

พฤติกรรมการเผาไหม้ถ่านหินและคาร์บอนใน Spouted และ Spout-Fluid Beds

ดร. ประสงค์ วงศ์วิชา

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

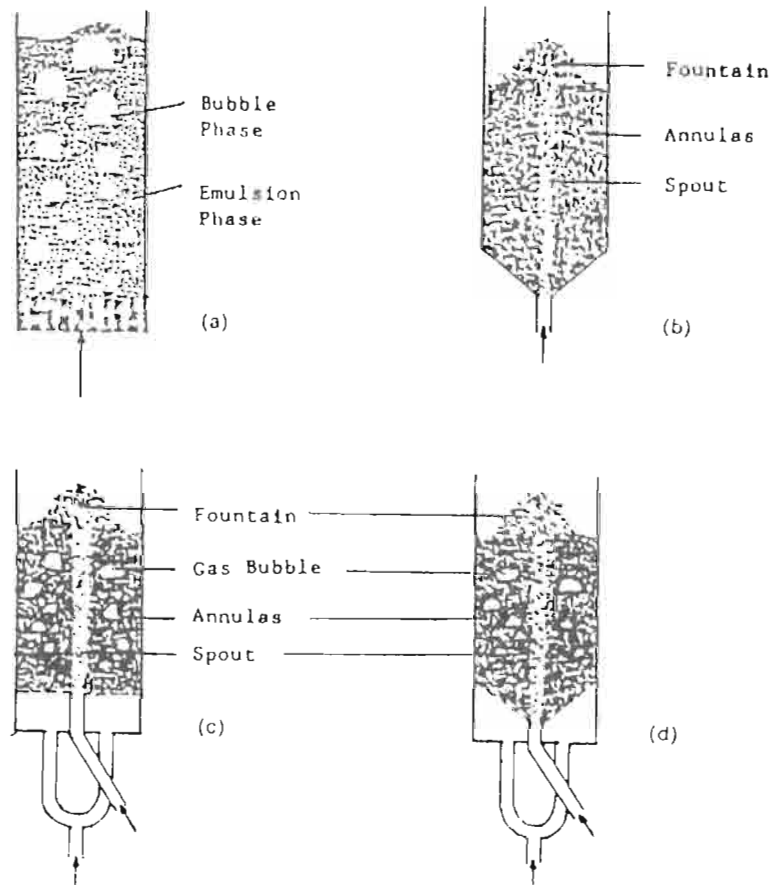
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ลักษณะของเทคนิค spouted bed และการนำไปใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะการทำแห้ง (drying) ได้ถูกบันทึกและเขียนในที่ต่างๆ แล้ว [1],[2],[3] การทดลองนำ spouted bed มาทำเป็น combustor เพื่อเผาถ่าน [4],[5] เเผาของเหลว [6] และเผาเชื้อเพลิงแข็ง [7],[8],[9] แสดงให้เห็นว่า การเผาไหม้เป็นไปได้ดีและเป็นที่ยอมรับได้ เมื่อเร็ว ๆ นี้ Zhao และคณะ [10],[11] และ Lim และคณะ [12] ได้ทดลองนำเทคนิค spout-fluid bed (SFB) มาใช้เผาไหม้ถ่านหินเกรดต่ำและพบว่าเผาไหม้ได้เป็นอย่างดี ลักษณะของ spout-fluid bed นี้จะรวมคุณลักษณะของ spouted bed (SB) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ให้อากาศผ่านรูกลาง (orifice) เป็นสายพ่น (jet) ผ่านด้านล่างของชั้นอนุภาคแข็ง (bed) และคุณลักษณะของ fluidized bed (FB) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ให้อากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอผ่านด้านล่างของชั้นอนุภาคแข็ง ลักษณะความแตกต่างของกระบวนการทั้งสามแบบได้แสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 1 ซึ่งข้อดีของ SB หรือ SFB เหนือ FB ในการเผาไหม้ก็คือ

- (i) สามารถที่จะเผาเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำได้ ทั้งในเชิงคุณภาพของความร้อน (calorific content) และการยึดเหนี่ยวเกาะกัน (stickiness) ของเชื้อเพลิง
- (ii) ง่ายต่อการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านล่างของ bed โดยการชักนำของลม (pneumatic conveying) โดยใช้อากาศที่ทำให้เกิด spouting [10]
- (iii) การปล่อยมลพิษ NO_x ต่ำกว่า

