

บทที่ 4

ผลการทดลอง และ อภิปรายผล

4.1 การศึกษาลักษณะจำเพาะของสารตั้งต้น

4.1.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา

ผลการวิเคราะห์ ลักษณะจำเพาะของผงอะลูมินา แสดงในตารางที่ 4.1

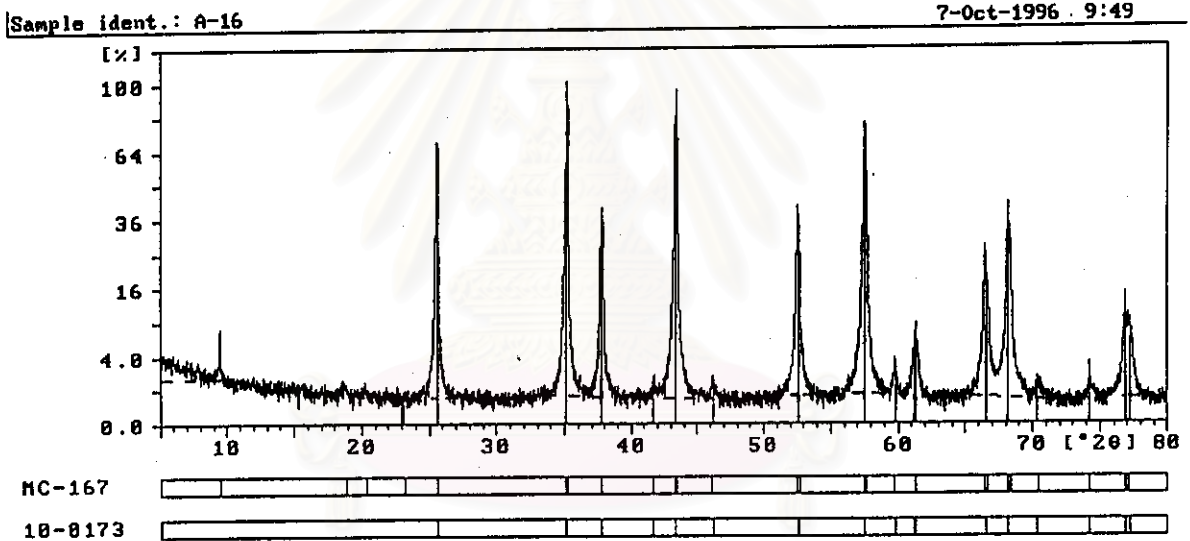
ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะจำเพาะที่วัดได้ของผงอะลูมินา

| ลักษณะจำเพาะ | ค่าที่วัดได้ |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)* | 3.91 |
| พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม) | 3.67 |
| การกระจายขนาด (ไมครอน) | |
| - ปริมาณสะสม ร้อยละ 10 | 0.26 |
| - ปริมาณสะสม ร้อยละ 50 | 0.43 |
| - ปริมาณสะสม ร้อยละ 90 | 0.86 |
| สิ่งเจือปน(ร้อยละ โดยน้ำหนัก) | |
| Na ₂ O | 0.08 |
| SiO ₂ | 0.03 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.01 |
| เฟส | α - Al ₂ O ₃ |

*ที่มา : ข้อมูลผลิตภัณฑ์ Alcoa

4.1.1.1 การวิเคราะห์ทางเฟสของผงอะลูมินา

การวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) รูปแบบพิกที่แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่า พิกที่มีความเข้ม (Intensity) สูงสุดอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 35.137 องศา พิกที่มีความเข้มชั้นรองลงมาอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 43.363 และ 57.519 องศา ตามลำดับ มีเฟสอยู่ในรูปแอลฟา-อะลูมินา (α - Al_2O_3) รูปทรงผลึกแบบรอมโบฮีดรัล (Rhombohedral) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข. Pattern 10-0173)

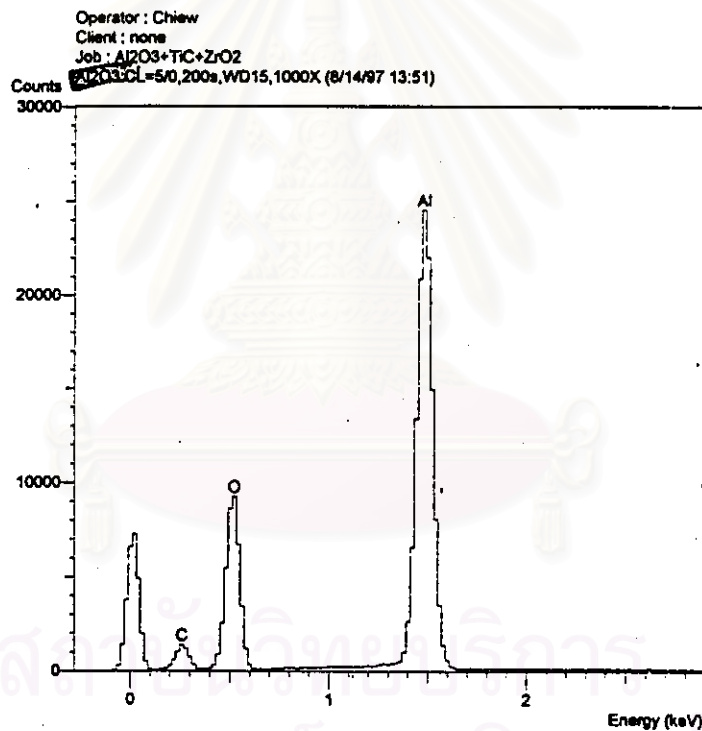


รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบพิก XRD ของผงอะลูมินา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงอะลูมินา

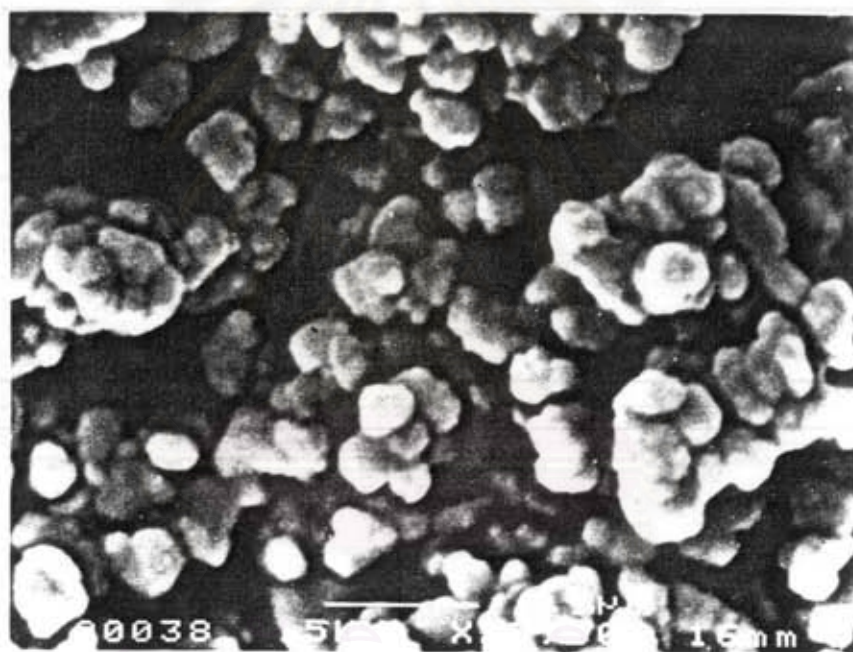
การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องเอนเนอร์จี-ดิสเพอร์ซีฟ-เอ็กซ์เรย์สเปกโตรมิเตอร์ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS) แสดงในรูปที่ 4.2 พบว่ามีธาตุอะลูมิเนียม(Al) มีความเข้มข้นอยู่ที่ 25,000 Counts ที่ระดับพลังงานประมาณ 1.5 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์(KeV) รองลงมาคือ ออกซิเจน(O) และมีธาตุคาร์บอน(C) เพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบพิก EDS ของผงอะลูมินา

4.1.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงอะลูมินา

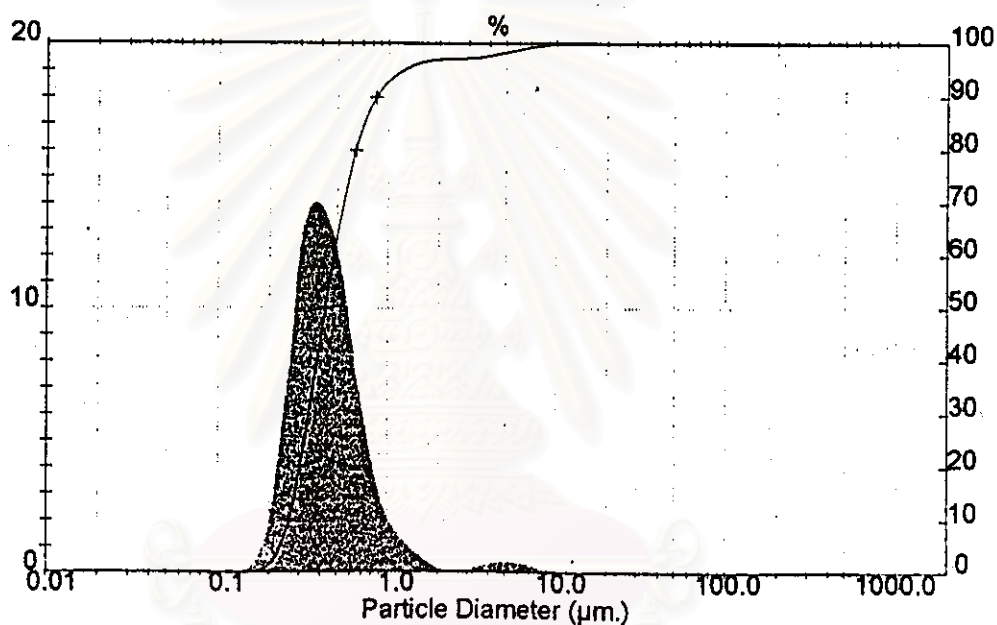
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าผงอะลูมินา มีรูปร่างแบบไม่สม่ำเสมอ (Irregular shape) โดยมีอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากอยู่กระจ่ายกับสม่ำเสมอ และก็มีอนุภาคขนาดใหญ่ปะปนอยู่เล็กน้อยขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยประมาณ 0.43 ไมครอน



รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายผงอะลูมินาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4.1.1.4 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงอะลูมินา

รูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคอะลูมินาจากกราฟในรูปที่ 4.4 (ข้อมูลแสดงในภาคผนวก ข.) พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 (d_{50}) มีค่าเท่ากับ 0.43 ไมครอน ช่วงการกระจายขนาดมีลักษณะแคบ

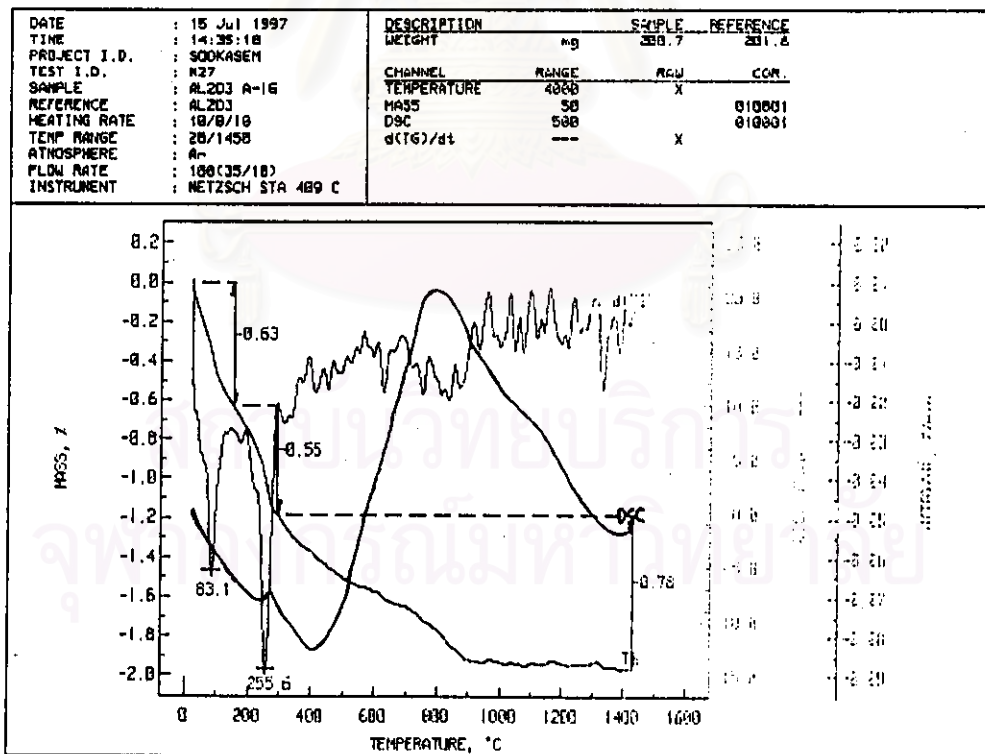


รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการกระจายขนาดของผงอะลูมินา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.1.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงอะลูมินา

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงอะลูมินา แสดงดังกราฟ TGA รูปที่ 4.5 ซึ่งพบว่า เมื่อเริ่มเผาจนอุณหภูมิสูงกว่า 255.6 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาแบบคายความร้อน(ดูจากกราฟ DSC) และมีการสูญเสียน้ำหนักอย่างรวดเร็วมากถึงร้อยละ 1.18 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เป็นการเกิดปฏิกิริยาของสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในผงอะลูมินา ได้แก่ Na_2O , SiO_2 , Fe_2O_3 ทำปฏิกิริยากับ Al_2O_3 เกิดเป็นสารประกอบ $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ โดยเริ่มเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 260 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาจึงเป็นไปอย่างสมบูรณ์และน้ำหนักได้ลดลงเรื่อยๆจนแทบจะ ไม่มีการสูญเสียน้ำหนักอีกเลย



รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของผงอะลูมินา

4.1.2 การศึกษาลักษณะจำเพาะของผงไททานเนียมคาร์ไบด์

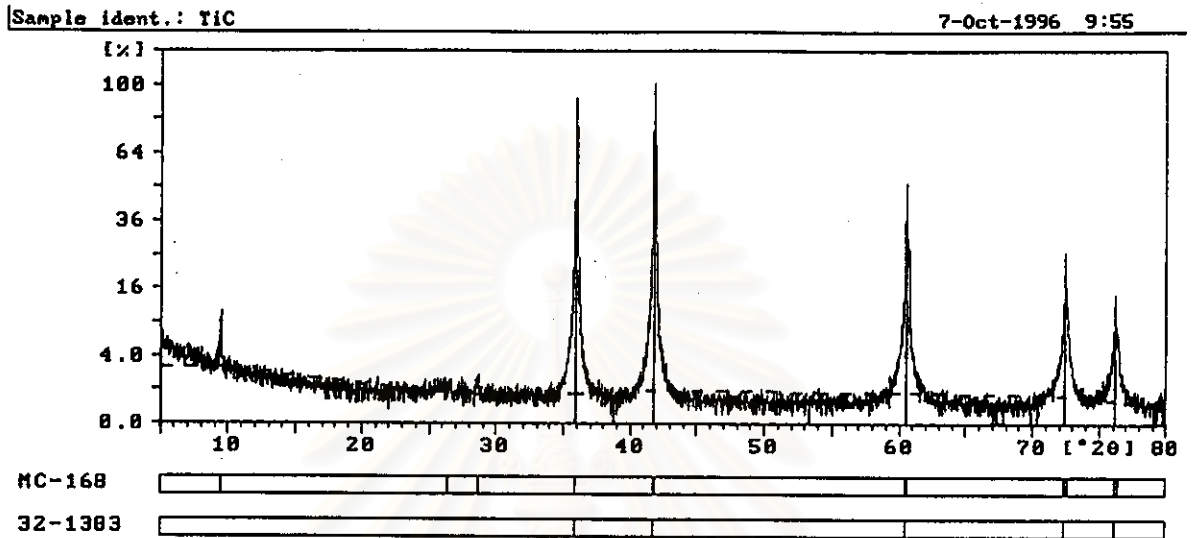
ผลการวิเคราะห์ลักษณะจำเพาะของผงไททานเนียมคาร์ไบด์ แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะจำเพาะที่วัดได้ของผงไททานเนียมคาร์ไบด์

| ลักษณะจำเพาะ | ค่าที่วัดได้ |
|--------------------------------------|--------------|
| ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) | 4.94 |
| พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม) | 4.45 |
| การกระจายขนาด (ไมครอน) | |
| - ปริมาณสะสม ร้อยละ 10 | 0.13 |
| - ปริมาณสะสม ร้อยละ 50 | 0.35 |
| - ปริมาณสะสม ร้อยละ 90 | 1.03 |
| สิ่งเจือปน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) | |
| O | 0.7 |
| C | 21 |
| เฟส | TiC |

4.1.2.1 การวิเคราะห์ทางเฟสของผงไททานเนียมคาร์ไบด์

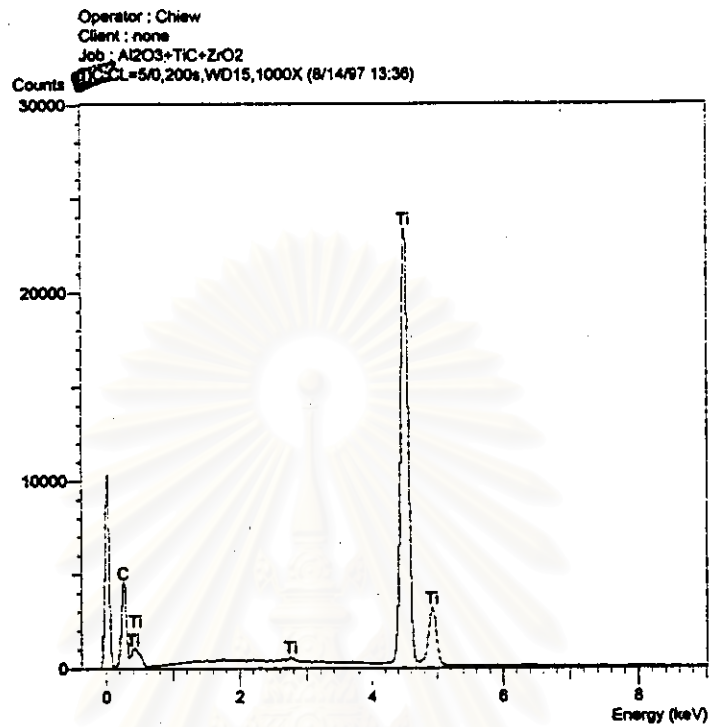
การวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) รูปแบบพีคที่แสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าพีคที่มีความเข้มข้นสูงสุดอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 41.711 องศา พีคที่มีความเข้มข้นรองลงมาอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 35.907 และ 60.450 องศาตามลำดับ รูปทรงผลึกแบบ คิวบิก (Cubic) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก Pattern 32-1383)



รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบพีก XRD ของผงไททานเนียมคาร์ไบด์

4.1.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงไททานเนียมคาร์ไบด์

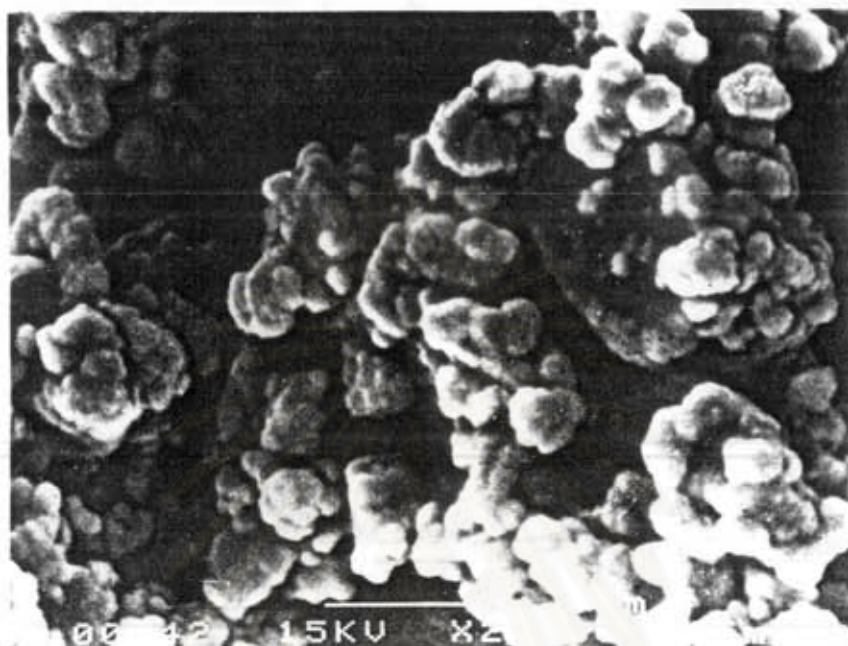
การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง EDS แสดงในรูปที่ 4.7 พบว่ามีธาตุไททานเนียม (Ti) มีความเข้มข้นอยู่ที่ 33,000 และ 6,000 Counts ตามลำดับที่ระดับพลังงานประมาณ 4.5 และ 4.95 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (KeV) ตามลำดับ และ มีธาตุคาร์บอน (C) ความเข้มข้นอยู่ที่ 5,000 Counts ที่ระดับพลังงานประมาณ 3 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (KeV)



รูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบพีก EDS ของผงไททานเนียมคาร์ไบด์

4.1.2.8 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงไททานเนียมคาร์ไบด์

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าผงไททานเนียมคาร์ไบด์จะมีรูปร่างแบบไม่สม่ำเสมอ (Irregular shape) ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยประมาณ 0.35 ไมครอน

