

บทที่ 4

ผลการทดลอง และ อภิปรายผล

4.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น

4.1.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา

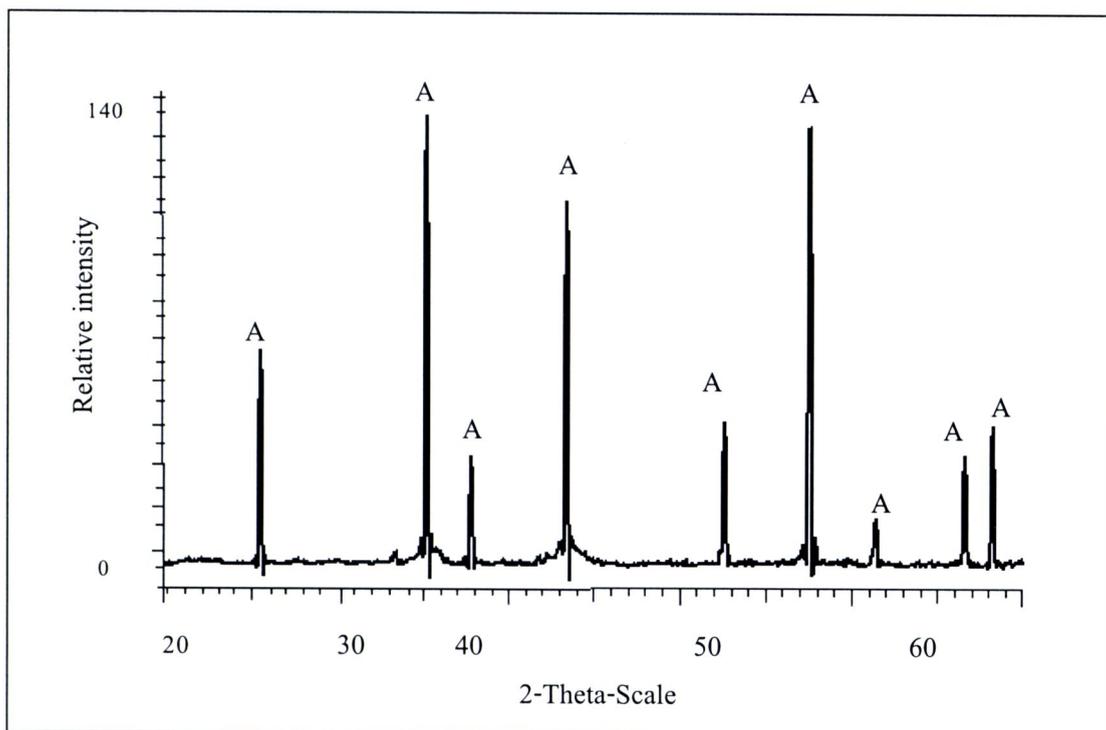
ลักษณะเฉพาะ	ค่าที่วัดได้
ความถ่วงจำเพาะ	3.69
การกระจายขนาดอนุภาค (ไมครอน)	
- ขนาดที่เล็กกว่า 0.39	ร้อยละ 10
- ขนาดที่เล็กกว่า 5.45	ร้อยละ 50
- ขนาดที่เล็กกว่า 13.30	ร้อยละ 90
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) *	
Al ₂ O ₃	95.0
Na ₂ O	0.3
SiO ₂	0.2
CaO	0.1
Fe ₂ O ₃	0.02
อื่น ๆ	4.38
วิญญาน	α- Al ₂ O ₃

หมายเหตุ: * Suzhou Dexin Advanced Ceramics Co., Ltd.

จากการศึกษาอะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์สูง (ร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก) จะมีสมบัติเชิงกลสูงด้วย แต่การวิจัยครั้งนี้ใช้อะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่แล้วและลดต้นทุนในการผลิต

