุดสำคัญของการถ่ายเทมวลสารนี้คือการเกิดฟองจะมีบทบาทต่อการถ่ายเทมวลสาร โดยจะช่วยพาอนุภาคที่กำลังเผาไหม้เข้ามาหาออกซิเจน (fresh oxygen) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของการส่งผ่านมวลสารของก๊าซ O_2 ไปยังพื้นผิวของถ่านโค้ก (13)

ซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังนี้

เมื่อ $d/d_p > 3$ ถึง 5 จะได้

$$N_{GH} = 2\epsilon_{mf} + (4\epsilon_{mf}d(U_{mf}/\epsilon_{mf} + U_b)/\pi D_p)^{1/2} \quad \text{-----} \quad 2.13$$

และเมื่อ $d/d_p < 3$

$$N_{GH} = 2\epsilon_{mf} + (4dU_{mf}/\pi D_p)^{1/2} \quad \text{-----} \quad 2.14$$

จากทฤษฎีดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า การถ่ายเทมวลสารจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศสูงกว่าความเร็วอากาศต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไรซ์

2.6 การถ่ายเทความร้อนในฟลูอิดไคส์เบด (8, 13)

ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถูกถ่ายเทจากอนุภาคที่กำลังเผาไหม้ไปยังอนุภาคเฉื่อย (inert material) ภายในเบด และส่งไปยังก๊าซที่ไหลผ่านเบดทั้งแบบการพาและโดยการแผ่รังสี ความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนแสดงอยู่ในรูปของค่าตัวเลข, $N_{Nu(c)}$, ปริมาณความร้อนทั้งหลายได้จากอัตราการถ่ายเทมวลสารคูณด้วยความร้อนจำเพาะที่ปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาของคาร์บอนกับออกซิเจน

$$N_{Nu(c)} = h_c d_p / K_g = 0.24 N_{Ar}^{0.33} d_p^{0.27} / 3855 d^{0.65} \quad \text{-----} \quad 2.15$$

เมื่อ $L = q D_p (c_p - c_{\infty}) / K_g$

จากสมการ 2.14 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h_c อาจพิจารณาได้ง่ายขึ้นเมื่อ $c_{\infty} = 0$ กล่าวคือ

$$h_c = 57.87 d_p^{1.26} d^{-0.65} \quad \text{-----} \quad 2.16$$

2.7 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอน

การเผาไหม้ในฟลูอิดไคส์เบดเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน มีกลไกและปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากมาย ประสิทธิภาพการเผาไหม้ขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

2.6.1 ตัวแปรที่สภาวะการเผาไหม้ (operational variables) ได้แก่ ความเร็วอากาศ อุณหภูมิในเบด ขนาดเชื้อเพลิงและความสูงเบดเป็นต้น

2.6.2 ตัวแปรที่เกิดจากการออกแบบ (design variables) ได้แก่ ความสูงของฟริบอร์ตและจุดบ่อนเชื้อเพลิงเป็นต้น

การสูญเสียความร้อนไปกับก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ และความชื้นในเชื้อเพลิงรวมทั้งการสูญเสียอนุภาคที่เผาไหม้ไม่หมดเหล่านี้ล้วนทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำลงทั้งสิ้น ในระบบฟลูอิดไคส์ส่วนใหญ่การสูญเสียความร้อนเกิดจากการสูญเสียอนุภาคคาร์บอนที่ยังสามารถเผาไหม้ได้อีกหลุดลอยออกจากเบด และความไม่สมบูรณ์ของปฏิกิริยาเนื่องจากภาวะการเผาไหม้ไม่เหมาะสม

ก๊าซ P_{∞} เป็นความหนาแน่นของคาร์บอน และ Y_{O_2} คือสัดส่วนโดยโมลจะได้สมการที่ 2.17 เป็น

$$P(R) = \frac{\rho_{\infty}}{6ShDC} Y_{O_2} F'_0 / W_{\infty} R^4 / R_1^3 \quad \text{-----} \quad 2.21$$