- (iv) การใช้ปูนขาว (limestone) เพื่อลดการปล่อย SO_2 ออกมาในขณะเผาไหม้ ถ่านหินมีประสิทธิภาพมากกว่า



รูปที่ 1 รูปเปรียบเทียบลักษณะของ fluidized bed (รูป a) spouted bed (รูป b) spout-fluid bed ที่มีฐานล่างราบเรียบ (รูป c) และ spout-fluid bed ที่มีฐานล่างเป็นรูปกรวย (รูป d)

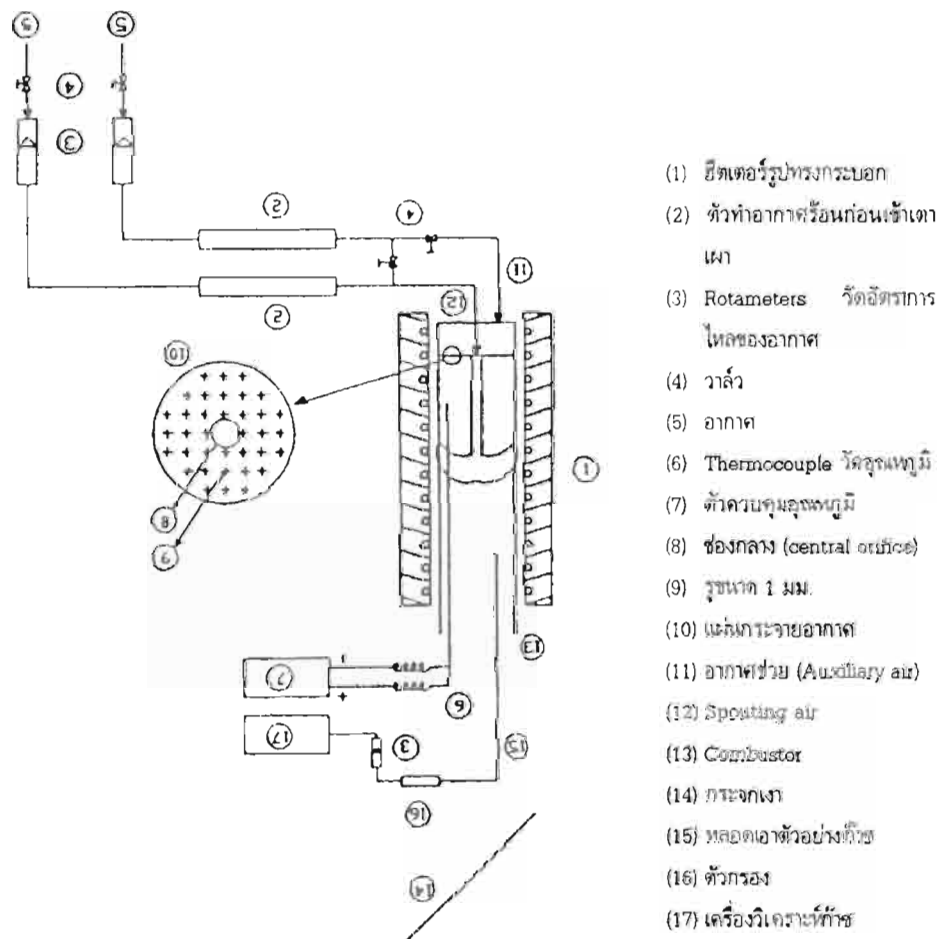
จากการทดลองของ Lim และคณะ [12] แสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ถ่านหินใน SFB เมื่อเทียบกับ SB และ FB แล้ว ให้แนวโน้มในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า มีประสิทธิภาพมากกว่า ให้ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิใน bed (ชั้นหรือปริมาตรของอนุภาคแขวนลอย) มากกว่า เนื่องจากการผสมของของแข็งดีกว่า และเนื่องจากมีความรุนแรงของการผสมของของแข็งดี ทำให้ลดการเกาะตัวของอนุภาคของถ่าน (char)