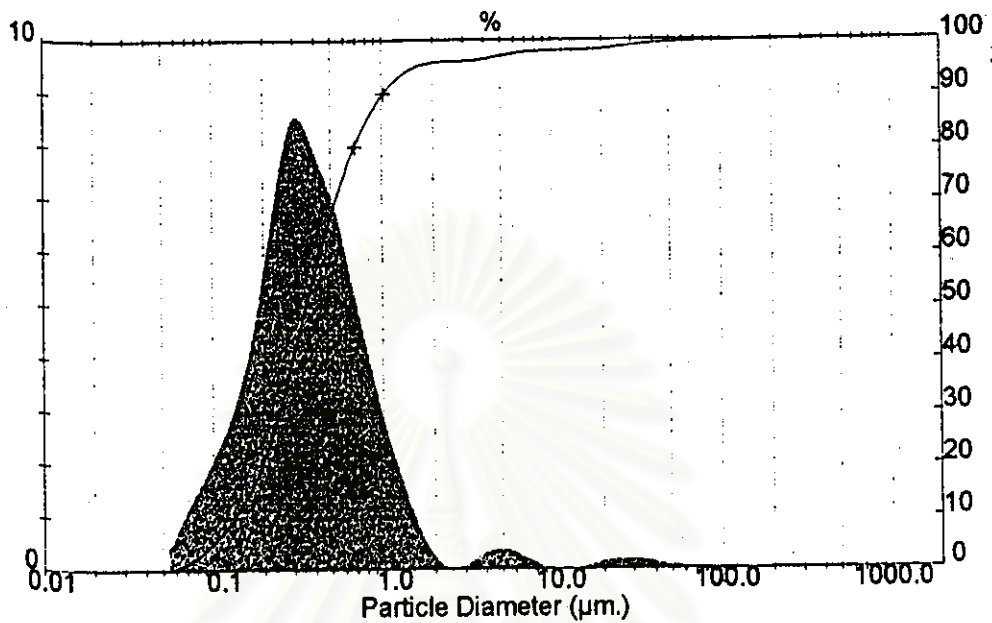


รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายผงไททาเนียมคาร์ไบด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4.1.2.4 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงไททาเนียมคาร์ไบด์

รูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคไททาเนียมคาร์ไบด์ จากกราฟรูปที่ 4.9 (ข้อมูลแสดงในภาคผนวก ข.) พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 (d_{50}) มีค่าเท่ากับ 0.35 ไมครอน ช่วงการกระจายขนาดมีลักษณะกว้าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

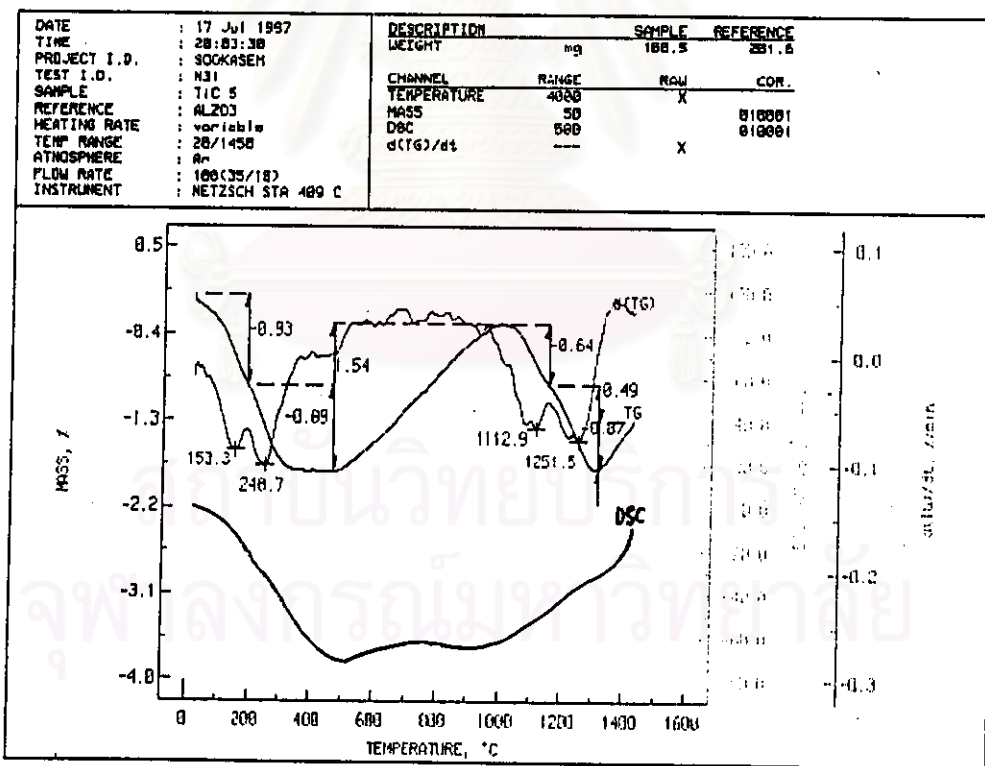
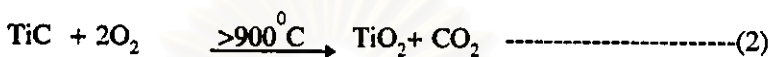
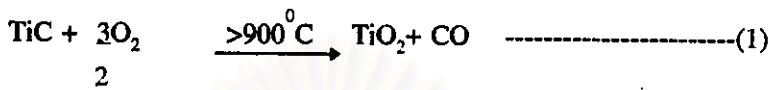


รูปที่ 4.9 แสดงรูปแบบการกระจายขนาดของผงไททานเนียมคาร์ไบด์

4.1.2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงไททานเนียมคาร์ไบด์

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงไททานเนียมคาร์ไบด์ แสดงดังกราฟ TGA รูปที่ 4.10 ซึ่งพบว่า เมื่อเริ่มเผาจนอุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาแบบคายความร้อน(ดูจากกราฟ DSC) และมีการสูญเสียน้ำหนักอย่างรวดเร็วมากถึงร้อยละ 1.82 เนื่องจากคาร์บอนที่อยู่ในไททานเนียมคาร์ไบด์แยกตัวมาเป็นคาร์บอนอิสระและหลังจากนั้นที่อุณหภูมิประมาณ 980 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนและน้ำหนักของสารเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.54 ที่อุณหภูมิ 980 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักอย่างรวดเร็วถึงร้อยละ 1.51 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมินี้เป็นผลเนื่องมาจากการสลายตัวของแก๊ส CO หรือ CO₂ ซึ่งแก๊สที่ขึ้นจะเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีของไททานเนียมคาร์ไบด์ กับ บรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการใช้แก๊สอาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.995 มีสิ่งเจือปนได้แก่ ออกซิเจน และสารมลทินอื่นๆอีกร้อยละ 0.005 ทำให้แก๊สออกซิเจนที่ผสมอยู่กับแก๊สอาร์กอนทำปฏิกิริยากับไททานเนียมคาร์ไบด์กลายเป็นไททานเนียมออกไซด์(รูไทล์)(TiC→TiO₂) ที่อุณหภูมิมากกว่า 900 องศาเซลเซียส ไททานเนียมคาร์ไบด์ซึ่งมีผลึกเป็นคิวบิก เมื่อกลายเป็น

ไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งมีผลึกเป็นรูปร่างยาว (Needle like) หรือรูไทล์ (Rutile) จะเกิดการขยายตัวของผลึกทำให้ปริมาตรและน้ำหนักเพิ่มขึ้น (Tampieri และ Bellosi, 1992)



รูปที่ 4.10 แสดงผลวิเคราะห์ทางความร้อนของผงไททาเนียมคาร์ไบด์

4.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารปรับปรุงสมบัติ

4.2.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของสารปรับปรุงสมบัติคือ เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะเฉพาะที่วัดได้ของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์

| ลักษณะเฉพาะ | ค่าที่วัดได้ |
|--------------------------------------|--------------|
| ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) | 5.73 |
| พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม) | 2.02 |
| การกระจายขนาด (ไมครอน) | |
| ร้อยละ 90 | 8.93 |
| ร้อยละ 50 | 0.55 |
| ร้อยละ 10 | 0.26 |
| องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ) | |
| Zr | 78.66 |
| O | 28 |
| เฟส | ZrO_2 |

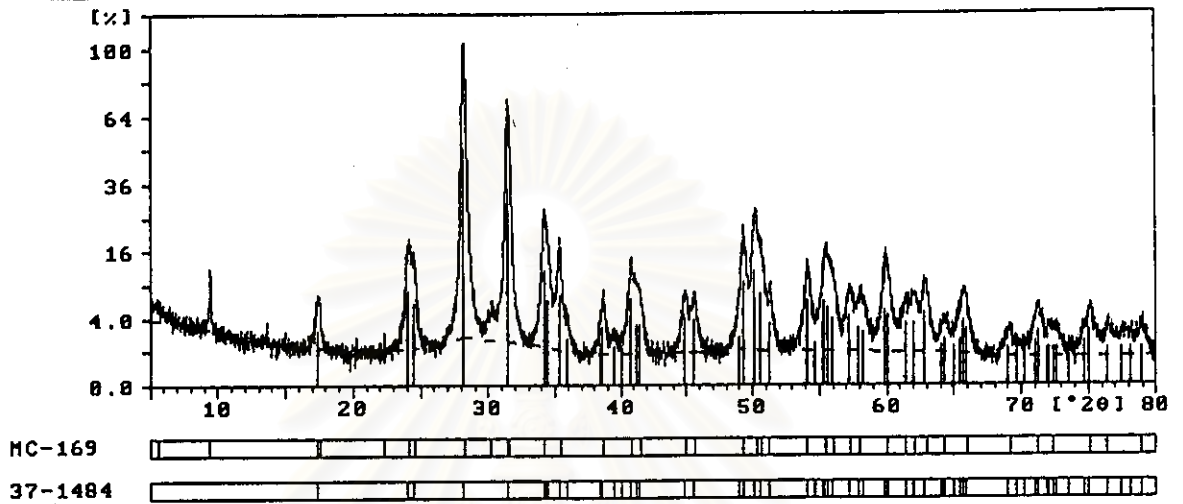
* ที่มา : จากการวัดด้วยเครื่อง EDS

4.2.1.1 การวิเคราะห์ทางเฟสของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์

การวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) รูปแบบพิกที่แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าพิกที่มีความเข้มข้นสูงสุดอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 28.175 องศา พิกที่มีความเข้มข้นรองลงมาอยู่ที่มุม 31.468 และ 50.116 องศาตามลำดับ รูปทรงผลึกแบบโมโนคลินิก (monoclinic) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข. Pattern 37-1484)

Sample Ident.: ZrO2

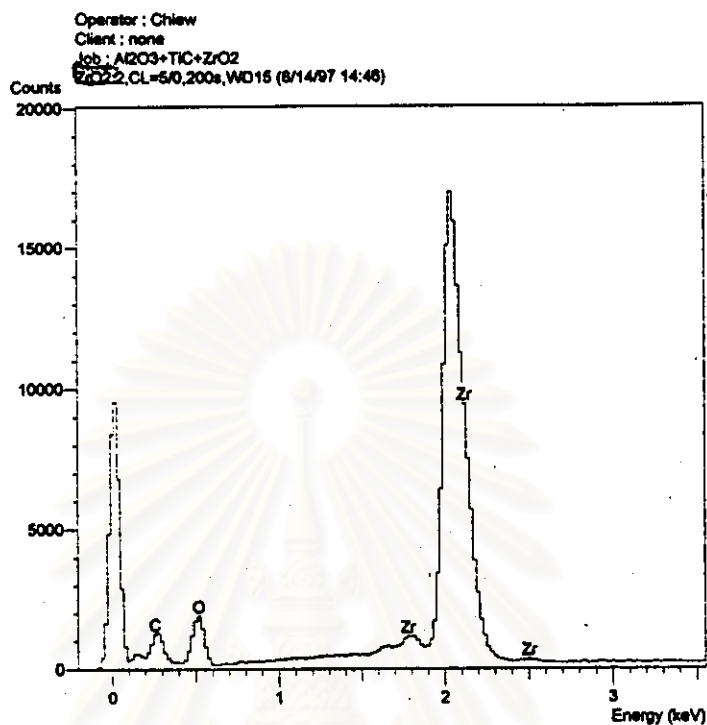
7-Oct-1996 10:01



รูปที่ 4.11 แสดงรูปแบบพีค XRD ของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์

4.2.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง EDS แสดงในรูปที่ 4.12 พบว่ามีธาตุเซอร์โคเนียม(Zr) มีความเข้มข้นสูงสุดมากกว่า 17,000 Counts ที่ระดับพลังงานประมาณ 2.1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (KeV) และออกซิเจนมากกว่า 2,000 Counts ที่ระดับพลังงานประมาณ 0.5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (KeV)

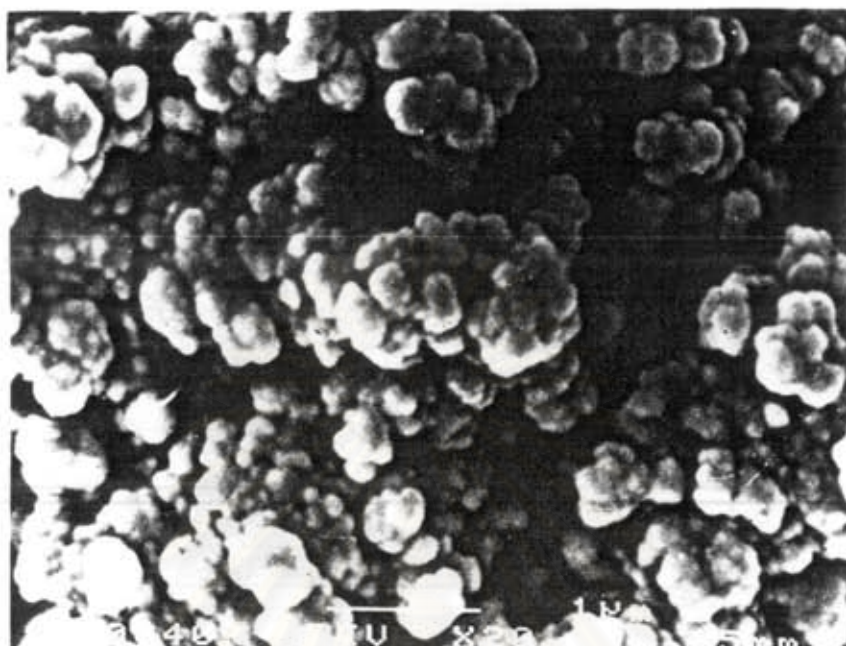


รูปที่ 4.12 แสดงรูปแบบพีก EDS ของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์

4.2.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงในรูปที่ 4.13 พบว่า ผงเซอร์โคเนียมมีรูปร่างแบบกลม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

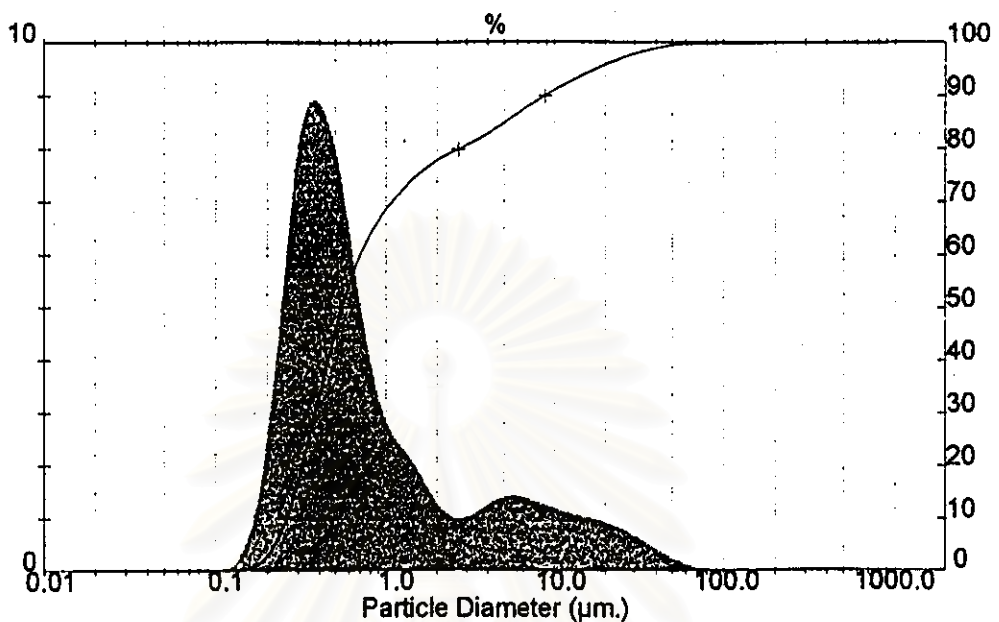


รูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายผงเซอร์โคเนียมออกไซด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4.2.1.4 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์

รูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคเซอร์โคเนียมออกไซด์แสดงในรูปที่ 4.14 (ข้อมูลแสดงในภาคผนวก ข.) จากกราฟในรูปที่ 4.14 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 (d_{50}) มีค่าเท่ากับ 0.55 ไมครอน ช่วงการกระจายขนาดมีลักษณะกว้าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

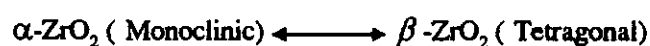


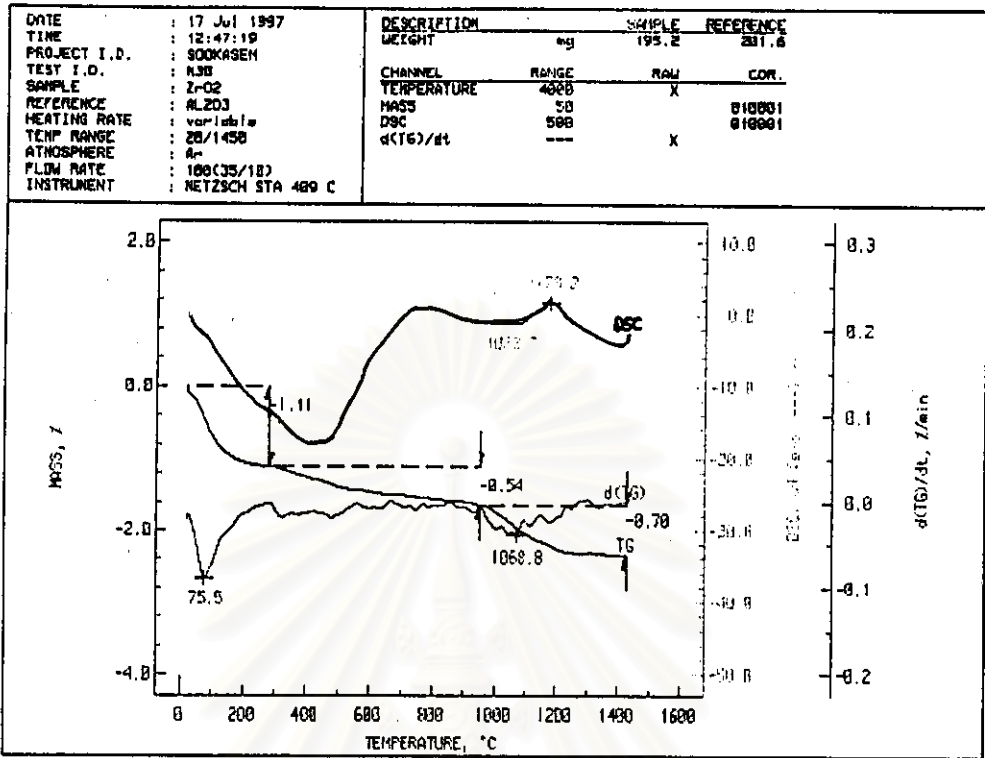
รูปที่ 4.14 แสดงรูปแบบการกระจายขนาดของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์

4.2.1.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเซอร์โคเนียมออกไซด์

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์แสดงดังกราฟ TGA รูปที่ 4.15 ซึ่งพบว่าการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 0.54 ที่อุณหภูมิประมาณ 1083.7 องศาเซลเซียส และน้ำหนักของสารลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 1250 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 1178.2 องศาเซลเซียสจะเกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน(ดูจากกราฟDSC)ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เนื่องมาจาก เซอร์โคเนียมออกไซด์เกิดการเปลี่ยนเฟสจาก อัลฟา-เซอร์โคเนียมออกไซด์(โมนอคลินิก) ไปเป็น เบต้า-เซอร์โคเนียมออกไซด์(เตตระโกนอล) ที่อุณหภูมิ 1170 องศาเซลเซียส (Sergij และ Lidia, 1997)

1170°C

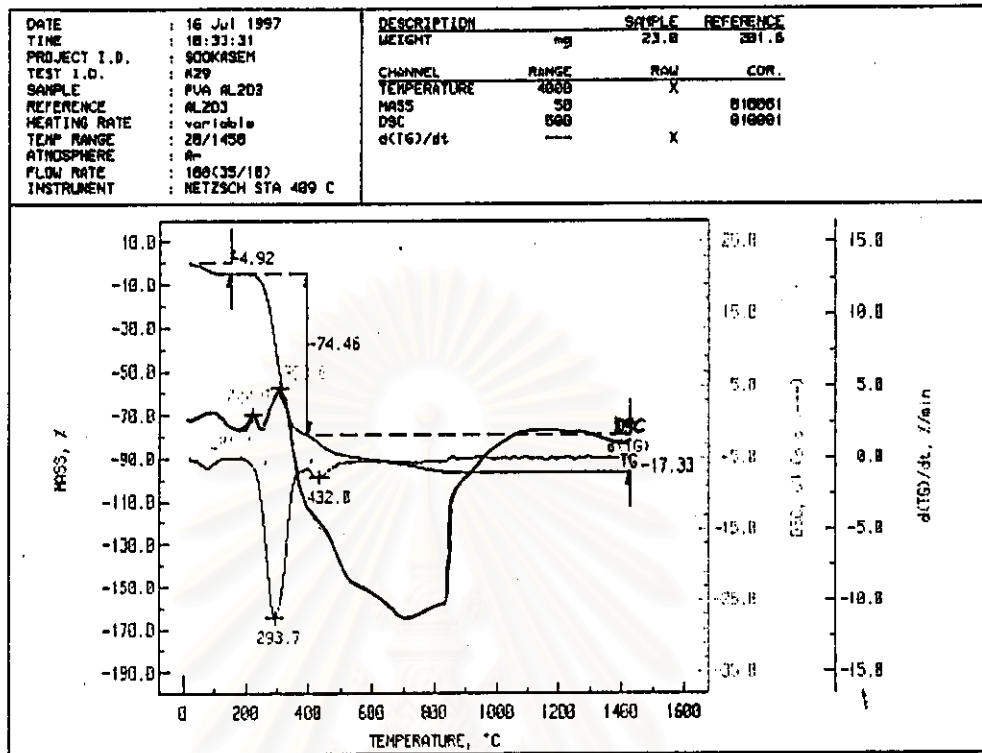




รูปที่ 4.15 ผลวิเคราะห์ทางความร้อนของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์

