

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์

#### 4.1 การเตรียมอะลูมินาสเลอว์รีและอิทธิพลของสารช่วยการกระจายลอยตัวต่อสมบัติการไหลตัวของอะลูมินาสเลอว์รี

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยการกระจายลอยตัว และค่าความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) ของอะลูมินาสเลอว์รี ในงานวิจัยนี้ แสดงในกราฟรูปที่ 4.1 ข้อมูลแสดงในตาราง ก. 1 (ภาคผนวก ก.)

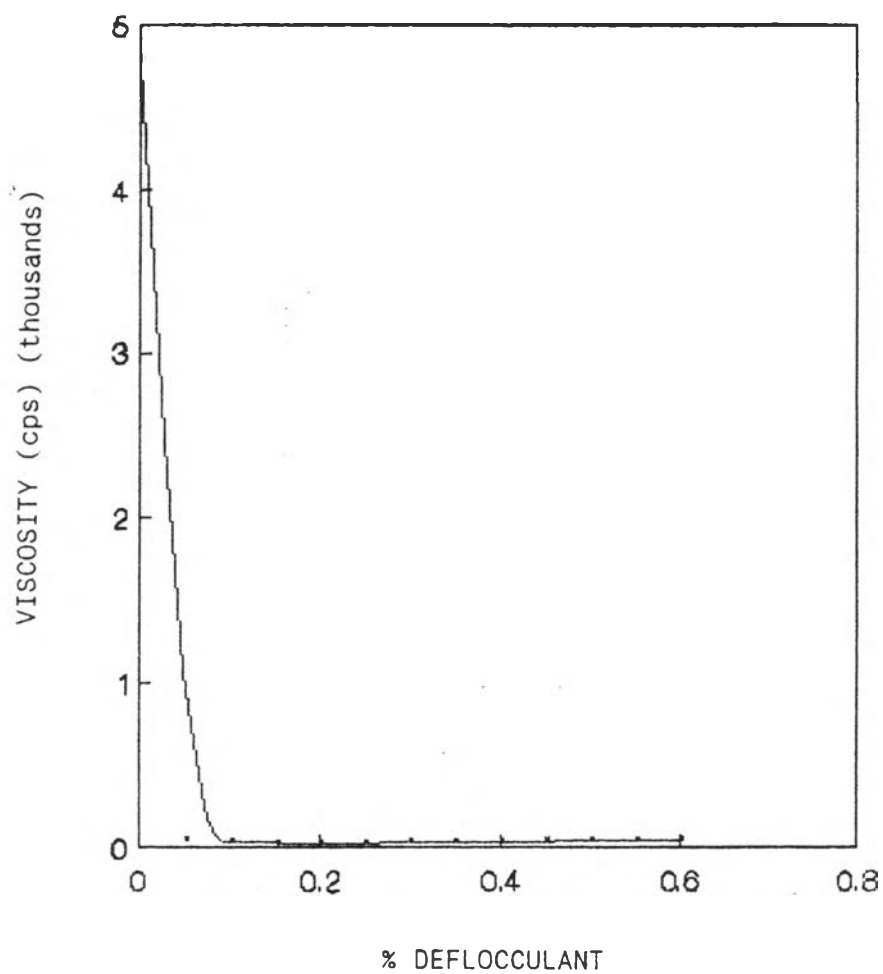
จากผลการทดลอง เมื่อเติมสารช่วยการกระจายลอยตัว เพียงเล็กน้อย ค่าความหนืดลดลงอย่างมาก สารช่วยการกระจายลอยตัวที่ใช้ในการวิจัย คือ เกลือโซเดียมของโพลีอะคริเลต มีโครงสร้างแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งมีกลุ่มข้างเคียง (side group) ที่แตกตัวได้ การแตกตัวในสารละลาย ทำให้เกิดกลุ่มข้างเคียงที่มีประจุ และไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม โม่เลกุลเหล่านี้จะถูกดูดบนผิวอนุภาคหลายจุดแสดงในรูปที่ 4.3 ลักษณะการป้องกันไม่ให้อนุภาคเข้าใกล้กันเชิงกายภาพในลักษณะนี้ เกิดจากการขัดขวางแบบสเตอริก (steric hindrance) ของโม่เลกุลที่ดูดอยู่

ปรากฏการณ์ การกระจายลอยตัวของสารเมื่อได้รับไอออน สามารถทำความเข้าใจได้จาก Diffuse electrical double-layer model (Reed, 1988) ซึ่งอธิบายรูปแบบไว้ว่า อนุภาคที่ได้รับประจุ จะประกอบด้วยชั้นของไอออนตรงข้าม (counter ions) ที่เคลื่อนที่ได้ยาก และความต่างของ ความเข้มข้นของไอออนตรงข้าม กับโม่เลกุลมีขั้วของของเหลวในชั้นที่เกิดการแพร่ (diffuse layer) ทำให้มีการจัดเรียงตัวแบบสภาวะคงที่ (steady state configurat-

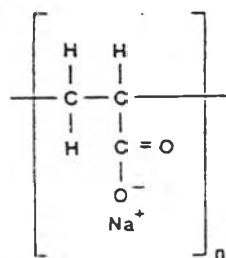
ion) การจัดเรียงตัวรูปแบบ แสดงในรูปที่ 4.4

การกระจายลอยตัว จากแรงผลัก ที่เกิดจากประจุทางไฟฟ้า และ/หรือ การขัดขวางแบบสเตอริก ในของเหลวมีขี้้ว สามารถเอาชนะแรงวันเดอวาลส์ (Van der Waals' forces) ที่ทำให้เกิดแอกโกลเมอเรท (agglomerates) ได้ การใช้สารช่วยการกระจายลอยตัวประเภทโพลีเมอร์ที่แตกตัวได้ ต้องควบคุมประเภทของสาร และ ความเข้มข้น เพื่อควบคุมแรงผลักระหว่างอนุภาคนั้นเอง

จากผลการทดลอง ในรูปที่ 4.1 พบว่า ปริมาณสารช่วยการกระจายลอยตัว ที่ทำให้ค่าความหนืดปรากฏต่ำสุด ซึ่งเป็นสภาวะที่แอกโกลเมอเรท ถูกกระจายให้เป็นกลุ่มอนุภาคเล็ก ๆ หรือ แต่ละอนุภาค คือร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนักของอะลูมินา จึงเลือกใช้ค่าความเข้มข้นนี้ในงานวิจัย

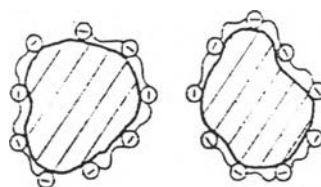


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยการกระจายลอยตัว และค่าความหนืดปรากฏของอะลูมินาสเลอรัว



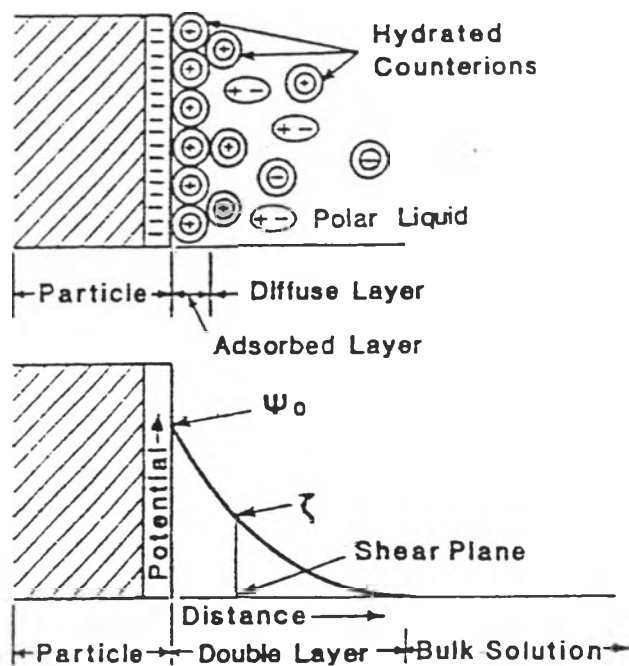
Sodium Polyacrylate

รูปที่ 4.2 โครงสร้างของสารช่วยการกระจายลอยตัว โซเดียมโพลีอะคริเลต



Anionic Polyelectrolyte

รูปที่ 4.3 การจับตัวของสารโพลีเมอร์ที่แตกตัวได้บนผิวอนุภาคออกไซด์



รูปที่ 4.4 รูปแบบ Electrical double layer สำหรับการทำให้อนุภาคเกิดประจุในของเหลวที่มีขั้ว

#### 4.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น

ลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินาที่ใช้เป็นสารตั้งต้น แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา

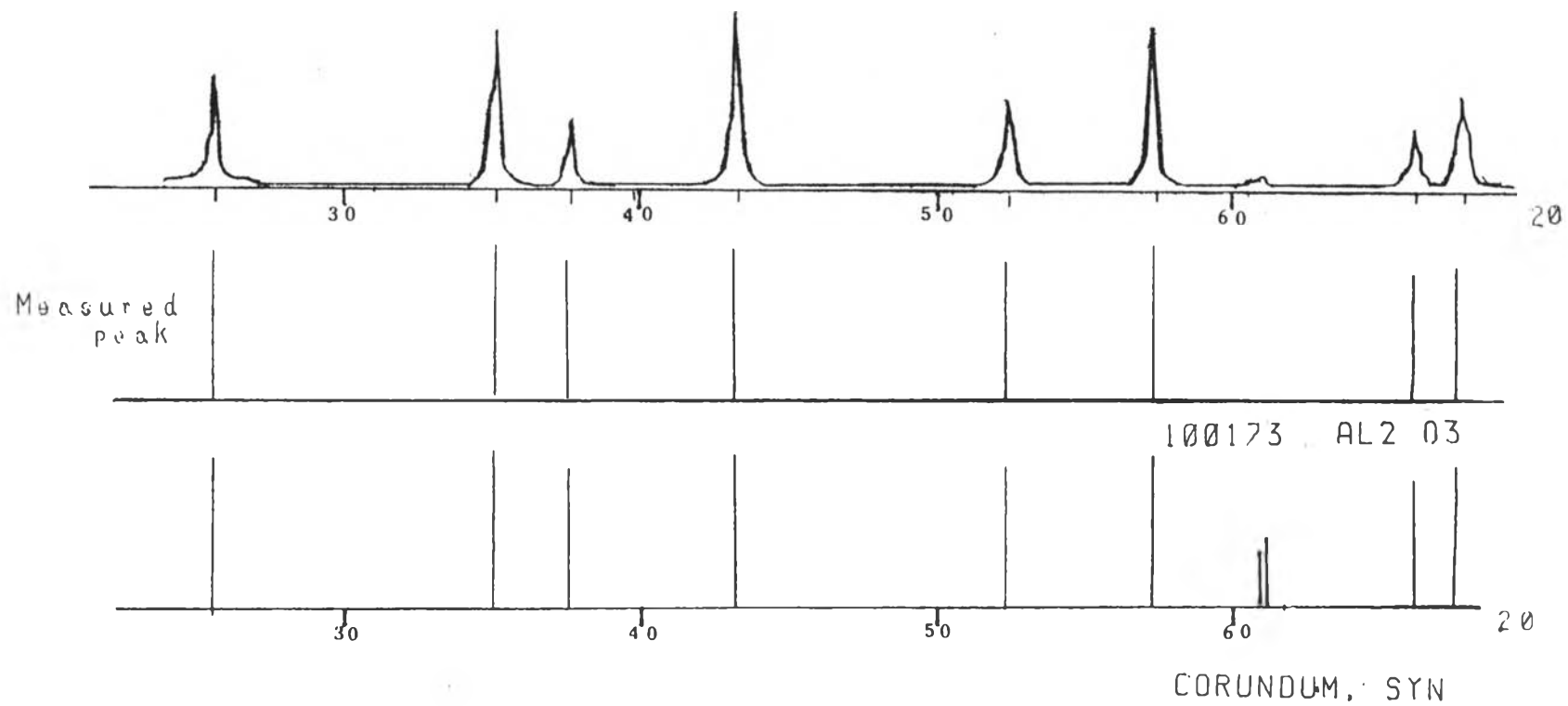
สมบัติ	ค่าที่วัดได้
$Al_2O_3$ , %	99+
CaO , %	วัดไม่ได้
$Fe_2O_3$ , %	วัดไม่ได้
การกระจายขนาด, ไมโครเมตร	
90%	5.0
50%	0.50
10%	0.18
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม)	9.5
ความถ่วงจำเพาะ	3.97

จากการวิเคราะห์ หาส่ว่นประกอบทางเคมี ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (วิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผลการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข.) สารตั้งต้นมีอะลูมินาเป็นส่วนประกอบมากกว่าร้อยละ 99 และไม่พบสิ่งเจือปนที่มีปริมาณสูงพอที่จะวัดได้

รูปแบบพีคของการศึกษาเฟส (XRD Pattern) แสดงในรูปที่ 4.5 ลักษณะของรูปแบบพีคเอกซเรย์ แสดงในตาราง ก.2 (ภาคผนวก ก.) พีคที่มีความเข้มสูงสุด อยู่ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 43.28 องศา พีคที่มีความเข้มรองลงมา อยู่ที่มุม  $2\theta$  35.08, 57.47 และ 25.52 องศา ตามลำดับ พบว่า สารตั้งต้นมีเฟส อยู่ในรูปอัลฟาอะลูมินา ( $\alpha - Al_2O_3$ )