บทความนี้จะเสนอผลการทดลองการศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนท์ที่ได้จากเหมืองบ้านปู จังหวัดลำปาง และคาร์บอนจากอิเล็กโตรดของถ่านไฟฉายที่ถูกกำจัดสารระเหย (pyrolysed electrode carbon) ในเตาเผาทั้งแบบ SB และ SFB แบบไม่ต่อเนื่อง (batch combustion) รวมทั้งการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการเผาไหม้ของสารระเหยในถ่านหิน (volatiles) ที่ปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้ และการเผาไหม้ของอนุภาคของถ่านหินที่เหลือหลังจากสารระเหยในถ่านหินถูกขับออกไปแล้ว (char) เปรียบเทียบกับการเผาไหม้อิเล็กโตรดคาร์บอนจากถ่านไฟฉาย

รายละเอียดของการทดลอง

การทดลองการเผาไหม้นี้ กระทำในท่อหรือคอลัมน์รูปทรงกระบอก ทำด้วย stainless steel ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10.8 ซม. มีผนังหนา 4 มม. และสูง 80 ซม. (ดูรูปที่ 2) ฐานล่างของคอลัมน์ถูกเชื่อมกับแผ่นกระจายอากาศ (distributor) ซึ่งเป็นแผ่น stainless steel เจาะรูเล็ก ๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม. จำนวน 164 รู ตรงกลางของแผ่นกระจายอากาศนี้จะเจาะเป็นช่องกลม (orifice) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. ซึ่งข้างบนจะมีตะแกรง (mesh) ขนาด 1 มม. ทับไว้เพื่อป้องกันอนุภาคแข็งตกลงไปยังท่ออากาศ ทางตอนล่างของแผ่นกระจายอากาศจะมีห้องลม (plenum chamber) เพื่อปรับความดันของอากาศให้คงที่ ซึ่งทำด้วยท่อขนาดเท่ากับท่อคอลัมน์สูง 10 ซม. อากาศซึ่งทำให้ร้อนก่อนแล้วด้วยตัวทำความร้อนไฟฟ้า (electrically air preheater) จะสามารถแยกให้ผ่านช่องกลาง (central orifice) (แบบ SB) หรือทั้งช่องกลางและผ่านรูเล็ก ๆ ในแผ่นกระจายอากาศ (แบบ SFB) ซึ่งกรณีหลังนี้ต้องผ่านห้องลมก่อน อัตราการไหลของอากาศจะวัดโดยใช้มาตรวัดอัตราการไหลแบบลูกลอย (rotameters) และสามารถปรับโดยวาล์วลิ้นทรงกลม (globe valves) นอกจากนี้เตาเผายังทำให้ร้อนทางภายนอกโดยตัวทำความร้อนทรงกระบอกแบบต้านทานไฟฟ้า (cylindrical resistance heater) ขนาด

4.5 kW ยาว 50 ซม. ซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมแบบอัตโนมัติ อุณหภูมิของ bed จะวัดที่จุดกึ่งกลางของส่วนที่เป็นวงแหวน (annulus) ใน bed และอยู่สูงจากแผ่นกระจายอากาศ 4 ซม. โดยใช้ K-type thermocouple ทางด้านบนของคอลัมน์เผาไหม้จะติดตั้งกระจกเงาเอียงเพื่อให้สังเกตเห็นการเกิดการเผาไหม้



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงเครื่องมือที่ใช้ทดลอง

ทรายขนาดเฉลี่ย 2.19 มม. จะถูกเทลงไปในคอลัมน์ให้สูง 8 ซม. (static bed height) เพื่อเป็น inert bed material คุณสมบัติของทรายที่ใช้แสดงในตารางที่ 1 ลิกไนต์ตัวอย่างที่จะนำมาทดลอง จะนำมาเตรียมโดยบดก้อนลิกไนต์แล้วร่อนด้วยตะแกรงมาตรฐานให้ได้ขนาดต่างๆ ส่วนตัวอย่างของคาร์บอนจะเตรียมโดยเอาอิเล็กโตรดคาร์บอนของไส้ถ่านไฟฉายมาตัดแล้วขัดด้วยกระดาษทรายให้มีรูปร่างทรงกลม ซึ่งเส้นผ่าศูนย์กลางจะคำนวณจากน้ำหนักที่ชั่งและความหนาแน่น และเพื่อลดผลของสารระเหยในถ่านหินที่มีอยู่จำนวนเล็กน้อย คาร์บอนดังกล่าวจะถูกนำไปแยกสารระเหยออกด้วยความร้อน (pyrolysed) ในไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 1123 °K เป็นเวลา 30 นาที เพื่อขับไล่สารระเหยในถ่านหินออกไป ทุกๆ ตัวอย่างที่เตรียมจะถูกนำไปอบในเตาอบประมาณ 24 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้ทดลอง คุณสมบัติของลิกไนต์ตัวอย่างและ pyrolysed carbon แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลวิเคราะห์ของลิกไนต์และคุณสมบัติของทรายและ pyrolysed electrode carbon ที่ใช้ทดลอง

