

บทที่ 4

ผลการทดลองและบทวิเคราะห์

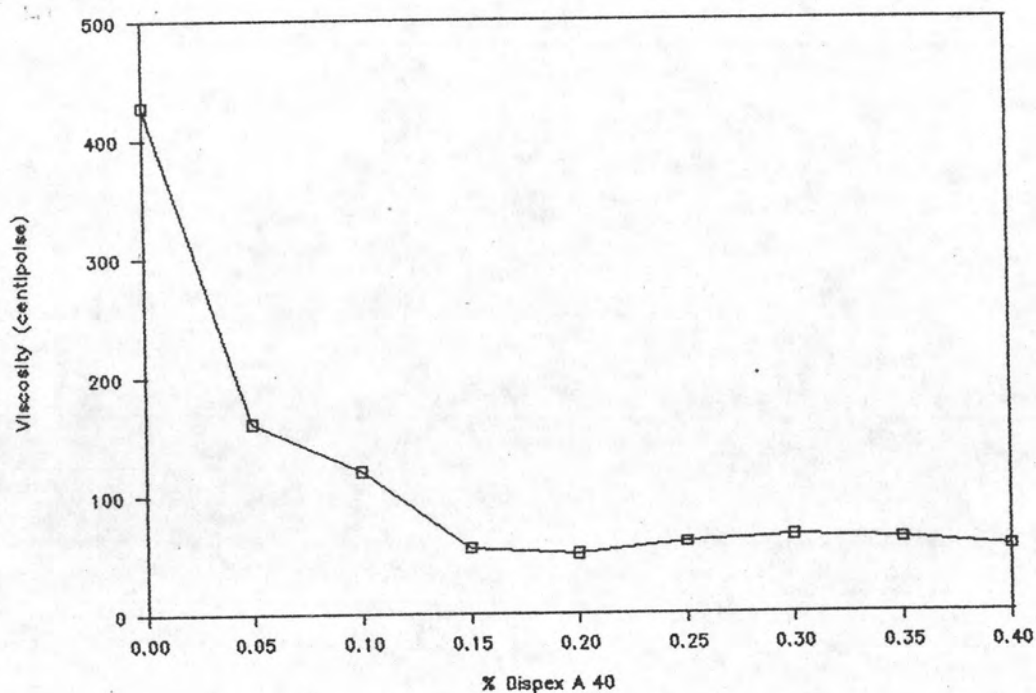
4.1 อิทธิพลของสารช่วยในการกระจายลอยตัวที่มีต่อการไหลตัวของสเลอรี

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารช่วยการกระจายลอยตัวกับความหนืดของสเลอรี ตัวอย่างที่เตรียมขึ้นใช้งานวิจัยครั้งนี้แสดงในตารางที่ 4.1 และกราฟรูปที่ 4.1 จากกราฟพบว่าความหนืดจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเติมสารช่วยการกระจายลอยตัวลงไปเล็กน้อย และจะเริ่มคงที่เมื่อเติมถึงร้อยละ 0.2 รคน้ำหนัก เป็นต้นไป จึงใช้ค่านี้เป็นมาตรฐานในการทดลองขั้นต่อไป

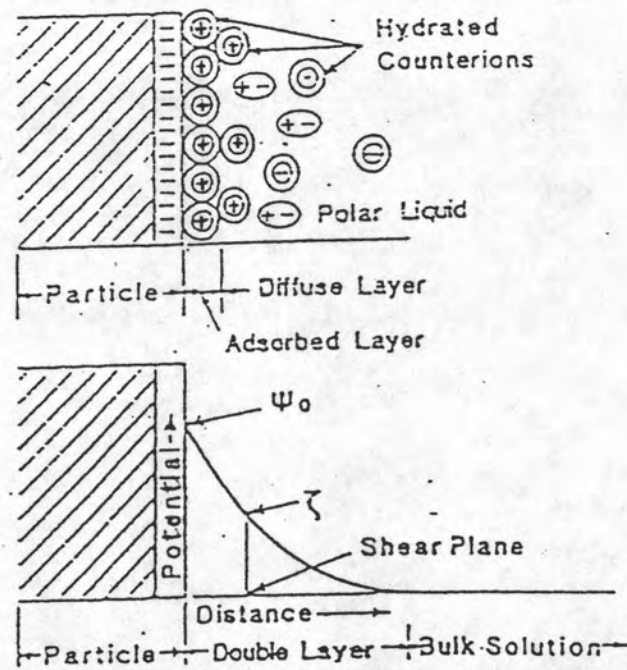
การกระจายลอยตัวของอนุภาคที่เกิดขึ้นเมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นผลมาจากการเกิดขึ้นของอิเล็กทริกดับเบิลเลเยอร์ (Electric double layer) ชั้นที่ผิวของอนุภาค ทั้งนี้เพราะที่ผิวของอนุภาคจะมีโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ เกิดเป็นผิวที่มีประจุไฟฟ้าซึ่งจะสามารถจับไอออนต่างๆ ที่มีประจุตรงกันข้ามในสารละลายเข้าหาตัวเองดังรูปที่ 4.2 จึงเกิดเป็นเยื่อบางๆ ดังกล่าวซึ่งทำให้มีศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ผิวซึ่งจะลดลงตามระยะห่างจากผิวอนุภาคนั้น (Reed, 1988) อนุภาคจะเกิดการลอยตัวได้ก็ต่อเมื่อมีแรงผลักดันระหว่างเยื่อบางๆ ที่เกิดขึ้นนี้

ตารางที่ 4.1 ความหนืดของสเลอรี่เมื่อเติมสารช่วยการกระจายลอยตัวที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

| ความเข้มข้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ความหนืด (เซนติพอยส์) |
|-----------------------------------|--------------------------|
| 0.00 | 427.2 |
| 0.05 | 160.8 |
| 0.10 | 120.0 |
| 0.15 | 55.2 |
| 0.20 | 50.4 |
| 0.25 | 60.0 |
| 0.30 | 65.8 |
| 0.35 | 62.4 |
| 0.40 | 55.2 |



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับสารช่วยการกระจายลอยตัว



รูปที่ 4.2 การเกิดอิเลกทริกดับเบิลเลเยอร์ที่ผิวของอนุภาคและศักย์ไฟฟ้าที่ลดลง
(Reed, 1988)

4.2 การวิเคราะห์ผงตัวอย่าง

4.2.1 ลักษณะของผงตัวอย่าง

ลักษณะโดยทั่วไปของผงตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า ขนาดของอนุภาคผงตัวอย่างที่วัดได้มีขนาดค่อนข้างเล็ก ส่วนมากไม่เกิน 6-8 ไมครอน ทั้งนี้เนื่องมาจากการวัดขนาดในการทดลองนี้ใช้วิธีการวัดแบบตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity sedimentation) ซึ่งจะต้องกระจายผงตัวอย่างในของเหลว ทำให้อนุภาคเล็กๆ ที่เกาะกันอยู่เป็นก้อน (Aggregate) แยกออกจากกัน ขนาดที่วัดได้จึงเป็นขนาดของอนุภาคเล็กๆ เหล่านั้นไม่ใช่ขนาดของผงตัวอย่างที่เตรียมได้จริง

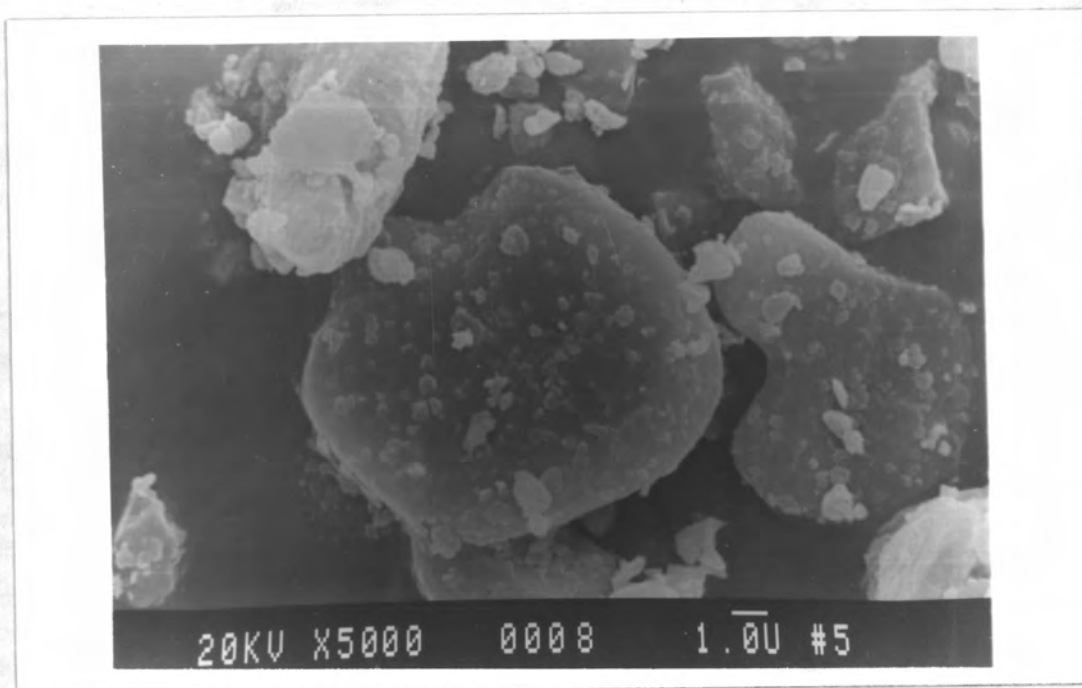
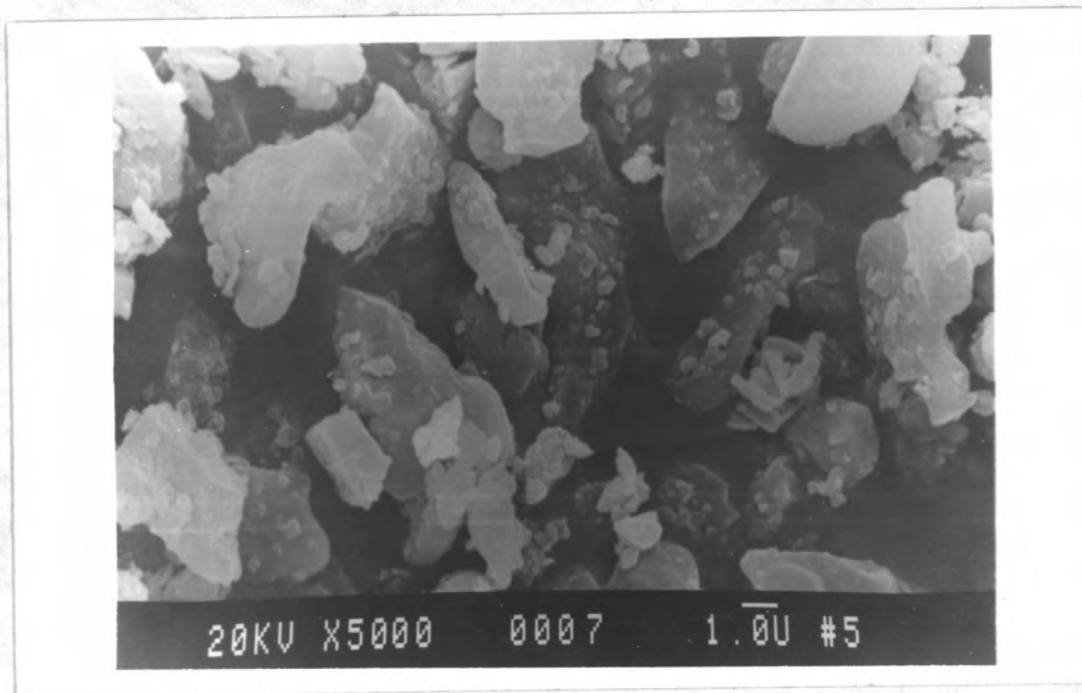
ค่าอัตราส่วนการบรรจุของผงตัวอย่างเท่ากับ 1.37 แสดงว่าผงตัวอย่างที่ได้มีการอัดตัวที่ดี แต่ว่าการไหลตัวมีอัตราค่ามาก เพียง 0.19 กรัมต่อวินาที ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ผงตัวอย่างมีการอัดตัวที่ดี จึงเคลื่อนผ่านซึ่งกันและกันได้ค่อนข้างยาก ซึ่งอาจจะแก้ไขได้โดยการเติมสารช่วยในการหล่อลื่น เช่น อลูมิเนียมสเตียเรท (Aluminum stearate) เพื่อช่วยในการหล่อลื่นของผงตัวอย่างอลูมินา (Reed, 1988)