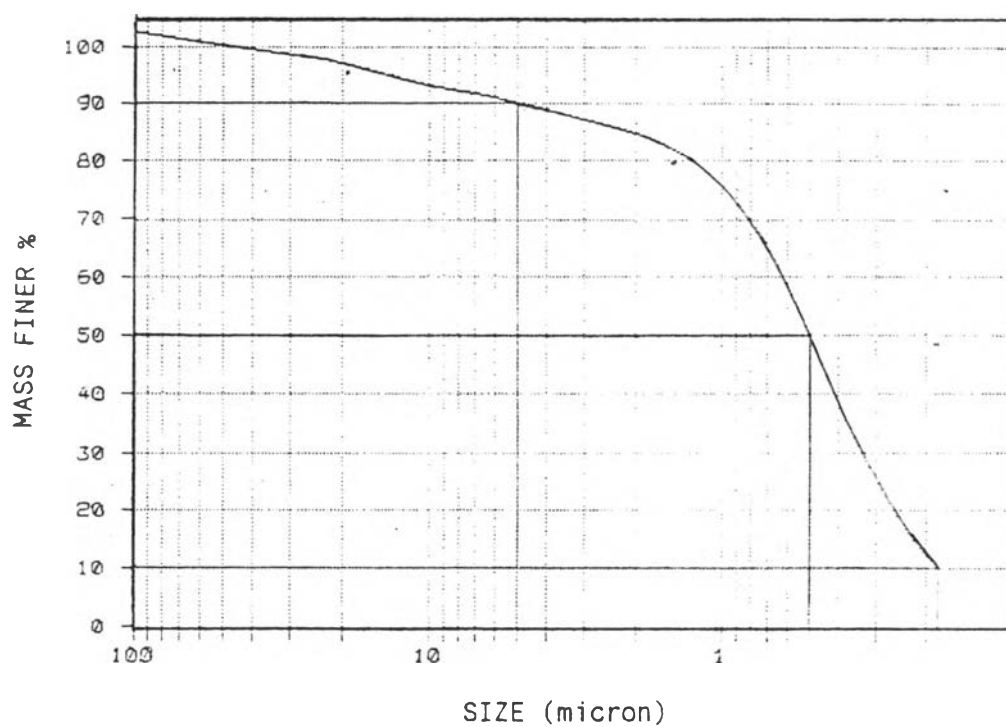
การกระจายขนาดอนุภาคของผงอะลูมินา แสดงในกราฟรูปที่ 4.6 ข้อมูลแสดงในตาราง ก.3 (ภาคผนวก ก.) จากกราฟพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) มีค่าเท่ากับ 0.50 ไมโครเมตร  $d_{16}$  เท่ากับ 0.25 ไมโครเมตร  $d_{84}$  เท่ากับ 2.0 ไมโครเมตร การกระจายขนาดไม่เป็นแบบ log - normal อนุภาคที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในรูปที่ 4.7 และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ ก.1 (ภาคผนวก ก.) พบว่าผงอะลูมินาส่ว่นมากมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร ช่วงการกระจายขนาดแคบ พบอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตร จำนวนหนึ่ง

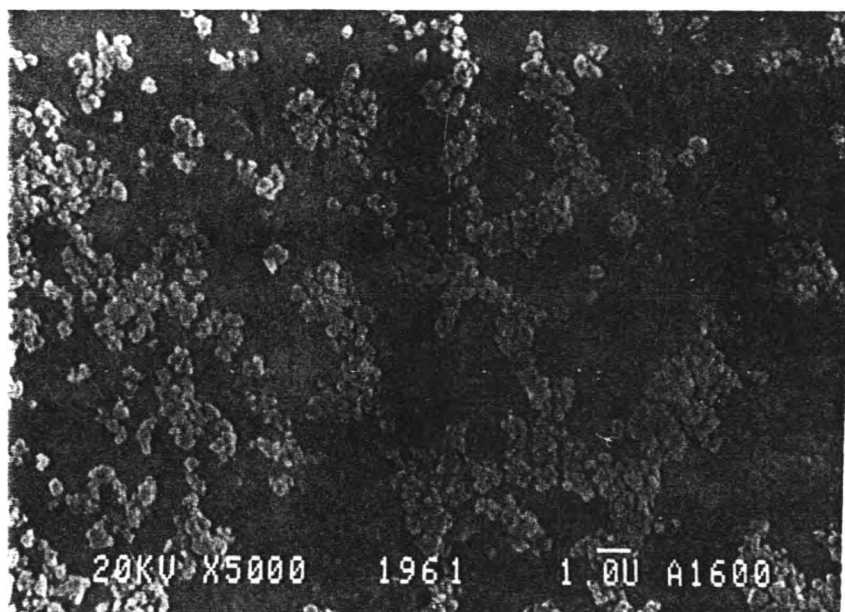


รูปที่ 4.5 รูปแบบพีคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของผงอะลูมินา A 16 SG

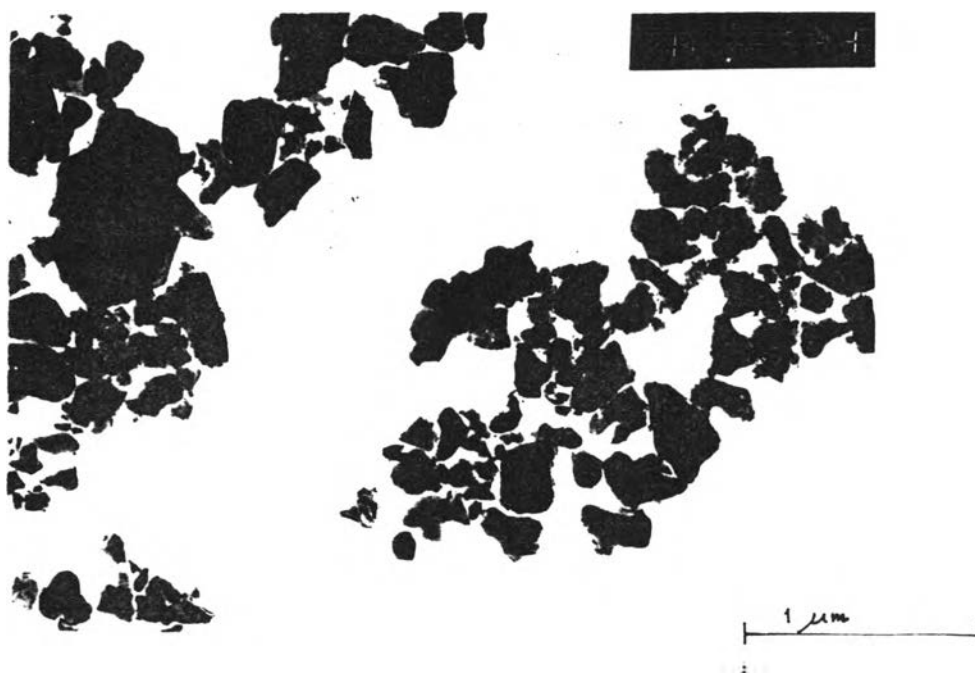




รูปที่ 4.6 การกระจายขนาดอนุภาคของผงอะลูมินา A 16 SG



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายผงอะลูมินา A 16 SG  
จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายผงอะลูมินา A 16 SG  
จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

#### 4.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของอะลูมินาสเลอรัรี

ลักษณะเฉพาะของอะลูมินาสเลอรัรี แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะเฉพาะของอะลูมินาสเลอรัรี

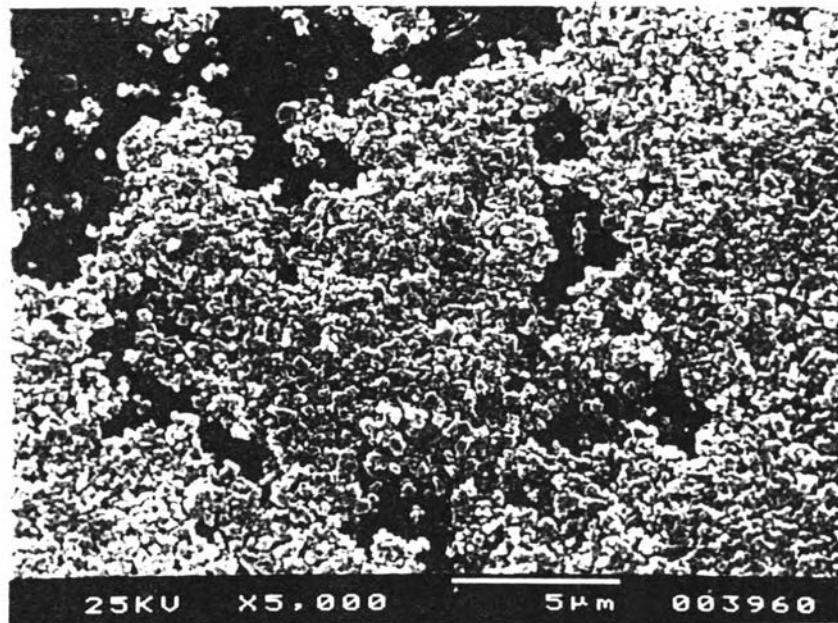


สมบัติ	ค่าเฉลี่ยที่วัดได้
ค่าความหนืดปรากฏ (มิลลิปาสคาล-วินาที)	
- ก่อนเติมตัวเพิ่มการยึดเกาะ	40.0 (+2.61)
- หลังผสมตัวเพิ่มการยึดเกาะ	181.6 (+25.3)
ความหนาแน่นจริงของสเลอรัรี (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.83

หมายเหตุ : ตัวเลขในวงเล็บคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง  
10 ครั้ง

ค่าความหนืดปรากฏของสเลอรัรี หลังผสมสารเพิ่มการยึดเกาะ มีค่าเฉลี่ย 181.6 มิลลิปาสคาลวินาที มากกว่าก่อนผสมสารเพิ่มการยึดเกาะ ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 40 มิลลิปาสคาลวินาที ประมาณ 4 - 5 เท่า เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นจริงของสเลอรัรี และจากการสังเกต ไม่พบฟองในสเลอรัรี

ภาพถ่ายสเลอรัรี หลังการผสมตัวเพิ่มการยึดเกาะ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในรูปที่ 4.9 จากภาพพบว่า ผงอะลูมินาในสเลอรัรีกระจายตัวดี ไม่พบลักษณะของแอกโกลเมอเรตขนาดใหญ่จากการศึกษา



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายอะลูมินาผงเลอร์รี่หลังการผสมตัวเพิ่มการยึดเกาะ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 4.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของแกรนูล

##### 4.4.1 ลักษณะเฉพาะของแกรนูล แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะเฉพาะของแกรนูล

สมบัติ	ค่าที่วัดได้
ความชื้น, (ร้อยละโดยน้ำหนัก) สำหรับการแกรนูล	5.02 (+0.64) <sup>1</sup>
เม็ดแกรนูล	0.91 (+ 0.19) <sup>1</sup>
ความหนาแน่น, (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	
ปรากฏ (apparent)	1.04
หลังการเคาะ (tap)	1.31
แกรนูล (granule)	2.19 <sup>2</sup>
ร้อยละของค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี ของความหนาแน่น	
ปรากฏ	26.1
หลังการเคาะ	32.9
แกรนูล	53.9 <sup>2</sup>
อัตราส่วนการบรรจุ	1.26
อัตราการไหล, (กรัม/วินาที)	0.54
การกระจายขนาด, (ไมโครเมตร)	
90% <	207
50% <	104
10% <	53

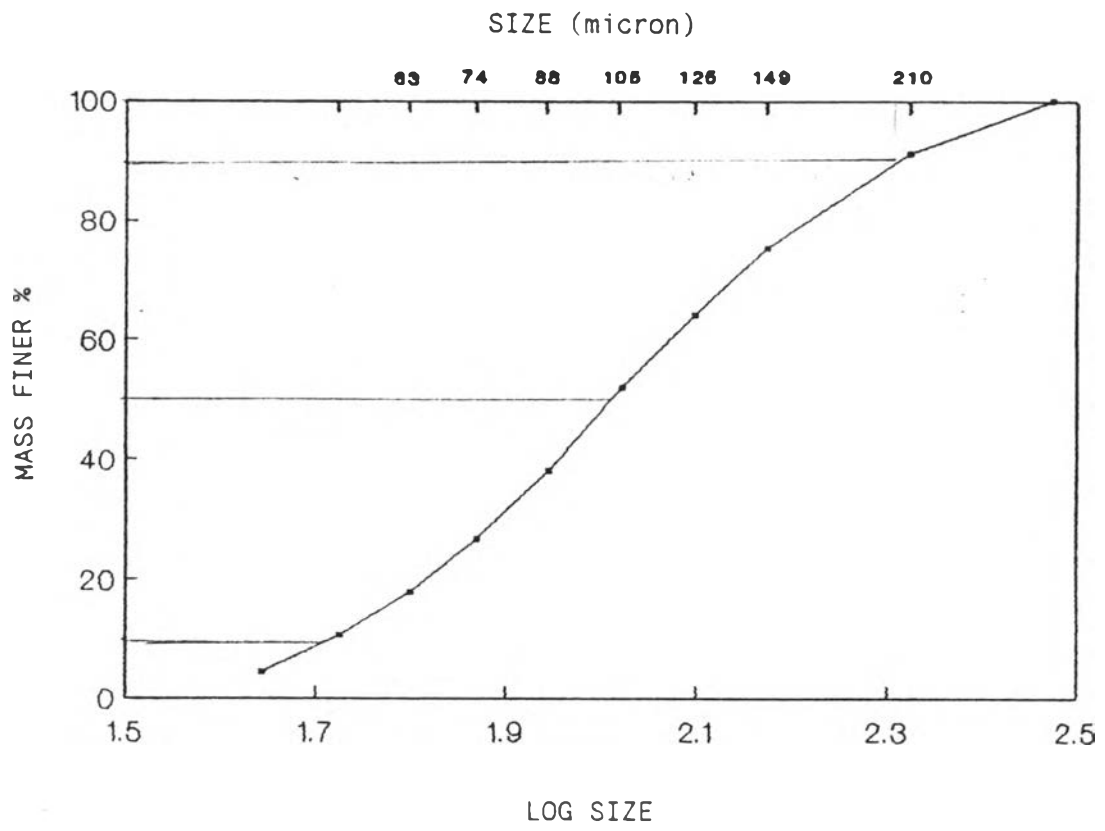
หมายเหตุ : 1 ตัวเลขในวงเล็บคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง  
20 ครั้ง

2 พิจารณาเฉพาะน้ำหนักอะลูมินา ไม่รวมสารอินทรีย์

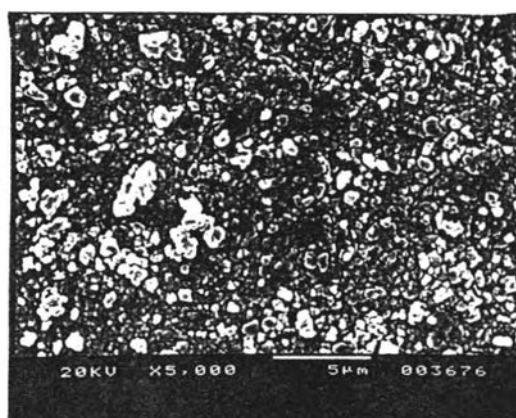
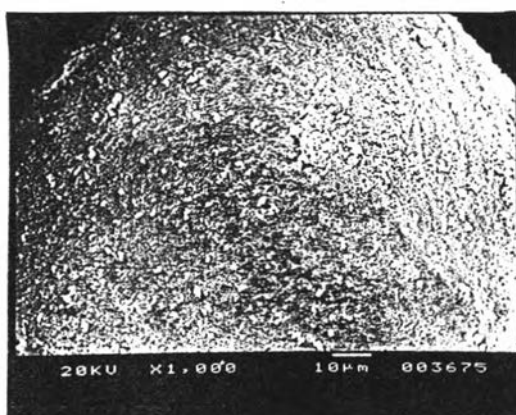
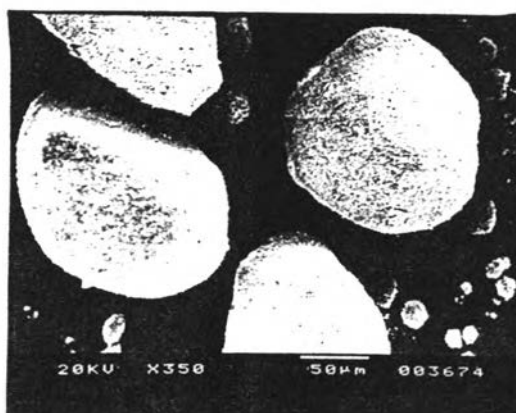
จากตาราง พบว่า ค่าความชื้นที่เหมาะสมในการแกรนูลที่มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 5.02 โดยน้ำหนัก และค่าความชื้นของแกรนูลที่เหมาะสมกับการอัดขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 0.91 โดยน้ำหนัก การคำนวณค่าความหนาแน่นของแกรนูล คำนวณโดยอาศัยสมมติฐาน จากการพิจารณากลไกของการจับอัดตัวของอนุภาคทรงกลมที่ว่า แกรนูลมีส่วนส่วนของรูพรุน (pore fraction) เท่ากับ 0.4 (Messing, 1984; Cameron, 1990)