4.1.1.1 การวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ของผงอะลูมินา

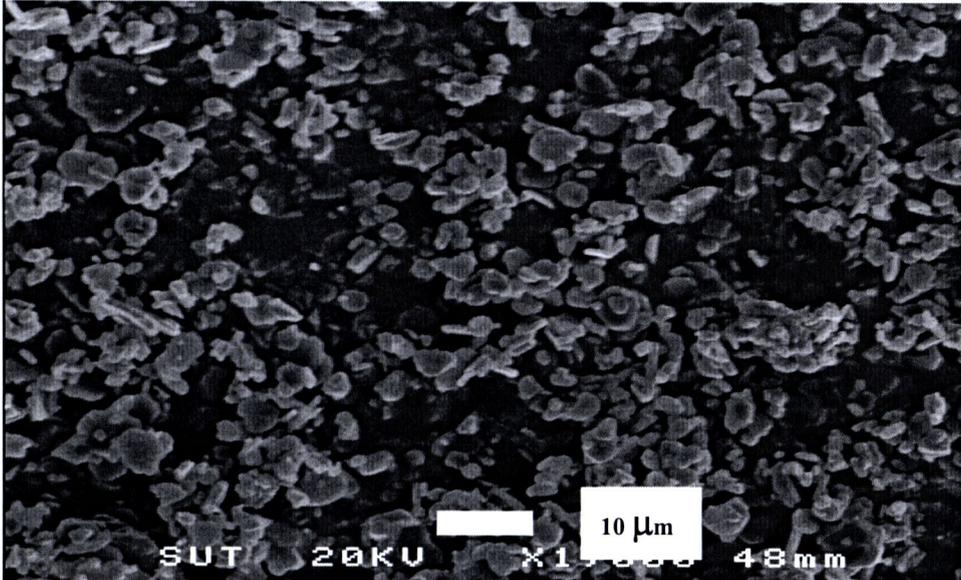
การวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) แพทเทิร์น (Peak) ที่แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่า พีคที่มีความเข้ม (Intensity) สูงสุดอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 35.13 องศา พีคที่มีความเข้มชั้นรองลงมาอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 57.51 และ 43.36 องศา ตามลำดับ มีวิทยาศาสตร์อยู่ในรูปแอลฟา- อะลูมินา (α - Al_2O_3) (Card number 00-010-0173) เพียงวิทยาศาสตร์เดียว



รูปที่ 4.1 แสดง XRD แพทเทิร์นของผงอะลูมินา โดย A แสดงวิทยาศาสตร์แอลฟา- อะลูมินา

4.1.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงอะลูมินา

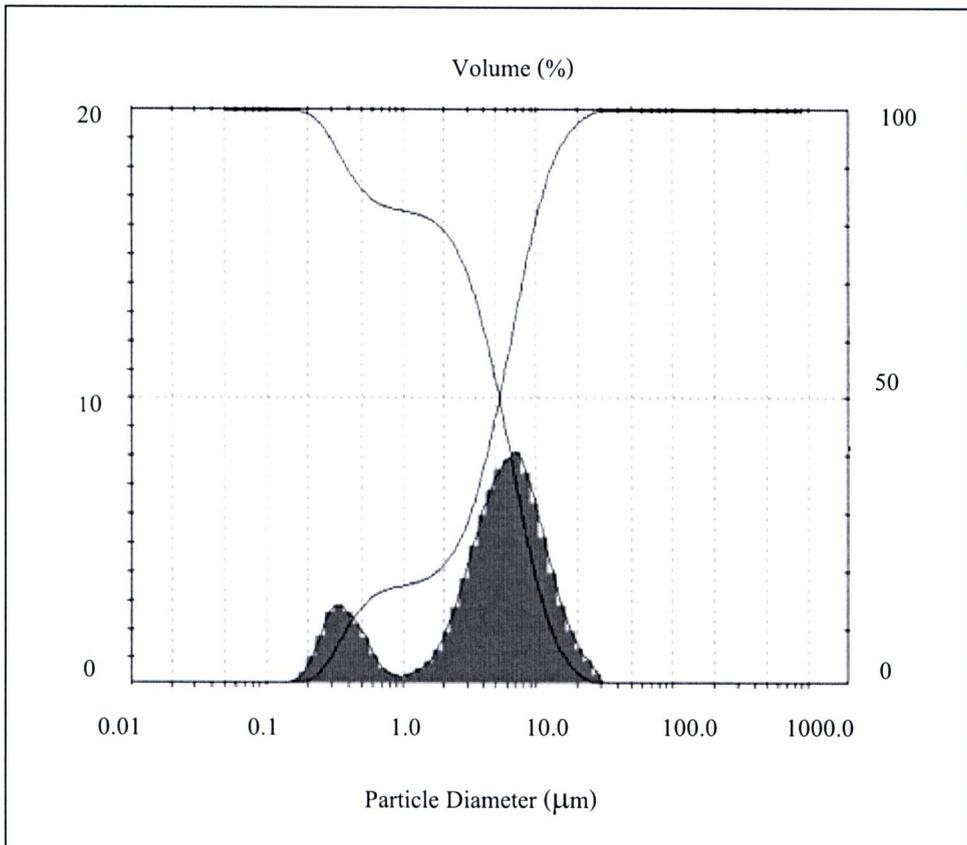
รูปไมโครกราฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) แสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าผงอะลูมินามีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular shape) มีอนุภาคขนาดใหญ่ปะปนอยู่กับอนุภาคขนาดเล็ก มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 10 ไมครอน