ลิกไนต์	
สารระเหยในถ่านหิน, %	47.58
Fixed Carbon, %	47.03
Ash, %	5.39
ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density), kg/cm ³	1.27
ทราย	
เส้นผ่าศูนย์กลาง	2-2.39
ความหนาแน่นกลุ่ม (Bulk density), kg/cm ³	1.45
ความหนาแน่นจริง (True density), kg/cm ³	2.63
Pyrolysed electrode carbon	
ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density), kg/cm ³	1.68

เริ่มการทดลองโดย bed หรือชั้นของอนุภาคแขวนลอยในคอลัมน์จะถูกทำให้ร้อนก่อน โดยให้อากาศร้อนผ่านเข้าแบบ SFB จนถึงอุณหภูมิ 700°K จากนั้นเทลิกไนท์ ขนาด 1-2 มม. ประมาณ 2-3 กรัม ลงจากด้านบนของคอลัมน์เพื่อให้เกิดการเผาไหม้และทำให้อุณหภูมิของ bed เพิ่มขึ้นอีก จากนั้นอากาศจะถูกเปลี่ยนให้เข้าแบบ SB หรือ SFB ที่มีอัตราส่วนเฉพาะของ superficial gas velocity (ความเร็วของก๊าซที่ผ่านคอลัมน์วัดเมื่อสมมุติไม่มีอนุภาคแข็งที่อุณหภูมิขณะเผาไหม้) กับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ bed เริ่มเกิด spouting (minimum spouting gas velocity) ที่ต้องการจะทดลอง ในการศึกษาที่เราใช้อัตราส่วน U/U_{ms} คงที่ที่ 1.25 เมื่อ bed มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ และลิกไนท์ที่เทลงไปได้ครั้งแรกเผาไหม้หมด จึงเริ่มดำเนินการทดลองแต่ละการทดลองดังต่อไปนี้

ทดลองการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงเดี่ยว

การทดลองนี้จะทำทั้งในแบบ SB และ SFB โดยใช้อนุภาคเชื้อเพลิงขนาด 6.3-8 มม. เทเข้าไปใน bed ทางด้านบนของคอลัมน์ การติดไฟของอนุภาค การเผาไหม้ของสารระเหยในถ่านหิน การแตกตัวและการเผาไหม้ของถ่าน (char) จะถูกสังเกตจากกระจกเงาด้านบน และเพื่อการศึกษาเปรียบเทียบ pyrolysed electrode carbon ที่มีขนาดเท่ากัน จะถูกนำมาทดลองในลักษณะแบบเดียวกัน

การทดลองหาเวลาที่เผาไหม้หมด (Burnout time)

การทดลองนี้จะทดลองทั้งแบบ SB และ SFB โดยอนุภาคของลิกไนท์ที่มีขนาดเท่ากันจำนวน 2 กรัม จะถูกเทลงไปใน bed จากด้านบนของคอลัมน์ เวลาที่สารระเหยในถ่านหินเผาไหม้และช่วงถ่านเผาไหม้หมดจะวัดโดยดูที่กระจกเงาและใช้นาฬิกาจับเวลา ขนาดของอนุภาคที่ใช้ศึกษา คือ 6.3-8 มม., 4.7-6.3 มม., 4-4.7 มม., 3.35-4 มม. และ 2.79-3.35 มม. แต่ละขนาดของอนุภาคข้างบนจะทดลองอย่างน้อย 2 ครั้ง เพื่อความแน่ใจในข้อมูลการทดลอง