ตารางที่ 4.2 ลักษณะบางอย่างของผงตัวอย่าง

| ลักษณะ | ค่าที่วัดได้ |
|---|---------------------------|
| ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | 0.4 |
| ความหนาแน่นบรรจุ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) | 1.09 (27.85) ¹ |
| ความหนาแน่นหลังการเคาะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) | 1.50 (38.20) ¹ |
| อัตราส่วนการบรรจุ | 1.37 |
| ความว่างจาเพาะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) | 3.57 (91.21) ¹ |
| อัตราการใช้ (กรัมต่อวินาที) | 0.19 |
| ขนาดอนุภาค (ไมครอน) - ปริมาณสะสม ร้อยละ 10 | 1 - 1.5 |
| - ปริมาณสะสม ร้อยละ 50 | 3 - 4 |
| - ปริมาณสะสม ร้อยละ 90 | 6 - 8 |
| พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม) | 2.70 |

หมายเหตุ : 1 ร้อยละของความหนาแน่นทางทฤษฎีได้จากข้อ 3.3.2 (3.914 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ลักษณะรูปร่างของผงตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.3 จากภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า พบว่ามีอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากอยู่กระจายกันอย่างสม่ำเสมอ โดยมีอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีลักษณะค่อนข้างกลมปะปนอยู่เล็กน้อย



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายอนุภาคผงตัวอย่างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและทางเฟสของผงตัวอย่าง

เนื่องจากในระหว่างการทดลองแต่ละขั้นตอน ตัวอย่างจะต้องผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดสิ่งเจือปนลงไปในสารตั้งต้นได้ ไม่ว่าจะมาจากลูกบด, ตะแกรงร่อนสแตนเลสสตีล, ภาชนะบรรจุหรืออุปกรณ์ต่างๆ ดังนั้น ผลวิเคราะห์ทางเคมีของผงตัวอย่างจึงมีค่าแตกต่างจากที่คำนวณตามสูตร เนื่องจากมีสิ่งเจือปนที่คำนวณได้ในข้อ 3.3.1 (โดยใช้ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุของอลูมินา เอ 14 และกินชาวปราจินในตารางที่ 3.1 และ 3.2) อยู่เสมอ ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทั้งสองได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 พบว่าในตัวอย่างมีอลูมินาน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ในขณะที่มีธาตุอื่นๆ เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากสิ่งต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วนั่นเอง

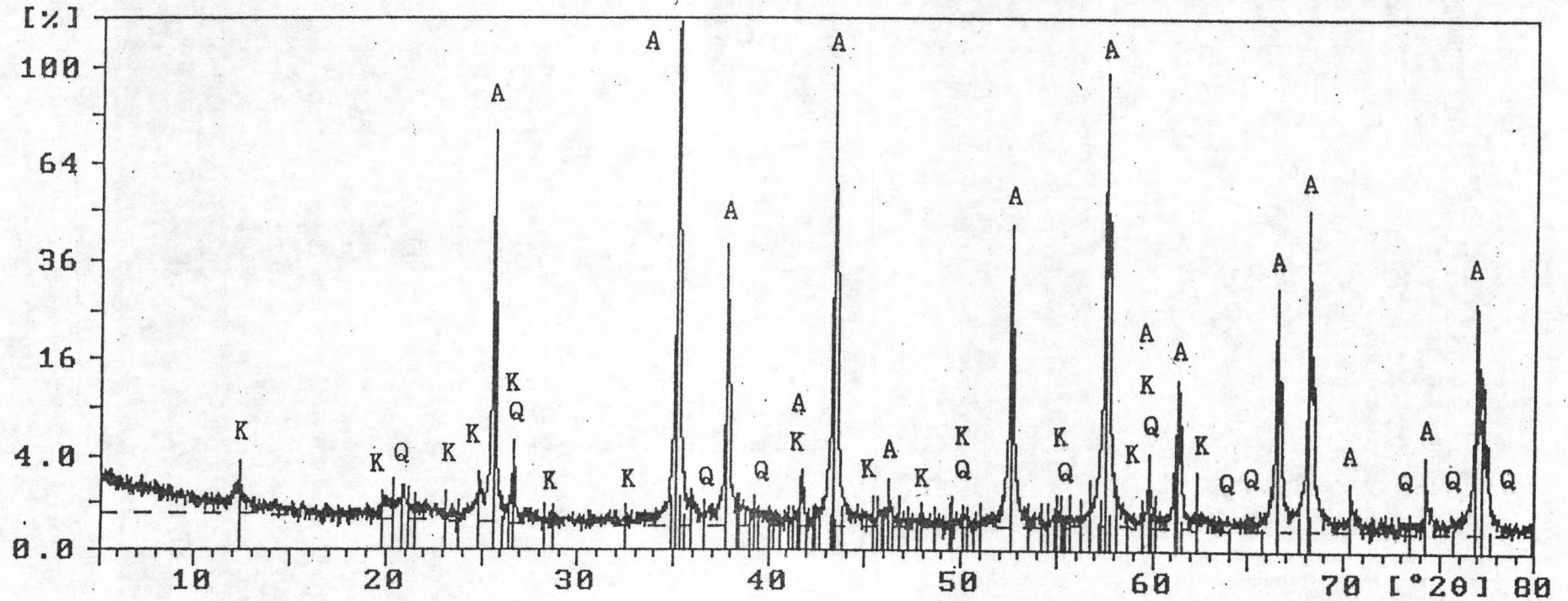
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบปริมาณออกไซด์ที่สำคัญบางตัวระหว่างค่าที่คำนวณได้กับผงตัวอย่างที่เตรียมขึ้นจริง

| ออกไซด์ | ค่าคำนวณ | ผลวิเคราะห์ |
|-----------|----------|-------------|
| Al_2O_3 | 95.00 | 90.90 |
| SiO_2 | 4.18 | 7.85 |
| MgO | 0.20 | - |
| Na_2O | 0.03 | 0.57 |
| Fe_2O_3 | 0.08 | 0.29 |

ผลวิเคราะห์ทางเฟสของผงตัวอย่างก่อนเผา โดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นว่ามิใช่มียอด (Peak) ที่ตรงกับลักษณะยอดของแร่อัลฟาอลูมินา (A) แค่นัยมากที่สุด ยอดที่เป็นของแร่กินชาวหรือเคลอซิลินาท์ (Kaolinite, K) และแร่หินเขี้ยวทูนาน (Quartz, Q) มีอยู่บ้างแต่เห็นไม่ชัดเจนนัก และไม่พบยอดอื่นๆ นอกเหนือจากยอดที่เป็นของแร่ทั้งสามชนิดนี้เลย

Sample ident.: Green Sample

4-Jul-1995 11:16

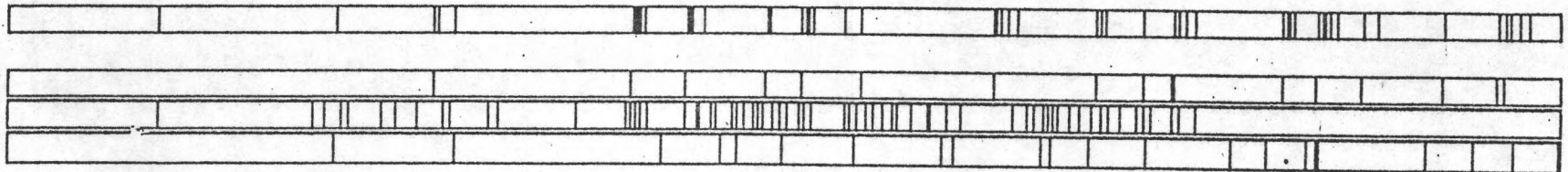


ตัวอย่าง

อัลฟาอะลูมินา (A)

เคโอลินานท์ (K)

ควอartz (Q)



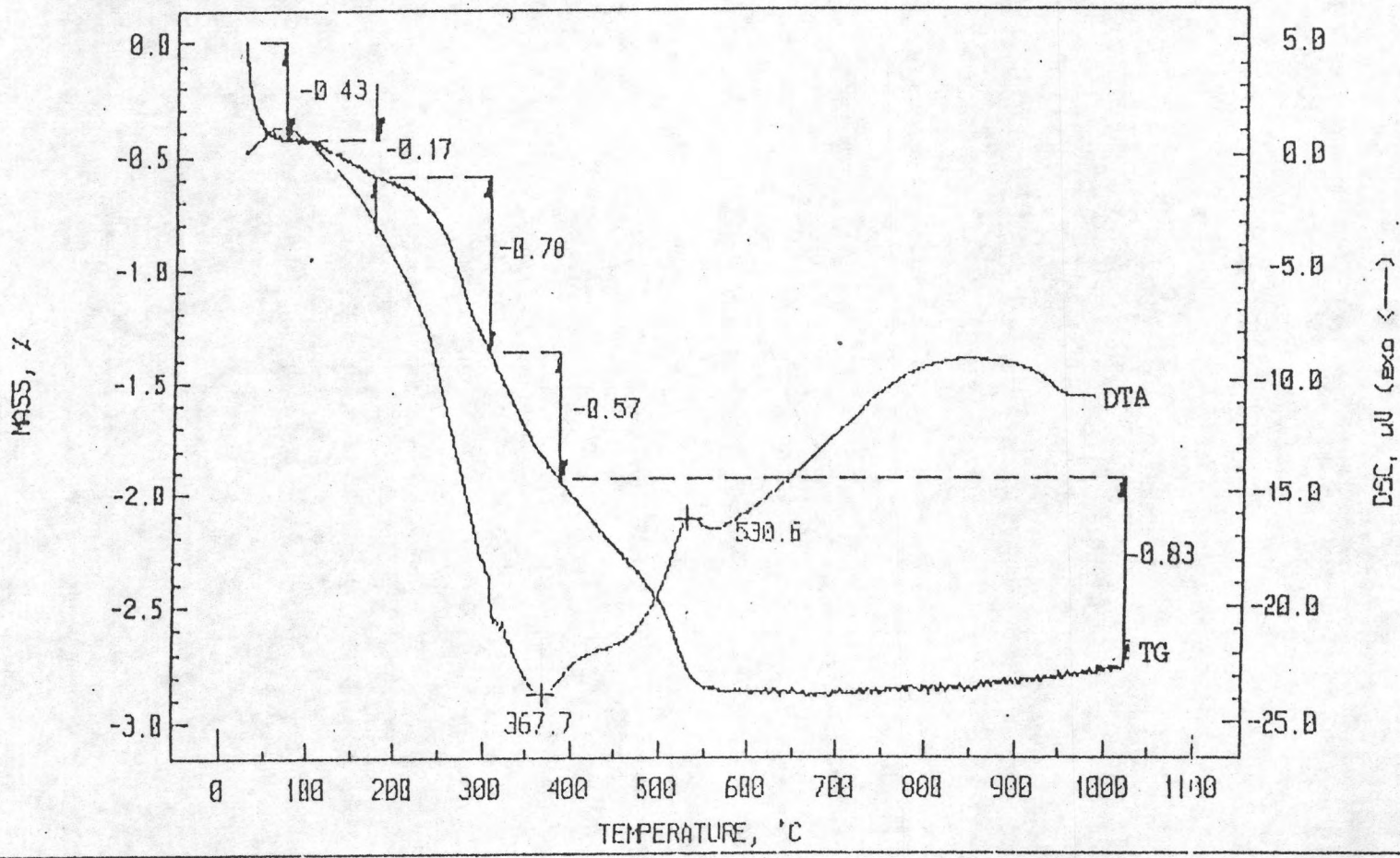
รูปที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ทางแร่ของตัวอย่างก้อนเผา

