

กระบวนการซินเทอริงของเถ้าถ่านหิน : ผลของการสกัดและการเติมสารแก้วอัลคาไลน์

มาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย¹ และ ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย^{2*}

Abstract

Tangsathitkulchai, M. and Tangsathitkulchai, C. (1994). Sintering of Coal Ashes : Effects of Extraction and Addition of Alkali Glass Materials. Suranaree J. Sci. Technol. 1 : 123 - 132.

The role of alkali glass materials on sintering behavior of fly ash from one type of bituminous coal was investigated. The approach used was to follow the change of compressive strength of fly ash pellets with temperature, for conditions of extracting the fly ash with 10% HF and direct addition of sodium silicate and calcium silicate powders. Similar tests were also made on the possible role of iron in the sintering process by adding iron silicate into the fly ash sample.

Spectrochemical analysis and X-ray diffraction of HF-washed fly ash indicated a reduction in the amounts of glassy phase materials as well as the alkali constituents. Fly ash pellets showed maximum compressive strength (~ 400 MPa) at temperature near 1,050°C, while HF-washed pellets showed almost unmeasurable strength over the same temperature range.

For temperatures below 1,000°C, the addition of alkali glasses yielded greater sinter strength, with sodium silicate giving higher strength than calcium silicate addition. However, at higher temperatures, alkali glass addition could lower the pellet strength, with calcium silicate showing the larger effect. This strength reduction was ascribed to the formation of crystalline phase materials which tended to retard the sintering rate. The addition of iron silicate into the fly ash was found to have negligible effects on the pellet strength. Results from this work have indicated that alkali plays an important role in affecting the extent of fly ash sintering. Therefore, it is possible to lower the strength of sinter masses, hence reducing slagging and fouling problems, by mixing calcium salts with the raw coals.

¹ Ph.D., ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาเคมี สำนักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

² Ph.D., รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาเทคโนโลยีทรัพยากร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

ผู้เขียนที่ให้การติดต่อ

บทคัดย่อ

ทำการศึกษาถึงผลของสารแก้วอัลคาไลน (alkali glass) ที่มีต่อพฤติกรรมของการเกิดซินเทอริง (sintering) ในถ่านหิน วิธีการวิจัยได้กระทำโดยวิธีการสกัดออกและวิธีการเติมสารแก้วอัลคาไลนลงในเม็ดถ่านลอยแล้ว ติดตามอัตราการเกิดซินเทอริงโดยการวัดค่าความต้านทานแรงกด (compressive strength) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิถ่านลอยที่ศึกษานำมาจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินปิตูมินัสจากแหล่ง Upper Freeport รัฐเพนซิลวาเนีย สหรัฐอเมริกา การสกัดสารแก้วอัลคาไลนออกจากถ่านได้ใช้สารละลาย 10% HF ส่วนการเติมสารแก้วอัลคาไลน (10% โดยน้ำหนัก) ได้ใช้โซเดียมซิลิเกต และแคลเซียมซิลิเกต นอกจากนี้ได้เติมสารแก้วเหล็ก (iron glass) ได้แก่ เหล็กซิลิเกต เพื่อศึกษาบทบาทของเหล็กด้วย

ผลการวิเคราะห์ทางสเปกโตรเคมีและเครื่องมือการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าถ่านลอยที่ถูกสกัดด้วย HF มีปริมาณสารแก้วและสารอัลคาไลนลดน้อยลงกว่าในถ่านลอย การติดตามอัตราการเกิดซินเทอริงของเม็ดถ่านลอยที่ถูกสกัดด้วย HF พบว่ามีค่าความต้านทานแรงกดต่ำลงจนเกือบเป็นศูนย์ในทุกอุณหภูมิ ขณะที่ถ่านลอยมีค่าความต้านทานแรงกดสูงกว่ามากในทุกอุณหภูมิ จากการเติมสารแก้วอัลคาไลนลงในถ่านลอยพบว่า ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 °C เม็ดถ่านลอยที่เติมสารแก้วอัลคาไลนให้ค่าความต้านทานแรงกดสูงกว่าของเม็ดถ่านลอย โดยเม็ดถ่านลอยที่เติมโซเดียมซิลิเกตให้ค่าความต้านทานแรงกดสูงกว่าเม็ดถ่านที่เติมแคลเซียมซิลิเกต แต่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้นพบว่าอัลคาไลนได้เปลี่ยนสารแก้วให้กลายเป็นสารผลึกซึ่งเป็นของแข็งที่อุณหภูมิสูงนั้น ทำให้อัตราการเกิดซินเทอริงช้าลง โดยเม็ดถ่านที่เติมแคลเซียมซิลิเกตลดค่าความแข็งได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าและลดค่าความต้านทานแรงกดได้มากกว่าเม็ดถ่านที่เติมโซเดียมซิลิเกต สำหรับการเติมเหล็กซิลิเกต พบว่าไม่ได้ทำให้ค่าความต้านทานแรงกดของเม็ดถ่านเปลี่ยนแปลงไปในทุกอุณหภูมิ

ผลของงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า ช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 1,000 °C สารแก้วอัลคาไลนในถ่านหินเป็นสารที่ก่อให้เกิดความต้านทานแรงกดขึ้นในก้อนสแลกและฟาวล์ แต่ช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น อัลคาไลนโดยเฉพาะแคลเซียมมีบทบาทลดค่าความต้านทานแรงกดลดลงได้มาก ดังนั้นการผสมเกลือแคลเซียมกับ ถ่านหินก่อนนำไปใช้ จึงอาจเป็นหนทางหนึ่งที่จะลดความแข็งของก้อนสแลกและฟาวล์ได้

Key words : Sintering, Compressive strength, Fly ash, Slag and fowl.