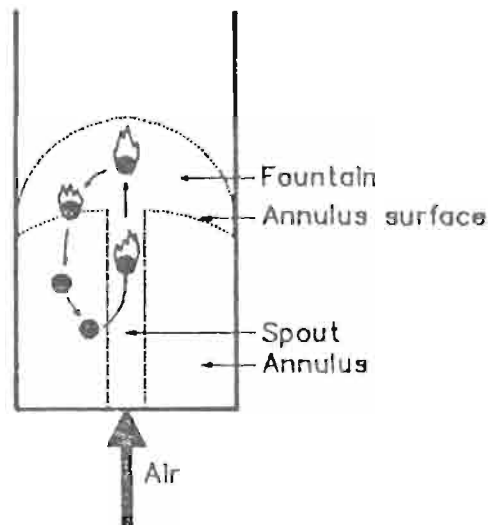
อุณหภูมิขึ้นลงแตกต่างจากอุณหภูมิที่ต้องการระหว่างการทดลองทั้ง 2 แบบดังกล่าวข้างบนนี้ จะอยู่ระหว่าง $\pm 20^{\circ}\text{K}$

ผลการทดลองและวิจารณ์

การเผาไหม้ของอนุภาคเดี่ยว

เมื่ออนุภาคของลิกไนต์ขนาด 6.3-8 มม. ถูกทดลองใน bed จะสังเกตเห็นประกายไฟของฝุ่นที่หลุดออกมาจากการเสียดสีของลิกไนต์กับอนุภาคของทราย (ฝุ่นที่เกิดจาก attrition) เกิดขึ้นอย่างชัดเจน หลังจากนั้นประมาณ 2-4 วินาที สารระเหยในถ่านหินจะเริ่มเผาไหม้โดยจะสังเกตเห็นเป็นรูปของเปลวไฟแผ่ออกล้อมรอบอนุภาคเชื้อเพลิง เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่จากบริเวณ spout ไปบริเวณ fountain แล้วตกกลับมาที่ผิวของ bed บริเวณ annulus (ลักษณะรายละเอียดภายใน spouted bed ดูบทความของ Prasong [9]) จากนั้นอนุภาคจะจมลงไปบริเวณ annulus พร้อมกับสารเหนียวคือ ทราย จนถึงบริเวณขอบเขตระหว่าง annulus กับ spout ก็จะถูกชักพาไปในบริเวณ spout ทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคครบรอบเป็นวงจร การเผาไหม้ของสารระเหยในถ่านหินภายในบริเวณ annulus และ spout จะสังเกตเห็นได้ยาก อย่างไรก็ตามเราสามารถทำนายได้ว่า เปลวไฟที่หุ้มล้อมรอบอนุภาคเนื่องมาจากการเผาไหม้ของสารระเหยในถ่านหิน จะดับหรือหายไปเมื่ออยู่ภายในบริเวณ annulus เพราะจะมีการสูญเสียความร้อนสูงจากเปลวไฟไปสู่อนุภาคของทรายที่ล้อมรอบอยู่ และเปลวไฟจะปรากฏอีกครั้งเมื่อถ่านหินถูกชักนำไปบริเวณ spout ดังแผนภาพเหตุการณ์ที่แสดงในรูปที่ 3 พฤติกรรมของการเผาไหม้ในถ่านหินนี้ ก็มีรายงานจากการสังเกตการเผาไหม้ถ่านหินในบริเวณ particulate phase และ bubble phase ใน fluidized bed แบบ 2 มิติ [13]

การแตกตัวของอนุภาคลิกไนต์ไปเป็นอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่ (เรียกว่าเกิด fragmentation) ครั้งแรกระหว่างช่วงการเผาไหม้สารระเหยในถ่านหิน ก็สังเกตเห็นเช่นกัน เนื่องจากเกิดความดันภายในอนุภาคเมื่อสารระเหยในถ่านหินถูกปล่อยออกมาในขณะที่อนุภาคถูกทำให้ร้อนอย่างรวดเร็ว [14] ลักษณะการเผาไหม้ของสารระเหยในถ่านหินของอนุภาคที่แตกตัวออกมานี้ ก็มีลักษณะเช่นเดียวกับการเผาไหม้ของสารระเหยในถ่านหินที่อธิบายมาแล้วข้างบน