4.2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงตัวอย่าง

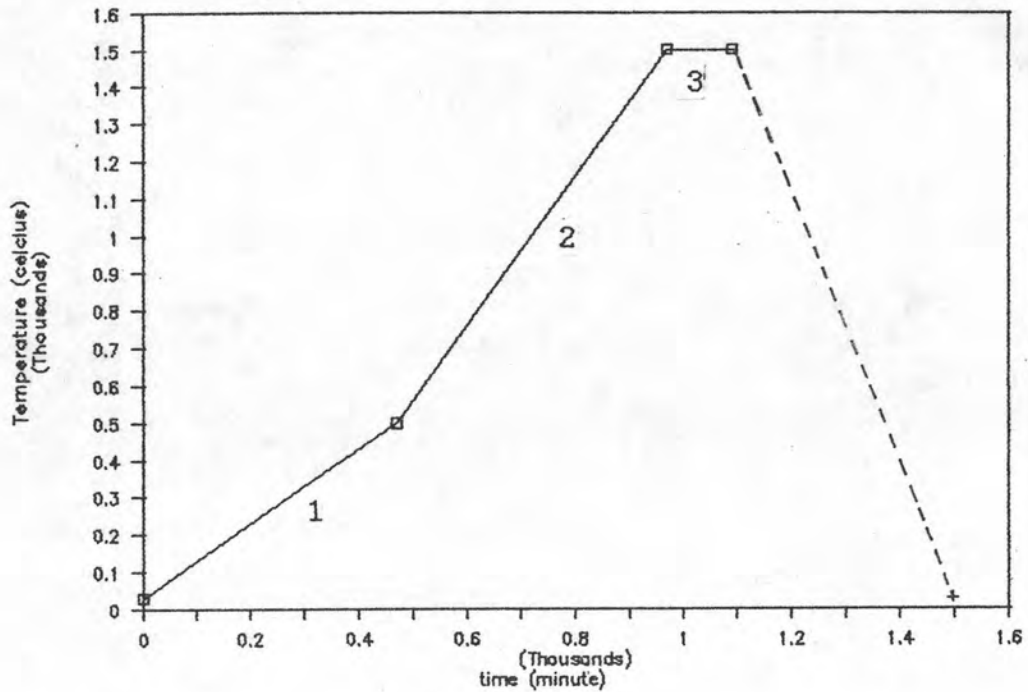
ผลวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงตัวอย่างแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.5 ซึ่งพบว่าเมื่อเริ่มเผาจนอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียสไปเล็กน้อยจะเกิดปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (ดูจากกราฟของ DTA) และมีการสูญเสียมวลรวดเร็วมากถึงร้อยละ 0.43 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงนี้คือการระเหยของน้ำที่มีอยู่ในผงตัวอย่างทั้งหมดไป (ตัวอย่างมีความชื้นประมาณร้อยละ 0.4) และหลังจากนั้นที่อุณหภูมิประมาณ 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาคลายความร้อนและมวลสารจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของสารช่วยการยึดเกาะตัว (ในที่นี้คือโพลีไวนิลแอลกอฮอล์) และน้ำในโครงสร้างของดิน จากกราฟ TG พบว่ามวลสารที่สูญเสียไปในช่วงนี้มีค่าประมาณร้อยละ 2.1 ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณสารช่วยการยึดเกาะตัวที่เติมลงไป (ร้อยละ 2.0) หลังจากจุดนี้ไปแล้วสารตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลงต่อไปอีกแต่แทบจะไม่มีการสูญเสียมวลสารไปอีกเลย ปฏิกิริยาช่วงนี้ก็คือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอลูมินาและดินขาวในตัวอย่าง

จากผลวิเคราะห์ทางความร้อนของตัวอย่างที่ได้นี้ เราสามารถนำมาใช้ในการสร้างตารางการเผาขึ้นตัวอย่าง เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ดีที่สุด ไม่เกิดการแตกหักหรือมีสารอินทรีย์ตกค้างอยู่ในชิ้นงานได้ ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงแผนภูมิการเผาขึ้นงานที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส โดยจะกำหนดเป็นอัตราการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่างๆ ใกล้เคียงกับการเผาในเตาอุโมงค์ กล่าวคือ ในช่วงตั้งแต่อุณหภูมิห้องไปจนถึง 500 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นช่วงที่มีการสูญเสียมวลสารนั้นจะให้อัตราการให้ความร้อนเป็น 1 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยจะไม่แช่ (soak) เอาไว้ที่อุณหภูมินี้ (เส้นที่ 1) จากนั้นตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสไปจนกระทั่งถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการเผา จะให้ความร้อนในอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที (เส้นที่ 2) และแช่เอาไว้ที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง (เส้นที่ 3) ก่อนจะทิ้งให้เย็นตัวลงในบรรยากาศภายในเตาเผา (เส้นประ)

| | | | | | |
|--------------|---------------------|-------------|--------|-----------|--------|
| DATE | : 13 Jun 1995 | DESCRIPTION | SAMPLE | REFERENCE | |
| TIME | : 13:23:27 | WEIGHT | mg | 162.6 | 187.5 |
| PROJECT I.D. | : NMRI | CHANNEL | RANGE | RAW | COR. |
| TEST I.D. | : N39 | TEMPERATURE | 4000 | X | |
| SAMPLE | : Praolin Clay | MASS | 500 | | 010000 |
| REFERENCE | : Al2O3 | DSC | 500 | X | |
| HEATING RATE | : 10 | | | | |
| TEMP RANGE | : 20/1050 | | | | |
| ATMOSPHERE | : Static Air | | | | |
| FLOW RATE | : --- | | | | |
| INSTRUMENT | : NETZSCH STA 409 C | | | | |



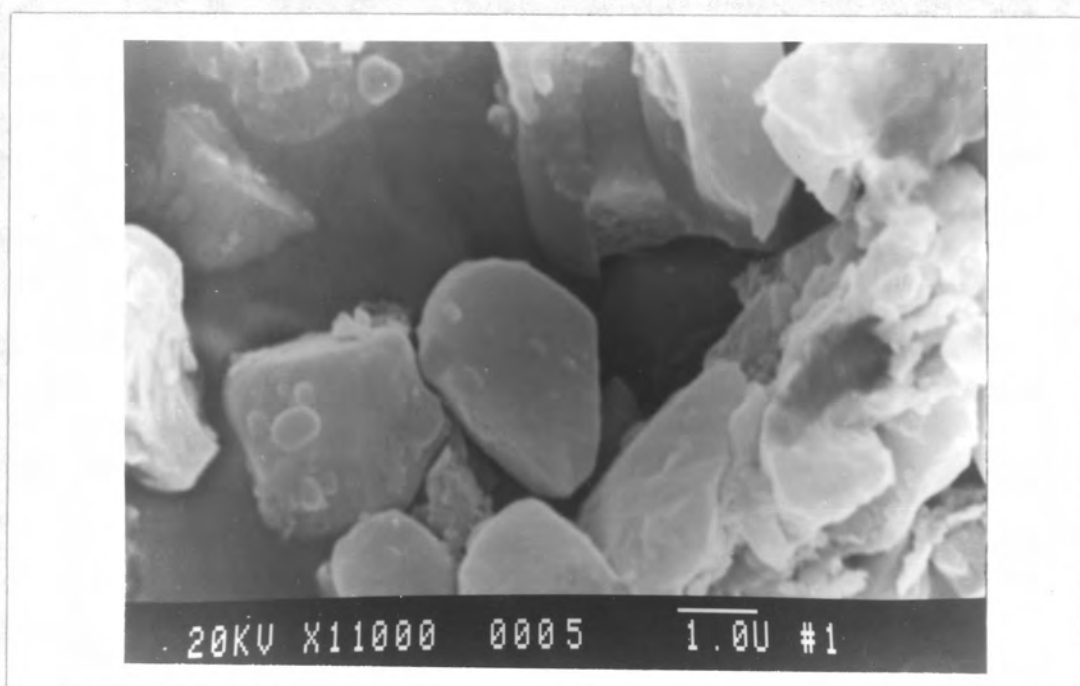
รูปที่ 4.5 ผลวิเคราะห์ทางความร้อนของผงตัวอย่างตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 1000 องศาเซลเซียส



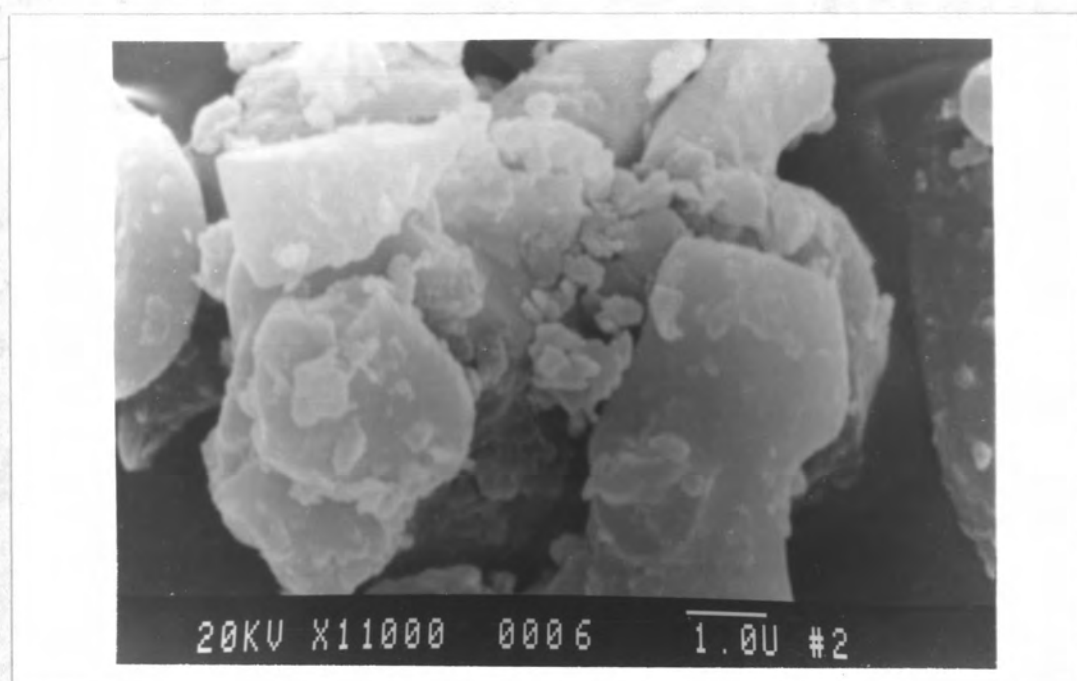
รูปที่ 4.6 แผนภูมิการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส

4.3 ผลของความดันในการขึ้นรูปที่มีต่อตัวอย่าง

ภาพถ่ายฝักรอยแตกของตัวอย่างที่ขึ้นรูปที่ความดันต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อความดันสูงขึ้น ลักษณะเกรนที่พบจะเกาะกันแน่นและมีขนาดใหญ่อันจะมีรูพรุนขนาดใหญ่อยู่ระหว่างเกรนเหล่านั้น ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปกับความหนาแน่นก่อนเผาของตัวอย่าง แสดงไว้บนตารางที่ 4.4 และกราฟรูปที่ 4.8 จากกราฟพบว่าเมื่อใช้ความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้นตามลำดับ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานสูงกว่าร้อยละ 65 ซึ่งนับว่าสูงมาก ทั้งนี้เป็นเพราะผงตัวอย่างที่เตรียมมามีอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมาก และมีอนุภาคขนาดใหญ่อยู่กระจัดกระจาย เมื่อได้รับแรงอัดในระหว่างการขึ้นรูปอนุภาคขนาดใหญ่ เหล่านี้จะอัดตัวเข้าหากัน โดยมีอนุภาคขนาดเล็กเข้าไปแทรกตามช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 4.9 ทำให้ปริมาตรช่องว่างในเนื้อลดลง