ปัญหาของการเกิดสแลกและฟาวล์ (slag and fowl) ในหม้อกำเนิดไอน้ำ (boilers) ของโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินผงละเอียด (pulverized coal combustion) นั้น เป็นปัญหาที่หลีกเลี่ยงได้ยาก เนื่องจากเตาเผาทำงานที่อุณหภูมิเผาไหม้สูงถึง 1,600 °C ซึ่งทำให้ถ่านหินมีการหลอมเหลวและปลิวไปเกาะติดบนผนังท่อรับความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการรับความร้อนลดลงและยังทำให้เกิดการฟูรอนของวัสดุท่อรับความร้อนอีกด้วย ถ้าวัดถ่านที่มาจากเตาเผาติดพอกตัวหนาขึ้นจะมีกระบวนการซินเทอริง (sintering) ซึ่ง

ลดความพรุนของอนุภาคเถ้าของก้อนสแลกและฟาวล์ เกิดร่วมด้วย ส่งผลให้ก้อนสแลกและฟาวล์มีความแข็งเพิ่มมากขึ้น ทำให้การกำจัดออกทำได้ยาก การศึกษาให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของการเกิดซินเทอริงของถ่านหิน จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะนำไปสู่การคัดเลือกถ่านหินมาใช้ และเพื่อลดปัญหาของการกำจัดสแลกและฟาวล์ให้น้อยลงได้

ในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของการเกิดซินเทอริงของถ่านหิน (1 - 4) ซึ่งโดยทั่วไปใช้วิธีการนำถ่านของถ่านหินจาก

แหล่งต่างๆ มาทำเป็นเม็ดได้ แล้วเปรียบเทียบอัตราการเกิดซินเทอริง โดยวัดค่าความต้านทานแรงกด (compressive strength) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ในรายงานเหล่านี้ได้พบว่า มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงกดกับส่วนประกอบที่เป็นสารแก้วและสารผลึกที่มีอยู่ในเม็ดได้ โดยเชื่อว่าสารแก้วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำในเม็ด มีบทบาททำให้เกิดอัตราซินเทอริงได้เร็ว ทำให้เม็ดได้มีค่าความต้านทานแรงกดสูง แต่ถ้าในเม็ดได้มีสารอัลคาไลน์อยู่มาก มักพบว่ามันจะเปลี่ยนสารแก้วให้กลายเป็นสารผลึกอัลคาไลน์ที่มีจุดหลอมเหลวสูง ส่งผลให้เกิดซินเทอริงในอัตราที่ช้ากว่า ทำให้เม็ดได้มีความต้านทานแรงกดต่ำลง

ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจถึงบทบาทของสารแก้วอัลคาไลน์ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดของเม็ดได้ งานวิจัยนี้จึงได้ทดลองทำทั้งวิธีสกัดสารแก้วอัลคาไลน์ออกจากเม็ดได้ และวิธีการเติมสารแก้วอัลคาไลน์ลงไปในเม็ดได้ แล้วเปรียบเทียบอัตราการเกิดซินเทอริงของเม็ดได้ โดยได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบที่เป็นสารแก้วและสารผลึกที่เกิดขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังได้เติมสารแก้วเหล็ก เพื่อศึกษาบทบาทของเหล็กกับค่าความต้านทานแรงกดของเม็ดได้ ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กเป็นอ็อกไซด์ที่มีอยู่ในส่วนประกอบของสารแก้วและสารผลึกในเม็ดได้เช่นเดียวกับอัลคาไลน์

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

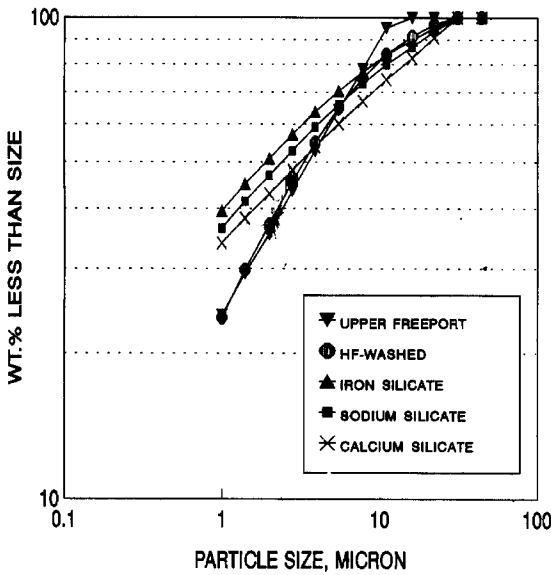
เม็ดได้ที่ใช้ในการทดลองได้มาจากโรงกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินจากแหล่ง Upper Freeport ในรัฐเพนซิลเวเนีย สหรัฐอเมริกา โดยจัดเป็นถ่านหินที่เป็นสัคย์บิทูมินัส (Bituminous) ในการทดลองได้นำเม็ดได้มาเผาไล่คาร์บอนในอากาศก่อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 700°ซ ภาพถ่าย SEM ของเม็ดได้ก่อนเผาได้แสดงไว้ในรูปที่ 5(a)

สำหรับการสกัดเม็ดได้ลอยด้วย 10% HF (hydrofluoric acid) ทำโดยนำเม็ดได้ลอยใส่ในบีกเกอร์และเทสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกให้ท่วมเม็ดได้ลอยแล้วควนอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้กรดละลายสารประกอบแก้วออกจากเม็ดได้ลอย จากนั้นนำไปกรองและสกัดด้วยกรดซ้ำอีกครั้ง นำเม็ดได้ที่กรองได้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 - 110°ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บเม็ดได้ที่ผ่านการสกัดและลดความชื้นไว้ในโถสุญญากาศเพื่อนำไปทดสอบในขั้นต่อไปขนาดของอนุภาคเม็ดได้ลอยที่ถูกสกัดด้วย HF แสดงเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคเม็ดได้ลอยไว้ในรูปที่ 1