4.3 การศึกษาลักษณะจำเพาะของสารเพิ่มการยึดเกาะ

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohols, PVA) แสดงดังกราฟ TGA รูปที่ 4.16 ซึ่งพบว่าเมื่อเริ่มเผาจนอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาแบบลดความร้อน (ดูจากกราฟ DSC) และมีการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 4.92 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงนี้คือ การระเหยของน้ำที่มีอยู่ในผงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ให้หมดไป และหลังจากนั้นที่อุณหภูมิประมาณ 308 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนเป็นผลเนื่องมาจากสาร Hydrocarbon หรือ PVA สลายตัวออกหมด จนถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส การเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ และมีการสูญเสียน้ำหนักรวมทั้งหมดร้อยละ 96.41



รูปที่ 4.16 แสดงผลวิเคราะห์ทางความร้อนของผงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

4.4 การศึกษาลักษณะจำเพาะของแกรนูล

4.4.1 การศึกษาลักษณะจำเพาะของผงแกรนูล

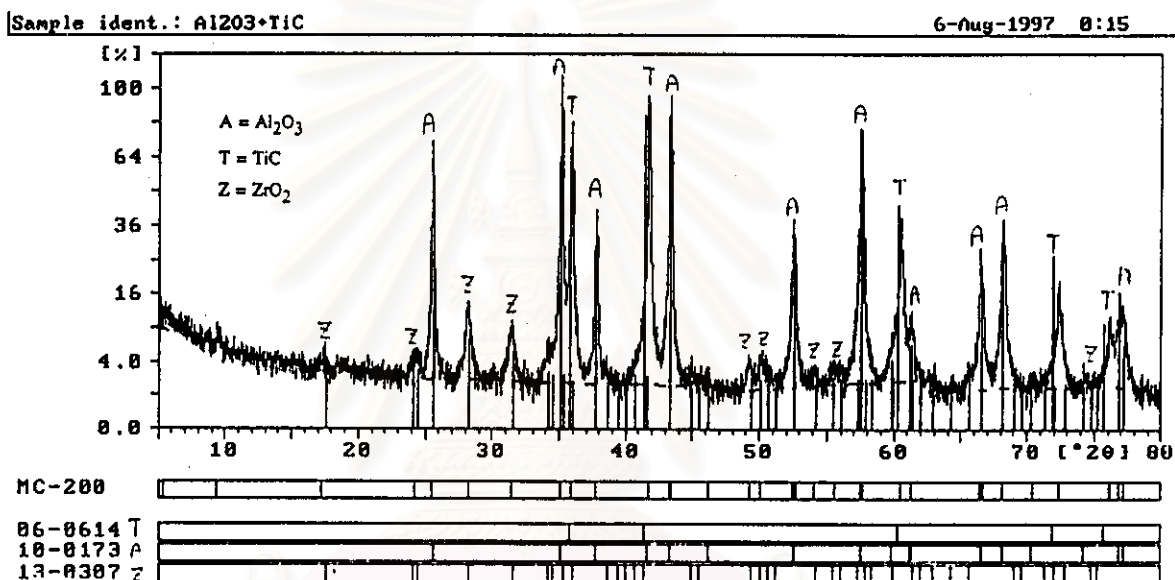
ผลการวิเคราะห์ลักษณะจำเพาะของผงแกรนูลแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงลักษณะจำเพาะที่วัดได้ของผงแกรนูล

| ลักษณะจำเพาะ | ค่าที่วัดได้ |
|-------------------------------------|---|
| ความหนาแน่น(กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) | 4.26 |
| พื้นที่ผิวจำเพาะ(ตารางเมตร/กรัม) | 3.27 |
| การกระจายขนาด(ไมครอน) | |
| - ปริมาณสะสมร้อยละ 10 | 0.24 |
| - ปริมาณสะสมร้อยละ 50 | 0.47 |
| - ปริมาณสะสมร้อยละ 90 | 0.53 |
| เฟส | Al ₂ O ₃ + TiC + ZrO ₂ |

4.4.2 การวิเคราะห์ทางเฟสของผงแกรนูล

การวิเคราะห์หัตถ์เครื่อง XRD รูปแบบพีกที่แสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าจะประกอบไปด้วยพีกของอะลูมินา ไททเนียมคาร์ไบด์ และเซอร์โคเนียมออกไซด์ ตามความเข้มข้นและมุม 2θ ที่ต่างกัน ดังแสดงตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.17 แสดงพีก XRD ของผงแกรนูล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 แสดงผลวิเคราะห์ห้องประกอบของเฟสในรูปแบบทีก XRD ของผงแกรนูล

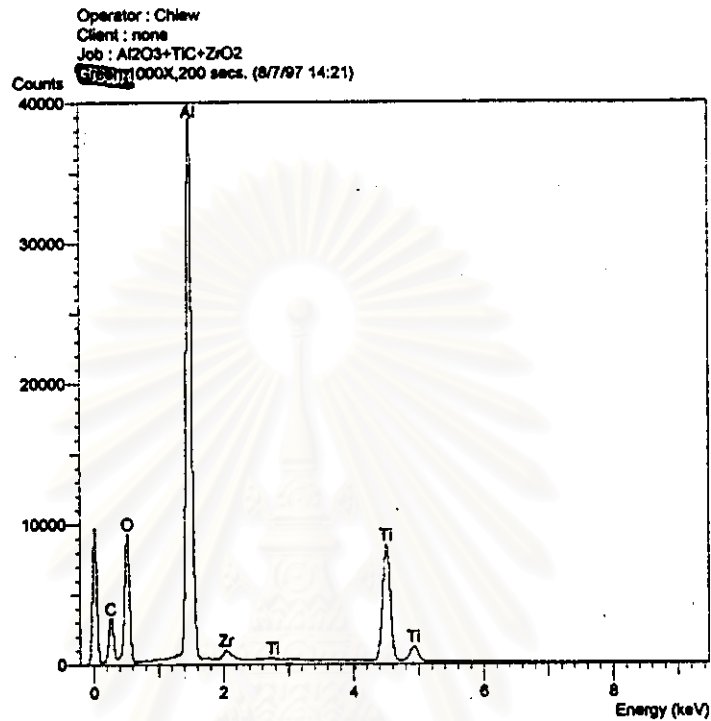
| เฟส | Pattern อ้างอิง | ชนิดของผลึก | มุม 2θ | ความเข้มข้น (ร้อยละ) |
|--------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------|-------------------------|
| Al ₂ O ₃ | 10-0173 | รอมโบฮีดรอล (Rhombohedral) | 35.137 | 90 |
| | | | 57.519 | 80 |
| | | | 25.584 | 75 |
| TiC | 32-1383 | คิวบิก (Cubic) | 35.907 | 80 |
| | | | 60.450 | 60 |
| | | | 72.371 | 30 |
| ZrO ₂ | 37-1484 | โมนอคลินิก (Monoclinic) | 28.175 | 100 |
| | | | 31.468 | 68 |
| | | | 50.116 | 22 |

4.4.3 การวิเคราะห์ห้องประกอบทางเคมีของผงแกรนูล

การวิเคราะห์ห้องประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง EDS แสดงในรูปที่ 4.18 พบว่ามีธาตุ Al, Ti, Zr, O และ C ตามความเข้มข้นที่ระดับพลังงานต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 4.6 แสดงผลวิเคราะห์ห้องประกอบทางเคมีของผงแกรนูล

| ธาตุ | ความเข้มข้น (Counts) | ระดับพลังงาน (KeV) |
|------|-------------------------|-----------------------|
| Al | 40,000 | 1.50 |
| Ti | 9,000 | 4.25 |
| | 1,500 | 4.80 |
| Zr | 1,000 | 2.10 |
| O | 9,500 | 0.50 |
| C | 3,500 | 0.25 |



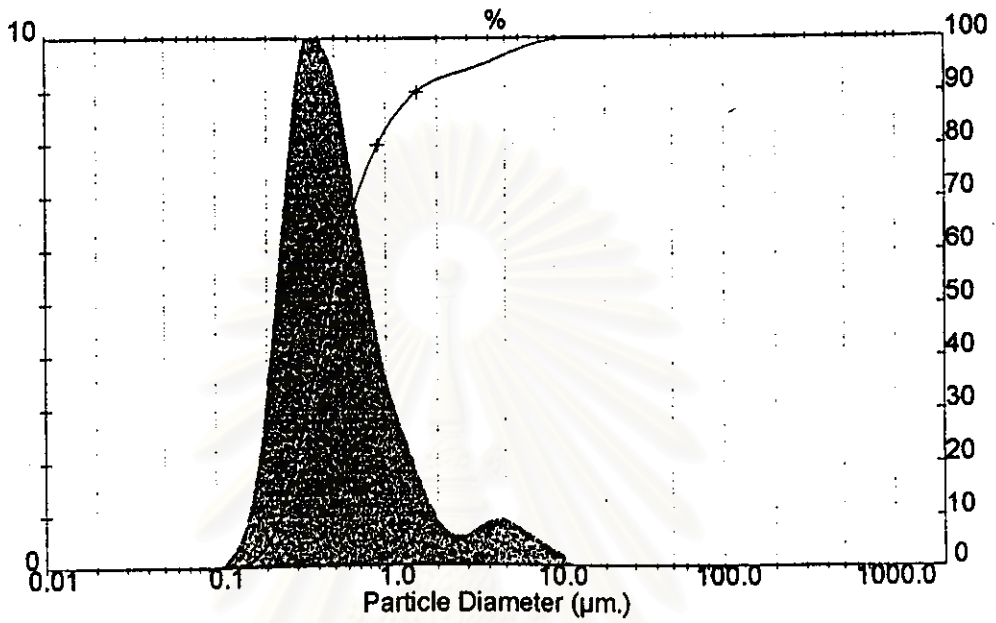
รูปที่ 4.18 แสดงรูปแบบพีก EDS ของผงแกรนูล

4.4.4 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างและการกระจายขนาดของผงแกรนูล

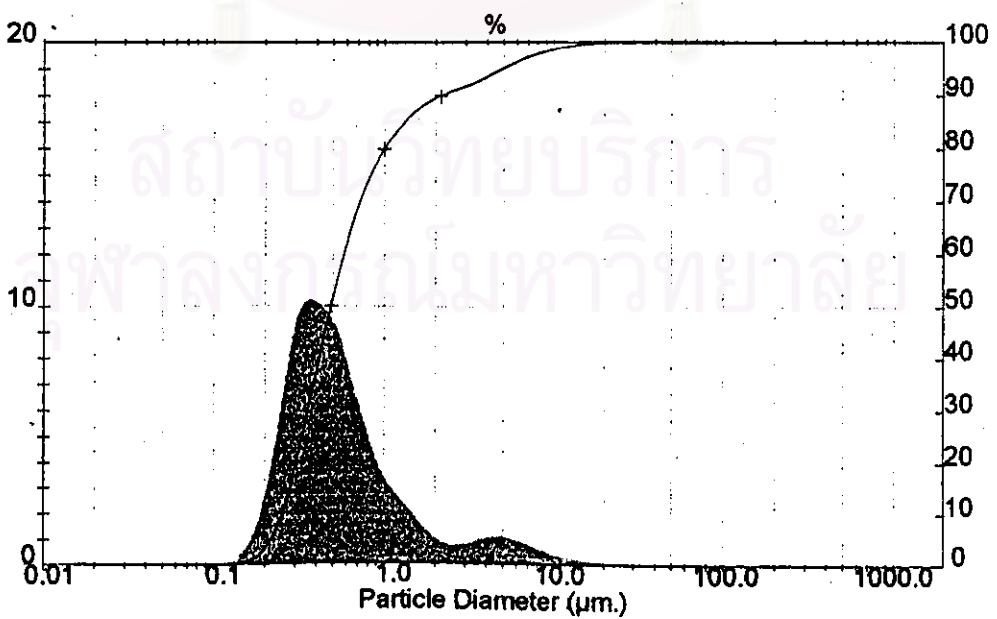
จากการทดลองบดสารตั้งต้นและสารปรับปรุงสมบัติในหัวข้อที่ 4.1.1, 4.1.2 และ 4.2 ด้วยเวลา 2 และ 30 ชั่วโมง แล้วทำการวัดขนาดแสดงรูปที่ 4.19 , รูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.7 ถ่ายภาพเพื่อดูลักษณะรูปร่างของแกรนูล แสดงรูปที่ 4.21

ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ลักษณะจำเพาะของผงแกรนูลที่เวลาบดต่างกัน

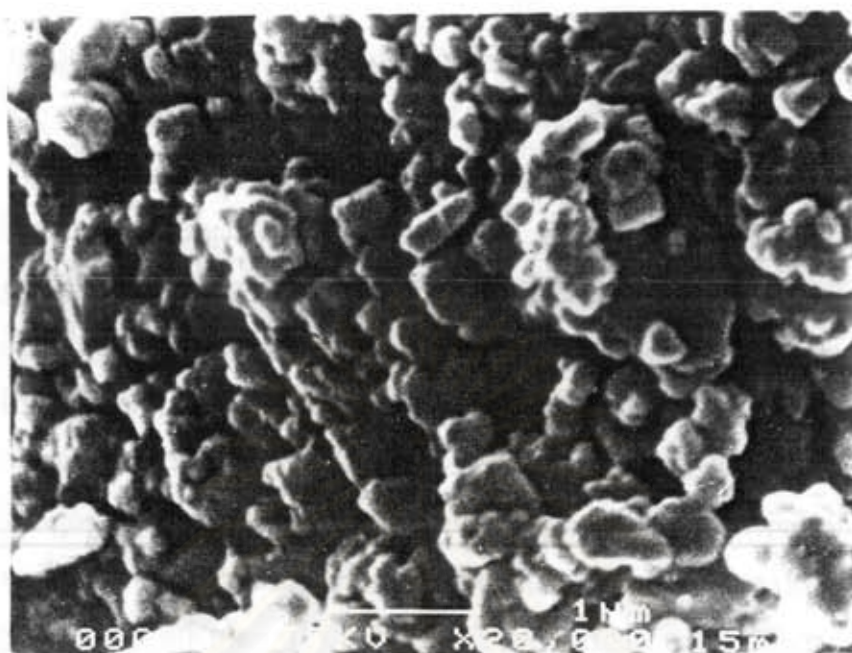
| ลักษณะจำเพาะ | ค่าที่วัดได้ | |
|-----------------------------------|--------------|---------------|
| | บด 2 ชั่วโมง | บด 30 ชั่วโมง |
| พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม) | 3.27 | 3.11 |
| การกระจายขนาด (ไมครอน) | | |
| - ปริมาณสะสมร้อยละ 10 | 0.24 | 0.25 |
| - ปริมาณสะสมร้อยละ 50 | 0.47 | 0.48 |
| - ปริมาณสะสมร้อยละ 90 | 1.54 | 2.03 |



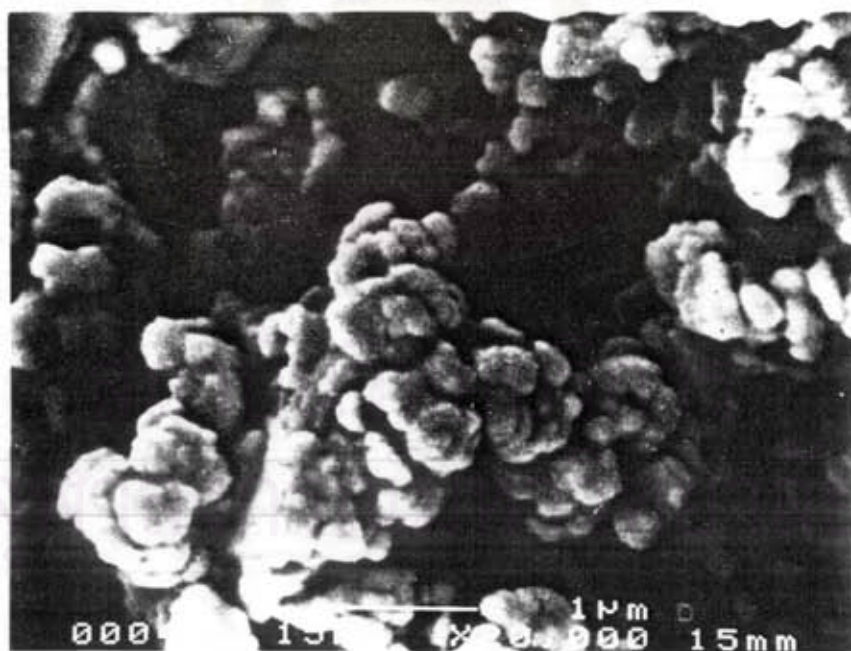
รูปที่ 4.19 แสดงรูปแบบการกระจายของผงแกรนูลขนาดแบบปริมาณสะสมใช้เวลาบด 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.20 แสดงรูปแบบการกระจายขนาดของผงแกรนูลแบบปริมาณสะสมใช้เวลาบด 30 ชั่วโมง



(ก) แสดงภาพถ่ายผงแกรนูลที่ใช้เวลาบด 2 ชั่วโมง

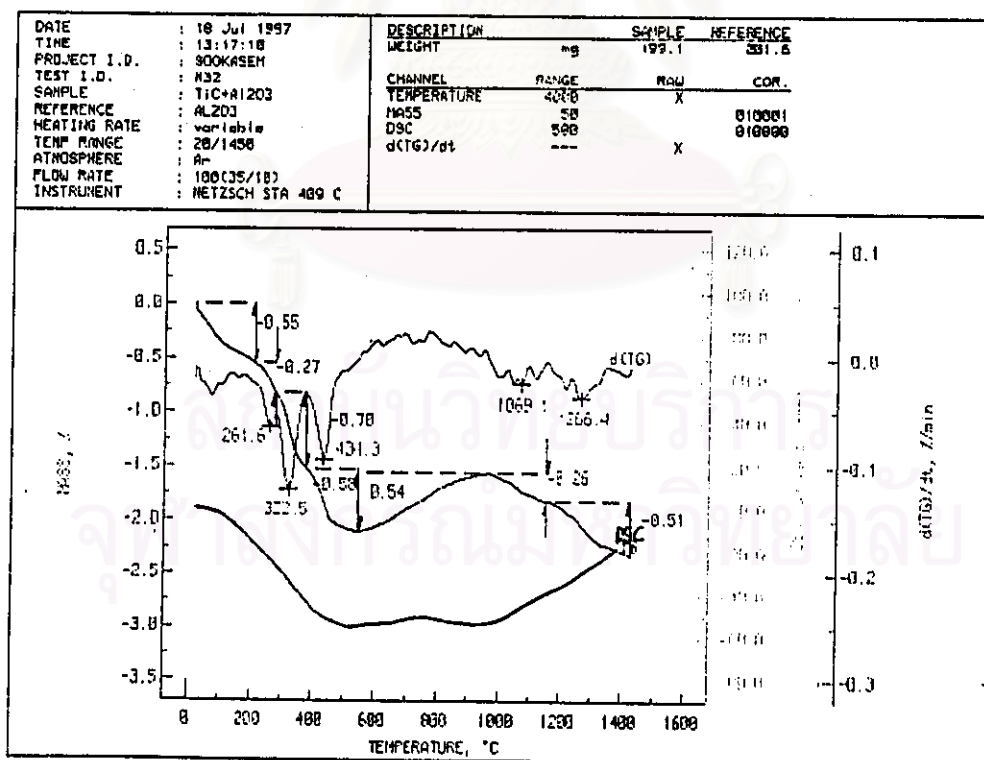


(ข) แสดงภาพถ่ายผงแกรนูลที่ใช้เวลาบด 30 ชั่วโมง

รูปที่ 4.21 แสดงภาพถ่ายเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างและขนาดของผงแกรนูลที่ใช้เวลาบดต่างกัน

4.4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงแกรนูล

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงแกรนูล แสดงดังกราฟ TGA รูปที่ 4.22 ซึ่งพบว่า เมื่อเริ่มเผาจนอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จนถึง 700 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน (ดูจากกราฟ DSC) และมีการสูญเสียน้ำหนักอย่างรวดเร็วมากถึงร้อยละ 2.10 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงนี้คือการระเหยของน้ำ และการสลายตัวของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ซึ่งเป็นสารช่วยเพิ่มการยึดเกาะตัวของอนุภาคที่มีอยู่ในผงแกรนูลให้หมดไปน้ำหนักของสารจะลดลงอย่างต่อเนื่องและหลังจากนั้นที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียสจนถึง 980 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนน้ำหนักสารเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.54 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมินี้เป็นผลเนื่องมาจาก การเกิดปฏิกิริยาเคมีของโททานียมคาร์ไบด์ กับบรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูง ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1.2.5 (การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงโททานียมคาร์ไบด์)



รูปที่ 4.22 แสดงผลวิเคราะห์ทางความร้อนของผงแกรนูล

จากผลวิเคราะห์ทางความร้อนของตัวอย่างที่ได้นี้เราสามารถนำมาใช้ในการสร้างตารางกำหนดอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมกับการเผาไล่สารประกอบประเภทอินทรีย์และการเผาผนึก เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ดีที่สุดไม่เกิดการแตกหักหรือมีสารอินทรีย์ตกค้างอยู่ในชิ้นงานได้

4.5 การศึกษาดัชนีเฉพาะของชิ้นงานกรีน ผลของความดัน การอัดชิ้นงานรูปแบบเย็น (Cold Pressing) ผลของความดันไอโซสแตติก และสมบัติของชิ้นงานก่อนการเผาผนึก (Sintering)

4.5.1 การศึกษาผลของความดันการขึ้นรูปแบบเย็น ต่อความหนาแน่นชิ้นงานกรีน

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบเย็นกับความหนาแน่นของชิ้นงานกรีน แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 และกราฟ รูปที่ 4.23