การกระจายขนาดอนุภาคของแกรนูล แสดงในกราฟรูปที่ 4.10 ข้อมูลแสดงในตาราง ก.4 (ภาคผนวก ก.) จากกราฟ พบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $\bar{d}_{sum}$ ) เท่ากับ 104 ไมโครเมตร และการกระจายขนาดเป็นแบบ log - normal เนื่องจาก ค่า  $d^{250} = d_{84} \cdot d_{16}$

ลักษณะรูปร่างของแกรนูล แสดงในรูปที่ 4.11 จากภาพถ่ายที่กำลังขยายต่างๆ กัน พบว่าแกรนูลส่วนใหญ่มีรูปร่างค่อนข้างกลม การจัดเรียงตัวของอนุภาคในแกรนูลสม่ำเสมอ ผิวเรียบ (Reed, 1988) พบแกรนูลที่มีขนาดเล็กกว่าช่วงการคัดขนาดในแกรนูลแต่ละส่วนบ้างเล็กน้อย



รูปที่ 4.10 การกระจายขนาดอนุภาคของแกรนูล



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายแกรนูลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 350 , 1000 และ 5000 เท่า



#### 4.4.2 การวิเคราะห์สิ่งเจือปนในแกรนูล

เนื่องจากการเตรียมแกรนูล ต้องผ่านขั้นตอนการใช้อุปกรณ์ซึ่งอาจทำให้มีสิ่งเจือปนลงไปในสารตั้งต้น อาทิ ลูบดที่มีส่วนประกอบของอะลูมินา (ประมาณร้อยละ 90-95 โดยน้ำหนัก) น้อยกว่าส่วนประกอบอะลูมินาของตัวอย่างทดลอง (มากกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก) ตะแกรงร้อนที่ทำด้วยสแตนเลสสตีลและภาชนะต่าง ๆ จึงพิจารณานำแกรนูลไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบเคมี ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากผู้ผลิต (Alcoa; ข้อมูลผลิตภัณฑ์) แสดงในตารางที่ 4.4 และ ผลวิเคราะห์แบบเดียวกันของสารตั้งต้นพบว่า มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ก็ยังอยู่ในช่วงขอบเขตของงานวิจัย คือปริมาณอะลูมินามากกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก จึงยอมรับสิ่งเจือปนในปริมาณนี้

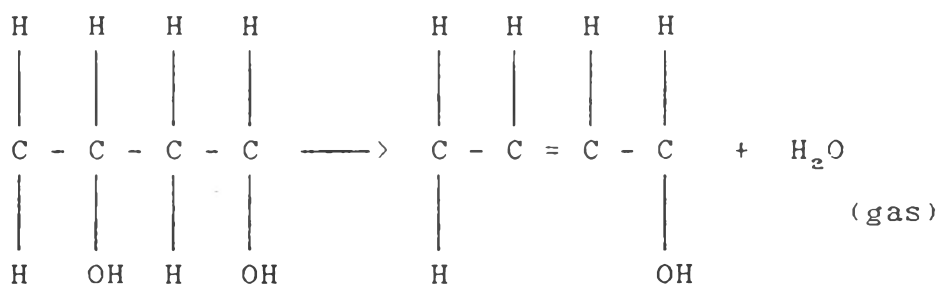
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบปริมาณสิ่งเจือปนในแกรนูล กับสิ่งเจือปนในสารตั้งต้นจากข้อมูลของผู้ผลิต

สิ่งเจือปน	ปริมาณ (ค่าสูงสุด), (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	สารตั้งต้น	แกรนูล
CaO	0.01	0.028
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01(0.03)	0.020
SiO <sub>2</sub>	0.02	
Na <sub>2</sub> O	0.08(0.1)	

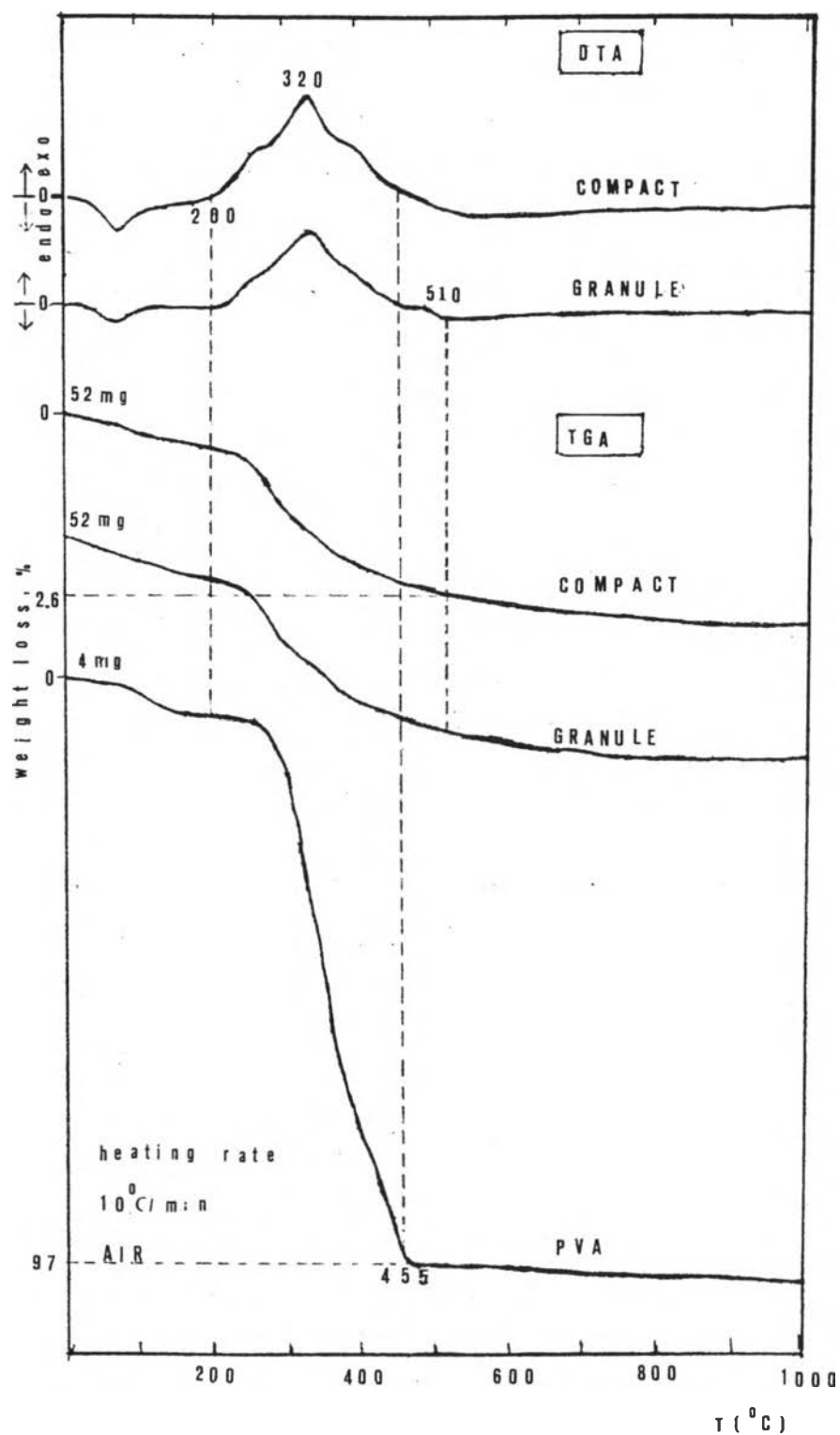
#### 4.4.3 การศึกษาสมบัติทางด้านความร้อนของแกรนูล

เทอร์โมแกรมของแกรนูล ที่ได้จากการวิเคราะห์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน แสดงในรูปที่ 4.12 จากกราฟ DTA พบว่าเมื่อแกรนูลได้รับความร้อน จะเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic) จากช่วงอุณหภูมิ ประมาณ 50-110 องศาเซลเซียส และเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic) ในช่วงอุณหภูมิ 190-500 องศาเซลเซียส จากกราฟ TGA พบว่าแกรนูลเริ่มสูญเสียน้ำหนักจากช่วงอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส ไปจนถึงอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักส่วนมาก จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 190-500 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน

ปฏิกิริยาที่เกิดในช่วงอุณหภูมิสูงถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการระเหยของน้ำ และปฏิกิริยาที่เกิดในช่วงอุณหภูมิ 190-500 องศาเซลเซียส เป็นปฏิกิริยาดีโพลีเมอไรเซชัน (depolymerization) และออกซิเดชัน (oxidation) (Revine, 1969; Reed, 1988) ของสารเพิ่มการยึดเกาะ คือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ กลุ่มข้างเคียงของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์จะค่อย ๆ หลุดออกไป ดังปฏิกิริยา



จากกราฟ TGA พบว่าน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักไปจนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ประมาณร้อยละ 2.5-2.7 ซึ่งอยู่ในช่วงปริมาณรวมของสารเพิ่มการยึดเกาะ และความชื้นที่ควบคุมในการผลิต

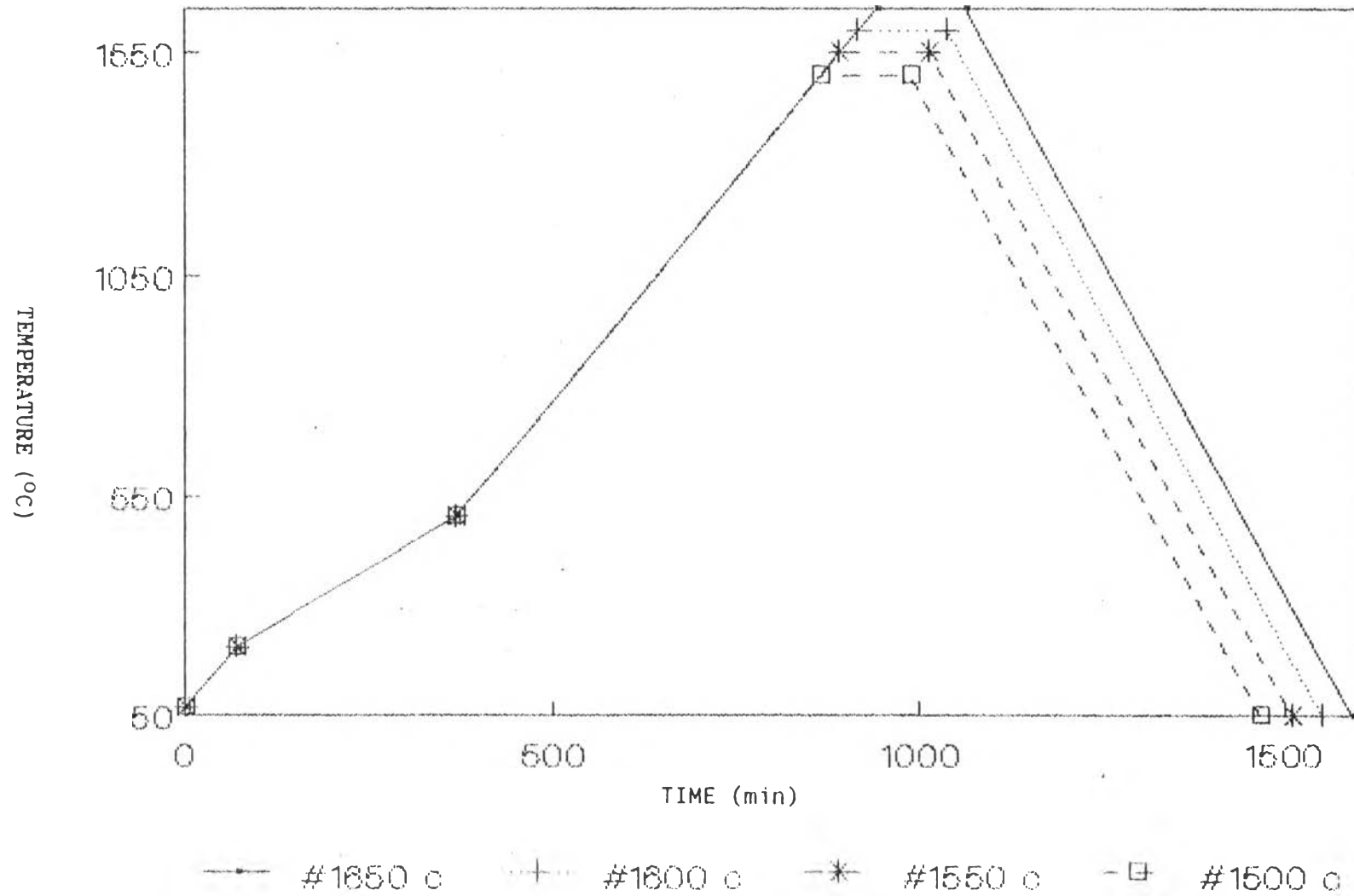


รูปที่ 4.12 เทอร์โมแกรมของแกรนูล ตัวอย่างก่อนการเผา และ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์

เมื่อเปรียบเทียบกราฟ TGA ของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ที่ใช้ในการทดลอง และ กราฟ TGA ของแกรนูล ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า อุณหภูมิสุดท้ายที่อัตราการสูญเสียน้ำหนักของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์สูง อยู่ที่ 455 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเดียวกันในแกรนูล ซึ่งอยู่ที่ 500 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาที่ผิว (surface reaction) ระหว่างผงอะลูมินากับโพลีแอลกอฮอล์ (Sheppard, 1990) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (Moutvala และ Onoda, 1971)