รูปที่ 4.2 แสดงรูปไมโครกราฟของผงอะลูมินาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1.1.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงอะลูมินา

รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา จากการศึกษาคู่ด้วยเครื่องมือวัดขนาดอนุภาค โดยอาศัยการกระเจิงและเลี้ยวเบนของลำแสงเลเซอร์แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 5.45 ไมครอน



รูปที่ 4.3 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา

4.1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงโครเมียม

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผงโครเมียม แสดงในตารางที่ 4.2



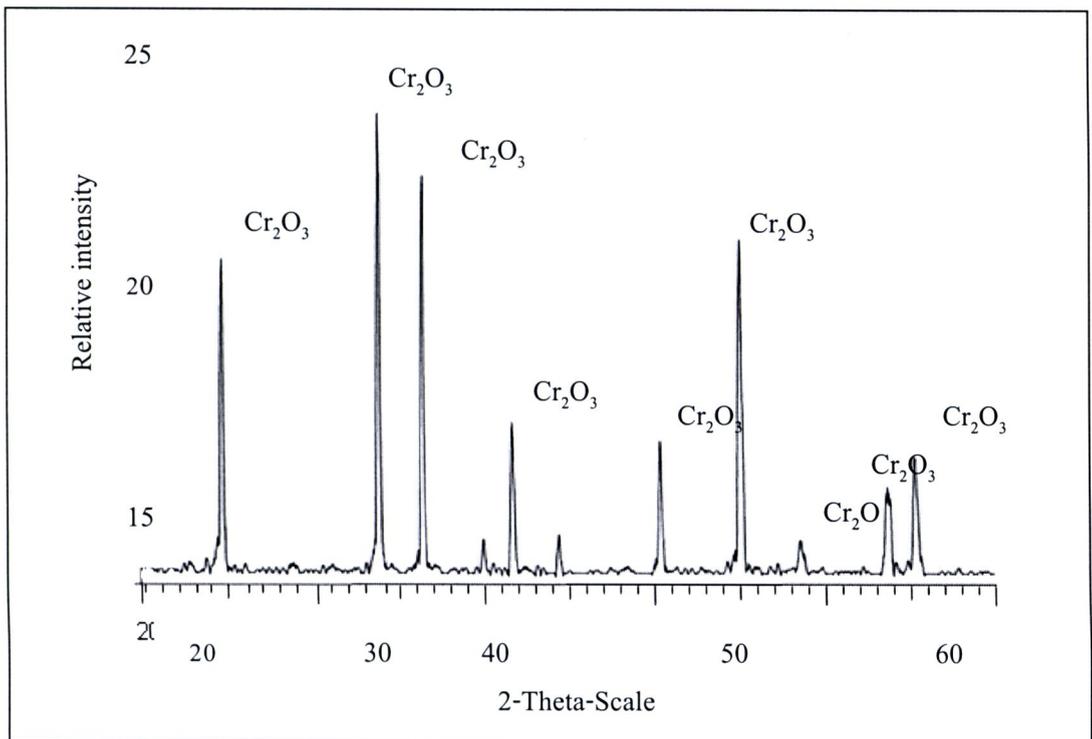
ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะเฉพาะของผงโครเมียม

ลักษณะเฉพาะ	ค่าที่วัดได้
ความถ่วงจำเพาะ	5.22
การกระจายขนาดอนุภาค (ไมครอน)	
- ขนาดที่เล็กกว่า 0.26	ร้อยละ 10
- ขนาดที่เล็กกว่า 0.53	ร้อยละ 50
- ขนาดที่เล็กกว่า 3.66	ร้อยละ 90
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)*	
Cr ₂ O ₃	98
NH ₄	0.01
Cl	0.002
SO ₄	0.01
Fe	0.05
Water-soluble matter	0.2
อื่นๆ	1.718
วิญภาค	Cr ₂ O ₃