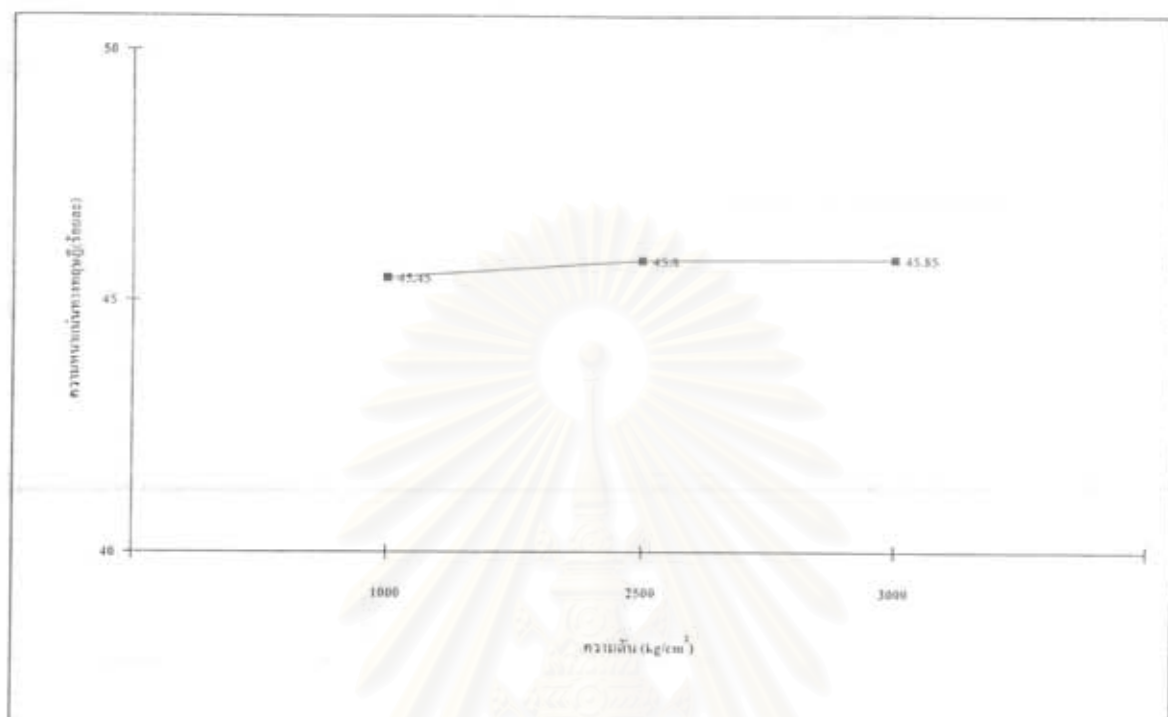
ตารางที่ 4.8 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานเมื่อใช้ความดันในการขึ้นรูปต่างกัน

| ความดัน (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) | ความหนาแน่นจริง* (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) | ความหนาแน่นทางทฤษฎี** (ร้อยละ) |
|--------------------------------------|--|-----------------------------------|
| 1000 | 1.936 | 45.45 |
| 2000 | 1.951 | 45.80 |
| 3000 | 1.957 | 45.95 |

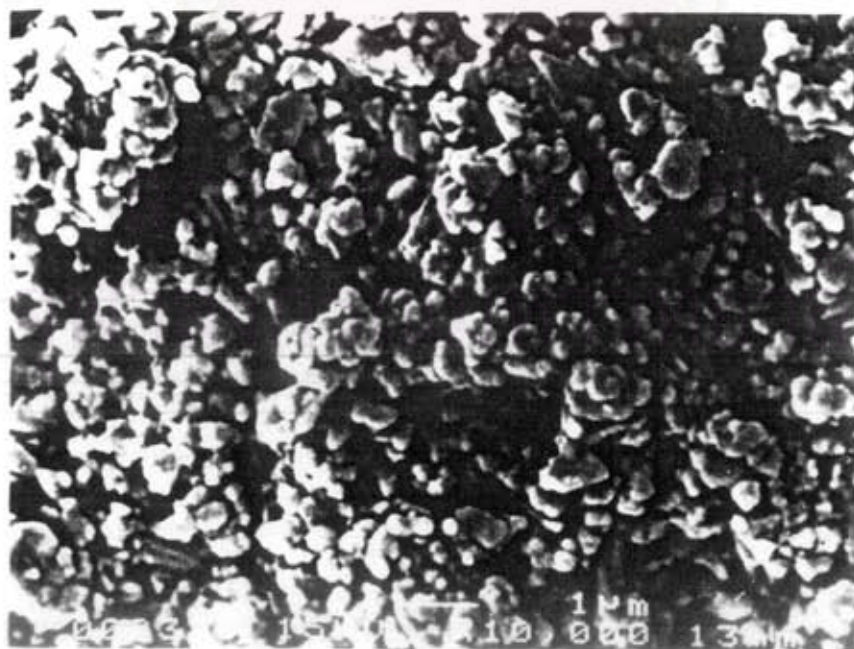
* ค่าเฉลี่ยจากการวัด จำนวน 3 ตัวอย่าง

**ความหนาแน่นทางทฤษฎีของ $Al_2O_3+TiC+ZrO_2 = 4.26$ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากกราฟรูปที่ 4.23 พบว่าเมื่อใช้ความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้นตามลำดับแต่มีความแตกต่างน้อยมากเนื่องจากการใช้ความดันต่ำที่ 1000 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตรก็สามารถทำให้อนุภาคอัดตัวแน่นสูงสุดแล้ว จนไม่สามารถอัดตัวกันได้มากกว่านี้ และยังพบว่าเมื่อใช้ความดันสูงถึง 3000 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ชิ้นงานกรีนจะมีรอยแตกทั้งนี้ก็เป็นเพราะการใช้ความดันที่มากเกินไป



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงานกรีนกับความดันที่ใช้ในการขึ้นรูป



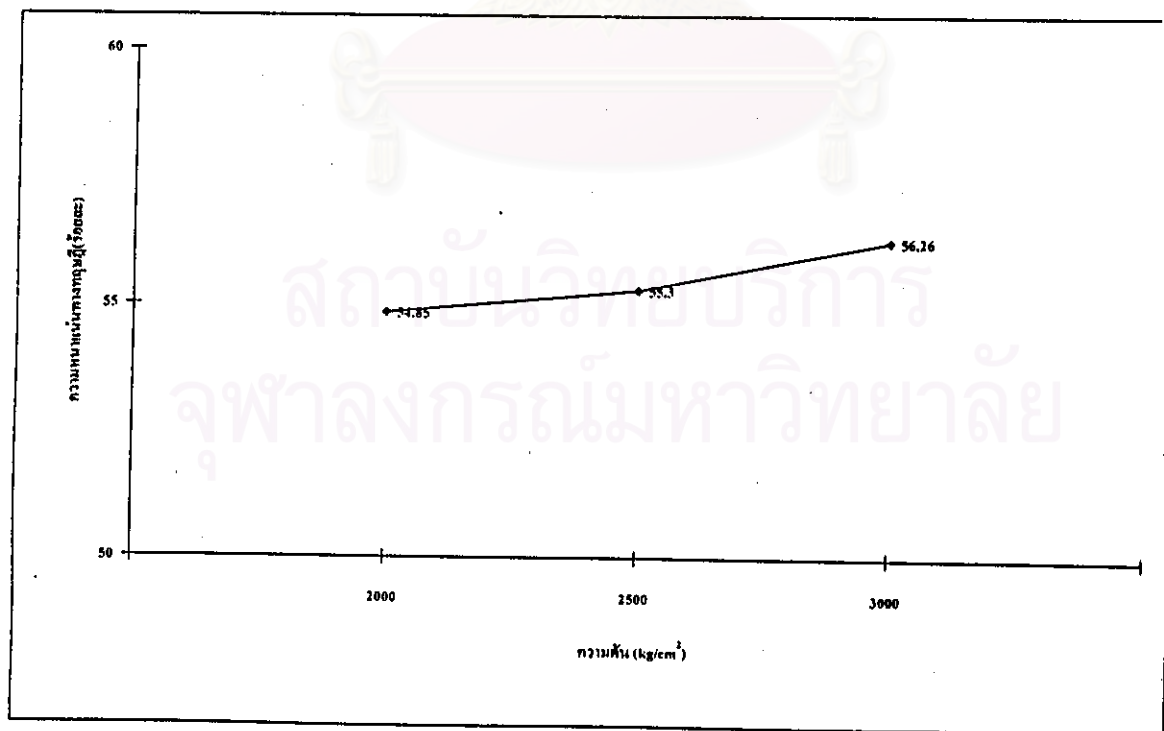
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายผิวรอยแตกของชิ้นงานกรีนที่ผ่านการขึ้นรูปแบบเย็น (Cold Pressing)

4.5.2 การศึกษาผลของความดัน การขึ้นรูปแบบไอโซสแตติก (CIP) ต่อ ความหนาแน่นของชิ้นงานกรีน

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบไอโซสแตติกกับความหนาแน่นของชิ้นงานกรีนแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 และกราฟรูปที่ 4.25 ตารางที่ 4.9 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานกรีนเมื่อใช้ความดันแบบไอโซสแตติกในการขึ้นรูปต่างๆกัน

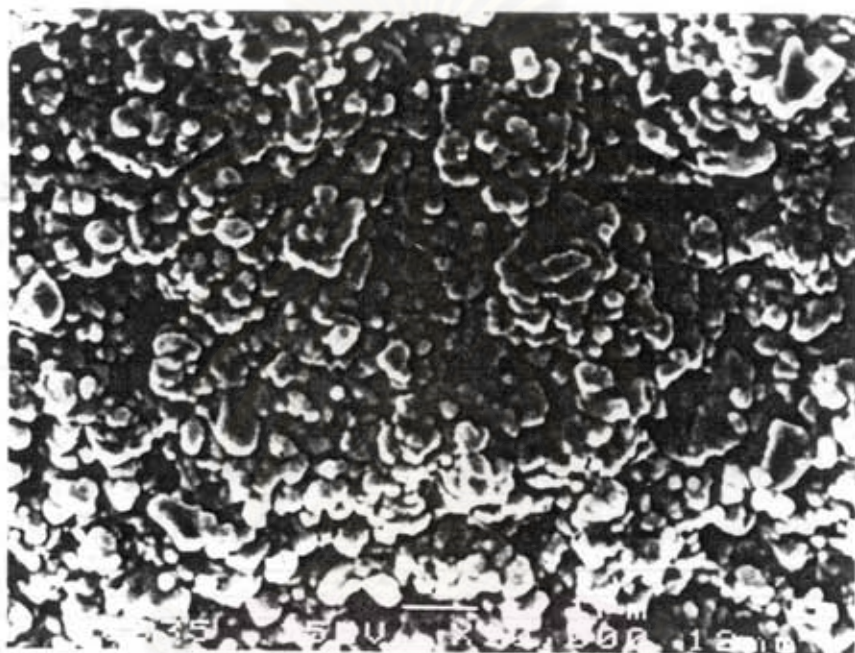
| ความดัน (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) | ความหนาแน่นจริง* (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) | ความหนาแน่นทางทฤษฎี (ร้อยละ) |
|--------------------------------------|--|---------------------------------|
| 2000 | 2.336 | 54.85 |
| 2500 | 2.355 | 55.30 |
| 3000 | 2.397 | 56.26 |

* ค่าเฉลี่ยจากการวัด จำนวน 3 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงานกรีนกับความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบไอโซสแตติก

จากรูปที่ 4.25 พบว่าเมื่อใช้ความดัน CIP ในการอัดเพิ่มความหนาแน่นให้กับชิ้นงานกรีน ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นตามความดันที่มากขึ้นและอนุภาคจะอัดตัวกันแน่นมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.26 เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานกรีนก่อน CIP ในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายสัรรอยแตกของชิ้นงานกรีนที่ผ่านการขึ้นรูปเพิ่มความหนาแน่นด้วย CIP

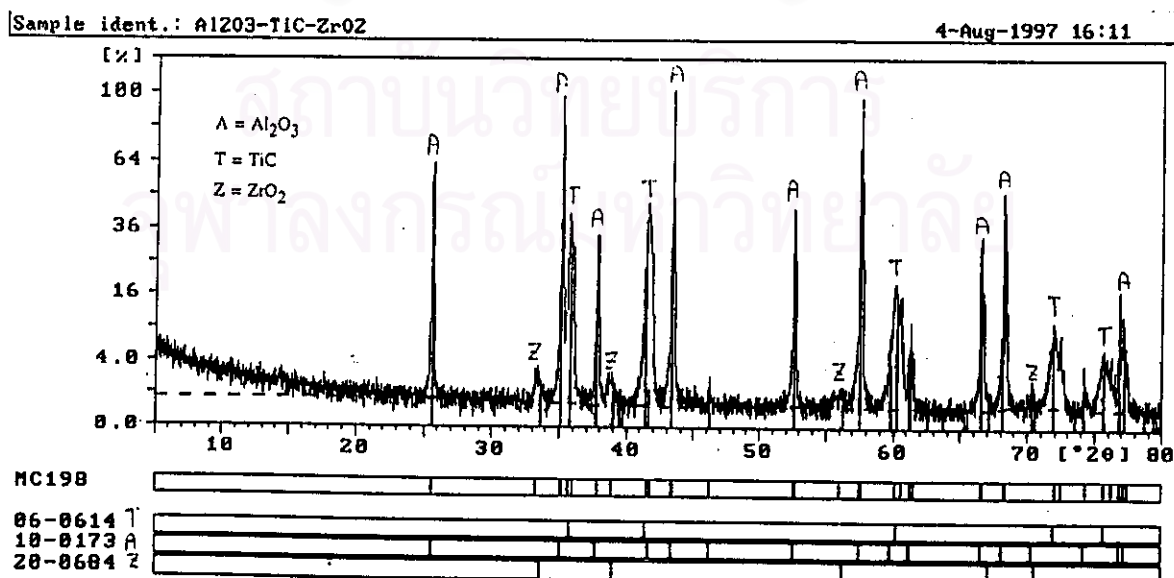
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 การศึกษาลักษณะจำเพาะและสมบัติของชิ้นงานผ่านการเผาผืนิก ผลของอุณหภูมิ เวลา และ อัตราการให้ความร้อน

4.6.1 การศึกษาลักษณะจำเพาะและสมบัติของชิ้นงานผ่านการเผาผืนิก

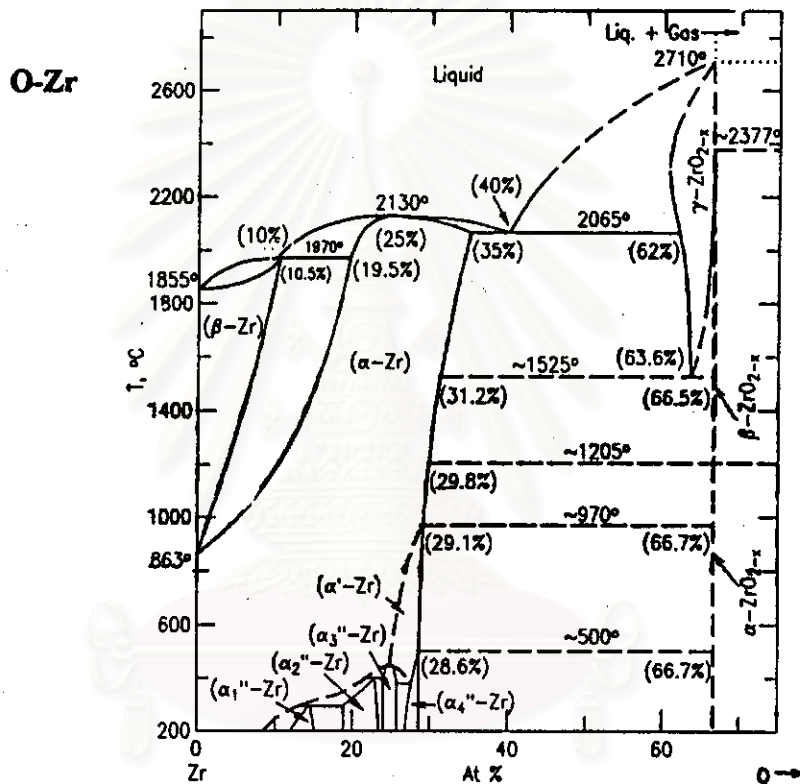
4.6.1.1 การวิเคราะห์ทางเฟสของชิ้นงานผ่านการเผาผืนิก

ผลการวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่อง XRD พิกแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่ามีพีคของ เฟสอัลฟาอะลูมินา(Pattern 10-0173) เฟสไททานเนียมคาร์ไบด์(Pattern 06-0614) ซึ่งทั้ง 2 เฟสจะ เหมือนกับรูปแบบพิก XRD ของผงแกรนูลแสดงในรูปที่ 4.17 ส่วนเฟสของเซอร์โคเนียมออกไซด์ พบว่ามีการเปลี่ยนเฟสจาก เซอร์โคเนียมไดออกไซด์(ZrO_2) Pattern 13-0307 ไปเป็น เซอร์โคเนียม ออกไซด์(ZrO) Pattern 20-0684 เป็นผลเนื่องมาจากการใช้ผงของ $Al_2O_3 + C + TiC$ ผังกลบชิ้น งานเพื่อป้องกันปฏิกิริยาขณะทำการเผาผืนิก มีความเป็นไปได้ที่อะตอมของคาร์บอนซึ่งมีความเข้มข้น ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักที่ผสมอยู่ในผงผังกลบชิ้นงานจะไปลด (Reduce)จำนวนอะตอมของ ออกซิเจนในเซอร์โคเนียมไดออกไซด์(ZrO_2) ได้เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และได้สาร ประกอบตัวใหม่เป็นเซอร์โคเนียมออกไซด์(ZrO) ซึ่งมีเฟสต่างจากผงแกรนูลดั้งสมการ



รูปที่ 4.27 แสดงรูปแบบพิก XRD ของชิ้นงานผ่านการเผาผืนิก

พบว่าสอดคล้องกับเฟสไดอะแกรมของ Zr-O แสดงรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่า จุดที่มีปริมาณของออกซิเจน(O) มากกว่าร้อยละ 66.7 เซอร์โคเนียมออกไซด์ ทั้งอัลฟา(α)เฟสคือโมนอกลิคและเบต้า(β)เฟสคือเตตระโกนอล สามารถเป็นสารประกอบได้ทั้ง ZrO_2 และ ZrO_{2-x} เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 1

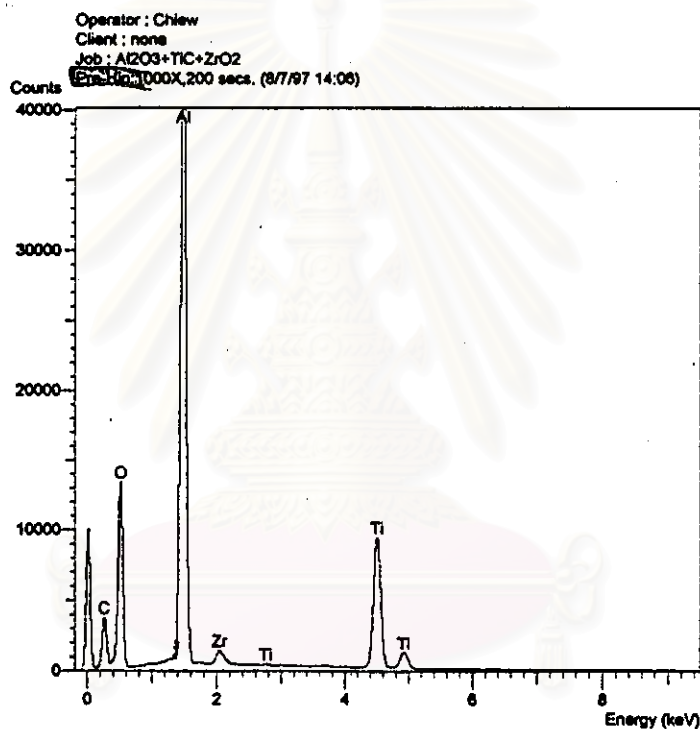


รูปที่ 4.28 แสดงเฟสไดอะแกรมของ Zr-O (Abriata และ Veraci , 1986)

การวิเคราะห์เฟสโททานิยมคาร์ไบด์ จากรูปแบบพีค XRD พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสจาก TiC \rightarrow TiO₂ แม้เผาผนึกอุณหภูมิสูงถึง 1900 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าการใช้ผงฝังกลบสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาของโททานิยมคาร์ไบด์ได้ ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของผงอะลูมินาร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ผงคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และผงโททานิยมคาร์ไบด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (75 wt% Al₂O₃ + 10 wt% C + 15 wt% TiC) จากใช้ฝังกลบ (Embed) ชิ้นงานในขณะที่เผาผนึกให้ความร้อนจะสามารถทำให้เกิดเฟสของแก๊ส Al₂O, C, TiO เพื่อระงับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะลูมินากับโททานิยมคาร์ไบด์ขณะเผาผนึก เป็นผลทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่เกิดรูพรุนภายในโครงสร้างและมีความหนาแน่นสูง (Kim และ Lee, 1989)

4.6.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานผ่านการเผาผนึก

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง EDS แสดงในรูปที่ 4.29 พบว่าประกอบด้วยธาตุอะลูมิเนียม(Al), ธาตุไททานเนียม(Ti), ธาตุออกซิเจน(O), ธาตุคาร์บอน(C), ธาตุเซอร์โคเนียม(Zr)



รูปที่ 4.29 แสดงรูปแบบพีค EDS ของชิ้นงานผ่านการเผาผนึก

4.6.2 ผลของอัตราความร้อนในการเผาผนึกต่อสมบัติชิ้นงานก่อนการ HIP

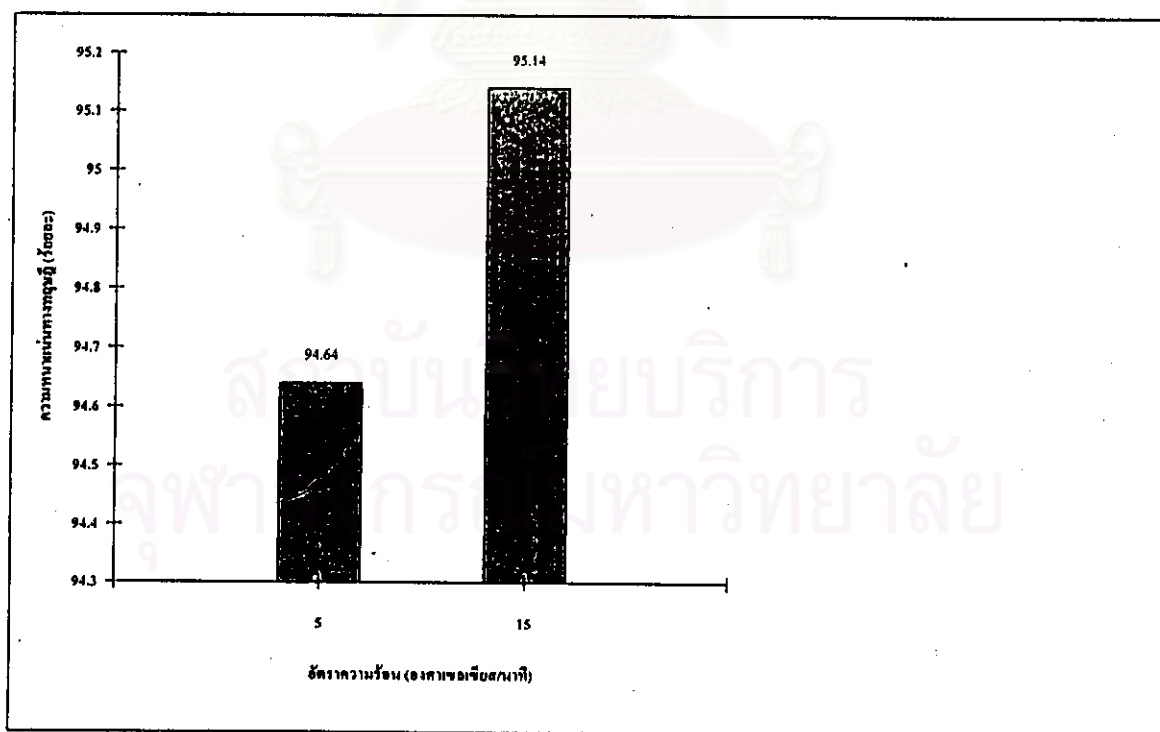
ผลของอัตราการให้ความร้อนในการเผาผนึกนั้นมีผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงาน เนื่องจากการเผาผนึกวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททานเนียมคาร์ไบด์ สามารถทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นเฟสของแก๊ส Al_2O และ CO ทำให้ชิ้นงานมีรูพรุนเกิดขึ้นรอบๆอนุภาคไททานเนียมคาร์ไบด์ มีผลกระทบต่อความหนาแน่นของชิ้นงาน ดังนั้นการใช้อัตราความร้อนสูงจะสามารถระงับไม่ให้เกิดแก๊สเฟสได้ (Song และ You, 1989)