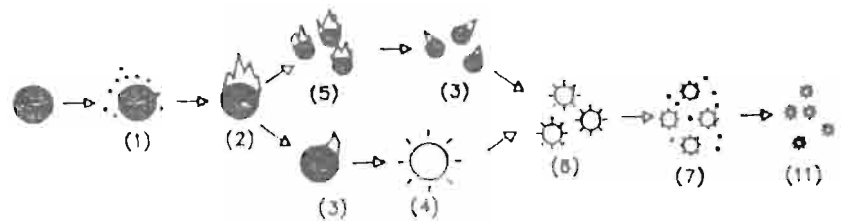


รูปที่ 3 ภาพแสดงการเผาไหม้ของสารระเหยในถ่านหินในขณะที่อยู่แต่ละบริเวณใน spouted bed combustor

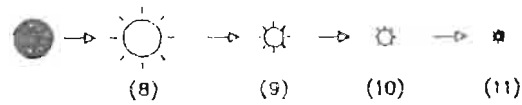
การเผาไหม้ของถ่าน จะเกิดขึ้นหลังจากที่สารระเหยในถ่านหินถูกขับออกไปแล้ว การแตกของอนุภาคครั้งที่สองของอนุภาคถ่านที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการชนกันและสารเชื่อมส่วนในอนุภาคถูกเผาไหม้ไป ก็สามารถสังเกตเห็นได้เช่นเดียวกัน ฝุ่นผงของถ่านที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีที่ผิว (char attrition) [15] และการแตกเป็นสะเก็ดเล็กๆ รอบอนุภาค [16],[17] จะเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการเผาไหม้ และขณะเดียวกันก็เพิ่มการสูญเสียของถ่านเนื่องจากฝุ่นผงถูกชักนำออกไปกับก๊าซ ทำให้ลดเวลาที่เผาไหม้หมดลง

สำหรับการเผาไหม้ของอนุภาค pyrolysed electrode carbon เวลาที่ติดไฟ (ignition time) จะช้าและนานกว่าการเผาไหม้ของถ่านหิน อนุภาคกำลังเผาไหม้จะถูกสังเกตเห็นเป็นจุดแดง โดยไม่มีเปลวเนื่องจากการเผาไหม้ของสารระเหยในถ่านหิน ขนาดของอนุภาคจะค่อยๆ เล็กลง โดยไม่เกิดการแตกตัวขึ้น

ลักษณะการเผาไหม้ของอนุภาคเดี่ยวของถ่านหินหรือคาร์บอนใน spouted bed สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งพฤติกรรมของการเผาไหม้ลักษณะเดียวกันก็สังเกตเห็น เมื่ออากาศถูกป้อนให้เกิดแบบ SFB ที่อุณหภูมิของ bed เท่ากับ 973°K $U/U_{ms} = 1.25$ และอัตราส่วนของอากาศที่ไหลผ่านช่อง orifice ต่ออัตราการไหลของก๊าซทั้งหมดเท่ากับ 0.2