หมายเหตุ: * ข้อมูลจาก บริษัท คาโร เอเบรา รีเจนต์ จำกัด

4.1.2.1 การวิเคราะห์ทางวิทยาของผงโครเมียม

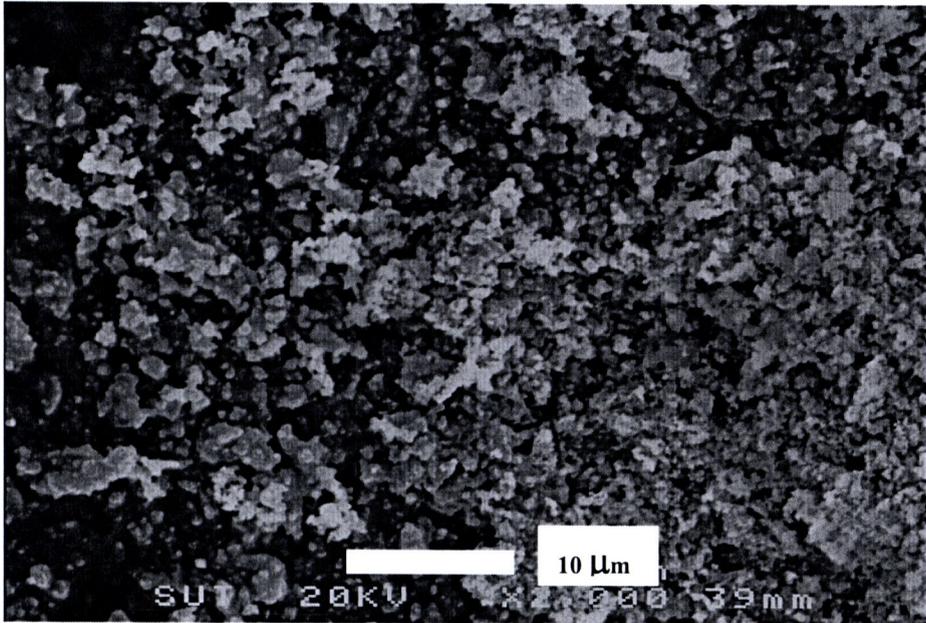
การวิเคราะห์ห้วิทยาด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) แพทเทิร์น (Peak) ที่แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่า พีกที่มีความเข้ม (Intensity) สูงสุดอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 33.58 องศา พีกที่มีความเข้มขึ้นรองลงมาอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 36.19 และ 54.86 องศา ตามลำดับ มีวิทยาอยู่ในรูปโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) (Card number 00-006-0504) เพียงวิทยาเดียว



รูปที่ 4.4 แสดง XRD แพทเทิร์นของผงโครเมียม โดย Cr_2O_3 แสดงวิทยาโครเมียมออกไซด์

4.1.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงโครเมียม

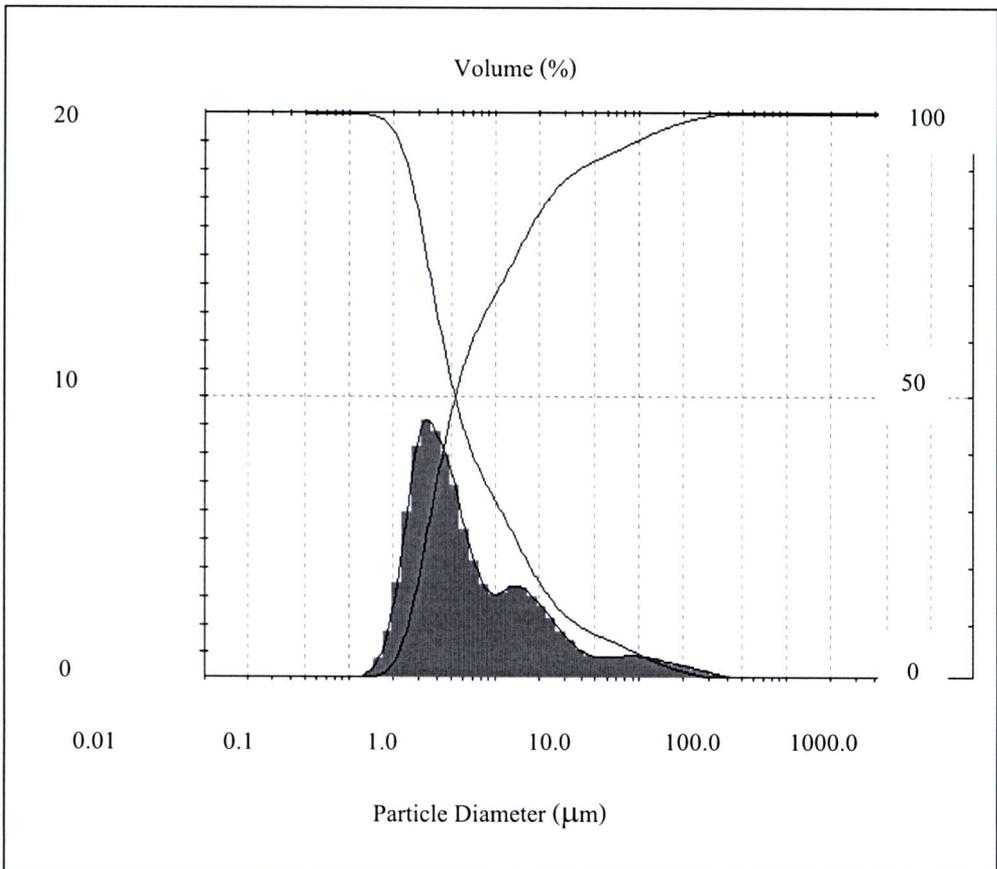
รูปไมโครกราฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าผงโครเมียมมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular shape) มีอนุภาคขนาดใหญ่ปะปนอยู่กับอนุภาคขนาดเล็ก มีขนาดอนุภาคค่อนข้างละเอียด อยู่ในช่วงประมาณ 0.1 ถึง 5 ไมครอน