พบว่าปริมาณคาร์บอนที่ใช้เป็นสัดส่วนกับอัตราการบ่อนถ่านหินและเวลาในการเผาไหม้ สิ่งเหล่านี้เป็นตัวกำหนดการสูญเสียอนุภาคคาร์บอนและจะเป็นผลกระทบต่อการปลดปล่อย (emission) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ได้มีผู้หาความสัมพันธ์ของเวลาในการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์บอน โดยสรุปว่าเวลาในการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยา (อันดับหนึ่งหรือศูนย์) (26,27) โดยเป็นฟังก์ชันกับขนาดและความหนาแน่นของคาร์บอน ความเร็ว และความหนาแน่นของอากาศ เป็นต้น เนื่องจากการสูญเสียอนุภาคคาร์บอนเกิดจากการที่อนุภาคมีขนาดเล็กจึงพอสรุปลสาเหตุได้ 2 ประการ

ประการแรก เกิดจากสาเหตุทางกายภาพ

ก. Fragmentation เป็นการแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ เนื่องจากการระเหยของสารระเหยและจากความเครียดทางความร้อน (thermal stress)

ข. Attrition เป็นการแตกที่บริเวณผิววนอกของอนุภาคซึ่งเกิดจากการขัดสีกันเองหรือกับผนังเตาหรือท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

ประการที่สอง เกิดจากการเผาไหม้

ถ่านหินเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้ความชื้นและสารระเหยหลุดออกไป ทำให้ถ่านหินมีความหนาแน่นลดลงและในที่สุดจะถูกเผาไหม้จนมีขนาดวิกฤตที่ถูกกระแสอากาศพัดพาออกจากเบด การสูญเสียที่เกิดจากสองกรณีนี้เป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการทำนายอัตราการสูญเสียอนุภาคขนาดเล็ก เพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบอุปกรณ์กำจัดอนุภาคขนาดเล็กต่อไป

Das (28) ได้ทำการทดลองและสรุปว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาแน่นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้อาจเกิดได้ 3 ลักษณะคือ

- ความหนาแน่นคงที่ แต่ขนาดเล็กลง
- ความหนาแน่นคงที่ แต่เกิดการลดของขนาดถ่าน (shrinking carbon core)

- ขนาดคงที่ แต่ความหนาแน่นลดลง

ขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคคาร์บอนที่เวลาใดๆ อาจคำนวณได้จากค่าของการเผาไหม้ของคาร์บอนซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างมวลของอนุภาคเริ่มต้น , m_0 กับมวลของอนุภาคที่เวลาใดๆ หาดด้วยมวลของอนุภาคเริ่มต้น , m

$$U = (m_0 - m) / m_0 \quad \text{-----} \quad 2.22$$

และ U จะมีความสัมพันธ์กับขนาดและความหนาแน่นของคาร์บอนคือ

$$d = d_0 (1 - U)^3 \quad \text{-----} \quad 2.23$$

$$\rho_A = \rho_{A_0} (1 - U)^3 \quad \text{-----} \quad 2.24$$

กรณีอนุภาคทรงกลม $3i + j = 1$

กรณีความหนาแน่นคงที่ $i = 1/3 ; j = 0$

ขนาดคงที่ $i = 0 ; j = 1$

Beer และผู้ร่วมงาน (29) และ Arena และผู้ร่วมงาน (30) พบว่า fragmentation จะเกิดในทันทีที่ถ่านหินเริ่มเข้าสู่เบต จากนั้นจะเกิดการขัดสีกันเองและถูกเผาไหม้มีขนาดเล็กลงจนกระทั่งปลิวหลุดออกจากเบต

สำหรับกลไกการแตกตัวเนื่องจากการปะทะกันระหว่างอนุภาคหรือกับผนังเตาได้มีผู้ศึกษาพบว่าอัตราการปะทะเป็นสัดส่วนกับอัตราการกระจายพลังงานภายในเบต ซึ่งเป็นสัดส่วนกับผลต่างของความเร็วอากาศที่ใช้กับความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์ (10) ซึ่งจะมีค่ามากเมื่อมีปฏิกิริยาออกซิเดชันและกระบวนการ pyrolysis การปะทะจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงที่บริเวณผิวหน้าของถ่านหินในระหว่างที่เกิดการเผาไหม้



