



รายงานการวิจัย

กระบวนการซินเทอริงของเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะการเผาไหม้ แบบฟลูอิดไดซ์เบด (Sintering of Coal Ashes Under Fluidized Bed Combustion Condition)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย
สาขาวิชาเคมี สำนักวิชาวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2541-2542

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2543

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บุคคลและหน่วยงานต่อไปนี้ที่ช่วยให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง
ด้วยดี

1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2541 และ 2542
2. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้บริการในงานด้านวัดและวิเคราะห์สาร
3. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินเพื่อใช้ในการวิจัย
4. ผู้ช่วยวิจัย คุณณภรณ์ จิวาลักษณ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงพฤติกรรมการเกิดซินเทอริง (sintering) ของเด้าด้านหินแหล่งต่าง ๆ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิการทำงานจากระบบเตาเผาฟลูอิดโคจซ์เบด ทั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มและผลของด้านหินในการก่อให้เกิดปัญหาการเกาะตัวของอนุภาคในฟลูอิดโคจซ์เบดที่เรียก bed agglomeration ซึ่งเป็นภาวะที่ส่งผลเสียต่อการทำงานของเตาเผาฟลูอิดโคจซ์เบด วิธีการศึกษาจะติดตามอัตราการเกิดซินเทอริงของเด้าอย่างเคียวและเด้าที่ผสมอนุภาคอื่นในเบด ได้แก่ ทราย, CaCO_3 , CaO , และ CaSO_4 รวมถึงผลการเติมสาร additives ได้แก่ gibbsite และ andalusite ซึ่งเชื่อว่าจะช่วยลดปัญหาการเกิด agglomeration ในการศึกษาพฤติกรรมซินเทอริงได้ทำภายใต้สภาวะอากาศซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น O_2 และ N_2 เนื่องจากบรรยากาศจริงในเตาเผาแบบฟลูอิดโคจซ์เบดจะมี CO_2 จากการเผาไหม้เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นเพื่อสามารถทดสอบถึงอิทธิพลของบรรยากาศแวดล้อมต่อพฤติกรรมการเกิดซินเทอริง จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมภายใต้สภาวะ CO_2 (50%) + N_2 (50%), CO_2 (100%) และ N_2 (100%)

เด้าด้านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเด้า ASTM ของด้านหินจากเหมือง 4 แหล่ง ได้แก่ แม่เมาะ บ้านปู เชียงม่วน และลานนา ชาติและสารประกอบที่มีอยู่ในเด้า ASTM ทั้ง 4 แหล่ง ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF) และเครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) ในการทดลองได้นำเด้าที่อัดเม็ดไปเผาในเตาเผาแบบท่อในช่วงอุณหภูมิ 800-1050 °C แล้วติดตามพฤติกรรมการเกิดซินเทอริงโดยการวัดค่าความแข็งของเม็ดเด้าที่เรียกค่าความทนแรงอัด (compressive strength) ของเม็ดเด้าที่เปลี่ยนไป ความอุณหภูมิ จากนั้นได้ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและสารประกอบในเม็ดเด้าหลังการเกิดซินเทอริงด้วยเครื่องมือ Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray detector (SEM-EDX) และเครื่องมือ XRD

ผลจากการวิเคราะห์เด้า ASTM ด้วยเครื่องมือ XRD พบว่าเด้าแม่เมาะและเด้าลานนามี anhydrite (CaSO_4) เป็นสารประกอบหลัก โดยมีสารประกอบรอง ได้แก่ quartz (SiO_2) และสารอื่นๆ ส่วนเด้าบ้านปู และเด้าเชียงม่วนมี quartz เป็นสารประกอบหลัก โดยมีสารประกอบรอง ได้แก่ anhydrite และสารอื่นๆ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ XRF ให้ผลเป็นไปในทางเดียวกัน

ผลจากการศึกษาพฤติกรรมซินเทอริงของเด้าด้านหินพบว่าเด้าแม่เมาะ เด้าบ้านปู และเด้าเชียงม่วน มีค่าความแข็งเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและมีค่าความแข็งที่แตกต่างกัน โดยมีความสัมพันธ์กับปริมาณ clays และ anhydrite (CaSO_4) ซึ่งทำให้เกิดสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำได้มากน้อยต่างกันในด้านหินแต่ละชนิด โดยเด้าแม่เมาะมี clays และ anhydrite ในปริมาณสูงจึงให้ค่าความแข็งสูงสุดหรือมีอัตราการเกิดซินเทอริงสูงสุดในช่วงอุณหภูมิ 1000°C ส่วนเด้าบ้านปูที่มีปริมาณ clays สูงสุด และ anhydrite ต่ำสุดให้ค่าความแข็งสูงสุดในช่วงอุณหภูมิ >math>1000^\circ\text{C}</math> สำหรับเด้าลานนาซึ่งมีปริมาณ anhydrite สูงสุด และปริมาณ clays ต่ำสุดให้ค่าความแข็งต่ำสุดและมีค่าความแข็งค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 1000 °C นั้นเด้าบางชนิดมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นร่วมด้วยซึ่งมีผลทำให้ค่าความแข็งของเด้ามากขึ้นหรือน้อยลงได้ โดยเด้าแม่เมาะและเด้าเชียงม่วนมีปฏิกิริยาเคมีระหว่าง anhydrite กับ

clays หรือ quartz ทำให้เกิดเป็นสารผลึกที่มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น ได้แก่ anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) และ albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) เป็นผลให้อัตราการเกิดซินเทอร์ริงช้าลงค่าความแข็งแรงลดลงด้วย ส่วนเต้าบ้านปูไม่มีพฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นแต่มีสารแก้วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำในปริมาณที่มากขึ้นค่าความแข็งแรงจึงมากขึ้นตามอุณหภูมิ สำหรับเต้าลานนาในช่วงที่อุณหภูมิสูงนี้ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นและมีค่าความแข็งแรงต่ำเหมือนที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ ($<1000^\circ\text{C}$)

จากพฤติกรรมซินเทอร์ริงของเต้าถ่านหินทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวนี้ ชี้ให้เห็นได้ว่าถ้าอุณหภูมิทำงานของเตาเผา $<1000^\circ\text{C}$ เต้าแม่เมาะมีแนวโน้มที่จะก่อปัญหา bed agglomeration ได้มากกว่าเต้าชนิดอื่น แต่ถ้าอุณหภูมิจากเตาเผา $>1000^\circ\text{C}$ เต้าบ้านปูมีแนวโน้มในการเกิดปัญหามากกว่าเต้าชนิดอื่น ส่วนเต้าลานนาไม่มีแนวโน้มที่จะก่อปัญหา bed agglomeration

ผลของอนุภาคอื่นในเบด (ทราย, CaO , CaCO_3 และ CaSO_4) และ additives (andalusite และ gibbsite) นั้น พบว่าอนุภาคเหล่านี้ประพฤติกรรมทั้งหมดเป็น inert diluent เนื่องจากสามารถกีดกันไม่ให้ปฏิกิริยาระหว่าง anhydrite และ clays เกิดขึ้นได้มากตามปกติทำให้เกิดมีสารจุดหลอมเหลวต่ำในปริมาณที่น้อยลง โดยสามารถลดค่าความแข็งแรงของเม็ดเต้าลงได้ในปริมาณใกล้เคียงกัน (ประมาณ 50%) เพื่อให้สามารถแยกแยะถึงบทบาทของอนุภาคอื่นในเบดและ additives ที่มีต่อกระบวนการเกิด bed agglomeration ให้ชัดเจนยิ่งขึ้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิจัยโดยการใช้ modifies ashes ซึ่งเป็นเต้าที่เติม 15 wt% amorphous silica ทั้งนี้เพื่อเพิ่มปริมาณสารแก้วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเพื่อให้ได้มีค่าความแข็งแรงสูงขึ้นกว่าเดิม ผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมอนุภาคอื่นในเบดและ additives ลงใน modified ashes นี้พบว่าสารเติมดังกล่าวเหล่านี้ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงด้วยกลไกที่แตกต่างชัดเจนถึง 3 แบบ ได้แก่ pure inert effect, inert / reaction effect และ inert / adsorption effect โดยมี gibbsite เป็นสารที่ลดค่าความแข็งแรงได้มากที่สุด

ในส่วนของบรรยากาศที่ต่างกันระหว่างอากาศ, $\text{CO}_2 + \text{N}_2$, 100% CO_2 และ 100% N_2 นั้น ไม่พบความแตกต่างของพฤติกรรมซินเทอร์ริงของเต้าถ่านหินอย่างเป็นนัยสำคัญซึ่งอาจเป็นผลจากการที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก บรรยากาศที่ต่างกันจึงไม่ทำให้มีอิทธิพลมากพอต่อการเปลี่ยนแปลงทางส่วนประกอบทางเคมีของเต้าถ่านหินทำให้พฤติกรรมซินเทอร์ริงมีแนวโน้มที่ไม่แตกต่างกัน

Abstract

The sintering behaviour of coal ashes was studied to obtain preliminary trend and prediction as to the level of bed agglomeration in fluidized bed combustion. The roles and mechanisms of bed materials (sand, CaCO_3 , CaO and CaSO_4) as well as additives (gibbsite and andalusite) to be used for possible bed agglomeration controlling were investigated. The chosen sintering atmospheric environment was air (O_2 , N_2). However, the atmosphere of fluidized bed combustion contains more of other gases such as CO_2 , therefore the effect of gas atmospheres ($\text{CO}_2 + \text{N}_2$, CO_2 , and N_2) were also examined.

The four sample coals used are low-rank coals from Maemoh seam, Banpu seam, Chiengmuan seam and Lanna seam. Elemental and mineralogical analyses of the test ashes were determined by X-ray-Fluorescence Spectrometer (XRF) and X-ray Diffractometer (XRD). The compressive strength was used to follow the extent of ash sintering under the temperature range 800-1050°C. Physical and chemical changes of the sintered products were ascertained from Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray detector (SEM-EDX) and XRD.

Results from mineralogical analyses indicated that Maemoh ash and Lanna ash contain anhydrite (CaSO_4) as major phase with quartz (SiO_2) being the minor phase. Chiengmuan ash and Banpu ash show different results, with quartz being the major phase and anhydrite the minor phase. XRF results are in agreement with the phase compositions analyzed by XRD.

Results from sintering test showed a clear difference in the strength-temperature relationship of the test ashes. This difference was attributed to the role and relative amounts of clays and anhydrite components that could form the low-melting temperature eutectics. That is Maemoh ash contains high percentage of both clays and anhydrite giving rise to highest strength at temperature <1000°C. Banpu ash contains highest amounts of clays but lowest anhydrite giving rise to highest strength at temperature >1000°C. Lanna ash contains lowest clays but highest anhydrite, showing lowest strength and was not influenced by changes in sintering temperature.

At the temperatures higher than 1000°C chemical reaction between the ash components occurred, resulting in higher strength or lower strength of ash pellets as compared to that observed at lower temperatures. For Maemoh ash and Chiengmuan ash, some of the low melting eutectics was removed to form the new high melting crystalline solid phase which retarded the sintering rate, and hence a reduction in strength. The new crystalline phases were anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) and albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). For Bangpu ash, chemical reaction resulted in the formation of more liquid glassy phase, thus giving the continued increasing pellet strength. For Lanna ash the very low pellet strength and the chemically unchanged phases indicated that the ash composition was very stable.

From these results, if the bed temperature is at the normal operating temperature of a fluidized bed combustor, Maemoh ash should pose the highest tendency for bed agglomeration. However, at higher temperatures ($>900^{\circ}\text{C}$), Banpu ash should give the greatest tendency for bed agglomeration. Lanna ash poses no tendency for such problem.

Incorporation each of bed materials and additives into the ashes caused a general strength reduction (50%) due to the inert dilution effect that prevented the association of anhydrite and clays to form the low melting eutectics. To comprehend the mechanism of bed agglomeration more clearly, modified ashes which produced extra amount of glassy materials, by addition of 15wt% amorphous silica, were prepared and tested. The bed materials and additives, when sintered with these modified ashes, gave reduction of strength by varying extents based on three distinct mechanisms namely, a pure inert effect, an inert/reaction effect and an inert/adsorption effect, with gibbsite being the most effective.

Variation of gaseous atmospheres in the temperature range of $800\text{-}1050^{\circ}\text{C}$ had little effect on the sintered strength of ash pellets. It is possible that the temperature range studied is not high enough to induce a significant change on the ash compositions caused by possible gas-ash component reactions, hence the sintering behaviour is relatively unaffected.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฅ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	4

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2 ทฤษฎีกระบวนการซินเทอริง.....	8
2.2.1 กระบวนการซินเทอริงแบบไม่มีของเหลว.....	12
2.2.2 กระบวนการซินเทอริงแบบมีของเหลว.....	12
2.2.3 สมบัติทางเคมีของเม็ดάνหินที่มีผลต่อกระบวนการซินเทอริง.....	16

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทำวิจัย.....	21
3.2 วิธีทดลอง.....	21
3.2.1 ขั้นตอนต่างๆ.....	29
3.2.2 การเตรียมเต้า ASTM.....	29
3.2.3 การเตรียมเม็ดάν.....	31
3.2.4 การเตรียม CaO.....	31

3.2.5 การเตรียมเม็ดเถ้า ASTM ผสมกับทราย, CaCO_3 , CaO , CaSO_4 , amorphous silica, andalusite หรือ gibbsite ในปริมาณ 15% โดยน้ำหนักของเม็ดเถ้า.....	31
3.2.6 การเผาเม็ดเถ้าเพื่อให้เกิดซินเทอร์ริง	31
3.2.7 การวัดความแข็งของเม็ดเถ้า	31

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 คุณสมบัติเถ้าที่ศึกษา	33
4.2 ผลของการซินเทอร์ริงเถ้าผ่านหินในอากาศ	33
4.3 ผลของการซินเทอร์ริงเถ้าผ่านหินที่ผสมอนุภาคอื่นในเบดและผสมอนุภาค additives ในอากาศ	41
4.4 ผลของการซินเทอร์ริง modified ashes ในอากาศ	51
4.5 ผลของการเกิดซินเทอร์ริงของเถ้าผ่านหินและเถ้าผ่านหินที่เติมอนุภาคอื่น ในเบดในบรรยากาศ $\text{CO}_2 + \text{N}_2$, CO_2 และ N_2	56

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	63

บรรณานุกรม

ภาคผนวก ก. ข้อมูล X-ray Diffractogram ของเถ้าผ่านหินภายใต้สภาวะต่างๆ

ภาคผนวก ข. การเผยแพร่ผลงานวิจัย

ประวัตินักวิจัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	สารอนินทรีย์เคมีต่าง ๆ ในถ่านหิน.....	17
ตารางที่ 4.1	การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ของถ่านหิน.....	34
ตารางที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ในถ่านหิน ASTM โดยเครื่องมือ x-ray Fluorescence Spectrometer (เป็น % oxide).....	34
ตารางที่ 4.3	ผลการวิเคราะห์สารประกอบในถ่านหินด้วย XRD.....	36
ตารางที่ 4.4	ส่วนประกอบ clays และ anhydrite ในถ่านหิน.....	39
ตารางที่ 4.5	ผลของการวิเคราะห์เม็ดถ่านหินที่ผสมอนุภาคต่าง ๆ ที่เผาที่ 1050 °C ด้วย XRD.....	50
ตารางที่ 4.6	ผลการวิเคราะห์เม็ดถ่านหินที่เป็น modified ashes เผาที่ 900 °C และ 1050 °C.....	53

สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการซินเทอริงในขั้นตอนที่ 1.....	9
	a) เริ่มต้น (Starting Particle)	
	b) การจัดเรียงตัวของอนุภาค (Rearrangement)	
	c) การเกิดคอคอด (Neck Formation)	
รูปที่ 2.2	การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการซินเทอริงในขั้นตอนที่ 2.....	10
	a) การโตขึ้นของคอคอดและการหดตัว (Neck Growth and Volume Shrinkage)	
	b) ขอบเกรนยาวขึ้น (Lengthening of grain boundary)	
	c) การโตขึ้นของส่วนต่าง ๆ (Continued neck growth and grain boundary lengthing, volume shrinkage, and grain growth)	
รูปที่ 2.3	การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการซินเทอริงในขั้นตอนที่ 3.....	11
	a) เกรนโตขึ้นและช่องว่างถูกแยกออก (Grain growth with discontinuous pore phase)	
	b) เกรนโตขึ้น ขนาดช่องว่างเล็กลง (Grain growth with porosity reduction)	
	c) เกรนโตขึ้น ขนาดช่องว่างหมดไป (Grain growth with porosity elimination)	
รูปที่ 2.4	การถ่ายเทมวลสารระหว่างอนุภาคที่เกิดซินเทอริง.....	13
รูปที่ 2.5	การเกิดซินเทอริงแบบมีของเหลว.....	14
รูปที่ 2.6	ก) ลักษณะ โครงสร้างของสารผลึก.....	18
	ข) โครงสร้างของสารแก้วแบบ random-network	
รูปที่ 2.7	โครงสร้างของ sodium silicate glass ที่เกิดจากการเข้าทำลายโครงสร้างของสารผลึกโดย Na ⁺	19
รูปที่ 3.1	เครื่องบดหยาบ (Jaw Crusher).....	22
รูปที่ 3.2	เครื่องบดละเอียด (Ball Mill).....	23
รูปที่ 3.3	ชุดตะแกรงร่อนพร้อมเครื่องเขย่า (Sieves and Sieve shaker).....	24
รูปที่ 3.4	เตาเผา Muffle.....	25
รูปที่ 3.5	เตาเผาแบบท่อ (Tube Furnace).....	26
รูปที่ 3.6	ชุดอัดเม็ด (die).....	27
รูปที่ 3.7	เครื่องวัดความทนแรงอัด (Compressive Strength Tester).....	28
รูปที่ 3.8	ลักษณะเต้า ASTM ทั้ง 4 ชนิดที่เตรียมได้.....	30
รูปที่ 3.9	เม็ดเต้าที่ทำจากชุดอัดเม็ด.....	32
รูปที่ 4.1	การกระจายขนาดของเต้าผ่านหินทั้ง 4 ชนิด.....	35

รูปที่ 4.2	ความทนแรงอัดของเส้นด้ายหินที่เกิดซินเทอริงในสภาวะอากาศ.....	37
รูปที่ 4.3	อัตราส่วน clays ต่อ anhydrite และค่าความแข็ง.....	40
รูปที่ 4.4	ภาพถ่ายจาก SEM ของเส้นแม่เมาะ.....	42
	(ก) ก่อนทำซินเทอริง	
	(ข) ซินเทอริงที่ 900 ° C ในอากาศ	
	(ค) ซินเทอริงที่ 1050 ° C ในอากาศ	
รูปที่ 4.5	สเปกตรัมจากเครื่อง EDX ของเส้นแม่เมาะ ซินเทอริงที่ 1050° C ในอากาศ.....	43
รูปที่ 4.6	ภาพถ่ายจาก SEM ของเส้นบ้านปู.....	44
	(ก) ก่อนทำซินเทอริง	
	(ข) ซินเทอริงที่ 900 ° C ในอากาศ	
	(ค) ซินเทอริงที่ 1050 ° C ในอากาศ	
รูปที่ 4.7	ภาพถ่ายจาก SEM ของเส้นเชียงใหม่.....	45
	(ก) ก่อนทำซินเทอริง	
	(ข) ซินเทอริงที่ 900 ° C ในอากาศ	
	(ค) ซินเทอริงที่ 1050 ° C ในอากาศ	
รูปที่ 4.8	ภาพถ่ายจาก SEM ของเส้นลานนา.....	46
	(ก) ก่อนทำซินเทอริง	
	(ข) ซินเทอริงที่ 900 ° C ในอากาศ	
	(ค) ซินเทอริงที่ 1050 ° C ในอากาศ	
รูปที่ 4.9	สเปกตรัมจากเครื่อง EDX ของเส้นลานนา ซินเทอริงที่ 1050° C ในอากาศ.....	47
รูปที่ 4.10	ความทนแรงอัดของเส้นด้ายหินที่ผสมกับอนุภาคอื่นในเบด (15 wt% ของ CaO, CaCO ₃ , CaSO ₄ และทราย) ในสภาวะอากาศ.....	48
รูปที่ 4.11	ความทนแรงอัดของเส้นด้ายหินที่ผสมกับ Additives (15 wt% ของ Andalusite และ Gibbsite) ในสภาวะอากาศ.....	49
รูปที่ 4.12	ความทนแรงอัดของ modified ashes ในสภาวะอากาศ.....	52
รูปที่ 4.13	ภาพ SEM ของ modified ashes เสาที่ 1000° C.....	54
	(ก) เส้นแม่เมาะ (ข) เส้นบ้านปู	
รูปที่ 4.14	ผลของอนุภาคอื่นในเบดและ additives (15 wt%) ต่อความทนแรงอัดของmodified ashes :	
	(ก) เส้นบ้านปู (ข) เส้นแม่เมาะ.....	55

รูปที่ 4.15	ผลของอุณหภูมิและ additives ต่อความทนแรงอัดของ modified ashes	57
รูปที่ 4.16	ความทนแรงอัดของเต้าถ่านหินที่เกิดชั้นเทอร์ริงในสภาวะบรรยากาศของ CO_2+N_2	58
รูปที่ 4.17	ความทนแรงอัดของเต้าถ่านหินที่ผสมกับอนุภาคอื่นในเบดในสภาวะบรรยากาศของ CO_2+N_2	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิด ไคซ์เบดเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาขึ้น ในเบื้องต้นเพื่อใช้เผาไหม้ ถ่านหินและเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำ เนื่องจากมีข้อดีในการควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ ให้อยู่ระหว่าง 800 - 900°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้า ทำให้สามารถลดปัญหาของการเกิด slagging และ fouling ได้ และยังสามารถจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในขณะที่เผาไหม้โดยการผสมหินปูน (CaCO₃) เข้าในหีบเผาไหม้โดยตรง ดังนั้นระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิด ไคซ์เบด จึงเป็นที่ยอมรับว่าเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ผลิตพลังงานความร้อนและกระแสไฟฟ้าที่ช่วยลดมลพิษทางอากาศ ให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยได้รับการพัฒนาเป็นหม้อไอน้ำ (boiler) ในระดับอุตสาหกรรม ในปัจจุบัน ได้มีการสร้างโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้ระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิด ไคซ์เบดในหลาย ประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา ยุโรป และญี่ปุ่น รวมทั้งประเทศไทยด้วย

สำหรับหลักการของการเผาไหม้แบบฟลูอิด ไคซ์เบดที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงนั้น อนุภาคถ่านหิน จะถูกป้อนเข้าไปในบริเวณกลุ่มอนุภาคทรายที่ลอยตัวอยู่ในกระแสน้ำอากาศ ซึ่งไหลขึ้นมาจากด้านล่าง ภายในกลุ่มอนุภาคทรายที่เรียกว่า เบด (bed) นี้ ถ่านหินจะถูกเผาไหม้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากการสัมผัส อย่างทั่วถึงระหว่างอากาศและอนุภาคถ่านหิน ความร้อนที่ถูกปลดปล่อยออกมาในอัตราที่เร็วจะส่งผ่านให้กับท่อที่รับความร้อนซึ่งจุ่มอยู่ในเบด โดยตรง ผลคือขนาดของหม้อไอน้ำจะมีขนาดเล็กกว่าหม้อไอน้ำที่ใช้เทคโนโลยีแบบดั้งเดิม เช่น แบบ Stoker หรือ Pulverized fired boilers

ในกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินแบบฟลูอิด ไคซ์เบดมีปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีระหว่างอนุภาคต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นเบด ได้แก่ อนุภาคถ่านหิน , เถ้าถ่านหิน , ทราย , หินปูน (CaCO₃) , แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) ซึ่งมีการเคลื่อน ไหวอยู่ตลอดเวลา การทำงานของเตาเผาแบบนี้ต้องมีการรักษาภาวะฟลูอิด ไคซ์เซชัน (fluidization) ให้มีความเสถียรอยู่ตลอดเวลา โดยที่อนุภาคในเบดต้องไม่มีการเกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่าเกิด bed agglomeration ขึ้น เพราะถ้าหากมีปัญหาคือ bed agglomeration ขึ้น จะทำให้เกิดการหยุดชะงักของการเคลื่อน ไหวของเบดที่เรียกว่าสภาวะ defluidization และทำให้การทำงานของระบบเผาไหม้ต้องหยุดชะงักลงได้ ปัญหา bed agglomeration นี้ส่วนใหญ่เกิดจากพื้นผิวของอนุภาคของเถ้าถ่านหินบางส่วนมีความเหนียวจึงเกิดการเกาะติดกันของอนุภาคต่าง ๆ เช่น เถ้าถ่านหินด้วยกันเอง และอนุภาคอื่น ๆ ในเบด แล้วตามด้วยกระบวนการซินเทอริง (sintering) ทำให้อนุภาคที่ติดเกาะกันมีความแข็งแรงและมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้เกิดสภาวะ defluidization ดังกล่าวได้

พฤติกรรมที่เกิด bed agglomeration มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัย ปัจจัยที่สำคัญได้แก่ ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน เนื่องจากมีรายงานว่า ถ่านหินต่างชนิดกันมีแนวโน้มในการเกิด

bed agglomeration มากน้อยต่างกัน ปัจจัยที่สำคัญรองลงมาได้แก่ การมีส่วนร่วมของอนุภาคอื่น ๆ ในเขตขนาดของอนุภาคที่เกี่ยวข้อง สภาวะบรรยากาศที่แวดล้อม การควบคุมสภาวะลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุภาคในเขตให้มีการผสมคลุกเคล้ากันระหว่างอนุภาคต่างๆในเขต โดยทั่วไปงานวิจัยที่ศึกษาถึงปัญหา bed agglomeration จะศึกษาโดยตรงจากเตาเผาระบบเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด ซึ่งต้องใช้ถ่านหินในปริมาณมาก ใช้เวลานาน จึงเสียค่าใช้จ่ายมากอีกทั้งการควบคุมสภาวะตัวแปรต่าง ๆ ทำได้ไม่มากนัก ดังนั้นในกรณีที่ต้องการศึกษาขั้นต้นถึงแนวโน้มเพื่อเปรียบเทียบระหว่างถ่านหินต่างชนิดซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการแยกแยะถ่านหินที่มีต่อปัญหา bed agglomeration หรือต้องการศึกษาดัชนีตัวแปรต่าง ๆ เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกที่เกี่ยวข้อง พบว่าสามารถศึกษาปัญหา bed agglomeration โดยใช้อุปกรณ์และวิธีการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยการพิจารณาพฤติกรรมการเกิดซินเทอริงของอนุภาคต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลที่ได้ในระดับห้องปฏิบัติการนี้จะช่วยลดปริมาณงานการทดลองในการใช้เตาเผาแบบเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดเพื่อศึกษาปัญหา bed agglomeration ให้ลดน้อยลงเหลือเท่าที่จำเป็นได้

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมซินเทอริงในห้องปฏิบัติการนิยมใช้วิธีการวัดค่าความทนแรงอัด (compressive strength) ของเม็ดถ่านหิน โดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความทนแรงอัด และติดตามการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของเม็ดถ่านหินด้วยเครื่องมือ Scanning Electron Microscope (SEM) หรืออุปกรณ์ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) และเครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) ซึ่งการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีจะช่วยเสริมให้เข้าใจถึงกลไก ปัจจัยและสภาวะต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมซินเทอริงซึ่งเกี่ยวข้องกับปัญหา bed agglomeration ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดซินเทอริงของถ่านหินจากแหล่งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด (fluidized bed combustion) แต่เนื่องจากในเทคโนโลยีของฟลูอิดไคซ์เบดนี้มีอนุภาคหลายชนิดปนกันอยู่ในเขต งานวิจัยนี้จะเริ่มจากการศึกษาซินเทอริงของถ่านหินอย่างเดียวก่อนเป็นหลักก่อน จากนั้นจึงจะศึกษาซินเทอริงของถ่านหินที่มีอนุภาคอื่นเพิ่มเข้าไปด้วย เช่น CaO , CaCO_3 , CaSO_4 และทราย โดยศึกษาภายใต้สภาวะอากาศ ($\text{O}_2 + \text{N}_2$) และบรรยากาศของ $\text{CO}_2 + \text{N}_2$, CO_2 และ N_2 เนื่องจากในบรรยากาศการเผาไหม้จะมี CO_2 เกิดขึ้นด้วย การศึกษานี้จะทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมและปัญหาของการเกิด bed agglomeration โดยการพิจารณาจากอัตราการเกิดซินเทอริงเพื่อเป็นตัวชี้วัดว่าถ่านหินต่าง ๆ จะมีแนวโน้มในการเกิดปัญหา bed agglomeration ได้มากน้อยแตกต่างกันอย่างไร ทำให้สามารถแยกแยะเลือกถ่านหินที่มีแนวโน้มของการเกิดปัญหา bed agglomeration ต่ำไปใช้งาน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการควบคุมสภาวะของการทำงานของเตาเผาในระบบฟลูอิดไคซ์เบดให้มีปัญหาเกี่ยวกับ bed agglomeration ให้น้อยที่สุด

สำหรับกรณีที่มีความจำเป็นต้องใช้ถ่านหินชนิดที่มีปัญหา การเติม additive อาจช่วยลดการเกิดซินเทอริงให้น้อยลงได้ ดังนั้นการวิจัยนี้จะเพิ่มการศึกษาถึงผลของการเติม additive เช่น gibbsite และ

andalusite เป็นต้น เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่ additive เหล่านี้จะช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับ bed agglomeration ในเทคโนโลยีของการเผาไหม้แบบฟลูอิดไลซ์เบดนี้ด้วย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

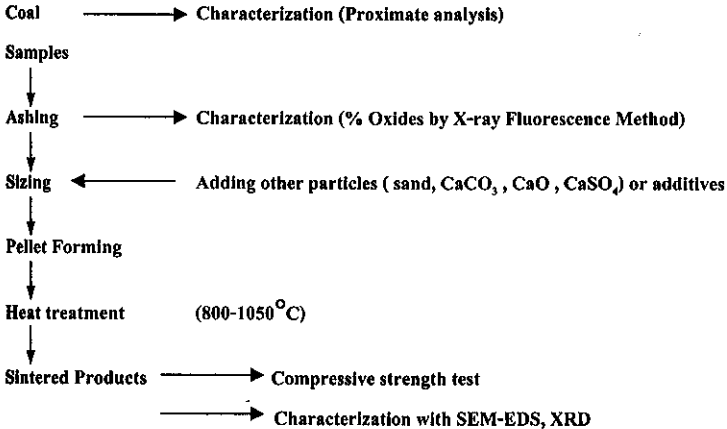
ประกอบด้วย

1. การวิเคราะห์แบบ Proximate (% moisture, % volatile matter, %fixed carbon , % ash) ของถ่านหิน 4 แหล่งที่เลือกมาศึกษา
2. การเตรียมถ่านหินในห้องปฏิบัติการ โดยการเผาถ่านหินตามวิธีมาตรฐาน ASTM
3. การวิเคราะห์ถ่านหินที่เตรียมได้โดยวิธีวิเคราะห์ทาง X-ray fluorescence spectrometry (รายงานเป็น % oxide)
4. การบดและคัดขนาดถ่านหินให้ได้ช่วงขนาดใกล้เคียงกับที่พบในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไลซ์เบด
5. การทำเม็ดถ่านเป็นรูปทรงกระบอกด้วยแม่พิมพ์ (die)
6. การเผาเม็ดถ่านที่อุณหภูมิ 800-1050 °C ในอากาศ และในบรรยากาศ CO₂+N₂ , CO₂ และ N₂
7. การวัดความแข็งของเม็ดถ่านที่เกิดซินเทอร์ริงแล้วด้วยเครื่องมือวัดความทนแรงอัด
8. การวิเคราะห์เม็ดถ่านที่เกิดซินเทอร์ริงแล้วด้วย SEM-EDS และ XRD เพื่อวิเคราะห์รูปลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเม็ดถ่าน
9. ในกรณีของการผสมอนุภาค CaO, CaCO₃ , CaSO₄ , ทราซ, amorphous silica และ additives อนุภาคเหล่านี้จะมีการเตรียมโดยการบดและคัดขนาดให้ใกล้เคียงกับถ่านหินและผสมลงในถ่านหินก่อนจะทำเป็นเม็ดถ่านแล้วดำเนินการวิจัยและวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกัน

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

วิธีการศึกษาพฤติกรรมการเกิดซินเทอร์ริงของถ่านหินภายใต้สภาวะของการเผาไหม้แบบฟลูอิดไลซ์เบด สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมีของถ่านหินที่จะนำมาศึกษา จากนั้นจึงนำถ่านหินซึ่งเตรียมได้จากถ่านหินมาทำการบดและคัดขนาด แล้วทำให้เป็นเม็ดรูปทรงกระบอก ทำการเผาเม็ดถ่านให้เกิดซินเทอร์ริงภายใต้อุณหภูมิและสภาวะต่าง ๆ จากนั้นวัดค่าความทนแรงอัด ซึ่งเป็นค่าความแข็งของเม็ดถ่าน โดยจะใช้ค่าความแข็งของเม็ดถ่านนี้เป็นตัวชี้ถึงระดับอัตราการเกิดซินเทอร์ริงได้ เม็ดถ่านที่เกิดซินเทอร์ริงดังกล่าวจะนำไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีโดยเครื่องมือวิเคราะห์ เช่น Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) และ X-ray Diffractometer (XRD) ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงกลไก และปัจจัยตลอดจนสภาวะต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการเกิดซินเทอร์ริงได้ (ดังแผนภาพ)

The Sintering Test Procedure



1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

หากการศึกษาระบวนการซินเทอริงของถ้ำด้านหินภายใต้สภาวะของการเผาไหม้แบบฟลูอิด ไคซ์เบดครั้งนี้บรรลุตามเป้าหมาย จะช่วยให้เข้าใจปัญหาการก่อตัวและเกาะติดของอนุภาคถ้ำและอนุภาคอื่นในเบด (bed agglomeration) และแนวทางการแก้ไข้ปัญหา ตลอดจนการเลือกใช้ถ้ำด้านหินที่มีแนวโน้มของปัญหาการเกิด bed agglomeration ต่ำไปใช้งาน ซึ่งจะเป็ประโยชน์ต่อการควบคุมการทำงานของเขาเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบด ทำให้เกิดการพัฒนาคเทคโนโลยีแบบฟลูอิด ไคซ์เบดในประเทศไทยให้แพร่หลายมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลคดียังนี้

1. มีการใช้ถ้ำด้านหินซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติเพิ่มขึ้นอย่างคุ่มค่ามากที่สุด ช่วยลดการใช้ น้ำมันปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติซึ่งนับวันจะหมดไป
2. ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม เพราะในเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบฟลูอิด ไคซ์เบดนี้สามารถจับซัลเฟอร์ขณะเผาไหม้ได้ จึงลดการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ ทำให้สามารถใช้กับถ้ำด้านหินคุณภาพต่ำที่มีปริมาณซัลเฟอร์สูงได้
3. สามารถใช้ถ้ำด้านหินคุณภาพต่ำที่เกิดปัญหา slagging และ fouling ในเทคโนโลยีแบบฟลูอิด ไคซ์เบด หรือ สโตเกอร์ได้ เนื่องจากในเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบฟลูอิด ไคซ์เบดสามารถทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า จึงไม่ทำให้ถ้ำด้านหินมีการหลอมเหลวไปเกาะติดผนังห้องส่งผ่านความร้อนต่าง ๆ จนเกิดปัญหาของ slagging และ fouling ขึ้น

4. เป็นแนวทางในการศึกษาปัญหา bed agglomeration ที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้วัสดุชีวมวลต่างๆ เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด วัสดุชีวมวลเหล่านี้ได้แก่ แกลบข้าว, ชานอ้อย, เปลือกไม้ เป็นต้น ซึ่งมีอยู่มากมายในประเทศไทย

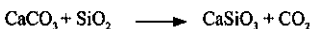
บทที่ 2

งานวิจัยและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การรายงานถึงเตาเผาที่ใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดว่ามีปัญหาของ bed agglomeration และ defluidization ได้มีมานานแล้ว (Smith , 1956 ; Goblirsch et al, 1980 ; Basu and Sarka , 1983 ; Manzoori , 1990 ; Moore et. al, 1991). แต่งานวิจัยที่ศึกษาถึงปัญหาของ bed agglomeration และ defluidization ในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดนั้นได้มีการเริ่มศึกษาอย่างจริงจังเมื่อ ปี 1992 ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา โดย M.R. Dawson และ R.C. Brown ได้ศึกษาปัญหานี้เนื่องจากที่มหาวิทยาลัยโอไฮโอวา-สเตทนั้นใช้กระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า ซึ่งใช้เทคโนโลยีแบบ circulating fluidized bed boiler แต่โรงไฟฟ้าทั้งสองโรงต่างก็ประสบปัญหาการเกิด bed agglomeration จนทำให้ต้องปิดโรงไฟฟ้าอยู่เสมอ คณะวิจัยนี้จึงได้ทำการวิจัยโดยอาศัยสมมติฐานว่า ปกติในเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดนี้เตาเผาทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าถ่านหิน ($T < 1000^{\circ}\text{C}$) ดังนั้นการที่ถ่านหินมีความเหนียวและเกาะติดกันจนเกิดซินเทอริงเป็นก้อนแข็งและมีขนาดใหญ่จนเตาเผาทำงานไม่ได้นี้น่าจะเกิดมาจากการที่ในเตาเผา มีสภาวะบรรยากาศแวดล้อมที่มีออกซิเจนน้อยกว่าที่ควร ทำให้เหล็กในเถ้าถ่านหินอยู่ในรูปที่มี oxidation number ต่ำ และทำตัวเป็น fluxing agent ทำให้ส่วนประกอบอื่น เช่น aluminosilicates ในเถ้าถ่านหินมีความหนืดลดลงจนสามารถไปเกาะติดและห่อหุ้มอนุภาคต่าง ๆ ในเบด (เช่น เม็ดทราย) ทำให้อนุภาคต่าง ๆ มีความเหนียวและเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้นมาได้ ดังนั้นคณะวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเปรียบเทียบการทำงานของเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดในห้องปฏิบัติการ โดยใช้สภาวะที่มีปริมาณอากาศสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ที่เกินร้อยละเจ็ด (120%) กับที่ต่ำกว่าร้อยละเจ็ด (70%) จากผลการวิจัยพบว่าเตาเผาที่มีสภาวะปริมาณอากาศต่ำกว่าร้อยละเจ็ดเกิดปัญหา bed agglomeration ขึ้นในขณะที่เตาเผาที่มีสภาวะปริมาณอากาศมากกว่าร้อยละเจ็ดไม่พบปัญหาดังกล่าว

คณะวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์สารต่าง ๆ ที่มีอยู่ใน bed ที่มีปัญหา agglomeration ก็พบว่าในกรณีนี้เตาเผาผสมหินปูนเข้าไปด้วยจะมีสารผลึกประเภทที่มีส่วนประกอบคล้ายสารแร่ Wallastonite คือ CaSiO_3 อยู่เป็นปริมาณมาก CaSiO_3 เกิดได้จากปฏิกิริยาระหว่างหินปูนและทรายดังนี้



ในกรณีที่เตาเผาไม่ได้ผสมหินปูน สารที่พบใน bed ที่เกิด agglomeration นั้นเป็นสารผลึกที่มีส่วนประกอบคล้ายสารแร่ pyroxene คือ diopside [$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Al}, \text{Si})_2\text{O}_6$] และสารแร่ amphibole คือ tremolite [$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5(\text{SiAl})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$] ซึ่งคณะวิจัยผู้นี้ได้เสนอว่า สารผลึก diopside และ tremolite นี้ น่าจะเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเคมี แบบ solid-solid reaction ระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ ของเถ้าถ่านหิน

เช่น CaO, Mg กับสาร aluminosilicate โดยมีเหล็กที่มี oxidation number ต่ำเป็นตัว fluxing agent ช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ ดังนั้นปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ย่อมไม่เกิดขึ้นในสภาวะที่เตาเผามีปริมาณออกซิเจนมากพอ จึงไม่เกิดปัญหา agglomeration ขึ้น จากผลการวิจัยก็ได้พบว่าในเตาเผาที่ไม่มีปัญหา agglomeration ไม่มีสารหลักเหล่านี้อยู่เลย

ในปีเดียวกันนี้ (1992) B.J. Skrifvars และคณะแห่งประเทศฟินแลนด์ ได้เสนอรายงานวิชาการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดขึ้นเทอร์ริงของถ่านหิน 5 ชนิดของประเทศฟินแลนด์ภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด ซึ่งเป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ คณะวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบถึงแนวโน้มของอัตราการเกิดขึ้นเทอร์ริงโดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่ถ่านหินเริ่มมีความแข็งเกิดขึ้นในเม็ดถ่าน (sintering temperature, T_{SINT}) ส่วนค่าความแข็งของเม็ดถ่านวัดโดยวิธีวัดค่าความทนแรงอัด (compressive strength) ถ่านหินที่มีค่า T_{SINT} ต่ำมีแนวโน้มจะเกิดปัญหา bed agglomeration ขึ้นได้ง่าย และพบว่าผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการที่ได้มีแนวโน้มเป็นไปตามประสบการณ์ทางอุตสาหกรรมที่พบจริงในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้มีการเติมหินปูน ($CaCO_3$) และสารแร่ (clays) ลงไปและพบว่าที่อุณหภูมิ $700^\circ C$ ถ้าผสมสารเหล่านี้เพียง 15% โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าความแข็งลดลง

จนกระทั่งปี 1994 คณะวิจัยชุดนี้จึงได้รายงานผลโดยเสนอเป็นกลไกของการเกิดขึ้นเทอร์ริงภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยมีการศึกษาถึงผลของสภาวะบรรยากาศที่มีต่อการเกิดขึ้นเทอร์ริงเพิ่มเติมจากเดิม และได้สรุปกลไกของการเกิดขึ้นเทอร์ริงว่ามี 3 ชนิดขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมีของถ่านหิน เป็นต้นว่า ถ่านหินชนิดที่ 1 (brown coal) ซึ่งมีส่วนประกอบหลักที่มี Na, S, Cl อยู่มาก จะเกิดเทอร์ริงที่มีกลไกแบบ reactive liquid sintering เนื่องจากพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มี Na และ S ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำอยู่มาก ถ่านหินชนิดที่ 1 นี้จึงได้ให้ค่า T_{SINT} ต่ำมาก และมีปัญหา bed agglomeration ได้ง่าย เช่นเดียวกับถ่านหินชนิดที่ 2 (brown coal) ซึ่งมี SiO_2 ในปริมาณมาก ก็พบว่าผลิตภัณฑ์ที่มี K และ SiO_2 อยู่มากค่า T_{SINT} ก็พบว่าสูงกว่าถ่านหินชนิดที่ 1 อยู่เพียงเล็กน้อย ดังนั้นถ่านหินทั้งสองชนิดน่าจะมิกไกที่เกิดขึ้นการหลอมเหลวของส่วนประกอบบางส่วน ทำให้มีของเหลวและเกิดขึ้นเทอร์ริงได้ง่าย ถ้ามีการหลอมเหลวมากขึ้น ค่า T_{SINT} ก็จะต่ำและจะมีปัญหา bed agglomeration มากขึ้นด้วย สำหรับถ่านหินชนิดที่ 4 และ 5 (anthracite) ซึ่งมีปริมาณ SiO_2 อยู่สูงมาก (>50%) เนื่องจากพบว่า T_{SINT} สูงและไม่มีปัญหา bed agglomeration จึงน่าจะมิกไกแบบ viscous flow โดยเนื่องจากในสภาวะของเตาเผามีอุณหภูมิต่ำจึงไม่อาจทำให้ส่วนประกอบของถ่านหินดังกล่าวนี้ลดความหนืดลงได้ ซึ่งการเกิดขึ้นเทอร์ริงแบบนี้ได้จะต้องอาศัยอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิในเตาเผา (>900°C)