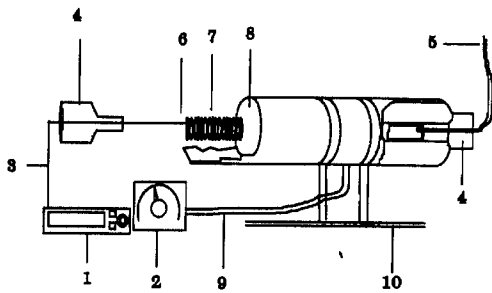
สารแก้วอัลคาไลน์ที่เติมลงในเม็ดได้ลอย ได้แก่ โซเดียมซิลิเกตและแคลเซียมซิลิเกต โซเดียมซิลิเกตทำได้จากการเผาสารผสมระหว่าง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ Na_2CO_3 และ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ SiO_2 ที่อุณหภูมิ 1,750°ซ โดยใช้เปลวไฟของแก๊สมีเทนและออกซิเจน ปล่อยให้เย็นแล้วนำมาบดให้ละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรง micro-mesh ขนาด 15 μm การเตรียมแคลเซียมซิลิเกตทำได้ในทำนองเดียวกัน โดยใช้สารผสมระหว่าง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CaCO_3 และ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ SiO_2 ส่วนสารแก้วเหล็กที่เติมลงในเม็ดได้ลอยได้ใช้เหล็กซิลิเกต ซึ่งเตรียมจากสารผสมระหว่าง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไพไรต์ (FeS_2) และ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ SiO_2

ขนาดอนุภาคของสารแก้วที่ใช้เพื่อเติมลงไปในเม็ดได้ลอยได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 การผสมสารประกอบซิลิเกตลงในเม็ดได้ลอยใช้อัตราส่วนผสมเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของเม็ดได้ลอยที่ใช้ทำเม็ดได้

การทำเม็ดได้ ทำโดยชั่งถ่านหิน 0.12 กรัม ผสมน้ำกลั่น 2 - 3 หยด แล้วกดลงในแบบพิมพ์รูปทรงกระบอกขนาดหน้าตัด 5 มม. สูง 5 มม. จะได้เม็ดได้ที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 1,200 กก./ม³ วางเม็ดได้จำนวน 5 เม็ดในถ้วยอลูมินาขนาดเส้นผ่า-



รูปที่ 1. ขนาดอนุภาคเถ้าลอย, เถ้าลอยที่ถูกสกัดด้วย HF, โซเดียมซิลิเกต, แคลเซียมซิลิเกต และ เหล็กซิลิเกต



1. เครื่องอ่านอุณหภูมิแบบ digital
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller)
3. สาย thermocouple ชนิด E
4. จุดอิฐทนไฟสำหรับปิดเตา
5. ท่อป้อนก๊าซ
6. ท่อเซรามิกใช้ทำเตา
7. ขดลวดความร้อน
8. ฉนวนกันความร้อน
9. สายไฟเข้าเตา
10. ฐานวางเตา

รูปที่ 2. รายละเอียดของเตาที่ใช้ทำการทดลอง

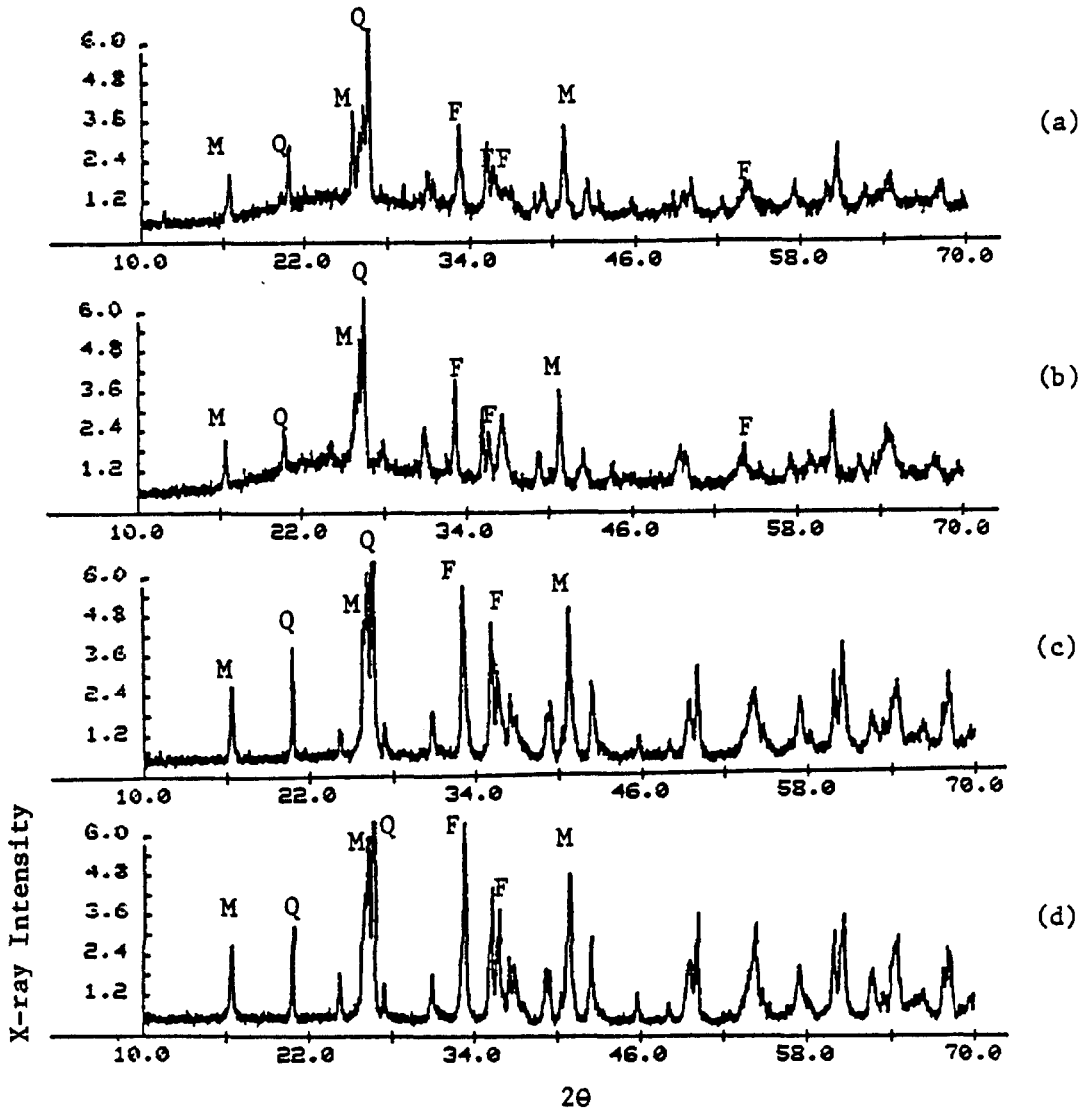
ศูนย์กลาง 10 มม. ยาว 25 มม. เฝามีคเถ้าให้ร้อนขึ้นในอัตรา 5°ซ ต่อนาทีในอากาศ ในเตาเผาที่แสดงไว้ในรูปที่ 2 จากนั้นควบคุมไว้ที่อุณหภูมิที่ต้องการเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง วัดค่าความต้านทานแรงกด (compressive strength) ด้วยเครื่องทดสอบแรงอัด (instron tester) และเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงกดที่วัดได้