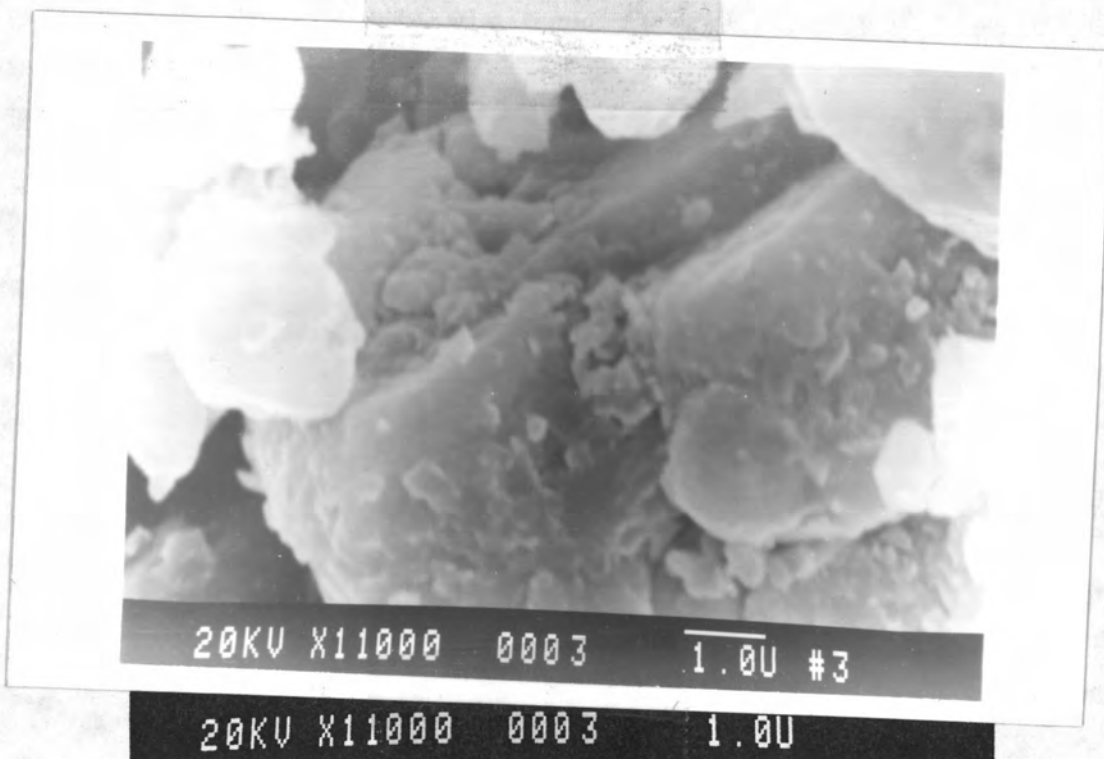


ก. 100 เมกะปาสกาล

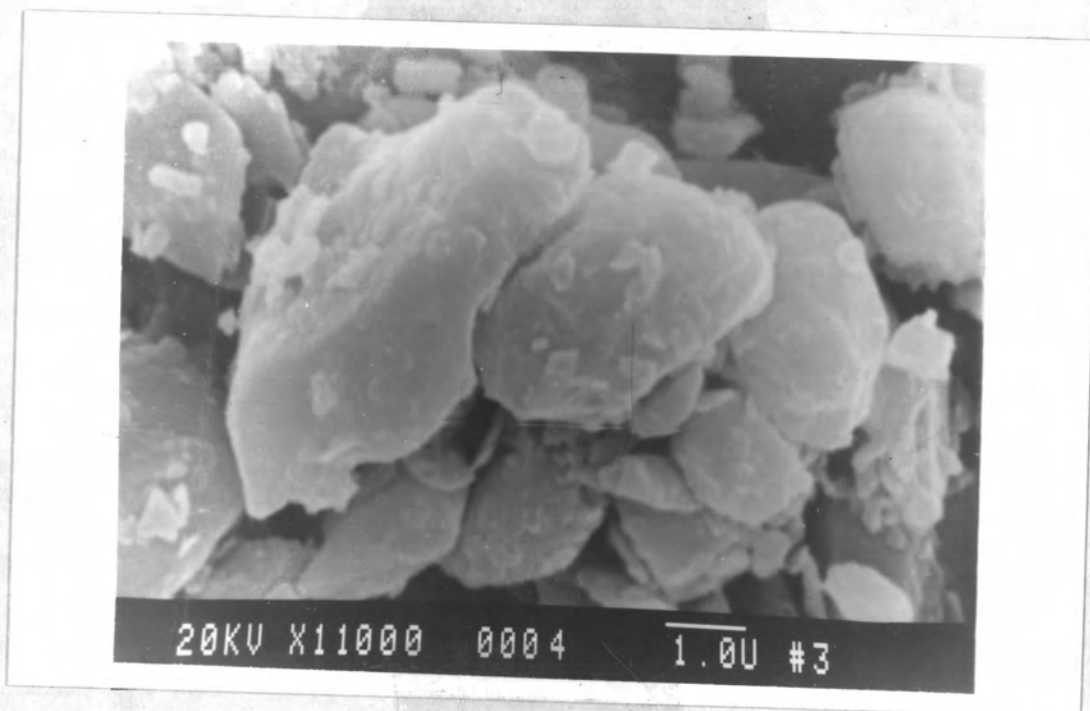


ข. 150 เมกะปาสกาล

รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายพินรอมเทคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความดันต่างๆ กัน



ค. 200 เมกะปาสทาล



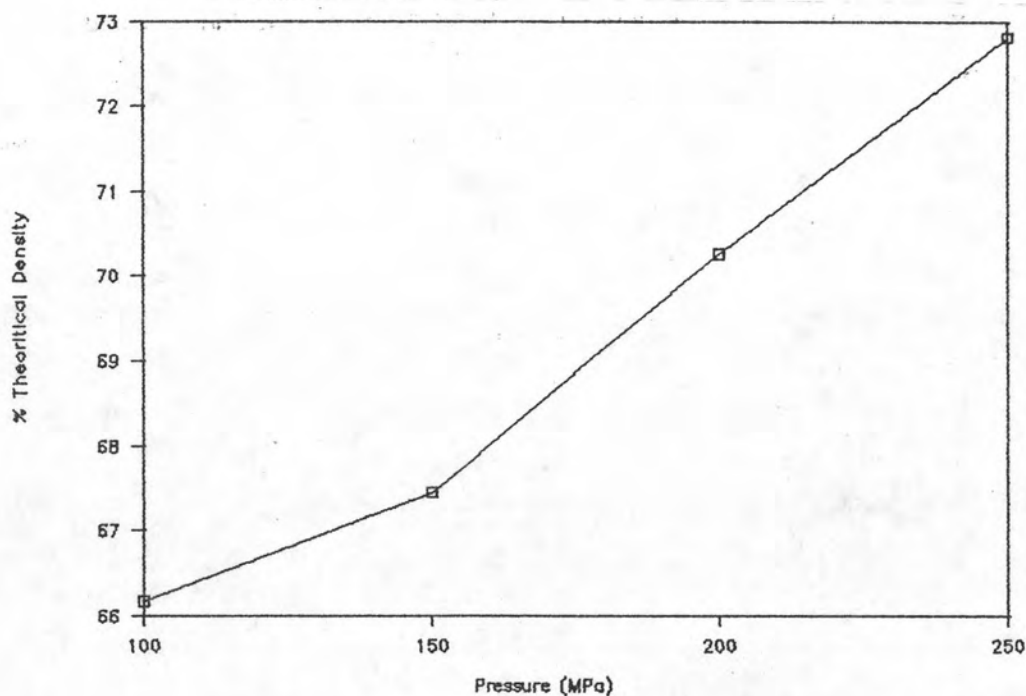
ข. 250 เมกะปาสทาล

รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายผิวรอยแตกของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความดันต่างๆ กัน

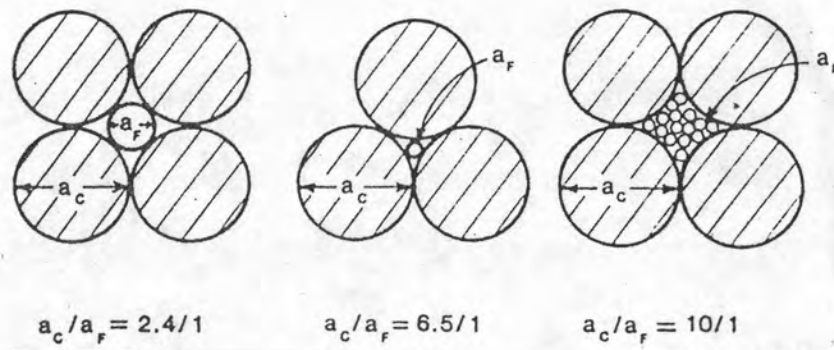
ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่างก่อนเผาเมื่อใช้ความดันในการขึ้นรูปต่างๆ กัน

| ความดัน (เมกะปาสกาล) | ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร) | ร้อยละของความ หนาแน่นทางทฤษฎี ¹ |
|-------------------------|--|---|
| 100 | 2.59 | 66.17 % |
| 150 | 2.64 | 67.45 % |
| 200 | 2.75 | 70.26 % |
| 250 | 2.85 | 72.82 % |

หมายเหตุ : ¹ความหนาแน่นทางทฤษฎีจากหัวข้อ 3.3.2 (3.914 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นตัวอย่างก่อนเผา
กับความดันที่ใช้ในการขึ้นรูป



รูปที่ 4.9 การอัดตัวของอนุภาคขนาดเล็กภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่
(Reed, 1988)

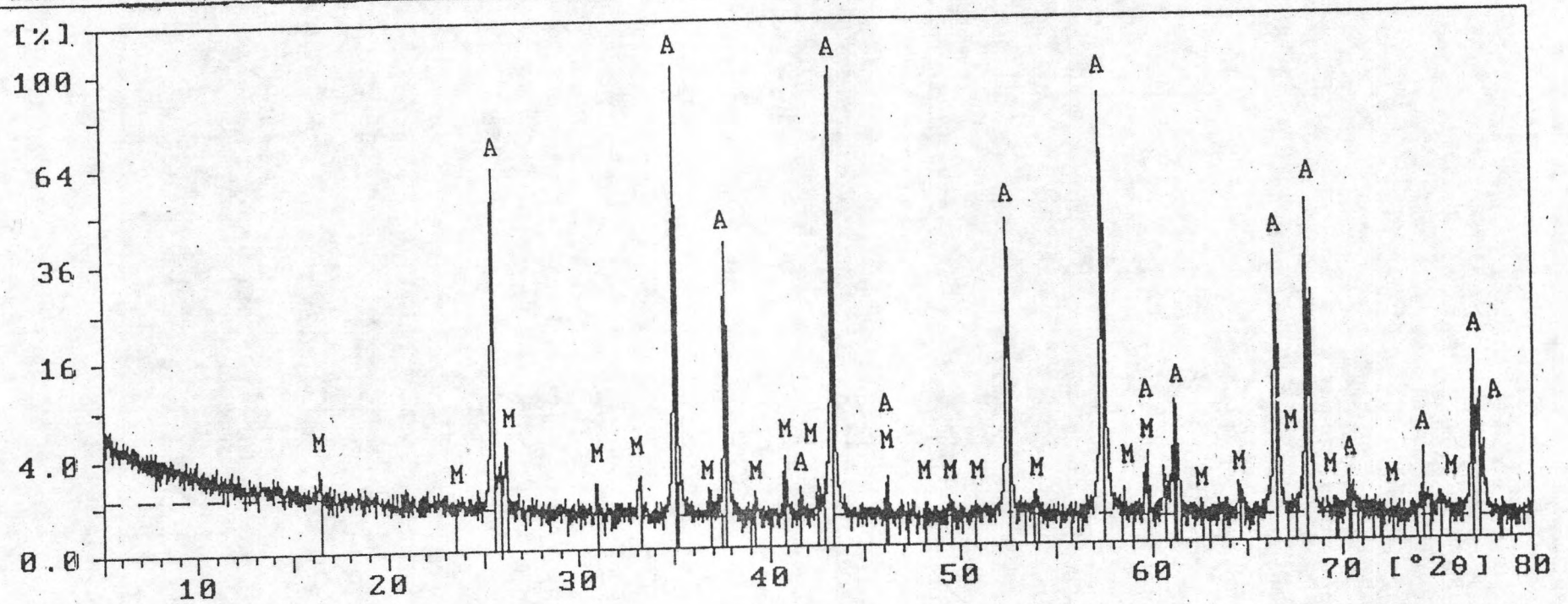
4.4 ผลของอุณหภูมิในการเผาที่มีต่อตัวอย่าง

4.4.1 การเปลี่ยนแปลงทางเฟสของตัวอย่างที่ผ่านการเผาแล้ว

ผลวิเคราะห์ทางเฟสของชิ้นตัวอย่างที่ขึ้นรูปที่ความดัน 250 เมกะปาสกาลและเผาที่อุณหภูมิ 1500 และ 1650 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.10 ก. และ ข. ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างก่อนเผา (รูปที่ 4.4) แล้วจะพบว่ายอดของอัลฟาอลูมินาจะยังคงมีอยู่แม้จะเผาถึงอุณหภูมิถึง 1650 องศาเซลเซียสแล้วก็ตาม ส่วนยอดของแรคตินชาวและแรคตินเซียพทูนานที่มีอยู่ในตัวอย่างก่อนเผาหายไปทั้งหมดโดยมียอดของแรคคัลโลท์ (M) เกิดแทนที่ตามที่คาดไว้จากแผนภาพสมดุล (Phase diagram) ระหว่างอลูมินากับซิลิกาในรูปที่ 4.11 และเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 1500 และ 1650 องศาเซลเซียสพบว่าในตัวอย่างหลังจะเห็นยอดของแรคคัลโลท์ชัดเจนกว่า ซึ่งให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาจะทำให้เกิดการตกผลึกของแรคคัลโลท์จากเนื้อสารส่วนที่เป็นแก้วมากขึ้น ความเข้มข้นของผลึกแรคคัลโลท์ในเนื้อวัสดุมีมากขึ้น จึงทำให้ยอดของแรคคัลโลท์เด่นชัดขึ้น จากการเปรียบเทียบปริมาณโดยอาศัยการวัดความสูงของยอดสูงสุดของแรคคัลโลท์ ซึ่งอยู่ที่มุม 2θ ประมาณ 26 องศา (ระยะห่างระหว่างระนาบ, d-spacing ประมาณ 3.39) พบว่า ตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส น่าจะมีปริมาณแรคคัลโลท์ในเนื้อวัสดุมากกว่าตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียสประมาณ 1.6 ถึง 1.9 เท่า (ความเข้มข้นร้อยละ 100 ของตัวอย่างในรูปที่ 4.10 ก. เท่ากับสัมมูลถนัม 1800 ครั้ง ในขณะที่ตัวอย่างในรูปที่ 4.10 ข. เท่ากับ 2000 ครั้ง)