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอัตราความร้อน พบว่าอัตราความร้อน 5 องศาเซลเซียส/นาทีก จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าอัตราความร้อน 15 องศาเซลเซียส/นาทีก ดังแสดงในตารางที่ 4.10, รูปที่ 4.30 และ รูปที่ 4.31

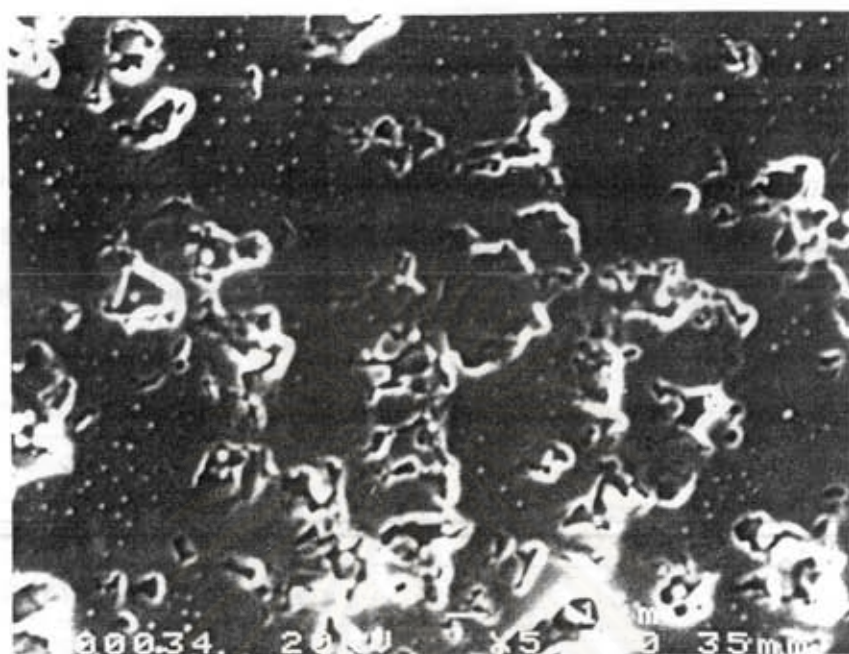
ตารางที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับอัตราความร้อนในการเผาผลาญ

| อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา(นาทีก) | อัตราความร้อน (องศาเซลเซียส/นาทีก) | ความหนาแน่นทางทฤษฎี* (ร้อยละ) |
|----------------------------|-------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| 1900 | 120 | 5 | 94.64 |
| 1900 | 120 | 15 | 95.14 |

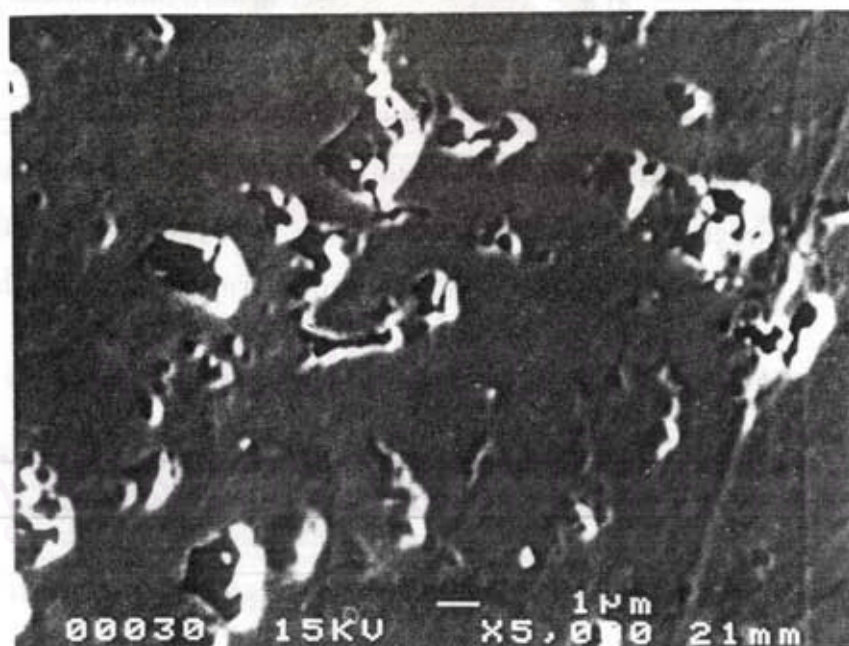
* ค่าเฉลี่ยจากการวัด จำนวน 3 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับอัตราความร้อนในการเผาผลาญชิ้นงานก่อนการ HIP



(ก) อัตราความร้อน 5 องศาเซลเซียส/นาทึ



(ข) อัตราความร้อน 15 องศาเซลเซียส/นาทึ

รูปที่ 4.31 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชิ้นงานก่อนการ HIP ที่อุณหภูมิ 1900 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที บรรยากาศแก๊สอาร์กอนที่อัตราความร้อนต่างๆกัน

4.6.3 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานเผาผนึกก่อนการ HIP

จากการเผาผนึกชิ้นงานก่อนการ HIP ที่อุณหภูมิ 1900 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที อัตราความร้อน 15 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศแก๊สอาร์กอน มาทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ค่าแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเผาผนึกก่อนการ HIP

| สมบัติ | ค่าที่วัดได้ |
|--|--------------|
| ความหนาแน่นทางทฤษฎี(ร้อยละ) | 95.14 |
| ความหนาแน่นจริง(กรัม/ลบ.ซม.) | 4.05 |
| ความทนต่อการคัดโค้ง(เมกกะปาสกาล) | 244.818 |
| ค่ายังโมดูลัส(จิกะปาสกาล) | 234.580 |
| ความแข็งวิกเกอร์(จิกะปาสกาล) | 19.711 |
| ความเหนียว(เมกกะปาสกาล.เมตร ^{1/2}) | 6.18 |

ความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกมีค่ามากกว่าร้อยละ 95 ของ ความหนาแน่นทางทฤษฎี สามารถที่จะเพิ่มความหนาแน่นของชิ้นงานให้ได้ใกล้เคียงกับความหนาแน่นทางทฤษฎีและเพิ่มสมบัติเชิงกลได้ โดยการนำชิ้นงานไปผ่านการอัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการ HIP โดยไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการห่อหุ้มชิ้นงาน(Encapsulation)

4.7 ผลของอุณหภูมิ ความดัน เวลา ของการ HIP ต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์

4.7.1 ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิของการ HIP ต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์

4.7.1.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์

การกำหนดภาวะการทดลองที่มีค่าตัวแปรของอุณหภูมิของการ HIP เป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลองที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 3.3.1

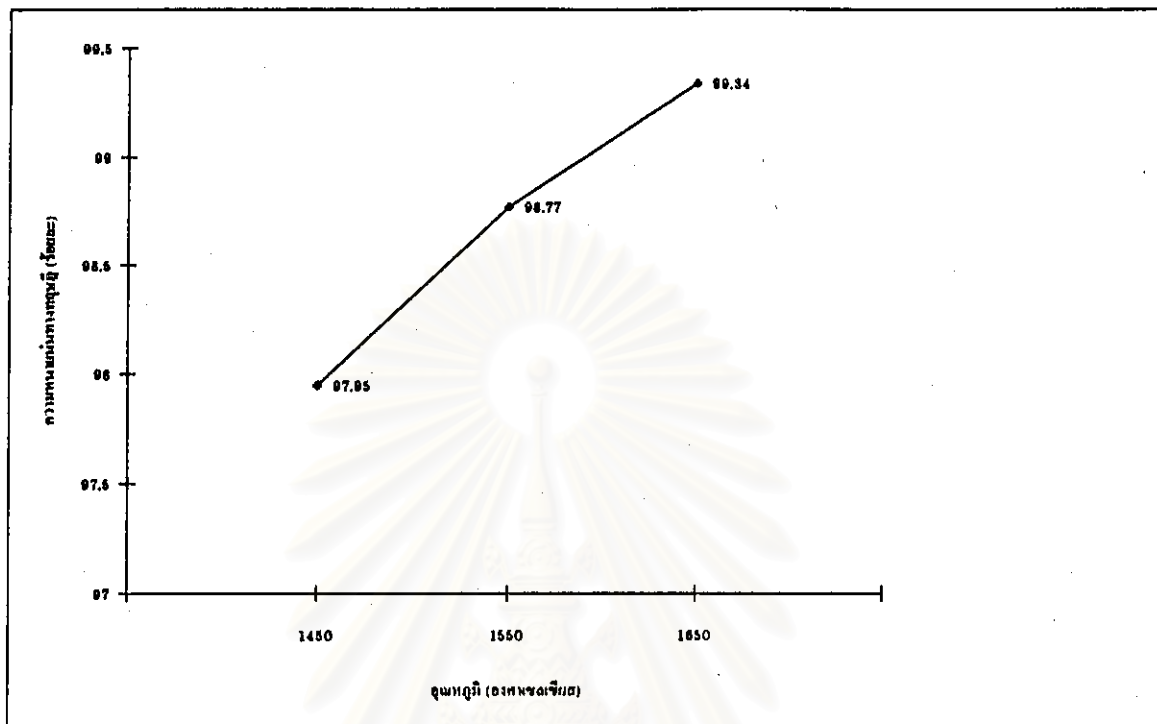
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิต่างๆ ของชิ้นงาน HIP

| อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | ความหนาแน่นทางทฤษฎี* (ร้อยละ) |
|----------------------------|----------------------------------|
| 1450 | 97.95 |
| 1550 | 98.77 |
| 1650 | 99.34 |

* ค่าเฉลี่ยจากการวัด จำนวน 3 ตัวอย่าง

จากตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.31 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการ HIP สูงขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 97.95 เป็นร้อยละ 98.77 และ ร้อยละ 99.34 ของความหนาแน่นทางทฤษฎี ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 1450, 1550 และ 1650 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

การเกิดความหนาแน่นภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ สามารถอธิบายได้จากแบบจำลองการเกิดความหนาแน่นไว้เป็น 2 ระยะ คือระยะที่ 1 ความหนาแน่นทางทฤษฎีจะน้อยกว่า 0.9 ($D < 0.9$) ซึ่งความหนาแน่นจะเกิดจากการครากแบบพลาสติก (Plastic yielding) ซึ่งจะเกิดการโตของคอคอด(necks)เมื่ออนุภาคสัมผัสกันเนื่องจากการให้ความดันเข้าไปทำให้เพิ่มจำนวนจุดสัมผัสกันของอนุภาค และ ระยะที่ 2 จะมีความหนาแน่นทางทฤษฎีมากกว่า 0.9 ($0.9 < D < 1$) ซึ่งจะเกิดกระบวนการแพร่ซึมเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่มีค่าสูงมากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้สูงขึ้นจนอนุภาคเกิดการเปลี่ยนรูปร่างจากกลมกลายเป็นรูปทรงที่มีหน้าหลายหน้า (Polyhedron) และ รูปทรงแปดหน้าอย่างสมมาตรก็จะกลายเป็นรูปทรง Tetrakaidecahedron มีรูกลมอยู่บริเวณมุมทั้ง 24 มุม (Helle และ คณะ, 1985)



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิตกับความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงาน HIP

4.7.1.2 ผลการศึกษาอุณหภูมิต่อความแข็งและความเหนียวของชิ้นงาน HIP

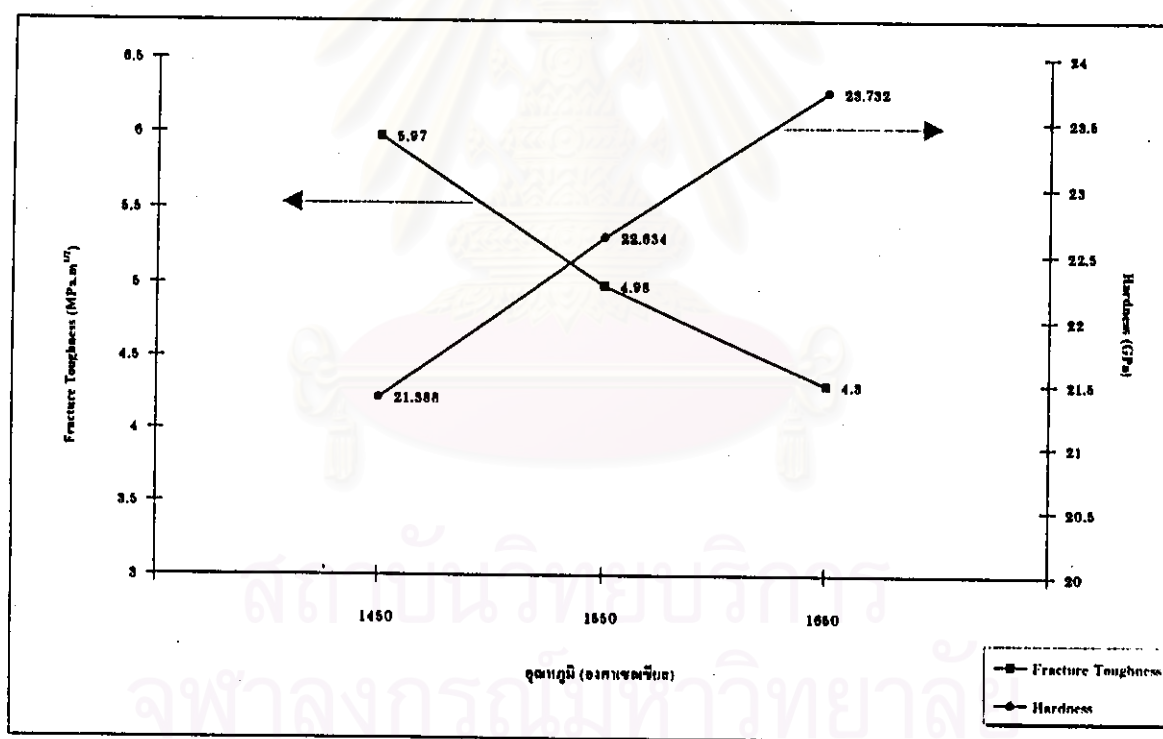
ค่าความแข็งและความเหนียวมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคเนื่องจากการให้อุณหภูมิ ทำให้ขนาดของเกรนเปลี่ยนไป ค่าความเหนียวก็จะเปลี่ยนไปเช่นกัน สำหรับชิ้นงานที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าร้อยละ 97 ของความหนาแน่นทางทฤษฎี ความแข็งและความเหนียวจะขึ้นอยู่กับจำนวนของรูพรุนแต่ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นมากกว่าร้อยละ 97 ของความหนาแน่นทางทฤษฎี ความแข็งและความเหนียวจะขึ้นอยู่กับขนาดของเกรน หากเกรนมีขนาดใหญ่จะมีผลทำให้ความเหนียวลดลง (Song และ You, 1989)

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความแข็งและความเหนียวที่อุณหภูมิต่างๆของชิ้นงานHIP

| อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | ความแข็ง (จิกะปาสคาล) | ความเหนียว (เมกกะปาสคาล.เมตร ^{1/2}) |
|----------------------------|--------------------------|--|
| 1450 | 21.388 | 5.97 |
| 1550 | 22.643 | 4.98 |
| 1650 | 23.732 | 4.30 |

หมายเหตุ : ทดสอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

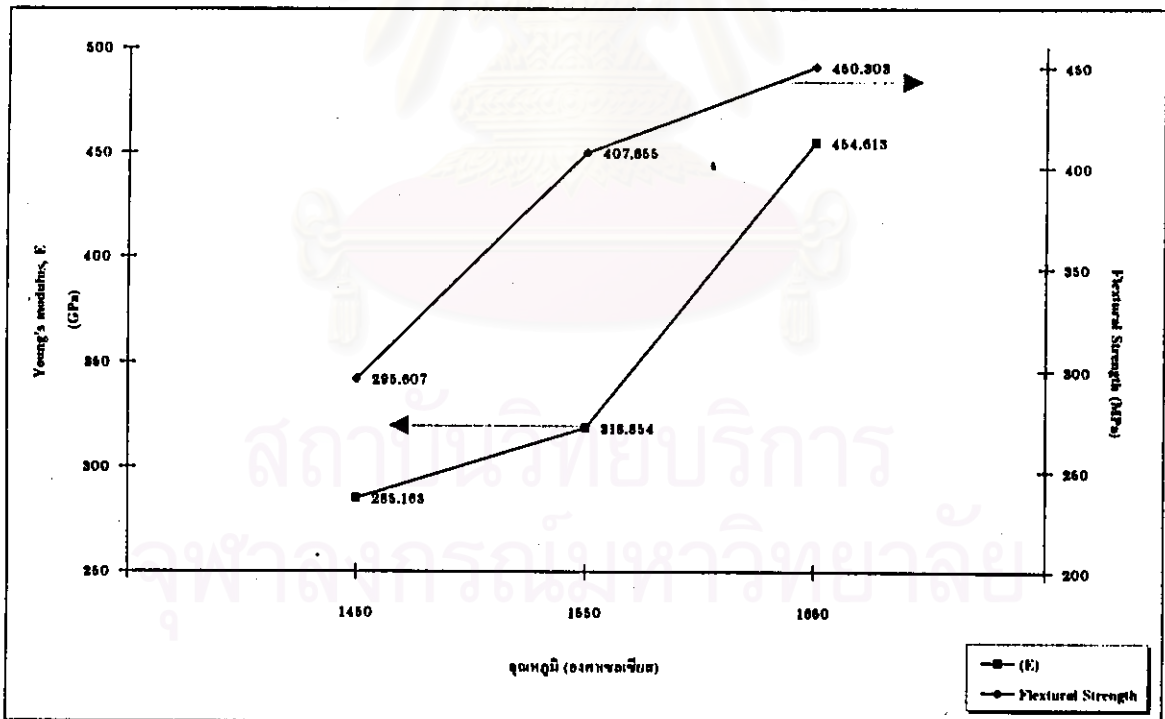
จากผลการทดสอบค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์และความเหนียวด้วยเทคนิคอินเดนทีเทชัน (Indentation) ซึ่งทดสอบที่อุณหภูมิห้องจากตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.32 พบว่าความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิโดยค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นจาก 21.388 เมกกะปาสกาล เป็น 22.643 เมกกะปาสกาล และ 23.732 เมกกะปาสกาล ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 1450, 1550 และ 1650 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนความเหนียวพบว่ามีความเหนียวลดลงตรงกันข้ามกับอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยค่าความเหนียวลดลงจาก 5.97 เมกกะปาสกาล.เมตร^{1/2} เป็น 4.98 และ 4.30 เมกกะปาสกาล.เมตร^{1/2} ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 1450, 1550 และ 1650 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความแข็งแรงและความเหนียวของชิ้นงาน HIP

4.7.1.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิต่อค่าความทนต่อการดัดโค้ง (Flexural Strength) และ ค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus, E)

จากผลการทดสอบค่าความทนต่อการดัดโค้งและค่าโมดูลัสของยัง โดยใช้การทดสอบแบบ 3-Point bending ซึ่งทดสอบที่อุณหภูมิห้อง จากตารางที่ 4.14 และกราฟรูปที่ 4.33 พบว่าค่าความทนต่อการดัดโค้งและค่าโมดูลัสของยัง มีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทำให้เห็นอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกอย่างชัดเจนโดยความทนต่อการดัดโค้งเพิ่มขึ้น จาก 295.607 เมกกะปาสกาล เป็น 407.655 และ 450.303 เมกกะปาสกาล ตามลำดับ เมื่อใช้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 1450, 1550 และ 1650 องศาเซลเซียสตามลำดับ ส่วนค่าโมดูลัสของยัง เพิ่มขึ้นจาก 285.163 เมกกะปาสกาล เป็น 318.854 และ 454.613 เมกกะปาสกาลตามลำดับ เมื่อใช้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 1450, 1550 และ 1650 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อค่าความทนต่อการดัดโค้งและค่าโมดูลัสของยังของชิ้นงาน HIP