รูปที่ 2.7 กระบวนการที่ทำให้อนุภาคคาร์บอนมีขนาดเล็กลงภายในฟลูอิดไดซ์เบด (13)

Hirama และคณะ (31) ได้คำนวณการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนในรูปของความร้อน เป็นประสิทธิภาพการเผาไหม้ , η_c

$$\eta_c = \frac{100 (1 - \text{ความร้อนที่สูญเสียไปกับการปลิวหลุดและท่อ ไหลล้น})}{\text{ความร้อนของถ่านหินที่ป้อนเข้าเตาเผาทั้งหมด}} \text{ ----2.25}$$

นอกจากความสัมพันธ์นี้ ยังมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

2.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้ (11,32)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นส่วนใหญ่ใช้แบบจำลองของ Davidson-Harison มีพื้นฐานอยู่บนทฤษฎีสองเฟส ในแต่ละแบบจำลองต่างกันที่ข้อสมมติ (assumption) ดังตารางที่ 2.2

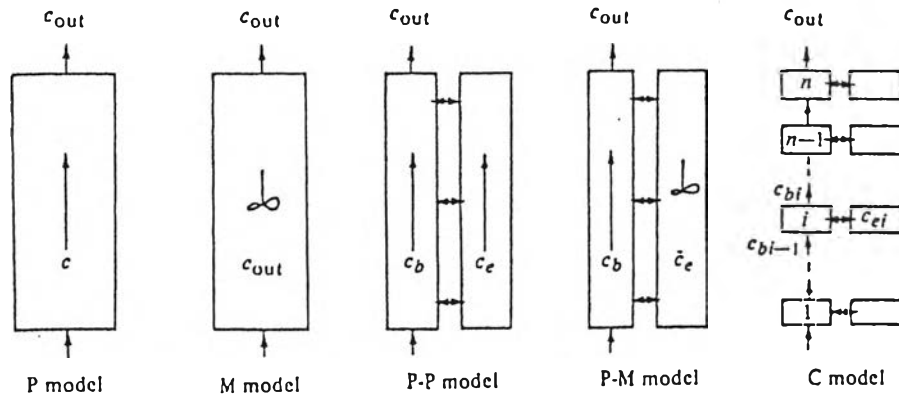
ตารางที่ 2.2 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีข้อสมมติต่างๆ กัน (32)

	Phase division		Bubble flow, Q_b			Emulsion flow					Interphase transfer		
	Two phases, bubbles empty	Two phases, bubbles contain some solids	$Q_b = Q - Q_{mf}$	$Q_b = 0$	Not specified	Axial dispersion model	Tanks in series model	Plug flow	Completely mixed	Down flow allowed	Measured by gas mixing or kept as correlating parameter	Calculated from chemical rate data	Calculated mechanically
Shen and Johnstone ⁷	⊗		⊗					⊗	⊗			⊗	
Mathis and Watson ⁸		⊗	⊗					⊗				⊗	
Lewis et al ⁹		⊗		⊗				⊗	⊗			⊗	
May ¹⁰	⊗		⊗			⊗					⊗		
Lanneau ¹¹		⊗			⊗					⊗			⊗
Gomezplata and Shuster ¹²	⊗		⊗					⊗				⊗	
Van Deemter ¹³	⊗				⊗	⊗					⊗		
Mamuro and Muchi ¹⁴	⊗		⊗				⊗					⊗	
Kobayashi et al ¹⁵		⊗	⊗	⊗				⊗	⊗		⊗		
Mireur and Bischoff ¹⁶	⊗		⊗			⊗					⊗	⊗	
Van Deemter ¹⁷	⊗				⊗			⊗		⊗	⊗		