ในส่วนของสภาวะบรรยากาศก็พบว่ามิกไกการเกิดขึ้นเทอร์ริงของถ่านหินบางชนิด (brown coal) โดยทำให้ถ่านหินมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะถ่านหินชนิดที่ 3 ซึ่งมี CaO อยู่มาก พบว่าในสภาวะบรรยากาศของ SO_2 ถ่านหินมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและพบผลิตภัณฑ์ของ $CaSO_4$ ส่วนในสภาวะบรรยากาศของ CO_2 ก็เช่นเดียวกันแต่จะไม่มิกเมื่อ $T > 600^\circ C$ และได้ผลิตภัณฑ์เป็น $CaCO_3$ แทน ดังนั้น

การเกิดซินเทอริงของเถ้าถ่านหินชนิดที่ 3 นั้น่าจะมีกลไกแบบ gas-solid chemical reaction ขึ้น สำหรับ bituminous coal ไม่พบว่ากรณี SO_2 หรือ CO_2 อยู่ในสภาวะบรรยากาศจะทำให้ค่าความแข็งแรงเปลี่ยนแปลงไป

Brown, Dawson และ Smeenk ได้เสนอว่า bed agglomeration เกิดจากผลของการเกาะติดกันของเถ้าที่มีความเหนียวกับอนุภาคอื่นในเบด จากนั้นจึงเกิดซินเทอริงและปฏิกิริยาเคมีขึ้น ทำให้อนุภาคยึดเกาะกันด้วยความแข็งแรงและมีขนาดใหญ่ขึ้น จนมีผลให้เกิดสภาวะ defluidization ขึ้นได้ ปัญหาของ bed agglomeration ได้มีรายงานจาก Manzoori ซึ่งศึกษาโดยใช้เตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดขนาดเล็ก โดยใช้ถ่านหินลิกไนต์ที่มี sodium และ sulfur สูงเป็นเชื้อเพลิงพบว่ามีการส่งผ่านเถ้าเหนียวจากถ่านที่กำลังเผาไหม้ไปสู่อนุภาคอื่นในเบด ทำให้อนุภาคอื่นในเบดมีการเกาะติดกันและเกิดซินเทอริงทำให้เกิดปัญหา bed agglomeration ขึ้น Bhattacharya และคณะ และ Steenari และคณะ ก็ได้ตรวจสอบ agglomerates ที่ได้จากเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด พบว่า agglomerates ประกอบด้วยอนุภาคอื่นในเบดฝังอยู่ด้านในและถูกล้อมรอบด้วยเถ้าหลอมเหลว Linjewile และ Manzoori ได้ศึกษาบทบาทของ additives ได้แก่ dolomite, gibbsite, kaolinite and sillimanite-rich clay และ quartz-rich clay ที่มีต่อการเกาะติดของเถ้าหลอมเหลว พบว่า agglomerates เมื่อไม่ได้เติม additives นั้นมีเถ้าหลอมเหลวประกอบด้วยสาร sodium และ sulfur อยู่มากกว่าสารอื่น ส่วนการเติม additives พบว่า gibbsite และ kaolinite and sillimanite-rich clay ได้ผลดีที่สุด โดยสรุปว่าบทบาทของ additives ในการลดปัญหา bed agglomeration เป็นแบบทั้งผลของทางเคมีและทางกายภาพขึ้นกับปฏิสัมพันธ์ระหว่าง additive แต่ละชนิดกับเถ้าหลอมเหลวนั้น

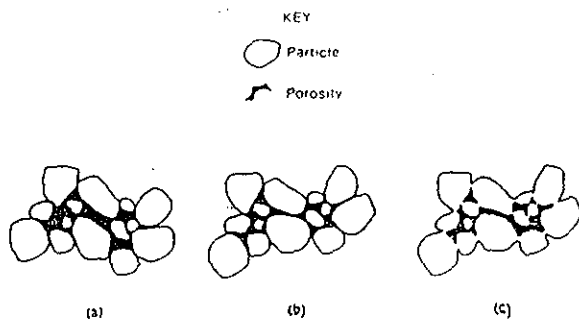
2.2 ทฤษฎีกระบวนการซินเทอริง

ซินเทอริงเป็นกระบวนการทางความร้อน (thermal process) ที่ช่วยให้เกิดการรวมตัวติดกันของอนุภาคหลาย ๆ อนุภาคที่เกาะกันอยู่อย่างหลวม ๆ ทำให้ความพรุนและปริมาตรรวมลดลง และส่งผลให้การเกาะติดกันระหว่างอนุภาคมีความแข็งแรงขึ้น จัดเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนเนื่องจากอาจมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีเกิดขึ้นไปด้วยกันได้ ขั้นตอนของกระบวนการนี้มีดังนี้

ขั้นตอนแรก เกิดการเรียงตัวของอนุภาค (rearrangement) และการเชื่อมกันเป็นลักษณะคอคอด (neck formation) ที่จุดสัมผัสกันระหว่างอนุภาค เกิดการถ่ายเทมวลสารระหว่างอนุภาคแต่ละอนุภาค ทำให้ปริมาตรรวมลดลง และความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงครั้งนี้แสดงในรูปรที่ 2.1

ขั้นตอนที่สอง ขนาดของคอคอดเพิ่มขึ้น (neck growth) ช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลง มีผลให้เกิดการหดตัวของอนุภาค เนื่องจากการเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากขึ้นของอนุภาค ซึ่งอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้ามาชิดกันนี้จะรวมกันเริ่มเกิดเป็น grain และความยาวของ grain จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้ grain มีขนาดใหญ่ขึ้น และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การลดลงของช่องว่างระหว่างอนุภาคและการหดตัวของปริมาตร (densification) โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นขั้นตอนที่สอง การเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนนี้แสดงไว้ด้งรูปที่ 2.2

ขั้นตอนที่สาม อนุภาคเคลื่อนที่เข้าชิดกันมากขึ้น ช่องว่างระหว่างอนุภาคมีขนาดเล็กลง และหมดไปในที่สุด ทำให้ขนาดหรือปริมาตรรวมลดลง และความแข็งแรงเพิ่มมากกว่าเดิม ดังรูปที่ 2.3

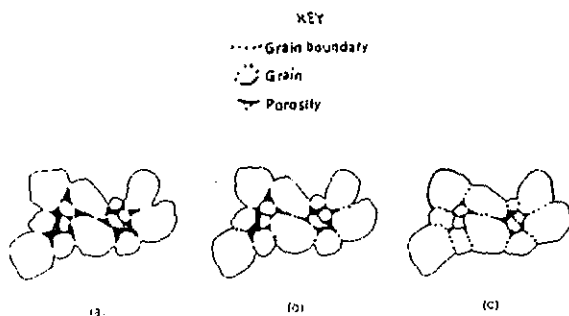


รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการซินเทอริงในขั้นตอนที่ 1

a) เริ่มต้น (Starting Particle)

b) การจัดเรียงตัวของอนุภาค (Rearrangement)

c) การเกิดคอคอค (Neck Formation)



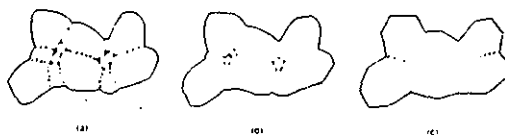
รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการซินเทอริงในขั้นตอนที่ 2

a) การโตขึ้นของคอคอดและการหดตัว

(Neck Growth and Volume Shrinkage)

b) ขอบเกรนยาวขึ้น (Lengthening of grain boundary)

c) การโตขึ้นของส่วนต่าง ๆ (Continued neck growth and grain boundary lengthening, volume shrinkage, and grain growth)



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการซินเทอริงในขั้นตอนที่ 3

- a) เกรนโตขึ้นและช่องว่างถูกแยกออก (Grain growth with discontinuous pore phase)
- b) เกรนโตขึ้น ขนาดช่องว่างก็ลดลง (Grain growth with porosity reduction)
- c) เกรนโตขึ้น ขนาดช่องว่างหมดไป (Grain growth with porosity elimination)

กระบวนการซินเทอริงแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ กระบวนการซินเทอริงแบบไม่มีของเหลว (solid state sintering) และกระบวนการซินเทอริงแบบที่มีของเหลว (liquid state sintering)

2.2.1 กระบวนการซินเทอริงแบบไม่มีของเหลว

ความแตกต่างกันของพลังงานอิสระ (Free energy) ระหว่างผิวหน้าของอนุภาคกับพื้นที่บริเวณคอคอคอดจะเป็นแรงขับเคลื่อน ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารขึ้น โดยมวลสารจะถ่ายเทจากผิวหน้าของอนุภาคไปยังคอคอคอด ทำให้นำไปสู่การรวมกลุ่มอนุภาค การถ่ายเทมวลสารที่ผิวหน้านี้จะยังไม่ทำให้เกิดการหดตัวของระบบรวมหรือการลดลงของความพรุนยังไม่เกิดขึ้น การถ่ายเทมวลสารที่ผิวหน้านี้เป็นขั้นตอนแรกที่สำคัญในการซินเทอริงแบบไม่มีของเหลวเกิดขึ้น ขั้นตอนต่อมาเป็นการถ่ายเทมวลสารของปริมาตรและการถ่ายเทมวลสารของ grain การถ่ายเทมวลสารรวมทั้งหมดนี้จะเป็นผลทำให้เกิดการลดลงของความพรุน และให้ความแข็งของอนุภาครวมเพิ่มขึ้น กระบวนการซินเทอริงจะทำให้พลังงานของผิวหน้าของอนุภาคลดลง รูปที่ 2.4 แสดงการถ่ายเทมวลสารระหว่างอนุภาคที่เกิดซินเทอริง

2.2.2 กระบวนการซินเทอริงแบบที่มีของเหลว

แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ซึ่งมีกลไกการเกิดในขั้นตอนแรกเหมือนกันแต่ต่างกันไปในขั้นตอนต่อมา ขั้นตอนแรกของเหลวนอนอนุภาคแต่ละอนุภาคจะเป็นตัวเชื่อมให้อนุภาคแต่ละอนุภาคติดกันหรือเชื่อมต่อกันทำให้เกิดการเกาะติดกัน ในการจัดตัวของอนุภาคที่เกาะติดกันส่งผลให้ความพรุนลดลงเนื่องมาจากการเกาะตัวกันในลักษณะที่แน่นขึ้นเรื่อย ๆ ถ้าของเหลวที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้มีปริมาณมาก จะเป็นผลให้อนุภาคทั้งหมดที่เกาะตัวกันถูกของเหลวเข้าไปแทนที่ ให้ความพรุนของระบบลดลง รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการซินเทอริงแบบมีของเหลว

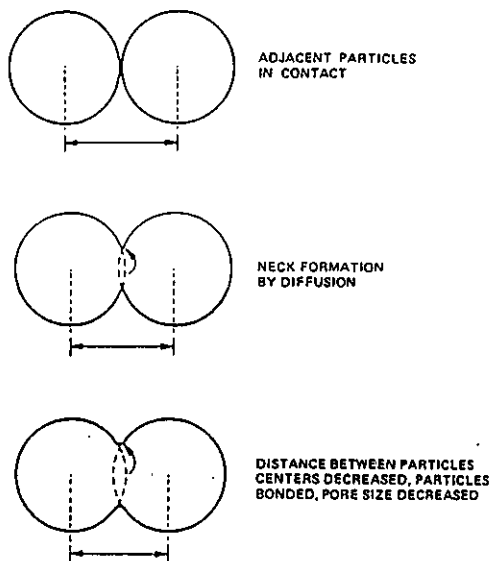
ก. กระบวนการซินเทอริงแบบที่มี Reactive liquid phase เกิดขึ้น

ของแข็งบางส่วนจะละลายลงในของเหลว การเกิดซินเทอริงจะเป็นไปอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง จากขั้นตอนแรกที่มีการถ่ายเทมวลสารจากอนุภาคสู้อนุภาคโดยการแพร่ผ่านของเหลว การถ่ายเทมวลสารแบบนี้คือการละลาย เมื่อมีการถ่ายเทมวลสารได้อย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดการหดตัวของอนุภาครวม เนื่องจากความพรุนลดลง และการละลายของแข็งในของเหลวนี้ จะทำให้อนุภาคที่เกาะติดกันนั้นรวมตัวเป็นก้อนเดียวกัน การเกิดซินเทอริงในขั้นตอนนี้เกิดได้อย่างรวดเร็ว

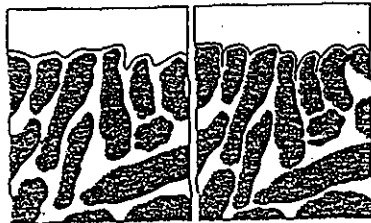
ข. กระบวนการซินเทอริงแบบ Non-reactive liquid phase

แบบนี้จะมีการละลายของของแข็งลงในของเหลวน้อยมาก โดยมีขั้นตอนแรกเหมือนกันกล่าวมาแล้ว และขั้นตอนต่อจากนั้นเหมือนกันกับขั้นตอนการเกิดซินเทอริงแบบไม่มีของเหลวเกิดขึ้น อัตราการเกิดซินเทอริงจะช้ากว่าแบบ reactive liquid phase แต่เร็วกว่าอัตราการเกิดซินเทอริงแบบที่ไม่มีของเหลวเกิดขึ้น

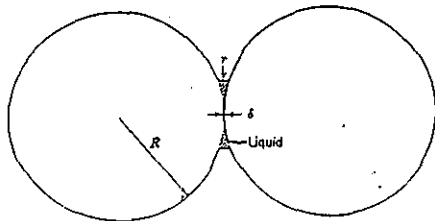
การเกิดซินเทอริงแบบที่มีของเหลวเกิดขึ้นมักเกิดกับสารผสมซึ่งมีหลายองค์ประกอบรวมกันและมีจุดหลอมเหลวแตกต่างกัน โดยสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำจะเป็นตัวเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการซินเทอริง



รูปที่ 2.4 การถ่ายเทมวลสารระหว่างอนุภาคที่เกิดซินเทอริง



(a)



(b)



รูปที่ 2.5 การเกิดซินเทอร์ริงแบบมีของเหลว

แบบที่มีของเหลวเกิดขึ้นอาจมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นร่วมด้วยทำให้การอธิบายถึงกลไกการเกิดซินเทอร์ริงของสารที่มีหลายองค์ประกอบมีความสลับซับซ้อนเนื่องมาจากปริมาณของเหลวที่เกิดขึ้น องค์ประกอบของของเหลว ความหนืดของของเหลว ซึ่งจะขึ้นกับอุณหภูมิและองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคที่รวมตัวกันอยู่ด้วย

ปัจจัยที่ส่งผลให้กระบวนการซินเทอร์ริงเกิดได้เร็วขึ้น มีดังนี้

1. อุณหภูมิ ช่วยเพิ่มอัตราเร็วของการถ่ายเทมวลทำให้เกิดความหนาแน่นสูงขึ้น
2. บรรยากาศ แก๊สบางชนิดช่วยเพิ่มอัตราเร็วของการถ่ายเทมวลได้
3. สารประกอบที่กลายเป็นของเหลว ณ อุณหภูมิของซินเทอร์ริง ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค เพิ่มแรงดึงดูดแบบ capillary forces ซึ่งทำให้อนุภาคมาเรียงตัวใหม่ให้สัมผัสกันได้มากขึ้น และมีอัตราเร็วในการถ่ายเทมวลสารได้เร็วมาก
4. ขนาดของอนุภาค แรงขับเคลื่อนสำหรับการเกิด densification คือ การลดพื้นที่ผิวลง ดังนั้นในอนุภาคขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวมากจะยังมีแรงขับเคลื่อนสูงมาก อัตราเร็วการถ่ายเทมวลสารจะเร็วมาก
5. ปฏิกิริยาเคมีซึ่งทำให้เกิดสารใหม่ขึ้น ณ อุณหภูมิที่เกิดซินเทอร์ริง มีผล 2 อย่าง ถ้าสารใหม่ที่เกิดขึ้นมีจุดหลอมเหลวต่ำลง จะช่วยให้เกิดซินเทอร์ริงได้ดี (คล้ายข้อ 3) แต่ถ้าสารใหม่ที่เกิดขึ้นมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าเดิม จะส่งผลให้เกิดซินเทอร์ริงช้ากว่าเดิมได้

2.2.3 สมบัติทางเคมีของแก้วของถ่านหินที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นเตาจริง

แก้วของถ่านหินประกอบด้วยส่วนที่เป็นสารแก้ว (glass material) และสารผลึก (crystalline material) สารประกอบทางเคมีของถ่านหินที่สำคัญได้แก่ ดินเหนียว (clays) ควอตซ์ (quartz) เหล็ก อัดคาไลน์ และอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 เป็นตัวที่ก่อให้เกิดสารแก้วและสารผลึกในแก้ว สมบัติของสารเหล่านี้ขึ้นกับ fluxing elements เช่น โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม และ เหล็ก อุณหภูมิและเวลาในหีบเผาไหม้ บรรยากาศที่มีออกซิเจน (oxidizing atmosphere) สภาวะรีดิวซิง (reducing atmosphere) และอัตราการเย็นตัวของแก้วถ่านหิน

สารแก้ว เป็นสารที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ มีสมบัติบางอย่างเป็น isotropy คือมีค่าเท่ากันในทุกทิศทาง เช่น ค่าครรรมนิหักเห และค่าการนำไฟฟ้า เนื่องจากมีการจัดตัวไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคจะมีความแข็งแรงแตกต่างกันไปในแต่ละส่วนของโมเลกุล เป็นผลทำให้มีค่าจุดหลอมเหลวที่ไม่ชัดเจน เพราะแต่ละส่วนของโมเลกุลจะหลอมเหลวที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ กัน

ควอตซ์ (SiO_2) ตามปกติจะมีโครงสร้างในสามมิติเป็นระเบียบเป็นสารผลึกดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 (ก) แต่ถ้าเอาควอตซ์มาหลอมเหลวที่ 1600°C จะได้ของเหลวที่มีความซับซ้อนและถึงแม้ว่าโครงสร้างร่างแหของพันธะ Si-O ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ แต่หลายพันธะจะถูกทำลายไป ความเป็นระเบียบในโครงสร้างจะลดลงไปด้านอากาศที่หลอมเหลวมาทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว อะตอมจะไม่สามารถจัดตัวให้เป็นระเบียบได้ทันทีจะได้สารแก้วของควอตซ์ (quartz glass or silicate glass) หรือ amorphous silica ที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 (ข)

ดินเหนียว เช่น kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นสารผลึก เมื่อถูกทำให้หลอมเหลวและเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะเกิดเป็นสารแก้วของอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate glass) ที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบเช่นกัน

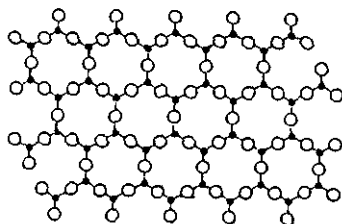
ในถ่านหินซึ่งมีทั้งสารแก้วของควอตซ์และสารแก้วของอลูมิโนซิลิเกตนั้น จะมีไอออนอื่นๆ เช่น Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Fe^{+2} , Fe^{+3} อยู่ด้วย ไอออนเหล่านี้จะประพฤติตัวเป็นตัวย่อยโครงสร้าง (network modifiers) ได้โดยจะเข้าไปในโครงสร้างของสารแก้วของควอตซ์หรือสารแก้วของอลูมิโนซิลิเกต แล้วทำลายพันธะของสารแก้วทำให้โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบของสารแก้วกลายเป็นสารที่มีโครงสร้างไร้ระเบียบยิ่งขึ้น (ดังรูปที่ 2.7) ทำให้ได้สารแก้วอีกชนิดหนึ่งที่มีจุดหลอมเหลวต่ำลงอีก ตัวอย่างสารแก้วควอตซ์ที่มีตัวทำลายโครงสร้างเป็น Na^+ เรียกว่า sodium silicate glass

สำหรับไอออนของเหล็กซึ่งสามารถเปลี่ยนเลขออกซิเดชันระหว่าง +2 และ +3 ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเจนในบรรยากาศ ในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน Fe^{+2} จะทำหน้าที่เป็นตัวทำลายโครงสร้างได้ดี ทำให้สารแก้วมีจุดหลอมเหลวต่ำลง ส่วนในสภาวะที่มีออกซิเจน Fe^{+3} มักจะรวมกับออกซิเจนเป็นเหล็กออกไซด์ (จุดหลอมเหลวประมาณ 1600°C) จึงไม่อยู่ในรูปไอออนที่จะทำหน้าที่ดังกล่าวได้

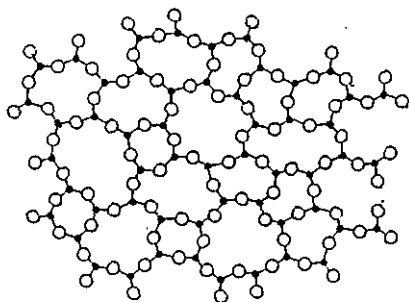
ในการเผาไหม้ถ่านหินสารเคมีต่าง ๆ ในถ่านหินจะถูกทำให้ร้อนมากแล้วสลายตัวและเมื่อเย็นตัวลงจะกลายเป็นเถ้า ดังนั้นถ่านหินจึงประกอบด้วยสารแก้วต่าง ๆ และสารผลึกต่าง ๆ ปนอยู่ในปริมาณที่

ตารางที่ 2.1 สารอนินทรีย์เคมีต่าง ๆ ในถ่านหิน

สารเคมี	สูตรเคมี	จุดหลอมเหลว °C
Clay minerals		
kaolinite	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	เมื่อกลายเป็น mullite, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ (1810)
muskovite	$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	
illite	$(Fe, Ca, K)_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	
montmorillonite	$(1-X)Al_2O_3 \cdot X(MgO, Na_2O) \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$	
Oxide minerals		
quartz	SiO_2	1710
hematite	Fe_2O_3	1567
magnetite	Fe_3O_4	1592
rutile	TiO_2	1827
Carbonate minerals		
calcite	$CaCO_3$	927
dolomite	$CaCO_3 \cdot MgCO_3$	777
enkerite	$CaCO_3 \cdot FeCO_3$	727
siderite	$FeCO_3$	527
Sulfide minerals		
pyrite, marcasite	FeS_2	1027, 1567
chalcopyrite	$CuFeS$	1027
galena	PbS	1097
Sulfate minerals		
berylite	$BaSO_4$	1582
gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	1452
kieserite	$MgSO_4 \cdot H_2O$	1122
thenardite	Na_2SO_4	884
melantelite	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	482
Chloride minerals		
halite	$NaCl$	800
sylvite	KCl	770
Phosphate mineral		
apatite	$Ca_3F(PO)_4$	1227

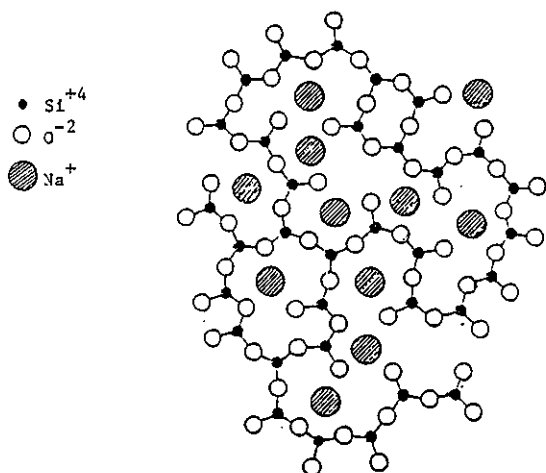


(ก)



(ข)

รูปที่ 2.6 ก) ลักษณะโครงสร้างของสารผลึก ข) โครงสร้างของสารแก้วแบบ random-network



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ sodium silicate glass ที่เกิดจากการเข้าทำลายโครงสร้างของสารผลึกโดย Na^{+}

แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของอนุภาคแก้วและองค์ประกอบทางเคมีของด้านหิน การทราบ ปริมาณและชนิดของสารแก้วและสารผลึกตลอดจนการกระจายตัวของสารเหล่านี้ในแก้วด้านหินจะทำให้ เข้าใจถึงพฤติกรรมการเกิดซินเทอริงของแก้วด้านหิน ซึ่งเกี่ยวข้องไปหาปัญหา bed agglomeration ที่เกิดใน เตาเผาแบบฟลูอิคไลซ์เบดได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทำวิจัย

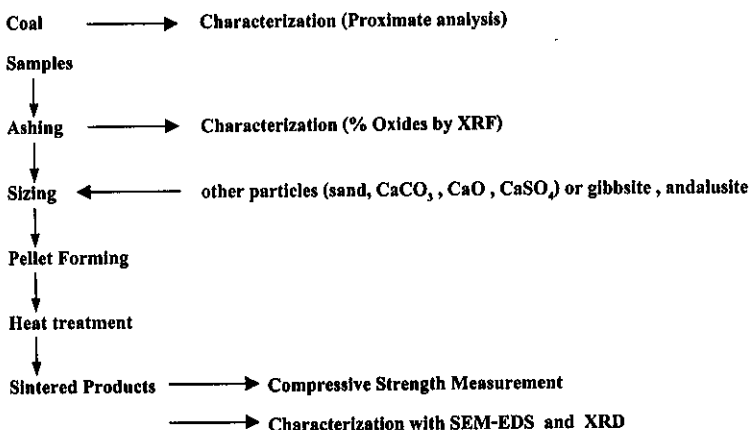
1. เครื่องบดหยาบ (Jaw crusher) แสดงไว้ในรูปที่ 3.1
2. เครื่องบดละเอียด (Ball mill) แสดงไว้ในรูปที่ 3.2
3. ชุดตะแกรงร่อนพร้อมเครื่องเขย่า (Sieves and sieve shaker) แสดงไว้ในรูปที่ 3.3
4. เตาเผา Muffle แสดงไว้ในรูปที่ 3.4
5. เตาเผาแบบท่อ (Tube furnace) พร้อมชุดเทอร์โมคัปเปิ้ลสำหรับวัดอุณหภูมิ แสดงไว้ในรูปที่ 3.5
6. ชุดอัดเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง X ความสูง เท่ากับ 0.5 X 0.5 เซนติเมตร แสดงไว้ในรูปที่ 3.6
7. เครื่องวัดความแข็งแบบกรุ่น Wykeham Farrance English แสดงไว้ในรูปที่ 3.7
8. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พร้อมระบบ Energy Dispersive X-ray detector (EDX)
9. เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer* (XRF)
10. เครื่อง X-ray Diffractometer* (XRD)

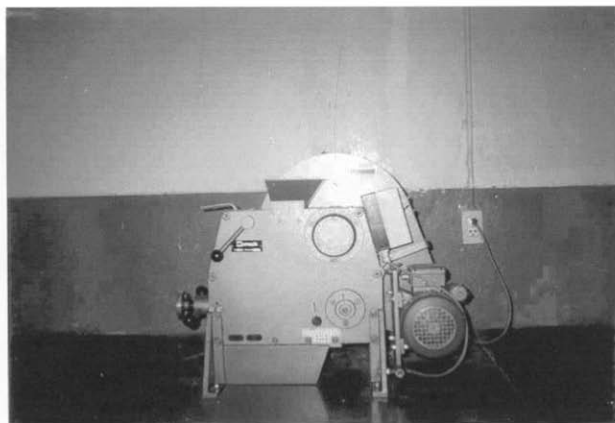
* เครื่องมือวิเคราะห์ลำดับที่ 9 ใช้บริการของ หน่วยวิเคราะห์ สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

เครื่องมือวิเคราะห์ลำดับที่ 10 ใช้บริการของสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 วิธีทดลอง

วิธีทดลองได้ทำเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ตามแผนผังนี้





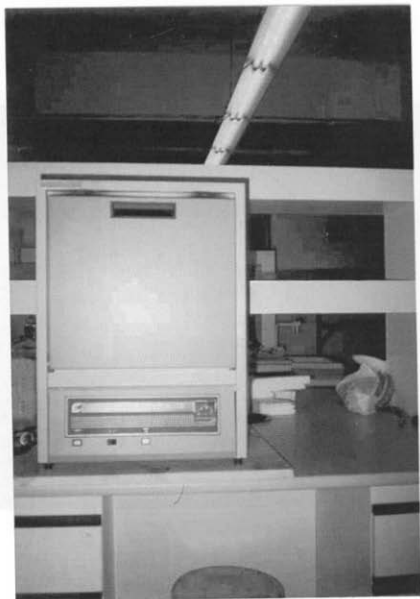
รูปที่ 3.1 เครื่องบดหยาบ (Jaw Crusher)



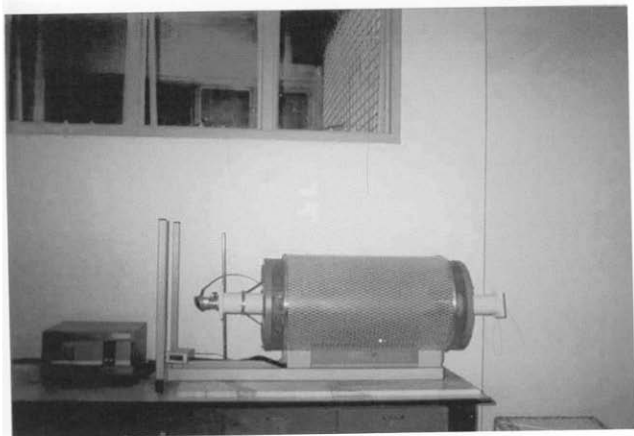
รูปที่ 3.2 เครื่องบดละเอียด (Ball Mill)



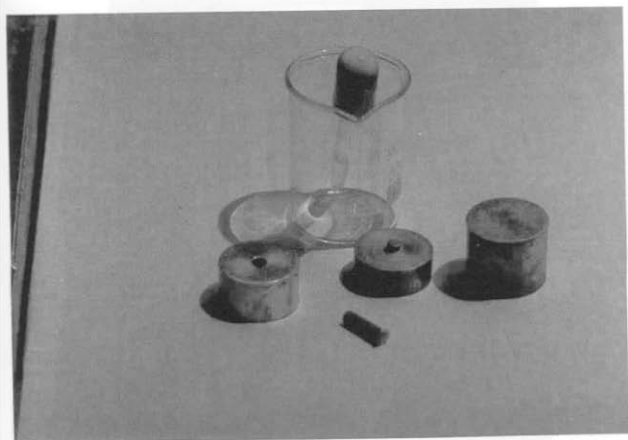
รูปที่ 3.3 ชุดตะแกรงร่อนพร้อมเครื่องเขย่า
(Sieves and Sieve shaker)



รูปที่ 3.4 เตาเผา Muffle

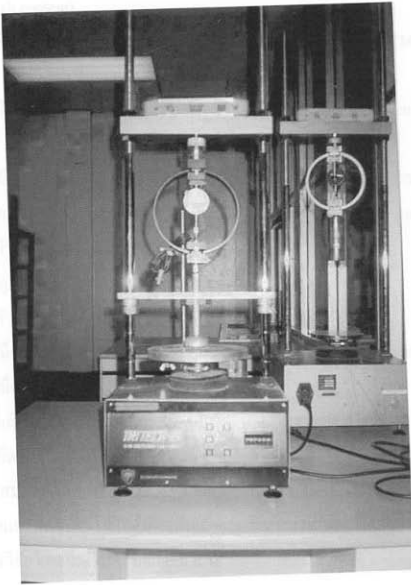


รูปที่ 3.5 เตาเผาแบบท่อ (Tube Furnace)



รูปที่ 3.6 ชุดอัดเม็ด (die)

รูปที่ 3.7 เครื่องอัดเม็ดแบบโรตารี
(Rotary Compression Tablet Press)



ภาพ

รูปที่ 3.7 เครื่องวัดความทนแรงอัด
(Compressive Strength Tester)

เครื่องวัดความทนแรงอัด (Compressive Strength Tester) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดความทนแรงอัดของวัสดุ โดยทั่วไปแล้วเครื่องวัดความทนแรงอัดจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ๆ ดังนี้

3.2.1 รายละเอียดขั้นตอนต่าง ๆ

1. จัดหาถ่านหิน 4 แหล่ง ได้มาจากแหล่งแม่เมาะ , บ้านปู้ , เชียงม่วน และ ลานนา โดยความอนุเคราะห์จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
2. วิเคราะห์คุณสมบัติถ่านหินทั้ง 4 แหล่ง โดยการวิเคราะห์แบบ proximate (% moisture % volatile matter, fixed carbon, % ash content)
3. เตรียมถ่านหินในห้องปฏิบัติการ โดยการเผาถ่านหินตามวิธีมาตรฐาน ASTM (ตามรายละเอียดหัวข้อการเตรียมถ่าน)
4. วิเคราะห์ถ่านหินที่เตรียมได้โดยวิธีวิเคราะห์ทาง X-ray Fluorescence Spectrometer (รายงานเป็น % oxide)
5. บดและคัดขนาดถ่านให้ได้ช่วงขนาดใกล้เคียงกับที่พบในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด
6. ทำเม็ดถ่านเป็นรูปทรงกระบอกด้วยแม่แบบ (die) ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 cm. และความสูง 0.5 cm. (ตามรายละเอียดหัวข้อการทำเม็ดถ่าน)
7. เผาเม็ดถ่านที่อุณหภูมิ 800-1050 °C ในบรรยากาศ อากาศ, 50%CO₂ + 50%N₂ , 100%CO₂ และ 100%N₂ (ตามรายละเอียดหัวข้อการเผาเม็ดถ่าน)
8. วัดความแข็งของเม็ดถ่านที่เกิดซินเทอริงแล้วด้วยเครื่องมือวัดความทนแรงอัด (ตามรายละเอียดหัวข้อการวัดความแข็งของเม็ดถ่าน)
9. วิเคราะห์เม็ดถ่านที่เกิดซินเทอริงแล้วด้วย SEM-EDS และ XRD เพื่อวิเคราะห์รูปลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเม็ดถ่าน
10. ในกรณีของการผสมอนุภาค CaO , CaCO₃ , CaSO₄ , ทราบ, amorphous silica และ additives ก็จะมีการเตรียม โดยการบดและคัดขนาดให้ใกล้เคียงกับถ่านหินและผสมลงในถ่านหินก่อนจะทำเป็นเม็ดถ่านแล้วดำเนินการวิจัยวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกัน

3.2.2 การเตรียมถ่าน ASTM

ตามวิธี ASTM (American Society for Testing and Materials)

1. นำถ่านหินมาบดด้วยเครื่องบดหยาบ (Jaw crusher)
2. นำถ่านหินที่บดได้จากเครื่องบดหยาบ ทำการบดละเอียดลงในเครื่องบดละเอียดแบบ Ball mill
3. คัดขนาดของถ่านหินโดยใช้เครื่องเขย่าตะแกรง (sieve shaker) ซึ่งร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 60 (250 ไมครอน) โดยปรับ amplitude ไปที่ 60 Hz. และใช้เวลาในการร่อนนาน 10 นาที
4. ในการเตรียมถ่าน ASTM นำถ่านหินที่คัดขนาดแล้ว ไปเผาในเตา MuMie ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการเผาข้างบนกระทั่งน้ำหนักคงที่ รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของถ่านที่เตรียมได้



รูปที่ 3.8 ลักษณะแก้ว ASTM ทั้ง 4 ชนิดที่เตรียมได้

3.2.3 การเตรียมเม็ดแก้ว

ชั่งน้ำหนักแก้ว 0.12 กรัม ผสมน้ำกลั่น 1-2 หยด แล้วคกลงในแม่แบบ(die)รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร จะได้เม็ดแก้วที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 1200 กก/ม³ ลักษณะของเม็ดแก้วแสดงดังรูปที่ 3.9

3.2.4 การเตรียม CaO

นำ CaCO_3 มาเผาในเตา Muffle ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักของ CaO ที่ได้จากนั้นนำมาเผาอีก 1 ชั่วโมง หากน้ำหนักยังไม่คงที่ ทำการเผาซ้ำจนน้ำหนักคงที่ เก็บ CaO ในโถดูดความชื้น (dessicator)

3.2.5 การเตรียมเม็ดแก้ว ASTM ผสมกับ ทราช , CaCO_3 , CaO , CaSO_4 , amorphous silica , andalusite หรือ gibbsite ในปริมาณ 15% โดยน้ำหนักของเม็ดแก้ว

เตรียมเม็ดแก้วครั้งละ 30 เม็ด โดยการชั่งอนุภาค ทราช , CaCO_3 , CaO , CaSO_4 , andalusite หรือ gibbsite นึก 0.54 กรัม ผสมกับแก้ว ASTM นึก 3.06 กรัม ผสมกันให้ทั่วถึง แล้วทำเม็ดแก้วตามรายละเอียดการเตรียมเม็ดแก้ว

3.2.6 การเผาเม็ดแก้วเพื่อให้เกิดซินเทอริง

- นำเม็ดแก้วแต่ละชนิดจำนวน 8 เม็ด วางบน ceramic boat ไว้ในตำแหน่งกึ่งกลางของเตาเผาแบบท่อ และเผาเม็ดแก้วให้ร้อนขึ้นในอัตรา 35 องศาเซลเซียสต่อนาที ในอากาศหรือบรรยากาศที่ต้องการศึกษา จากนั้นควมคุมไว้ที่อุณหภูมิที่ต้องการเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เม็ดแก้วเย็นตัวในเตา
- ทำการทดลองโดยเผาที่อุณหภูมิ 800, 900, 950, 1000, 1050°C ตามลำดับ

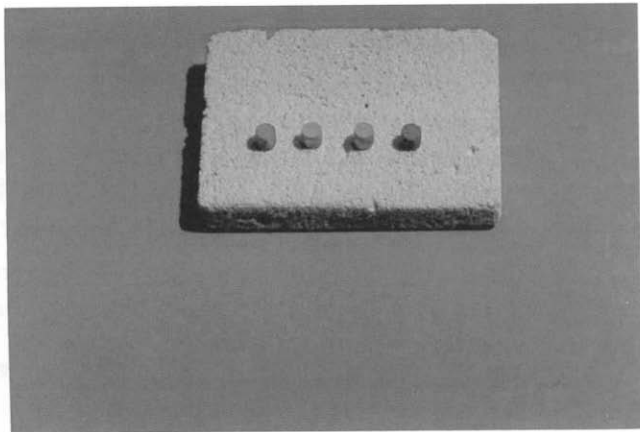
3.2.7 การวัดความแข็งของเม็ดแก้ว

วัดขนาดของเม็ดแก้วที่ผ่านการเผาและเย็นตัวแล้วเพื่อศึกษาแนวโน้มการหดตัวของเม็ดแก้วที่แต่ละอุณหภูมิ และนำเม็ดแก้วจำนวน 6 เม็ด ไปวัดค่าความทนแรงอัดโดยใช้อัตราการเคลื่อนที่ของแรงกดที่ค่า 1.27 มิลลิเมตรต่อนาที พร้อมกับเฉลี่ยค่าความแข็งที่วัดได้ เม็ดแก้วที่เหลือนำไปวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมีต่อไป

รูปที่ 4

ผลการทดสอบแรงอัดของคอนกรีต

รูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เม็ดเต๋าที่ทำจากชุดอัดเม็ด

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 คุณสมบัติของแก้วที่ศึกษา

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ของถ่านหินทั้ง 4 แหล่ง ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายขนาดของแก้วทั้ง 4 ชนิด ผลจากการวัดขนาดของอนุภาคแก้ว ASTM จากถ่านหินทั้ง 4 แหล่ง พบว่าทุกแหล่งมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยขนาดของอนุภาคของแก้วแม่เมาะ, แก้วบ้านปู, แก้วเชียงม่วน และแก้วลานนา เป็น $54.2 \mu\text{m}$, $46.5 \mu\text{m}$, $61.5 \mu\text{m}$ และ $51.5 \mu\text{m}$ ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ในแก้ว ASTM จากถ่านหินทั้ง 4 แหล่ง ด้วยเครื่องมือ X-ray Fluorescence (XRF) โดยรายงานเป็น % oxide ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 พบว่าแก้วบ้านปูและแก้วเชียงม่วนมีปริมาณสารพวก Acidic oxides (Al_2O_3 , SiO_2) มากกว่าแก้วแม่เมาะและแก้วลานนา ซึ่งแก้วทั้งสองนี้มีปริมาณสารพวก Basic Oxides (CaO , Na_2O) และ SO_3 สูงกว่าแก้วบ้านปูและแก้วเชียงม่วน ส่วนสารประกอบในแก้วซึ่งถูกวิเคราะห์ด้วย เครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่าให้ผลเป็นไปในทำนองเดียวกันกับที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF กล่าวคือพบว่าแก้วบ้านปูและแก้วเชียงม่วนมีสารประกอบหลักเป็น quartz (SiO_2) และสารประกอบรองเป็น anhydrite (CaSO_4) และ hematite (Fe_2O_3) ส่วนแก้วแม่เมาะและแก้วลานนามีสารประกอบหลักเป็น anhydrite มีสารประกอบรองเป็น quartz และ hematite

4.2 ผลของการขึ้นเตอริงแก้วถ่านหินในอากาศ

ผลจากการทดลองในช่วงอุณหภูมิปฏิบัติการของเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด ($<1000^\circ\text{C}$) พบว่าพฤติกรรมของแก้วทั้ง 4 แหล่ง ซึ่งได้ใช้ค่าความแข็งของเม็ดแก้ว (ค่าความทนแรงอัด) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิเป็นตัวชี้วัดระดับอัตราการเกิดจินเทอริง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 นั้นเป็นดังนี้ แก้วแม่เมาะ, แก้วเชียงม่วน และแก้วบ้านปูมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนแก้วลานนาซึ่งมีค่าความแข็งต่ำสุดนั้นพบว่ามีความแข็งที่ไม่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยสรุปเรียงลำดับค่าความแข็งในช่วงอุณหภูมิ $<1000^\circ\text{C}$ ได้ดังนี้

แก้วแม่เมาะ > แก้วเชียงม่วน > แก้วบ้านปู > แก้วลานนา

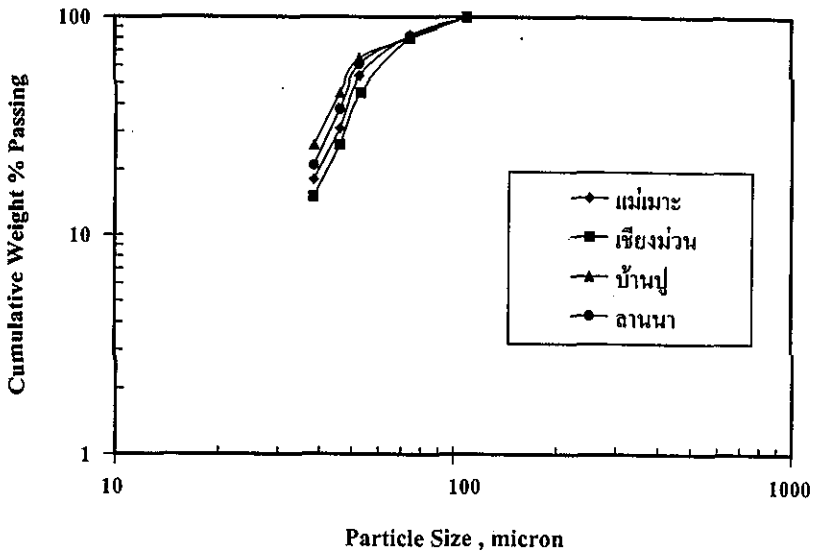
ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้จุดซินเทอริง (sinter point, T_{SINT}) คืออุณหภูมิที่เม็ดแก้วเริ่มมีความแข็งที่สามารถวัดค่าได้ จุดซินเทอริงนี้สามารถหาได้จากรูปที่ 4.2 โดยการลากเส้นตรงต่อจากเส้นกราฟค่าความแข็งไปถึงจุดที่ค่าความแข็งเป็นศูนย์บนแกนของอุณหภูมิ ซึ่งพบว่าจุดซินเทอริงของแก้วแม่เมาะ, แก้วเชียงม่วน และแก้วบ้านปู มีค่า 650°C , 750°C , 770°C ตามลำดับ ส่วนแก้วลานนาไม่สามารถระบุค่าจุดซินเทอริงได้ เนื่องจากลากมายังจุดที่ค่าความแข็งเป็นศูนย์บนแกนอุณหภูมิไม่ได้ อย่างไรก็ตามการที่แก้วลานนามีค่าความแข็งต่ำมากและไม่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมินั้นทำให้สามารถกล่าวได้ว่าแก้วลานนามีจุดซินเทอริงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแก้วอื่นในการทดลองนี้ และทำให้สรุปได้ว่า สำหรับแก้วทั้ง 4 ชนิดในการทดลองนี้มีความ