(a) ลิกไนต์



(b) Electrode Carbon

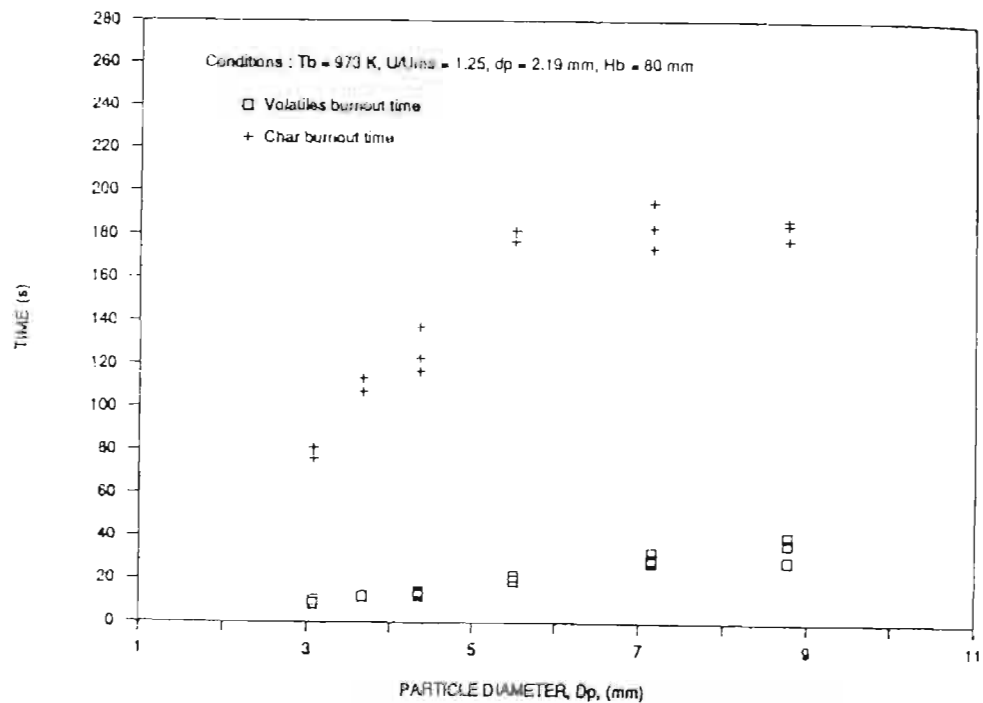
รูปที่ 4 รูปสเกตเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นของอนุภาคเดี่ยวของลิกไนต์ (a) และ pyrolysed electrode carbon (b) จากพื้นที่ที่ตกลงไปใน spouted bed combustor: (1) เกิด pyrolysis และ attrition, (2) การติดไฟของสารระเหยในถ่านหินแล้วเผาไหม้ในรูปเปลวไฟแผ่ออกไป, (3) เปลวของสารระเหยในถ่านหินดับ, (4) จุดแดงจากการเผาไหม้ของถ่าน (char), (5) การแตกตัวไปเป็นอนุภาคใหญ่และการเผาไหม้ต่อเนื่องของสารระเหยในถ่านหินที่ปล่อยออกมา, (6), (7) จุดแดงเนื่องจากการเผาไหม้ของอนุภาคของถ่าน จาก fragmentation และ attrition, (8)-(10) จุดแดงเนื่องจากการเผาไหม้ของอนุภาคของ electrode carbon ในขณะที่มีอนุภาคมีขนาดลดลง, และ (11) การเผาไหม้หมดของถ่าน

เวลาที่เผาไหม้หมด

สำหรับทุกช่วงขนาดของอนุภาคที่ศึกษา อนุภาคของลิกไนต์จะเผาไหม้ดังที่สเกตในรูปที่ 4(a) โดยอนุภาคจะเคลื่อนที่เป็นรอบแบบวงจรถัดอธิบายที่ผ่านมาแล้ว อนุภาคที่เล็กที่สุดมีแนวโน้มที่จะลอยที่ผิวของ bed และในช่วงระหว่างการเผาไหม้ของสารระเหยในถ่านหิน การแตกตัวจะเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของอนุภาค รูปที่ 5 แสดง

เวลาที่เผาไหม้หมดของสารระเหยในถ่านหิน และถ่านใน spouted bed combustor ทดลองที่ $U/U_{ms} = 1.25$ และอุณหภูมิของ bed = 973 °K จะพบว่าค่าเวลาที่เผาไหม้หมดของสารระเหยในถ่านหิน และถ่านจะเพิ่มตามขนาดของอนุภาคที่ทดลองไป

เนื่องจากการแตก ซึ่งอาจจะเพิ่มตามการเพิ่มของพื้นที่ผิวของอนุภาค จึงทำให้การเพิ่มของเวลาที่เผาไหม้หมดสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุดสองขนาดในกราฟเพิ่มเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 5 เวลาที่เผาไหม้หมดของสารระเหยในถ่านหิน (□) และถ่าน (+) ใน spouted bed

สรุป

การเผาไหม้ของทั้งลิกไนท์ และ electrode carbon ใน SB และ SFB แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่เป็นรอบแบบวงจรไประหว่างบริเวณ annulus, spout, และ fountain เวลาที่อนุภาคคงอยู่ (residence times) ในบริเวณเหล่านี้จะเป็นตัวแปรสำคัญต่ออัตราการเผาไหม้ การศึกษาเพิ่มเติมในเรื่อง residence times ของอนุภาคที่อยู่ในแต่ละบริเวณจึงมีความสำคัญมากต่อการทำ combustion modelling การปล่อยออกของสาร