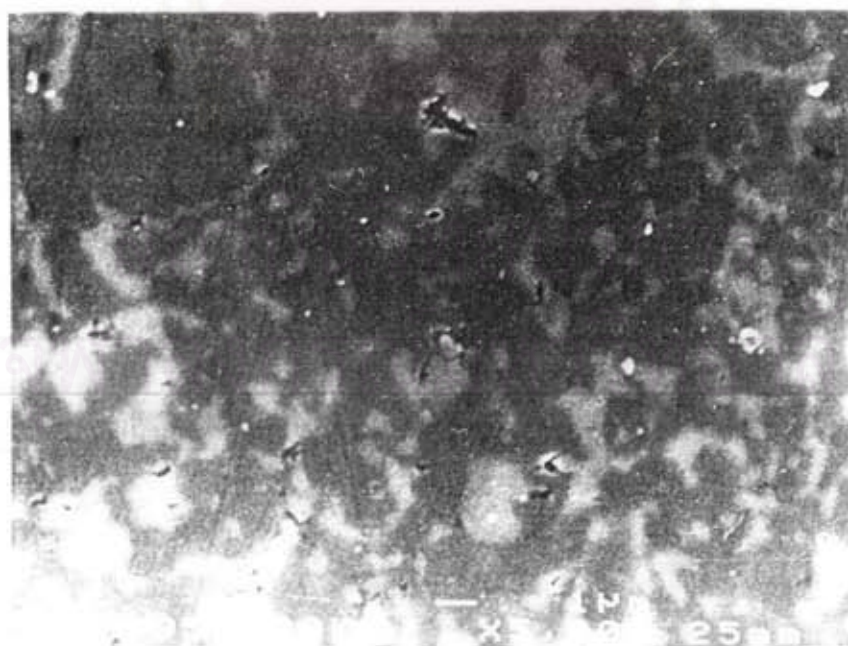
ตารางที่ 4.14 แสดงค่าความทนต่อการดัดโค้งและค่าโมดูลัสของยังที่อุณหภูมิต่างๆของชิ้นงาน HIP

| อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส) | ความทนต่อการดัดโค้ง (เมกกะปาสกาล) | ค่าโมดูลัสของยัง (จิกะปาสกาล) |
|------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 1450 | 295.607 | 285.163 |
| 1550 | 407.655 | 318.854 |
| 1650 | 450.303 | 454.613 |

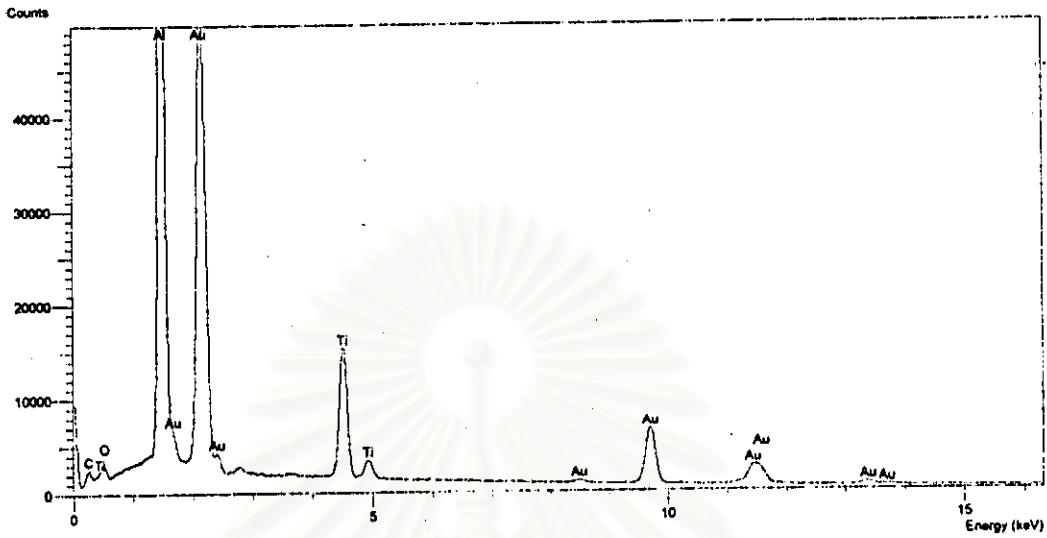
หมายเหตุ : ทดสอบซ้ำจำนวน 3 ตัวอย่าง

4.7.1.4 ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและเฟส

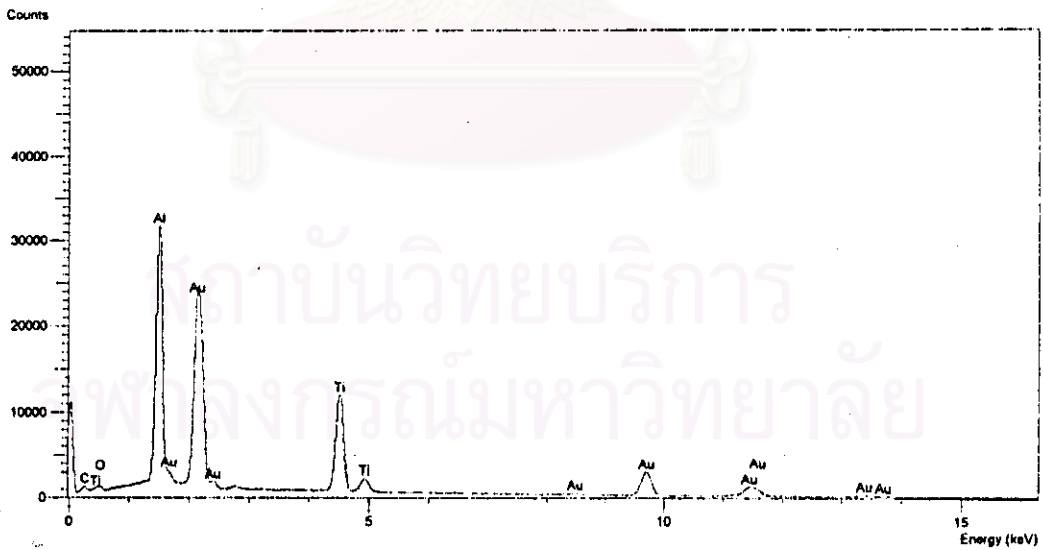
จากการศึกษาลักษณะผิวของชิ้นงานที่ผ่านการขัดเงาด้วยผงขัดเพชรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อตรวจดูเฟสที่เกิดขึ้นจากรูปที่ 4.34 ลักษณะทั่วไปพบว่าจะประกอบด้วย 2 เฟส คือบริเวณที่เป็นพื้นที่สีดำ ซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ ส่วนเฟสที่สองคือ บริเวณที่เป็นสีขาว สามารถทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจดูเฟสได้โดยการใช้เครื่อง EDS ตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีแบบเฉพาะจุดของแต่ละเฟส พบว่าบริเวณที่เป็นสีดำจะเป็นเฟสของอะลูมินา ส่วนบริเวณที่เป็นสีขาวจะเป็นเฟสของไททานเนียมคาร์ไบด์ แสดงรูปแบบพิกในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.34 แสดงภาพถ่ายลักษณะผิวของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งผ่านการ HIP ที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส ความดัน 1600 กิโลกรัม/ตร.ซม. เวลา 60 นาที



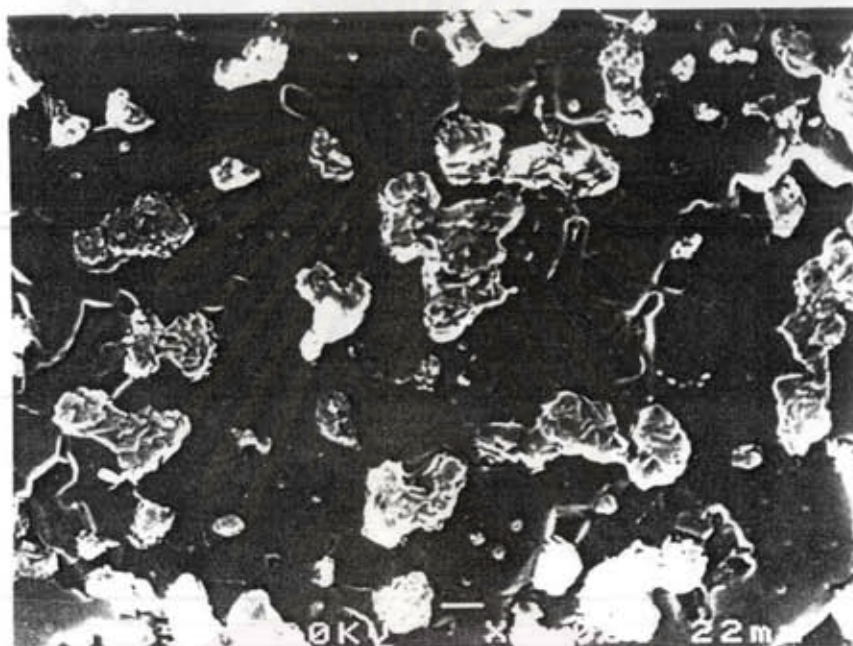
(ก) รูปแบบพีด EDS ของเฟสอะลูมินา (บริเวณสีดำ)



(ข) รูปแบบพีด EDS ของเฟสไททาเนียมคาร์ไบด์ (บริเวณสีขาว)

รูปที่ 4.35 แสดงรูปแบบพีด EDS ที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงาน
ที่ผ่านการ HIP

และเมื่อนำชิ้นงาน HIP ที่ผ่านการขัดเงาผิวด้วยผงขัดเพชร มาทำการกัดผิวด้วยสารเคมีและความร้อน(ตามข้อ ง. หัวข้อที่ 3.3.4.1 ของบทที่ 3) แล้วถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในรูปที่ 4.36 สามารถมองเห็นเฟสของไททาเนียมคาร์ไบด์สูงขึ้นมาอยู่บนเฟสของอะลูมินาได้อย่างชัดเจน

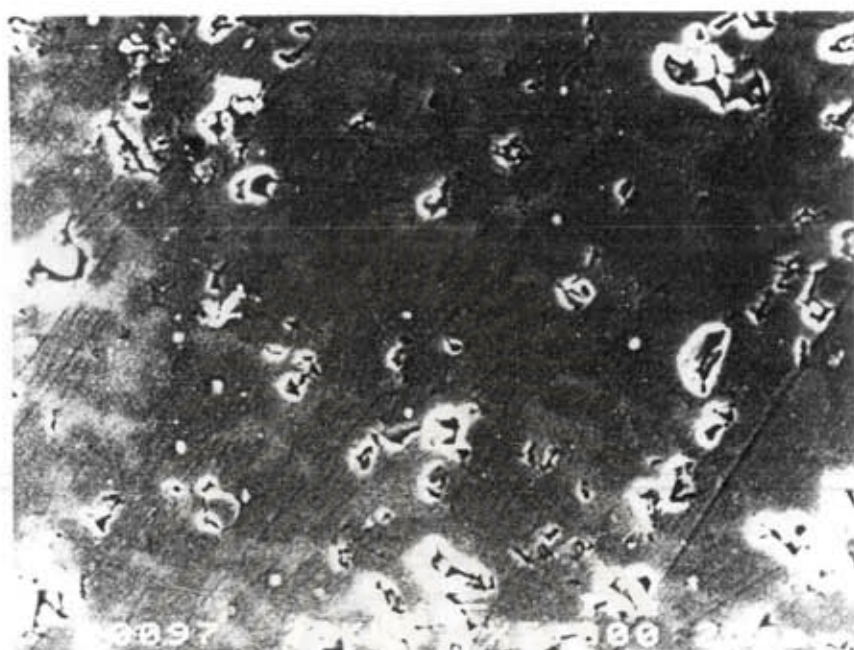


รูปที่ 4.36 แสดงภาพถ่ายลักษณะผิวของชิ้นงาน ที่ผ่านการกัดผิวด้วยสารเคมีและความร้อนจากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานซึ่งผ่านการHIPที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส ความดัน 1600 กิโลกรัม/ตร.ซม. เวลา 60 นาที

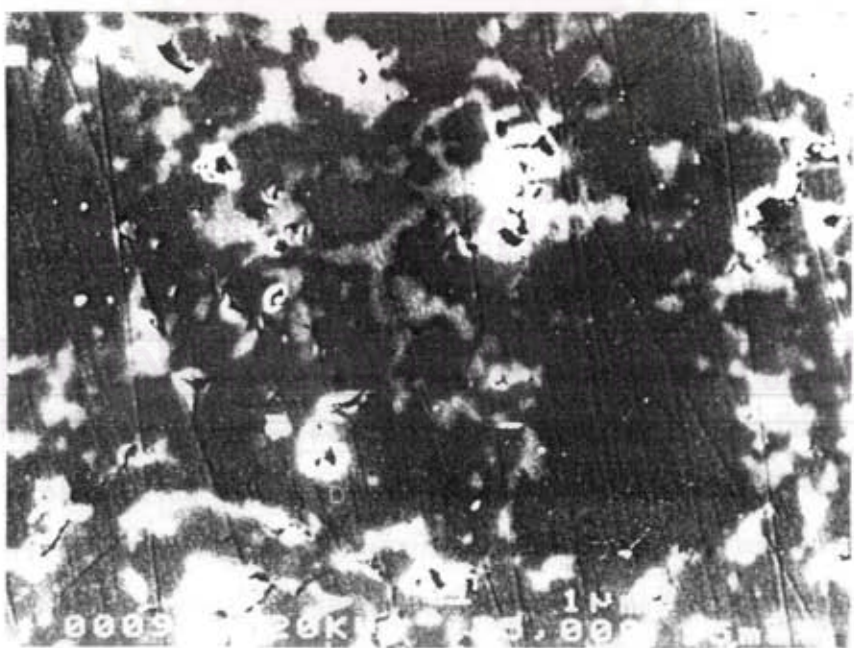
สถาบันวิทยบริการ

จากการตรวจดูรูพรุนของชิ้นงานHIPที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงรูปที่ 4.37 พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการ HIP ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส จะมีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่และจำนวนมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการ HIP ที่อุณหภูมิ 1550 และ 1650 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการ HIP จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของชิ้นงาน

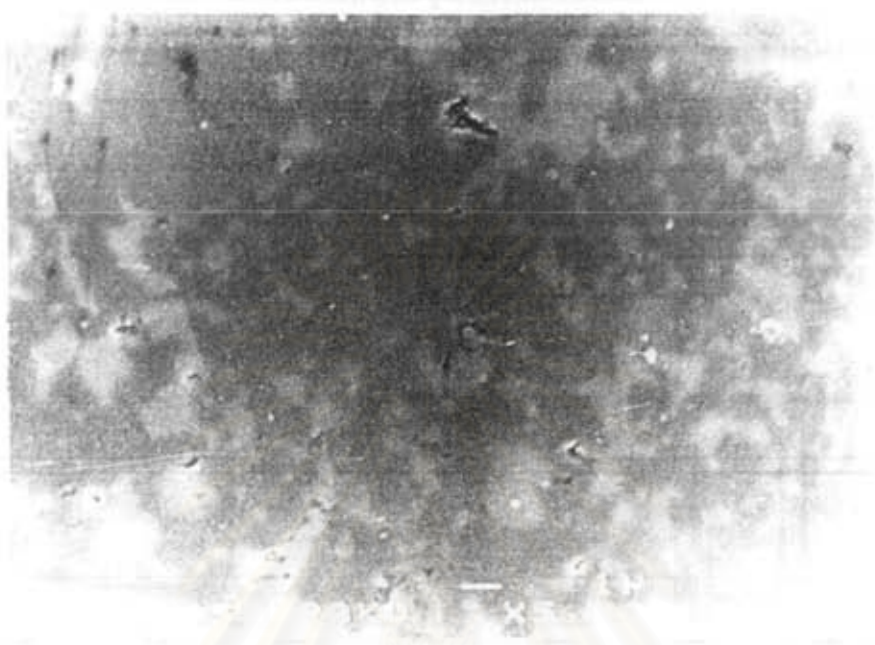
การมีรูพรุนหลงเหลือในชิ้นงานเป็นผลเนื่องมาจากการเผาผลาญแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์ จะมีเฟสของแก๊ส Al_2O_3 และ CO เกิดขึ้นและจะอยู่รอบของอนุภาคไททาเนียมคาร์ไบด์ และหลงเหลือเป็นรูพรุนอยู่ในชิ้นงาน (Song และ You, 1989)



(ก) อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส



(ข) อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส



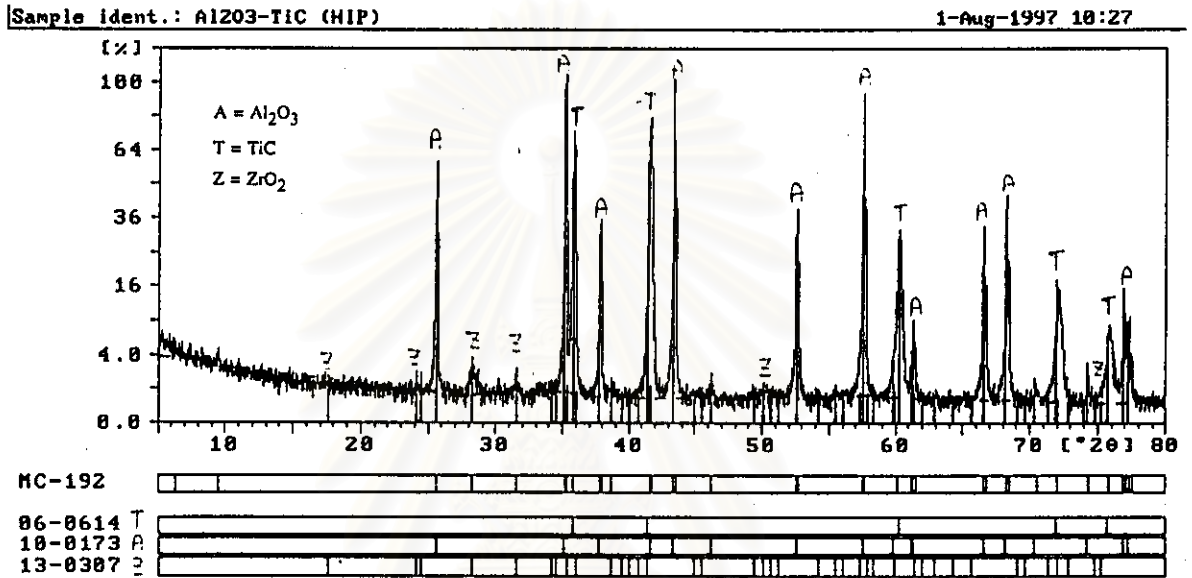
(ค) อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.37 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ผ่านการ HIP ที่ ความดัน 1600 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตรเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ

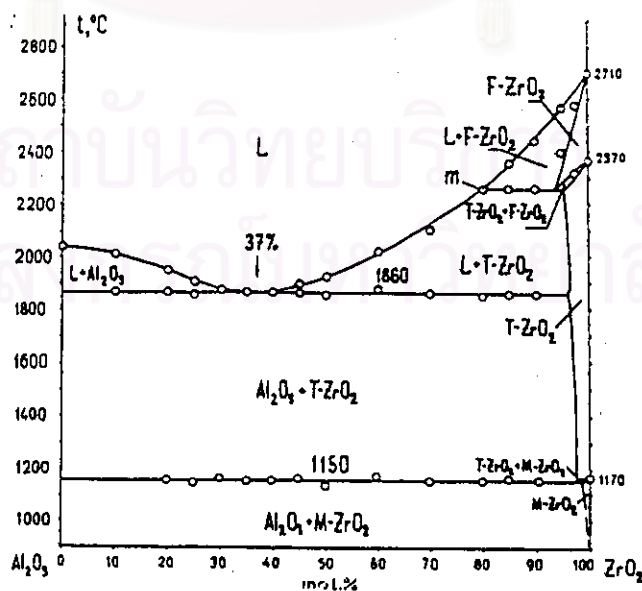
4.7.1.5 ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อเฟส

ผลการวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นงาน โดยตรวจสอบจากรูปแบบพีค XRD ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.38 ซึ่งเป็นของชิ้นงานที่ผ่านการ HIP ที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส พบว่ามีเฟสอัลฟาอะลูมินา ซึ่งมีผลึกเป็นรอมโบฮีดรอลตาม Pattern 10-0173 เฟสไททานเนียมคาร์ไบด์ มีผลึกเป็นคิวบิกตาม Pattern 06-0614 และเฟสเซอร์โคเนียมออกไซด์ตาม Pattern 13-0307 ซึ่งมีผลึกเป็นแบบโมโนคลินิกตามเฟสไดอะแกรมของอะลูมินา-เซอร์โคเนียมออกไซด์ ($Al_2O_3-ZrO_2$) แสดงรูปที่ 4.39 เมื่อใช้เซอร์โคเนียมออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก เมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 1650 องศาเซลเซียสตามสภาวะการทดลอง จะได้เฟสของอะลูมินา + เตตระโกนอลเซอร์โคเนียมออกไซด์ ($Al_2O_3+T-ZrO_2$) และเมื่อปล่อยให้ตัวลงมา

ตามธรรมชาติก็จะเกิดการเปลี่ยนเฟสมาเป็นอะลูมินา+โมโนคลินิกเซอร์โคเนียออกไซด์ ($Al_2O_3+M-ZrO_2$) ที่อุณหภูมิห้องซึ่งตรงกับรูปแบบพิก XRD ของผงแกรนูล แสดงในรูปที่ 4.17 และตรงกับรูปแบบพิก XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการ HIP แสดงรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 แสดงรูปแบบพิก XRD ของชิ้นงานผ่านการ HIP ที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส ความดัน 1600 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เวลา 60 นาที

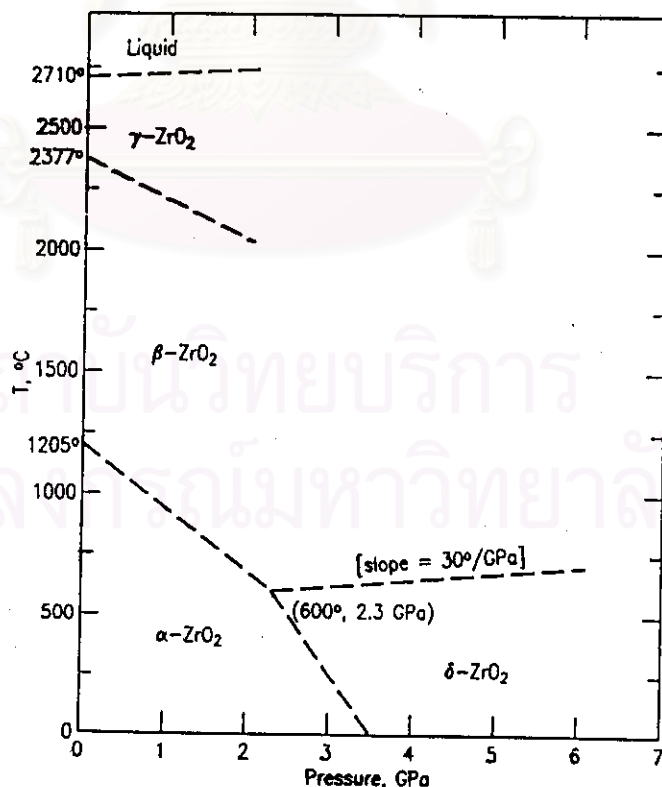


รูปที่ 4.39 แสดงเฟสไดอะแกรมของอะลูมินา-เซอร์โคเนียออกไซด์ ($Al_2O_3-ZrO_2$)