นำเถ้าที่เหลือไปถ่ายภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของอนุภาค และส่วนประกอบที่เป็นสารแก้วและสารผลึกในเถ้าซึ่งการวิเคราะห์สารผลึกได้ใช้เครื่องมือการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray diffractometer, XRD)

ผลการทดลองและวิจารณ์

ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย Upper Freeport เปรียบเทียบกับเถ้าลอย Upper Freeport ที่ถูกสกัดด้วย HF ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 จะเห็นว่าปริมาณของ SiO₂, CaO, Na₂O, และ K₂O ของเถ้าลอยที่ถูกสกัดมีปริมาณลดลงกว่าในเถ้าลอย ผลจากการวิเคราะห์ด้วย XRD ของเถ้าลอยและเถ้าลอยที่ถูกสกัดได้แสดงไว้ในรูปที่ 3(a) และ 3(c) ตามลำดับ จากลักษณะของ XRD พบว่าเถ้าลอยมีแบคกราวด์ (background) ที่กว้างแสดงถึงปริมาณสารแก้วที่มีอยู่มากในเถ้าลอย ส่วนเถ้าลอยที่ถูกสกัดมีแบคกราวด์ที่ลดลงไปมาก ซึ่งให้เห็นว่าเหลือสารแก้วอยู่น้อยมากในเถ้าลอยที่ถูกสกัดแล้ว

รูปที่ 4 แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแรงกดของเถ้าซินเทอรักับอุณหภูมิสำหรับเถ้าลอย มีลักษณะกราฟที่ค่าของความต้านทานแรงกดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว จนมีค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดที่ 1,050°ซ จากนั้น



รูปที่ 3. X-ray diffraction patterns ของ (a) เถ้าลอย Upper Freeport, (b) เถ้าลอย Upper Freeport เมาที่ 1,000°ซ, (c) เถ้าลอย Upper Freeport ที่ถูกสกัดด้วย HF (d) เถ้าลอย Upper Freeport ที่ถูกสกัดด้วย HF เมาที่ 1,000°ซ (Q = quartz, M = mullite, F = hematite)

ค่าความต้านทานแรงกดได้ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนเถ้าลอยที่ถูกสกัดด้วย HF พบว่ามีลักษณะกราฟที่ค่าของความต้านทานแรงกดต่ำลงเกือบเป็นศูนย์ในทุกอุณหภูมิ ยกเว้นที่อุณหภูมิ 1,150°ซ ซึ่งเริ่มมีความต้านทานแรงกดเพียงเล็กน้อย

จากผลข้างต้นนี้อธิบายได้ว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำ (850 - 1,050°ซ) เมื่อเถ้าลอยเกิดซินเทอริงขึ้น สาร

แก้วอัลคาไลน์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำจะเริ่มหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด และของเหลวจะมีปริมาณมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเกิดซินเทอริงที่สูงมาก ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดสูงมากตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1,050°ซ ค่าความต้านทานแรงกดได้ลดลงตามอุณหภูมิ ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจากภาพถ่าย SEM ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5(c)

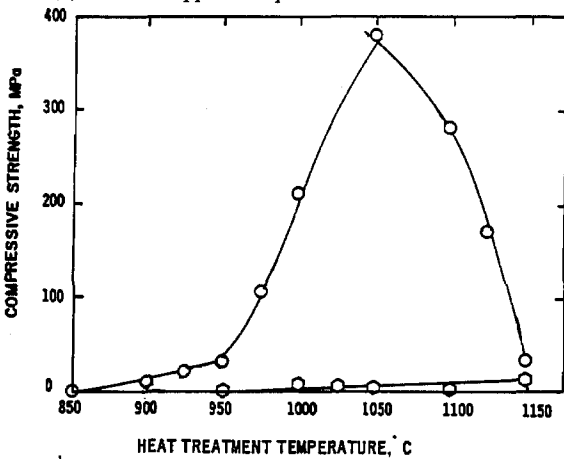
ตารางที่ 1. ผลการวิเคราะห์ของแร่ลอย Upper Freeport ทางสเปกโตรเคมีของแร่ลอย¹