Sample ident.: Fired 1500°C Sample

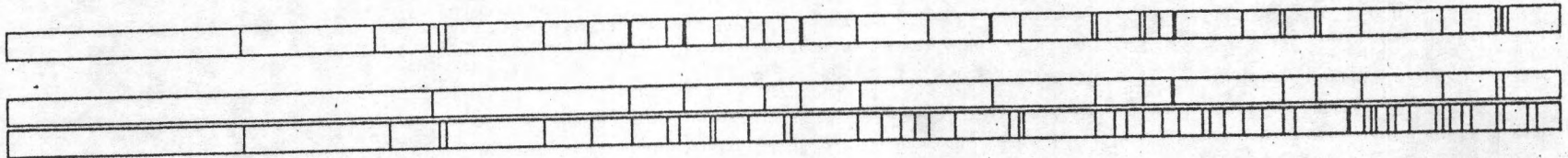
29-Aug-1995 9:48



ตัวอย่าง

อัลฟาอะลูมินา (A)

มัลลิต (M)

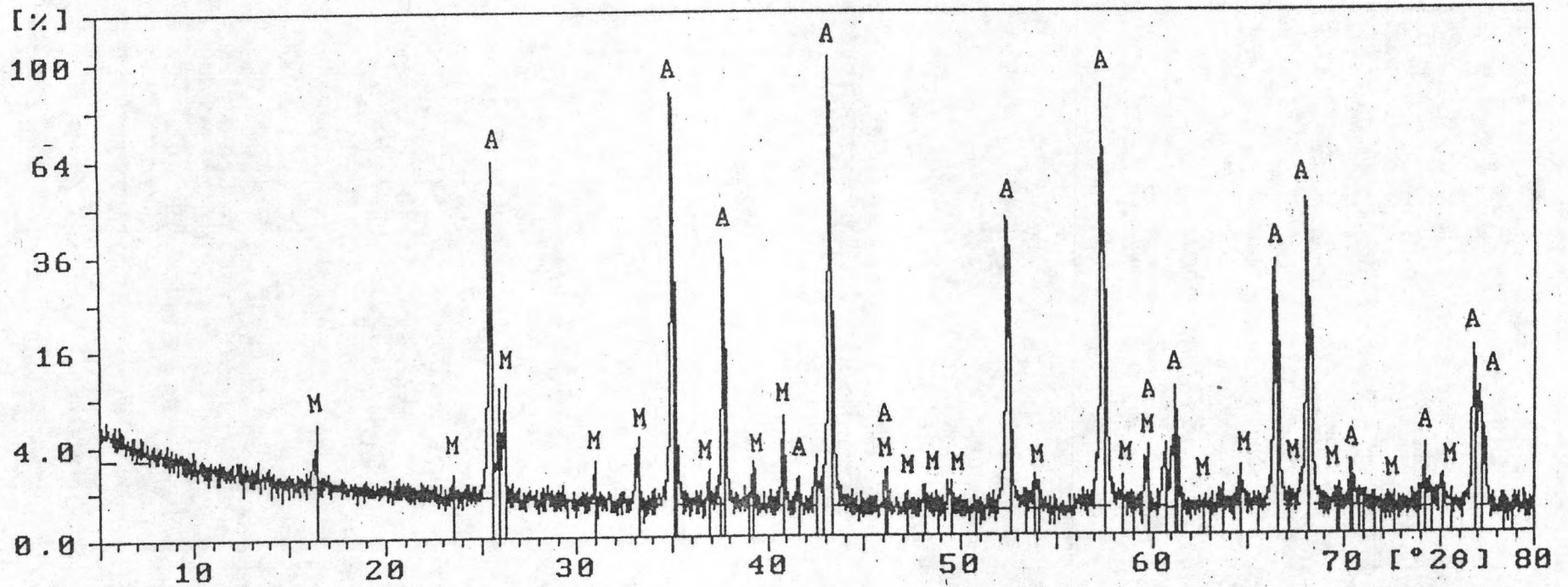


ก. 1500 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.10 ผลวิเคราะห์ทางแร่ของตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยความดัน 250 เมกะปาสกาล และเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

Sample ident.: Fired 1650°C Sample

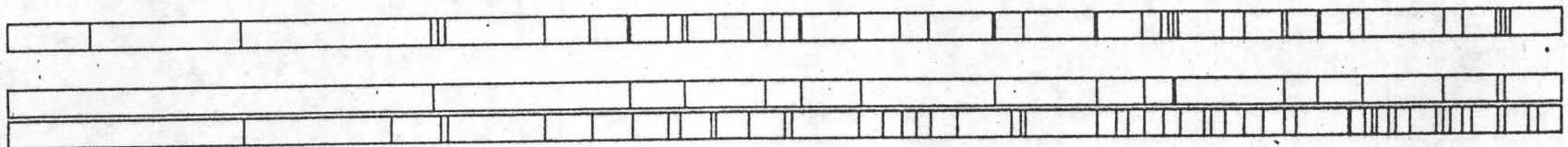
29-Aug-1995 10:55



ตัวอย่าง

อัลฟาอลูมินา (A)

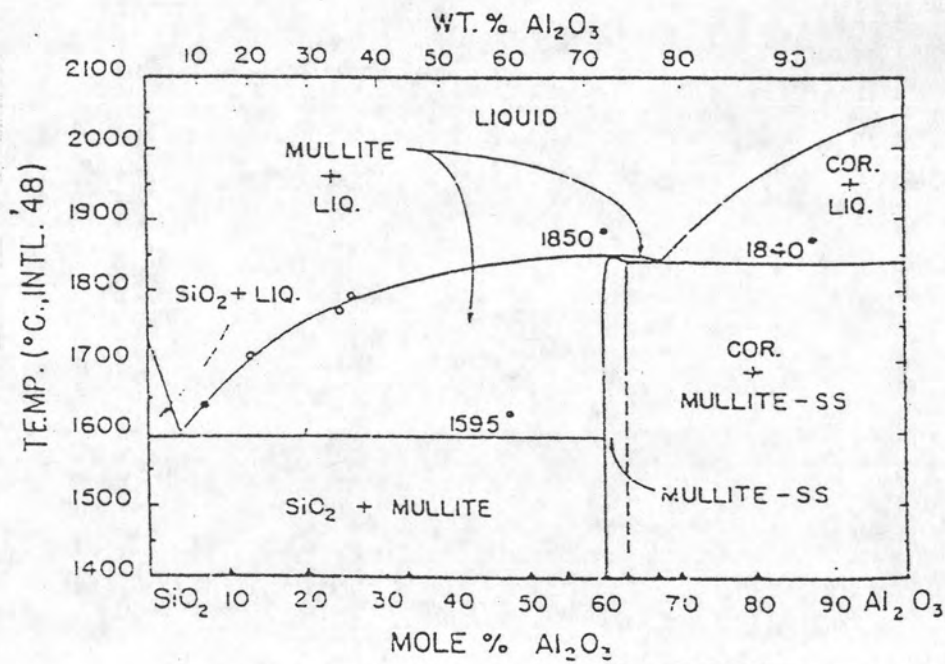
มัลลิว (M)



ข. 1650 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.10 ผลวิเคราะห์ทางแร่ของตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยความดัน 250 เมกะปาสกาล

และเผาที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.11 แผนภาพสมดุลระหว่างอุณหภูมิกับซิลิกาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1400 องศาเซลเซียส
(Aramaki และ Roy, 1954)

4.4.2 ผลของความดันในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการ เผาต่อโครงสร้างของตัวอย่าง

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการ เผากับการหดตัวของตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4.5 และกราฟรูปที่ 4.12

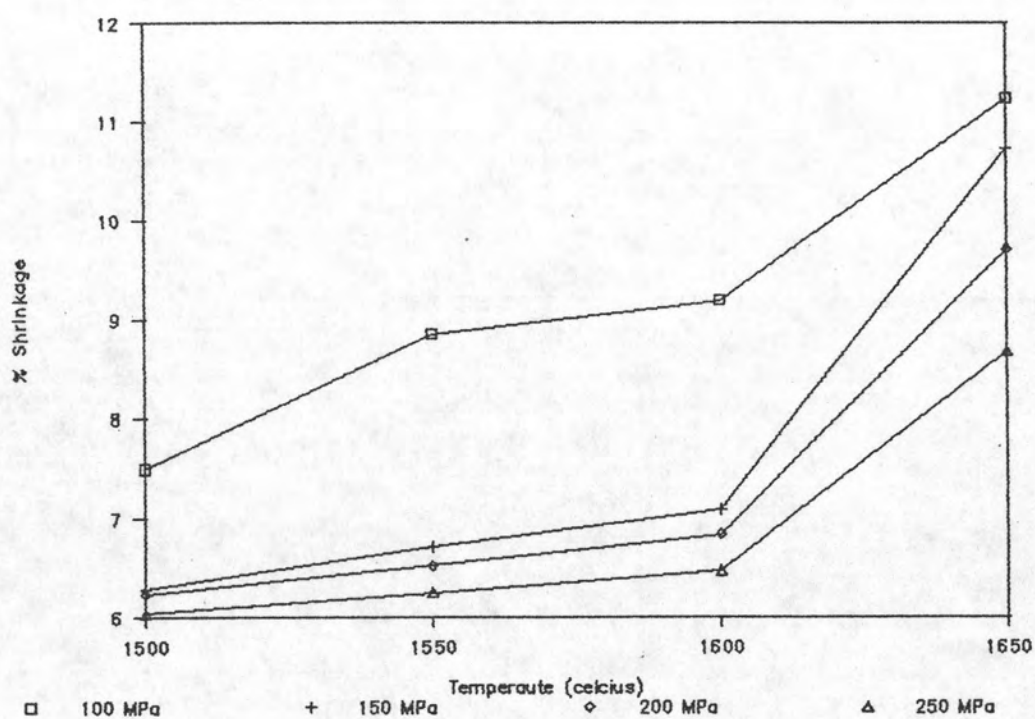
ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการ เผากับความหนาแน่นของตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4.6 และกราฟรูปที่ 4.13

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการ เผากับปริมาตรรูพรุนในเนื้อตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4.7 และกราฟรูปที่ 4.14

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการ เผากับการดูดซึมน้ำของตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4.8 และกราฟรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.5 ร้อยละของการหดตัวของตัวอย่างที่ขึ้นรูปและเผาที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ กัน