ตาราง 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของถ่านหิน

% (dry basis)	Maemoh	Banpu	Chiengmuan	Lanna
Volatile matter	48.2	34.3	42.1	34.0
Ash	30.1	35.6	30.2	36.1
Fixed Carbon	21.7	30.1	27.7	29.9

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ในถ่านหิน ASTM โดยเครื่องมือ x-ray Fluorescence Spectrometer (เป็น % oxide)

% Oxide	Maemoh	Banpu	Chiengmuan	Lanna
SiO ₂	32.9	58.8	49.2	18.0
Al ₂ O ₃	18.9	29.2	23.1	8.1
TiO ₂	0.4	0.6	0.6	0.2
Fe ₂ O ₃	11.4	4.4	7.3	13.8
MgO	2.4	1.2	2.3	4.2
CaO	15.6	1.4	7.2	23.7
MnO	0.16	0.001	0.04	0.10
K ₂ O	2.4	2.3	2.3	1.1
Na ₂ O	0.83	0.20	0.07	1.1
P ₂ O ₅	0.15	0.03	0.05	0.10
SO ₃	14.1	2.1	6.3	29.5



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของเถ้าถ่านหินทั้ง 4 ชนิด

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในถ้ำถ่านหินด้วย XRD

(ก) เถ้าแม่เมาะ

Ash condition	Major crystalline phases	Minor crystalline phases
Unheated	anhydrite [CaSO ₄]	quartz [SiO ₂], hematite [Fe ₂ O ₃]
900° C	anhydrite [CaSO ₄]	quartz [SiO ₂], hematite [Fe ₂ O ₃], amorphous phase
1050° C	anorthite [CaAl ₂ Si ₂ O ₈]	diopside [CaMg (SiO ₃) ₂], hematite [Fe ₂ O ₃], cristobalite [SiO ₂], trunscottite [Ca ₂ Si ₄ O ₉], quartz [SiO ₂], amorphous phase

(ข) เถ้าเชียงม่วน

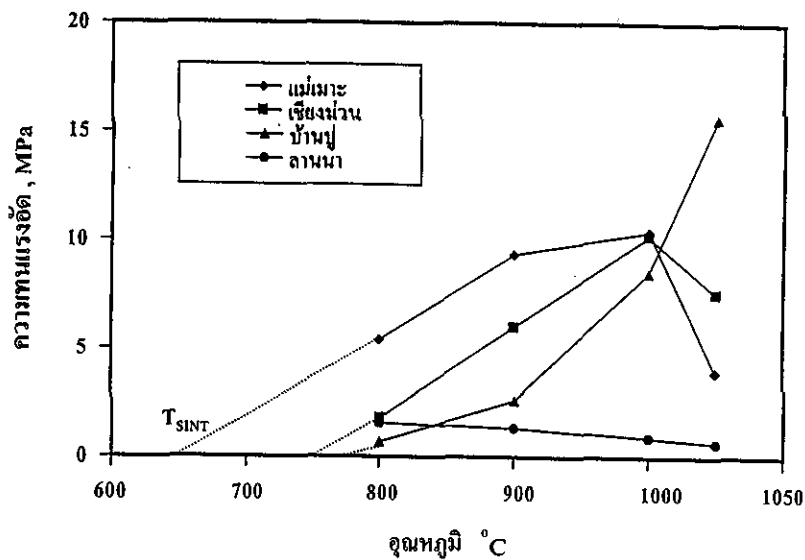
Ash condition	Major crystalline phases	Minor crystalline phases
Unheated	quartz [SiO ₂]	anhydrite [CaSO ₄], hematite [Fe ₂ O ₃]
900° C	quartz [SiO ₂]	anhydrite [CaSO ₄], hematite [Fe ₂ O ₃]
1050° C	quartz [SiO ₂]	anhydrite [CaSO ₄], albite [NaAlSi ₃ O ₈], hematite [Fe ₂ O ₃], amorphous phase

(ค) เถ้าบ้านบุ

Ash condition	Major crystalline phases	Minor crystalline phases
Unheated	quartz [SiO ₂]	anhydrite [CaSO ₄], hematite [Fe ₂ O ₃]
900° C	quartz [SiO ₂]	anhydrite [CaSO ₄], hematite [Fe ₂ O ₃]
1050° C	quartz [SiO ₂]	mullite [Al ₆ Si ₂ O ₁₃], hematite [Fe ₂ O ₃], amorphous phase

(ง) เถ้าลานนา

Ash condition	Major crystalline phases	Minor crystalline phases
Unheated	anhydrite [CaSO ₄]	quartz [SiO ₂], hematite [Fe ₂ O ₃], diopside [Ca,Mg (SiO ₃) ₂]
900° C	anhydrite [CaSO ₄]	quartz [SiO ₂], hematite [Fe ₂ O ₃], diopside [Ca,Mg (SiO ₃) ₂]
1050° C	anhydrite [CaSO ₄]	quartz [SiO ₂], hematite [Fe ₂ O ₃], diopside [Ca,Mg (SiO ₃) ₂]



รูปที่ 4.2 ความทนแรงอัดของเต้าถ่านหินที่เกิดซินเทอริงในสภาวะอากาศ

สัมพันธ์ผกผันระหว่างจุดซินเทอร์และค่าความแข็งของเถ้า ดังนั้นจุดซินเทอร์อาจใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงแนวโน้มของพฤติกรรมการเกิดซินเทอร์ริงได้เช่นเดียวกับค่าความแข็งของเถ้า

นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของเถ้ากับปริมาณของ clays (ดูจากปริมาณ % Al_2O_3) และปริมาณ anhydrite (ดูจาก % CaO และ % SO_3) ที่มีอยู่ในเถ้าซึ่งสามารถอธิบายตามตารางที่ 4.4 ได้ดังนี้ เถ้าแม่เมาะซึ่งมีค่าความแข็งสูงสุด มี clays 18.9% และ anhydrite 29.7% สูงใกล้เคียงกันทั้งคู่ ส่งผลให้เกิดสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง clays ที่มีโครงสร้างไม่เสถียรกับ anhydrite ส่วนเถ้าเชียงม่วนที่มีค่าความแข็งต่ำกว่าเถ้าแม่เมาะมี clays สูงกว่า (23.1%) แต่มี anhydrite ต่ำกว่า (13.5%) สำหรับเถ้าบ้านปูซึ่งมี clays สูงสุด (29.2%) แต่มี anhydrite ต่ำสุด (3.5%) และเถ้าลานนาซึ่งมี clays ต่ำสุด (8.1%) แต่มี anhydrite สูงสุด (53.2%) นั้นพบว่าทั้งเถ้าบ้านปูและเถ้าลานนาคงก็มีค่าความแข็งต่ำกว่าเถ้าอื่นที่อุณหภูมิต่ำกว่า $900^{\circ}C$ จากข้อสังเกตนี้ทำให้สรุปได้ว่า ค่าความแข็งของเถ้าจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับปริมาณ clays และ anhydrite โดยอัตราส่วนของ clays ต่อ anhydrite ประมาณ 1 นั่นคือ เถ้าที่มีปริมาณ clays กับ anhydrite ใกล้เคียงกันจะทำให้ค่าความแข็งสูงสุด (ดูรูปที่ 4.3) ผลจาก XRD ที่อุณหภูมิช่วงนี้ ($<1000^{\circ}C$) พบว่ามีสารประกอบเหมือนกับสภาวะก่อนเผาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 (ก)

สำหรับผลการซินเทอร์ริงของเถ้าในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น ($1000-1050^{\circ}C$) ดังแสดงในรูป 4.2 นั้นพบว่าค่าความแข็งของเถ้าเรียงลำดับเป็นดังนี้

เถ้าบ้านปู > เถ้าเชียงม่วน > เถ้าแม่เมาะ > เถ้าลานนา

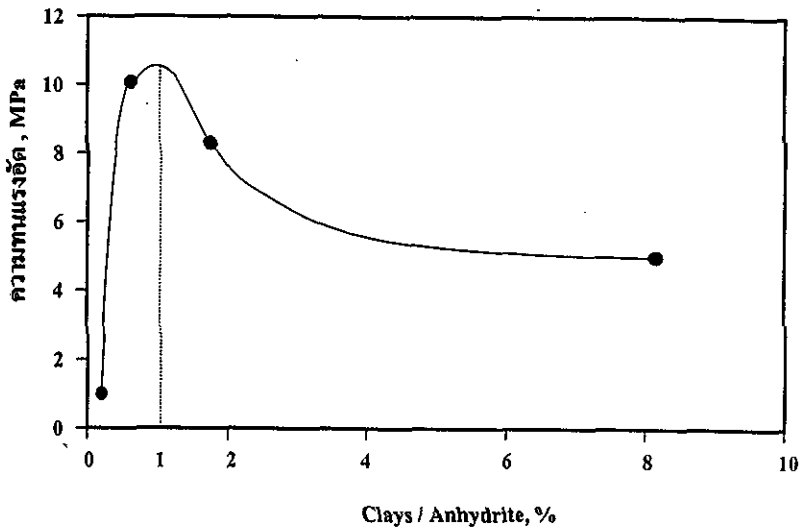
แนวโน้มดังกล่าวพบว่าเป็นไปตามปริมาณของ clays ที่มีอยู่ในเถ้า นั่นคือเถ้าบ้านปูที่มีปริมาณ clays (% Al_2O_3) สูงสุดมีค่าความแข็งมากที่สุด ดังนั้นปริมาณของ clays จึงมีความสำคัญต่อพฤติกรรม ซินเทอร์ริงของเถ้าในช่วงอุณหภูมิสูงนี้ นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงนี้ปฏิกิริยาเคมีระหว่างส่วนประกอบของเถ้าได้เกิดขึ้นร่วมกับกระบวนการซินเทอร์ริงด้วย ซึ่งส่งผลให้เถ้ามีค่าความแข็งสูงขึ้นหรือต่ำกว่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ ($<1000^{\circ}C$) ผลการวิเคราะห์เม็ดเถ้าด้วย XRD สำหรับเถ้าแม่เมาะในตารางที่ 4.3 (ก) พบว่าเม็ดเถ้าเผาที่ $1050^{\circ}C$ ไม่ปรากฏว่ามี anhydrite เหลืออยู่ แต่มีสารผลึกใหม่เกิดขึ้นคือ anorthite ($CaAl_2Si_2O_8$) นั่นคือที่อุณหภูมิสูงนี้สารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่เกิดขึ้นถูกกำจัดออกไปโดยไปเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นสารผลึกใหม่ สารผลึกใหม่ (anorthite) ที่เกิดใหม่นี้มีจุดหลอมเหลวสูงจึงทำให้เถ้าแม่เมาะเกิดซินเทอร์ริงได้ช้า และทำให้เถ้าแม่เมาะที่อุณหภูมิสูงนี้มีค่าความแข็งน้อยกว่าเถ้าแม่เมาะที่ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า

เถ้าเชียงม่วนที่อุณหภูมิสูงนี้มีพฤติกรรมซินเทอร์ริงคล้ายเถ้าแม่เมาะ (ดูรูปที่ 4.2) ยกเว้นมีการลดลงของปริมาณ anhydrite และเกิดสารผลึกชนิดใหม่เป็น albite ($NaAlSi_3O_8$) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 (ข)

สำหรับเถ้าบ้านปูพบว่า มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจนได้ค่าความแข็งสูงสุดที่ $1050^{\circ}C$ เมื่อเทียบกับเถ้าอื่น ผลจาก XRD (ตารางที่ 4.3(ค)) ไม่พบ anhydrite เหลืออยู่แต่มีสารผลึกใหม่คือ mullite ($Al_2Si_2O_7$) เกิดขึ้นซึ่งสารนี้เกิดจากการสลายตัวของ kaolinite ที่มีอยู่ในเถ้านี้ แต่ไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ส่วนการที่ไม่พบ anhydrite เหลืออยู่นั้น อาจเป็นไปได้ว่า anhydrite สามารถ

ตารางที่ 4.4 ส่วนประกอบ clays และ anhydrite ในเถ้าถ่านหิน

Ash	Clays (%Al₂O₃)	Anhydrite (% CaO+%SO₃)	Clays/Anhydrite: % ratio	Strength (MPa) at	
				950 °C	1050 °C
Banpu	29.2	3.5	8.3	5.0	16.0
Chiengmuan	23.1	13.5	1.7	8.0	7.5
Maemoh	18.9	29.7	0.64	10.0	3.5
Lanna	8.1	53.2	0.15	1.0	1.0



รูปที่ 4.3 อัตราส่วน Clays ต่อ anhydrite และค่าความแข็ง

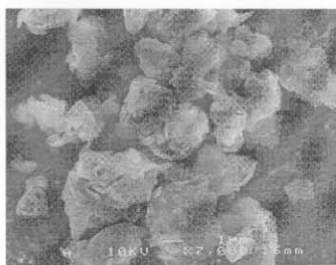
เกิดปฏิกิริยากับสารอื่น ได้เป็นสารแก้วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำในปริมาณมากขึ้นกว่าเดิม ทำให้ค่าความแข็งของแก้วสูงขึ้นตามอุณหภูมิ การลดลงหรือหายไปของ anhydrite พร้อมกับการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งของเม็ดแก้วบ้านปูในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jung และ Schobert (1991,1992) และ Benson et.al (1982) ซึ่งรายงานว่ามีปฏิกิริยาระหว่าง anhydrite กับ clays หรือ quartz เกิดเป็นสารแก้วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำทำให้เกิดซินเทอริงได้เร็วขึ้นทำให้มีค่าความแข็งสูงขึ้น โดยในงานวิจัยดังกล่าวพบว่าสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำนั้นเป็นสารที่มีโครงสร้างแบบไม่มีระเบียบประเภท calcium-rich, sulfur poor glass ได้แก่ Hauyne ซึ่งมีสูตรทางเคมี $(\text{Na,Ca})_8(\text{Si,Al})_{12}\text{O}_{24}(\text{SO}_4)_2$ และ Nosean $(\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{SO}_4)$ โดยสารเหล่านี้เกิดมาจากปฏิกิริยาระหว่าง anhydrite กับ clays หรือ quartz และเนื่องจากสารเหล่านี้เป็นสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (~800°C) จึงมีส่วนช่วยให้ซินเทอริงเกิดได้เร็ว อันจะนำไปสู่ปัญหาของการเกิด bed agglomeration ขึ้นได้

สำหรับเต้าลานมาจากสารที่มีค่าความแข็งต่ำมาก (รูปที่ 4.2) ผลจาก XRD จากตารางที่ 4.3(ง) ก็พบว่าหลักของสารประกอบที่มีอยู่ในเต้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากเดิมในทุกอุณหภูมิ ซึ่งเห็นว่าส่วนประกอบทางเคมีของเต้าลานนามีค่อนข้างเสถียรและไม่ทำปฏิกิริยากัน แม้ว่าอุณหภูมิจะสูงมากก็ตาม จึงทำให้ค่าความแข็งต่ำตลอดทุกอุณหภูมิ และมีแนวโน้มที่จะไม่ก่อปัญหา bed agglomeration โดยปกติแล้วการไฟฟ้าฝ่ายผลิตที่แม่เมาะจะใช้ถ่านหินจากแหล่งลานนาซึ่งถือเป็นถ่านหินที่ตีมาผสมกับถ่านหินจากแหล่งแม่เมาะเพื่อแก้ปัญหาการเกิด slagging เป็นระยะๆ

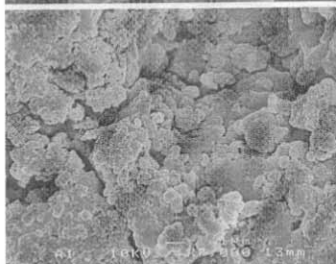
จากภาพ SEM ของเต้าถ่านหินทั้ง 4 ชนิดที่ซินเทอริงที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4, 4.6, 4.7 และ 4.8 ซึ่งเมื่อใช้เครื่องมือ EDX ที่สามารถวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ไปพร้อมกับการพิจารณาภาพจาก SEM ด้วย พบว่าเต้าแม่เมาะซินเทอริงที่ 1000°C มีปริมาณ Al, Si และ Ca สูง (รูปที่ 4.5) ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก XRD ที่พบว่ามีสารประกอบหลักเป็น anorthite $(\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7)$ ส่วนเต้าลานนาซินเทอริงที่ 1000°C (รูปที่ 4.9) พบว่ามีปริมาณ Ca และ S สูง ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก XRD ที่พบว่ามีสารประกอบหลักเป็น anhydrite (CaSO_4)

4.3 ผลของการซินเทอริงเต้าถ่านหินที่ผสมอนุภาคอื่นในเบดและผสม additives ในอากาศ

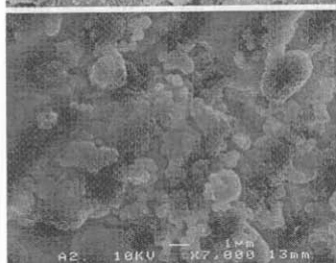
รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ได้แสดงผลของค่าความแข็งที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของเต้าที่ผสมกับอนุภาคอื่นในเบด (ทราย, CaO , CaCO_3 และ CaSO_4) และ additives (gibbsite และ andalusite) ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าอนุภาคเหล่านี้ลดค่าความแข็งของเต้าลงได้ ผลจาก XRD แสดงตารางที่ 4.5 ของอนุภาคเหล่านี้เปรียบเทียบกับก่อนและหลังจากเผาที่ 1050°C แล้วพบว่า ทราย, CaSO_4 และ andalusite ที่เติมลงไปยังคงรูปเดิมอยู่ ส่วน CaO และ CaCO_3 สลายตัวเป็น amorphous CaO และ gibbsite สลายตัวเป็น amorphous alumina นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ >1000°C ยังไม่พบการหายไปหรือลดปริมาณลงของ anhydrite หรือมีการเกิดสารผลึกชนิดใหม่เหมือนเช่นที่พบในเต้าที่ไม่ได้เติมอนุภาคใดลงในเต้า ซึ่งชี้ให้เห็นว่า อนุภาคอื่นๆ ในเบดและ additives ที่เติมลงไปสามารถลดค่าความแข็งของเต้าโดยการประพุดตัวเป็นสารเฉื่อย (inert diluent) ซึ่งสามารถลดบทบาทของ anhydrite และ clays ในการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่ส่งผลต่อค่าความแข็งได้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าทรายและ additives จะลดค่าความแข็งของเต้าบ้านปูได้ แต่



(ก)



(ข)

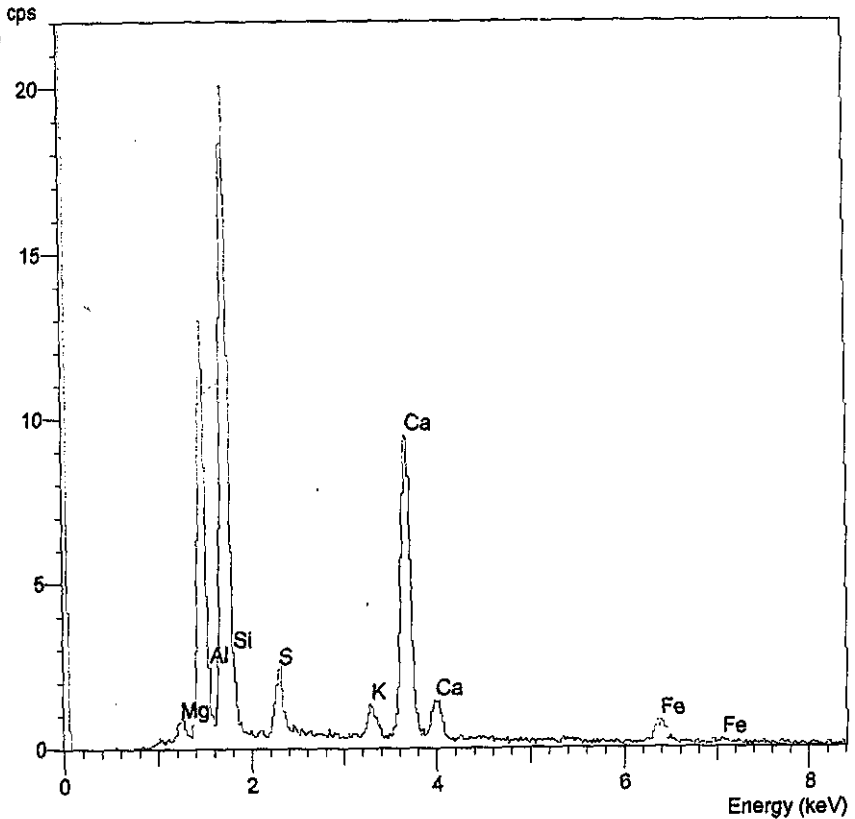


(ค)

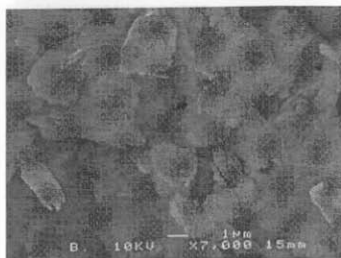
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจาก SEM ของเส้นแม่เมาะ

- (ก) ก่อนทำซินเทอริง
- (ข) ซินเทอริงที่ 900 °C ในอากาศ
- (ค) ซินเทอริงที่ 1050 °C ในอากาศ

Label	Range (keV)	Gross	Net	% total
MgKa ₁	1.107 to 1.327	647	203	0.9
AlKa	1.347 to 1.567	6283	4531	20.7
SiK	1.587 to 1.888	10714	9258	42.4
SKa	2.148 to 2.467	1827	841	3.8
KKa	3.148 to 3.487	1192	526	2.4
CaKa	3.527 to 3.828	6119	5327	24.4
CaKb	3.848 to 4.188	1332	693	3.2
FeKa	6.207 to 6.588	807	487	2.2
FeKb	6.867 to 7.247	330	-10	0.0



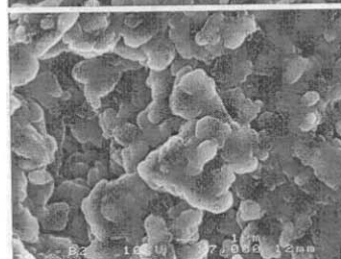
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมจากเครื่อง EDX ของแก้วแม่เมาะ จันทองริงที่ 1050°C ในอากาศ



(ก)



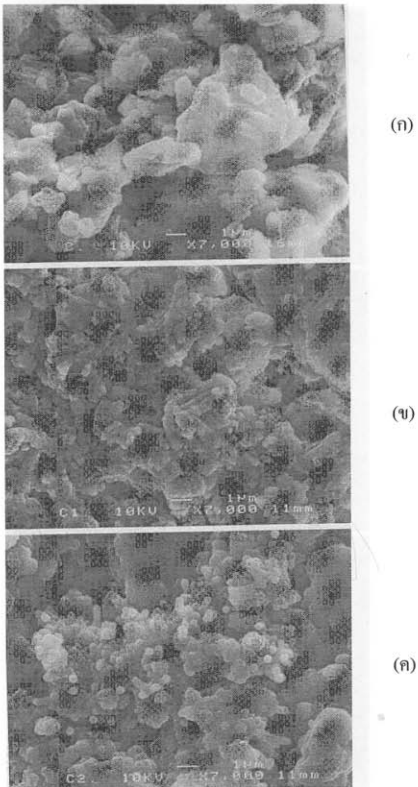
(ข)



(ค)

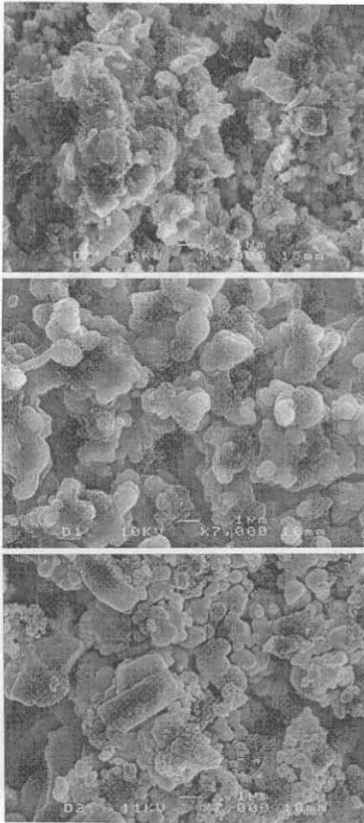
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจาก SEM ของเด็บ้านปู

- (ก) ก่อนทำซินเทอริง
- (ข) ซินเทอริงที่ 900 °C ในอากาศ
- (ค) ซินเทอริงที่ 1050 °C ในอากาศ



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายจาก SEM ของเส้นใยขม่วน

- (ก) ก่อนทำซินเทอร์ริง
- (ข) ซินเทอร์ริงที่ 900 °C ในอากาศ
- (ค) ซินเทอร์ริงที่ 1050 °C ในอากาศ



Element	Weight %
C	44.2
O	55.8
N	0.0
Na	0.0
Mg	0.0
Al	0.0
Si	0.0
S	0.0
Cl	0.0
K	0.0
Ca	0.0
Fe	0.0
Ni	0.0
Br	0.0
I	0.0
Ba	0.0
Pb	0.0

(ก)

(ข)

(ค)

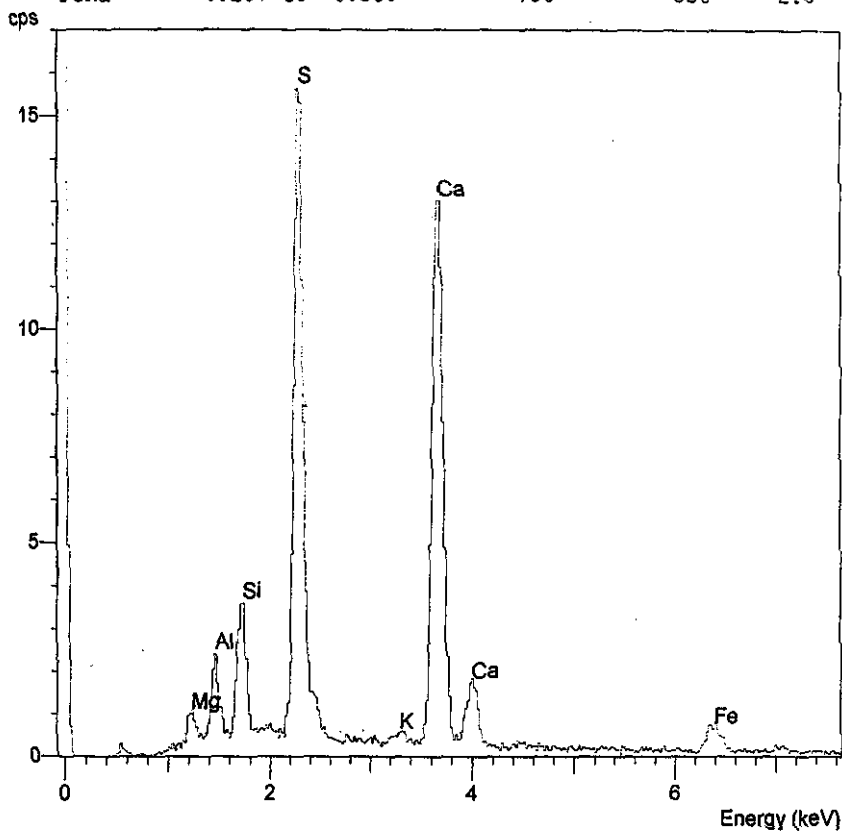
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจาก SEM ของเด้าลานนา

- (ก) ก่อนทำชินเทอริง
- (ข) ชินเทอริงที่ 900 °C ในอากาศ
- (ค) ชินเทอริงที่ 1050 °C ในอากาศ

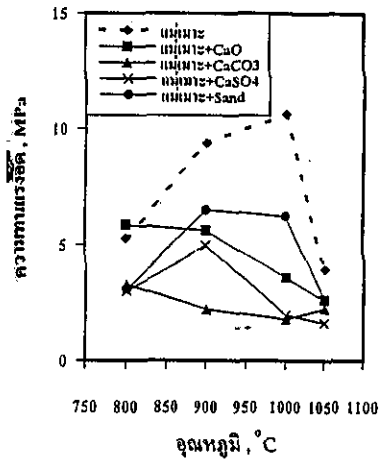
Energy (keV)

ลักษณะของผิว SEM ของเด้าลานนา ชินเทอริงที่ 1050 °C ในอากาศ

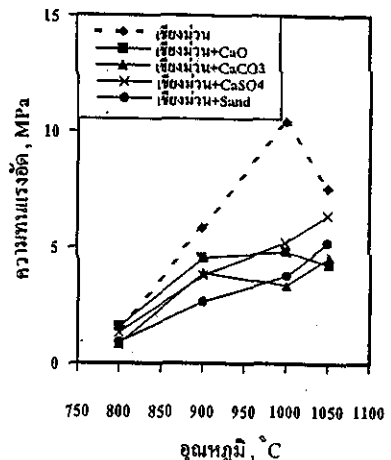
Label	Range (keV)	Gross	Net	% total
MgK α_1 ,	1.107 to 1.327	723	279	1.5
AlK α	1.347 to 1.567	1380	516	2.7
SiK α	1.587 to 1.888	2461	1461	7.7
SK α	2.148 to 2.467	9206	7481	39.2
KK α	3.148 to 3.487	802	127	0.7
CaK α	3.527 to 3.868	8613	7767	40.7
CaK β	3.888 to 4.188	1469	901	4.7
FeK α	6.207 to 6.588	790	530	2.8



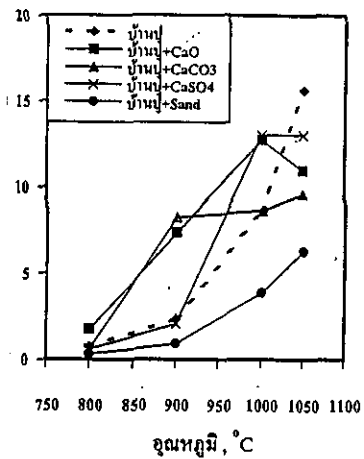
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมจากเครื่อง EDX ของเด็กลานนา ซินเทอร์ริงที่ 1050°C ในอากาศ



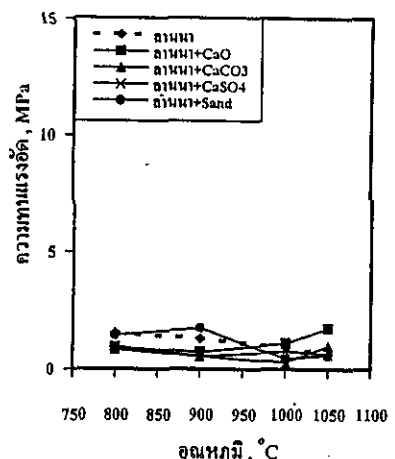
(ก)



(ข)

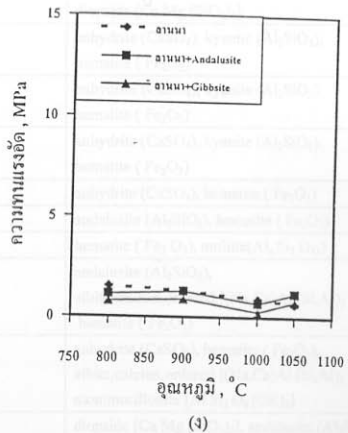
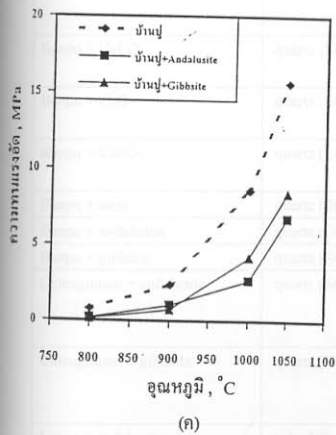
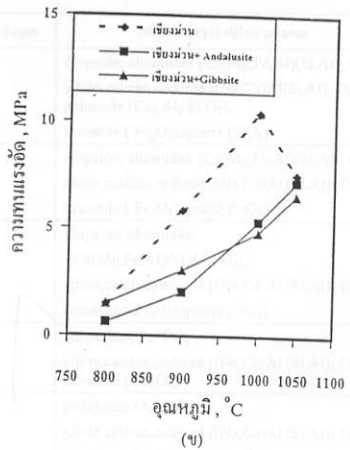
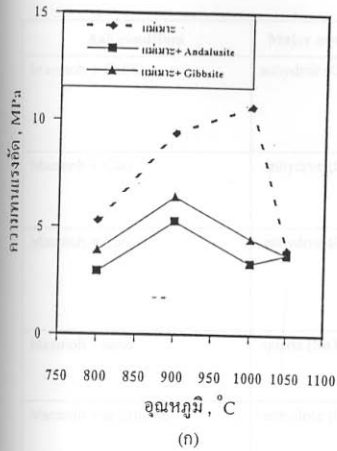


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.10 ความทนแรงอัดของเด้าด้านหินที่ผสมกับอนุภาคอื่นในเบต (15 wt% ของ CaO, CaCO₃, CaSO₄, และทราย) ในสภาวะอากาศ



รูปที่ 4.11 ความทนแรงอัดของเด้าถ่านหินที่ผสมกับ Additives (15 wt% ของ Andalusite และ Gibbsite)
ในสภาวะอากาศ

ตารางที่ 4.5 ผลของการวิเคราะห์เม็ดแก้วที่ผสมอนุภาคต่าง ๆ ที่เผาที่ 1050 °C ด้วย XRD

Ash condition	Major crystalline phases	Minor crystalline phases
Maemoh + CaCO ₃	anhydrite (CaSO ₄)	diopside, aluminian [Ca(Mg,Fe,Al)(Si,Al) ₂ O ₆], albite,calcian,ordered [(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈], gehlenite (Ca ₂ Al ₂ SiO ₇), hematite (Fe ₂ O ₃),quartz (SiO ₂)
Maemoh + CaO	anhydrite (CaSO ₄)	diopside, aluminian [Ca(Mg,Fe,Al)(Si,Al) ₂ O ₆], albite,calcian,ordered [(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈], hematite (Fe ₂ O ₃),quartz (SiO ₂)
Maemoh + CaSO ₄	anhydrite (CaSO ₄)	diopside, aluminian [Ca(Mg,Fe,Al)(Si,Al) ₂ O ₆], albite,calcian,ordered [(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈], hematite (Fe ₂ O ₃),quartz (SiO ₂)
Maemoh + sand	quartz (SiO ₂)	anhydrite (CaSO ₄), albite,calcian,ordered [(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈], hematite (Fe ₂ O ₃)
Maemoh + andalusite	anhydrite (CaSO ₄)	andalusite (Al ₂ SiO ₅), albite,calcian,ordered [(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈], hematite (Fe ₂ O ₃),quartz (SiO ₂), diopside [Ca Mg (SiO ₃) ₂]
Maemoh + gibbsite	anhydrite (CaSO ₄)	albite,calcian,ordered [(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈], hematite (Fe ₂ O ₃),quartz (SiO ₂), diopside [Ca Mg (SiO ₃) ₂]
Banpu + CaCO ₃	quartz (SiO ₂)	anhydrite (CaSO ₄), kyanite (Al ₂ SiO ₅), hematite (Fe ₂ O ₃)
Banpu + CaO	quartz (SiO ₂)	anhydrite (CaSO ₄), kyanite (Al ₂ SiO ₅), hematite (Fe ₂ O ₃)
Banpu + CaSO ₄	quartz (SiO ₂)	anhydrite (CaSO ₄), kyanite (Al ₂ SiO ₅), hematite (Fe ₂ O ₃)
Banpu + sand	quartz (SiO ₂)	anhydrite (CaSO ₄), hematite (Fe ₂ O ₃)
Banpu + andalusite	quartz (SiO ₂)	andalusite (Al ₂ SiO ₅), hematite (Fe ₂ O ₃)
Banpu + gibbsite	quartz (SiO ₂)	hematite (Fe ₂ O ₃), mullite(Al ₆ Si ₂ O ₁₃)
Chiengmuan + andalusite	quartz (SiO ₂)	andalusite (Al ₂ SiO ₅), albite,calcian,ordered [(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈], hematite (Fe ₂ O ₃)
Chiengmuan + gibbsite	quartz (SiO ₂)	anhydrite (CaSO ₄), hematite (Fe ₂ O ₃), albite,calcian,ordered [(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈], montmorillonite [Al Si ₂ O ₄ (OH) ₂]
Lanna + andalusite	anhydrite (CaSO ₄)	diopside [Ca Mg (SiO ₃) ₂], andalusite (Al ₂ SiO ₅), hematite (Fe ₂ O ₃),quartz (SiO ₂)
Lanna + gibbsite	anhydrite (CaSO ₄)	hematite (Fe ₂ O ₃), diopside [Ca Mg (SiO ₃) ₂], albite,calcian,ordered [(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈], quartz (SiO ₂)

อนุภาคอื่นในเบด (CaO , CaCO_3 และ CaSO_4) ไม่ลดค่าความแข็งของเต้าบ้านปูซึ่งแตกต่างจากเต้าชนิดอื่น อาจเป็นไปได้ว่าอนุภาคอื่นในเบดดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยากับ clays ที่มีอยู่ในปริมาณมากของเต้าบ้านปู ได้เกิดเป็นสารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความแข็งไม่ลดลง ดังนั้นอนุภาคอื่นในเบดเหล่านี้จึงไม่ได้แสดงพฤติกรรมเป็น inert diluent เพียงอย่างเดียวเหมือนที่เกิดกับเต้าชนิดอื่น

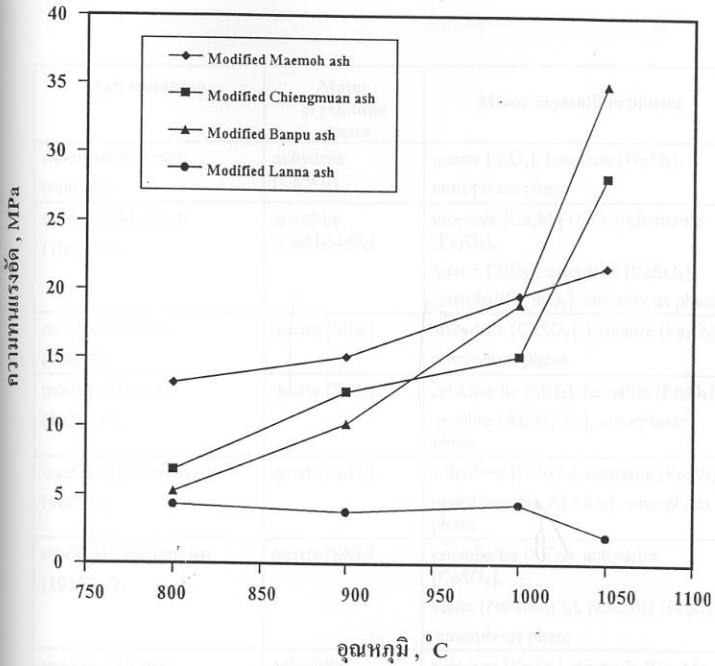
4.4 ผลของการเกิดซินเทอริงของ modified ashes ในอากาศ

เนื่องจากส่วนประกอบของ bed agglomeration ที่เกิดจากเตาเผาไหม้ระบบฟลูอิดไคซ์เบดนั้น ส่วนใหญ่เป็นสารแก้วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ และมีบางส่วนเป็นสารผลึกต่าง ๆ เช่น CaSO_4 , Na_2SO_4 , Fe_2O_3 , SiO_2 เป็นต้น แต่เต้า ASTM ที่ใช้ในการทดลองนี้เตรียมที่อุณหภูมิต่ำจึงอาจมีสารแก้วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำไม่มากพอ จึงได้ทำการเตรียม modified ashes ซึ่งเป็นเต้าดำนินที่เติม 15 wt% amorphous silica ลงไปเพื่อให้เกิดสารแก้วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำในปริมาณที่มากพอและทำให้เต้าดำนินมีค่าความแข็งสูงขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เหมาะแก่การนำไปศึกษาถึงผลของอนุภาคอื่นในเบดและ additives ที่มีต่อกระบวนการ bed agglomeration ได้ชัดเจนขึ้น

ผลของค่าความแข็งของ modified ashes จากเต้าดำนินทั้ง 4 ชนิดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 เห็นได้ว่ากรเตรียม amorphous silica ทำให้ค่าความแข็งของเต้าดำนินเพิ่มขึ้นอย่างมากและเพิ่มคามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สำหรับในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 1000°C พบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งเหมือนเต้าดำนินที่ไม่ได้เติมสารใด นั่นคือเต้าแม่เมาะที่เป็น modified ashes มีค่าความแข็งสูงสุด ส่วนที่อุณหภูมิช่วงที่สูงกว่า 1000°C นั้นเต้าบ้านปูที่เป็น modified ashes ให้ค่าความแข็งสูงสุดถึง 36 MPa ที่ 1050°C ซึ่งสูงเกินกว่าเต้าบ้านปูที่ไม่ได้เติมสารใดถึง 120% ที่อุณหภูมิเดียวกัน

ผลจากการวิเคราะห์ด้วย XRD ของ modified ashes ทั้ง 4 ชนิด แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 พบว่ามีสารแก้วเพิ่มขึ้นแต่สารประกอบที่เป็นผลึกอื่นๆ นั้นยังคงเหมือนกับของเต้าดำนินทั้ง 4 ชนิด สารแก้วที่เพิ่มขึ้นมาพิจารณาได้จากกรณี broad background ใน XRD diffractogram และเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง amorphous silica ที่เติมลงไปกับสาร alkali, alkaline earth และสารประกอบเหล็กต่าง ๆ ที่มีอยู่ในเต้า ภาพถ่ายจาก SEM (รูปที่ 4.13) ของเต้าแม่เมาะที่เป็น modified ash และเต้าบ้านปูที่เป็น modified ash แสดงให้เห็นว่ามีอนุภาคบางส่วนที่หลอมเหลวเนื่องมาจากการเกิดซินเทอริงแบบ viscous flow ส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้นกว่าเดิม