(Sergij และ Lidia, 1997)

เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบพิก XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกแสดงในรูปที่ 4.27 กับรูปแบบพิก XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการ HIP แสดงในรูปที่ 4.38 พบว่ามีเฟสที่เหมือนกันอยู่ 2 เฟส ได้แก่ เฟสอะลูมินา และเฟสไททานเนียมคาร์ไบด์ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนเฟสเซอร์โคเนียมออกไซด์ในรูปแบบพิก XRD ของชิ้นงานเผาผนึกจะเป็น ZrO ส่วนในรูปแบบพิก XRD ของชิ้นงาน HIP จะเป็น ZrO_2 หรือ $\alpha-ZrO_2$ (โมโนคลินิก) เหมือนกับรูปแบบพิก XRD ของผงแกรนูลแสดงในรูปที่ 4.17

กลไกของการเปลี่ยนแปลงเฟสของเซอร์โคเนียมออกไซด์ จากเฟส $\beta-ZrO_2 \rightarrow$ เฟส $\alpha-ZrO_2$ นอกจากอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสแล้ว ยังพบว่า การให้ความดันแก่ชิ้นงานก็มีผลด้วยเช่นกัน (Abriata และ Veraci, 1986) ความดันในที่นี้หมายถึงความดันจากการ HIP การให้ความดันกระทำกับชิ้นงานเท่ากับเป็นการให้พลังงานเข้าไปกระตุ้นเพื่อให้เกิดความเค้น (Stress) แก่ $\beta-ZrO_2$ ที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสกลายเป็น $\alpha-ZrO_2$ ที่อุณหภูมิต่ำหรือเรียกว่าการให้ความเค้นเพื่อทำให้การเปลี่ยนเฟส (Stress-Induced Phase Transformation ดังไดอะแกรมรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 ไดอะแกรมของความดันและอุณหภูมิซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของเซอร์โคเนียมออกไซด์ (Abriata และ Veraci, 1986)

4.7.2 ผลการศึกษาผลของความดันของ HIP ต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์

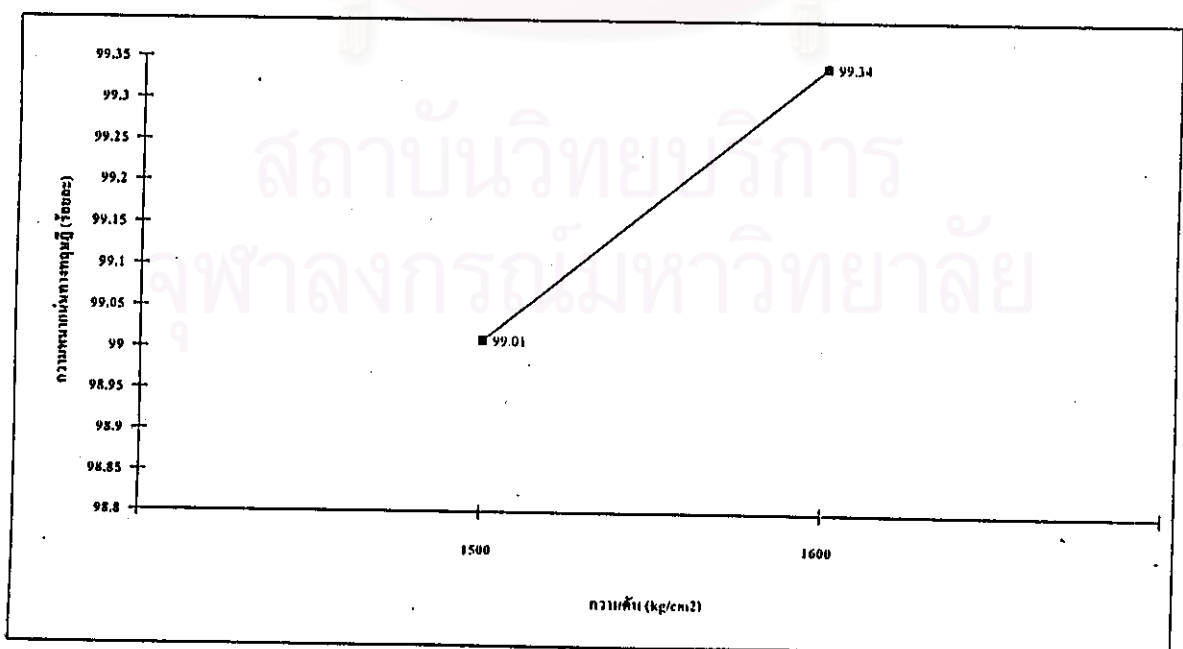
4.7.2.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์

การกำหนดภาวะการทดลองที่มีค่าตัวแปรของความดันของ HIP เป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลองที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 3.3.1 คือทดลองใช้ความดัน 1500, 1600 กิโลกรัม / ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าความหนาแน่นที่ความดันต่าง ๆ ของชิ้นงาน HIP

| ความดัน (กิโลกรัม / ตารางเซนติเมตร) | ความหนาแน่นทางทฤษฎี* (ร้อยละ) |
|--|----------------------------------|
| 1500 | 99.01 |
| 1600 | 99.34 |

* ค่าเฉลี่ยจากการวัด จำนวน 3 ตัวอย่าง



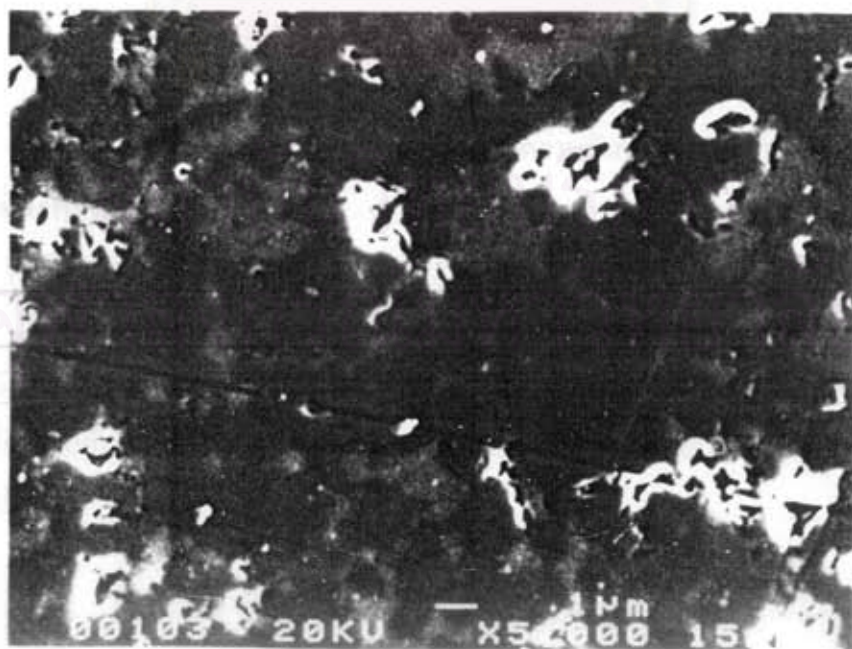
รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันกับความหนาแน่นของชิ้นงาน HIP

จากตารางที่ 4.15 และกราฟรูปที่ 4.41 พบว่าใช้ความดันในการ HIP มากขึ้น ความหนาแน่นก็จะมากขึ้นด้วย โดยความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 99.06 เป็น ร้อยละ 99.34 ของความหนาแน่นทางทฤษฎีที่ความดัน 1500, 1600 กิโลกรัม / ตารางเซนติเมตรตามลำดับ

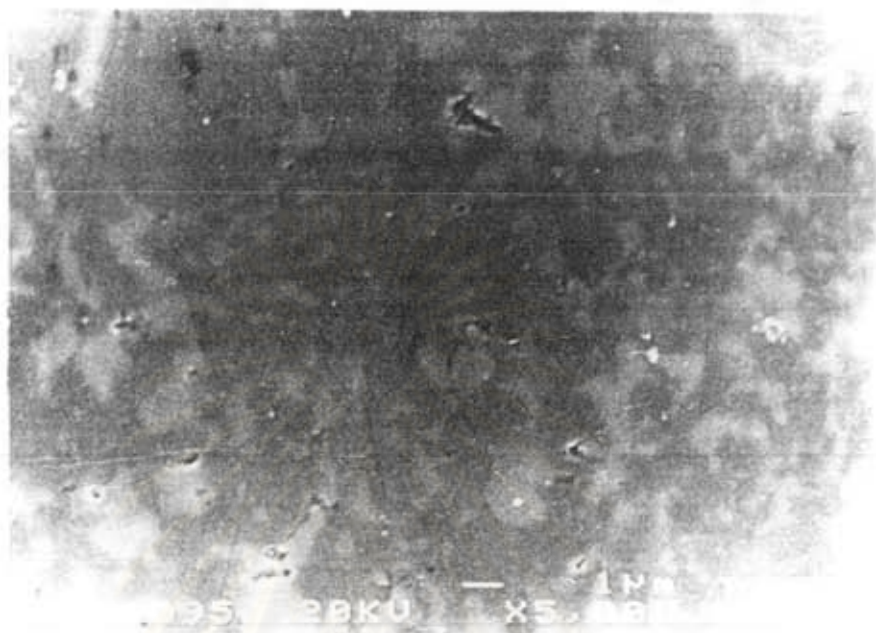
ค่าความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้นตามความดันที่สูงขึ้นเป็นผลเนื่องจากการเกิดความหนาแน่นในภาวะเริ่มต้นจากแบบจำลองการเกิดความหนาแน่นของ Helle จะเกิดการโคของคอกอด (Necks) เมื่ออนุภาคสัมผัสกันและมีความดันจากภายนอกเข้าไป ก็จะทำให้เกิดแรงช่วยให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ดียิ่งขึ้นจนเกิดจำนวนของจุดสัมผัสของอนุภาคมากขึ้น ดังนั้นความดันที่สูงขึ้นอนุภาคเกิดการอัดแน่นตัวได้ดีขึ้น รูพรุนถูกปิดทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูง (Helle และ คณะ, 1985)

4.7.2.2 ผลการศึกษาผลของความดันที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค

จากการถ่ายภาพชิ้นงานที่ผ่านการ HIP ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อดูโครงสร้างจุลภาคและรูพรุน พบว่าที่ความดัน 1500 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร จะมีขนาดรูพรุนใหญ่และมีจำนวนมากกว่าชิ้นงานที่ใช้ความดัน 1600 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตรซึ่งขนาดของรูพรุนจะเล็กและจำนวนน้อยกว่า สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นในหัวข้อที่ 4.7.2.1 ดังแสดงในรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 (ก) ความดัน 1500 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.42 (ข) ความดัน 1600 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

รูปที่ 4.42 แสดงภาพถ่ายโดยสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ผ่านการ HIP ที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ที่ความดันต่างกัน

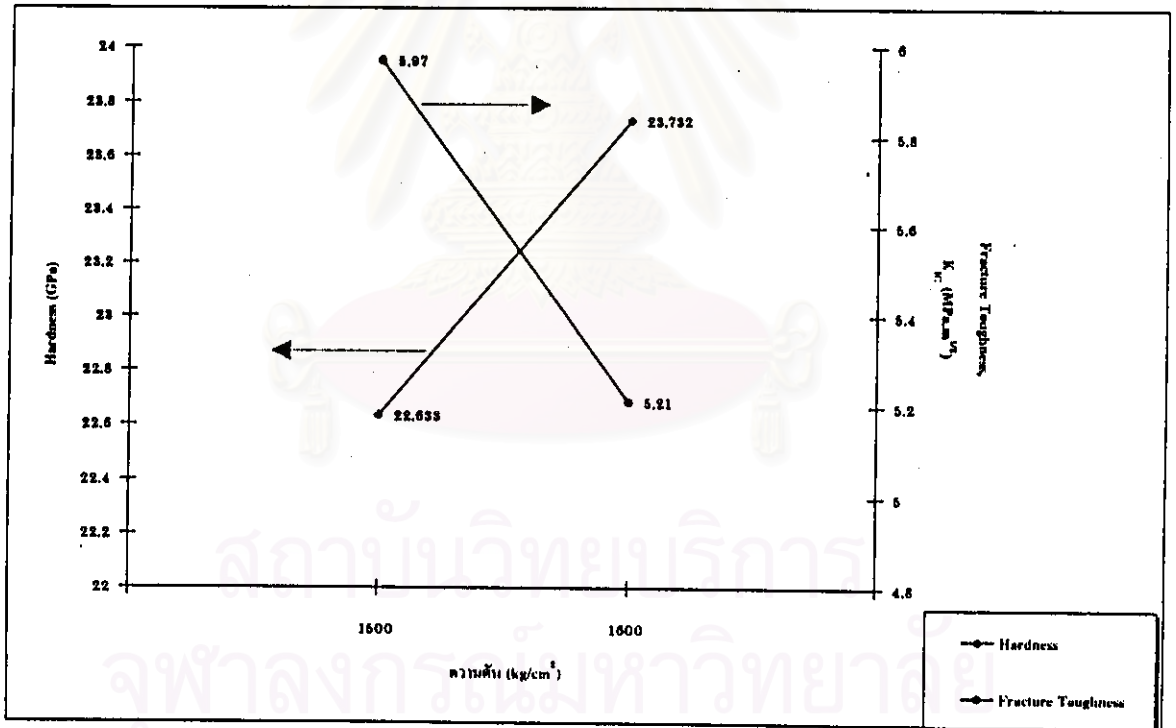
4.7.2.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของความดันที่มีผลต่อ ความแข็ง และ ความเหนียวของชิ้นงาน HIP

จากผลการศึกษาพบว่าถ้าความแข็งจะมากขึ้นตามความดันโดยเพิ่มขึ้นจาก 22.633 เป็น 23.732 จิกะปาสคาล ที่ความดัน 1500, 1600 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ส่วนความเหนียวจะมีค่าลดลง เมื่อความดันสูงขึ้น โดยลดลงจาก 5.97 เป็น 5.21 เมกกะปาสคาล.เมตร^{1/2} แสดงตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.43

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าความแข็งและความเหนียวของชิ้นงาน HIP ที่ความดันต่าง ๆ

| ความดัน (กิโลกรัม / ตารางเซนติเมตร) | ความแข็ง (จิกะปาสคาล) | ความเหนียว (เมกะปาสคาล.เมตร ^{1/2}) |
|--|--------------------------|---|
| 1500 | 22.633 | 5.97 |
| 1600 | 23.732 | 5.21 |

หมายเหตุ : ทดสอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง



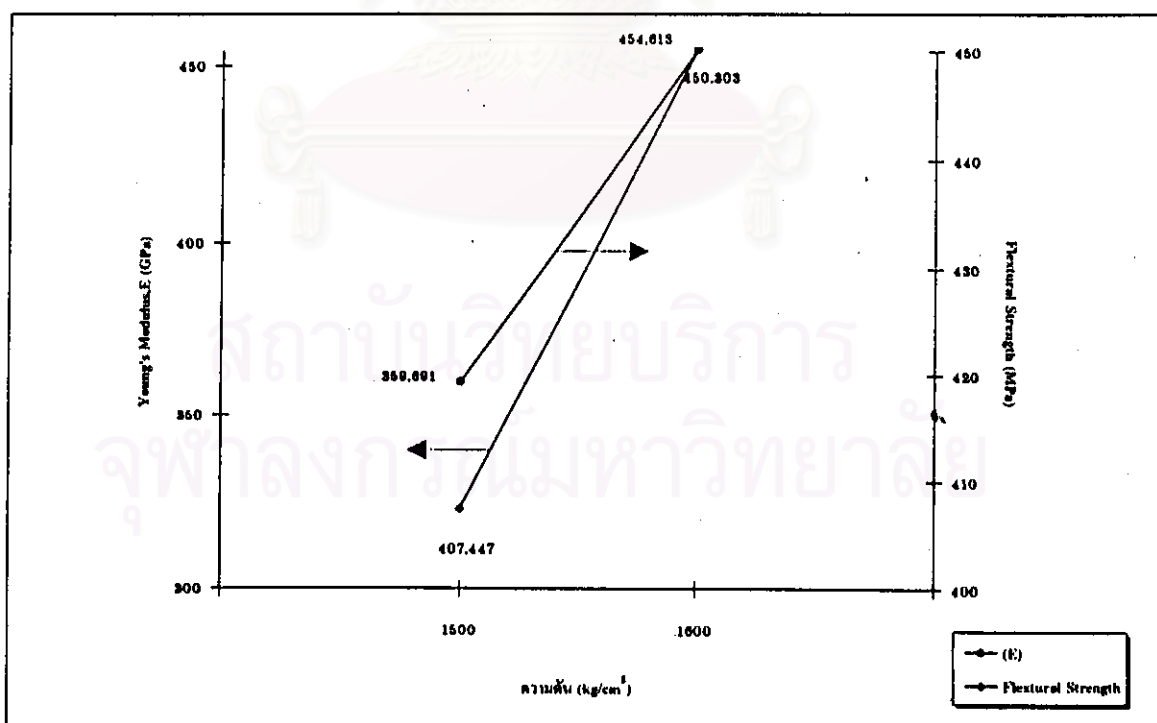
รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันกับความแข็ง และความเหนียวของชิ้นงาน HIP

4.7.2.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของความดันที่มีผลต่อความทนต่อการคดโค้ง และ ค่าโมดูลัสของยังของชิ้นงาน HIP

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าความทนต่อการคดโค้งและค่าโมดูลัสของยัง ของชิ้นงาน HIP ที่ความดันต่าง ๆ

| ความดัน (กิโลกรัม / ตารางเซนติเมตร) | ความทนต่อการคดโค้ง (เมกกะปาสคาล) | ค่าโมดูลัสของยัง (จิกะปาสคาล) |
|--|-------------------------------------|----------------------------------|
| 1500 | 359.691 | 407.447 |
| 1600 | 454.613 | 450.303 |

หมายเหตุ : ทดสอบซ้ำจำนวน 3 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันกับความทนต่อการคดโค้ง และ ค่าโมดูลัสของยัง

พบว่าความทนต่อการคัดโค้งและค่าโมดูลัสของยัง จะสูงตามความดันดังแสดงในตารางที่ 4.17 และกราฟรูปที่ 4.44 เป็นผลเนื่องมาจากการใช้ความดันสูงแบบกระทำกับชิ้นงานเท่ากันทุกทิศทาง (Isostatic Press) ที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกรนมีขนาดเล็ก สมำเสมอ และความหนาแน่นสูง ดังนั้นความดันจึงมีผลทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น (Kolzumi และ Nishihara, 1987)

4.7.3 ผลการศึกษาผลของเวลาเผาแซ้ (Soaking time) ในการ HIP ต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์

4.7.3.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเผาแซ้กับความหนาแน่นของชิ้นงาน HIP

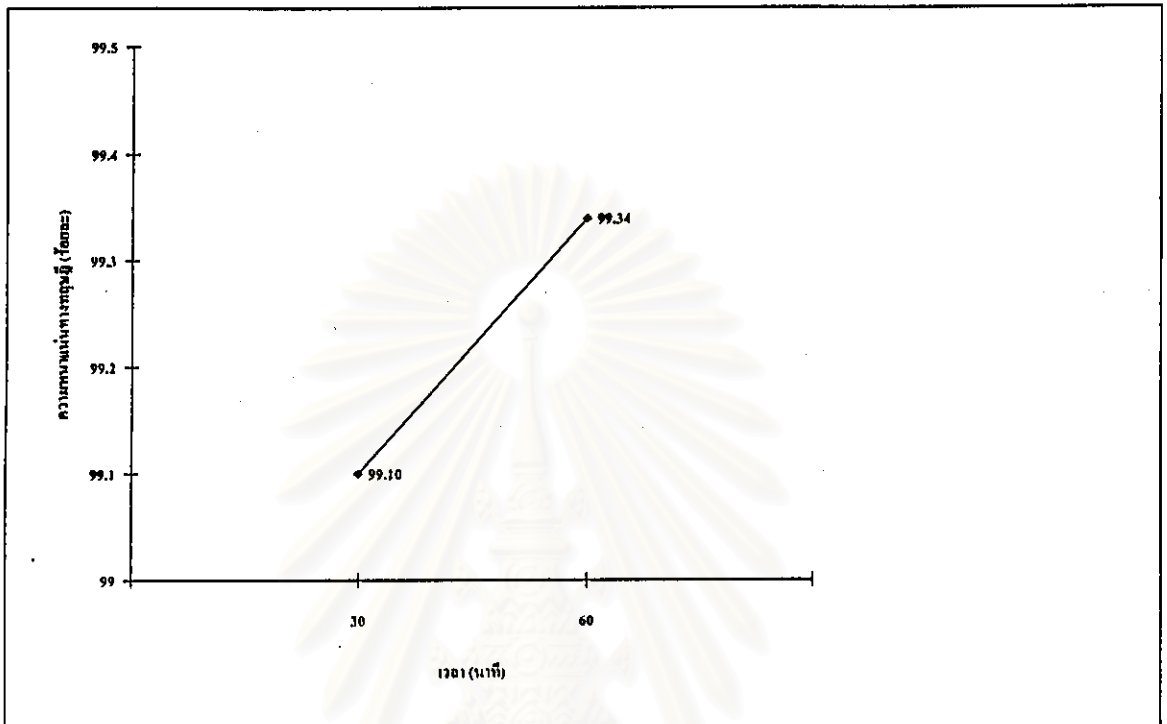
การกำหนดภาวะการทดลองที่มีค่าตัวแปรของเวลาของการ HIP เป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลองที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.3.1 คือทดลองใช้เวลาในการเผาแซ้ 30, 60 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าความหนาแน่นที่เวลาเผาแซ้ต่าง ๆ ของชิ้นงาน HIP

| เวลาเผาแซ้ (นาที) | ความหนาแน่นทางทฤษฎี* (ร้อยละ) |
|-------------------|----------------------------------|
| 30 | 99.10 |
| 60 | 99.34 |