การนำไปใช้ที่สำคัญอย่างหนึ่ง ของการวิเคราะห์ทางด้านความร้อน คือ การนำไปใช้ในการพิจารณาตารางการเผา (Roosen, 1989) การให้ความร้อนในอัตราที่สูงเกินไป จะทำให้สารอินทรีย์เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เหลือถ่านสีดำในผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้นยังอาจทำให้เกิดรอยแตก (crack) ในชิ้นงาน การเผาควรให้อัตราการเพิ่มความร้อนต่ำ ในช่วงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาสูง นอกจากนั้น ยังต้องคำนึงถึงขนาดของชิ้นงานด้วย จากวัตถุประสงค์ข้อหนึ่งของงานวิจัย คือ มุ่งการนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม ประกอบกับผลจากการศึกษาทางด้านความร้อน จึงเลือกใช้ตารางการเผาในลักษณะใกล้เคียงกับการเผาในเตาอุโมงค์ โดยคุมให้อัตราการให้ความร้อนช่วงอุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส ต่ำที่สุด คือ 1 องศาเซลเซียส ต่อนาที และไม่ต้องแช่ (soak) ไว้ที่อุณหภูมิช่วงนี้ กำหนดให้อัตราการเพิ่มความร้อน ช่วงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิขึ้นเตอรืง เท่ากับ 2 องศาเซลเซียส ต่อนาที ตารางการเผาที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 4.14



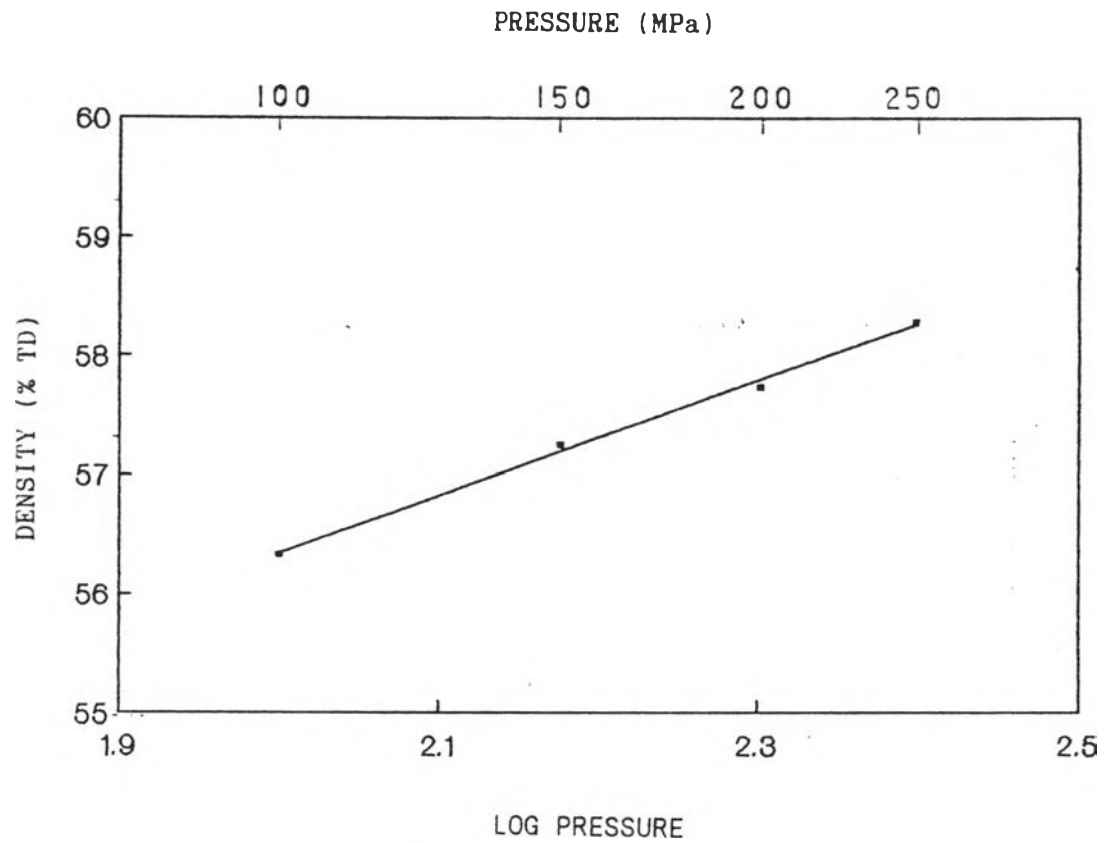


รูปที่ 4.14 แสดงตารางการเผาที่ใช้ในการทดลอง

#### 4.5 การเตรียมการขึ้นรูป และอิทธิพลของความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปกับสมบัติของตัวอย่างทดลองก่อนเผา

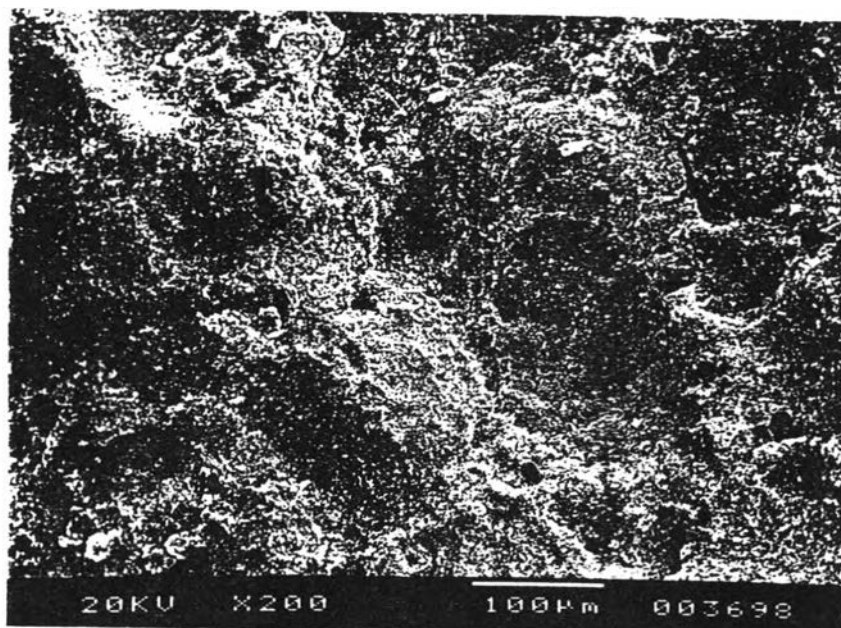
ความสัมพันธ์ ระหว่างความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป กับความหนาแน่น ของตัวอย่างทดลองก่อนเผา แสดงในกราฟรูปที่ 4.15 ข้อมูลแสดงในตาราง ก.5 (ภาคผนวก ก.) จากกราฟพบว่า เมื่อใช้ความดันเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นจะสูงขึ้น โดยได้ค่าความหนาแน่นสูงสุด ร้อยละ 58.23 ของค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี ที่ ความดัน 250 เมกะปาสคาล และค่าความหนาแน่นต่ำสุด ร้อยละ 56.33 ของค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี ที่ความดัน 100 เมกะปาสคาล

ภาพถ่ายรอยแตกของตัวอย่างทดลอง ที่ความดันต่าง ๆ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในรูปที่ 4.16 จากภาพแสดงว่าที่ความดันสูงขึ้น แกรนูลในชิ้นงานตัวอย่างเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากขึ้น ที่ 250 เมกะปาสคาล ไม่มีลักษณะแกรนูลในผิวรอยแตกเลย การแตก เป็นการแตกแบบผ่านเม็ดแกรนูล รุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนภายในแกรนูล (intergranular pores) เมื่อใช้ความดัน 100 และ 150 เมกะปาสคาล แกรนูลที่ได้จากการเตรียมวิธีนี้ ยังคงรูปร่างอยู่ มีการจับเกาะตัวกันระหว่างเม็ดแกรนูลน้อย การแตก เป็นการแตกระหว่างแกรนูล ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแกรนูลเมื่อได้รับแรงอัด แสดงในรูปที่ 4.17 (Reed, 1988)

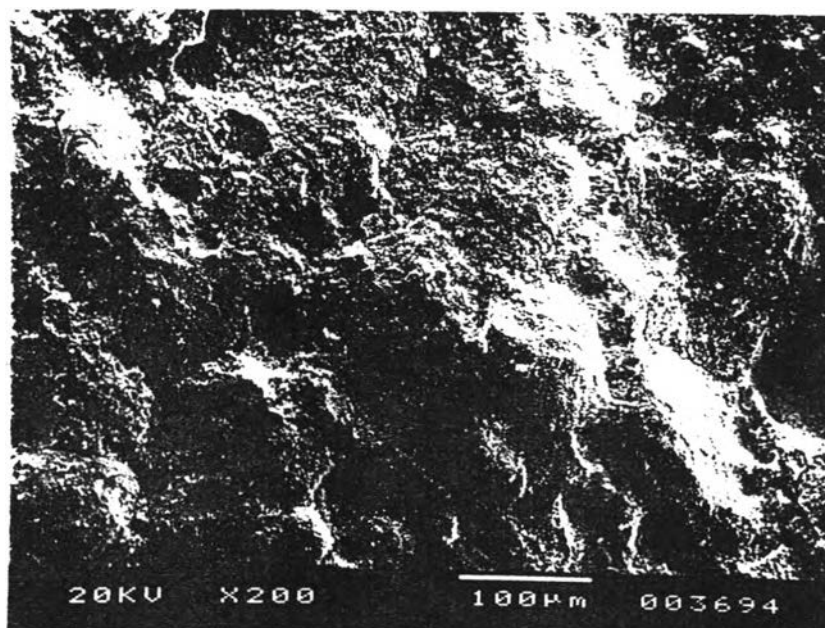


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ใช้อัดขึ้นรูปกับความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่าง ก่อนเผา



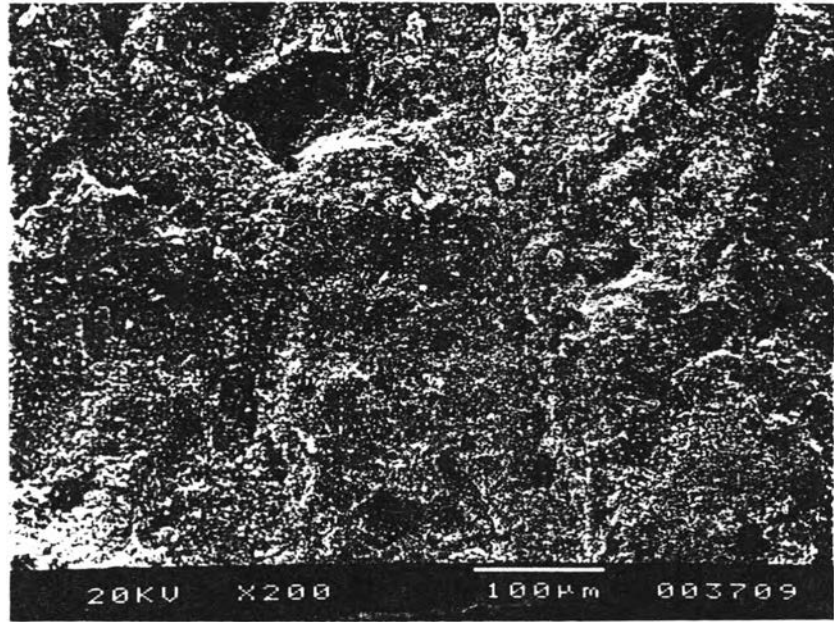


ก) 100 เมกะพลาสติก

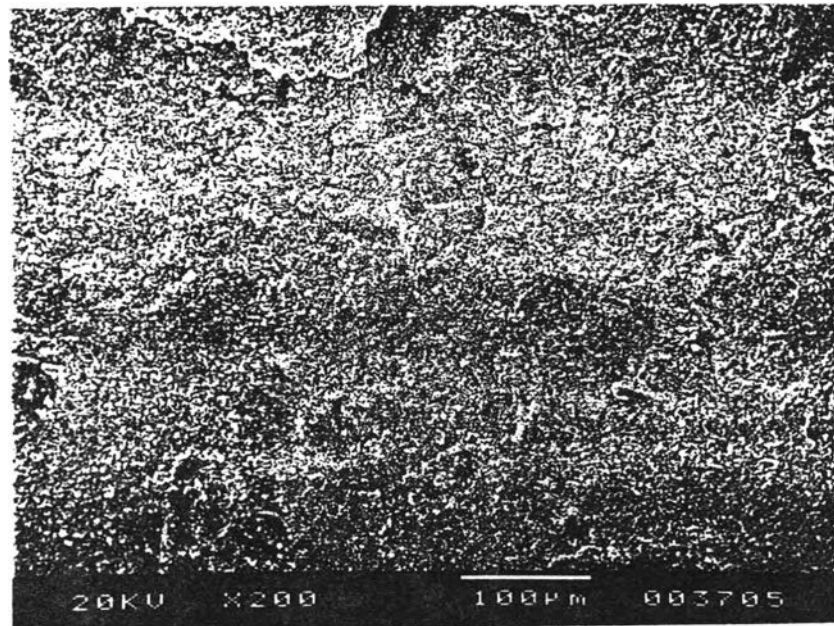


ข) 150 เมกะพลาสติก

รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายรอยแตกของตัวอย่างทดลองที่ความดันต่างๆ

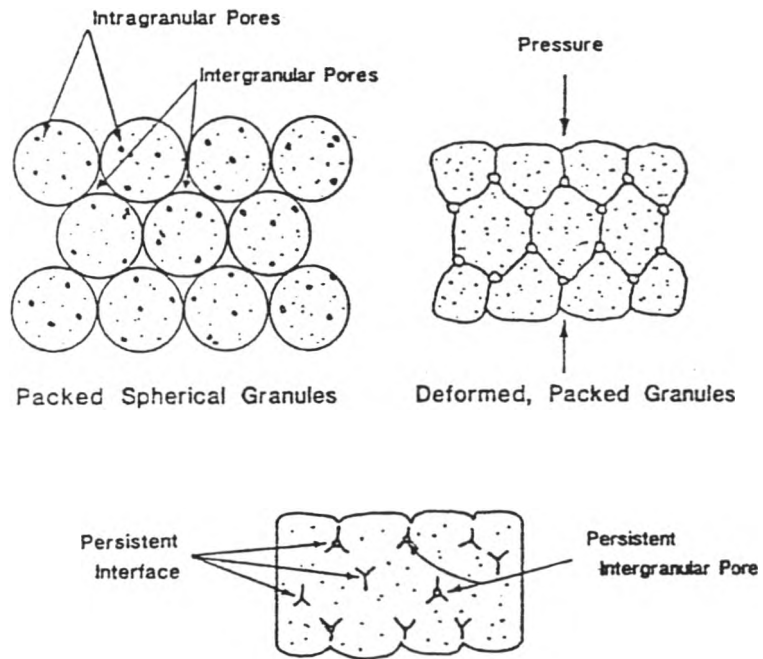


ค) 200 เมกะปาสคาล



ง) 250 เมกะปาสคาล

รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายรอยแตกของตัวอย่างทดลองที่ความดันต่างๆ