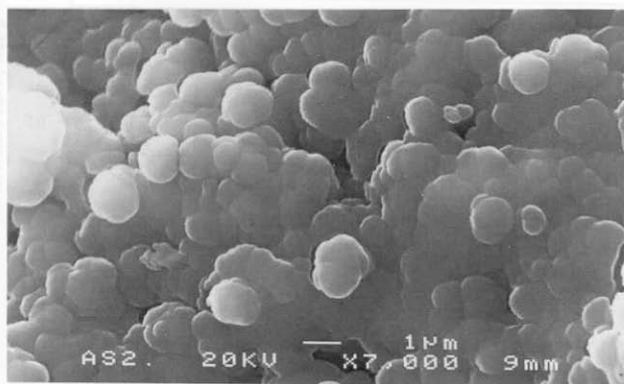
ผลของค่าความแข็งเมื่อเติมอนุภาคอื่นในเบดและ additives ลงในเต้าแม่เมาะที่เป็น modified ash และเต้าบ้านปูที่เป็น modified ash แล้วศึกษาพฤติกรรมซินเทอริงที่ 1000°C นั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 พบว่าสามารถแบ่งสารเหล่านี้ได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 (CaSO_4 , CaO , CaCO_3), กลุ่มที่ 2 (ทรายและ andalusite) และกลุ่มที่ 3 (gibbsite) โดยกลุ่มที่ 2 ทำให้ค่าความแข็งลดลงได้ปานกลางและเนื่องจากทรายและ andalusite ยังคงอยู่ในรูปผลึกหลังจากเกิดซินเทอริงแล้ว ดังนั้นสารกลุ่มที่ 2 นี้จึงลดค่าความแข็งได้ โดยมีพฤติกรรมเป็น inert diluents จึงเป็นผลแบบ inert effect ส่วนกลุ่มที่ 3 (gibbsite) นั้นลดค่าความแข็งได้มากที่สุดถึง 52% สำหรับเต้าบ้านปูที่เป็น modified ash และ 65% สำหรับเต้าแม่เมาะที่เป็น modified



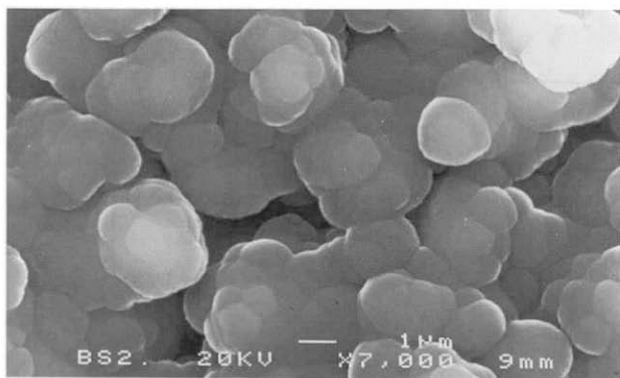
รูปที่ 4.12 ความทนแรงอัดของ Modified ashes ในสภาวะอากาศ

ตารางที่ 4.6 ผลของการวิเคราะห์เม็ดเถ้าที่เป็น modified ashes เตาที่ 900° C และ 1050° C

Ash condition	Major crystalline phases	Minor crystalline phases
modified Maemoh (900° C)	anhydrite [CaSO ₄]	quartz [SiO ₂], hematite [Fe ₂ O ₃], amorphous phase
modified Maemoh (1050° C)	anorthite [CaAl ₂ Si ₂ O ₈]	diopside [Ca,Mg (SiO ₃) ₂], hematite [Fe ₂ O ₃], quartz [SiO ₂], anhydrite [CaSO ₄], cristobalite [SiO ₂], amorphous phase
modified Banpu (900° C)	quartz [SiO ₂]	anhydrite [CaSO ₄], hematite [Fe ₂ O ₃], amorphous phase
modified Banpu (1050° C)	quartz [SiO ₂]	cristobalite [SiO ₂], hematite [Fe ₂ O ₃], mullite [Al ₆ Si ₂ O ₁₃], amorphous phase
modified Chiengmuan (900° C)	quartz [SiO ₂]	anhydrite [CaSO ₄], hematite [Fe ₂ O ₃], nepheline [Na Al SiO ₄], amorphous phase
modified Chiengmuan (1050° C)	quartz [SiO ₂]	cristobalite [SiO ₂], anhydrite [CaSO ₄], albite [NaAlSi ₃ O ₈], hematite [Fe ₂ O ₃], amorphous phase
modified Lanna (900° C)	anhydrite [CaSO ₄]	hematite [Fe ₂ O ₃], diopside [Ca, Mg (SiO ₃) ₂], quartz [SiO ₂]
modified Lanna (1050° C)	anhydrite [CaSO ₄]	diopside [Ca, Mg (SiO ₃) ₂], hematite [Fe ₂ O ₃], quartz [SiO ₂]



(ก)

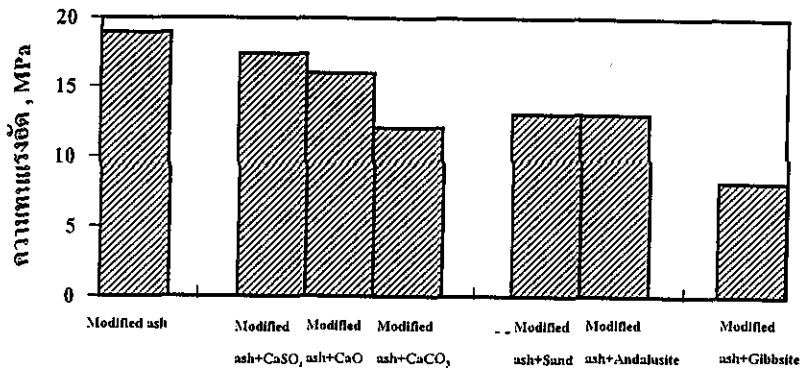


(ข)

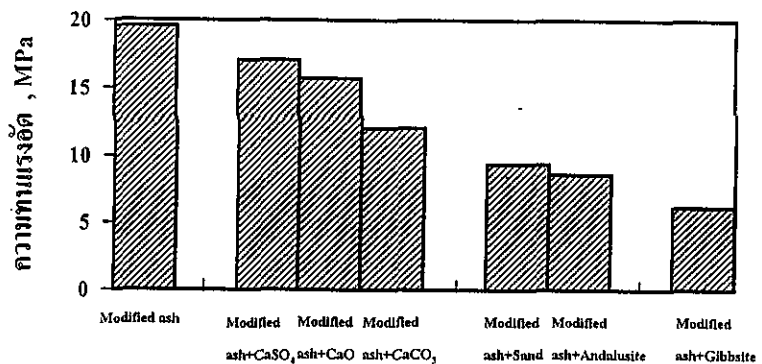
รูปที่ 4.13 ภาพ SEM ของ modified ashes เตาที่ 1000°C

(ก) เถ้าแอมะ

(ข) เถ้าบ้านปู



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 ผลของอนุภาคอื่นในเบตและ Additives (15 wt.%) ต่อความทนแรงอัดของ modified ashes :
(ก) เถ้าบ้านปู, (ข) เถ้าแม่เมาะ

ash Linjewile และ Manzoori (1997) ได้เคยศึกษาบทบาทของ gibbsite ในการควบคุมปัญหา bed agglomeration ในเตาเผาระบบฟลูอิดไคซ์เบดที่เผาถ่านหินชนิด سختต่ำมาแล้ว โดยได้เสนอว่า gibbsite เมื่อเปลี่ยนเป็น amorphous alumina ที่อุณหภูมิของการเกิดซินเทอริงแล้วจะมีพื้นที่ผิว $88 \text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งสามารถดูดซับเถ้าที่หลอมเหลวไว้ได้ ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงไป งานวิจัยนี้ก็ได้พบปรากฏการณ์เช่นกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า บทบาทของ gibbsite นั้นเป็นบทบาทที่รวมทั้งผลของ inert dilution และ molten ash adsorption จึงเป็นผลแบบที่เรียกว่า inert/adsorption effect สำหรับกลุ่ม calcium-based bed materials ในกลุ่มที่ 1 นั้น มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สำหรับการเติม CaCO_3 และ CaO นั้นควรให้ผลอย่างเดียวกันเนื่องจาก CaCO_3 จะสลายตัวได้เป็น amorphous CaO ซึ่งมีมวลค่าสูงกว่าเดิม จากรูปที่ 4.14 อัตราส่วนของค่าความแข็งแรง $\text{CaCO}_3 / \text{CaO}$ มีค่าประมาณ 0.65 ซึ่งค่านี้ใกล้เคียงกับอัตราส่วนของมวลโมเลกุลคือ 0.56 ในภาพรวมทั้งหมดแล้วสารในกลุ่มนี้อาจทำปฏิกิริยากับ amorphous silica ที่มีอยู่แล้วทำให้เกิดสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าเดิมส่งผลให้ค่าความแข็งแรงไม่ลดลงเท่าที่ควร ดังนั้นจึงเป็นผลแบบที่เรียกว่า inert/reaction effect

รูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิและ additives ที่มีต่อค่าความแข็งแรงของ modified ashes ทั้ง 4 ชนิด เห็นได้ชัดว่า additives สามารถลดค่าความแข็งแรงได้ในทุกอุณหภูมิ สำหรับ gibbsite นั้นพบว่า ได้ผลดีกว่า andalusite เนื่องจากลดค่าความแข็งแรงได้มากกว่า โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงกว่า 900°C ส่วนถ่านนาที่เป็น modified ash ไม่พบการลดค่าความแข็งแรงที่ชัดเจนเมื่อเติม additives ทั้งนี้เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงที่ต่ำมากอยู่แล้ว เห็นได้ชัดว่าการใช้ modified ash ในการศึกษาครั้งนี้เป็นวิธีที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาบทบาทของอนุภาคอื่นในเบดและ additives ที่มีต่อกระบวนการ bed agglomeration ได้

4.5 ผลของการเกิดซินเทอริงของถ่านหิน และถ่านหินที่เติมอนุภาคอื่นในเบดในบรรยากาศ



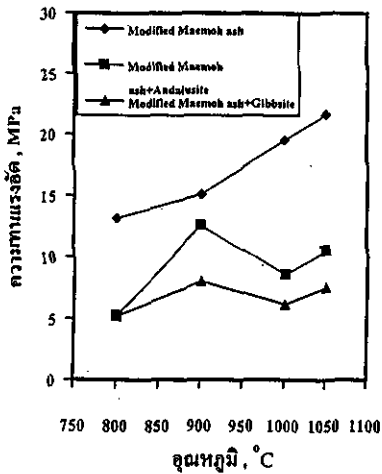
รูปที่ 4.16 แสดงพฤติกรรมซินเทอริงของถ่านทั้ง 4 แหล่งภายใต้บรรยากาศของ $\text{N}_2 + \text{CO}_2$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอากาศ (รูปที่ 4.2) แล้วพบว่า มีขนาดและลำดับของค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกัน นั่นคือ ในช่วงอุณหภูมิ $< 1000^\circ\text{C}$ เรียงลำดับค่าความแข็งแรงได้ดังนี้

ถ่านแม่เมาะ \approx ถ่านเชียงม่วน $>$ ถ่านบ้านปู \approx ถ่านลานนา

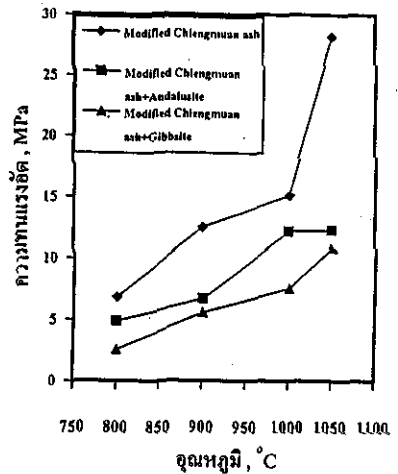
ส่วนในช่วงอุณหภูมิ $> 1000^\circ\text{C}$ เรียงลำดับค่าความแข็งแรงได้ดังนี้

ถ่านบ้านปู $>$ ถ่านแม่เมาะ \approx ถ่านเชียงม่วน $>$ ถ่านลานนา

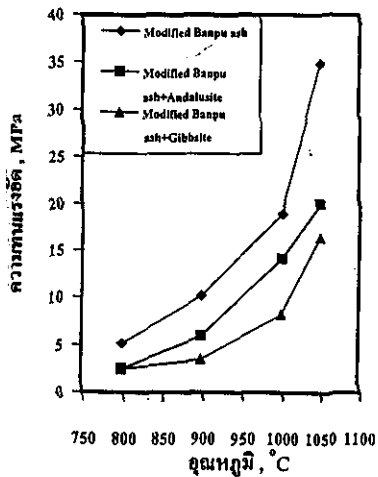
ความแตกต่างกันเล็กน้อยที่พบได้แก่ การที่ถ่านแม่เมาะและถ่านเชียงม่วนมีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกันในทุกอุณหภูมิของการเกิดซินเทอริงในสภาวะ $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ ในขณะที่สภาวะอากาศค่าความแข็งแรงของถ่านทั้งสองมีความแตกต่างกันมากกว่านี้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากพฤติกรรมของถ่านทั้ง 4 แหล่งในสภาวะ $\text{CO}_2 + \text{N}_2$



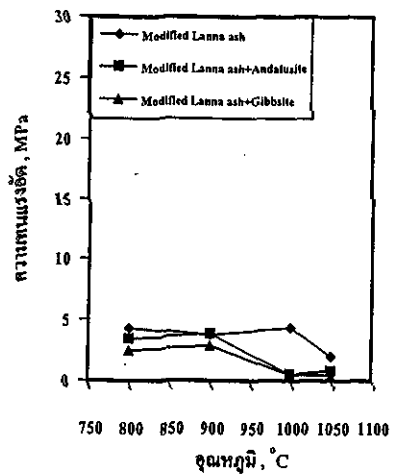
(ก)



(ข)

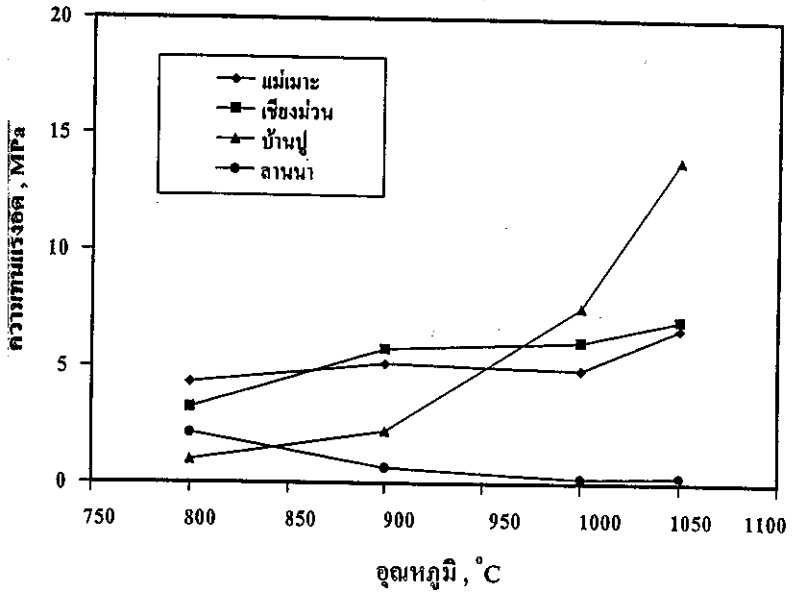


(ค)



(ง)

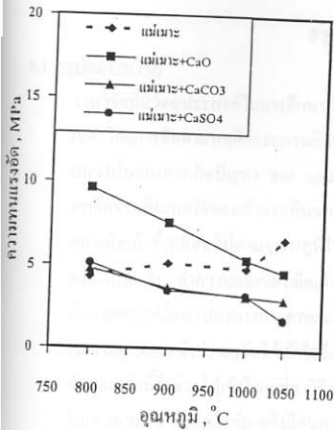
รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิและ additives ต่อความทนแรงอัดของ modified ashes



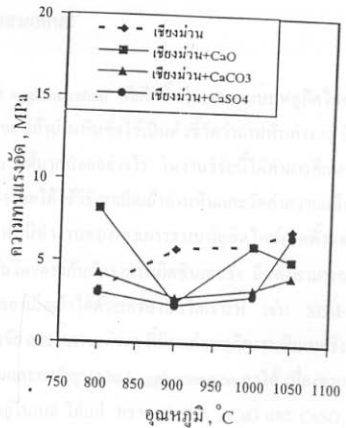
รูปที่ 4.16 ความทนแรงอัดของเต็อด่านหินที่เกิดซินเทอริงในสภาวะบรรยากาศของ $\text{CO}_2 + \text{N}_2$

และในสภาวะอากาศไม่มีความแตกต่างกันเป็นนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าสภาวะบรรยากาศที่ต่างระหว่าง $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ หรืออากาศไม่มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดซินเทอร์ริงของเม็ดάνหินที่ใช้ทดลองในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ผลการศึกษาพฤติกรรมซินเทอร์ริงในบรรยากาศของ 100% CO_2 และ 100% N_2 พบว่ามีค่าความแข็งใกล้เคียงกับในสภาวะอากาศ และ $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ จึงยืนยันได้ว่าบรรยากาศที่ต่างกันในการทดลองนี้ไม่มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดซินเทอร์ริงของเม็ดάνหิน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอุณหภูมิของการศึกษาซินเทอร์ริงในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 800 – 1050 °C ซึ่งไม่สูงมาก ทำให้ผลของบรรยากาศซึ่งต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมีแบบ solid-gas reaction ที่มีบรรยากาศเข้าไปร่วมด้วยจึงมีอิทธิพลน้อย ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเม็ดάνหินส่งผลให้สภาวะบรรยากาศที่ต่างกันไม่ทำให้พฤติกรรมซินเทอร์ริงเปลี่ยนไป Skrifvars และคณะ (1994) ก็ได้รายงานไว้เช่นกันว่าการมี CO_2 อยู่ในสภาวะบรรยากาศไม่มีผลต่อค่าความแข็งของเม็ดάνหินที่ซินเทอร์ริงในสภาวะเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยตรง

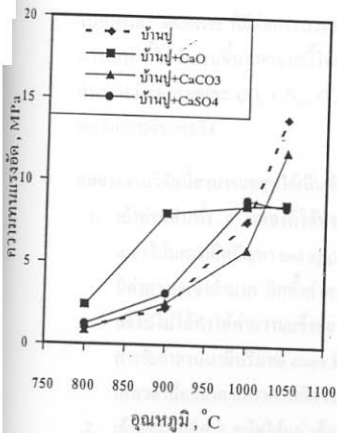
สำหรับเม็ดที่เติมอนุภาคในเบดได้แก่ CaCO_3 และ CaSO_4 ในสภาวะ $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ นั้น ผลของการมีอนุภาคทั้งสองนี้ทำให้มีการลดลงของค่าความแข็งของเม็ดแม่เผาและเม็ดเชิงมุม แต่ไม่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งของเม็ดบ้านปูและเม็ดลานนา (รูปที่ 4.17) ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวนี้คล้ายกับพฤติกรรมซินเทอร์ริงของเม็ดในสภาวะอากาศ ส่วนผลการเติม CaO ในสภาวะ $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ นั้น พบลักษณะที่แตกต่างไปจากสภาวะอากาศเล็กน้อย กล่าวคือ CaO ทำให้เม็ดแม่เผาและเม็ดบ้านปูมีค่าความแข็งสูงขึ้นกว่าเม็ดที่ไม่ได้เติม CaO ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า CaO สามารถทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบทางเคมีบางชนิดในเม็ดแม่เผาและเม็ดบ้านปูในสภาวะ $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ ได้ดีกว่าสภาวะอากาศ โดยได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้มีการเกิดซินเทอร์ริงได้เร็วจึงให้ค่าความแข็งสูงขึ้นกว่าเม็ดดังกล่าว ผลิตภัณฑ์เป็นสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำดังกล่าวอาจอยู่ในรูปสารแก้วซึ่งมีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบจึงไม่อาจตรวจสอบด้วย XRD ดังนั้นเพื่อให้ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดสารผลิตภัณฑ์ได้เร็วและกลายเป็นสารผลึกเพื่อง่ายต่อการตรวจสอบ การทดลองครั้งนี้จึงได้ทดลองผสม CaO กับ amorphous silica แล้วศึกษาซินเทอร์ริงในสภาวะเดียวกันกับเม็ดที่เติม CaO สำหรับการเลือกใช้ amorphous silica ให้เป็นตัวแทนขององค์ประกอบทางเคมีของเม็ดάνหินเนื่องมาจาก amorphous silica มีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบจึงเกิดปฏิกิริยาได้เร็วในอุณหภูมิของการทดลองครั้งนี้ ซึ่งผลการทดลองพบว่า ส่วนผสมดังกล่าวมีค่าความแข็งมากขึ้นตามอุณหภูมิดังนี้ 4.3 MPa(800°C) , 10.4 MPa(900°C) และ 19.0 MPa(1000°C) และมีสารผลิตภัณฑ์วิเคราะห์ได้จาก XRD เป็นสารกลุ่ม calcium silicates ได้แก่ wallastonite (CaSiO_3) และ Larnite (Ca_2SiO_4) ซึ่งแสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง CaO กับ amorphous silica ขึ้นจริงในสภาวะที่ทำการทดลองครั้งนี้ ดังนั้นการที่เม็ดแม่เผาและเม็ดบ้านปูที่เติม CaO มีค่าความแข็งสูงขึ้นกว่าเม็ดที่ไม่ได้เติม จึงน่าจะมีผลมาจากบทบาทของ CaO ที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบบางส่วนของเม็ดได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำลงทำให้เกิดซินเทอร์ริงได้เร็วขึ้นนั่นเอง



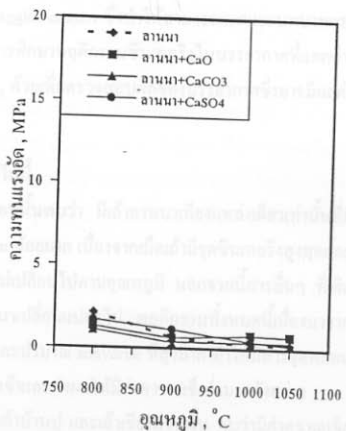
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.17 ความทนแรงอัดของเต้าถ่านหินผสมกับอนุภาคอินโนเบดโนสภาวะบรรยากาศของ CO₂+N₂

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาปัญหา bed agglomeration ที่เกิดขึ้นในเตาเผาแบบฟลูอิดไครซ์เบด โดยการติดตามพฤติกรรมการเกิดซินเทอร์ริงของเม็ดถ่านหินซึ่งใช้เป็นตัวชี้วัดว่าถ่านหินต่าง ๆ มีแนวโน้มของการเกิดปัญหา bed agglomeration ได้มากน้อยอย่างไร ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมซินเทอร์ริงของเม็ดถ่านหินจาก 4 แหล่งโดยใช้วิธีเผาเม็ดถ่านหินและวัดค่าความแข็งของเม็ดถ่านที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิทำงานของเตาเผาแบบฟลูอิดไครซ์เบดตั้งแต่ 800–1050 °C ค่าความแข็งของเม็ดถ่านมีแนวโน้มโดยตรงกับอัตราการเกิดซินเทอร์ริง อีกทั้งสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของเม็ดถ่านได้ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ เช่น SEM-EDS และ XRD ซึ่งช่วยเสริมให้เข้าใจถึงกลไก ปัจจัย และสภาวะต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมซินเทอร์ริง ข้อมูลเหล่านี้จึงช่วยให้เข้าใจและหาวิธีการป้องกันและลดปัญหา bed agglomeration ลงได้ เนื่องจากในเตาเผาแบบ ฟลูอิดไครซ์เบดยังมีอนุภาคอื่นปนอยู่ในเบด ได้แก่ ทราย, CaCO_3 , CaO และ CaSO_4 การศึกษาจึงได้มีการเพิ่มอนุภาคเหล่านี้เข้าไปในเม็ดถ่านหิน ผลของการเติม additives (andalusite และ gibbsite) ก็ได้มีการศึกษาเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ additives ในการลดปัญหา bed agglomeration งานวิจัยนี้ได้ใช้ modified ashes ด้วยเพื่อช่วยเสริมให้เห็นถึงบทบาทของอนุภาคอื่นในเบดและ additives ที่มีต่อกระบวนการ bed agglomeration ซึ่งทำให้สามารถแยกแยะบทบาทของสารเหล่านี้ได้ชัดเจนขึ้นนอกจากนี้ได้เพิ่มเติมการศึกษาพฤติกรรมซินเทอร์ริงในบรรยากาศที่แตกต่างกันระหว่างอากาศและ $\text{CO}_2 + \text{N}_2$, CO_2 และ N_2 ด้วยเพื่อตรวจสอบผลของบรรยากาศซึ่งอาจมีผลต่อพฤติกรรมซินเทอร์ริง

ผลจากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้เป็นข้อๆ ดังต่อไปนี้

1. ถ่านหินทั้ง 4 แหล่งที่ได้ทำการทดสอบนั้นพบว่า มีถ่านหินเพียงแหล่งเดียวเท่านั้นที่มีแนวโน้มการเกิดปัญหา bed agglomeration น้อยมาก เนื่องจากเม็ดถ่านมีจุดซินเทอร์ริงสูงสุดและมีค่าความแข็งต่ำมาก อีกทั้งค่าความแข็งไม่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ นอกจากนี้สารอื่นๆ ที่เติมลงไปไม่ได้ทำให้ค่าความแข็งของถ่านหินเปลี่ยนแปลงไป พฤติกรรมทั้งหมดนี้เนื่องมาจากการที่ถ่านหินมีปริมาณ clays ที่ต่ำมากและปริมาณ anhydrite ที่สูงมาก ทำให้มีสารจุดหลอมเหลวต่ำน้อยมาก อัตราการเกิดซินเทอร์ริงจึงช้าและส่งผลให้มีค่าความแข็งต่ำมากดังกล่าว
2. ถ่านหินอีก 3 ชนิดได้แก่ ถ่านแม่เมาะ, ถ่านบ้านปู และถ่านเชียงม่วนนั้น พบว่ามีค่าความแข็งเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและมีค่าความแข็งที่แตกต่างกัน โดยในช่วงอุณหภูมิต่ำ (<1000°C) ถ่านแม่เมาะที่มีปริมาณ anhydrite และ clays ใกล้เคียงกันให้ค่าความแข็งสูงสุด ส่วนในช่วงอุณหภูมิสูง (>1000°C) ถ่านบ้านปูที่มีปริมาณ clays สูงสุดให้ค่าความแข็งสูงสุด ดังนั้นถ่าน

อุณหภูมิของเตาเผาอยู่ในช่วงปฏิบัติการของการเผาไหม้แบบฟลูอิด ไคซ์เบดคือ $<1000^{\circ}\text{C}$ แล้ว ด้านหินแม่เมาะมีแนวโน้มของการเกิดปัญหา bed agglomeration มากกว่าด้านหินจากแหล่งอื่น แต่ถ้าอุณหภูมิมากกว่า 1000°C แล้ว ด้านหินบ้านปุมมีแนวโน้มของการเกิดปัญหานี้ได้มากกว่าด้านหินชนิดอื่น

3. พฤติกรรมการเกิดซินเทอร์ริงของถ่านหินขึ้นกับทั้งส่วนประกอบทางเคมีของถ่านหินและอุณหภูมิ นั่นคือในช่วงอุณหภูมิต่ำ ($<1000^{\circ}\text{C}$) พฤติกรรมการเกิดซินเทอร์ริงขึ้นกับว่าองค์ประกอบทางเคมีดั้งเดิมของถ่านหินมีการเกิดปฏิกิริยาให้สารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำมากน้อยเพียงใด เช่นถ่านแม่เมาะมีองค์ประกอบ anhydrite และ clays ในปริมาณใกล้เคียงกันพบว่าให้สารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำมาก ทำให้มีค่าความแข็งแรงสูงหรือมีอัตราการเกิดซินเทอร์ริงได้เร็ว แต่ในช่วงอุณหภูมิสูง ($>1000^{\circ}\text{C}$) เกิดมีปฏิกิริยาเคมีอื่นร่วมด้วยโดยเปลี่ยนสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำไปเป็นสารใหม่ที่มีจุดหลอมเหลวสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดซินเทอร์ริงช้าลง ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงได้
4. ผลของอนุภาคอื่นในเบด (ทราย, CaCO_3 , CaO และ CaSO_4) และ additives (andalusite และ gibbsite) นั้น พบว่ามีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของเม็ดถ่านลดลง โดยอนุภาคเหล่านี้มีประพัตต์ตัวทั้งหมดเป็น inert diluent ซึ่งก็คิดกันไม่ให้ส่วนประกอบทางเคมีของถ่านได้แก่ anhydrite และ clays ทำปฏิกิริยากันมากเท่าที่ควร จึงเกิดสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำน้อย ค่าความแข็งแรงจึงต่ำไปด้วย เมื่อใช้ modified ashes ก็พบว่าสามารถแยกแยะบทบาทของสารเหล่านี้ได้ชัดเจนขึ้น โดยกลุ่มที่ 1 ได้แก่ CaCO_3 , CaO และ CaSO_4 มีกลไกแบบ inert/reaction effect กลุ่มที่ 2 ได้แก่ ทราย และ andalusite มีกลไกแบบ pure inert effect และกลุ่มที่ 3 ได้แก่ gibbsite มีกลไกแบบ inert adsorption effect ซึ่งเป็นแบบที่มีประสิทธิภาพในทางลดค่าความแข็งแรงได้มากที่สุด ดังนั้นการมีอนุภาคอื่นหรือ additives ปนอยู่ในถ่านที่เกิด agglomeration จึงมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของ agglomerates ลดลงได้ แต่เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้เข้าปะปนอยู่กับถ่านหินจึงเป็นการเพิ่มมวลของ agglomerates ซึ่งอาจทำให้การลดปัญหา bed agglomeration มีประสิทธิภาพน้อยกว่าที่ควรจะเป็น
5. ผลของบรรยากาศที่ต่างกันระหว่างอากาศ, $\text{CO}_2 + \text{N}_2$, CO_2 และ N_2 ไม่มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดซินเทอร์ริงของถ่านหินทั้ง 4 แหล่ง และถ่านหินที่มีอนุภาคอื่นในเบด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิในการทดลองไม่ได้สูงมาก ($800-1050^{\circ}\text{C}$) ผลของบรรยากาศซึ่งต้องใช้ปฏิกิริยาเคมีเข้าร่วมด้วยจึงมีอิทธิพลน้อยมาก บรรยากาศของ $\text{CO}_2 + \text{N}_2$, CO_2 และ N_2 จึงไม่ได้ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน ทำให้พฤติกรรมซินเทอร์ริงในสภาวะบรรยากาศที่ต่างกันเกือบไม่มีความแตกต่างกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ส่วนประกอบทางเคมีที่เป็นสารแร่ (mineralogical components) ในถ่านหินที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้พบว่ามีความสัมพันธ์ต่อผลของค่าความแข็งหรือพฤติกรรมชั้นเทอริงของเม็ดถ่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณและชนิดของ clays และปริมาณของ anhydrite ตลอดจนการกระจายตัวของสารแร่ต่างๆ ในถ่านหินด้วย ดังนั้นงานวิจัยที่ควรศึกษาในขั้นต่อไปคือการวิเคราะห์หาปริมาณตลอดจนชนิดต่างๆ ของสารแร่ในถ่านหินซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธีได้แก่ วิธีแรก ทำถ่านหินให้เป็นเถ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าด้วยวิธี Low Temperature Ashing แล้วนำถ่านดังกล่าวไปวิเคราะห์หาปริมาณสารแร่ต่าง ๆ ด้วยวิธีการ XRD วิธีที่สองที่มีการนิยมใช้มากขึ้นเนื่องจากสามารถหาได้ทั้งชนิดและปริมาณของสารแร่ต่างๆ และยังรู้ถึงการกระจายตัวของสารแร่ต่างๆ ในเม็ดถ่านด้วย วิธีนี้เรียกว่า Computerized Scanning Electron Microscopy (CSEM)
2. ในการเตรียม modified ashes ซึ่งเติม amorphous silica นั้นงานวิจัยต่อไปอาจใช้สารอื่นเช่น Na_2SO_4 ผสมลงไปด้วยหรืออาจทำในบรรยากาศของ SO_2 เนื่องจากมีงานวิจัยที่เคยเสนอไว้ถึงบทบาทสำคัญของ sulfation ที่มีต่อกระบวนการ bed agglomeration โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเตาเผาไหม้ระบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ใช้ถ่านหินสัคย์ต่ำที่มีปริมาณ sodium และซัลเฟอร์ค่อนข้างสูง
3. เนื่องจากถ่านหินที่ใช้ในการวิจัยนี้มีเพียง 4 แหล่ง ซึ่งเป็นถ่านหินสัคย์ต่ำ ดังนั้นผลวิจัยที่ได้ไม่อาจใช้เป็นตัวแทนของถ่านหินสัคย์อื่นเช่น บิทูมินัส หรือ แอนทราไซด์ ได้ ดังนั้นการวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษาถ่านหินจากแหล่งอื่นเพิ่มเติมให้มากขึ้น
4. ศึกษา bed agglomeration ของวัสดุชีวมวล เนื่องจากขณะนี้ประเทศไทยได้มีการใช้เทคโนโลยีเตาเผาระบบฟลูอิดไคซ์เบดจากต่างประเทศที่ใช้วัสดุชีวมวลเช่น แกลบข้าวเป็นเชื้อเพลิง เพิ่มจำนวนมากขึ้น
5. สร้างชุด Fluidized bed combustor เพื่อจำลองการทำงานของระบบจริงและเก็บตัวอย่างเถ้าโดยตรงจากเบด

બચ્ચત્તુકર

1. Basu, P., Sarka, A.(1993). Agglomeration of coal ash in fluidized beds. Fuel, 62, 924-926.
2. Benson, S.A., Karner, F.R., Goblirsch, G.M., Brekke, D.W., (1982). Preprinted Paper American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry, 27(1), 174.
3. Bhattacharya, S.P., Kosminski, A., Yan, H., Vuthaluru, H.B. (1999). Combustion of Victorian and South Australian low-rank coals in circulating fluidized bed combustion pilot plant, the Ninth Japan/Australian Joint Technical Meeting on Coal, Melbourne, June 1-2
4. Brown, R.C, Dawson, M.R., Smeenk, J.L. (1996). Bed material agglomeration during fluidized bed combustion, Final Report to the US Department of Energy (DOE) DE 96007754XPS.
5. Dawson M.R.and Brown R.C., (1992) Bed material cohesion and loss of fluidization during fluidized bed combustion of Midwestern coal, Fuel, 71, 585-592.
6. Goblirsch, G., Van der Molen, K.H., Wilson, K., Hajicek, D., (1980) Atmospheric fluidized bed testing of North Dakota lignite, 6th International Conference on Fluidized Bed Combustion.
7. Jung, B., Schobert, H.H.(1991) Energy and Fuels, 5, 555-561.
8. Jung, B., Schobert, H.H.(1992) Energy and Fuels, 6, 59-68.
9. Linjewile, T.M., Manzoori, A.R. (1997). Role of additives in controlling agglomeration and defluidization during fluidized bed combustion of high-sodium, high-sulphur low-rank coal, Engineering Foundation Conference, Hawaii, 2-7 November.
10. Manzoori, A.R.(1990) Role of the inorganic matter in agglomeration and defluidization during the circulating fluid bed combustion, Ph.D thesis, The University of Adelaide, Adelaide, S.A., Australia.
11. Manzoori, A.R., Linjewile, T.M. and Linard, D. (1995) Mechanistic evaluation of the role of additives in controlling bed material ash deposition and agglomeration during fluidized bed combustion of low-rank coal, Proceedings of the 5th Japan-Australia Joint Technical Meeting on Coal, Adelaide, June.
12. Moore, R.E., Zahradnik, r.L., Vawter, R.G. (1991) Simultaneous combustion of oil shale, low BTU gas and coal in a circulating fluidized-bed combustor, Proceeding of the 1991 International Conference on Fluidized Bed Combustion, April 21-24, Montreal, Canada, Vol.1, pp 553-558.

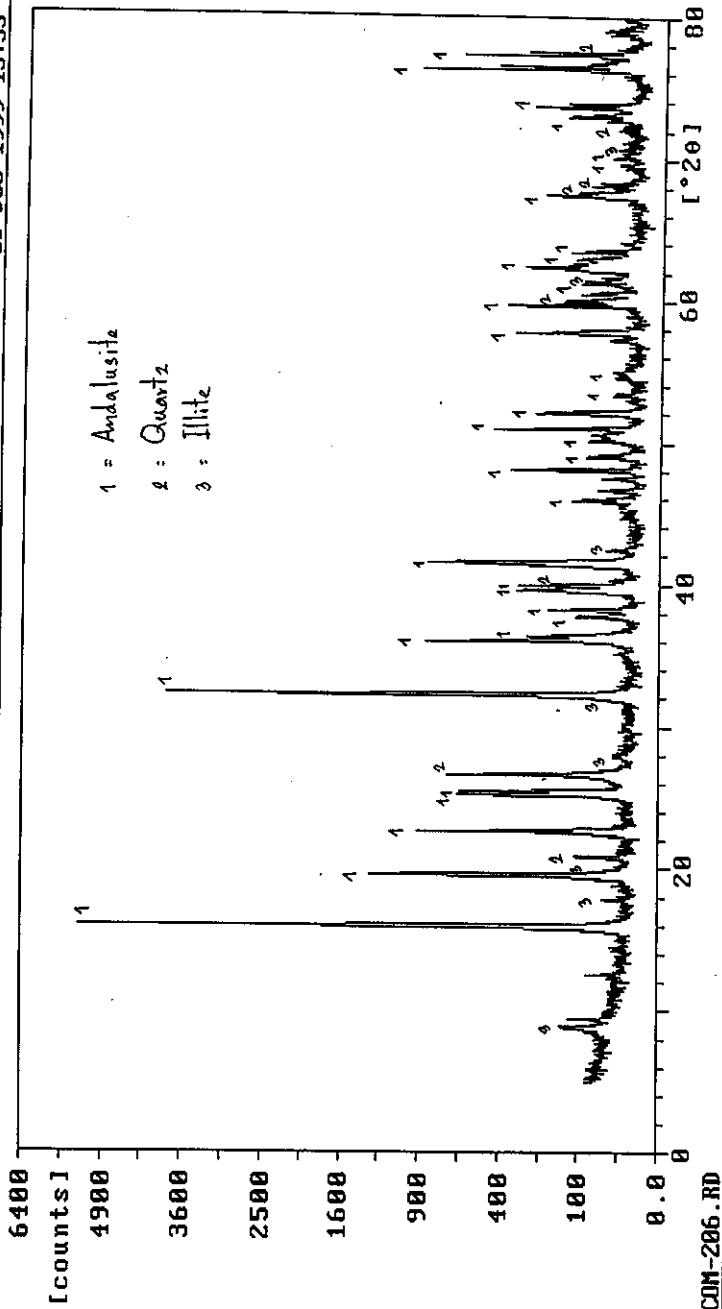
13. Skrifvars, B.J., Hupa, M. and Hiltunen, M.(1992) Sintering of ash during fluidized bed combustion, *Industrial & Engineering Chemistry Research*,31(4) 1026-1030.
14. Skrifvars, B.J., Hupa M, Backman, R and Hiltunen, M(1994) 73 (2) 171-176.
15. Smith E.J.D.,(1956) The Sintering of fly ash, *Journal of Institute of Fuel*, 29(185), pp 253-260.
16. Steenari, B.M., Lindquist, O., Langer, V.(1998), *Fuel*, 77(5),407-417.