	Weight percent of equivalent oxide ²	
	(1)	(2)
SiO ₂	53.5	34.9
Al ₂ O ₃	28.2	42.7
TiO ₂	1.4	2.9
Fe ₂ O ₃	6.3	14.1
MgO	1.3	0.5
CaO	3.1	0.1
MnO	0.0	0.0
SrO	0.0	0.0
BaO	0.0	0.1
Na ₂ O	0.4	0.1
K ₂ O	2.9	0.2
P ₂ O ₅	0.5	0.0
ZnO	0.0	0.5
SO ₃	0.9	0.2
Total	98.0	95.8

¹ ที่มา : Mineral Constitution Laboratory, The Pennsylvania State University, Pa.

² (1) แร่ลอย Upper Freeport,

(2) แร่ลอย Upper Freeport ที่สกัดด้วย HF

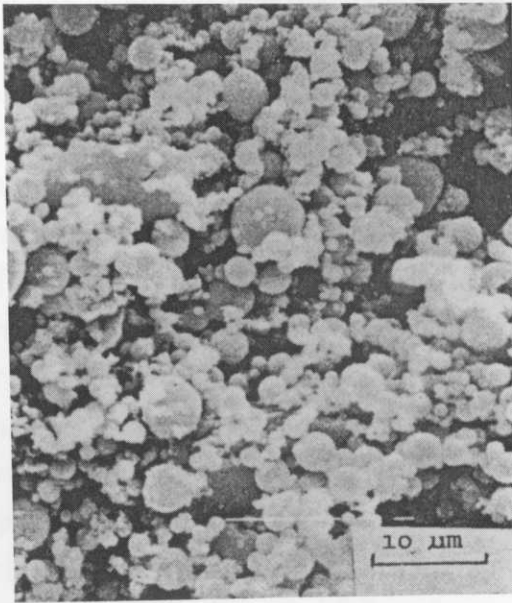


รูปที่ 4. ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแรงกดของเม็ดแร่ขึ้นเทอริงกับอุณหภูมิ สำหรับแร่ลอย Upper Freeport และ แร่ลอย Upper Freeport ที่ถูกสกัดด้วย HF

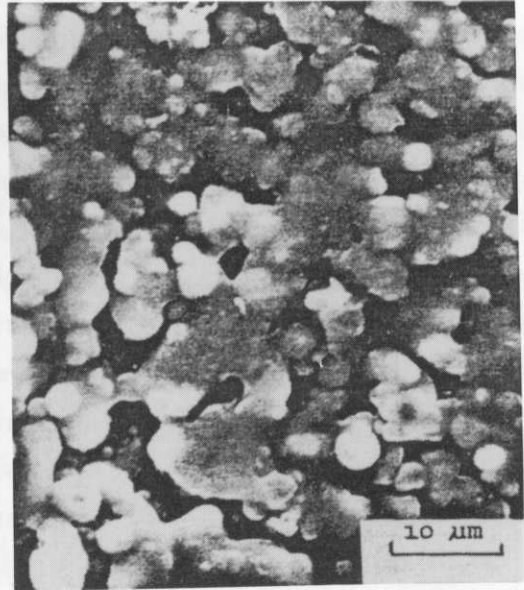
และการวิเคราะห์โดย XRD ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8(c) พบว่าในเม็ดแร่ที่มีค่าความต้านทานแรงกดลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ มีสารผลึกเกิดขึ้นมาก ได้แก่ mullite (3Al₂O₃·2SiO₂ m.p. 1,810°ซ) โดยมีปริมาณมากขึ้นตามอุณหภูมิ ขณะที่ปริมาณสารแก้วลดลง และ quartz (SiO₂) หดไป (ดูรูปเปรียบเทียบในรูปที่ 3(a) และ 8(c)) สารผลึก mullite มีจุดหลอมเหลวสูง จึงเป็นของแข็งในเม็ดแร่ที่อุณหภูมิของการเกิดขึ้นเทอริงนั้น ของเหลวในเม็ดแร่จึงมีความหนืดมากขึ้น และประกอบกับที่ของเหลวมีปริมาณลดลงส่งผลให้อัตราการเกิดขึ้นเทอริงช้าลง จึงให้ค่าความต้านทานแรงกดลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นดังกล่าว

สำหรับแร่ลอยที่ถูกสกัดด้วย HF ซึ่งให้ค่าความต้านทานแรงกดต่ำมากนั้น ซึ่งให้เห็นว่าสารแก้วอัลคาไลน์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำได้ถูกสกัดออกไป จึงไม่มีสารก่อให้เกิดขึ้นเทอริงแบบมีของเหลว อัตราการเกิดขึ้นเทอริงจึงช้ามากส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงกดต่ำมาก และมีค่าความต้านทานแรงกดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยที่อุณหภูมิสูงสุดของการทดลอง จากภาพถ่ายจาก SEM เห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิ 950°ซ เช่นเดียวกันนั้น แร่ลอยมีกลไกการเกิดขึ้นเทอริงแบบมีของเหลว (รูปที่ 5 (b)) เนื่องจากลักษณะอนุภาคมีการเกิดคอคอดและมีการหลอมเหลวบางส่วน ส่วนแร่ลอยที่ถูกสกัดไม่มีลักษณะการหลอมเหลวและไม่มีลักษณะของอนุภาคที่มีการเกิดคอคอดจากกระบวนการขึ้นเทอริง (รูปที่ 5(d))