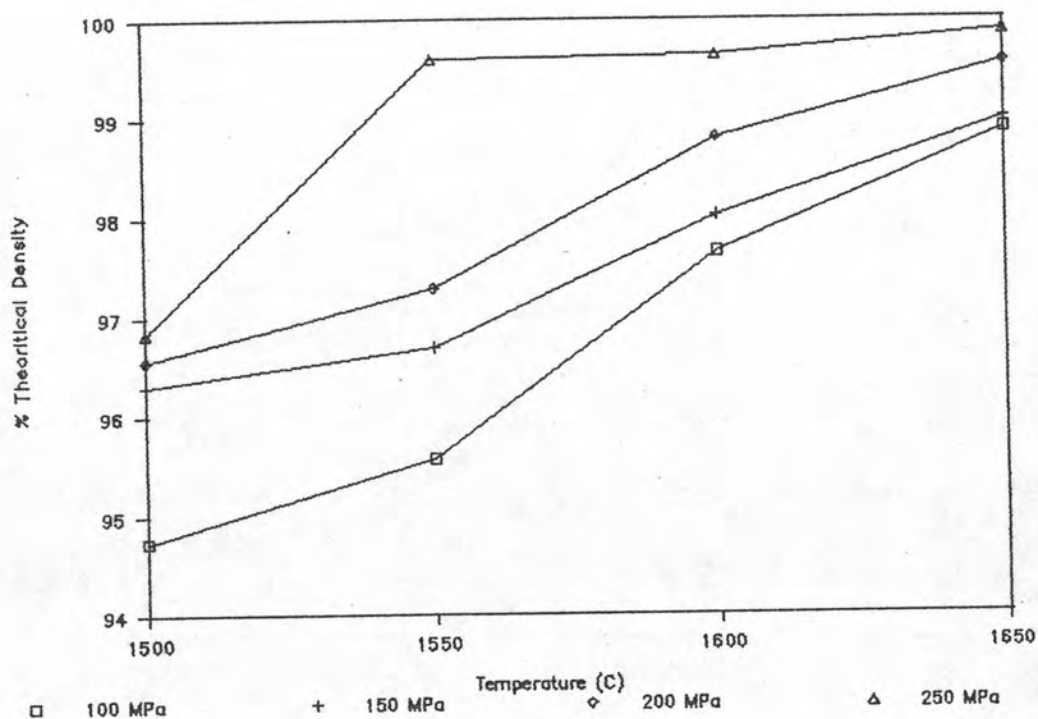
| อุณหภูมิ ในการเผา (องศาเซลเซียส) | ความดันที่ใช้ขึ้นรูป (เมกะปาสกาล) | | | |
|--|-----------------------------------|---------|--------|--------|
| | 100 | 150 | 200 | 250 |
| 1500 | 7.50 % | 6.28 % | 6.23 % | 6.03 % |
| 1550 | 8.86 % | 6.72 % | 6.52 % | 6.25 % |
| 1600 | 9.20 % | 7.09 % | 6.84 % | 6.47 % |
| 1650 | 11.24 % | 10.73 % | 9.71 % | 8.69 % |



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการเผากับร้อยละของการหดตัวของตัวอย่าง

ตารางที่ 4.6 ร้อยละของความหนาแน่นทางทฤษฎีของตัวอย่างที่ขึ้นรูปและเผาที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ กัน (ความหนาแน่นทางทฤษฎีเท่ากับ 3.914 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

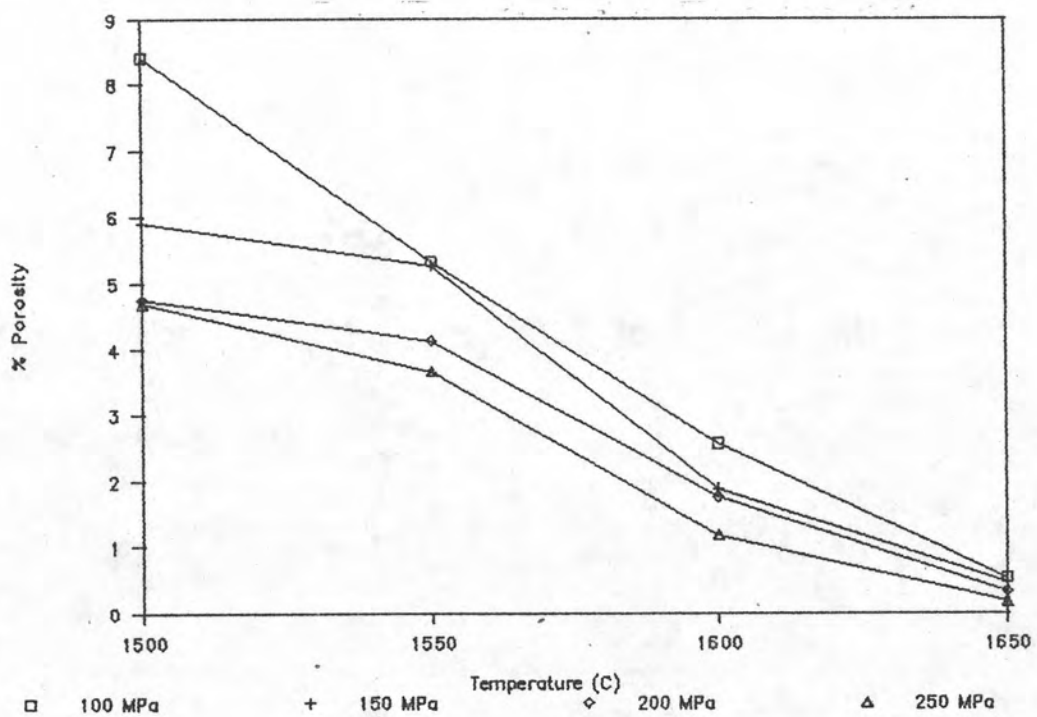
| อุณหภูมิ ในการเผา (องศาเซลเซียส) | ความดันที่ใช้ขึ้นรูป (เมกะปาสกาล) | | | |
|--|-----------------------------------|---------|---------|---------|
| | 100 | 150 | 200 | 250 |
| 1500 | 94.73 % | 96.31 % | 96.56 % | 96.83 % |
| 1550 | 95.57 % | 96.69 % | 97.29 % | 99.59 % |
| 1600 | 97.65 % | 98.01 % | 98.80 % | 99.63 % |
| 1650 | 98.88 % | 98.99 % | 99.55 % | 99.88 % |



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการเผากับร้อยละของความหนาแน่นทางทฤษฎีของตัวอย่าง

ตารางที่ 4.7 ร้อยละของปริมาณรูพรุนในเนื้อตัวอย่างที่ขึ้นรูปและ เเผาที่ความดัน และอุณหภูมิต่างๆ กัน

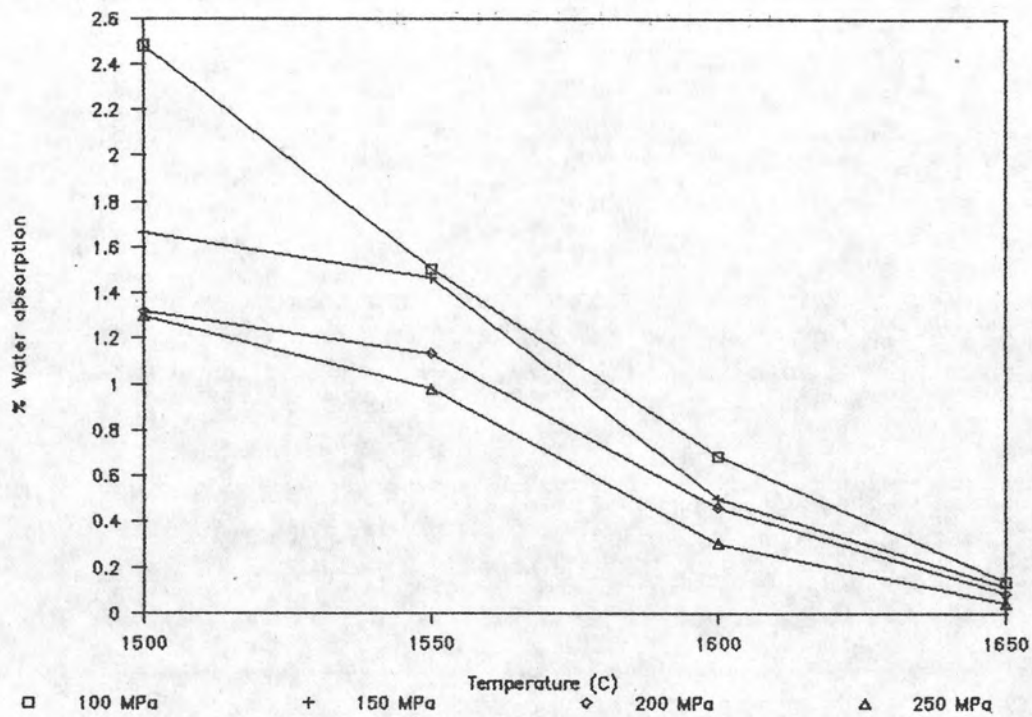
| อุณหภูมิ ในการเผา (องศาเซลเซียส) | ความดันที่ใช้ขึ้นรูป (เมกะปาสกาล) | | | |
|--|-----------------------------------|---------|---------|---------|
| | 100 | 150 | 200 | 250 |
| 1500 | 8.415 % | 5.907 % | 4.745 % | 4.688 % |
| 1550 | 5.326 % | 5.261 % | 4.129 % | 3.665 % |
| 1600 | 2.564 % | 1.877 % | 1.759 % | 1.178 % |
| 1650 | 0.532 % | 0.457 % | 0.331 % | 0.179 % |



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการเผา กับร้อยละปริมาณรูพรุนของตัวอย่าง

ตารางที่ 4.8 ร้อยละของการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่ขึ้นรูปและ เเผาที่ความดัน และอุณหภูมิต่างๆ กัน

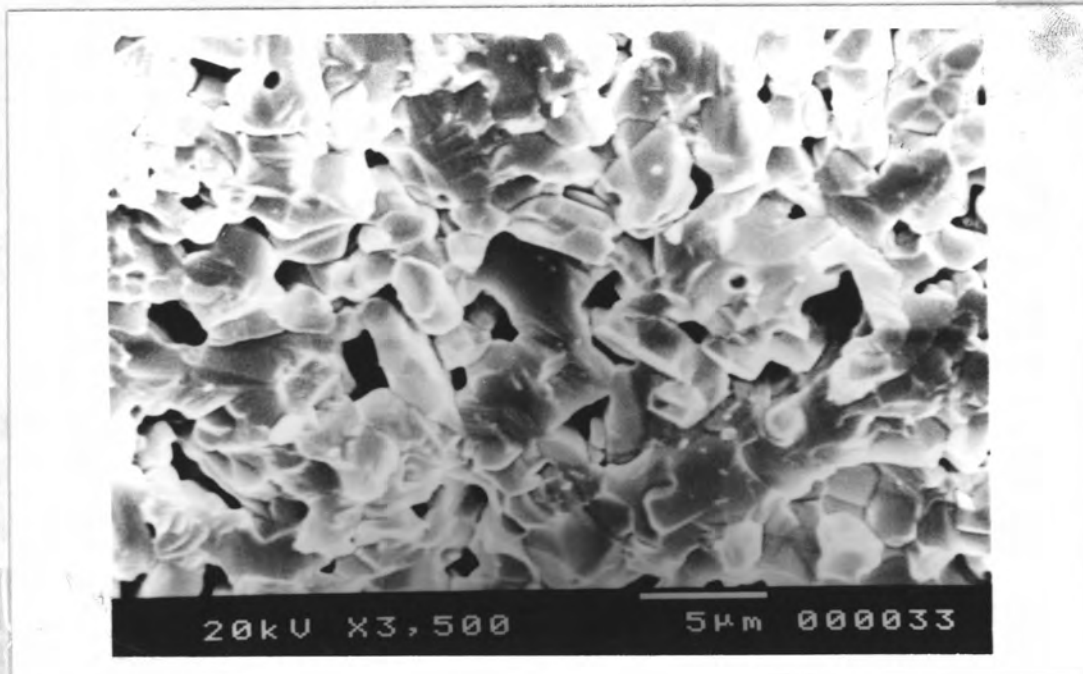
| อุณหภูมิ ในการเผา (องศาเซลเซียส) | ความดันที่ใช้ขึ้นรูป (เมกะปาสกาล) | | | |
|--|-----------------------------------|---------|---------|---------|
| | 100 | 150 | 200 | 250 |
| 1500 | 2.481 % | 1.666 % | 1.318 % | 1.298 % |
| 1550 | 1.504 % | 1.467 % | 1.135 % | 0.979 % |
| 1600 | 0.687 % | 0.499 % | 0.463 % | 0.306 % |
| 1650 | 0.138 % | 0.118 % | 0.085 % | 0.046 % |