รูปที่ 4.17 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแกรนูล  
เมื่อได้รับแรงอัด (Reed, 1988)

#### 4.6 การเตรียมผลิตภัณฑ์ และอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการเตรียม กับสมบัติของผลิตภัณฑ์จากการทดลอง

ผลิตภัณฑ์จากการทดลอง มีรูปร่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15-17 มิลลิเมตร สูง 9 - 11 มิลลิเมตร อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการเตรียมกับสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ มีดังนี้

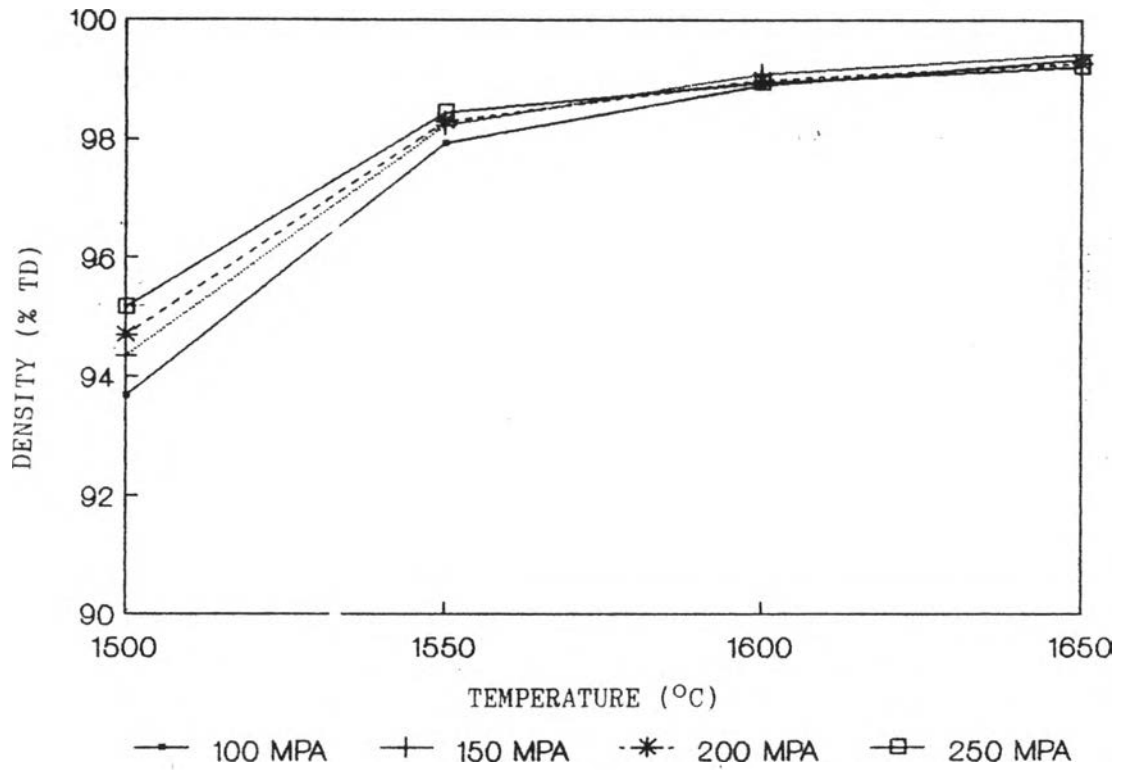
##### 4.6.1 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในกระบวนการเตรียมต่อสมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์จากการทดลอง

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขึ้นเทอริง ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป และค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 4.18 ข้อมูลความหนาแน่น แสดงในตาราง ก.6 (ภาคผนวก ก.)

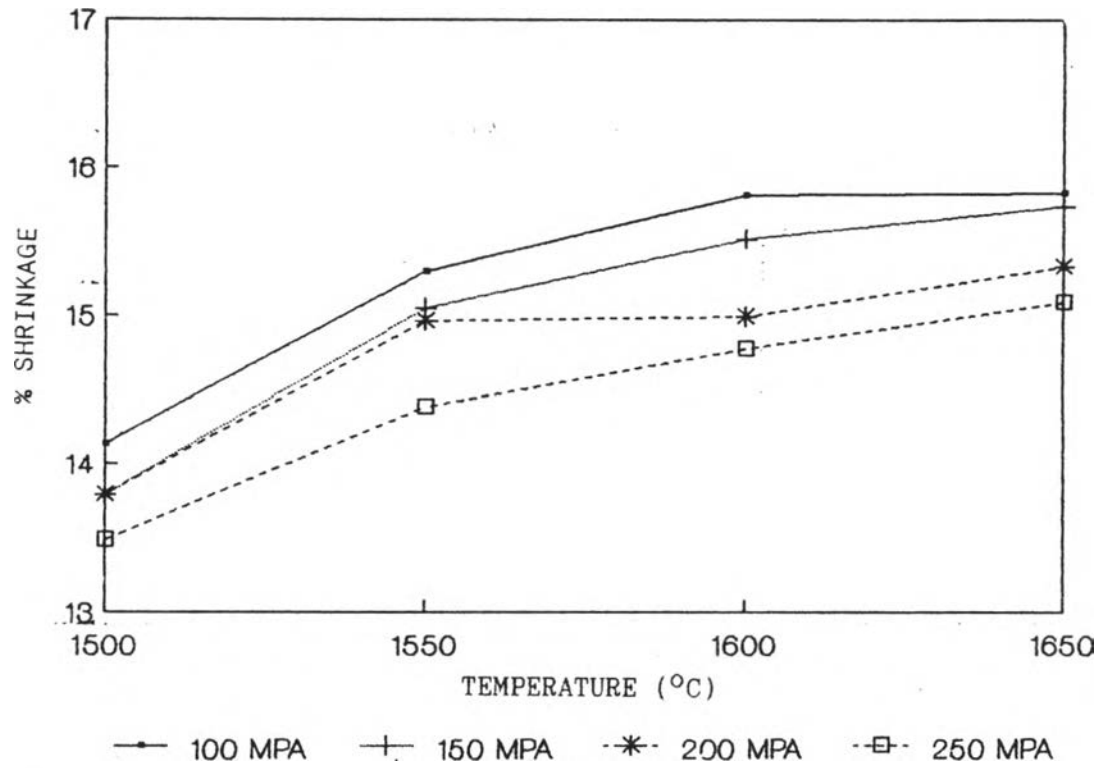
รูปที่ 4.19 แสดงร้อยละการหดตัวของอุณหภูมิ และความดันต่างๆ ข้อมูลร้อยละการหดตัว แสดงในตาราง ก.7 (ภาคผนวก ก.)

รูปที่ 4.20 แสดงค่าการดูดซึมน้ำ ที่อุณหภูมิ และความดันต่างๆ ข้อมูลค่าการดูดซึมน้ำ แสดงในตาราง ก.8 (ภาคผนวก ก.)

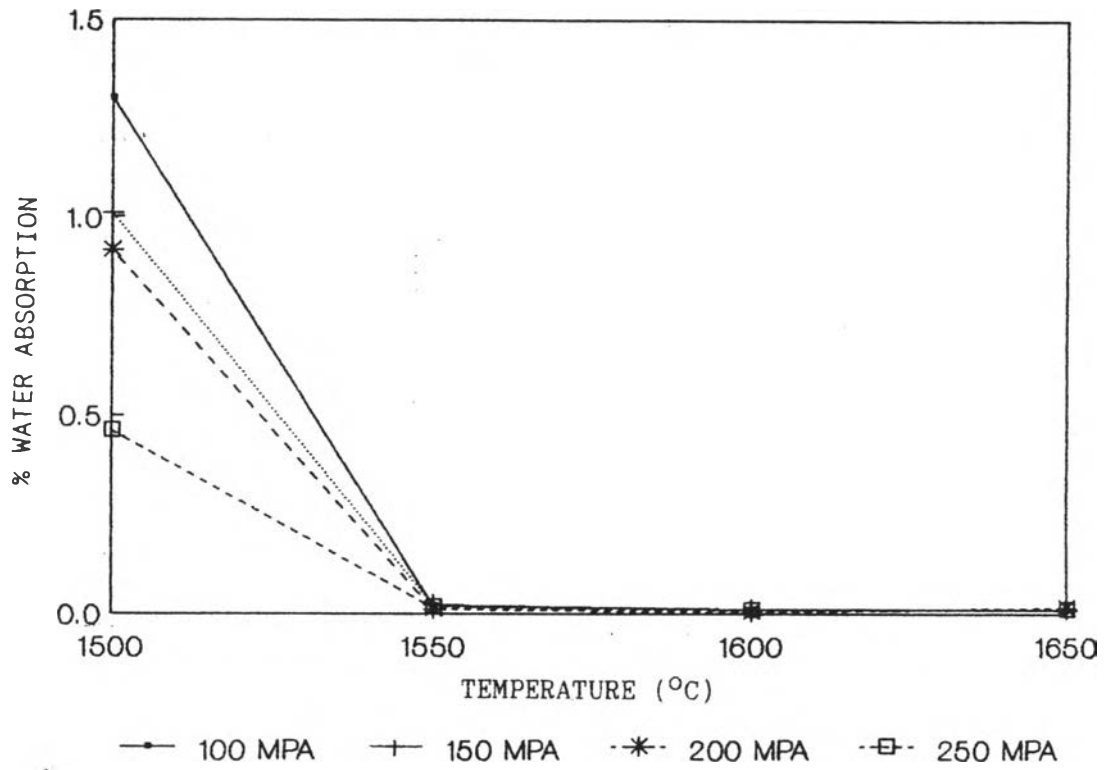
รูปที่ 4.21 แสดงปริมาณรูพรุน ที่อุณหภูมิ และความดันต่างๆ ข้อมูลปริมาณรูพรุน แสดงในตาราง ก.8 (ภาคผนวก ก.)



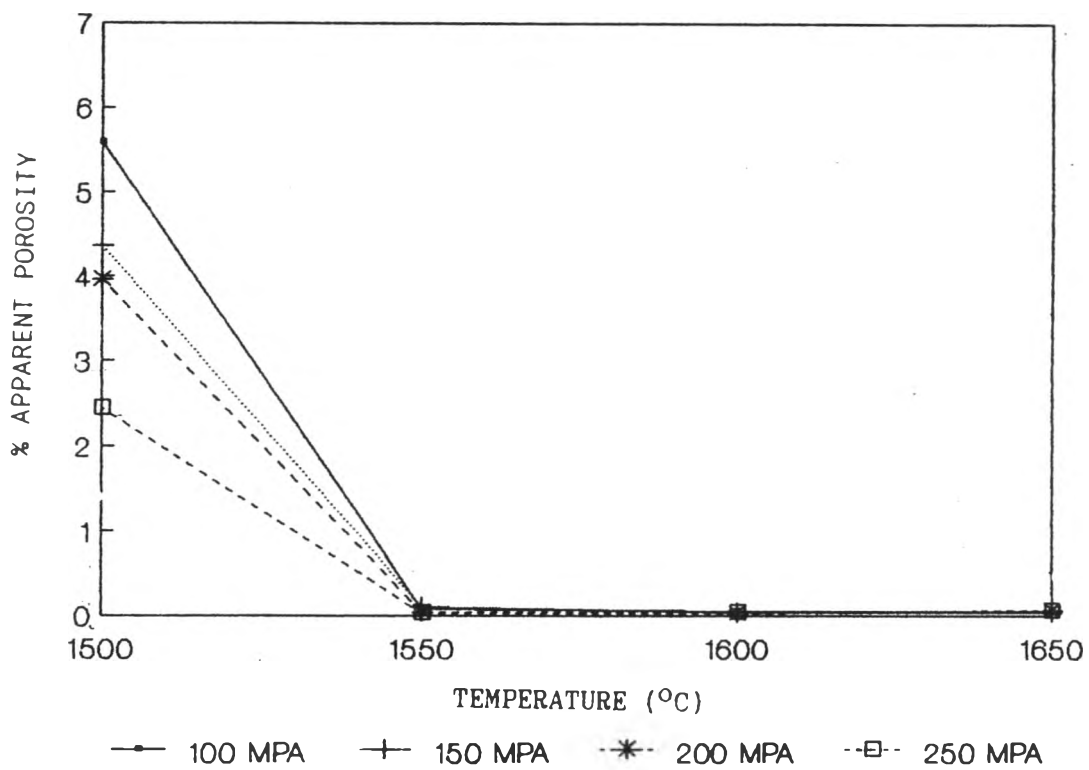
รูปที่ 4.18 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป  
ต่อความหนาแน่นของตัวอย่าง



รูปที่ 4.19 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป  
ต่อร้อยละการหดตัวของตัวอย่าง



รูปที่ 4.20 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อการดูดซึมน้ำของตัวอย่าง



รูปที่ 4.21 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป  
ต่อปริมาณรูพรุนของตัวอย่าง



จากกราฟ รูปที่ 4.18 แสดงว่า เมื่ออุณหภูมิซินเทอริงสูงขึ้น ความหนาแน่นของตัวอย่างทดลองเพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มความหนาแน่นในช่วงอุณหภูมิซินเทอริง ช่วง 1550-1650 องศาเซลเซียส ต่ำกว่า ในอุณหภูมิช่วง 1500-1550 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป มีผลกับค่าความหนาแน่นของตัวอย่างมาก ในกรณีที่ทำการซินเทอริงที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อใช้ความดันสูงจะได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูงกว่าใช้ความดันต่ำ ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยสูงสุดที่ได้จากการทดลอง คือ ร้อยละ 99.4 ของค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี

จากกราฟ รูปที่ 4.19 แสดงว่าทั้งอุณหภูมิซินเทอริงและความดัน มีอิทธิพลต่อการหดตัวของตัวอย่าง ที่ความดันต่ำลง และ/หรือ อุณหภูมิซินเทอริงสูงขึ้น ค่าการหดตัวจะสูงขึ้น เมื่อใช้ความดันสูงขึ้น ความหนาแน่นของตัวอย่างก่อนเผาเพิ่มขึ้น ค่าการหดตัวจึงลดลง ค่าการหดตัวเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง อยู่ใน ช่วงร้อยละ 14-16

หมายเหตุ : จากการทดลองพบว่าไม่มีการหดตัวของตัวอย่าง จากการอบแห้ง

จากกราฟ รูปที่ 4.23 และ รูปที่ 4.24 แสดงว่าที่อุณหภูมิซินเทอริง 1500 องศาเซลเซียส ตัวอย่างมีรูพรุนและการดูดซึมน้ำค่อนข้างสูง ที่อุณหภูมิซินเทอริงตั้งแต่ 1550 องศาเซลเซียสขึ้นไป ตัวอย่างที่ผ่านการอัดขึ้นรูปที่ทุกความดัน มีปริมาณรูพรุน และการดูดซึมน้ำน้อยมาก จนมีค่าเกือบเป็นศูนย์