	Phase division			Bubble flow, Q_b		Emulsion flow							Interphase transfer							Cloud size	Flow in bubble	Flow in cloud	Wake					
	Two phases, bubbles empty	Two phases, cloud + bubble + wake; emulsion	Three phases; bubble; cloud + wake; emulsion	$Q_b = Q - Q_{mf}$	$Q_b = 0$	Axial dispersion (1)	Axial dispersion (2)	Tanks in series	Plug flow	Completely mixed	Downflow allowed	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	Davidson	Murray	Streamline	Completely mixed	Streamline	Completely mixed	Included in cloud	Ignored or included in dense phase		
Orcutt et al ¹⁸	⊗			⊗					⊗	⊗																	⊗	
Davidson and Harrison ²	⊗			⊗					⊗	⊗																	⊗	
Rowe ¹⁹		⊗		⊗					⊗					⊗					⊗	⊗				⊗	⊗	⊗		
Rose ²⁰		⊗		⊗					⊗					⊗					⊗	⊗				⊗	⊗	⊗		
Partridge and Rowe ²¹		⊗		⊗					⊗					⊗					⊗	⊗				⊗	⊗	⊗		
Toor and Calderbank ²²	⊗	⊗		⊗	⊗				⊗	⊗				⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗				⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Hovmand and Davidson ²³	⊗			⊗					⊗					⊗					⊗	⊗							⊗	
Kunii and Levenspiel ²⁴			⊗	⊗			⊗				⊗			⊗					⊗	⊗				⊗	⊗	⊗		
Kato and Wen ²⁵		⊗			⊗			⊗				⊗	⊗						⊗	⊗				⊗	⊗	⊗		⊗
Chiba and Kobayashi ²⁶		⊗		⊗				⊗				⊗	⊗						⊗	⊗				⊗	⊗	⊗		
Fryer and Potter ²⁷			⊗	⊗			⊗		⊗	⊗				⊗					⊗	⊗				⊗	⊗	⊗		



และมีแบบจำลองพื้นฐาน (simple model) ของการไหลในแต่ละวัฏภาคแสดงไว้รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงแบบจำลองพื้นฐานและปฏิกิริยาในวัฏภาคก๊าซ (11)

พารามิเตอร์ที่อธิบายปฏิกิริยาระหว่างก๊าซ-ของแข็งในแต่ละแบบจำลองเป็นตัวแปรไร้มิติ 2 ตัวคือ

$$N_M, \text{ number of transfer unit} = F_{b_m} \epsilon_b L/U \quad \text{-----} \quad 2.26$$

$$\text{และ } N_R, \text{ number of reaction unit} = kL_{mf}/U \quad \text{-----} \quad 2.27$$

- F_{b_m} = สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนก๊าซในวัฏภาคของ-วัฏภาคหนาแน่น
- k = ตัวคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง
- L, L_{mf} = ความสูงของเบดที่ภาวะการทดลองและที่จุดเริ่มเกิดฟลูอิดไลซ์
- U = ความเร็วปรากฏ
- ϵ_b = อัตราส่วนปริมาตรของช่องต่อปริมาตรของเบดทั้งหมด ซึ่งมีค่า $(L-L_{mf})/L$

แต่ละแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลงของก๊าซ (conversion) ดังนี้

P model (Plug flow)

$$\begin{aligned} C_{out} &= 1 - \text{conversion} = \exp(-kL_{mf}/U) \\ &= \exp(-N_R) \quad \text{-----} \quad 2.28 \end{aligned}$$

M model (complete mixing)

$$1 - \text{conversion} = 1/(1+N_R) \quad \text{-----} \quad 2.29$$

สำหรับกรณีที่เป็น 2 ภูมิภาคซึ่งประกอบด้วย ภูมิภาคฟองก๊าซและภูมิภาคหนาแน่น

ภูมิภาคฟองก๊าซ

$$\begin{aligned} (\text{การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น}) (\text{อัตราการไหลของฟอง}) &= \text{การถ่ายเทอนุภาคกับภูมิภาคหนาแน่น} \\ &- \text{ปฏิกิริยาของอนุภาคในภูมิภาคฟองก๊าซ} \quad \text{---} 2.30 \end{aligned}$$