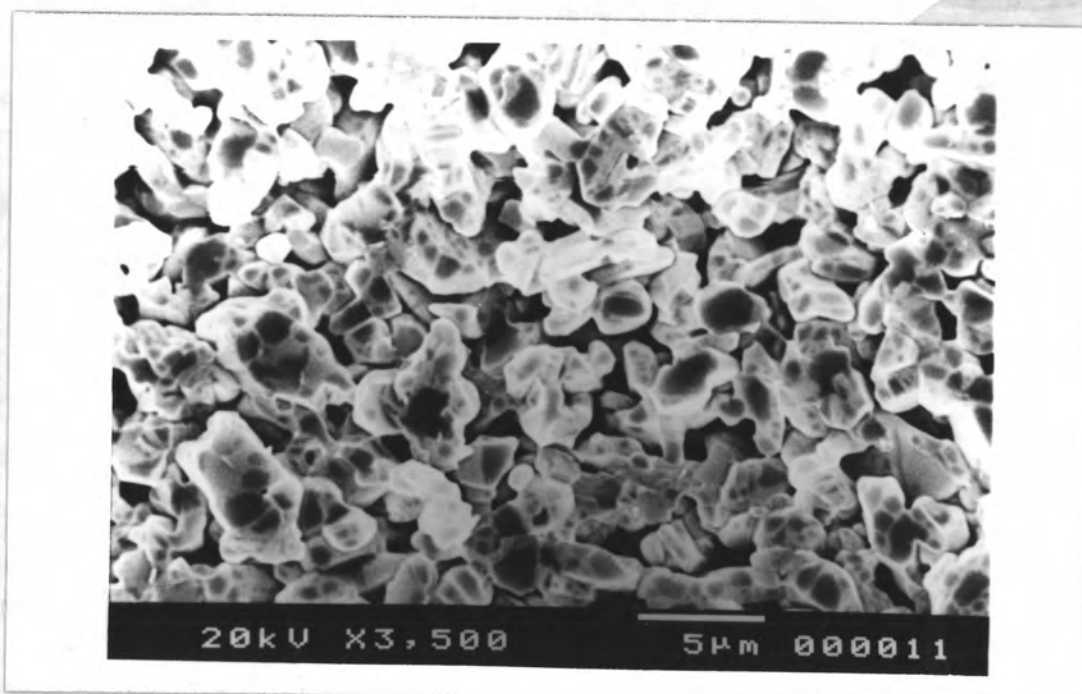
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการเผา กับร้อยละของการดูดซึมน้ำของตัวอย่าง

จากผลการทดลองแสดงว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาไหม้จะมีผลทำให้การหดตัวและความหนาแน่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อใช้ความดันในการขึ้นรูปไม่มากนัก ผลของอุณหภูมิในการเผาไหม้จะแสดงให้เห็นเด่นชัดมากขึ้น เช่นตัวอย่างที่ขึ้นรูปที่ความดัน 100 เมกะปาสกาลนั้นจะมีการหดตัวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 7.50 เป็น 11.24 และความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 94.61 เป็น 98.88 ของความหนาแน่นทางทฤษฎีเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาไหม้จาก 1500 มาเป็น 1650 องศาเซลเซียส ในขณะที่เมื่อขึ้นรูปด้วยความดันที่สูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากอุณหภูมิในการเผาไหม้จะไม่มากนัก เช่นตัวอย่างที่ขึ้นรูปที่ความดัน 250 เมกะปาสกาลการหดตัวจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6.03 เป็น 8.69 และความหนาแน่นจะมีค่าเพิ่มจากร้อยละ 96.83 ไปเป็น 99.80 ของความหนาแน่นทางทฤษฎีในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน และเช่นเดียวกัน ผลจากความดันในการขึ้นรูปก็จะทำให้การหดตัวและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิค่า

ค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณรูพรุนก็จะแสดงแนวโน้มคล้ายกัน กล่าวคือจะลดลงเมื่อเพิ่มความดันในการขึ้นรูป และ/หรือ อุณหภูมิในการเผา จุดที่น่าสนใจก็คือตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1600 องศาเซลเซียสจะมีค่าลดลงอย่างมาก จากตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียสซึ่งมีปริมาณรูพรุนถึงประมาณร้อยละ 3 ถึง 5 และการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.9 ถึง 1.5 เหลือเพียงปริมาณรูพรุนร้อยละ 1 ถึง 2.5 และการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.3 ถึง 0.6 เท่านั้นเมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายฝักรอยแตกของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความดัน 100 และ 250 เมกะปาสกาลและเผาที่อุณหภูมิ 1500 และ 1650 องศาเซลเซียสตามลำดับ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการเผาตัวอย่างจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในอย่างมาก ตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียสจะมีขนาดเกรนโตกว่าและมีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมากและการแตกจะเป็นแบบแตกภายในเกรน ผิดกับตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียสซึ่งเกรนละเอียดกว่าและมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอและการแตกจะเป็นแบบแตกตามบริเวณขอบเกรน ในขณะที่ตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยความดันต่างกันแต่เผาที่อุณหภูมิเดียวกันจะมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน แต่ขนาดเกรนจะใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มความดันในการขึ้นรูป ขนาดเกรนที่วัดได้จากตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยความดัน 100 เมกะปาสกาลและเผาที่อุณหภูมิ 1500 และ 1650 องศาเซลเซียสจะมีค่าประมาณ 2.28 และ 3.48 ไมครอนตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยความดัน 250 เมกะปาสกาลและเผาที่อุณหภูมิ 1500 และ 1650 องศาเซลเซียสจะมีขนาดเกรนประมาณ 2.51 และ 4.86 ไมครอนตามลำดับ

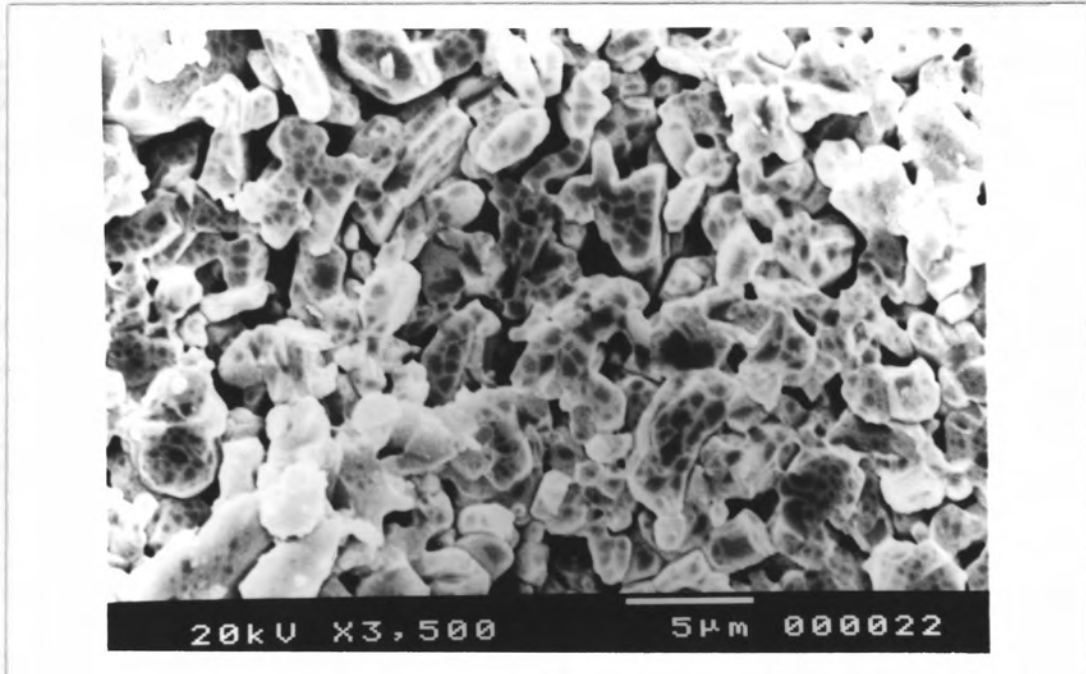


ก. 100 เมกะปาสกาล/1500 องศาเซลเซียส

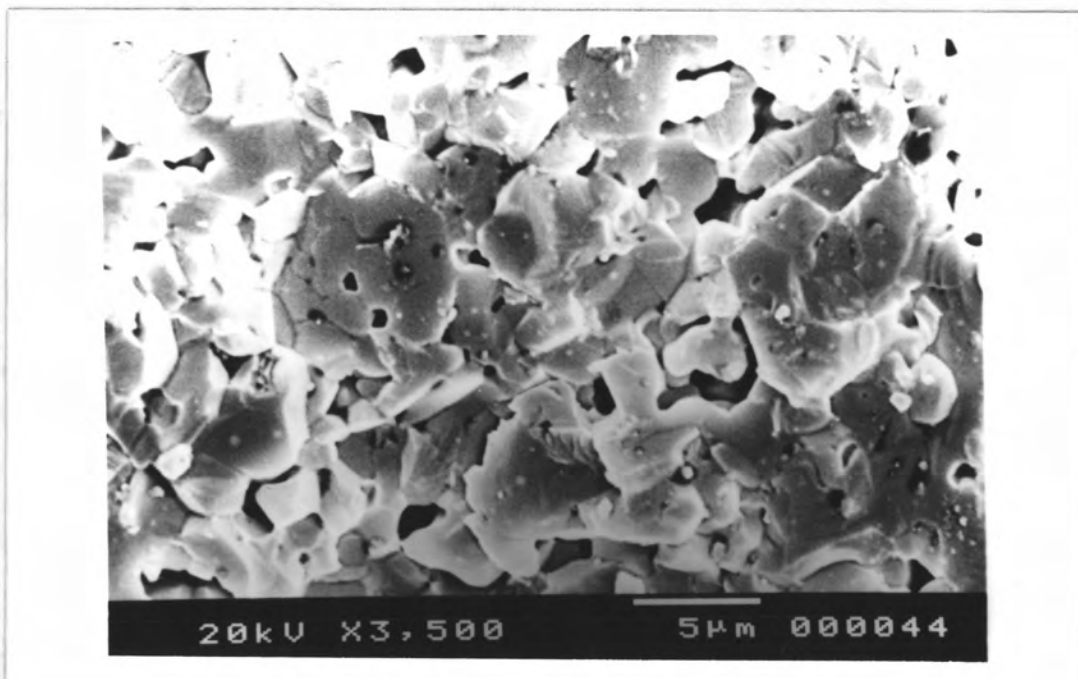


ข. 100 เมกะปาสกาล/1650 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายฉัวยรอยแตกของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความดันและ เเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กัน



ค. 250 เมกะปาสกาล/1500 องศาเซลเซียส



ข. 250 เมกะปาสกาล/1650 องศาเซลเซียส

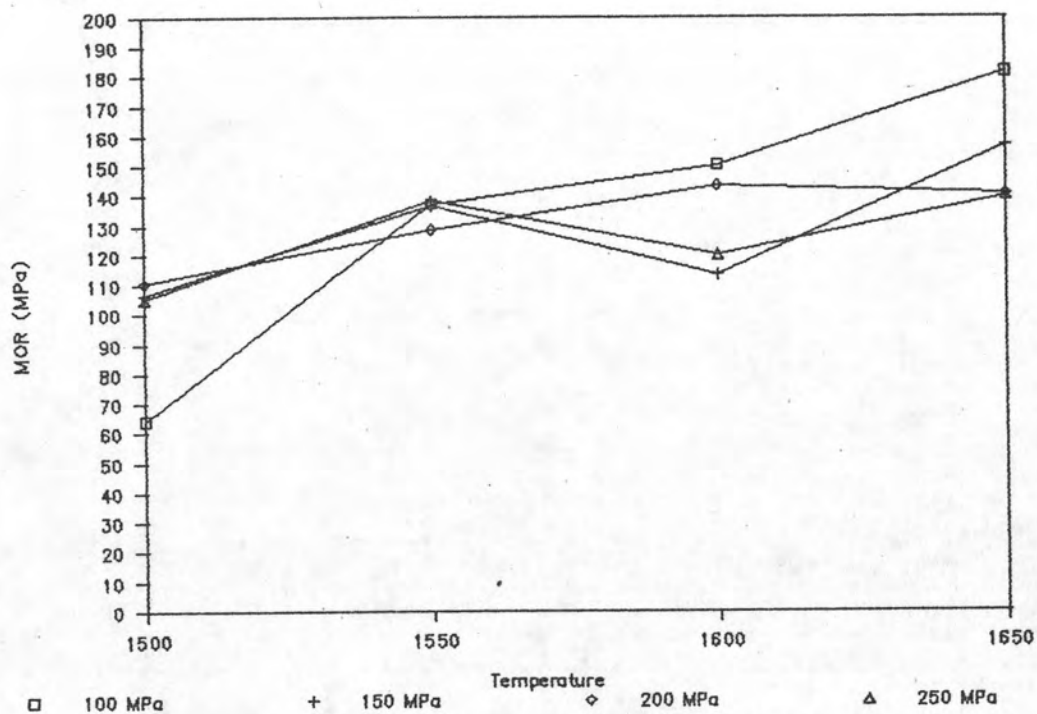
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายฟิวไรนแตกของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความดันและ เเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

4.4.3 ผลของความดันในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการ เผาต่อความแข็งแรง เชิงกลของตัวอย่าง