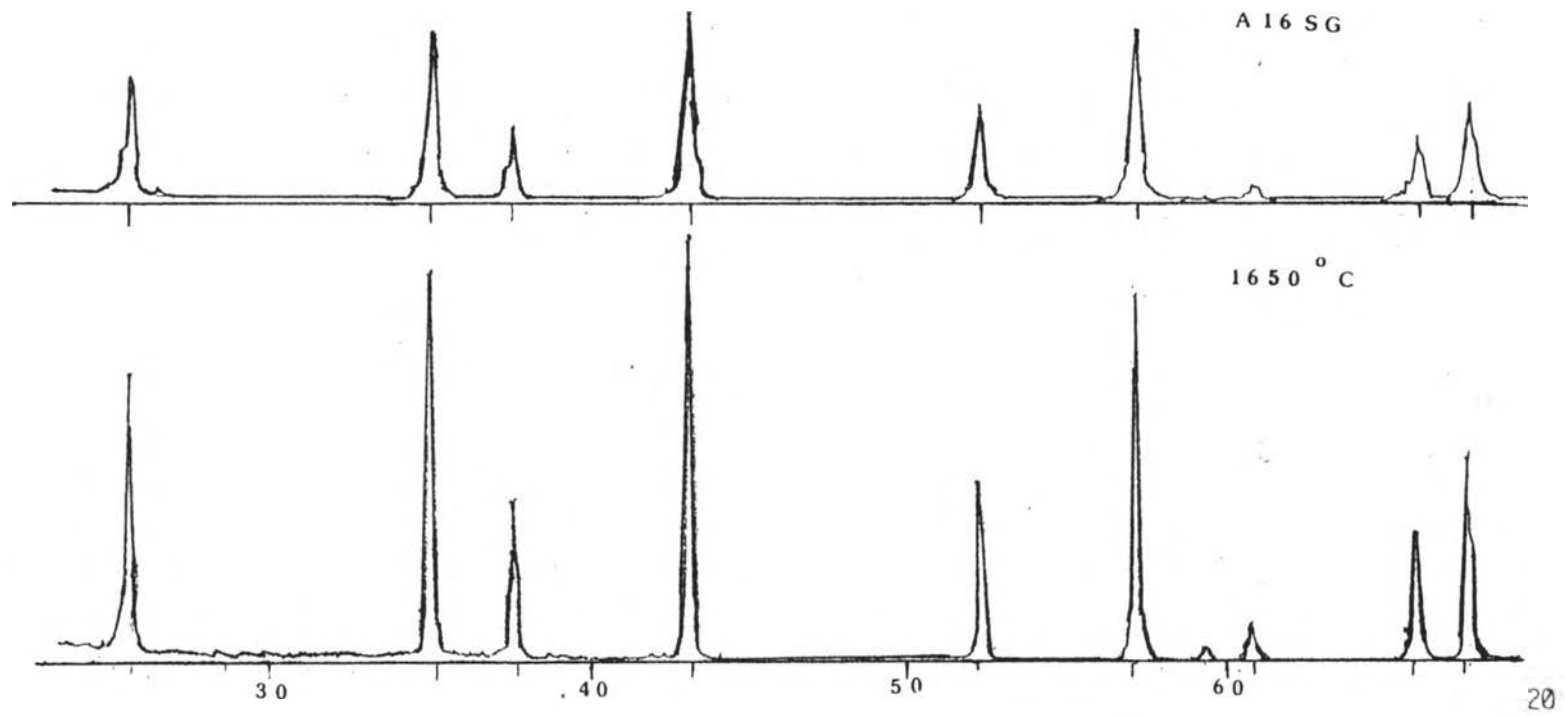
#### 4.6.2 สีและเฟสของตัวอย่างทดลองหลังเผา

สีของตัวอย่างทดลองหลังเผา แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงสีของตัวอย่างทดลองหลังเผา

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สีที่ปรากฏ
1500	ขาว
1550	ขาวนวล
1600	สีงาช้าง
1650	สีงาช้าง

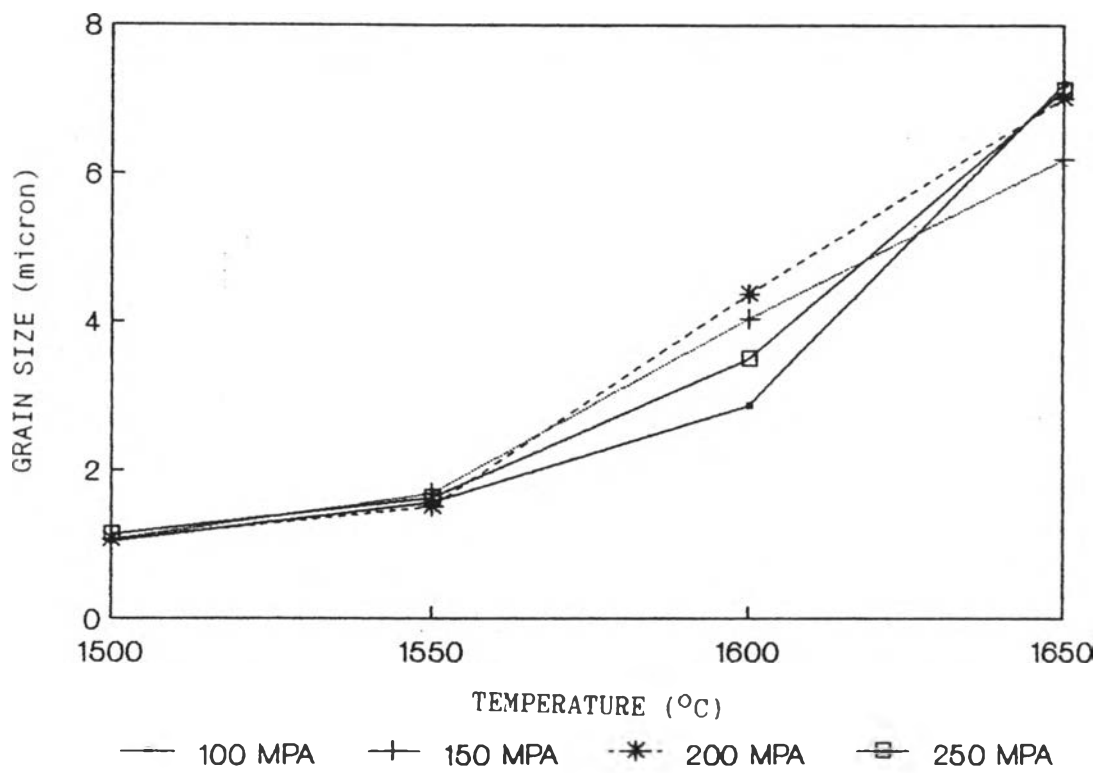
รูปแบบฟีดเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน ของตัวอย่างทดลองที่ผ่านการเผาขึ้นเทอริงที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 4.22 จากการวิเคราะห์ พบว่าผลิตภัณฑ์หลังเผา อยู่ในรูปเฟสแอลฟา-อะลูมินา เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบฟีดเอ็กซ์เรย์ของสารตั้งต้น พบว่า ผลิตภัณฑ์มีรูปแบบฟีดเหมือนสารตั้งต้น แต่ความเข้มข้นของฟีดสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4.22 รูปแบบพีคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของตัวอย่างทดลอง  
 หลังเผาขึ้นเตอรังที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส

#### 4.6.3 อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นเทอริง และความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อขนาดเกรนของตัวอย่างทดลอง

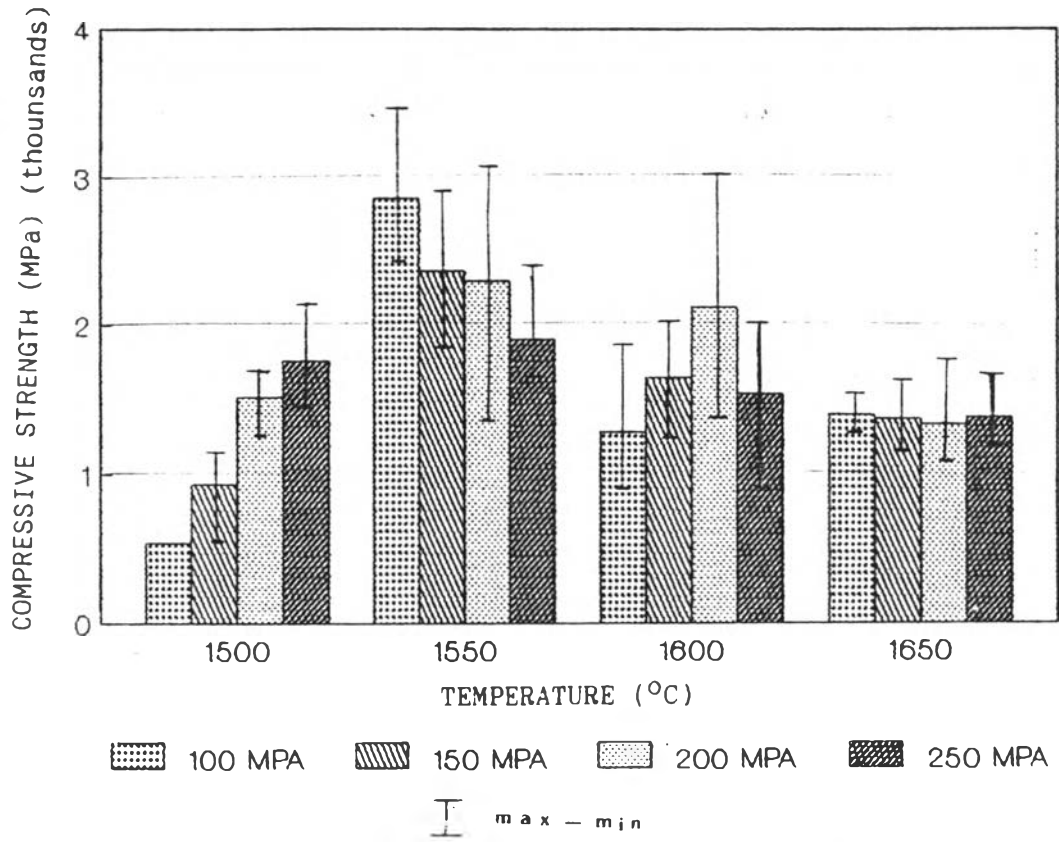
กราฟรูปที่ 4.23 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นเทอริง และความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป ต่อขนาดเกรนของตัวอย่าง ข้อมูลขนาดของเกรน แสดงในตารางที่ ก.9 (ภาคผนวก ก.) จากรูปกราฟ พบว่า เมื่ออุณหภูมิขึ้นเทอริงสูงขึ้น ขนาดเฉลี่ยของเกรนเพิ่มขึ้น และการกระจายขนาดของเกรนเพิ่มขึ้น (พิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส การกระจายขนาดของเกรนสูงมาก ตัวอย่างที่อัดขึ้นรูปที่ความดันต่างกัน มีขนาดเฉลี่ยของเกรนต่างกันไม่มากนัก ในแต่ละช่วงอุณหภูมิขึ้นเทอริง ขนาดเฉลี่ยของเกรนสูงขึ้นมากจากช่วงอุณหภูมิ 1600 - 1650 องศาเซลเซียส ขนาดเฉลี่ยของเกรนที่อุณหภูมิขึ้นเทอริง 1500, 1550, 1600, 1650 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 1.04 - 1.13, 1.50 - 1.69, 2.87 - 4.37 และ 6.20 - 7.22 ไมโครเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป  
ต่อขนาดเกรนของตัวอย่าง

#### 4.6.4 อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นเทอริงและความดัน ที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อความทนทานต่อ แรงกดอัด

กราฟรูปที่ 4.24 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นเทอริง และ ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป ต่อความทนทานต่อแรงกดอัด ข้อมูลจากการทดลองแสดงใน ตาราง ก.10 (ภาคผนวก ก.) จากกราฟแสดงว่า ความทนทานต่อแรงกดอัดเฉลี่ย เพิ่มขึ้นจาก 544 - 1755.5 เมกะปาสคาล เป็น 1900.4 - 2854.8 เมกะปาสคาล เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเทอริงจาก 1500-1550 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1550 องศาเซลเซียส ความทนทานต่อแรงกดอัด จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ความทนทานต่อแรงกดอัดเฉลี่ย ที่อุณหภูมิขึ้นเทอริง 1650 องศาเซลเซียส อยู่ใน ช่วง 1329.7 - 1390.9 เมกะปาสคาล ความสัมพันธ์ที่ชัดเจนไม่อาจสรุปได้ เนื่องจากมีการกระจายของข้อมูลสูงมาก แม้ว่าจะทำการขีดขึ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบ จนมีผิวเรียบและเสมอกัน โดยมีความต่างของความยาวด้านขนานไม่เกิน 0.02 มิลลิเมตร ซึ่งก็เป็นลักษณะที่พบทั่วไปจากการทดสอบแบบนี้ ในการทดสอบยากที่จะแน่ใจได้ว่า ชิ้นตัวอย่างจะได้รับแรงกดอัดในทิศทางเดียว (Uniaxial Compression) โดยไม่มี end effects ในทางปฏิบัติ การแตกหักใด ๆ มักจะเกิดจากแรงเค้นเฉือน (shear) หรือแรงดึง (tensile) อย่างไรก็ตาม ค่าที่ทดสอบได้จากตัวอย่างทดลอง อยู่ในข้างของค่าที่รายงานไว้ สำหรับเนื้ออะลูมินาประเภทเดียวกัน (Coors Ceramic; ข้อมูลผลิตภัณฑ์) ค่าที่รายงานไว้ คือ 2620 เมกะปาสคาล สำหรับอะลูมินาเซรามิกที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 สำหรับใช้งานทางเชิงกล