รูปที่ 4.5 แสดงรูปไมโครกราฟของผงโครเมียมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1.2.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของโครเมีย

รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของโครเมีย จากการศึกษาด้วยเครื่องมือวัดขนาดอนุภาค โดยอาศัยการกระเจิงและเลี้ยวเบนของลำแสงเลเซอร์แสดงใน รูปที่ 4.6 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 0.53 ไมครอน



รูปที่ 4.6 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของ โครเมีย

4.1.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนีย

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนีย แสดงในตารางที่ 4.3

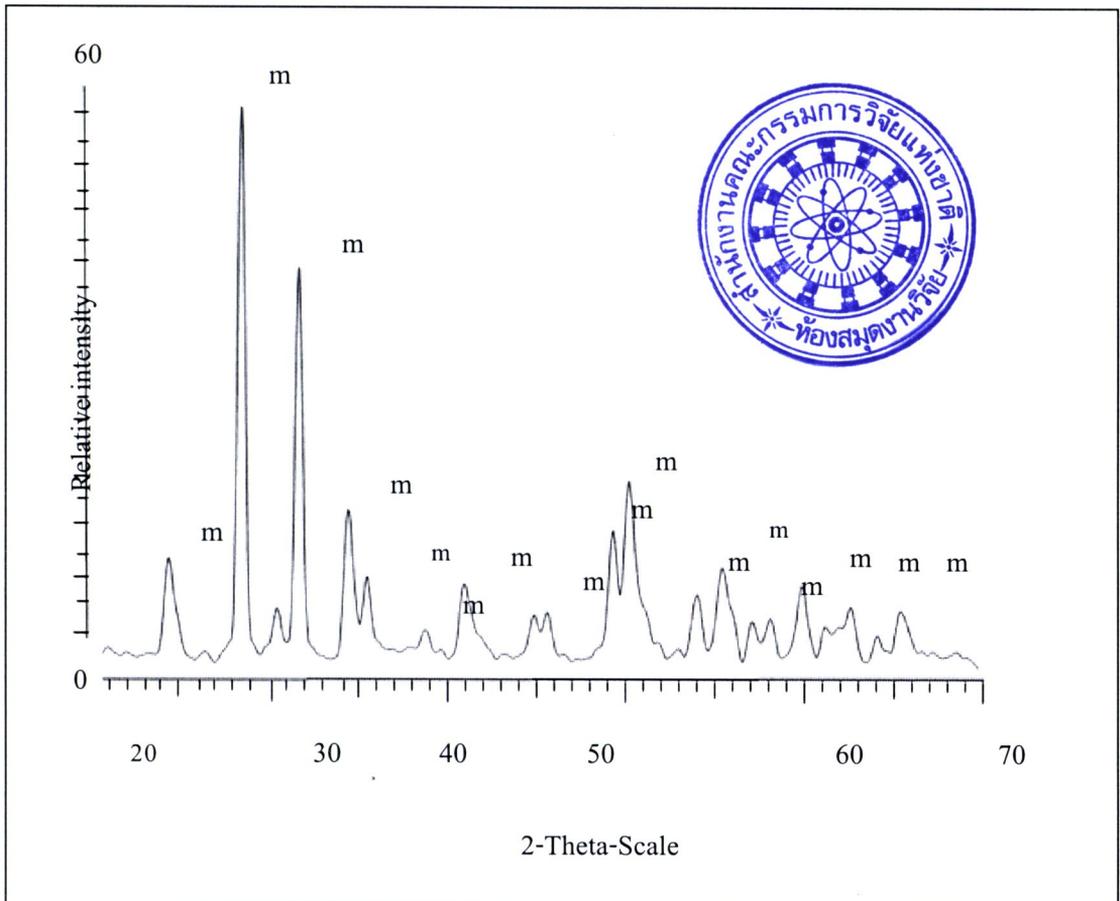
ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนีย