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการ เผาตัวอย่างกับค่าปริมาตรของการแตกหักแสดงได้ดังตารางที่ 4.9 และกราฟรูปที่ 4.17 ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความแปรปรวนของแนวโน้มเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากการ เตรียมตัวอย่างที่ไม่สามารถหาได้สม่ำเสมอเหมือนกันทุกชิ้นได้ อาทิเช่น พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่เตรียมขึ้นมักจะมีรูปร่าง เบี้ยวมาจากวงกลมที่สมบูรณ์อยู่เสมอ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้การกระจายแรงกดเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ เช่นเดียวกับรอยแตก (Crack) และตำหนิ (Flaw) ต่างๆ ภายในเนื้อซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูปก็จะมีผลทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลงมาก แต่ก็พอจะสรุปได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการ เผาโดยทั่วไปจะมีผลทำให้ความแข็งแรงของตัวอย่างสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างที่อัดด้วยความดันไม่มากนัก เช่นตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยความดัน 100 เมกะปาสกาลจะแสดงให้เห็นอิทธิพลของอุณหภูมิในการ เผาอย่างชัดเจน โดยความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นจาก 64.3 เมกะปาสกาลเป็น 181.5 เมกะปาสกาลเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการ เผาจาก 1500 องศาเซลเซียสเป็น 1650 องศาเซลเซียส ในขณะที่ตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยความดัน 250 เมกะปาสกาลจะเพิ่มจาก 105 เมกะปาสกาลเป็น 139.9 เมกะปาสกาล ส่วนการเปลี่ยนแปลงความดันในการอัดขึ้นรูปจะผลต่อความแข็งแรงต่างกันไป โดยตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิต่ำๆ เช่น 1500 องศาเซลเซียส การเพิ่มความดันจะทำให้ความแข็งแรง เพิ่มขึ้นในขณะที่ตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ การเพิ่มความดันในการขึ้นรูปกลับจะทำให้ความแข็งแรงลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งแรงของวัสดุจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการคือความหนาแน่นและขนาดของเกรน ในกรณีของตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยความดันต่ำ การเพิ่มอุณหภูมิในการ เผาจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นมาก (จากตารางที่ 4.6) อิทธิพลของความหนาแน่นจึงส่งผลเด่นชัดกว่า แต่ในการขึ้นรูปด้วยความดันสูง การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นไม่มากนัก อิทธิพลของขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิในการ เผาจะทำให้ความแข็งแรงจึงลดลงไป โดยค่าปริมาตรของการแตกหักที่ได้อยู่ในระดับประมาณ 60 ถึง 180 เมกะปาสกาลหรือประมาณ 9,000 ถึง 26,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งใกล้เคียงกับมาตรฐานที่กำหนดเอาไว้

ตารางที่ 4.9 ค่ามอดูลัสของการแตกหักของตัวอย่างที่ขึ้นรูปและเผาที่
ความดันและอุณหภูมิต่างๆ กัน (หน่วยเป็นเมกะปาสกาล)

| อุณหภูมิ ในการเผา (องศาเซลเซียส) | ความดันที่ใช้ขึ้นรูป (เมกะปาสกาล) | | | |
|--|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| | 100 | 150 | 200 | 250 |
| 1500 | 64.3 | 106.3 | 110.3 | 105.0 |
| 1550 | 137.2 | 136.6 | 128.5 | 138.2 |
| 1600 | 150.2 | 113.3 | 143.3 | 120.0 |
| 1650 | 181.5 | 156.7 | 140.5 | 139.9 |



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการเผา
กับค่ามอดูลัสของการแตกหักของตัวอย่าง

4.4.4 ผลของความต้านทานในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการ เผาต่อสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอย่าง

4.4.4.1 ความต้านทานไฟฟ้า

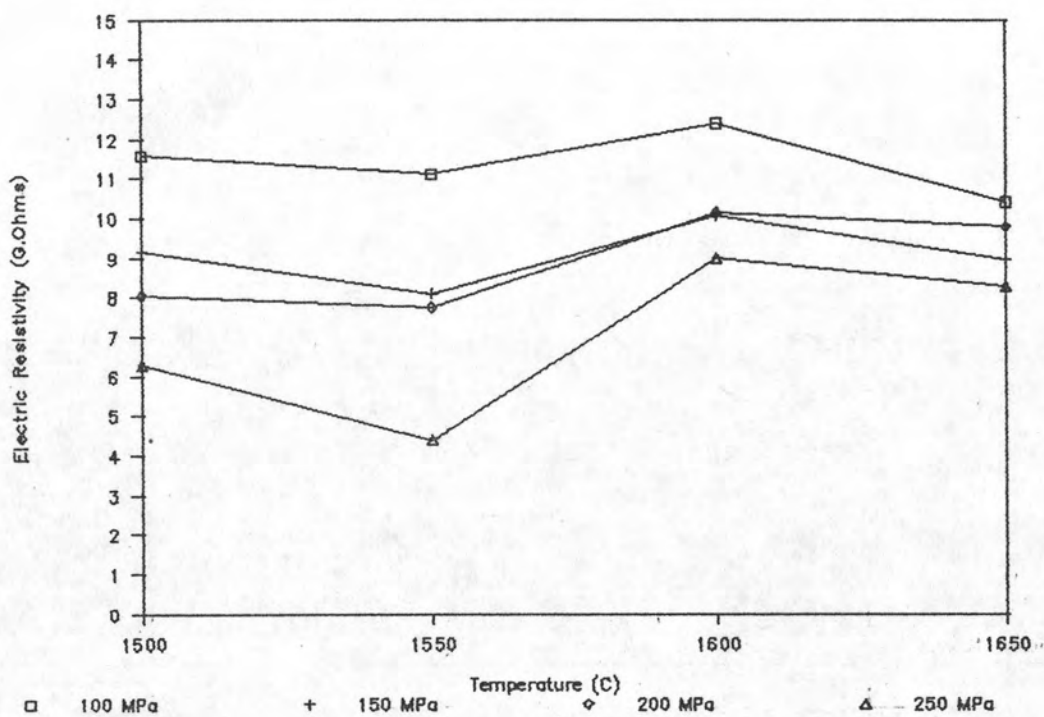
ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่ใช้ในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการเผา กับค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4.10 และกราฟรูปที่ 4.19 ผลที่ได้สอดคล้องกับที่คาดไว้ กล่าวคือการเพิ่มความต้านทานในการขึ้นรูป และ/หรือ อุณหภูมิในการเผาจะทำให้ความต้านทานไฟฟ้าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้น (Barta, Bartuska และคณะ อ้างถึงใน Gitzen, 1970) เพราะกระแสไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบเกรนดีกว่าในเนื้อวัสดุ ขนาดเกรนที่โตขึ้นจะทำให้บริเวณขอบเกรนยาวขึ้นและระยะอิสระที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ได้เพิ่มขึ้น การนำไฟฟ้าจึงสูงขึ้น แต่เมื่อเผาตัวอย่างถึงอุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ปริมาณรูพรุนและการकुศิมน้ำลดลงอย่างมาก ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ทั้งนี้เพราะอากาศโดยทั่วไปจะมีความชื้นและสิ่งสกปรกซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ค้ำอยู่ด้วยเสมอ ดังนั้นเมื่อลดปริมาณรูพรุนลดลง ปริมาณสิ่งเจือปนเหล่านี้ในเนื้อวัสดุก็จะลดลงด้วยทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของชิ้นงานที่วัดได้อยู่ในระดับจิกะ หรือ 10^9 โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งนับว่าค่อนข้างต่ำมาก เมื่อเทียบกับมาตรฐานซึ่งอยู่ในระดับ 10^{14} ถึง 10^{15} โอห์ม-เซนติเมตร สาเหตุสำคัญคือผงตัวอย่างที่ใช้ในการขึ้นรูปปริมาณเศษเคียมเพิ่มขึ้นจากที่คิดไว้ (ตารางที่ 4.3) เศษเคียมจะเกิดปฏิกิริยากับอลูมินาและซิลิกาเป็นสารประกอบจุดหลอมเหลวต่ำซึ่งเป็นองค์ประกอบของเนื้อสารส่วนที่เป็นแก้ว จึงทำให้กระแสไฟฟ้าผ่านบริเวณนี้ได้มากขึ้น ความต้านทานจึงลดลง

4.4.4.2 ความแข็งแรงทางโคอีเลกทริก

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่ใช้ในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการเผา กับค่าความแข็งแรงทางโคอีเลกทริก แสดงดังตารางที่ 4.11 และกราฟรูปที่ 4.20 ผลที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับความต้านทานไฟฟ้า กล่าวคือการเพิ่มความต้านทานในการขึ้นรูป และ/หรือ อุณหภูมิในการเผาจะทำให้ความแข็งแรงทางโคอีเลกทริกลดลง ยกเว้นตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยค่าที่ได้อยู่ในระดับประมาณ 300 จูลต่อหนึ่งน้ำหนัก ซึ่งใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน เนื่องจากการมีเนื้อสารส่วนที่เป็นแก้วนั่นเอง

ตารางที่ 4.10 ความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่ขึ้นรูปและ เฝ้าที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ กัน
(หน่วยเป็นจิกะโอม-เซนติเมตร)

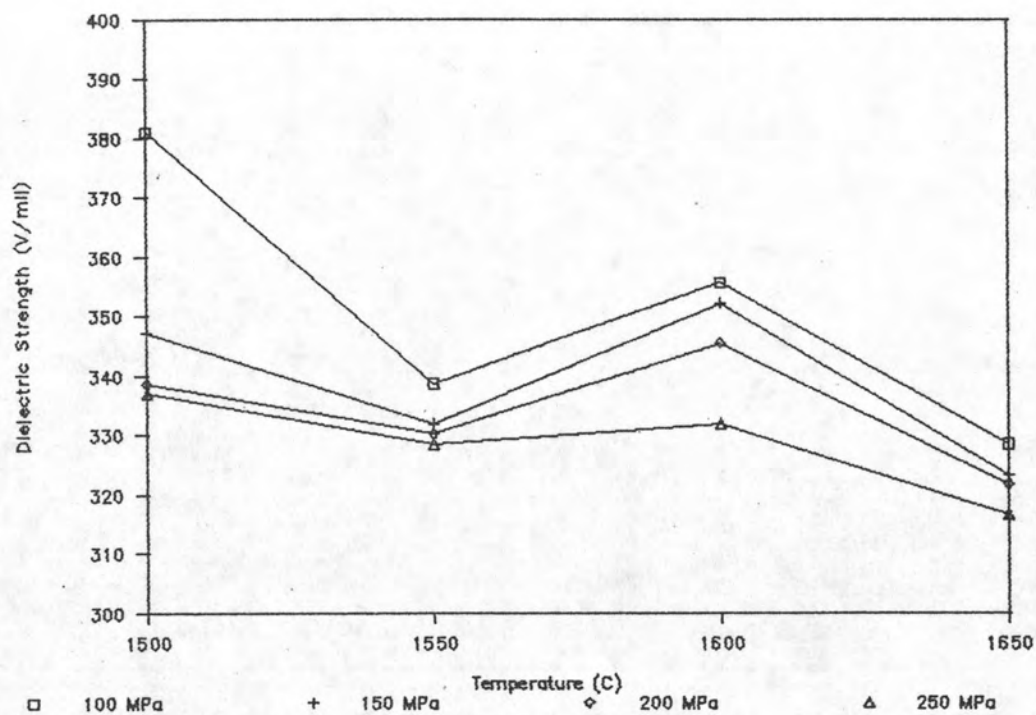
| อุณหภูมิ ในการ เฝ้า (องศาเซลเซียส) | ความดันที่ใช้ขึ้นรูป (เมกะปาสกาล) | | | |
|--|-----------------------------------|-------|-------|------|
| | 100 | 150 | 200 | 250 |
| 1500 | 11.58 | 9.16 | 8.05 | 6.30 |
| 1550 | 11.11 | 8.09 | 7.76 | 4.39 |
| 1600 | 12.39 | 10.07 | 10.14 | 9.00 |
| 1650 | 10.42 | 8.95 | 9.79 | 8.28 |



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการ เฝ้า
กับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่าง

ตารางที่ 4.11 ความแข็งแรงทางโคอีเลคทริกของตัวอย่างที่ขึ้นรูปและเผาที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ กัน (หน่วยเป็นโวลต์ต่อหนึ่งนิ้ว)

| อุณหภูมิในการเผา (องศาเซลเซียส) | ความดันที่ใช้ขึ้นรูป (เมกะปาสกาล) | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| | 100 | 150 | 200 | 250 |
| 1500 | 381.0 | 347.1 | 338.7 | 337.0 |
| 1550 | 338.7 | 331.9 | 330.2 | 328.5 |
| 1600 | 355.6 | 352.2 | 345.4 | 331.9 |
| 1650 | 328.5 | 323.4 | 321.7 | 316.7 |



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการเผากับความแข็งแรงทางโคอีเลคทริกของตัวอย่าง