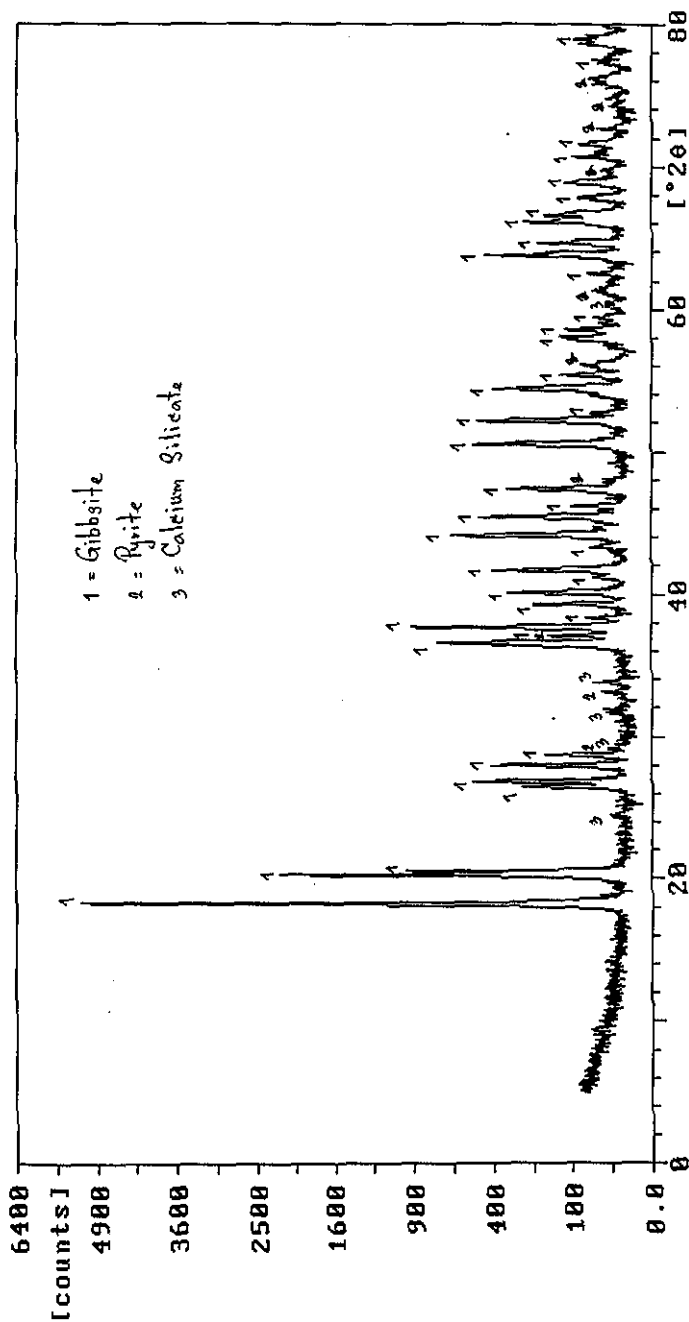
ภาคผนวก ก

ข้อมูล X-ray Diffractogram ของแร่ถ่านหินภายใต้สภาวะต่าง ๆ

สัญลักษณ์ที่ใช้ประกอบผล Diffractogram

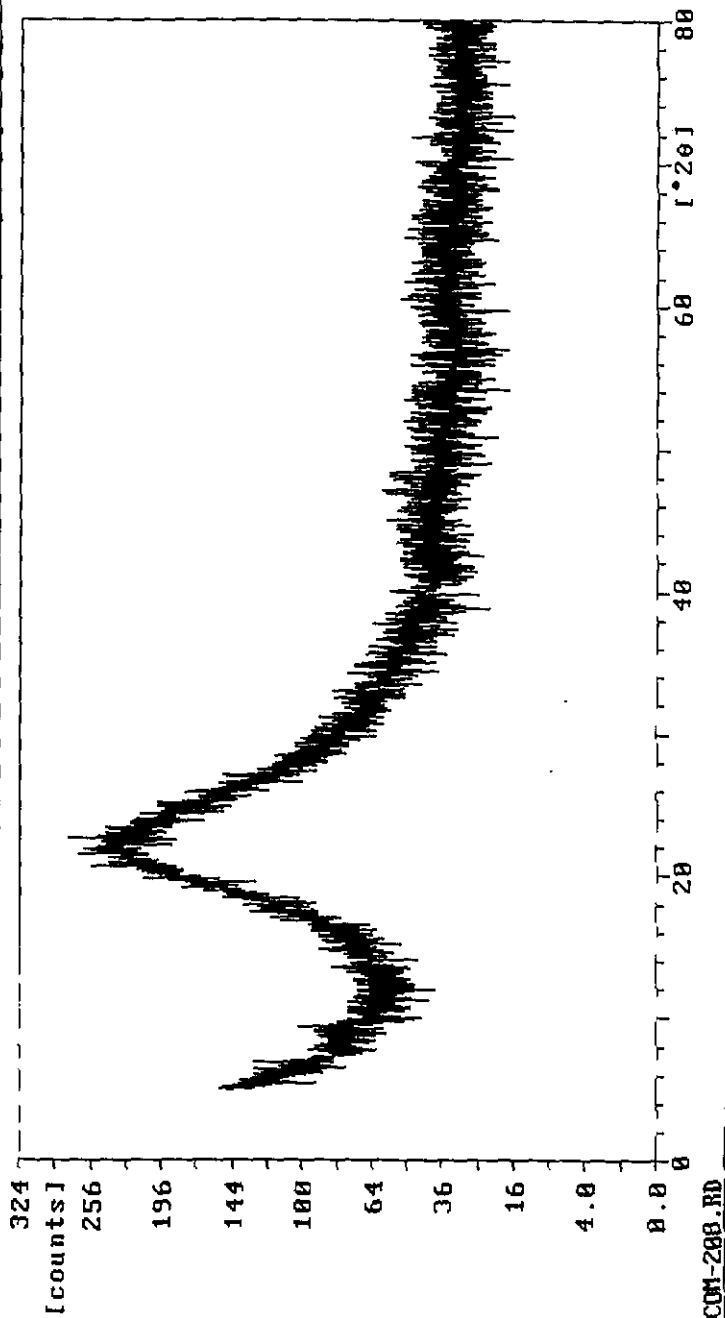
A, M	=	แม่เมาะ		
B	=	บ้านปู้		
C	=	เขียงม่วง		
D	=	ลานนา		
1	=	900°C		
2	=	1050°C		
E	=	CaO + amorphous silica		
F	=	CaCO ₃ + amorphous silica		
S	=	amorphous silica		
S1, FS	=	ทรายดิบ	S2	= ทรายเผาที่ 1050°C
CO	=	CaO		
CC	=	CaCO ₃		
CS	=	CaSO ₄		
All, G	=	gibbsite		
A	=	andalusite		





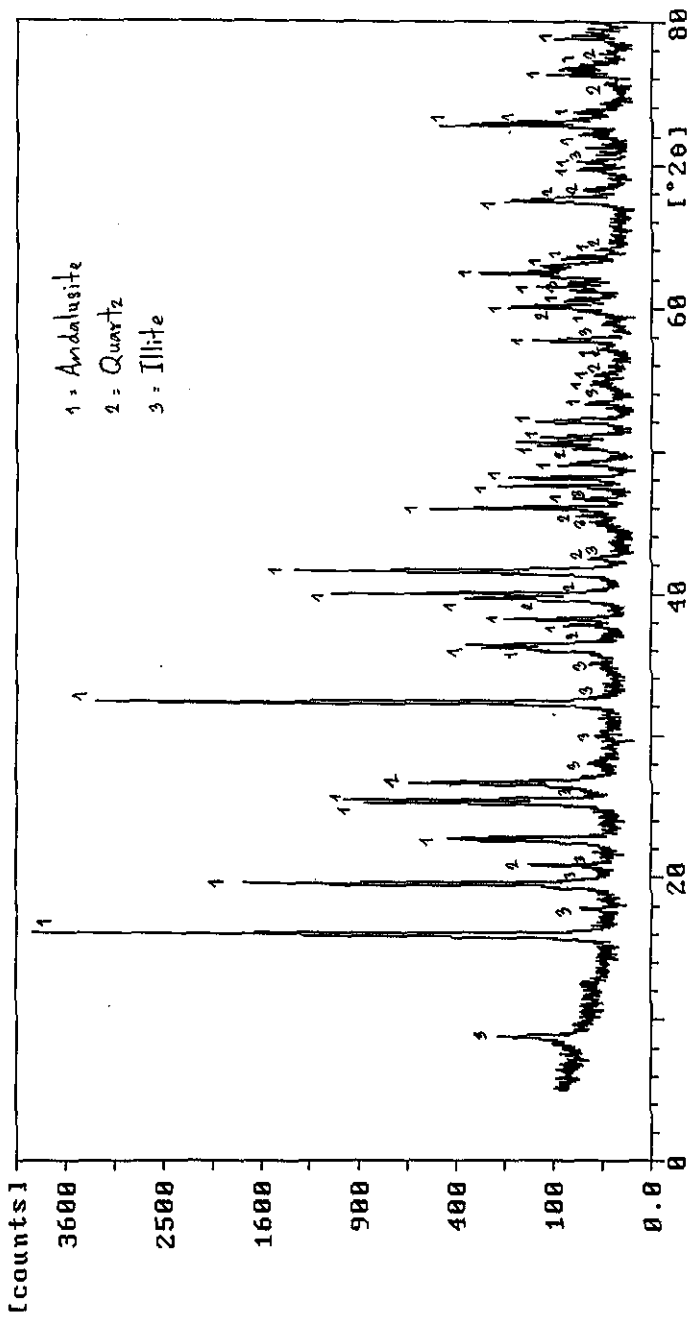
Sample identification: No.5

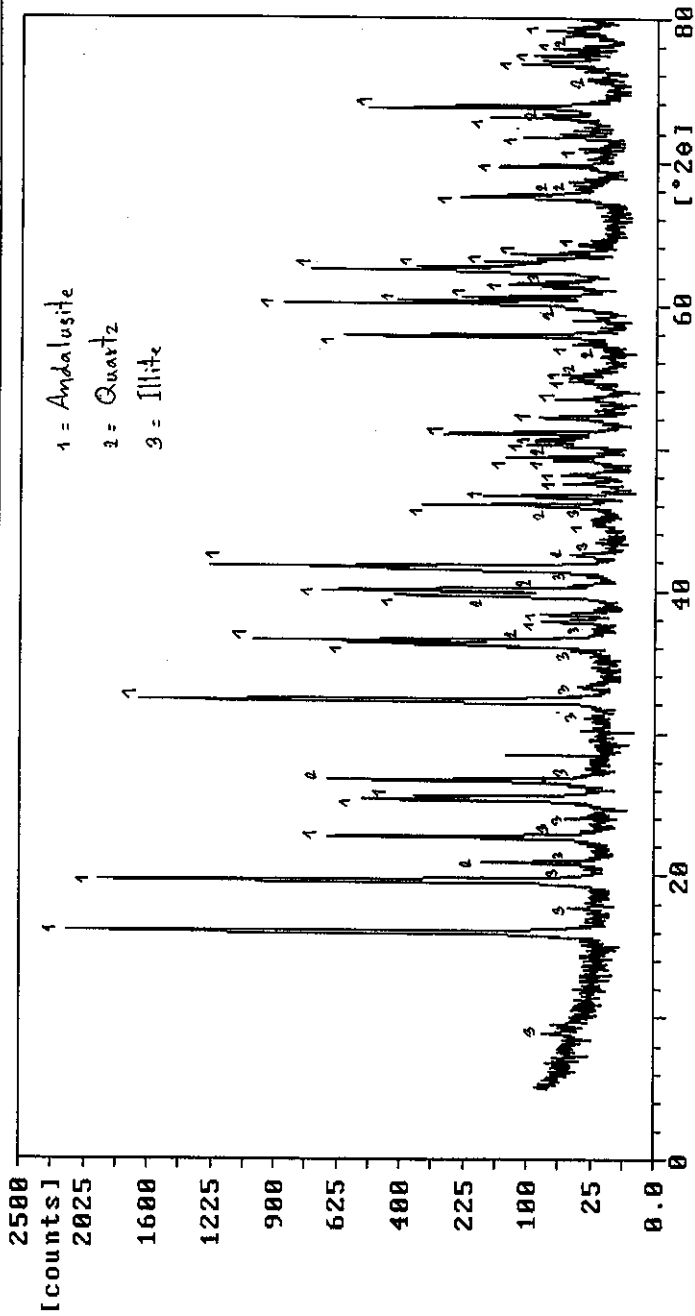
16-Dec-1993 13:34



[Sample identification: A1

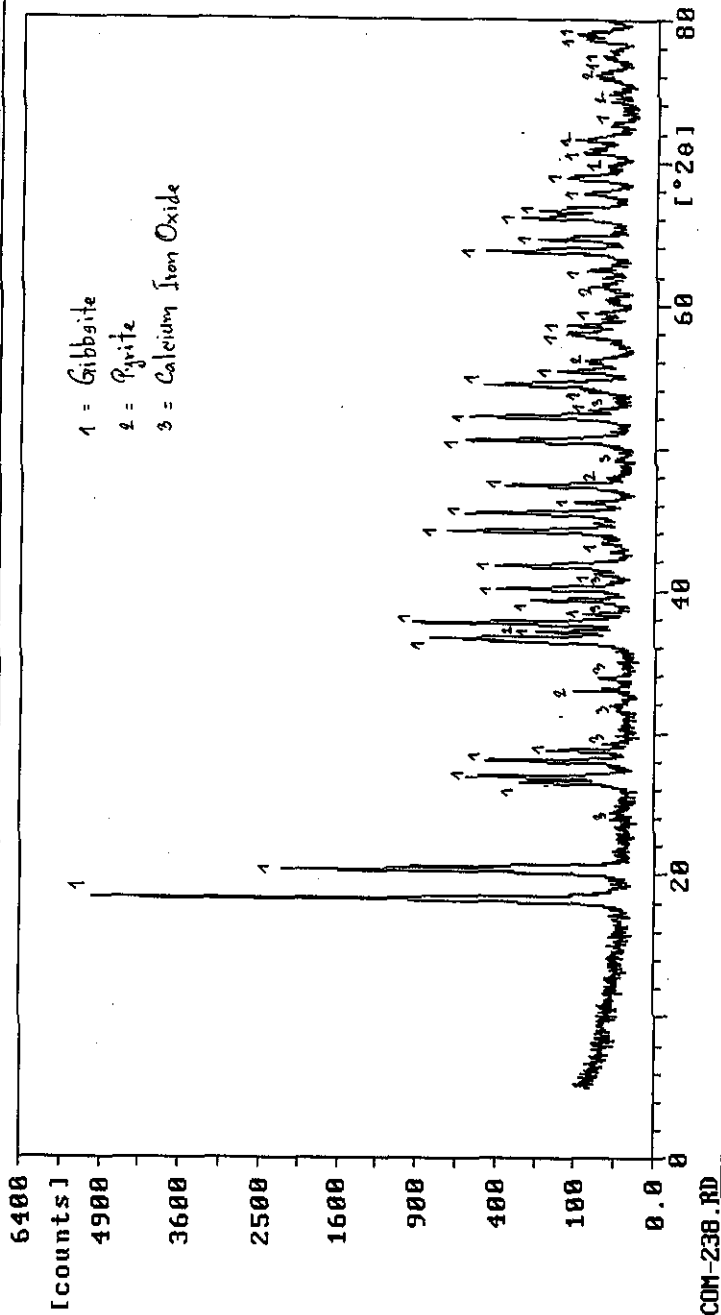
18-Feb-2000 21:08

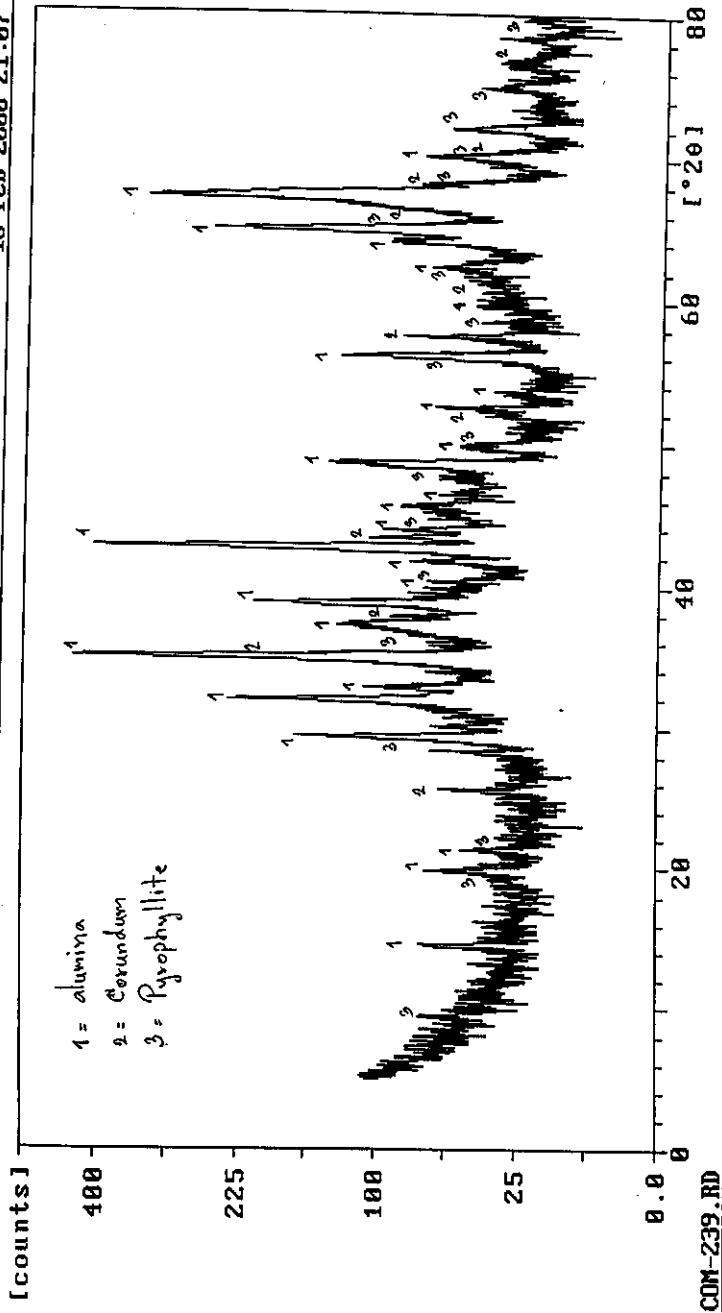




Sample Identification: Al 1

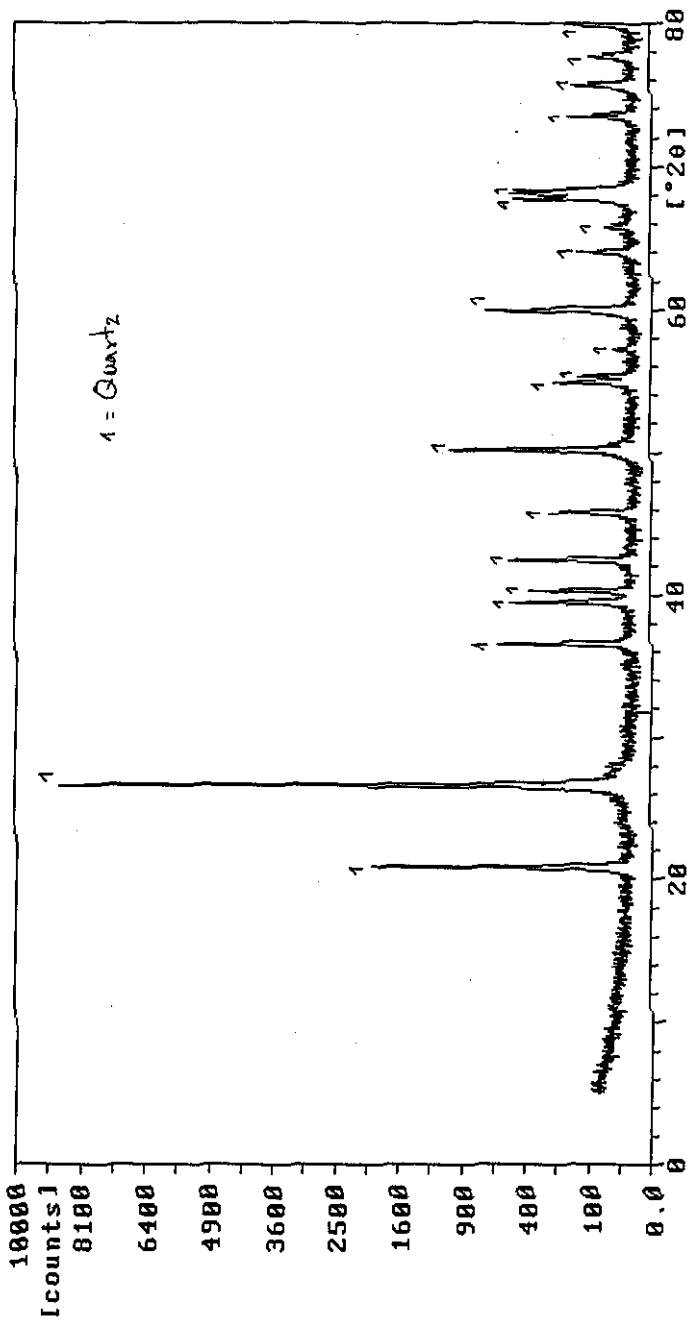
18-Feb-2000 21:07





Sample identification: S1

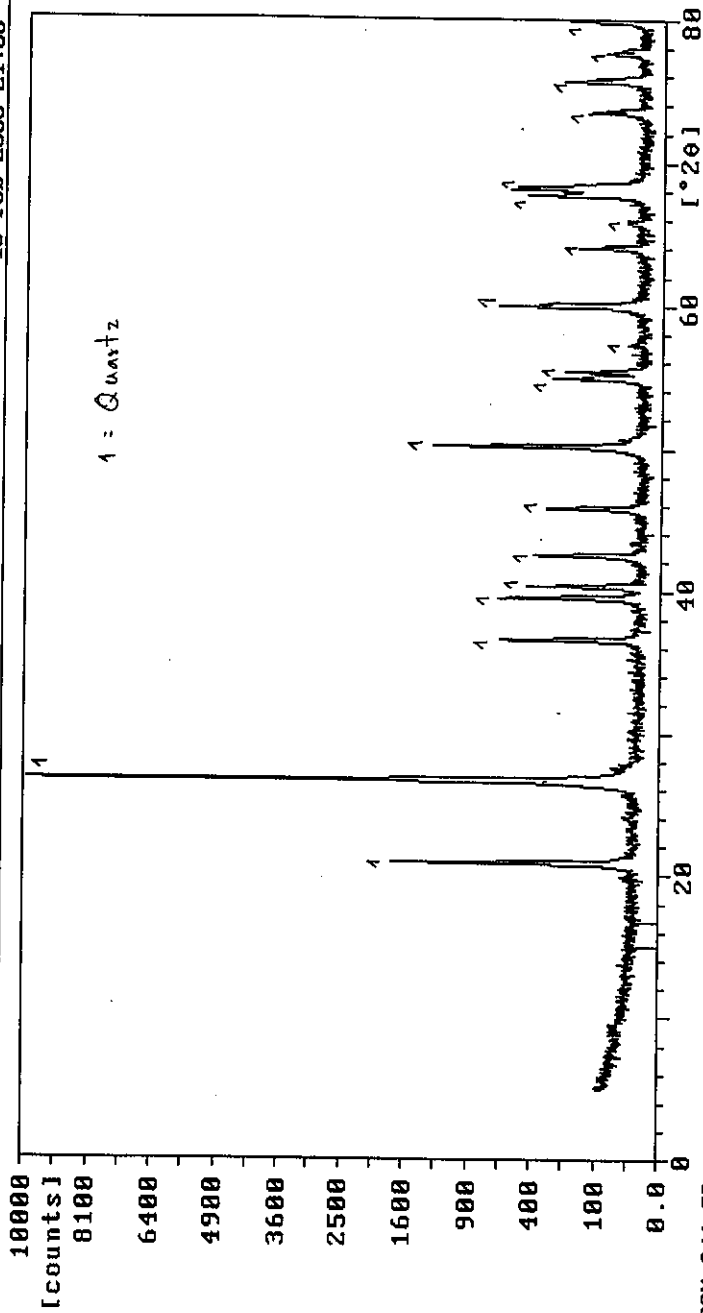
18-Feb-2000 21:07



COM-240.RD

Sample identification: SZ

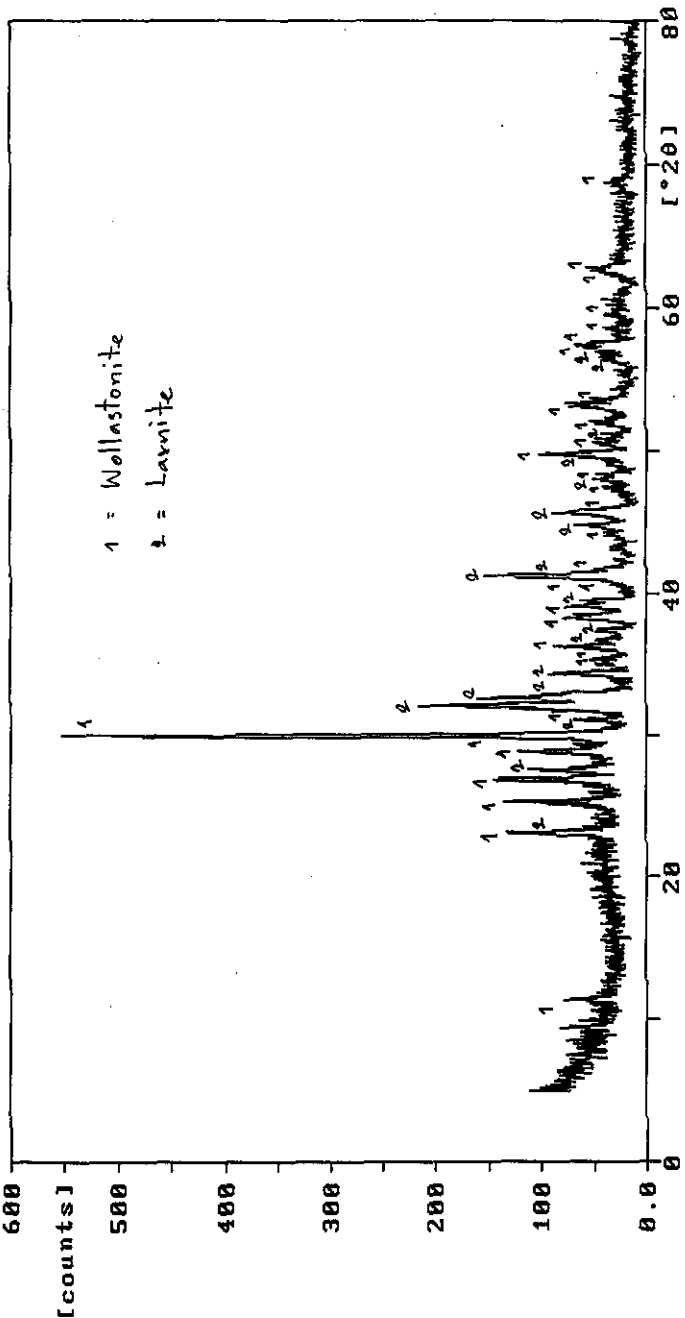
18-Feb-2000 21:06



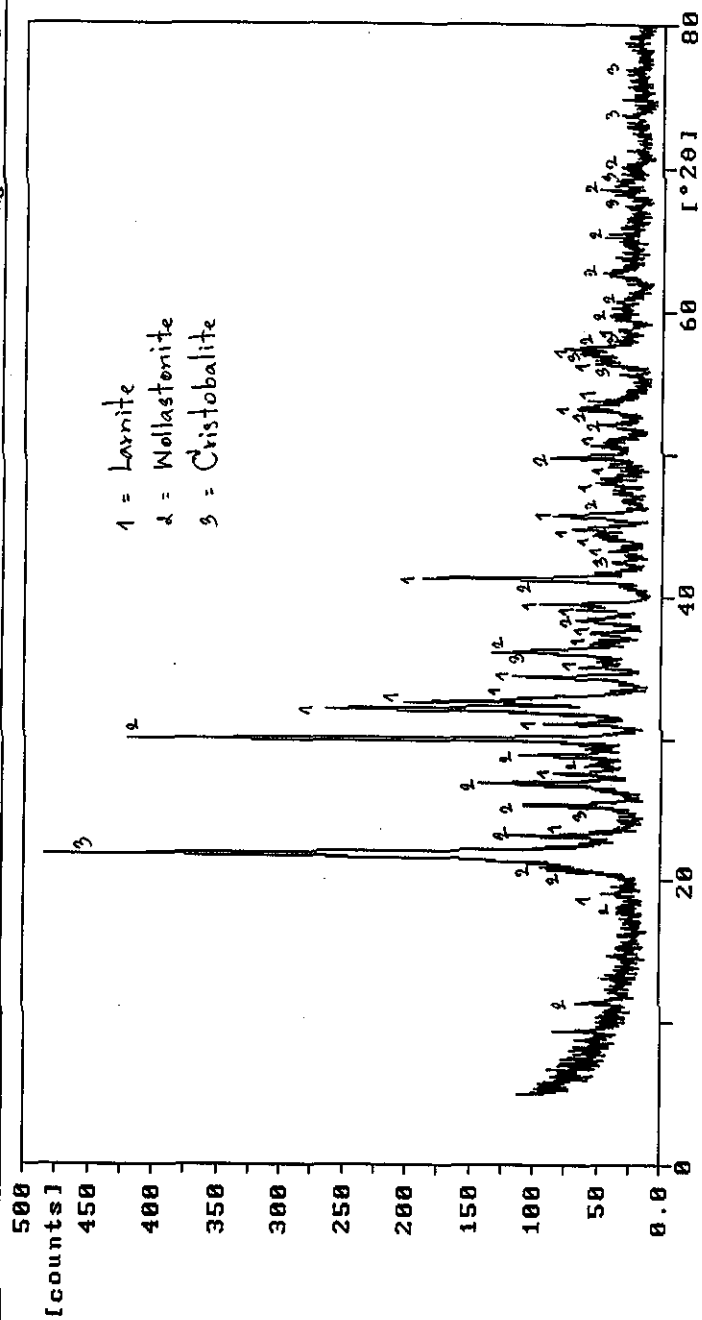
COM-241.RD

Sample identification: E (air 1000C)

6-aug-1998 22:29

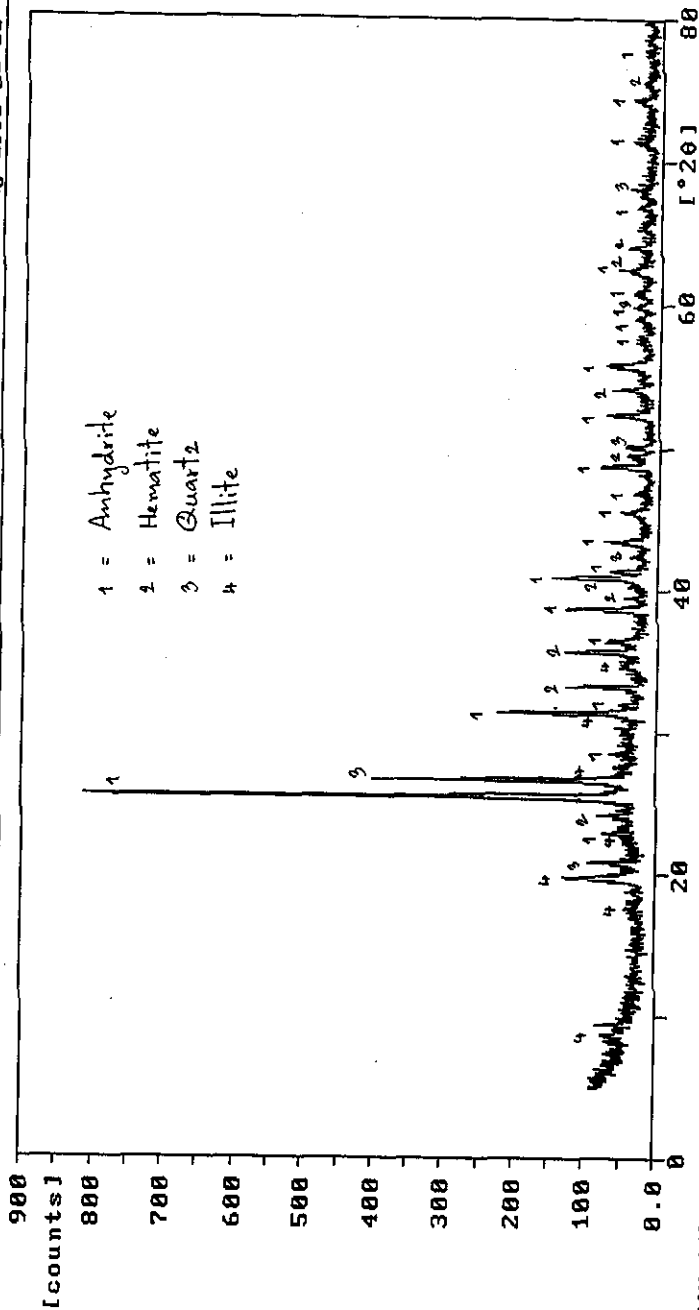


COM-162.RD



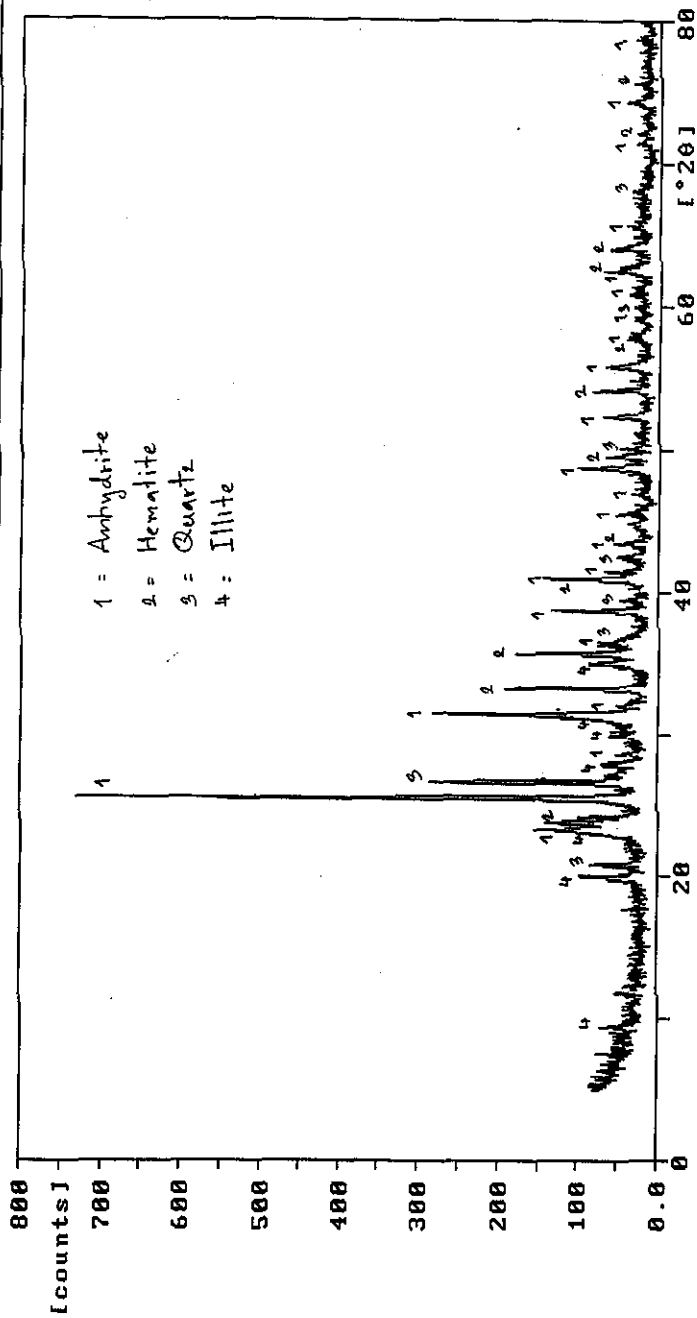
Sample Identification: Ash.A(ASTM)

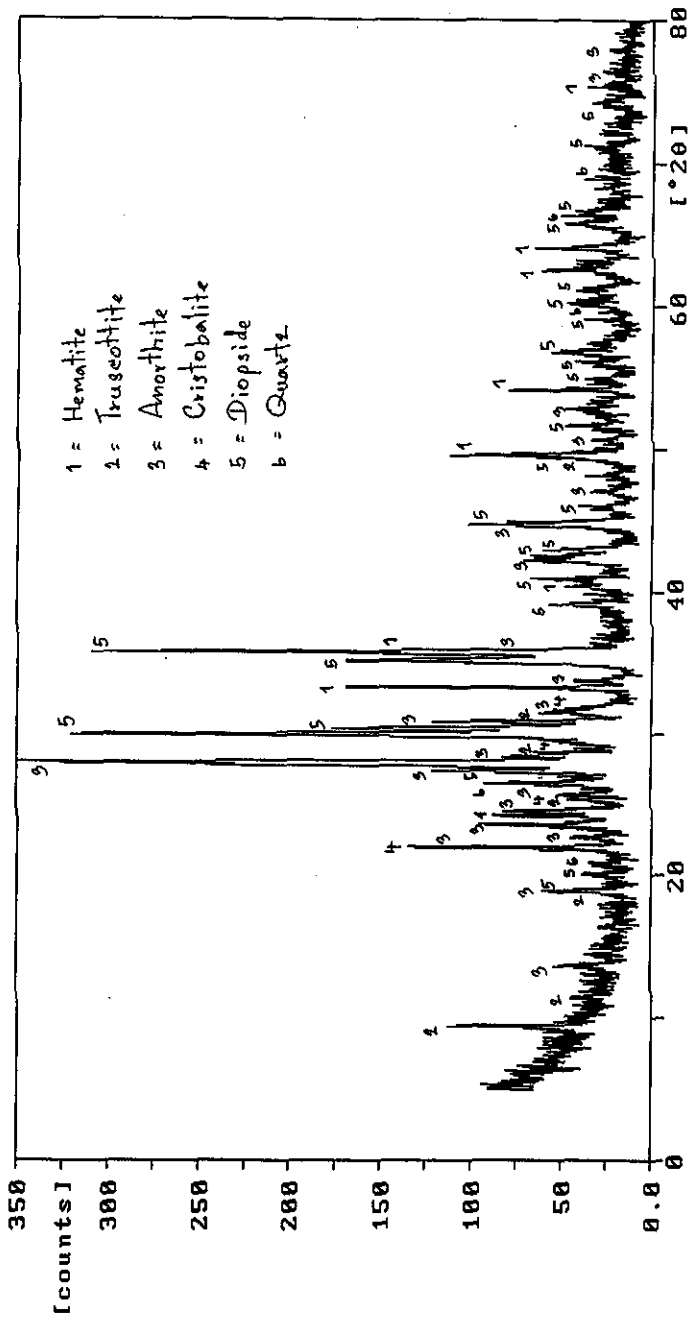
6-aug-1998 21:56



Sample Identification: A(air 980C)

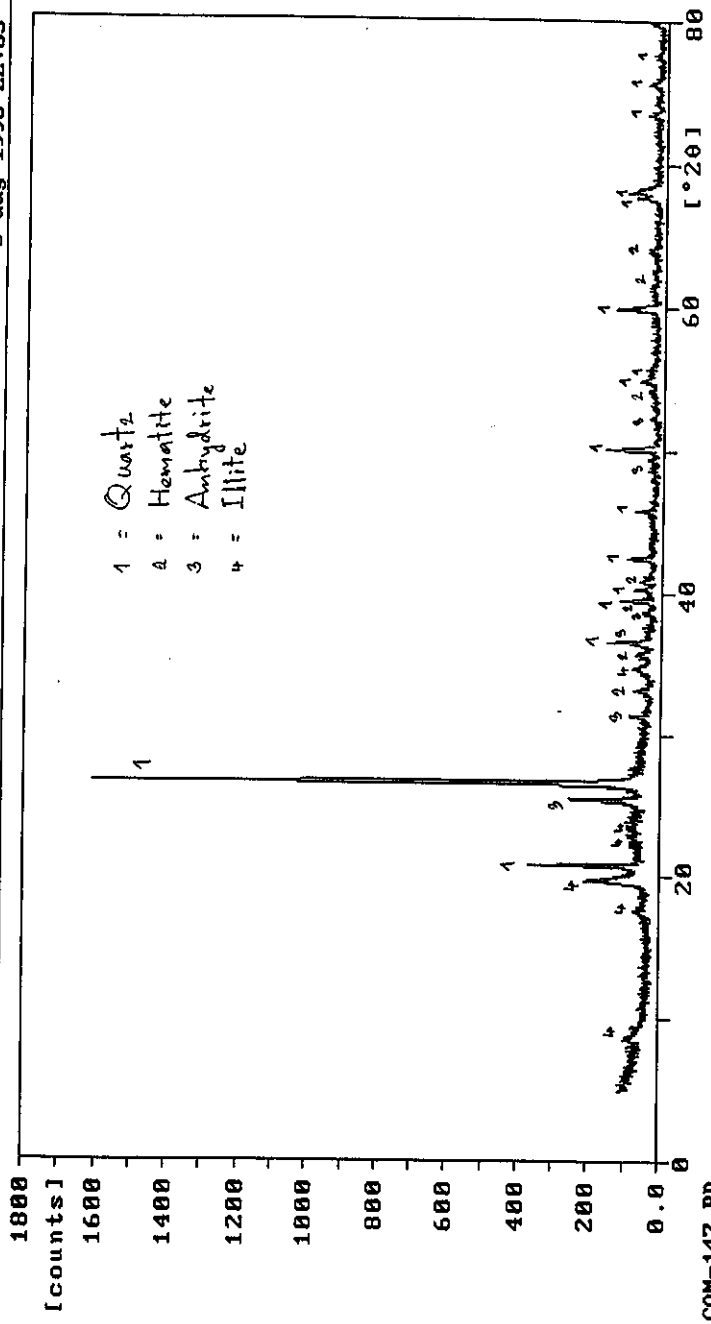
6-aug-1998 21:57





Sample identification: Ash.B(ASTM)

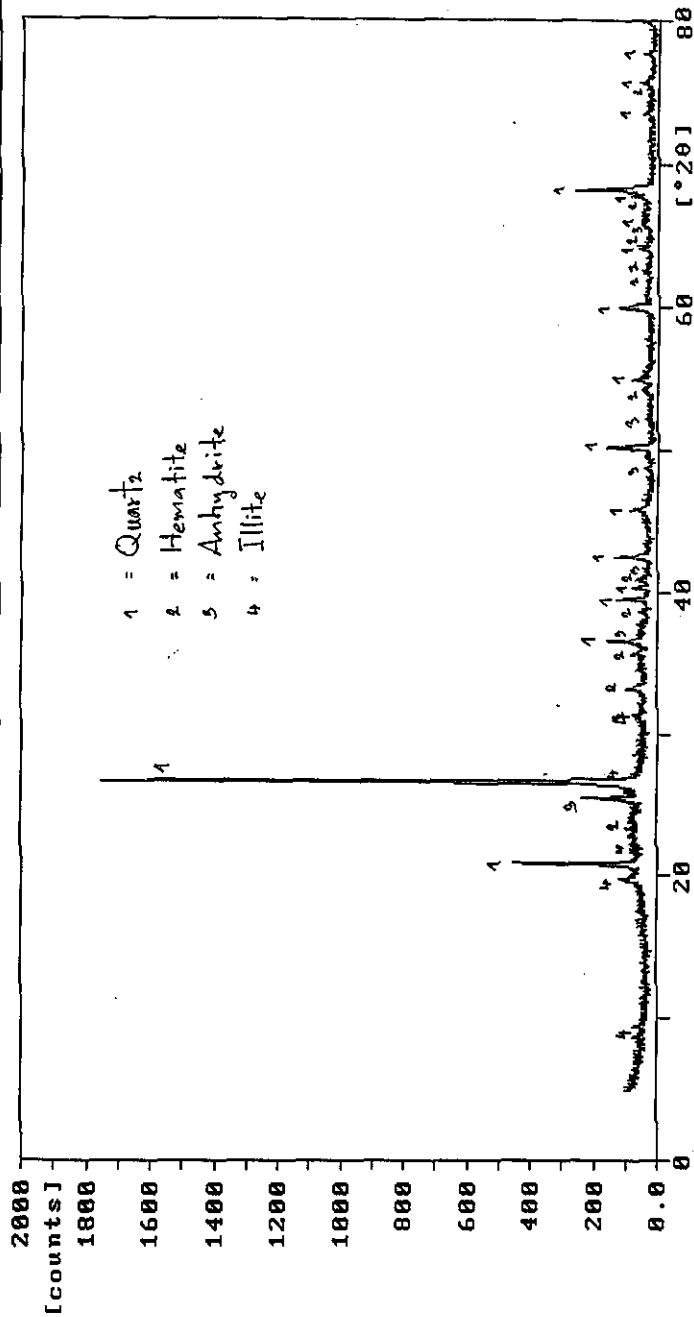
6-aug-1998 22:03



COM-147.RD

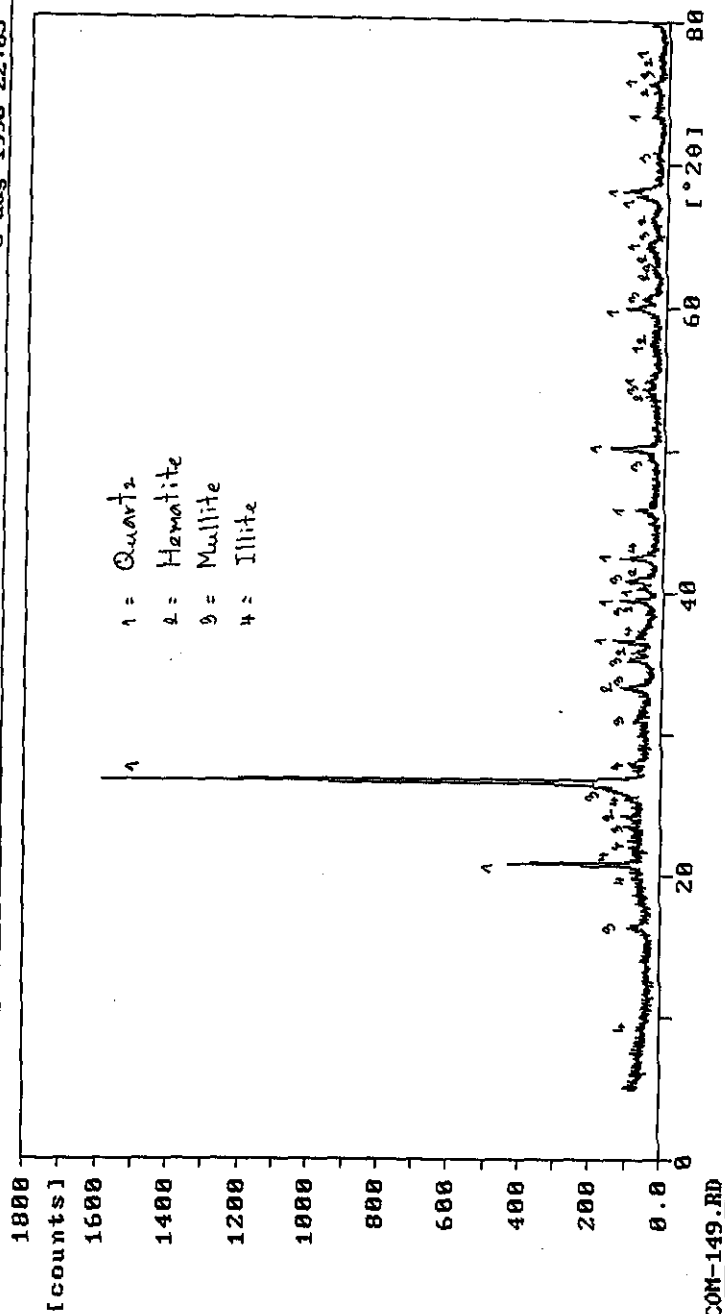
Sample identification: B(air 900C)