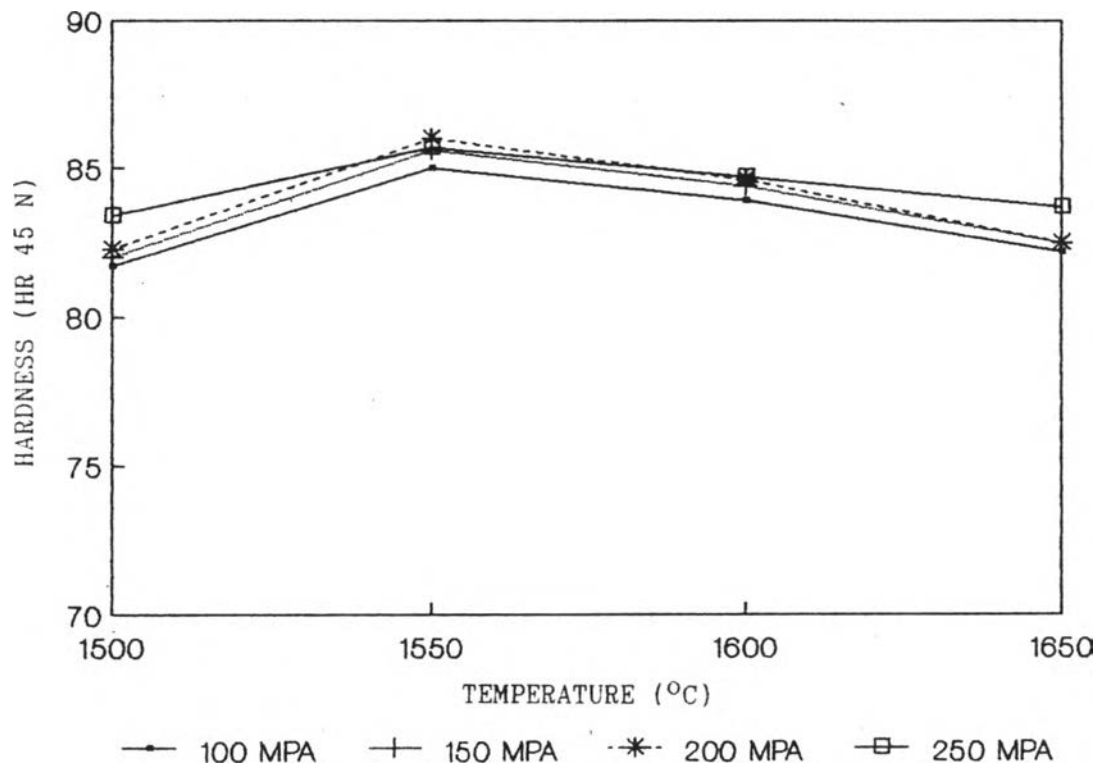


รูปที่ 4.24 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป  
ต่อค่าความทนทานต่อแรงกดอัดของตัวอย่าง

#### 4.6.5 อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นเทอริง และความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อ ความแข็ง (HR 45N) ของตัวอย่างทดลอง

กราฟรูปที่ 4.25 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นเทอริง และ ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป ต่อความแข็งของตัวอย่าง ข้อมูลจากการทดลอง แสดงในตารางที่ ก.11 (ภาคผนวก ก.) จากกราฟแสดงว่า ตัวอย่างจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น จาก 81.7 - 83.4 เป็น 85.0 - 86.0 เมื่ออุณหภูมิขึ้นเทอริงเพิ่มขึ้นจาก 1500 เป็น 1550 องศาเซลเซียส จากนั้น ความแข็งจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิขึ้นเทอริงสูงกว่า 1550 องศาเซลเซียส ความแข็งที่อุณหภูมิขึ้นเทอริง 1650 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ย 82.2 - 83.7 ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อความแข็งของตัวอย่างไม่มากนัก แต่เมื่อใช้ความดันมากขึ้น ความแข็งของตัวอย่างที่ได้ก็สูงขึ้นที่ทุกอุณหภูมิขึ้นเทอริง ค่าความแข็งเฉลี่ยของค่าที่วัดได้ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 86 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากตัวอย่างทดลองที่ผ่านการอัดขึ้นรูปที่ 200 เมกะปาสคาล เพาซินเทอริงที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส

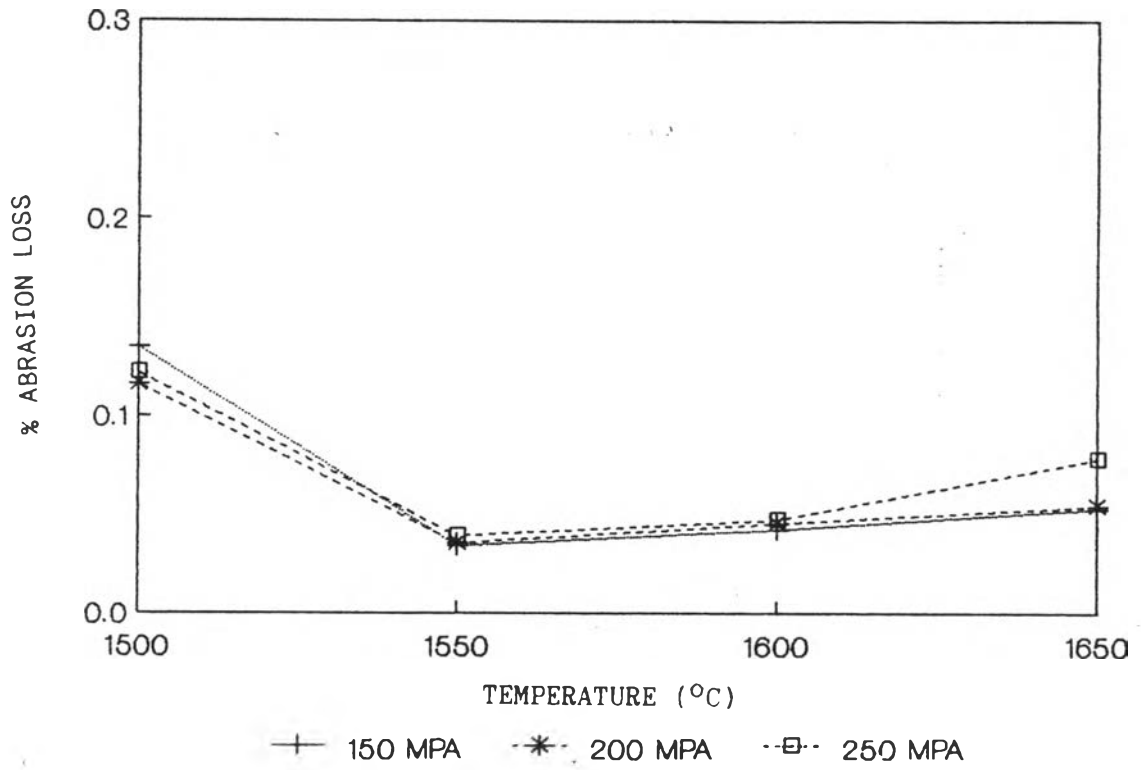




รูปที่ 4.25 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป  
ต่อความแข็งของตัวอย่าง

#### 4.6.6 อิทธิพลของอุณหภูมิชื้นเทอร์ริง และความดันที่ใช้ชั้นรูปต่ออัตราการสึกกร่อน

รูปที่ 4.26 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิชื้นเทอร์ริง และความดันที่ใช้อัดชั้นรูป ต่ออัตราการสึกกร่อน ข้อมูลจากการทดลอง แสดงในตารางที่ ก.12 (ภาคผนวก ก.) จากกราฟแสดงว่า อัตราการสึกกร่อนจะมีค่าต่ำสุด เท่ากับ ร้อยละ 0.034 และ 0.039 ซึ่งเป็นค่าอัตราการสึกกร่อนที่ต่ำมาก (Gitzen, 1970) ถ้าเพิ่มอุณหภูมิชื้นเทอร์ริงจากนี้ อัตราการสึกกร่อนก็จะเพิ่มสูงขึ้นอีก



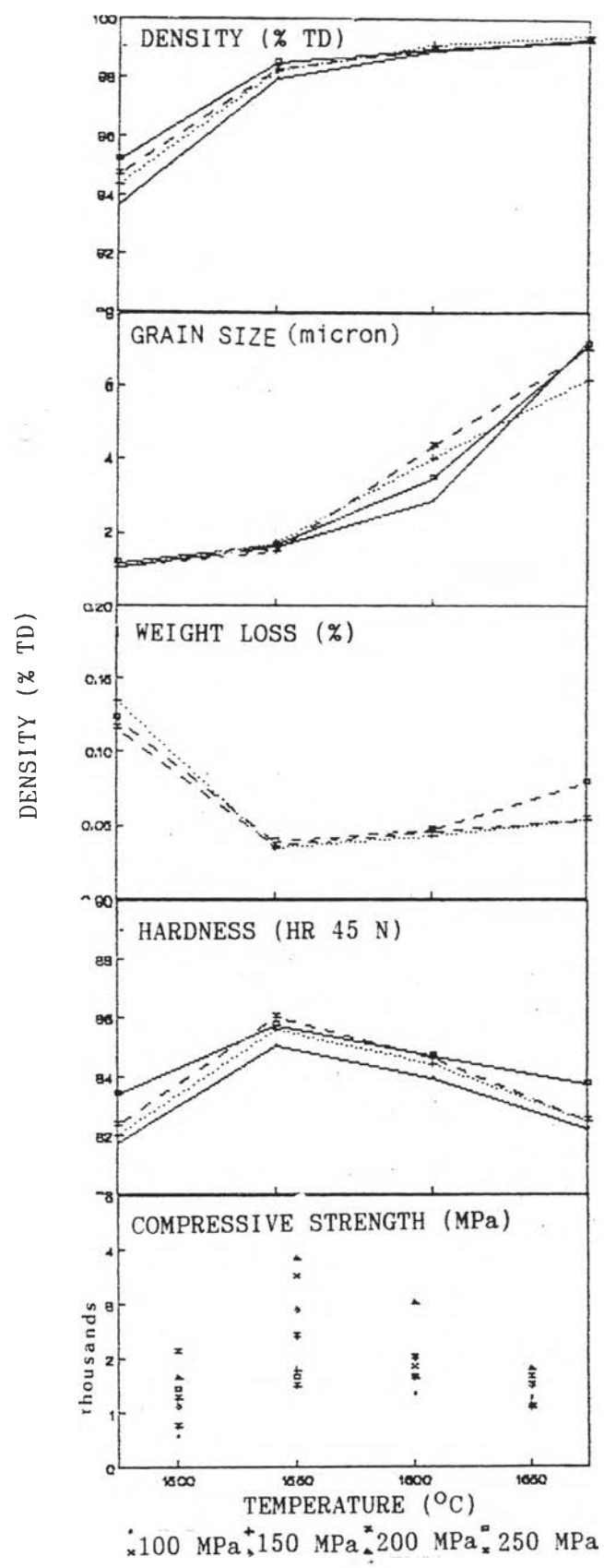
รูปที่ 4.26 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป  
ต่ออัตราการสึกกร่อนของตัวอย่าง

#### 4.7 อิทธิพลของขนาดเกรนต่อสมบัติเชิงกลของตัวอย่างทดลอง

การเปรียบเทียบผลการทดลอง สมบัติของตัวอย่างทดลองทางด้านความหนาแน่น ขนาดเกรน ความทนทานต่อแรงกดอัด ความแข็ง และอัตราการสึกกร่อน ดัง แสดงในกราฟรูปที่ 4.27

จากกราฟ พบว่า ที่อุณหภูมิขึ้นเทอร์ริงสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นสูงขึ้น จนถึงระดับหนึ่ง จากนั้นค่าความหนาแน่นเกือบคงที่ ในขณะที่ขนาดเฉลี่ยของเกรนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยเพิ่มสูงมากในช่วงอุณหภูมิสูง แสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่น และขนาดเฉลี่ยของเกรน ต่างเป็นตัวแปรอิสระต่อกัน ส่วนสมบัติด้านอื่น คือ อัตราการสึกกร่อน ความแข็ง และความทนทานต่อแรงกดอัด จะมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งหมดคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเทอร์ริง จาก 1500 องศาเซลเซียส เป็น 1550 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่มีสมบัติดีขึ้น ซึ่งเป็นค่าสูงสุด จากนั้นสมบัติต่าง ๆ จะลดลง แสดงว่าสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ อาจได้รับอิทธิพลจากตัวแปรเดียวกัน

พิจารณาอัตราการสึกกร่อน การกระทำของสารที่ทำให้เกิดการสึกกร่อนบนเนื้อวัสดุเซรามิก เป็นผลรวมของ การเคลื่อนตัวแบบพลาสติก ที่ถูกจำกัดบริเวณ และการแตก อนุภาคที่ทำให้เกิดการสึกกร่อน จะสร้างรอยแตก (cracks) และช่องว่างที่เกิดจากการสึก (wear grooves) วัสดุที่หลุดออกไป เป็นผลจาก การเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก (plastic deformation) และการแตก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จากข้อบกพร่องดังกล่าว ที่สามารถขยายตัวไปจนถึงพื้นผิว การเกิดขบวนการเหล่านี้ ขึ้นกับแรงที่ได้รับ ขนาดอนุภาค และ ความแข็งของสารที่ทำให้เกิดการสึกกร่อน ลักษณะจุลโครงสร้างที่สำคัญกับสมบัตินี้ คือ ขนาดของเกรน และปริมาณรูพรุน (Morrell, 1989) เมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง อัตราการสึกกร่อนของตัวอย่างมีค่าต่ำ เมื่อตัวอย่างมีขนาดเฉลี่ยของเกรนเล็กที่สุดในกลุ่มของตัวอย่างที่มีปริมาณรูพรุนระดับเดียวกัน ตัวอย่างที่มีปริมาณรูพรุนสูง แม้ขนาดเฉลี่ยของเกรนจะเล็ก อัตราการสึกกร่อนก็ยังคงสูง



รูปที่ 4.27 อิทธิพลของขนาดเกรนต่อสมบัติเชิงกล

สมบัติด้านความแข็ง และความทนทานต่อแรงกดอัด ก็มีลักษณะเดียวกัน คือ ตัวอย่างที่มีสมบัติสูงสุด เมื่อมีขนาดเฉลี่ยของเกรนต่ำสุด ในกลุ่มที่มีปริมาณรูพรุนใกล้เคียงกัน ตัวอย่างที่มีขนาดเฉลี่ยของเกรนเล็กมีค่าความแข็งสูงกว่า เนื่องจากการแตกภายใต้ห้วงกดที่ใช้ทดสอบน้อยกว่า การเคลื่อนที่ (dislocation) เมื่อได้รับแรงจากห้วงกดทดสอบ จะถูกกักบริเวณโดยขอบเขตของเกรน (McCollm, 1990)

สมบัติความทนทานต่อแรงกดอัด สามารถอธิบายได้ว่า (Morrell, 1989) การถูกทำลายด้วยแรงกดอัดในอะลูมินา ขึ้นกับ การเคลื่อนที่ได้บางบริเวณ ในรูปของทวินนิง (twinning) แถบของทวินจะเกิดที่แรงเค้นต่ำกว่าแรงเค้นทำให้เกิดการแตก ในระดับที่ต่ำกว่า ค่าแรงเค้นที่ทำให้เกิดการแตกที่จะสามารถทำปฏิกิริยากับขอบเกรน หรือพื้นผิวตัวอย่างได้ในระดับหนึ่ง การเกิดทวินจึงเป็นจุดเริ่มของรอยแตกเล็ก ๆ (microcracks) การเพิ่มแรงดันต่อไปอีก ทำให้เป็นการเพิ่มจำนวนรอยแตกเล็ก ๆ ซึ่งในที่สุดรอยแตกเล็ก ๆ เหล่านี้จะมารวมกัน จนเกิดการทำลาย เนื่องจากความยาวของรอยแตกเล็ก ๆ ที่เกิดจากทวิน เท่ากับขนาดของเกรน ดังนั้นค่าความทนทานต่อแรงกดอัด จึงขึ้นกับขนาดเกรน นอกจากนี้การถูกทำลายด้วยแรงกดอัด ยังเกิดได้จากขบวนการที่ติดต่อกจากการรวมตัวกันของรูพรุน (pore collapse) ตัวอย่างที่มีปริมาณรูพรุนสูง จึงมีความทนทานต่อแรงกดอัดต่ำ