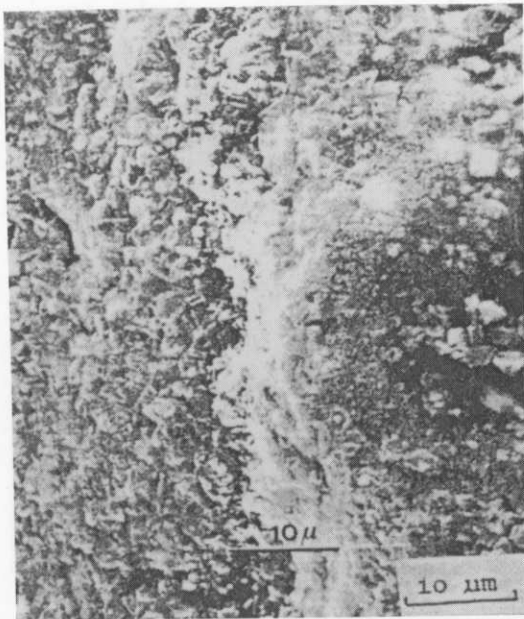
ในรูปที่ 6(a) แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแรงกดของเม็ดแร่ขึ้นเทอริงกับอุณหภูมิ สำหรับแร่ลอยเปรียบเทียบกับแร่ลอยที่เติมโซเดียมซิลิเกต เห็นได้ว่าช่วงอุณหภูมิค่า 850 - 1,000°ซ การเติมโซเดียมซิลิเกตทำให้เม็ดแื่อนั้นมีค่าความต้านทานแรงกดสูงกว่าเม็ดแร่ลอย แต่ค่าความต้านทานแรงกดได้ลดลงอย่างรวดเร็วที่ ≥ 1,025°ซ ซึ่งให้เห็นว่าในช่วงอุณหภูมิค่านั้น โซเดียมมีส่วนทำให้เกิดสารแก้วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำลง ซึ่งทำให้เกิดปริมาณ



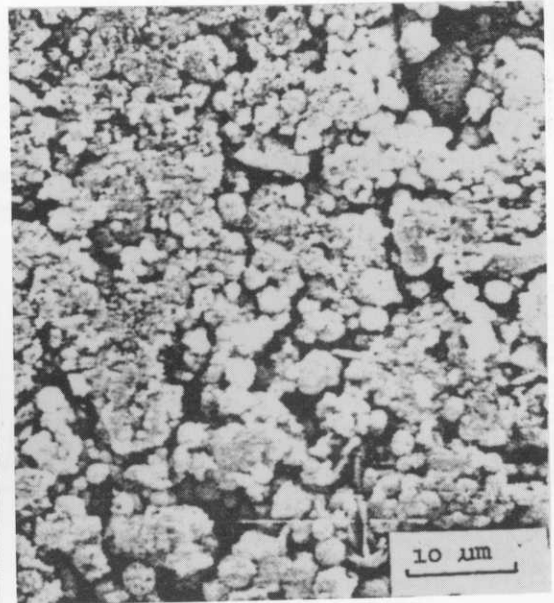
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 5. ภาพ SEM ของ

(a) ฝั่ลลอย Upper Freeport

(b) ฝั่ลลอย Upper Freeport เฝ้ที่ 950° ซ

(c) ฝั่ลลอย Upper Freeport เฝ้ที่ 1,200° ซ

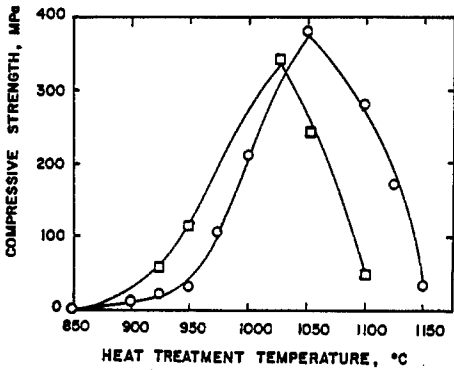
(d) ฝั่ลลอย Upper Freeport สักด้วย HF เฝ้ที่ 950° ซ

ของเหลวได้มาก อัตราการเกิดซินเทอริงจึงสูงกว่าในแร่ลอย แต่เมื่ออุณหภูมิสูง $\geq 1,025^{\circ}\text{C}$ นั้น โซเดียมก็ได้มีส่วน ทำให้มีการเปลี่ยนสารแก้วให้กลายเป็นสารผลึกที่มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้นมาของเหลวในเม็ดถ่านจึงมีความหนืดมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดซินเทอริงช้าลง และค่าความต้านทานแรงกดลดลงกว่าแร่ลอย

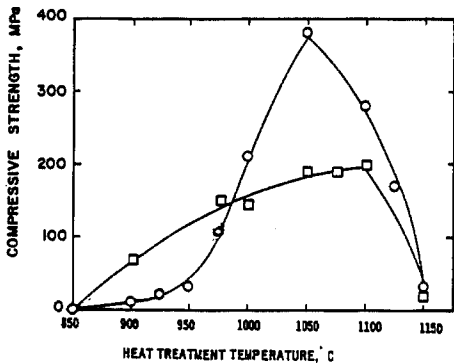
สำหรับบทบาทของแคลเซียมพบว่ามีความคล้ายกันกับโซเดียม แต่พบว่าเม็ดถ่านที่เติมแคลเซียมซิลิเกตลดค่าความต้านทานแรงกดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า และ