* ค่าเฉลี่ยจากการวัด จำนวน 3 ตัวอย่าง

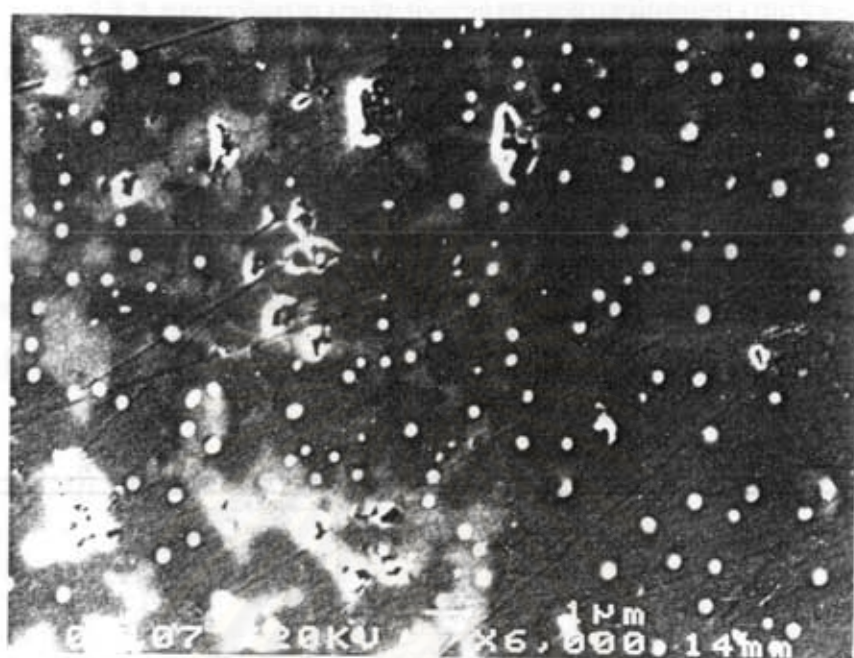
ผลการศึกษาจากตารางที่ 4.18 และกราฟรูปที่ 4.45 พบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มสูงขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการเผาแซ้นานขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจากความหนาแน่นร้อยละ 99.10 เป็น ร้อยละ 99.34 ของความหนาแน่นทางทฤษฎี ซึ่งความแตกต่างมีน้อยมากคือ มีความแตกต่างของความหนาแน่นเพียง ร้อยละ 0.24 ของความหนาแน่นทางทฤษฎี ดังนั้นเวลาจึงไม่มีผลต่อความหนาแน่นมากนัก



รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลาเผาแซ่กับความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงาน HIP

4.7.3.2 ผลการศึกษาผลของเวลาเผาแซ่ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค

จากการถ่ายภาพชิ้นงาน HIP ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อดูโครงสร้างจุลภาคและรูพรุน พบว่า ที่เวลาเผาแซ่ 30 นาที รูพรุนจะมีจำนวนมากกว่าการใช้เวลาเผาแซ่ 60 นาที ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน HIP ในหัวข้อ 4.7.3.1 เป็นผลมาจากการใช้เวลานานขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาของการเผาผนึกเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ ถึงจุดสุกตัวได้ดีกว่าที่ใช้เวลาที่สั้น แสดงในรูปที่ 4.46



(ก) เวลาเผาแช่ 30 นาที



(ข) เวลาเผาแช่ 60 นาที

รูปที่ 4.46 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ผ่านการ HIP ที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส ความดัน 1600 กิโลกรัม /ตารางเซนติเมตร

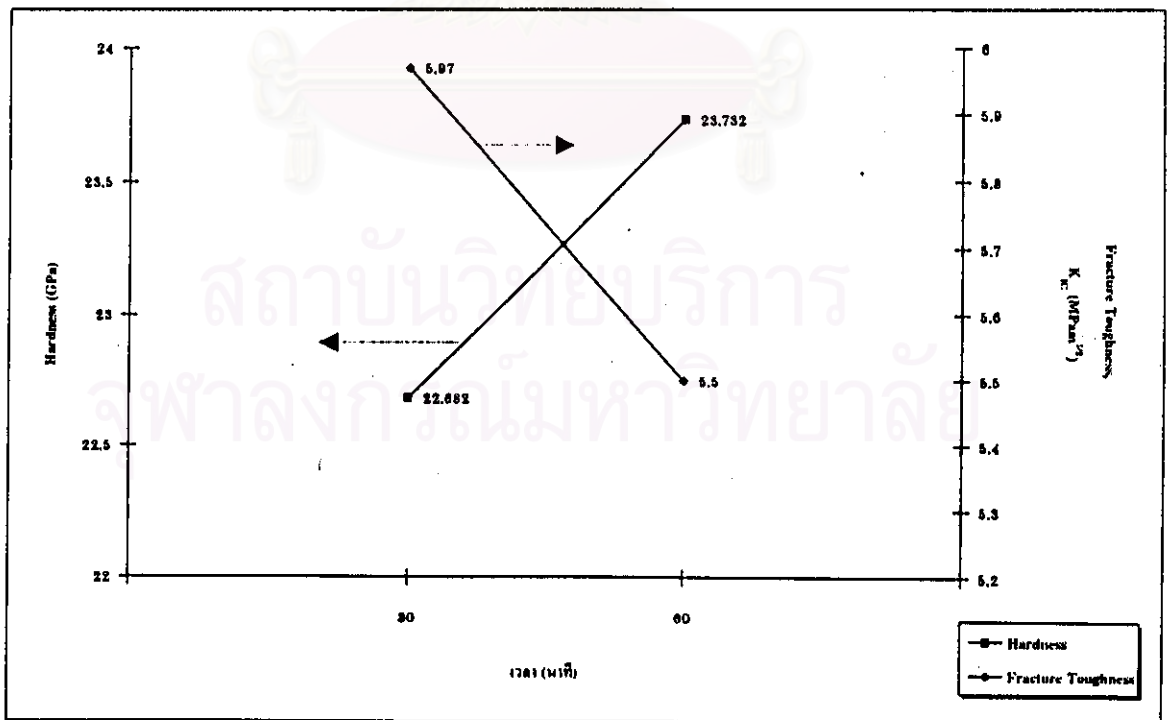
4.7.3.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของความดันที่มีผลต่อความแข็งแรง และ ความเหนียวของชิ้นงาน HIP

จากผลการศึกษาพบว่าค่าความแข็งแรงจะมากขึ้นตามเวลาในการเผาแซ่ที่มากขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 22.682 เป็น 23.732 จิกะปาสคาล ที่เวลา 30, 60 นาทีตามลำดับ ส่วนความเหนียวจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น โดยลดลงจาก 5.97 เป็น 5.50 เมกกะปาสคาล.เมตร^{1/2} แสดงตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.47

ตารางที่ 4.19 แสดงค่าความแข็งแรงและความเหนียวของชิ้นงาน HIP ที่เวลาต่างๆ

| เวลาเผาแซ่ (นาที) | ความแข็งแรง (จิกะปาสคาล) | ความเหนียว (เมกกะปาสคาล.เมตร ^{1/2}) |
|----------------------|-----------------------------|--|
| 30 | 22.682 | 5.97 |
| 60 | 23.732 | 5.50 |

หมายเหตุ : ทดสอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง



รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลากับความแข็งแรงและความเหนียวของชิ้นงาน HIP

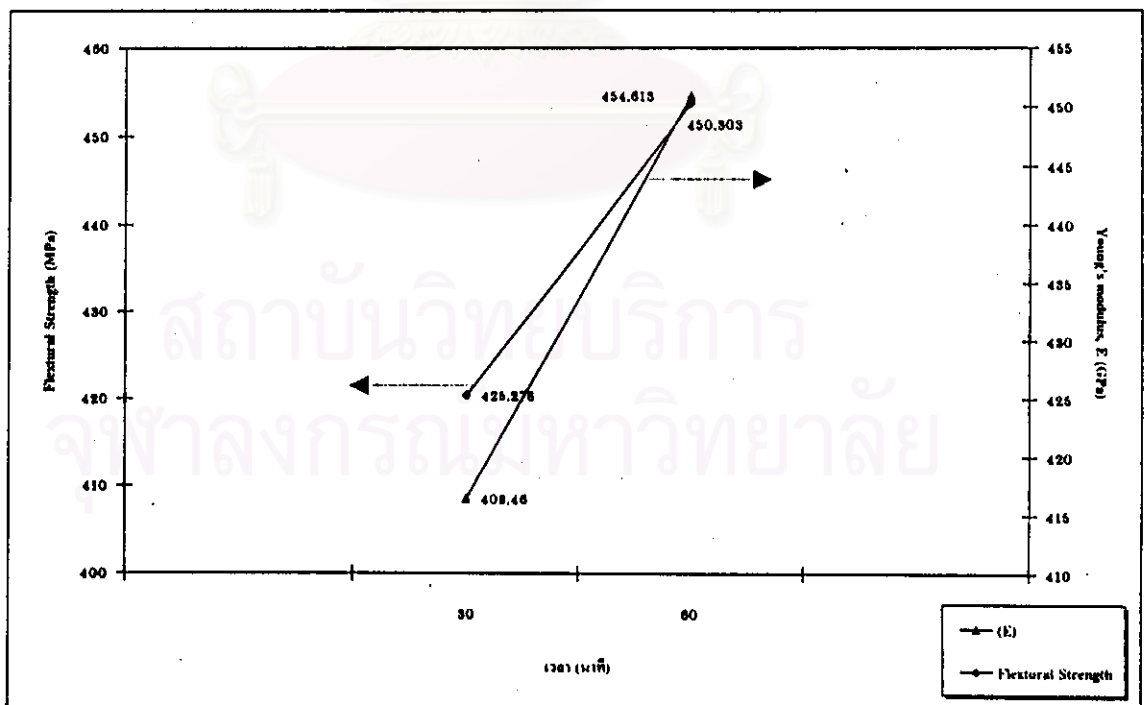
4.7.3.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของเวลาเผาแห้ง กับ ความทนต่อการดัดโค้ง และ ค่าโมดูลัสของยัง

พบว่าค่าความทนต่อการดัดโค้งและค่าโมดูลัสของยัง จะสูงขึ้นตามเวลาที่มากขึ้น โดยค่าความทนต่อการดัดโค้งจะเพิ่มจาก 425.278 เป็น 454.613 เมกกะปาสคาล และค่าโมดูลัสของยัง เพิ่มขึ้นจาก 408.46 เป็น 450.303 จิกะปาสคาลที่เวลา 30, 60 นาที ตามลำดับ แสดงตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.48

ตารางที่ 4.20 แสดงค่าความทนต่อการดัดโค้งและค่าโมดูลัสของยัง ของชิ้นงาน HIP ที่เวลาต่างๆ

| เวลา (นาที) | ความทนต่อการดัดโค้ง (เมกกะปาสคาล) | ค่าโมดูลัสของยัง (จิกะปาสคาล) |
|----------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 30 | 425.278 | 408.46 |
| 60 | 454.613 | 450.303 |

หมายเหตุ : ทดสอบซ้ำจำนวน 3 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลากับความทนต่อการดัดโค้งและค่าโมดูลัสของยัง ของชิ้นงาน HIP

4.8 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างภาวะการทดลองและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์

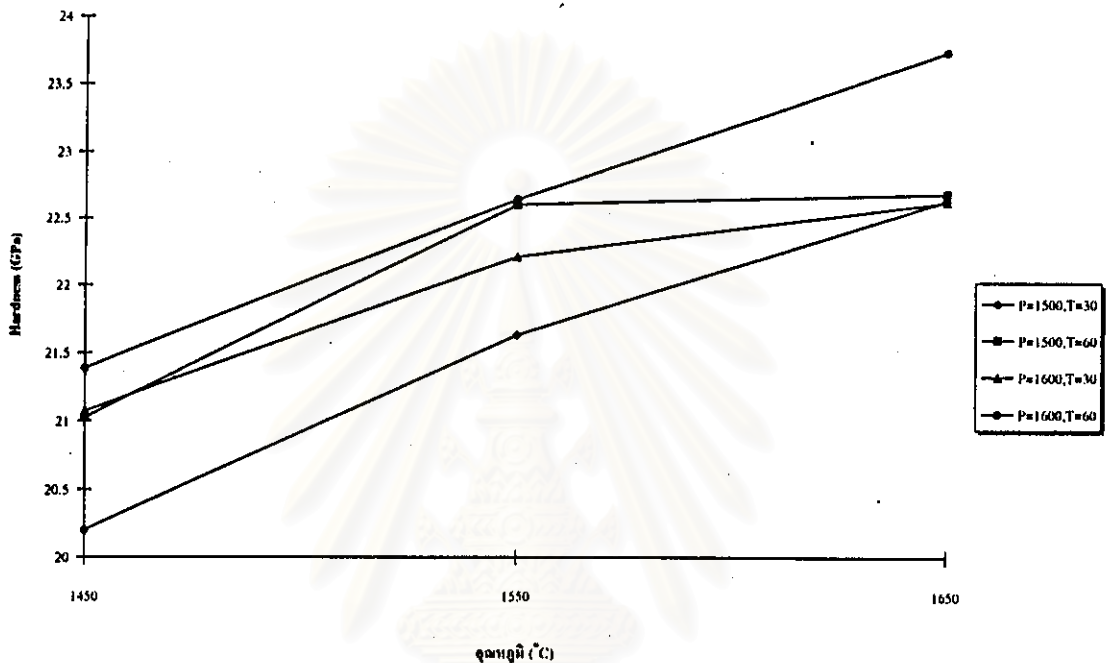
จากการศึกษาความหนาแน่นที่ภาวะการทดลองต่างๆแสดงกราฟรูปที่ 4.49 พบว่าความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการ HIP เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานในการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้สูงขึ้น ขณะเกิดกระบวนการแพร่ซึมและเวลาที่ยาวนานขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีสามารถดำเนินได้อย่างต่อเนื่องนานขึ้นจึงเป็นสาเหตุทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงขึ้น



* P = ความดัน (kg/cm²), T = เวลา (min.)

รูปที่ 4.49 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน HIP ที่ภาวะต่างๆ

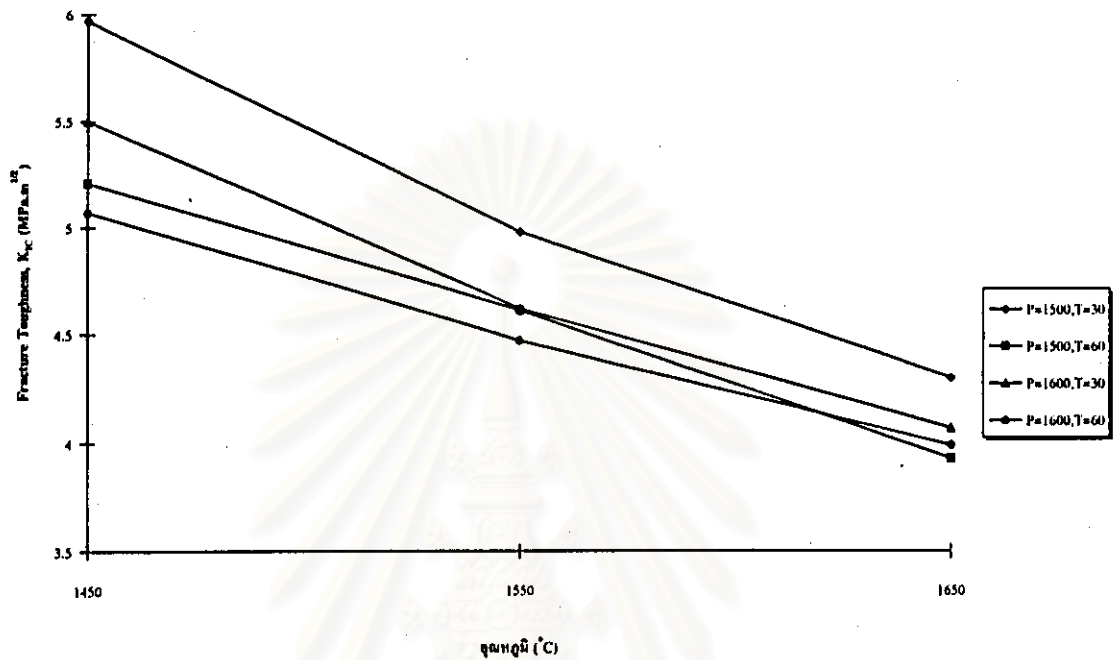
จากการศึกษาความแข็งที่ภาวะการทดลองต่างๆ แสดงกราฟรูปที่ 4.50 พบว่าความแข็งมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น เนื่องจากชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น



* P = ความดัน (kg/cm^2), T = เวลา (min.)

รูปที่ 4.50 กราฟแสดงค่าความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงาน HIP ที่ภาวะต่างๆ

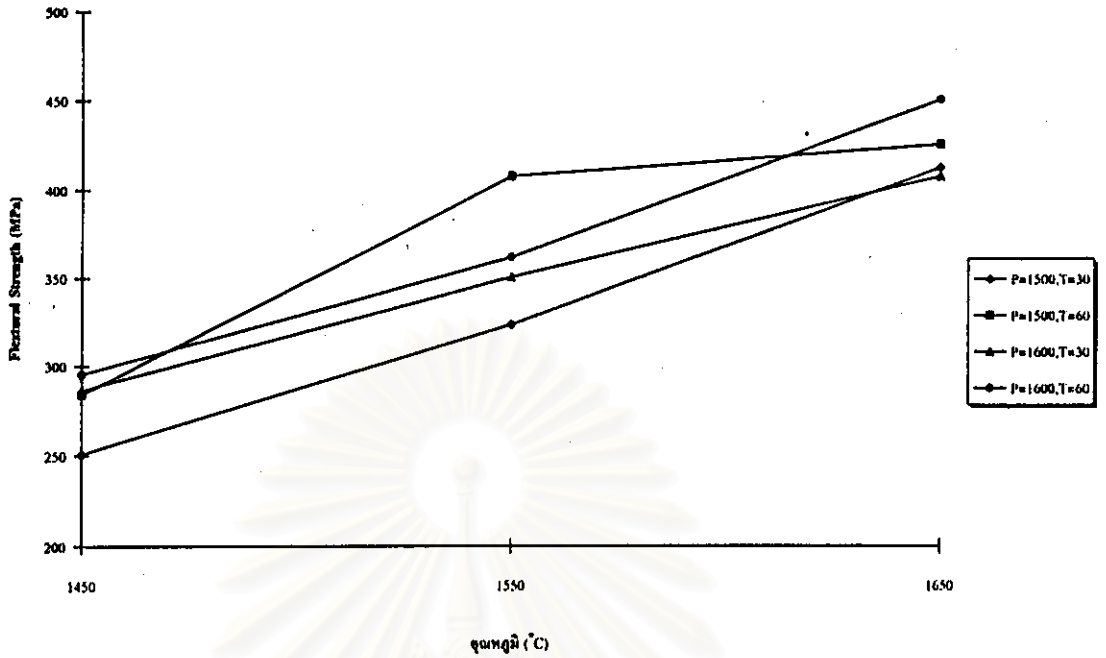
ส่วนความเหนียวพบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงกราฟรูปที่ 4.51 อาจมีผลเนื่องจากชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจำนวนรูพรุนในเนื้อวัสดุมีจำนวนน้อยลง เพราะรูพรุนจะสามารถดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงจากภายนอกมากกระทำกับชิ้นงานทำให้มีความเค้นเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุและความเค้นจะวิ่งไปปะทะกับรูพรุนทำให้พลังงานที่วิ่งมาปะทะกับรูพรุนนั้นลดลงได้ เมื่อจำนวนรูพรุนมีมากก็ดูดซับพลังงานได้มากทำให้วัสดุมีความเหนียวสูงและในทางตรงกันข้ามเมื่อจำนวนรูพรุนมีน้อยก็ดูดซับพลังงานได้น้อยทำให้วัสดุมีความเหนียวต่ำ



* P = ความดัน (kg/cm^2), T = เวลา (min.)

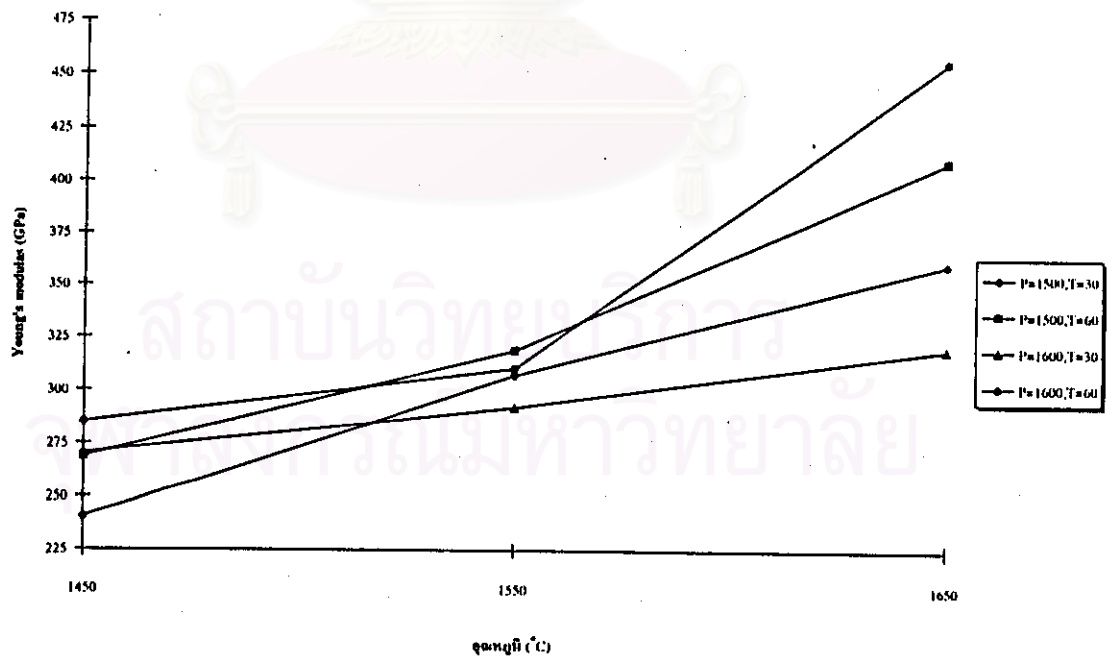
รูปที่ 4.51 กราฟแสดงค่าความเหนียว (Fracture Toughness) ของชิ้นงาน HIP ที่ภาวะต่างๆ

จากการศึกษาความทนต่อการดัดโค้งแสดงกราฟรูปที่ 4.52 และ ค่าโมดูลัสของยังแสดงกราฟรูปที่ 4.53 พบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น



* P = ความดัน (kg/cm²), T = เวลา (min.)

รูปที่ 4.52 กราฟแสดงค่าความทนต่อการคดโค้ง (Flexural Strength) ของชิ้นงาน HIP ที่ภาวะต่างๆ



* P = ความดัน (kg/cm²), T = เวลา (min.)

รูปที่ 4.53 กราฟแสดงค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) ของชิ้นงาน HIP ที่ภาวะต่างๆ