ลักษณะเฉพาะ	ค่าที่วัดได้
ความถ่วงจำเพาะ	5.68
การกระจายขนาดอนุภาค (ไมครอน)	
- ขนาดที่เล็กกว่า 0.48	ร้อยละ 10
- ขนาดที่เล็กกว่า 13.67	ร้อยละ 50
- ขนาดที่เล็กกว่า 21.50	ร้อยละ 90
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)*	
ZrO ₂	99
Fe	0.03
Ti	0.1
SiO ₂	0.3
SO ₄	0.2
อื่น ๆ	0.37
วิฤภาค	m-ZrO ₂

หมายเหตุ:* ข้อมูลจาก บริษัท รีเดอร์ เดอ ฮัท จำกัด

4.1.3.1 การวิเคราะห์ทางวิทยาของผงเซอร์โคเนีย

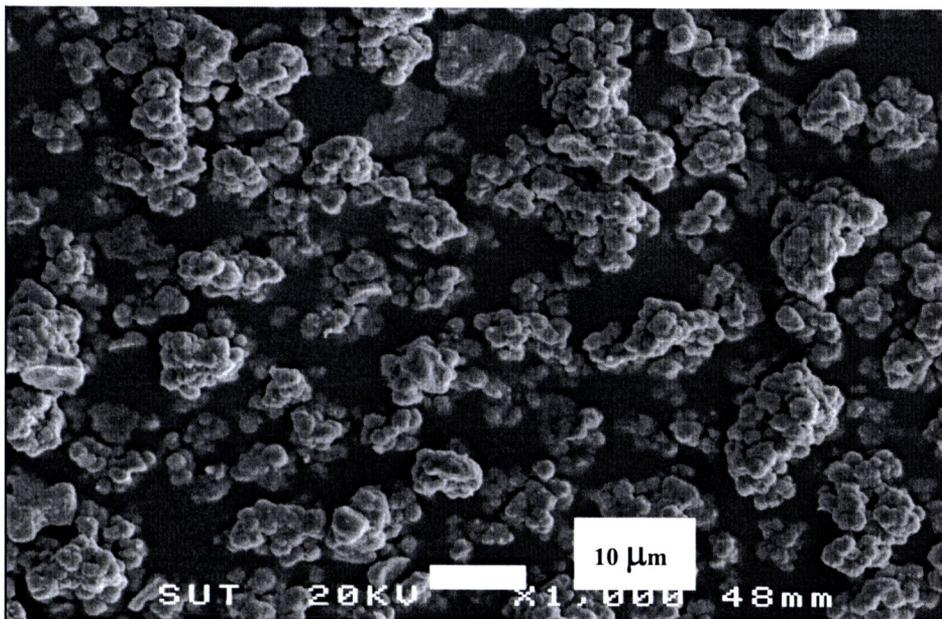
การวิเคราะห์ทางวิทยา ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) แพทเทิร์น (Peak) ที่แสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า พีคที่มีความเข้ม (Intensity) สูงสุดอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 28.17 องศา พีคที่มีความเข้มขึ้นรองลงมาอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 31.46 และ 50.11 องศา ตามลำดับ มีวิทยาอยู่ในรูปโมโนคลีนิก-เซอร์โคเนีย ($m\text{-ZrO}_2$) (Card number 00-037-1484) เพียงวิทยาเดียว



รูปที่ 4.7 แสดง XRD แพทเทิร์นของผงเซอร์โคเนีย โดย m แสดงวิทยา โมโนคลีนิก-เซอร์โคเนีย ($m\text{-ZrO}_2$)