6-aug-1998 22:04



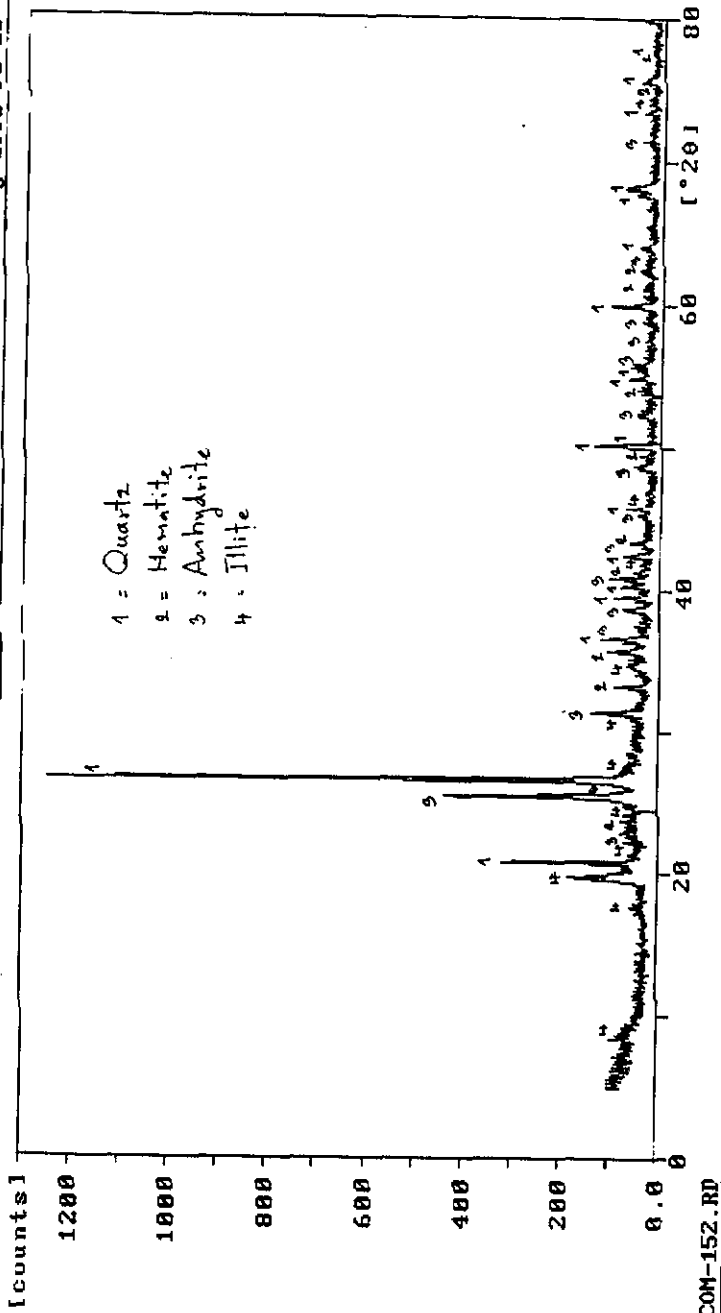
Sample identification: B(air 1000C)

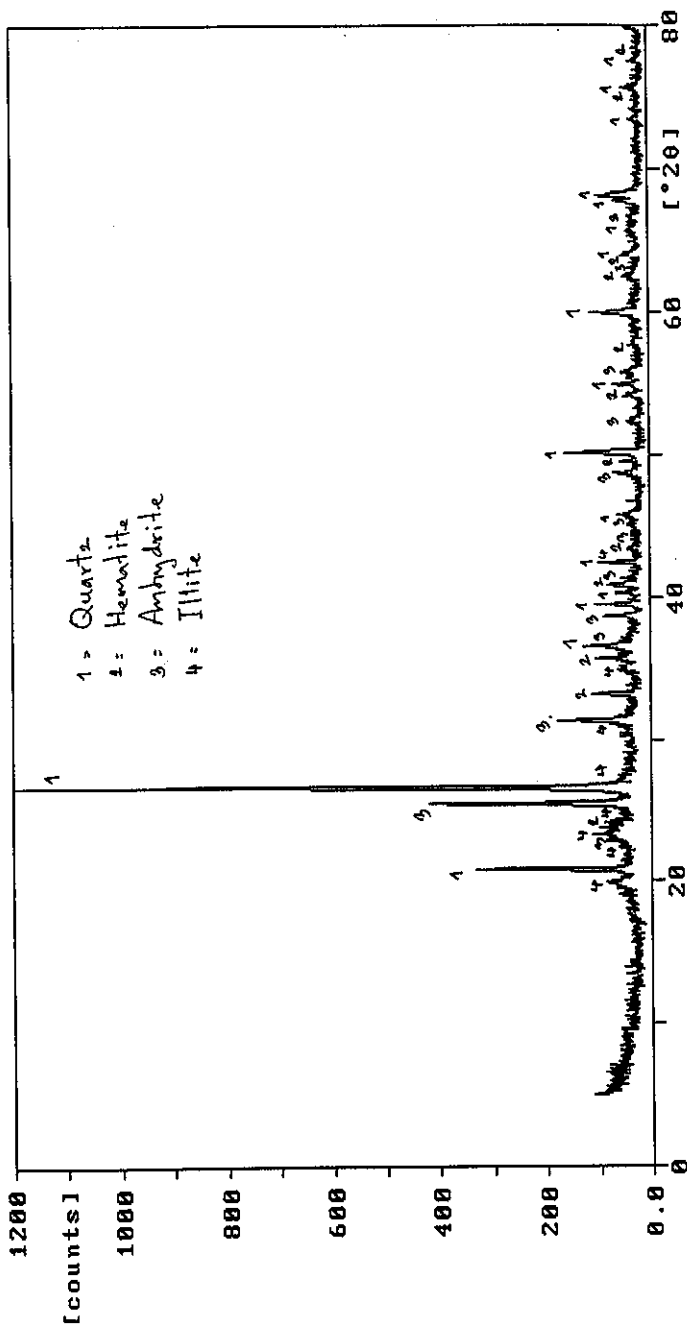
6-aug-1998 22:05



Sample identification: Ash.C(ASTM)

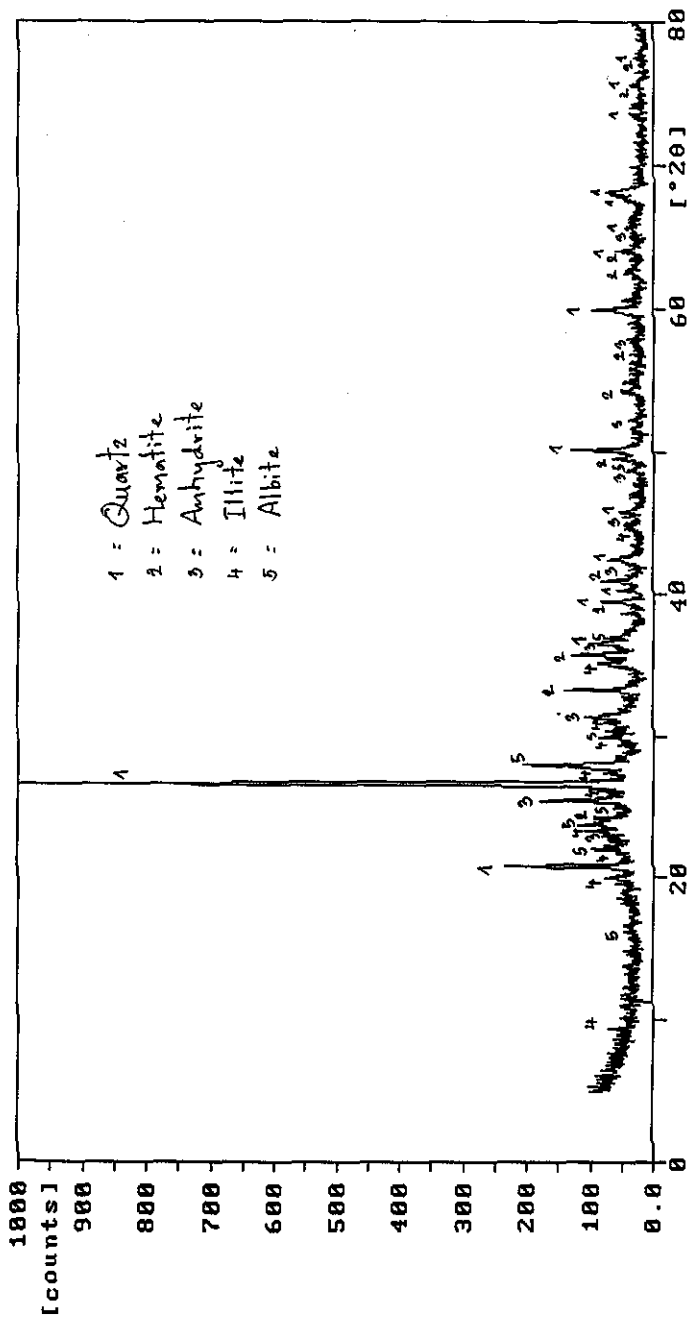
6. aug-1998 22:18





Sample Identification: C(air 1000C)

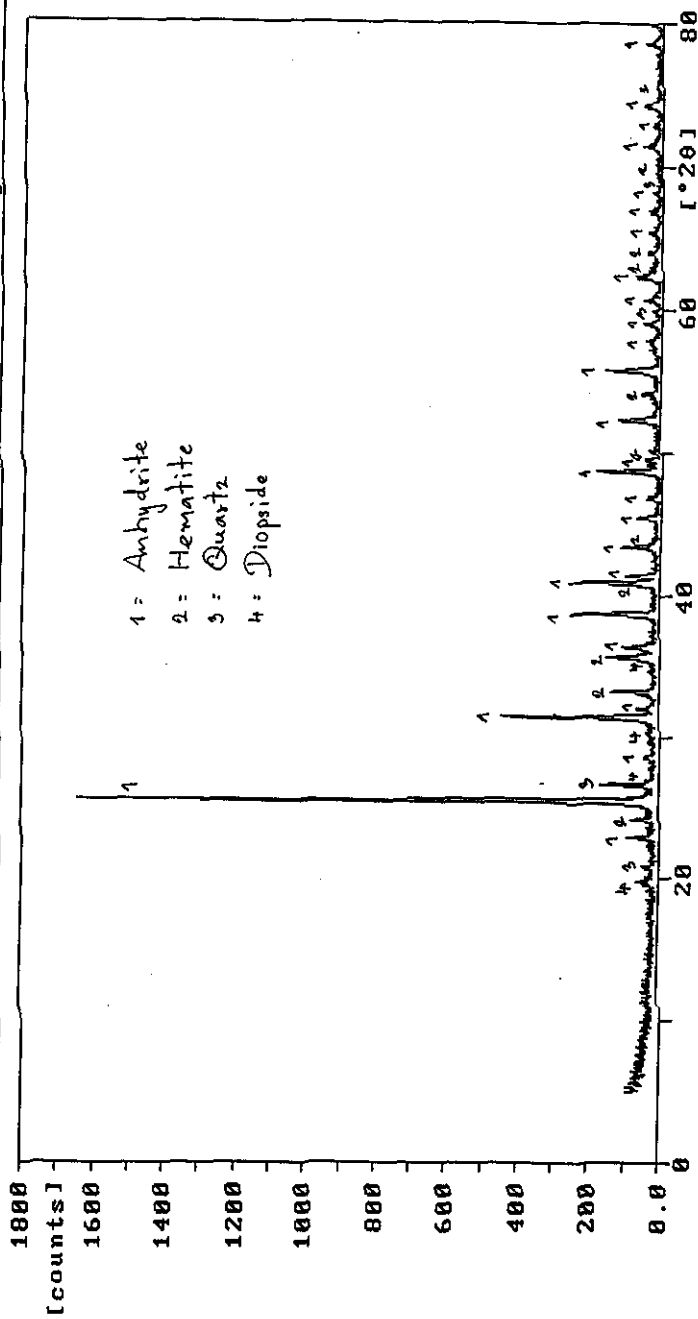
6-aug-1998 22:18



COM-154.RD

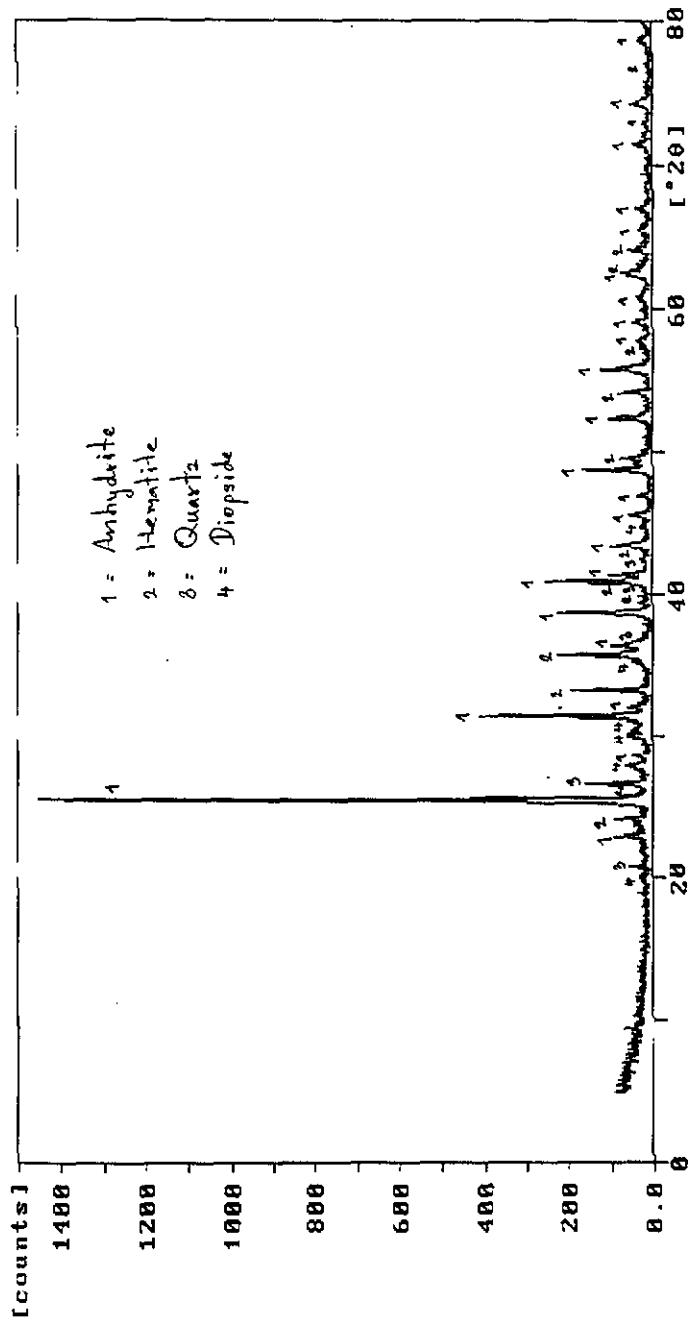
Sample identification: Ash.D (ASTM)

6-aug-1998 22:22



Sample Identification: D (air 988C)

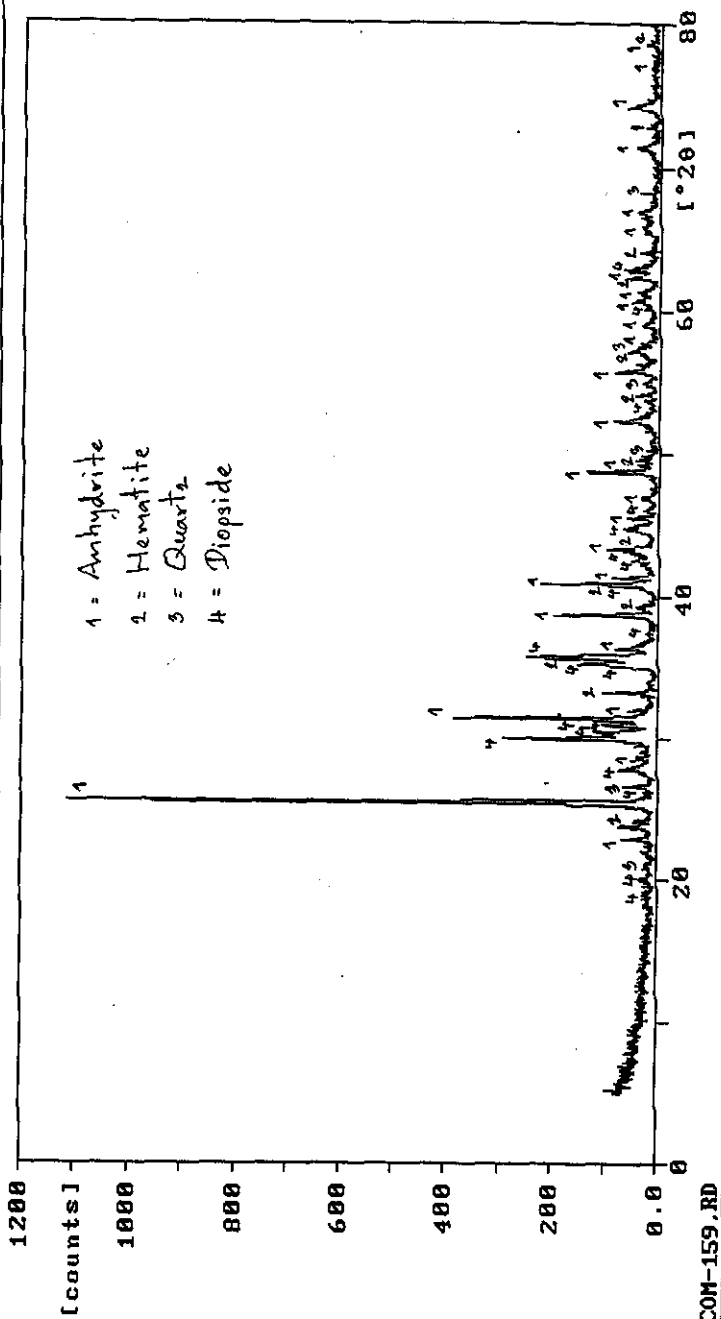
6-aug-1998 22:23

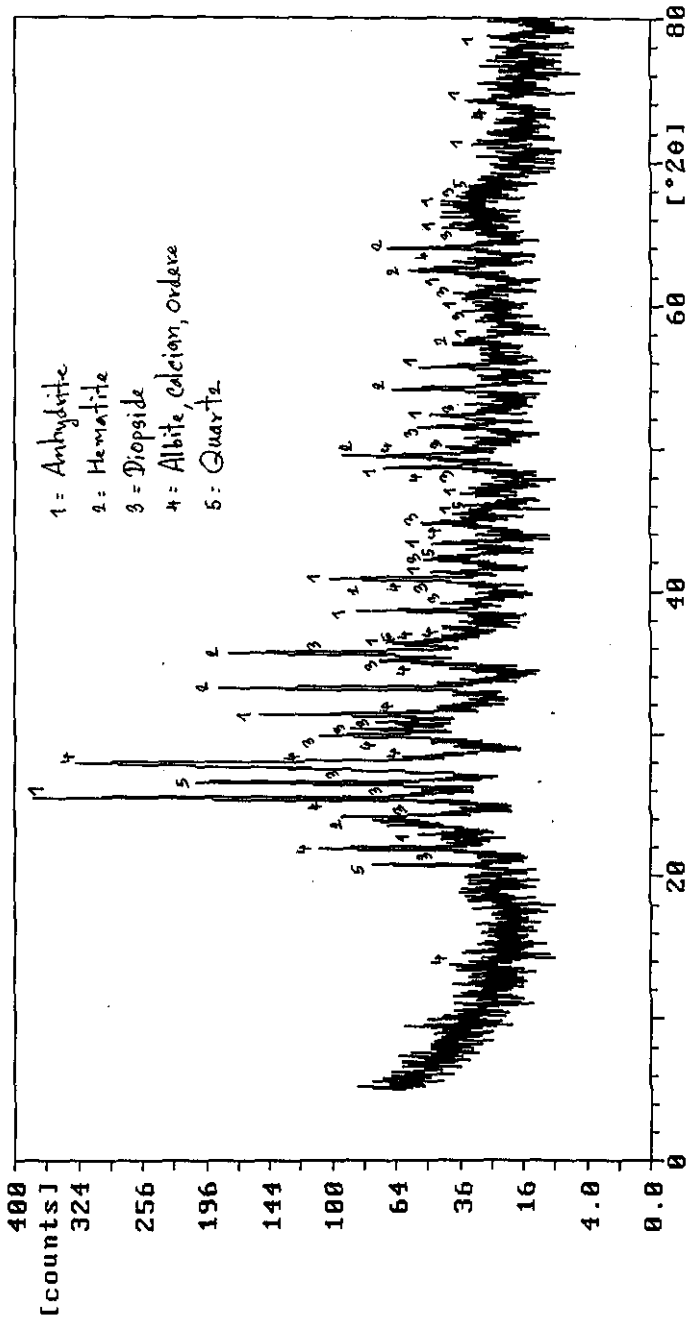


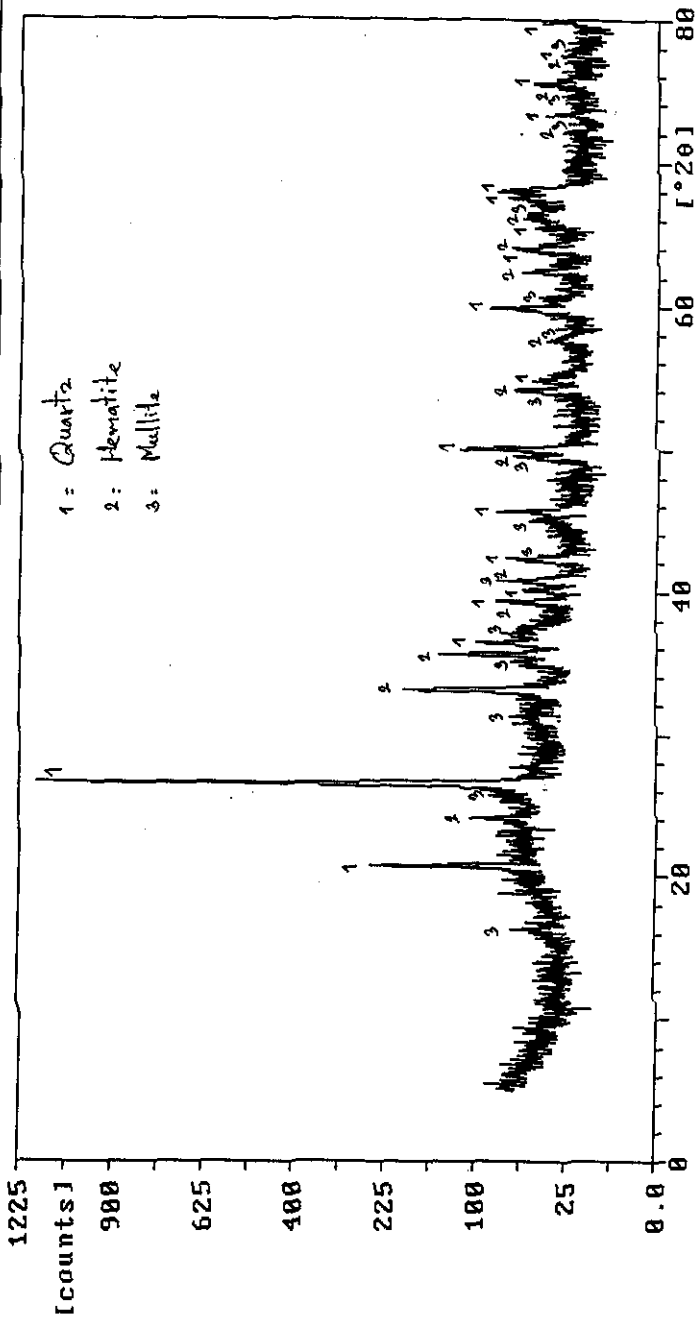
COM-158.RD

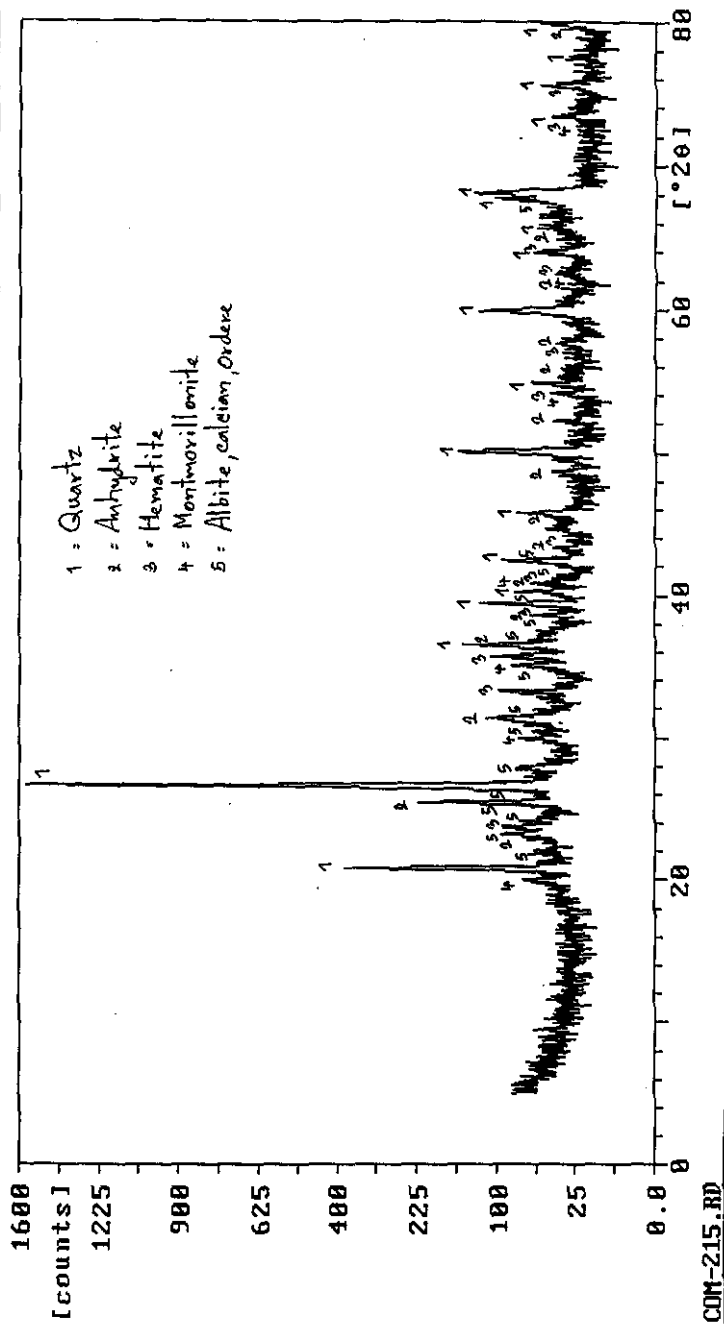
Sample identification: D (air 1000C)