ภูมิภาคหนาแน่น

$$\text{การถ่ายเทอนุภาคกับภูมิภาคฟอง} = \text{ปฏิกิริยาของอนุภาคในภูมิภาคหนาแน่น} \quad \text{----} 2.31$$

จากสมมูลในแต่ละภูมิภาค

P-P model (plug flow ในภูมิภาคฟองและภูมิภาคหนาแน่น)

$$1 - \text{conversion} = \exp(-N_R \{ N_M/N_R ((1-Y_{\text{f}})/N_M/N_R + (1-Y_{\text{d}})) + Y_{\text{f}} \}) \quad \text{----} 2.32$$

M-M model (well-mixed ทั้งภูมิภาคฟองและภูมิภาคหนาแน่น)

$$1 - \text{conversion} = [1 + Y_{\text{f}} N_R + (1-Y_{\text{d}}) N_M / (N_M/N_R + (1-Y_{\text{d}}))]^{-1} \quad \text{----} 2.33$$

P-M model (plug flow ในวัฏภาคของ , well mixed ในวัฏภาคหนาแน่น) , $Y_{\infty} \rightarrow 0$

$$1 - \text{conversion} = [1 + (\exp(-N_M))(N_R - 1)] / (1 + N_R - \exp(-N_M)) \quad \text{---2.34}$$

C model (compartments)

$$1 - \text{conversion} = \frac{[(N_M/N_R + (1 - Y_{\infty})) / (1 - Y_{\infty}) [1 + (N_R/n) Y_{\infty} + N_M/n] + (N_M/N_R) [1 + (N_R/n) Y_{\infty}]]^n}{\dots} \quad \text{---2.35}$$

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาที่มีอัตราการเกิดการเกิดปฏิกิริยาเร็ว ปกติมีค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเท่ากับ 5 วินาที^{-1} หรือมากกว่า ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้กับการเผาไหม้จึงเป็น P-P หรือ P-M ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเร็วปรากฏต่อความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดซ์

P-P model ใช้เมื่อ $U / U_{mf} < 6$ ถึง 11

P-M model ใช้เมื่อ $U / U_{mf} > 6$ ถึง 11

ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างถ่านหินกับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งตัวทำปฏิกิริยาทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงดังสมการ



มีสมการมวลสารคือ

$$(UA)C_{A \text{ in}} X_A = W_b C_{B \text{ in}} X_B \quad \text{---2.37}$$

- เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของเบด
- b = สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพัทธ์ (stoichiometric coefficient)
- W_b = อัตราการป้อนของแข็งโดยปริมาตร

C_{A1n} และ C_{B1n} เป็นความเข้มข้นของก๊าซและของแข็งที่ป้อนเข้า

การเปลี่ยนแปลงในวัฏภาคก๊าซคือ

$$X_A = 1 - \exp(-N_r \{N_M/N_r [(1-\gamma_u)/(N_M/N_r + (1-\gamma_u))] + \gamma_u\}) \quad \text{---- 2.38}$$

และในวัฏภาคของแข็งซึ่งสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ของแข็งสามารถอยู่ในเบต ,

$$X_B = 1 - 0.25\beta + 0.05\beta^2 - 0.0083\beta^3 \quad (\beta < 1) \quad \text{----- 2.39}$$

$$\text{เมื่อ} \quad \beta = t^* / t \quad \text{----- 2.40}$$

เนื่องจากปฏิกิริยาของแข็งมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตลอดเวลา จึงนำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Shrinking core model มาใช้ ซึ่งพิจารณาการควบคุมปฏิกิริยาเป็น 3 แบบคือ

- ควบคุมด้วยแผ่นฟิล์มของของไหล

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

- ควบคุมด้วยปฏิกิริยาเคมี

$$t^* = d_{em}^2 \rho_{em} / 2bk_c C \quad \text{----- 2.42}$$

- ควบคุมด้วยการแพร่ผ่านชั้นของเถ้า

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

ขั้นตอนของการควบคุมปฏิกิริยาจะเป็นตัวชี้แนะว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้มีกลไกเป็นอย่างไร และสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของถ่านหินหรือประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้