4.1.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงเซอร์โคเนีย

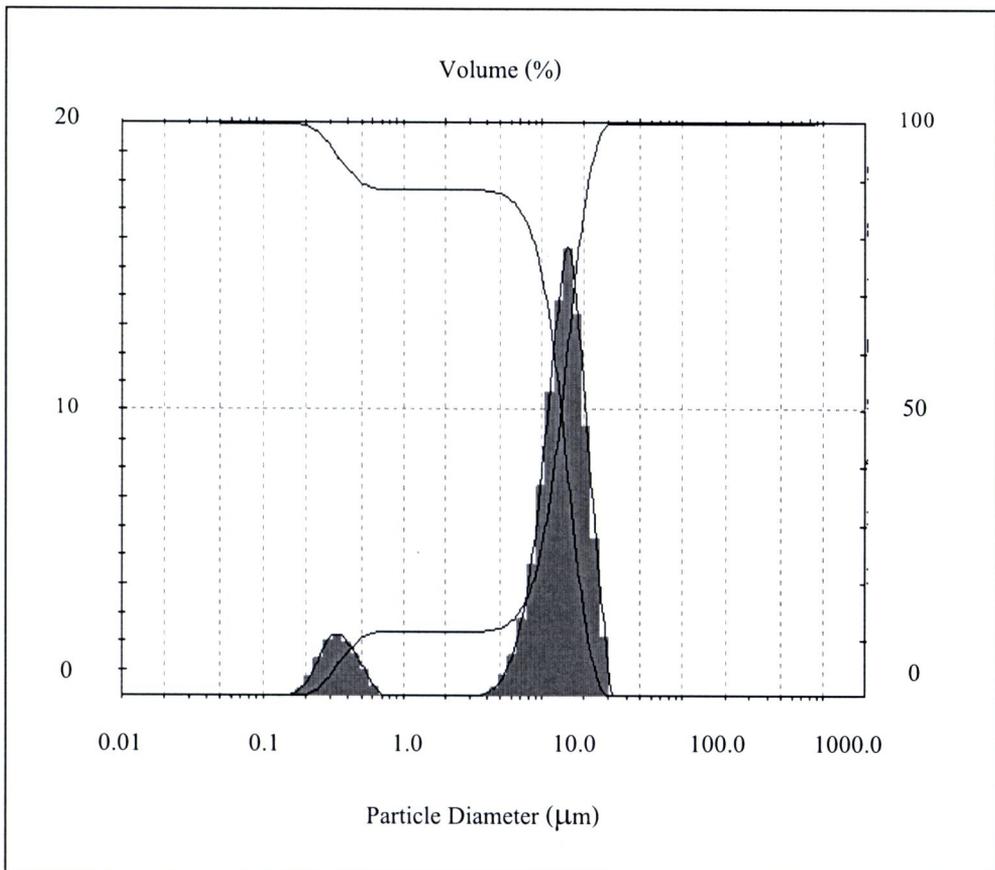
รูปไมโครกราฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าผงเซอร์โคเนียมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular shape) มีการกระจายตัวที่แคบและจับตัวกันเป็นก้อน มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 20 ไมครอน



รูปที่ 4.8 แสดงรูปไมโครกราฟของผงเซอร์โคเนียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1.3.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงเซอร์โคเนีย

รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของเซอร์โคเนีย จากการศึกษาด้วยเครื่องมือวัดขนาดอนุภาค โดยอาศัยการกระเจิงและเลี้ยวเบนของลำแสงเลเซอร์แสดงใน รูปที่ 4.9 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 13.67 ไมครอน