6-aug-1998 22:25



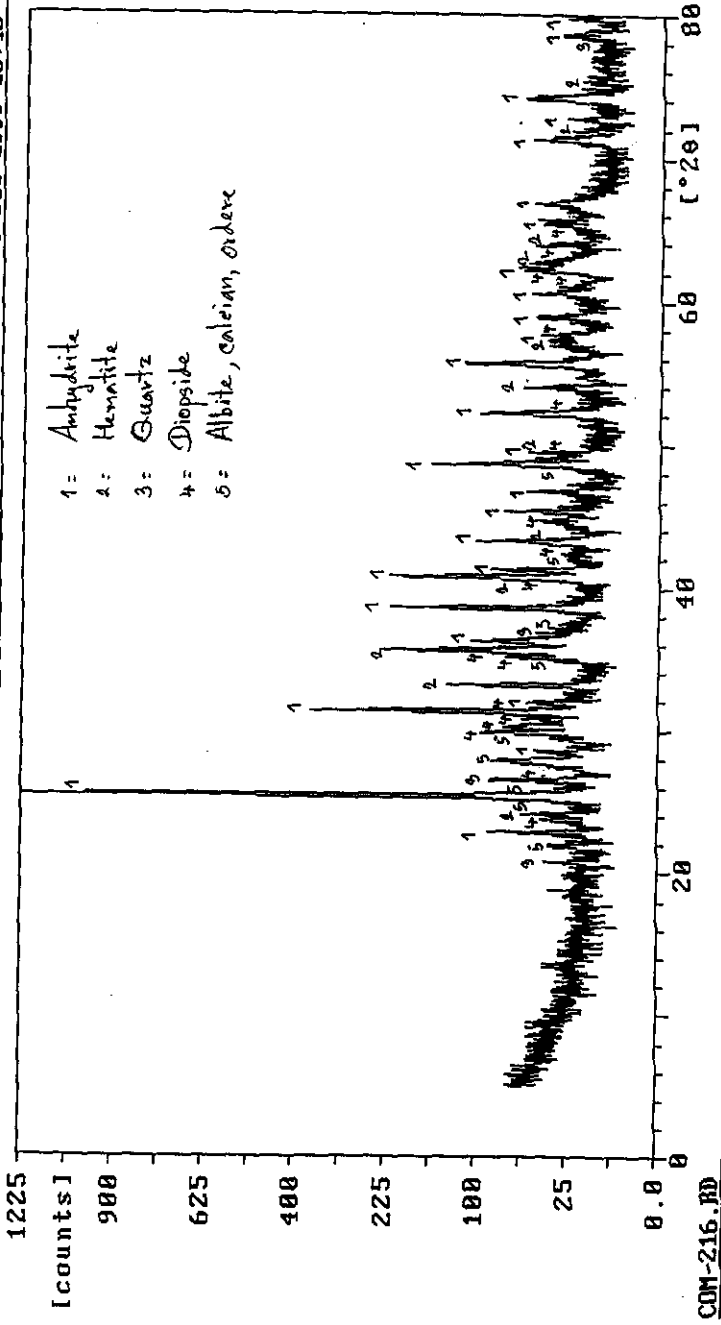






Sample identification: No. DG 2

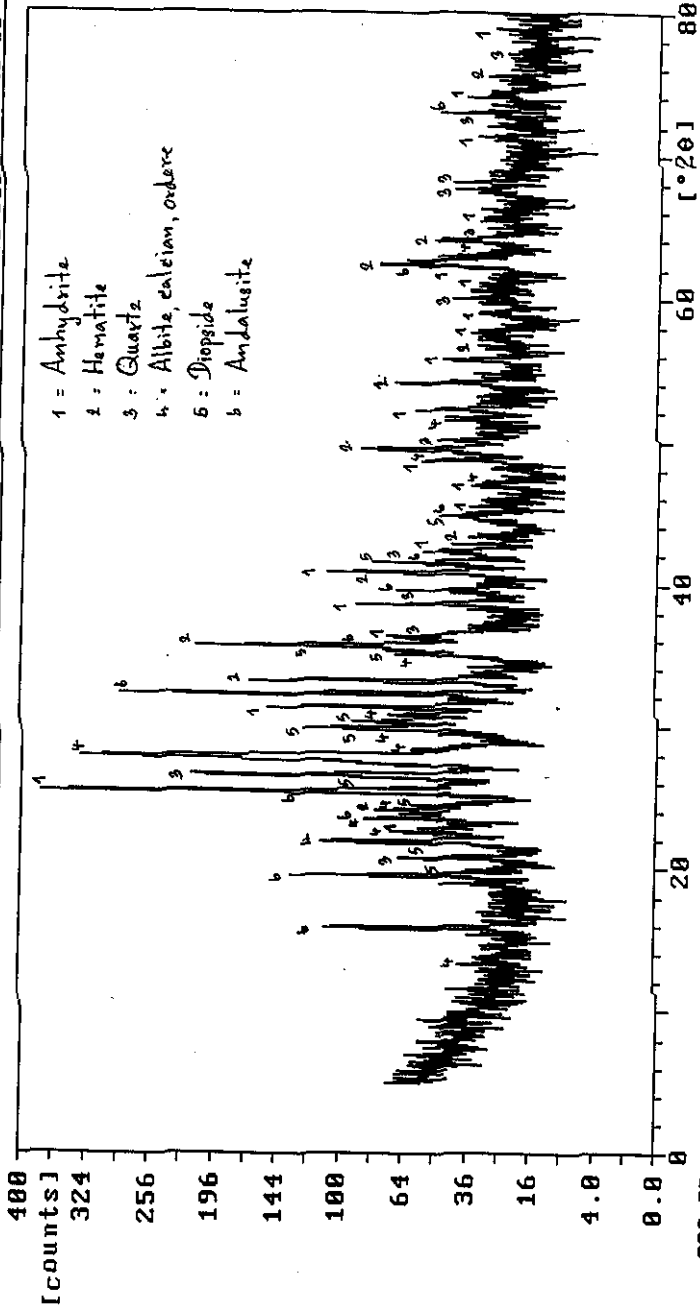
16-Dec-1999 13:40



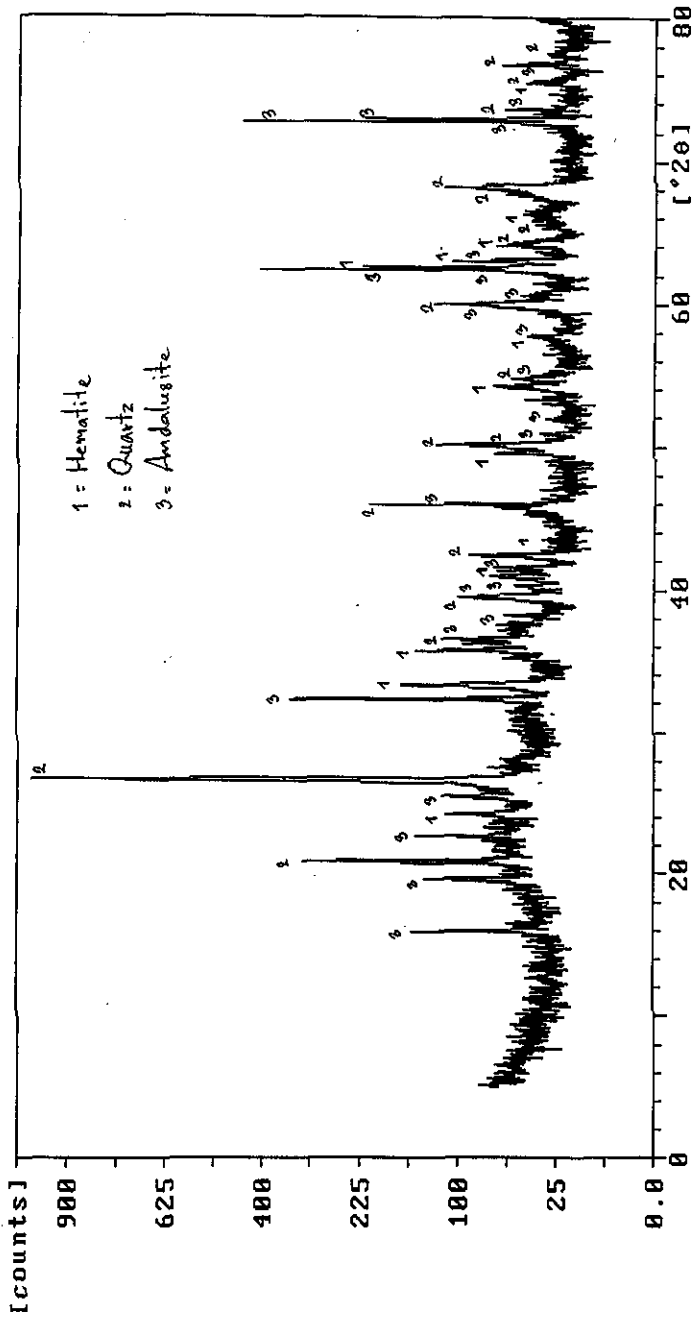
COM-216.BD

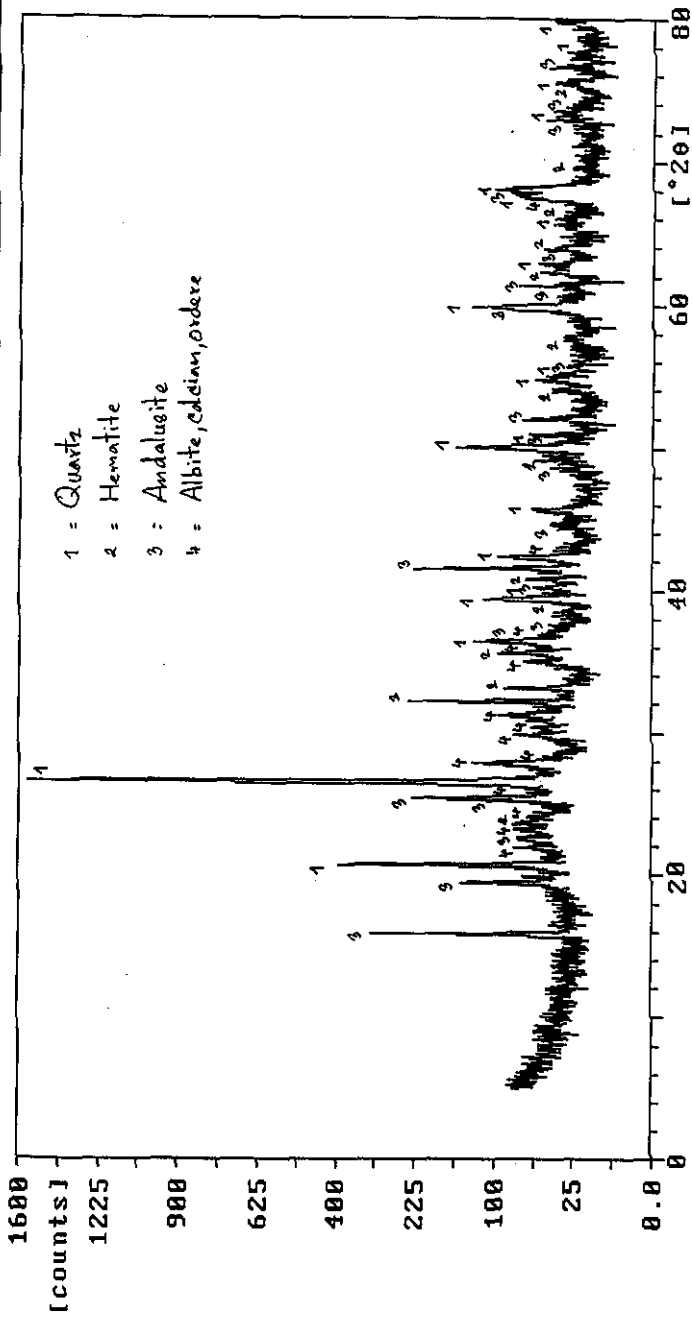
16-Dec-1999 13:36

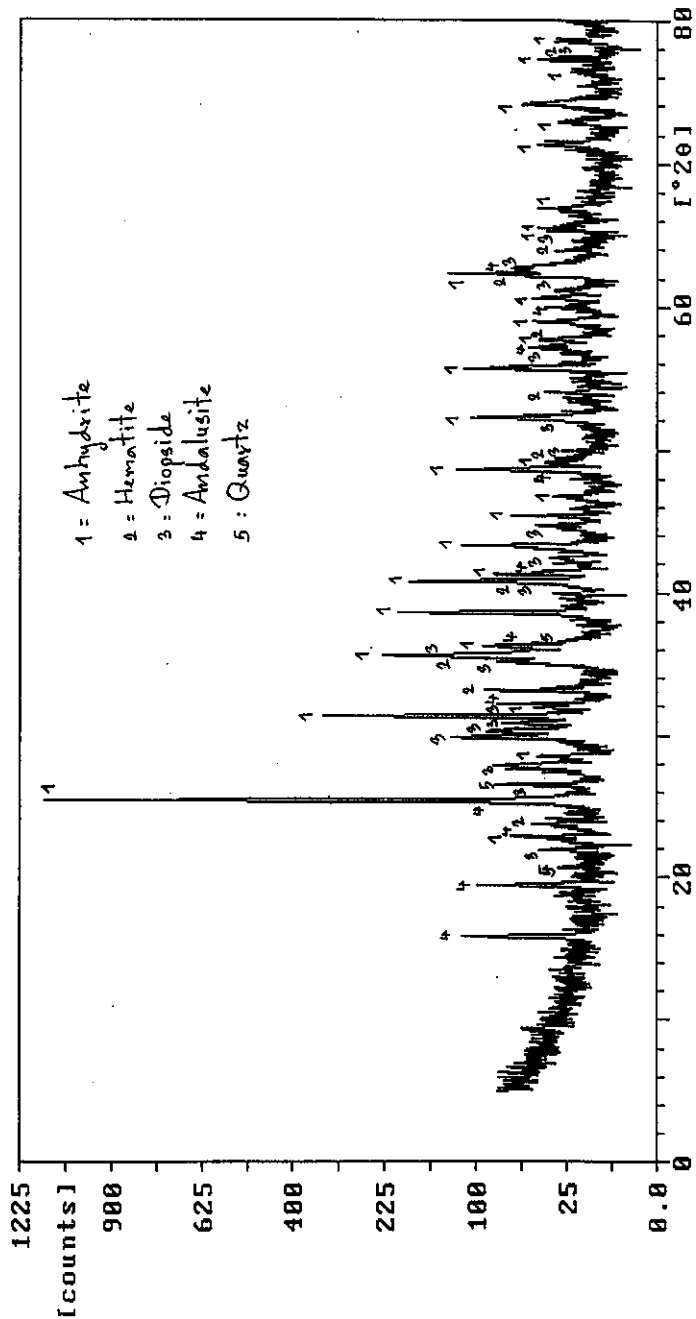
Sample identification: No.002

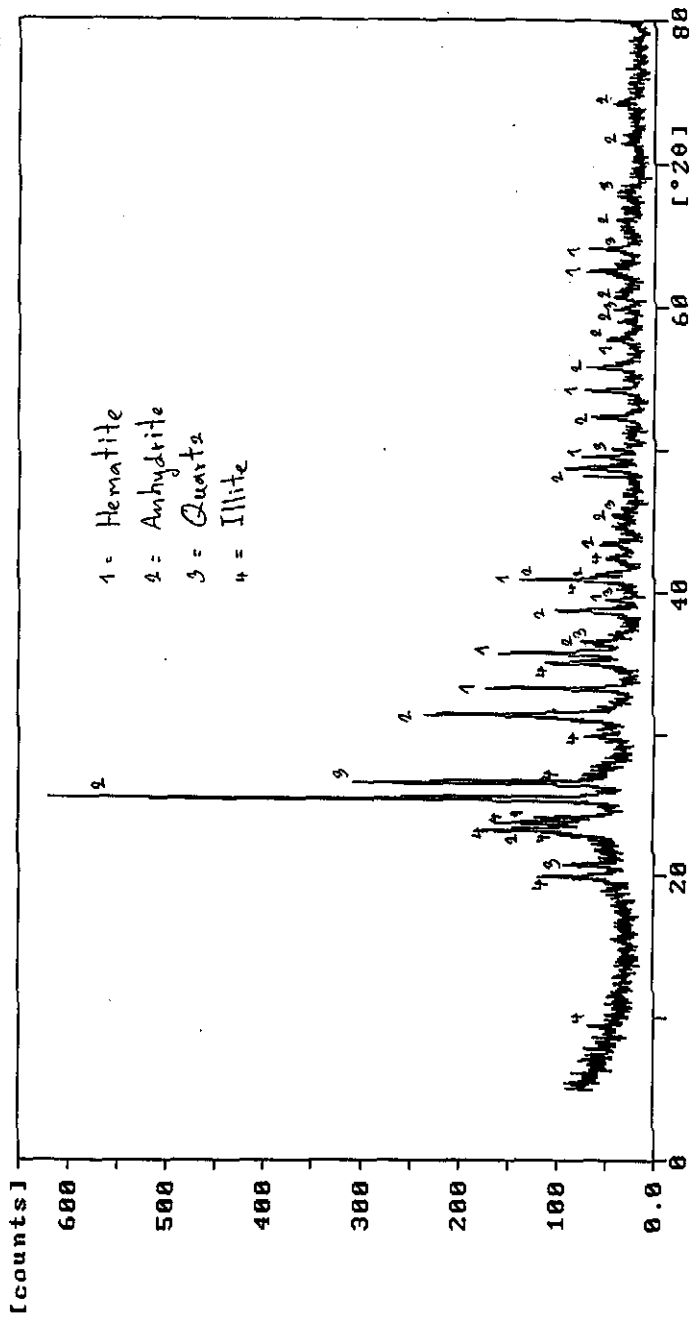


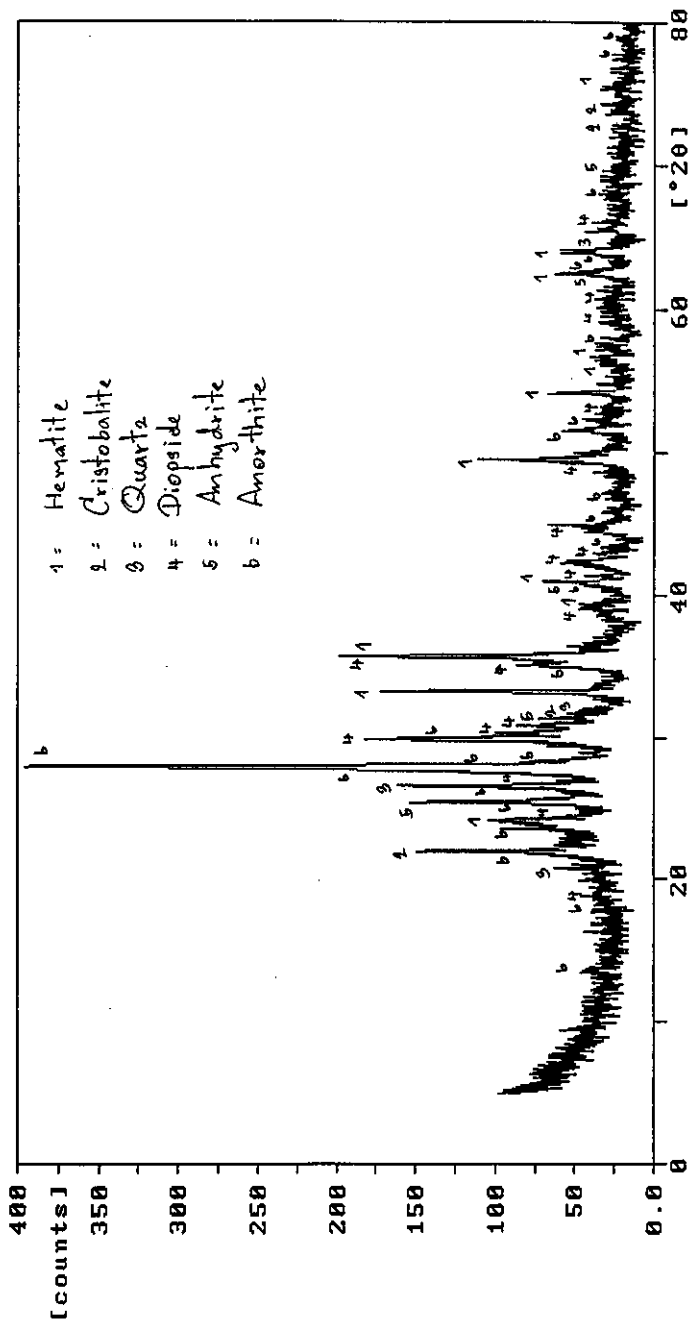
COM-209.RD





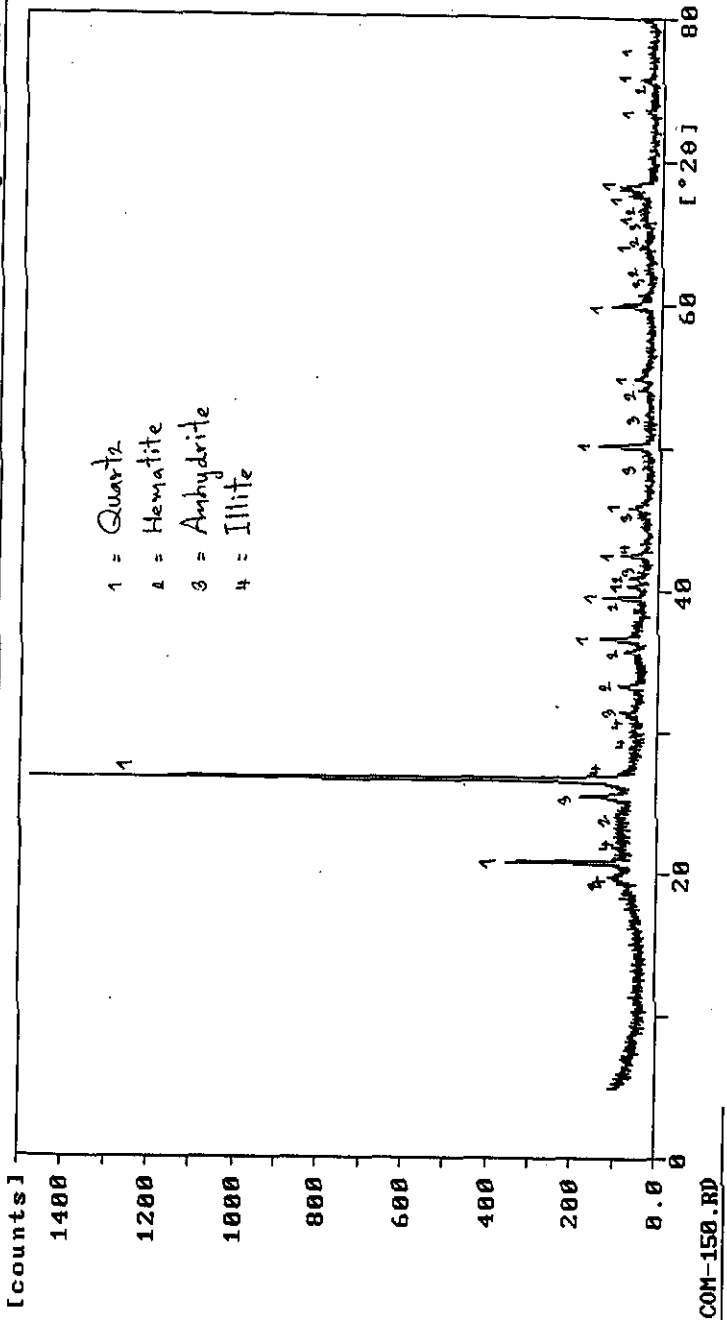






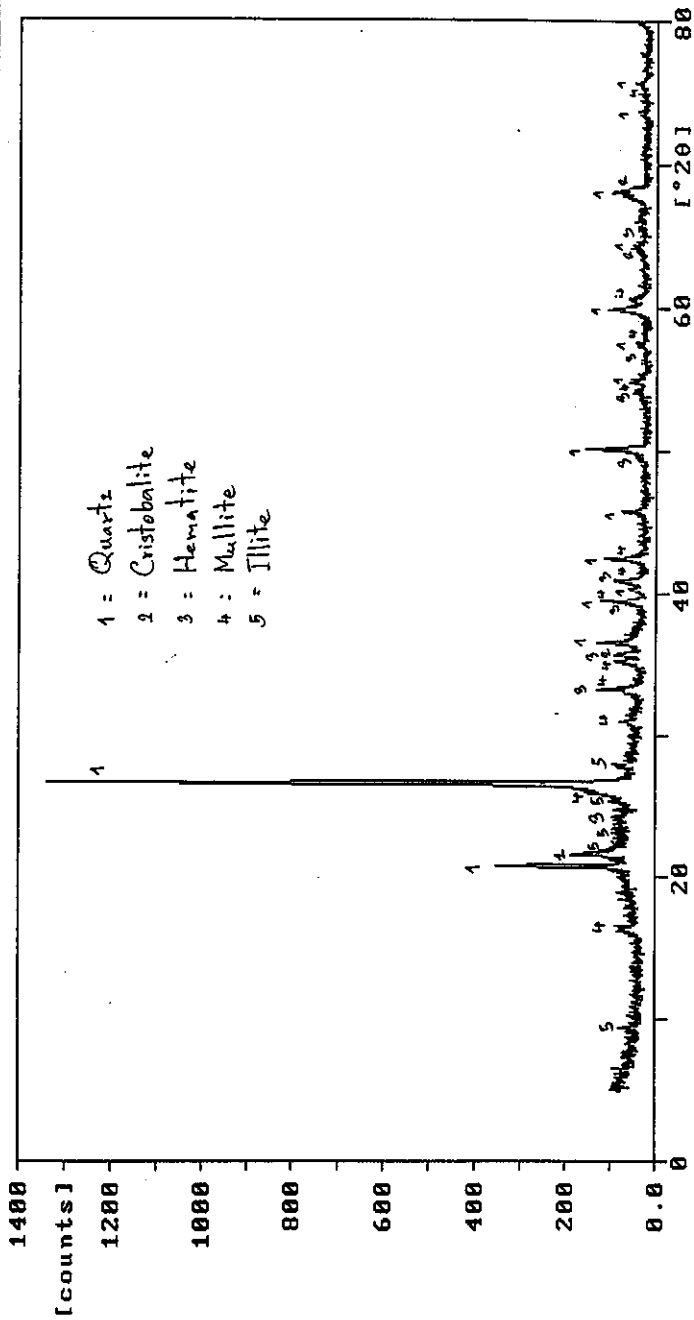
Sample identification: BS(air 900C)

6-aug-1998 22:07



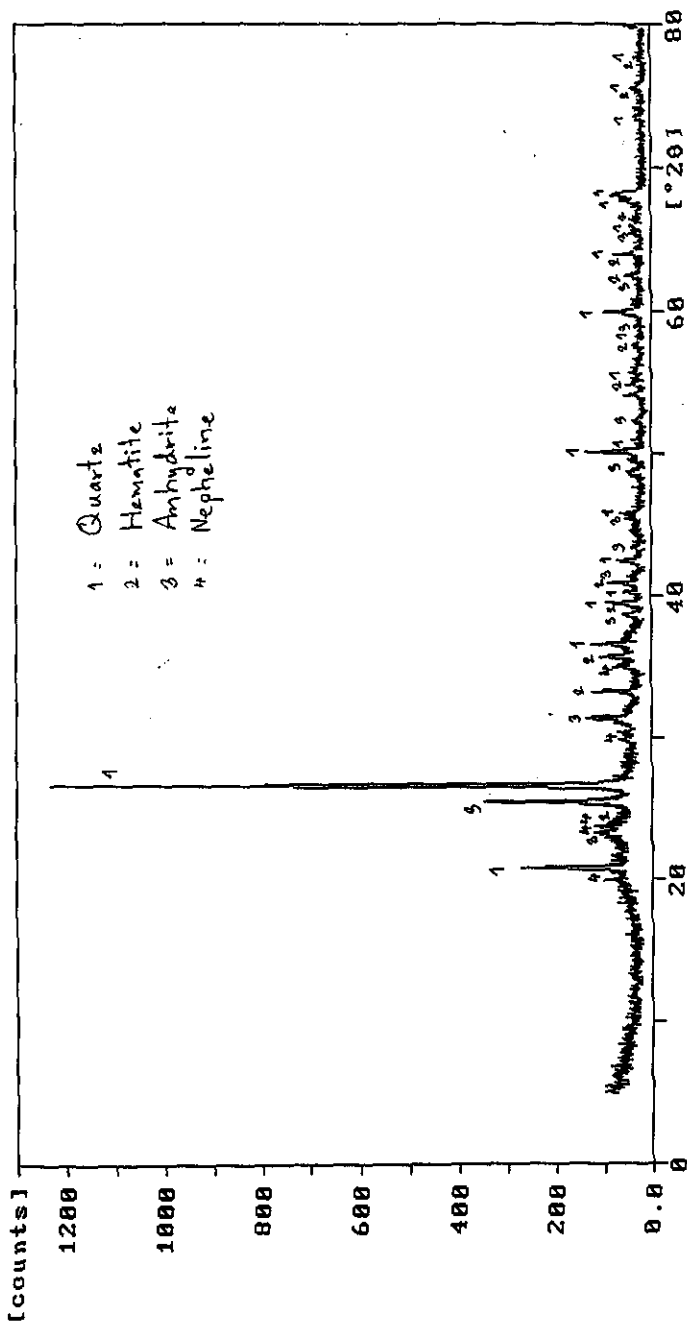
Sample identification: BS(air 1000C)

6-aug-1998 22:08



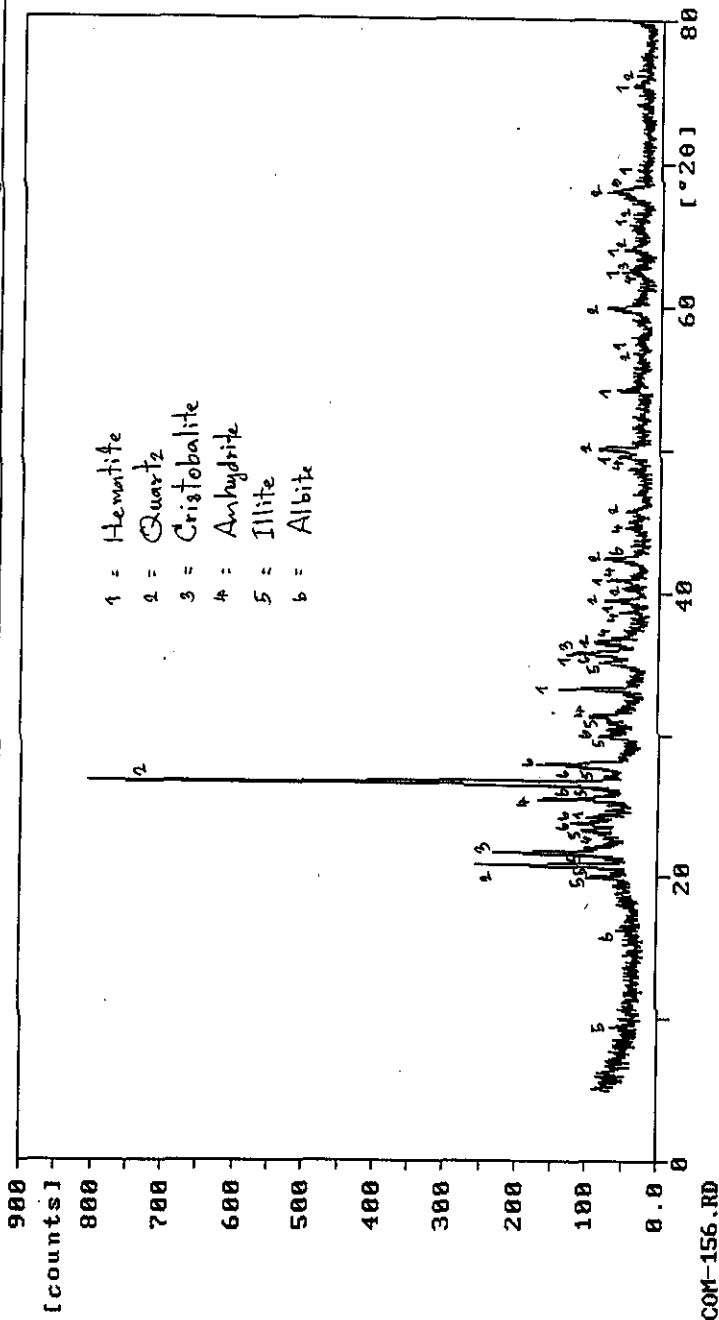
Sample identification: CS (air 980C)

6-aug-1998 22:19



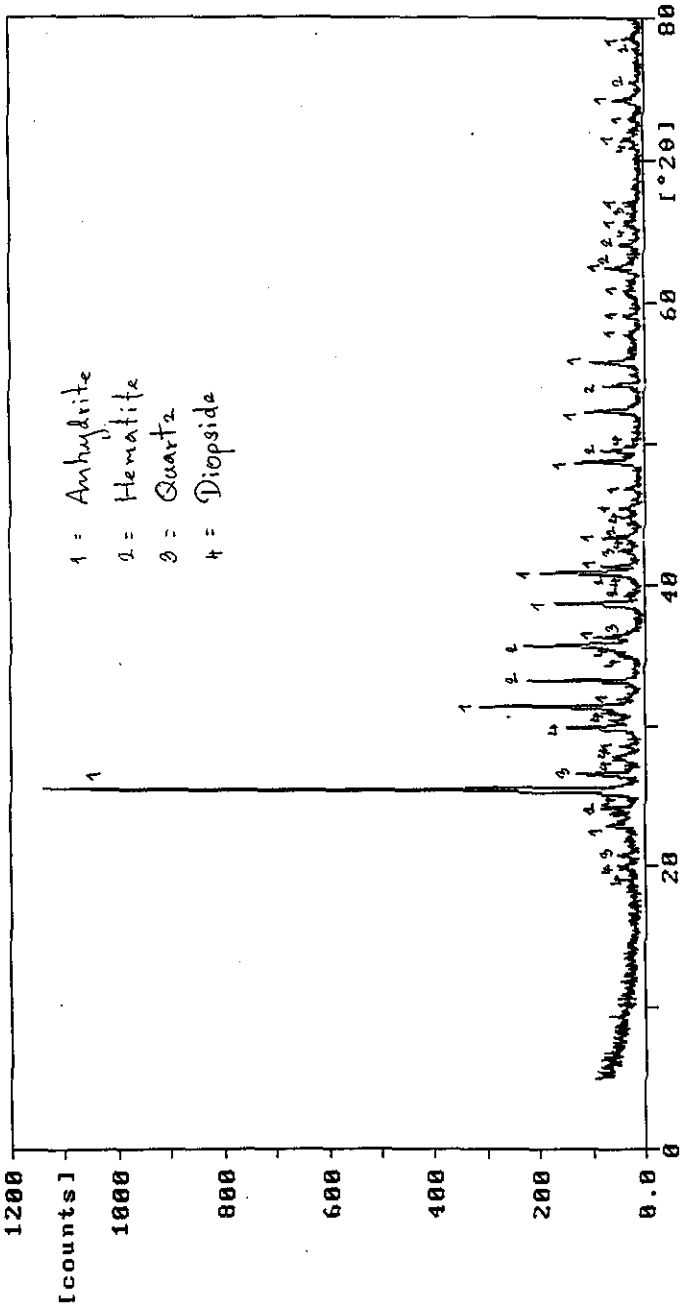
Sample identification: CS(air 1000C)

6-aug-1998 22:21



Sample identification: DS (air 988C)

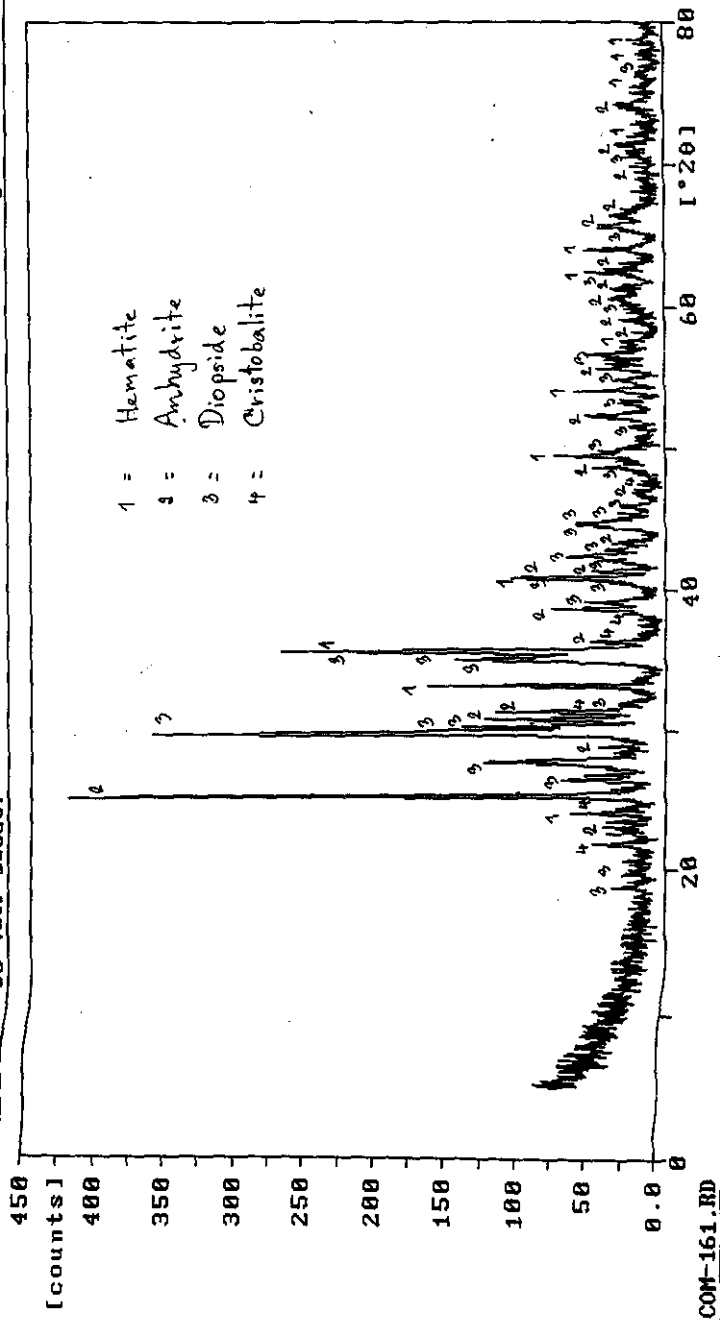
6-aug-1998 22:26

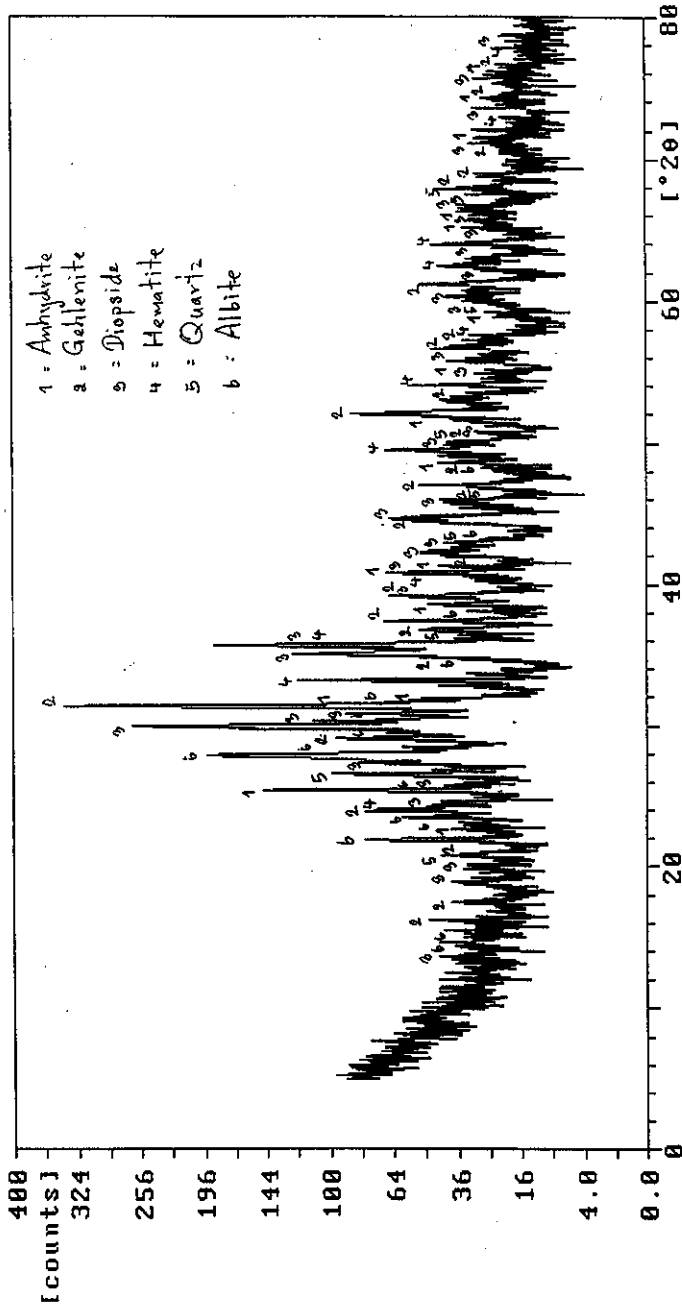


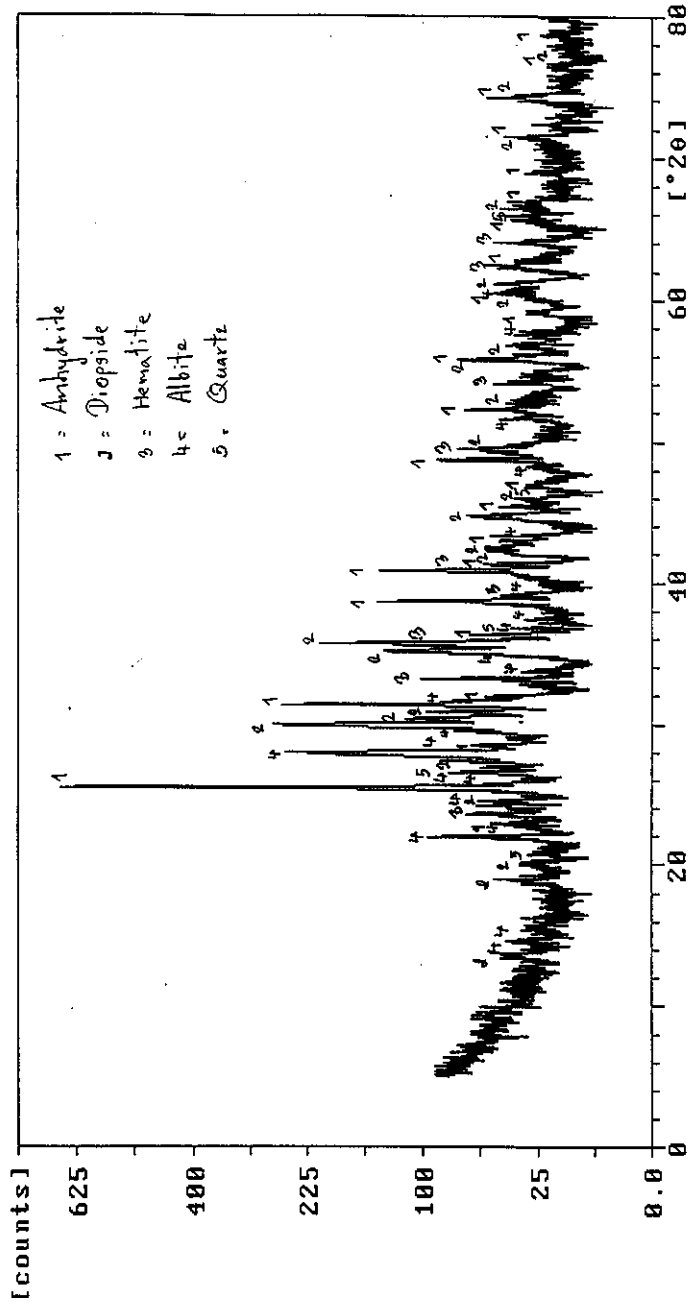
COM-160.RD

Sample identification: DS (air_1000C)

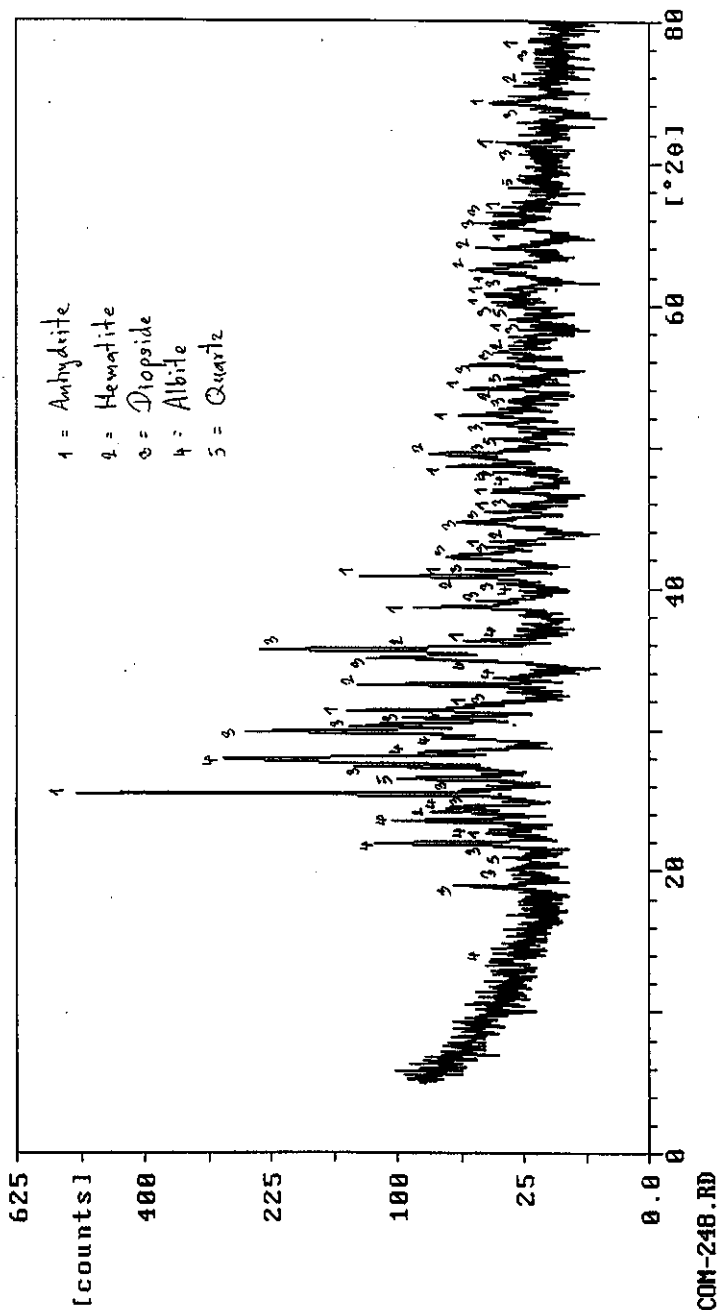
6-aug-1998 22:27





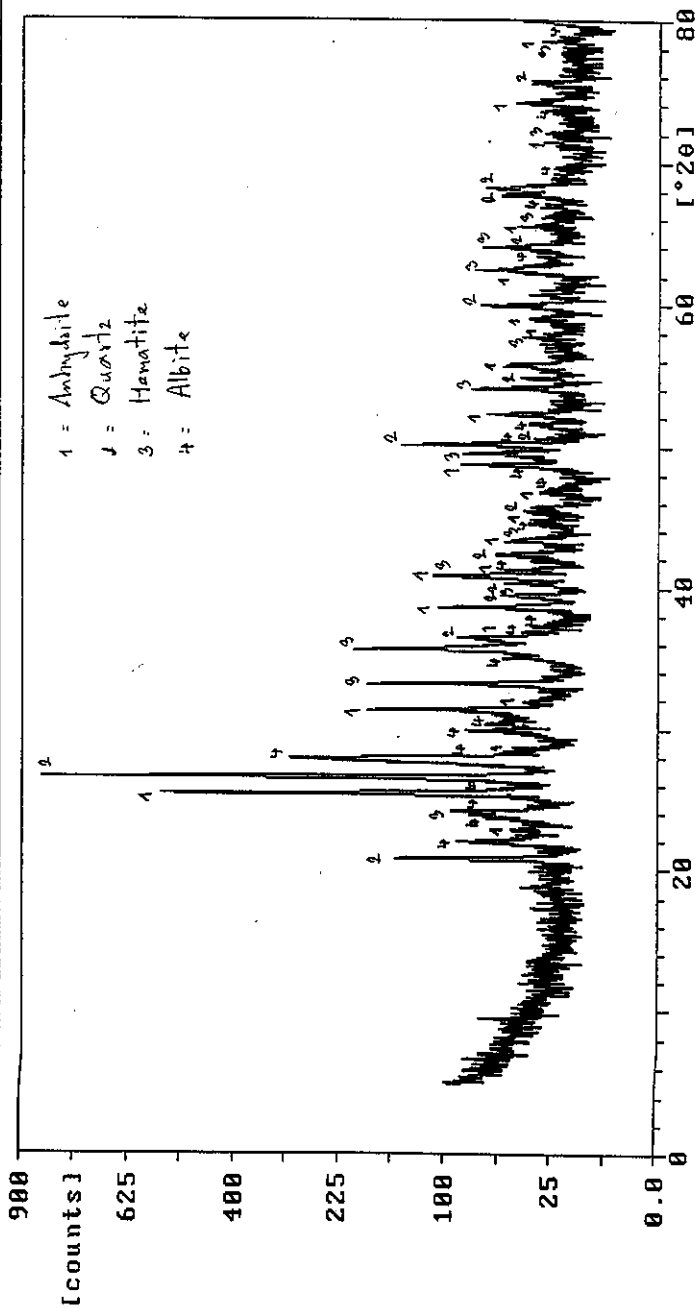


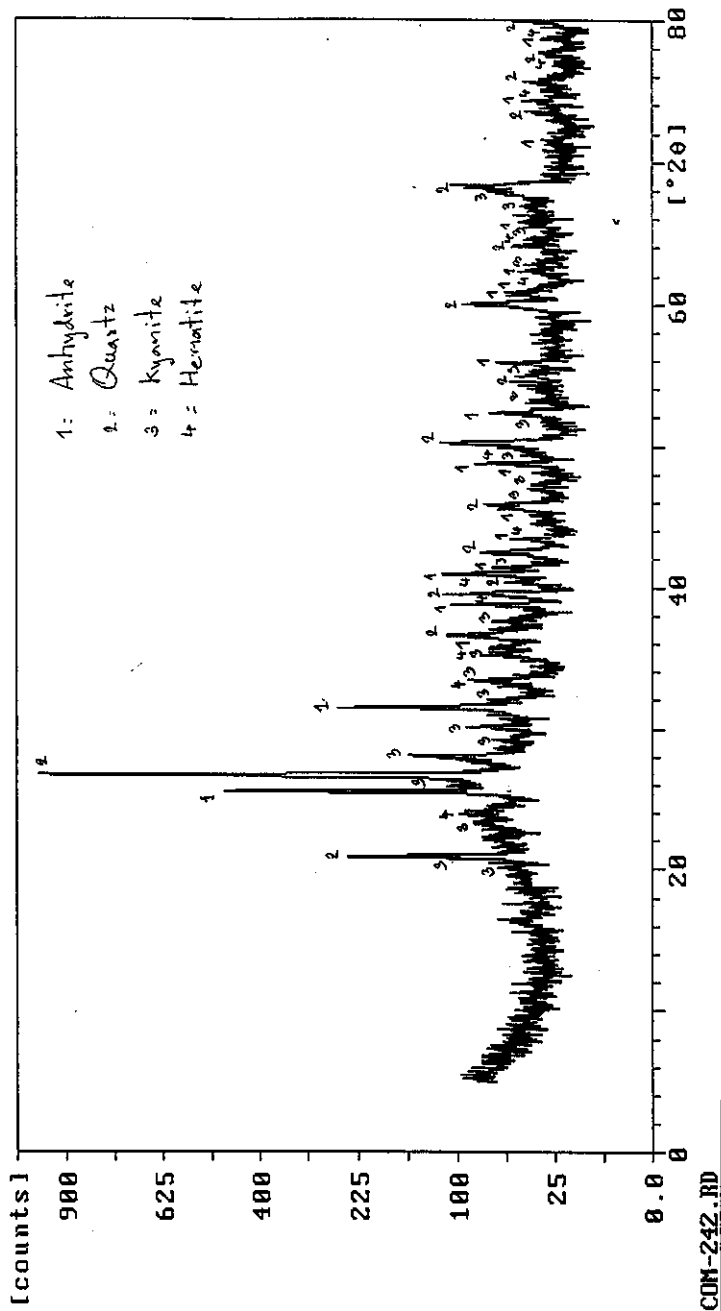
Sample identification: MCS 2 18-Feb-2000 21:04