ระเหยในถ่านหินจากอนุภาคของลิไนท์จะถูกเผาไหม้ในรูปของเปลวไฟล้อมรอบอนุภาคเฉพาะในบริเวณ spout และ fountain การแตกของอนุภาคเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้ของสารระเหยในถ่านหินและถ่านจะสังเกตเห็นในกรณีของลิไนท์ อนุภาคของ electrode carbon จะเผาไหม้โดยไม่มีการแตกตัว

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mathur, K. B. and Epstein, N. (1974). *Spouted Beds*, Academic Press, New York
- [2] Epstein, N. and Grace, J. R. (1984). '*Spouting of Particulate Solids*', in Fayed, M. E. and Otten, L. (Eds.) *Handbook of Powder Science and Technology*, Van Nostrand Reinhold, New York, 507
- [3] Bridgwater, J. (1985). '*Spouted Beds*', in Davidson, J. F. et al. (Eds.) *Fluidization*, 2nd Edn., Academic Press, London, 201
- [4] Khoshnoodi, M. and Weinberg, F. J. (1978). '*Combustion in Spouted Beds*', *Combustion and Flame*, **33**, 11
- [5] Khoe, G. H. and Weve, D. (1983). '*Visual Observations of Spouted Bed Gas Combustion Modes and Their Flow Regimes*', *Canadian J. Chem. Eng.*, **61**, 460
- [6] Arbib, H. A. and Levy, A. (1982). '*Combustion of Low Heating Value Fuels and Wastes in The Spouted Beds*', *Canadian J. Chem. Eng.*, **60**, 528
- [7] Lim, C. J., Barua, S. K., Epstein, N., Grace, J. R. and Watkinson, A. P. (1984). '*Spouted Bed and Spout-Fluid Bed Combustion of Solid Fuel*', in *Fluidized Combustion*, Proc. of Int. Conf. on Combustion, Institute of Energy, London, England, 72

- [8] Bhattacharya, S. C. and Shah, N. (1987). '*Spouted Bed Combustion of Paddy Husk*', Int. J. Energy Research, 11, 429
- [9] Prasong Wongvicha (1993). '*Spouted Bed Combustion and Combustion Efficiency of Thai Lignite Char*', Engineering KKU Journal, Vol. 20, No. 1 (17-30)
- [10] Zhao, J., Lim, C. J. and Grace, J. R. (1987a). '*Flow Regimes and Combustion Behavior in Coal-Burning Spouted and Spout-Fluid Bed*', Chem. Eng. Sci., 42, 2865
- [11] Zhao, J., Lim, C. J. and Grace, J. R. (1987b). '*Coal Burnout Times in Spouted and Spout-Fluid Beds*', Chem. Eng. Res. and Design, 65, 426
- [12] Lim, C. J., Watkinson, A. P., Khoe, G. K., Low, S., Epstein, N. and Grace, J. R. (1988). '*Spouted, Fluidized and Spout-Fluid Bed Combustion of Bituminous Coals*', Fuel, 67, 1211
- [13] Prins, W., Siemons, R. and Ban Swaaij, W. P. M. (1989). '*Devolatilization and Ignition of Coal Particles in A Two-Dimensional Fluidized Bed*', Combustion and Flame, 75, 57
- [14] Chirone, R., Cammarota, A., D'Amore, M. and Massimilla, L. (1982). '*Fluidization, and Attrition in The Fluidized Combustion of A Coal*', Proc. 6th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, Washington, USA, 1023
- [15] Arena, U., D'Amore, M. and Massimilla, L. (1983). '*Carbon Attrition During the Fluidized Combustion of A Coal*'. AIChE J., 29, 40
- [16] Kerstein, A. R. and Niksa, S. (1984). '*Fragmentation During Carbon Conversion: Predictions and Measurement*'. Proc. 20th Symp. (Int.) Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, 941

- [17] Reyes, S. and Jensen, L. F. (1986). ***Percolation Concept in Modelling of Gas-Solid Reactions-II. Application to Char Gasification in The Diffusion Regime***, Chem. Eng. Sci., 41, 345