ลดค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดได้มากกว่าเม็ดถ่านที่เติมโซเดียมซิลิเกต รูปที่ 6 (b) ผลจากการเปรียบเทียบสารผลึกที่เกิดในเม็ดถ่านด้วย XRD ในรูปที่ 8 (a) และ (b) เม็ดถ่านที่เติมแคลเซียมซิลิเกตมีสารผลึกแคลเซียมคือ Anorthite ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ m.p. $1,550^{\circ}\text{C}$) เกิดขึ้นมาก ขณะที่เม็ดถ่านลอย และเม็ดถ่านที่เติมโซเดียมซิลิเกตไม่มีสารผลึกนี้ แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมสามารถลดค่าความต้านทานแรงกดของเม็ดถ่านได้โดยการลดปริมาณสารแก้วให้กลายเป็นสารผลึกที่มีจุดหลอมเหลวสูงได้แก่ Anorthite ดังกล่าว สำหรับเม็ดถ่านที่เติมโซเดียมซิลิเกต ผลจากการวิเคราะห์ด้วย XRD ไม่พบสารผลึกของโซเดียม ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าโซเดียมได้ระเหยเป็นไอไปได้บ้างที่อุณหภูมิสูง จึงไม่สามารถเกิดเป็นสารผลึกและลดค่าความต้านทานแรงกดได้มากเท่าแคลเซียม

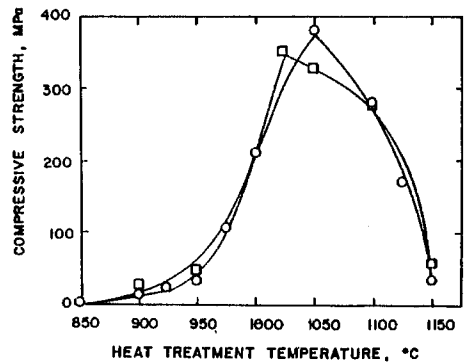
ในการเติมเหล็กซิลิเกตลงในแร่ลอยพบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแรงกดของแร่ลอยเกิดขึ้น ดังได้แสดงค่าความต้านทานแรงกดเปรียบเทียบกันไว้ในรูปที่ 7 ซึ่งให้เห็นว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำเหล็กไม่ได้มีส่วนทำให้จุดหลอมเหลวของสารแก้ว



(a)



(b)

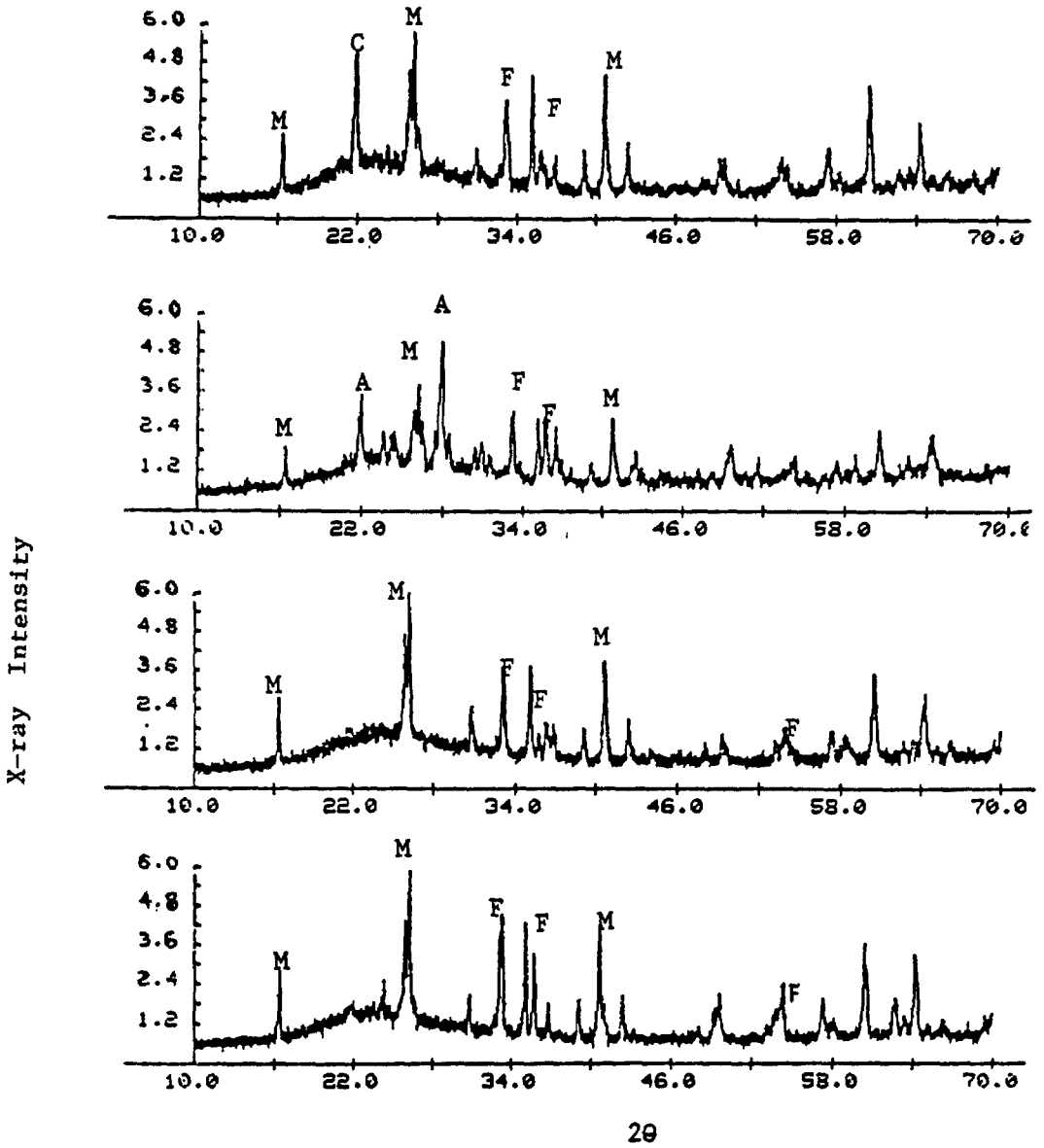


รูปที่ 6. ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแรงกดของเม็ดถ่านซินเทอริงกับอุณหภูมิของ