18-Feb-2000 21:03

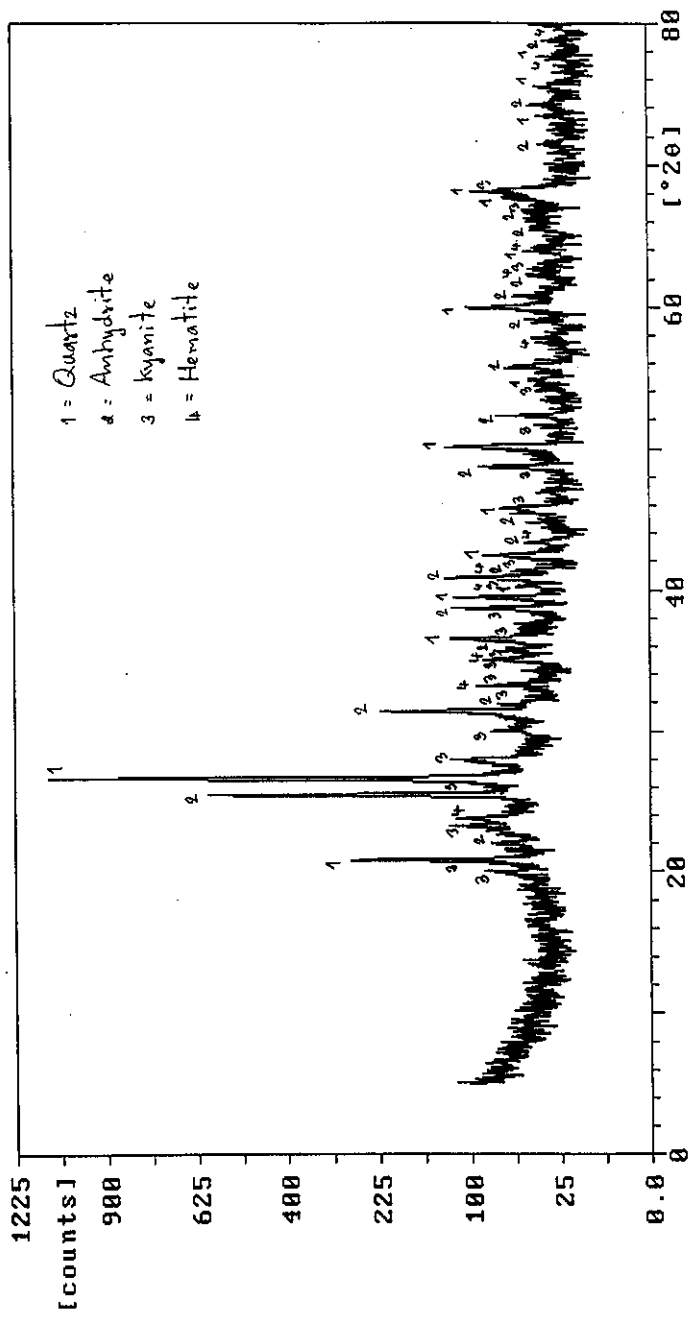
Sample identification: MFS 2





18-Feb-2000 21:05

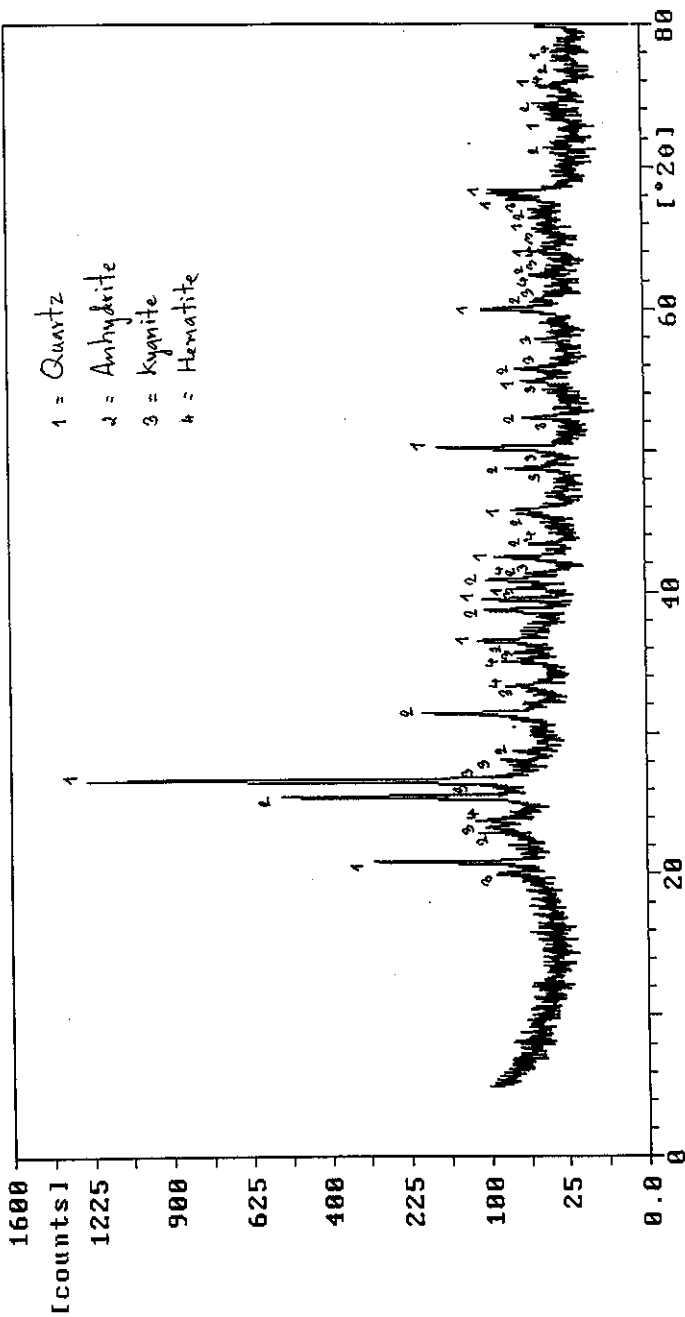
Sample identification: BCD2



COM-243.RD

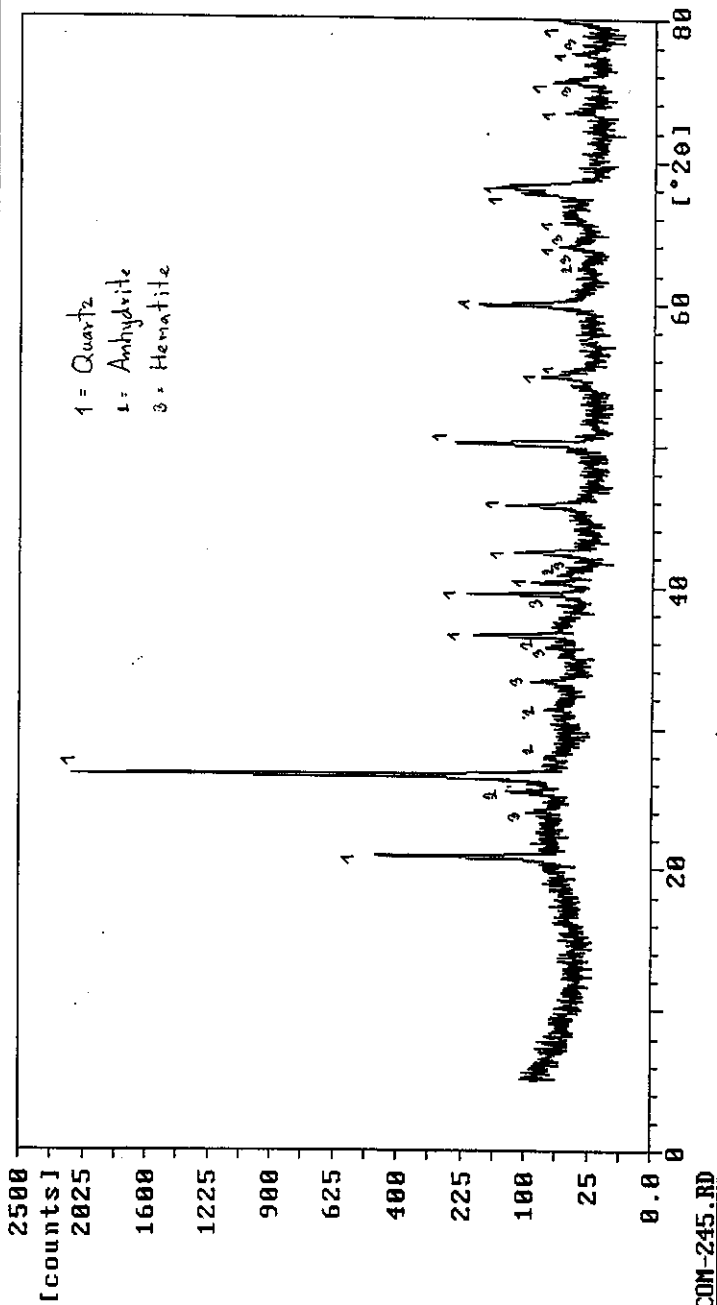
18-Feb-2000 21:05

Sample identification: BCS 2



COM-244.RD

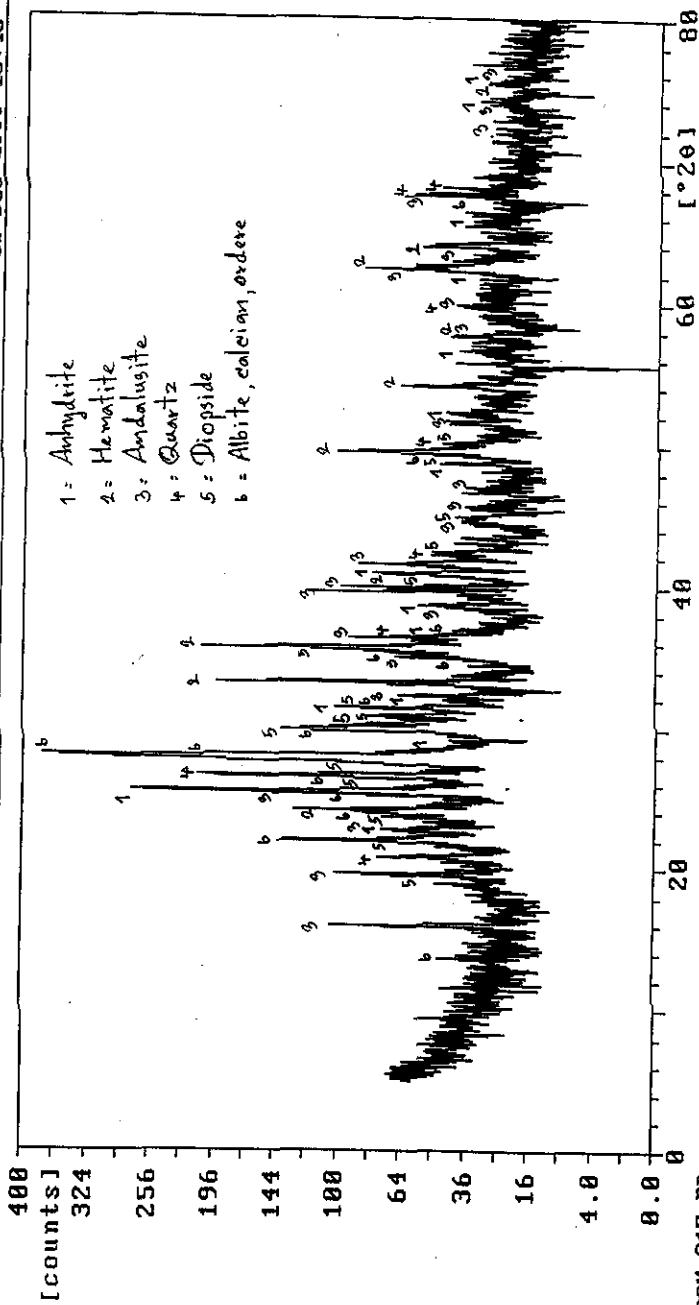
18-Feb-2000 21:05



Sample identification: BFS 2

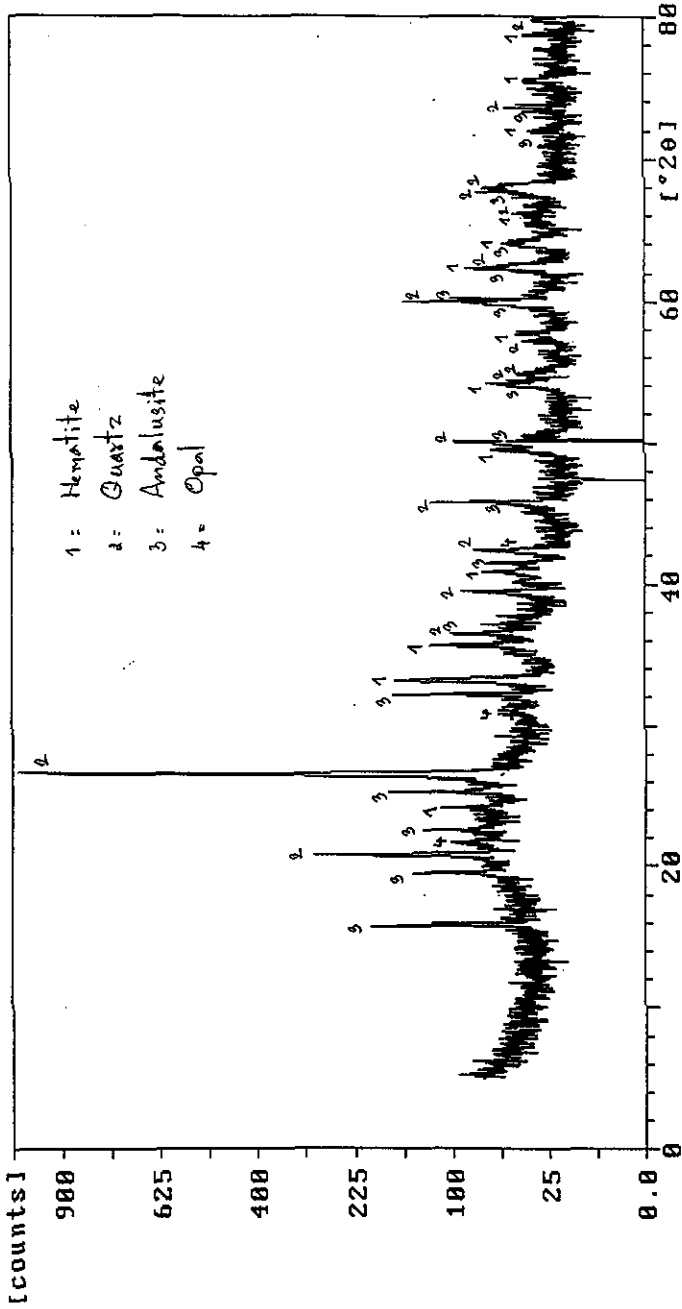
Sample identification: No. ASA 2

16-Dec-1999 13:40



16-Dec-1999 13:41

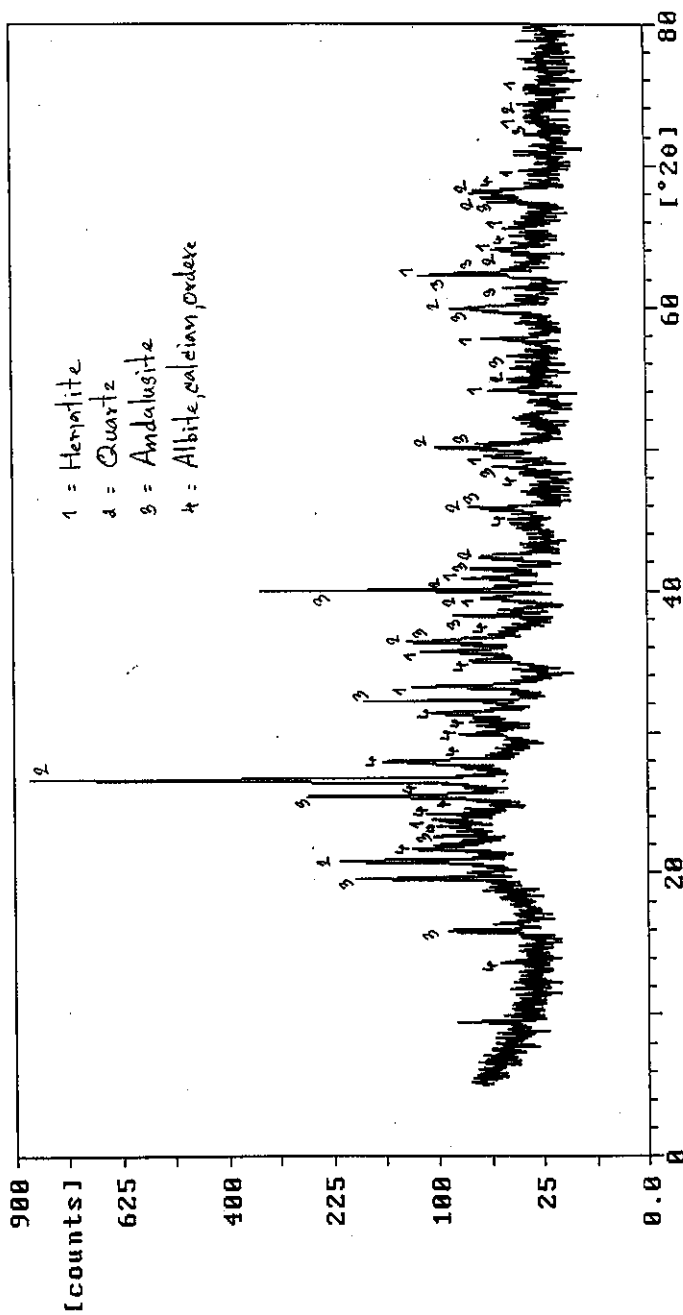
Sample identification: No. BSA 2



COM-218.RD

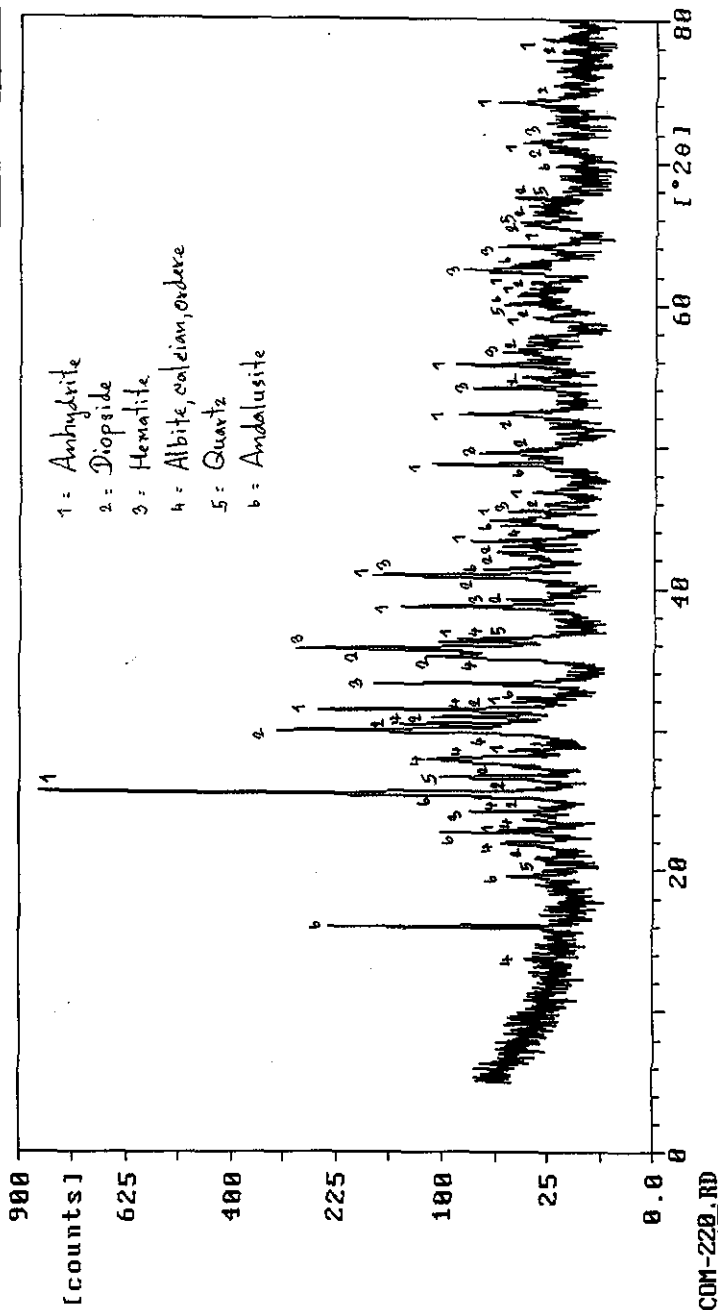
20-Dec-1999 22:46

Sample identification: No. CSA 2



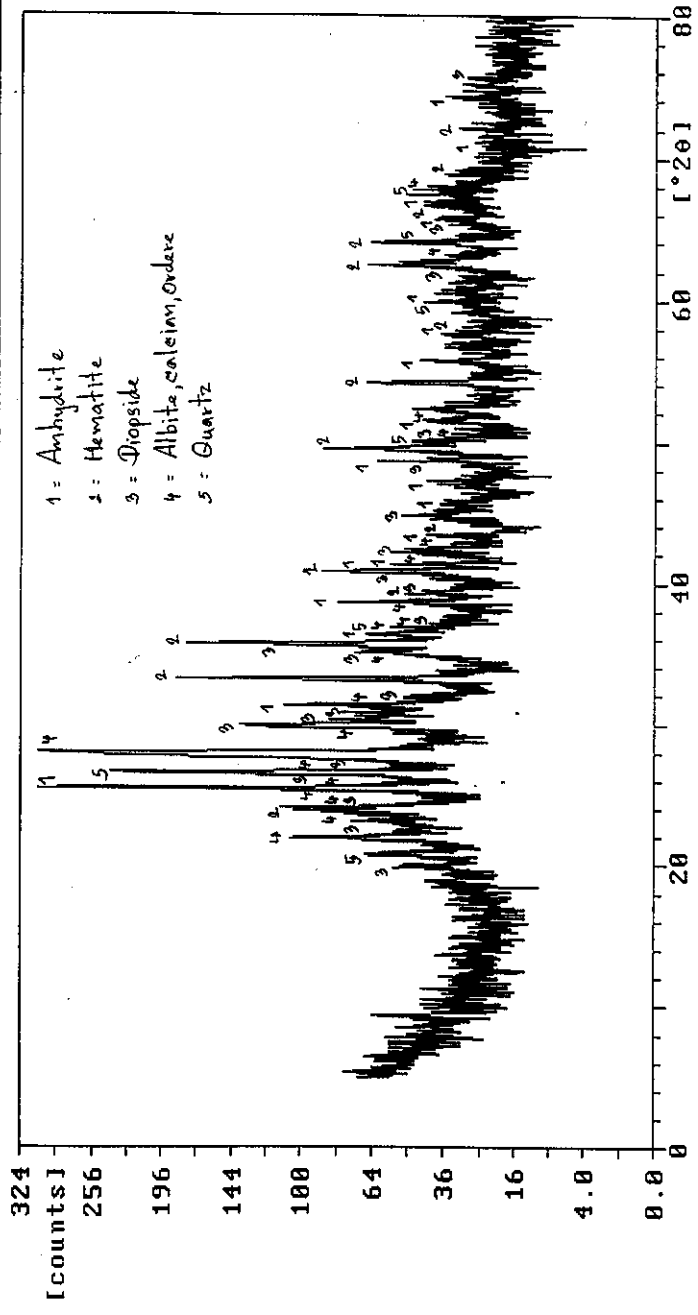
Sample identification: No. DSN 2

16-Dec-1999 13:42



Sample Identification: No. ASG 2

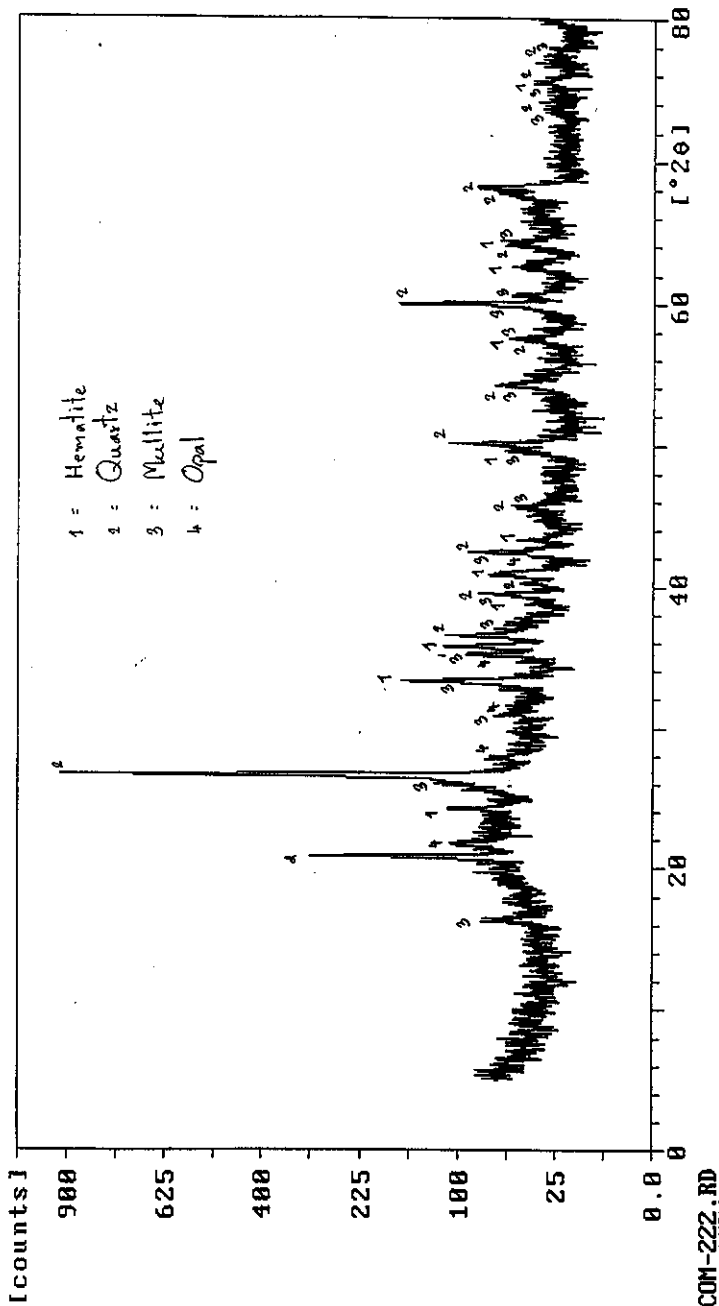
16-Dec-1999 13:42



COM-221.RD

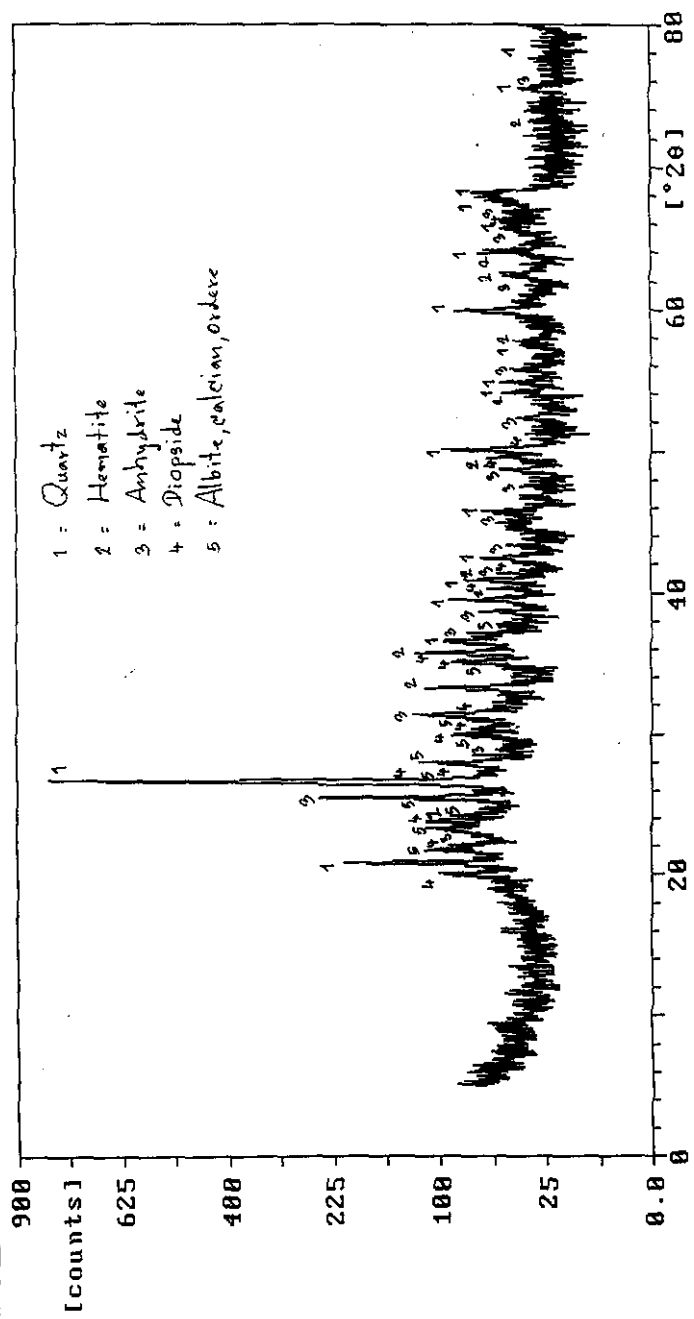
Sample identification: No. BSG 2

16-Dec-1999 13:42

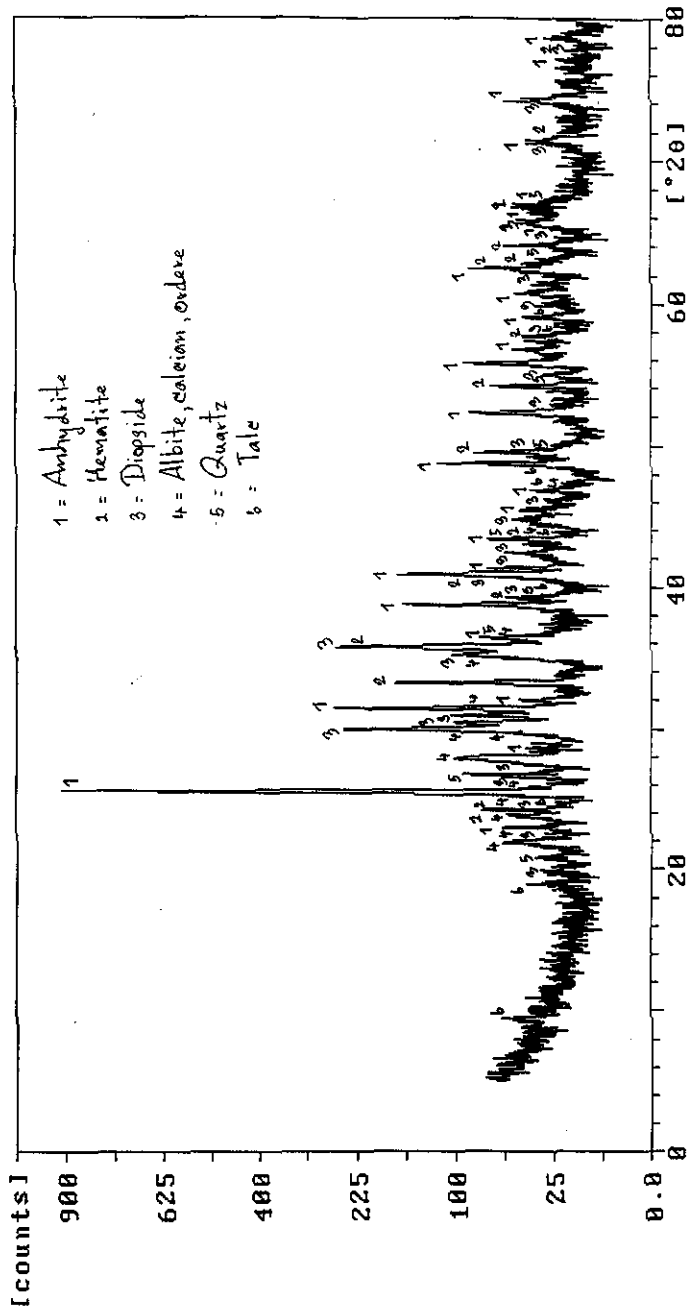


Sample identification: No. CSG 2

16-Dec-1999 13:43



COM-223.RD



ภาคผนวก ข

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

1. ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, มาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย พฤติกรรมการเกิดซินเทอร์ริงของเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะเผาไหม้ระบบฟลูอิไดซ์เบด, การประชุมวิศวกรรมเคมีแห่งชาติครั้งที่ 8, มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพฯ, 17-18 ธันวาคม, 2541.
2. Tangsathitkulchai, C., Tangsathitkulchai, M.(1999) Effect of Fluidized Bed Materials on the Sintering Behaviour of Coal Ashes, Regional Symposium on Chemical Engineering, Prince of Songkla University, Songkla, November 22-24.
3. Tangsathitkulchai, C., Tangsathitkulchai, M.(2000) Effect of Bed Materials and Additives on the Sintering of Coal Ashes Relevant to Agglomeration in Fluidized Bed Combustion, submitted for publication to Fuel Processing Technology.

ประวัตินักวิจัย

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัยและผู้ร่วมวิจัย

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

นายชัยยศ ตั้งสติศย์กุลชัย (Chaiyot Tangsathitkulchai)

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์และหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบ	ระดับปริญญา	ชื่อปริญญา	สาขาวิชา	สถาบันที่จบ
พ.ศ. 2519	ตรี	วทบ.(เกียรตินิยม)	วิศวกรรมเคมี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2523	โท	M.App.Sc.	วิศวกรรมเคมี	University of Adelaide, Australia.
พ.ศ. 2529	เอก	Ph.D.	Mineral Processing	Pennsylvania State University, U.S.A.

สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

- เทคโนโลยีถ่านหิน
- การบดขยี้วัสดุ
- ถ่านกัมมันต์และการดูดซับ

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์

มีผลงานวิจัยด้านถ่านหินและเทคโนโลยีอนุภาคทั้งหมด 38 เรื่อง (ดังแนบ)

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

ชื่อเรื่อง	แหล่งทุน	ปีที่ทำเสร็จ	สถานภาพ
1. Improved Producer Gas Cleaning System	USAID	2533	ผู้ร่วมวิจัย
2. การพัฒนาระบบฟลูอิดไดซ์เบดหมุนเวียน	สภาวิจัยแห่งชาติ	2535	หัวหน้าโครงการ
3. ระบบผลิตพลังงานความร้อนจากแกลบข้าว	สภาวิจัยแห่งชาติ	2537	ผู้ร่วมวิจัย
4. การพัฒนาหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก	ASEAN-Australia	2537	ผู้ร่วมวิจัย
5. การจำแนกแฉะลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมจากแม่เมาะเพื่อใช้ในงานคอนกรีต	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	2538-2541	ผู้ร่วมวิจัย

งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

เรื่อง	แหล่งทุน	ระยะเวลา	สถานภาพ
1. กระบวนการซินเทอริงของแฉะถ่านหินภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด	เงินอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2540-2542	หัวหน้าโครงการ
2. การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์	เงินอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2541-2542	หัวหน้าโครงการ
3. การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์ด้วยวิธี กระตุ้นทางเคมี	เงินอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2543-2544	หัวหน้าโครงการ
4. สมดุลย์และจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเม็ดถ่าน	ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 3	2543-2547	หัวหน้าโครงการ

บทความวิจัย (รศ.ดร.ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย)

1. C. Tangsathitkulchai, and L.G. Austin, "The Effect of Slurry Density on Breakage Parameters of Quartz, Coal and Copper Ore in a Laboratory Ball Mill", Powder Technology, Vol. 42, 287-296 (1985).
2. C. Tangsathitkulchai, "The Rheological Behavior of Homogeneous Suspensions of Coal and Quartz Slurries", KMITT Research and Development Bulletin, No.1 vol.10, June 34-59 (1987).
3. L.G. Austin, and C. Tangsathitkulchai, "Comparison of Methods for Sizing Ball Mills Using Open-Circuit Wet Grinding of Phosphate ore as a Test Example", Ind. Eng. Chem. Res., vol.26, 997-1003 (1987).
4. T. Sakulpanich, P. Thitthiwong, D. Khummongkol, and C. Tangsathitkulchai, "Gasification of Coconut Shell with a Purpose of Charcoal Production", Proceedings of the Regional Symposium on Petrochemical Technology' 87, Chulalongkorn University Bangkok, Thailand, 14-17 December 1987.
5. C. Tangsathitkulchai, "Fluidized - Bed Cooling Tower", Proceedings of the Regional Symposium on Petrochemical Technology' 87, Chulalongkorn University Bangkok, Thailand, 14-17 December 1987.
6. C. Tangsathitkulchai, and L.G. Austin, "Rheology of Concentrated Slurries of Particles of Natural Size Distribution Produced by Grinding", Powder Technology, vol. 56, 293 -299, 1988.
7. C. Tangsathitkulchai, "Slowing - Down Effect in Fine Wet Grinding": paper presented at Joint Technical Seminar on Powder Technology (Thai - Japan), Technological Promotion Association (Thai - Japan), Bangkok, 21 Nov., 1988.
8. C. Tangsathitkulchai, and L.G. Austin, "Slurry Density Effects on Ball Milling in a Laboratory Ball Mill, Powder Tech. Vol. 59, No. 4, 285 -289, 1989.
9. D. Khummongkol, and C. Tangsathitkulchai, " A Model for Tar - Removal Efficiency from Biomass - Produced Gas Impinging on a Water Surface", Energy, Vol. 14, No. 3, 113 -121, 1989.
10. C. Tangsathitkulchai, "Evaporative Cooling of Water in a Spouted Bed Contactor", Technical Meeting on Heat, Mass and Momentum Transfer, The Engineering Institute of Thailand, 12 -13 Dec. 1989.
11. C. Tangsathitkulchai, " Slowing - Down Effect in Fine Wet Grinding, TIZ International Powder Magazine, vol.113, No.10, 802 -804, 1989.
12. C. Tangsathitkulchai, and D. Khummongkol, " Cleaning of Producer Gas from a Rice Husk Gasifier by Impingement on a Water Surface", International Conference on Energy & Environment, Tara Hotel, Bangkok, 27 - 30 Nov., 1990.

13. M. Tangsathitkulchai and C.Tangsathitkulchai "Study of Boiler Slag Deposit Formation Using a Vertical Externally - Heated Tube Furnace", International Conference on Energy & Environment, Tara Hotel, Bangkok, 27 - 30 Nov.,1990.
14. C. Tangsathitkulchai, "Water Cooling in a Three - Phase Spouted Bed", the First National Chemical Engineering Conference, Siam Intercontinental Hotel,- 19 Bangkok, 17 Dec.,1990.
15. S.Suwanayuen, C. Tangsathitkulchai, S. Tia, and V.Kritpiphat, "A Multifuel Fluidized Bed Boiler for Small Scale Industrial Use: System Design", the First National Chemical Engineering Conferenece, Siam Intercontinental Hotel, Bangkok, 17 -19 Dec.,1990.
16. C. Tangsathitkulchai, "Sizing of Ball Mills Using a Size - Mass Balance Approach", 2nd Japan - Thailand Symposium on Powder Technology - Applications to Environmental Protection, New Material and Industrial Pharmacy, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 22 - 23 Aug.,1991.
17. ชัยยศ ตั้งสติศย์กุลชัย, บทความวิชาการ เรื่อง " ปัญหามลภาวะจากการใช้ถักไนต์และการป้องกัน", วารสารเทคโนโลยี ศษช., ฉบับที่ 1 ปีที่ 4 เดือนตุลาคม 2534.
18. C. Tangsathitkulchai, S. Tia, S. Suwanayuen, A. Dararuja and P. Reungsin, "Mixing of Rice Husk in a Fluidized Bed of Sand", Conference on Advance in Chemical Engineering, B.P. Grand Tower Hotel, Songkla, Jun 25 -26,1991.
19. S. Suwanayuen, T. Chayawattana, Y. Surachpakorn, S. Tia, and C. Tangsathitkulchai, "Combustion of Rice Hull in a Fluidized Bed Furnace", ASEAN J. Sci & Tech., vol, no. 2, 107 - 115, 1992.
20. S. Suwanayuen, S. Tia, C. Tangsathitkulchai, P. Raungsin, and A. Dararuja, "Mixing of Fuel Particles in a Fluidized Bed of Sand, ASEAN J. Sci & Tech., Vol, no.2 143 -150, 1992.
21. S. Suwanayuen, S. Tia, C. Tangsathitkulchai, T. Pursakasemsug, and W. Promboon, "A Cold Model Study of Erosion in a Gas Fluidized Bed of Sand", Res. Dev. J. of Eng.Inst. Thailand, vol.3, No. 2, 1992.
22. S. Suwanayuen, C. Tangsathitkulchai, and S. Tia, "Lignite Fluidized Bed Combustor for Small - Scale Industrial Use", ASEAN FBC workshop, Bundung, Indonesia, 12-14 Apr, 1993.
23. C. Tangsathitkulchai et.al., "Fluidized Bed Combustion of Rice Hull", proceeding of 1st Technical Meeting of Engineering Faculty, KMITT, 8 - 9 Jun 1993.
24. S. Suwanayuen, C. Tangsathitkulchai, and S. Tia. "Performance of KMITT - Prototype Fluidized Bed Boiler : Effects of Fuel Type & Size", the 5th ASEAN Conf. on. Energy Tech., 25 -27 APR. 1994, Tara Hotel, Bangkok.

25. S. Suwanayeeun, C. Tangsathitkulchai, and S. Tia, "Emission Characteristics of KMITT Prototype Fluidized Bed Boiler", the 5th ASEAN Conf. on Energy Tech, 25 - 27 Apr, 1994.
26. C. Tangsathitkulchai, C. Kuvrananchareon, and M. Tangsathitkulchai, "Sintering Study of Thai Lignite Ashes", 2nd Technical Meeting of Engineering Faculty, KMITT, 7 - 8 Jun, 1994.
27. C. Tangsathitkulchai, S. Suwanayeeun, and S. Tia "Evaluation of a 2MW Fluidized Bed Boiler Burning Thai Lignite", 4th ASIAN conf. on Fluidized Bed and Three - Phase Reactors, Nov 28 - 30, 1994 Fukuoka, Japan.
28. C. Tangsathitkulchai, "Acceleration of Particle Breakage Rate in a Laboratory Wet Ball Mill", Mining Engineering Conf., B.P. Grand Tower, Songkla, 24 - 25 Nov, 1994.
29. M. Tangsathitkulchai, and C. Tangsathitkulchai, "Sintering of Coal Ashes : Effects of Temperature and Atmosphere", 4th Chem. Eng. Conf., Khonkaen Univ., 20-21Oct.,1994.
30. M. Tangsathitkulchai, and C. Tangsathitkulchai "Sintering of Coal Ashes : Effects of Extraction and Addition of Alkali Glass Materials, Suranaree J. Sci. Technol.,1, No.2,123 - 132, 1994.
31. C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Effect of Environment Atmosphere on the Sintering of Thai Lignite Fly Ashes", Eng. Found. Conf. on Application Advanced Technologies to Ash - Related Problem in Boilers, New Hampshire, 16-21 July,1995.
32. S. Tia, C. Tangsathitkulchai, and P. Dumronglaohapun, "Continuous Drying of Slurry in a Jet Spouted Bed", Drying Technology, 13 (8&9), 1825 - 1840 (1995).
33. C. Tangsathitkulchai and M. Tangsathitkulchai, "Study of Slag Deposit Formation using Synthetic Coals", 7th APCCHE Congress, Taipei, Mar 4 - 6, 1996.
34. ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, เอนก ศิริพานิชกร, จารุรัตน์ วรรณิสรากุล, พชร เกตุกราย, สมิตร ส่งพิริยะกิจ, พิชัย นิมิตรยงสกุล, ปริชญญา จินดาประเสริฐ, ชัยยศ ตั้งสติชัยกุลชัย, ทิน เกตุรัตน์บวร "การคัดเลือกถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต (Classified Fly Ash for Concrete Utilization)", บทความเสนอในการประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2539 สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 15-18 สิงหาคม 2539, ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์
35. S.Tia, S. Suwanayeeun, C. Tangstikulchai, C. Phromvichit and W. Nimipal, " Heat Transfer Characteristics in a Small - Scale Fluidized Bed Boiler", Int. J. Energy Research, Vol.20, 521-530, 1996.
36. C. Tangstikulchai, and M. Tangstikulchai, "Sintering Behavior of Coal Ashes under Fluidized Bed Combustion Conditions", proceedings of 8th Chemical Engineering Conference, Mahidol University, 17-18 Dec, 1998.

37. C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Effect of Fluidized Bed Materials on Sintering Behavior of Coal Ashes", Regional Symposium on Chemical Engineering, Prince of Songkla University, 22 - 24 Nov., 1999
38. C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, 2000, Effect of bed Materials and Additives on the Sintering of Coal Ashes Relevant to agglomeration in Fluidized Bed Combustion, submitted to Fuel Processing Technology.

ประวัติผู้ร่วมงานวิจัย

นางมาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย (Malee Tangsathitkulchai)

ตำแหน่งปัจจุบัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาเคมี

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบ	ระดับปริญญา	ชื่อปริญญา	สาขาวิชา	สถาบันที่จบ
พ.ศ. 2515	ตรี	วทบ.	เคมี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
พ.ศ. 2517	โท	วทม.	เคมีอนินทรีย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2523	โท	M.S.	Inorganic Chemistry	Flinders University, Australia.
พ.ศ. 2529	เอก	Ph.D.	Fuel Science	Pennsylvania state University, U.S.A.

สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

- เทคโนโลยีถ่านหิน
- ถ่านกัมมันต์และการดูดซับ

ประสบการณ์งานวิจัย

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

- (1) Reactions at Noble Metal/Ceramic Interfaces
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2520-2523)
- (2) Fundamental Studies of the Mechanisms of Slag Deposit Formation
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2525-2529)
- (3) Sintering and Slag Deposit Formation of Thai Lignite Ashes
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2534-2537)

งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

- (1) การนำเถ้าลอยถ่านหินมาใช้ผลิตสาร Zeolite
- (2) การศึกษาซินเทอร์ริงของเถ้าชีวมวลภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิด ไคซ์เบด
- (3) กระบวนการซินเทอร์ริงของเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิด ไคซ์เบด
(ผู้ร่วมวิจัย, เงินอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2540-2542)
- (4) การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์
(ผู้ร่วมวิจัย, เงินอุดหนุนวิจัยปี 2542 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)
- (5) การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี
(ผู้ร่วมวิจัย, เงินอุดหนุนวิจัยปี 2543-4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์

- มีผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ถ่านหิน และซินเทอร์ริง จำนวน 15 เรื่อง (ดังแนบ)

บทความวิจัย (ผศ.ดร.มาตี ตั้งสถิตย์กุลชัย)

1. Bruin, H.J. de., and Tangtreeratana, M., 1981, "Diffusion of Palladium Into MgO", Technical note, J. of Physics and Chemistry of Solids, Vol. 42(4), 333-334.
2. Austin, L.G., Kinnman, W.P., Abbott, M.F., and Tangsathitkulchai, M., 1984, Ash Deposition in Syngas Coolers of Slagging Gasifiers", Electric Power Research Institute Project 1654-11, Final Report.
3. Tangsathitkulchai, M., and Austin, L.G., 1985, " Studies of Sintering of Coal Ash Relevant to Pulverized Coal Utility Boilers: Part 2: Preliminary Studies of Compressive Strength of Fly Ash Sinters", Fuel, Vol 64., 86-92.
4. Tangsathitkulchai, M., and Austin, L.G., 1985, " Studies of Slag Deposit Formation Using a Laboratory Furnace", American Society of Mechanical Engineering Paper No. 85.- JPGC - Pwr-45 presented at the Jt. ASME/IEEE power generation conference, Milwaukee, wisconsin, USA, oct 20-24.
5. Tangsathitkulchai, M., and Austin, L.G., 1985", Nature of The Surface Involved in Fly Ash Adhesion on Boiler Steel", Short Communications, Fuel, Vol. 64, 1764-1765.
6. Benson, S.A., Tangsathitkulchai, M., and Austin, L.G., 1985, " Studies of Ash Deposit Formation Using a Laboratory Furnace", Proceeding of An Annual Pittsburgh Coal Conference, 689-694.
7. Austin, L.G., Benson, S.A., Schobert, H.H., and Tangsathitkulchai, M., 1987 "Fundamental Studies of the Mechanism of Slag Deposit Formation", U.S. Department of Energy Report DOE/FE-70770.
8. Tangsathitkulchai, M., and Tangsathitkulchai, C., 1990, " Studies of Boiler Slag Deposit Formation Using A Vertical Externally-Heated Tube Furnace", International Conference of Energy and Environment, Tara Hotel, Bangkok, November 27-30.
9. Tangsathitkulchai, C., Kuvarananchareon, C., and Tangsathitkulchai, M., 1994, Sintering Study of Thai Lignite Ashes, " 2nd Technical Meeting, Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Thonburi, June 7-8.
10. Tangsathitkulchai, M., and Tangsathitkulchai, C., 1994 "Sintering of Coal Ashes: Effects of Temperature and Atmosphere," 4th National Chemical Engineering Conference, Khon Kaen University, October 20-21.
11. Tangsathitkulchai, M., and Tangsathitkulchai, C., 1994, "Sintering of Coal Ashes: Effects of Extraction and Addition of Alkali - Glass Materials," Suranaree Journal of Science and Technology, Vol. 1, No.2, July - December, 123-132.
12. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., 1995, " Effect of Environment Atmosphere on The Sintering of Thai Lignite Fly Ashes," Presented at the Engineering Foundation Conference: Application of Advanced Technology to Ash - Related Problems in Boilers, 16-22 July, New Hampshire, USA.

13. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Study of Slag Deposit Formation Using Synthetic Coals," Presented at the 7th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineers Congress of Taipei Chem Exhibition. Taipei, Taiwan, March 4-6, 1996.
14. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., 1998 "Sintering Behavior of Coal Ashes under Fluidized Bed Combustion Conditions", 8th National Chemical Engineering Conference, Mahidol University, December 17-18.
15. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., 1999 "Effect of Fluidized Bed Materials on the Sintering Behavior of Coal Ashes", Regional Symposium on Chemical Engineering, Prince of Songkla University, Songkla, November 22-24.
16. C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, 2000, Effect of bed Materials and Additives on the Sintering of Coal Ashes Relevant to agglomeration in Fluidized Bed Combustion, submitted to Fuel Processing Technology.