จากผลการทดลองดังกล่าว แสดงว่า ตัวแปรที่สำคัญต่อสมบัติเชิงกล คือ ขนาดเกรน ซึ่งจากรูปกราฟที่ 4.27 ก็แสดงไว้อย่างชัดเจนว่า การมีสมบัติเชิงกลสูง ไม่จำเป็นต้องมีค่าความหนาแน่นสูงสุด การที่ต้องการค่าความหนาแน่นสูง เนื่องมาจากต้องการให้มีปริมาณรูพรุนต่ำ ซึ่งเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่สำคัญ

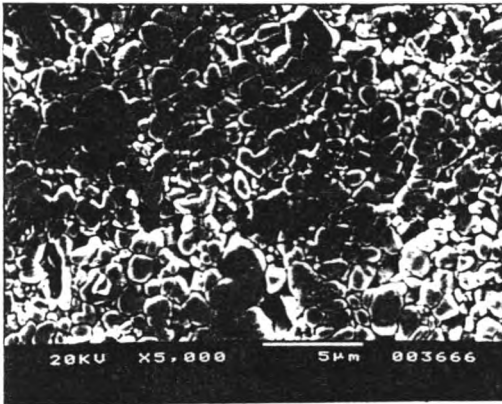
#### 4.8 ลักษณะจุลโครงสร้างของตัวอย่างทดลอง

ลักษณะจุลโครงสร้างทั่วไปของตัวอย่างทดลอง แสดงในรูปที่ 4.28 จากรูป เป็นภาพถ่าย ลักษณะผิวที่ผ่านการกัดขอบเกรนด้วยความร้อน จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของตัวอย่างที่อัดขึ้นรูปที่ความดัน 250 เมกะปาสคาล และซินเทอริงที่อุณหภูมิ 1500-1650 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เกรนมีขนาดเล็กกระจายตัวสม่ำเสมอ เริ่มพบเกรนขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิซินเทอริงที่ตัวอย่างได้รับความหนาแน่นสูง คือ 1550 องศาเซลเซียส เกรนขนาดใหญ่ มีแนวโน้มจะเป็นเกรนที่มีรูปร่างเรียวยาวมากกว่า เกรนขนาดเล็กส่วนใหญ่มีความสม่ำเสมอของขนาดในแต่ละทิศทางมากกว่า ที่ช่วงอุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส มีการกระจายขนาดของเกรนสูงมาก ซึ่งอาจพิจารณาได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในการวัดขนาดเกรน ในตารางที่ ก.9 (ภาคผนวก ก.) อย่างไรก็ตาม จากภาพถ่ายลักษณะจุลโครงสร้าง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงว่า ตัวอย่างที่ผ่านการอัดขึ้นรูป 250 เมกะปาสคาล มีการกระจายขนาดของเกรนน้อยที่สุดในทุกอุณหภูมิซินเทอริง ตัวอย่างลักษณะการกระจายขนาดของเกรนที่แตกต่างกันมากนี้ แสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งแสดงจุลโครงสร้างของตัวอย่างที่ผ่านการอัดขึ้นรูป 100 เมกะปาสคาล และเผาซินเทอริงที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส

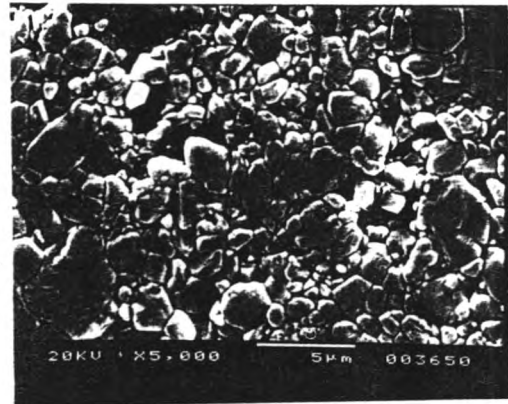
ลักษณะจุลโครงสร้างที่แสดงโดยภาพถ่ายลักษณะผิวแตก จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของตัวอย่างทดลอง แสดงในรูปที่ 4.30 ซึ่งเป็นจุลโครงสร้างของตัวอย่างที่ได้จากการอัดขึ้นรูป 200 เมกะปาสคาล เผาซินเทอริงที่ 1550 องศาเซลเซียส เป็นตัวอย่างที่มีสมบัติด้านต่าง ๆ ดี จากรูป พบว่า การกระจายขนาดของเกรนค่อนข้างสม่ำเสมอ ขนาดเกรนเล็ก ปริมาณรูพรุนน้อย และพบอยู่ตามขอบเกรน ในตัวอย่างอื่นที่มีขนาดเกรนใหญ่ ๆ พบรูพรุนที่อยู่ภายในเกรนบ้าง (จากภาพถ่ายผิวที่ผ่านการกัดขอบเกรนด้วยความร้อน จะพิจารณา ลักษณะปริมาณ และการกระจายรูพรุนได้ยาก เนื่องจากมีบางเกรนหลุดออกไปในระหว่างการขัดเตรียมตัวอย่าง) รูปแบบการแตกของตัวอย่าง เป็นรูปแบบผสมระหว่างแตกตามขอบเกรน และแตกผ่านเกรน ซึ่งมักพบในเกรนที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ลักษณะ

แบบนี้ เกิดจากอิทธิพลของความเข้มข้นของแรงดัน (stress concentration) ของรูพรุนที่ถูกกักขังอยู่ในบางเกรนเนื่องจากการโตของเกรน (Know, 1987) นอกจากนี้ ยังพบลักษณะผิวแตกที่เห็นส่วนของโครงร่างผลึก (crystallographic-type fracture) พบลักษณะเช่นนี้เนื่องจาก อะลูมินาที่มีพลังงานในการแตกที่ผิว (fracture surface energy) สูง และจะพบในการแตกที่รอยแตก (crack) ว่างเร็ว (Heuer, 1969)

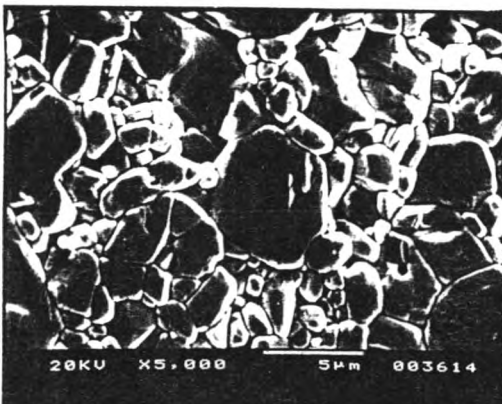




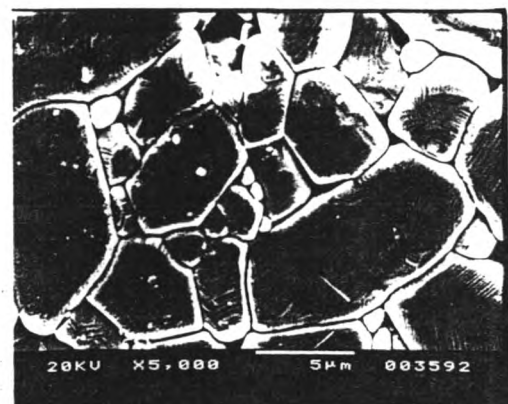
ก. 1500 องศาเซลเซียส



ข. 1550 องศาเซลเซียส

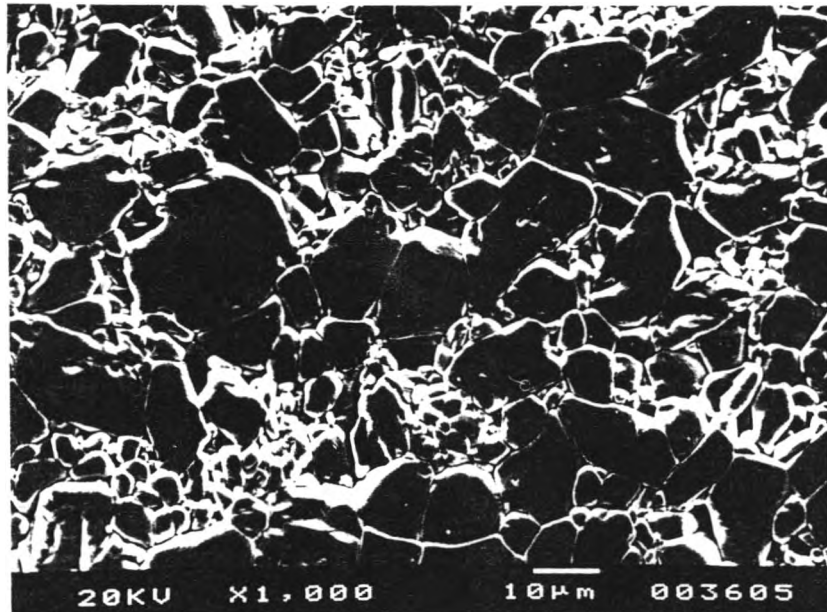


ค. 1600 องศาเซลเซียส

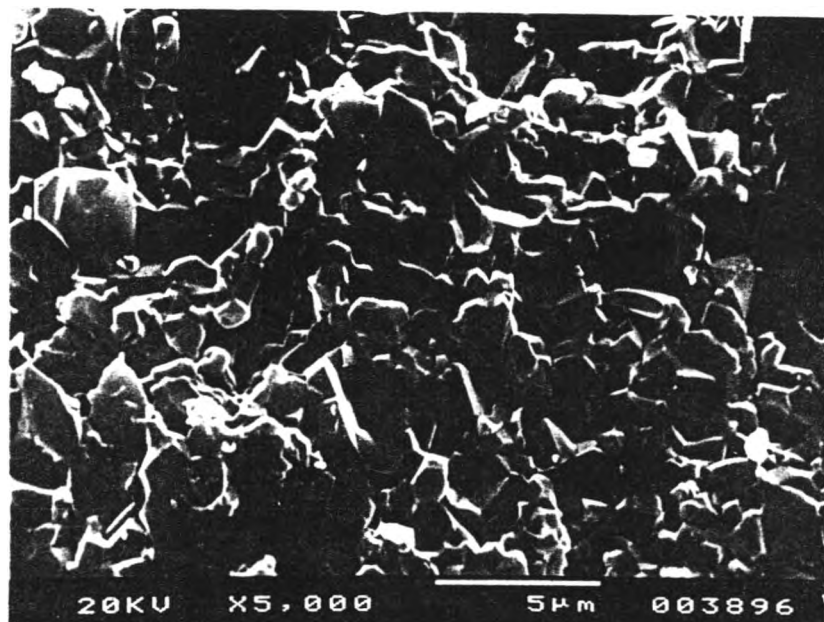


ง. 1650 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายจุลโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของตัวอย่างทดลองที่ผ่านการอัดขึ้นรูปที่ความดัน 250 เมกะปาสคาล และเผาขึ้นเทอริงที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายจุลโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของตัวอย่างทดลองที่ผ่านการอัดขึ้นรูปที่ความดัน 100 เมกะปาสคาล และเผาขึ้นเทอริงที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายลักษณะผิวแตกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของตัวอย่างทดลองที่ผ่านการอัดขึ้นรูปที่ความดัน 200 เมกะปาสคาล และเผาขึ้นเทอริงที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส

#### 4.9 การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทดลองและผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ

##### 4.9.1 การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทดลอง และข้อมูลผลิตภัณฑ์ จากต่างประเทศ

ข้อมูลเปรียบเทียบ สมบัติของตัวอย่างทดลองและข้อมูลผลิตภัณฑ์ จากต่างประเทศ ที่มีส่วนประกอบทางเคมี ประเภทเดียวกัน (Coors Ceramics, Morgan Mortroc, CTI; ข้อมูลผลิตภัณฑ์) คือ มีอะลูมินาเป็นส่วนประกอบอยู่มาก กว่าร้อยละ 99 แสดงในตารางที่ 4.6 จากตารางพบว่า ตัวอย่างจากการทดลอง มีค่าความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุน การดูดซึมน้ำ และความแข็ง อยู่ในช่วงเดียวกันกับ ค่าที่รายงานไว้ของผลิตภัณฑ์ทางการค้าประเภทเดียวกัน

ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทดลอง และข้อมูลผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ

สมบัติ	ผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ	ตัวอย่างทดลอง
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	3.9	3.9
ปริมาตรรูพรุน (ร้อยละ)	0	0
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0	0
ความแข็ง (HR 45N)	83	86

#### 4.9.2 การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทดลองและตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ

ข้อมูลเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทดลอง และตัวอย่างจากต่างประเทศ แสดงในตารางที่ 4.7 ตัวอย่างจากต่างประเทศ เป็นตัวอย่างจากบริษัท Morgan Matroc จำกัด ส่วนตัวอย่างพอร์ซเลน เป็นตัวอย่างที่ได้จากห้องปฏิบัติการเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ การศึกษานี้มีจุดประสงค์ เพื่อทดสอบเปรียบเทียบการทดสอบ ด้านการสึกกร่อนระหว่างตัวอย่างจากการทดลอง และ ผลิตภัณฑ์เชิงการค้าที่ใช้กันอยู่ทั่วไป (ไม่สามารถหาตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชิงการค้าที่มีส่วนประกอบของอะลูมินาเท่ากับการทดลองมาทำการทดสอบในช่วงเวลาที่ทำการทดลองได้) จากตาราง แสดงว่าตัวอย่างทดลองมีอัตราการสึกกร่อนต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้อยู่ทั่วไป ทั้งนี้ เนื่องมาจากตัวอย่างทดลอง มีส่วนประกอบของอะลูมินาสสูงกว่า อย่างไรก็ตาม ต้องอาศัยการควบคุมกระบวนการเตรียมอย่างเคร่งครัดด้วย

ตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทดลองและตัวอย่างจากต่างประเทศ

สมบัติ	ตัวอย่าง		
	พอร์ซเลน	จากต่างประเทศ $Al_2O_3$ 90%	ทดลอง $Al_2O_3$ 99%
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	2.6	3.5	3.9
ปริมาณรุกราน (ร้อยละ)	0	0	0
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0	0	0
ความแข็ง (HR 45N)	-	73.5	86.0
อัตราการสึกกร่อน (ร้อยละ/ชั่วโมง)	0.36	0.12	0.03