- (a) ϵ แร่ลอยและ 1 แร่ลอยที่เติมโซเดียมซิลิเกต
- (b) ϵ แร่ลอยและ 1 แร่ลอยที่เติมแคลเซียมซิลิเกต

รูปที่ 7. ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแรงกดของเม็ดถ่านซินเทอริงกับอุณหภูมิของ ϵ แร่ลอย

- Upper Freeport และ 1 แร่ลอย Upper Freeport ที่เติมเหล็กซิลิเกต



รูปที่ 8. X-ray diffraction patterns ของ

- (a) แก้วลอย Upper Freeport ที่เติมโซเดียมซิลิเกตเผาที่ 1,100°ซ
 - (b) แก้วลอย Upper Freeport ที่เติมแคลเซียมซิลิเกตเผาที่ 1,100°ซ
 - (c) แก้วลอย Upper Freeport เผาที่ 1,200°ซ
 - (d) แก้วลอย Upper Freeport ที่เติม เหล็กซิลิเกต เผาที่ 1,150°ซ
- (C = cristobalite, M = mullite, A = anorthite, F = hematite)

ในถ่านล้อยต่ำลงได้ และในช่วงอุณหภูมิสูง เหล็กก็ไม่ได้ทำให้สารแก้วกลายเป็นสารผลึกได้อย่างแคลเซียม อย่างไรก็ตาม เนื่องจากในถ่านล้อยของถ่านหินบิทูมินัสที่ใช้ในการวิจัยนี้มีปริมาณของเหล็กในถ่านล้อยอยู่มาก ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่า เฉพาะเหล็กที่มีอยู่ในถ่านล้อยก็มีบทบาทต่อความต้านทานแรงกดของเม็ดถ่านมากพออยู่แล้ว การเติมเหล็กลงไปอีก จึงอาจไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแรงกดของเม็ดถ่านดังที่ได้พบในงานวิจัยนี้ ซึ่งผลจาก XRD ของเม็ดถ่านล้อยและเม็ดถ่านที่ผสมเหล็กซิลิเกตเผาที่อุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 8 (c) และ 8 (d) ตามลำดับ ก็พบสารผลึกประเภทเดียวกัน

สรุปผลการทดลอง

ถ่านล้อย Upper Freeport เมื่อเกาะและก่อตัวเป็นก้อนสแลกและฟาวล์มีค่าความต้านทานแรงกดสูงมาก เนื่องจากในถ่านมีปริมาณสารแก้วอัลคาไลน์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ จึงเกิดซินเทอริงแบบมีของเหลวได้ง่ายและมีอัตราการเกิดซินเทอริงที่เร็วมาก ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดสูงมาก ผลของการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า หากต้องการลดค่าความต้านทานแรงกดลง อาจกระทำได้โดยการสกัดสารแก้วอัลคาไลน์ออกไปเพื่อเปลี่ยนให้ถ่านมีการเกิดซินเทอริงแบบไม่มีของเหลวซึ่งมีอัตราการเกิดซินเทอริงต่ำมากแทน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่ำลงได้ แต่ในทางปฏิบัติจะกระทำได้ยาก เนื่องจากไม่อาจเข้าไปทำการสกัดสารแก้วอัลคาไลน์ออกจากถ่านที่เกิดในการเผาไหม้ก่อนที่มันจะก่อตัวเป็นก้อนสแลกและฟาวล์ในหม้อกำเนิดไอน้ำได้

สำหรับการลดค่าความต้านทานแรงกดของก้อนสแลกและฟาวล์อีกวิธีหนึ่งได้แก่ การเติมสารผสมกับถ่านหินก่อนนำไปใช้ ในการวิจัยนี้พบว่าแคลเซียมมีบทบาทที่ลดค่าความแข็งแรงได้ดีกว่าโซเดียม เนื่องจากมันสามารถลดปริมาณสารแก้วให้เป็นสารผลึกแคลเซียมได้ ทำให้อัตราการเกิดซินเทอริงแบบมีของเหลว มีอัตราช้าลง ส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงกดลดลงได้ นอกจากนี้ อาจใช้ถ่านหินจากสองแหล่งผสมกัน โดยเฉพาะถ่านหินที่มีแคลเซียมต่ำกับถ่านหินที่มีแคลเซียมสูง งานวิจัยในขั้นตอนต่อไป จะได้ทำการทดสอบการสกัด และการเติมสารแก้วกับถ่านหินจากแหล่งต่างๆ เพิ่มเติม รวมทั้งถ่านหินลิกไนต์ในประเทศไทยด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. Gibb, W.H. (1981). The slagging and fouling characteristics of coal II. A sintering test for the determination of fouling propensity. Powder Industry Research 1 : 269 - 278.
2. Tangsathitkulchai, M. and Austin, L.G. (1985). Studies of sintering of coal ash relevant to pulverized coal utility boilers 2. Preliminary studies of compressive strength of fly ash sinters. Fuel 64 : 86.
3. Tangsathitkulchai, C., Kuvarananchareon, C. and Tangsathitkulchai, M. (1994). Sintering study of Thai lignite ashes. 2nd Technical Meeting of Engineering Faculty, KMITT, 7 - 8 June 1994.
4. Tangsathitkulchai, M., and Tangsathitkulchai C. (1994). Sintering of coal ashes : Effects of temperature and atmosphere. 4th Chemical Engineering Meeting, Khon Kaen, 20 - 21 October 1994.