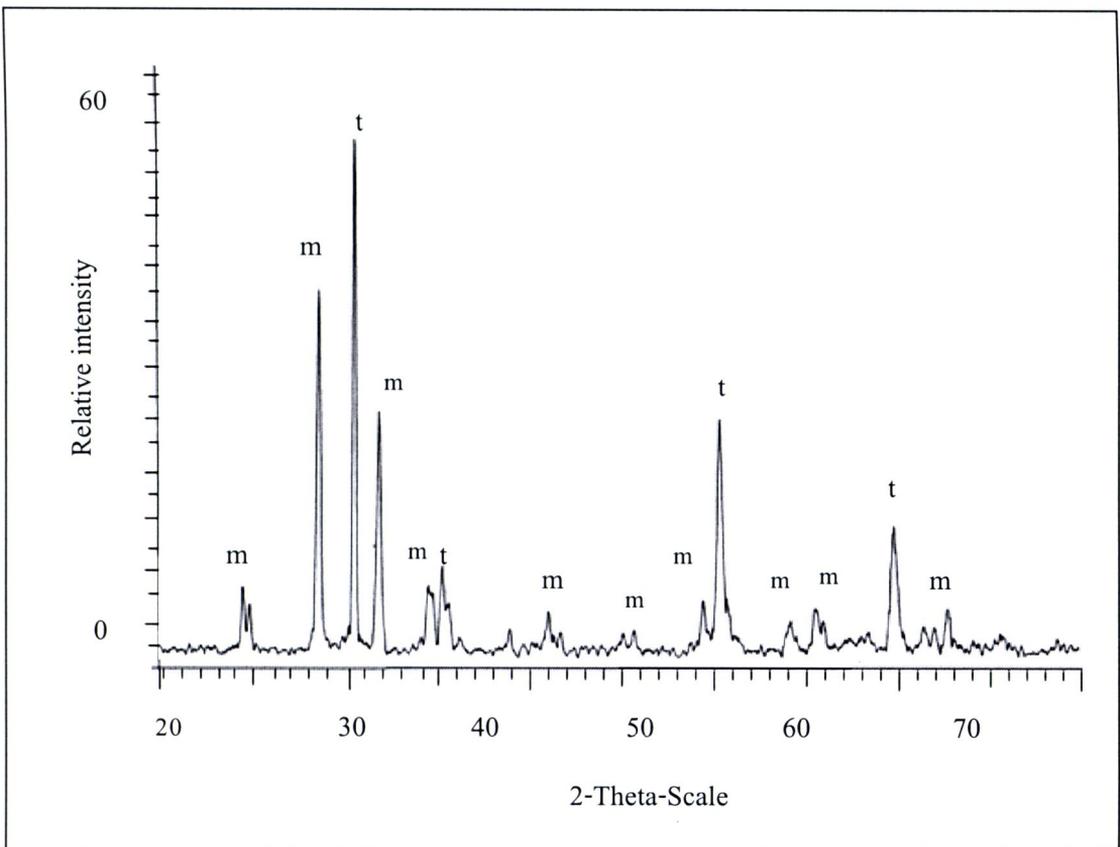


รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของเซอร์โคเนีย

4.1.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนียที่ผ่านการทำให้เสถียรโดยใช้ 4% โมลอิธเทียมออกไซด์ (4Y)

4.1.4.1 การวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ของผงเซอร์โคเนียที่ผ่านการทำให้เสถียรโดยใช้ 4% โมลอิธเทียมออกไซด์ (4Y)

การวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) แพทเทิร์น (Peak) ที่แสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า มีฟิสิกของเตตระโกนอลเซอร์โคเนียเกิดขึ้น ซึ่งฟิสิก เตตระโกนอลเซอร์โคเนียที่มีความเข้ม (Intensity) สูงสุดอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 30.14 องศา ฟิสิกที่มีความเข้มขึ้นรองลงมาอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 50.23 และ 59.76 องศา ตามลำดับ (Card number 01-070-4430)



รูปที่ 4.10 แสดง XRD แพทเทิร์นของผง 4Yเซอร์โคเนีย โดย m แสดงวัฏภาค โมโนคลีนิก ($m\text{-ZrO}_2$) และ t แสดงวัฏภาคเตตระโกนอล ($t\text{-ZrO}_2$)

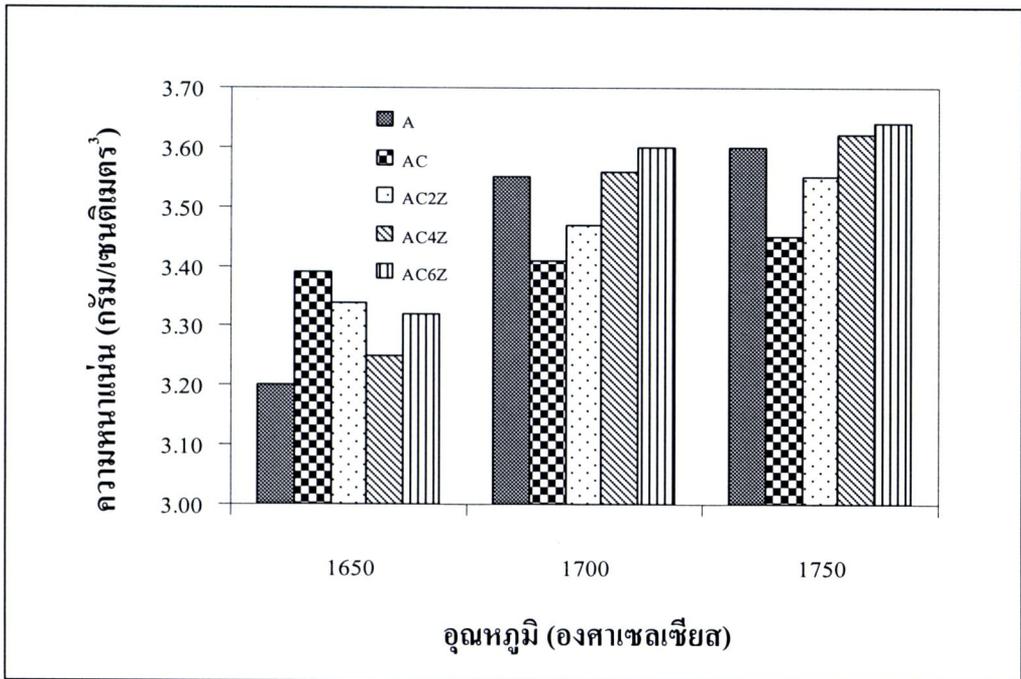
4.2 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติเชิงกลของวัสดุ เซิงประกอบ อะลูมินา-โครเมีย/เซอร์โคเนีย หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิแตกต่างกันเป็นเวลา 90 นาที

4.2.1 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุน

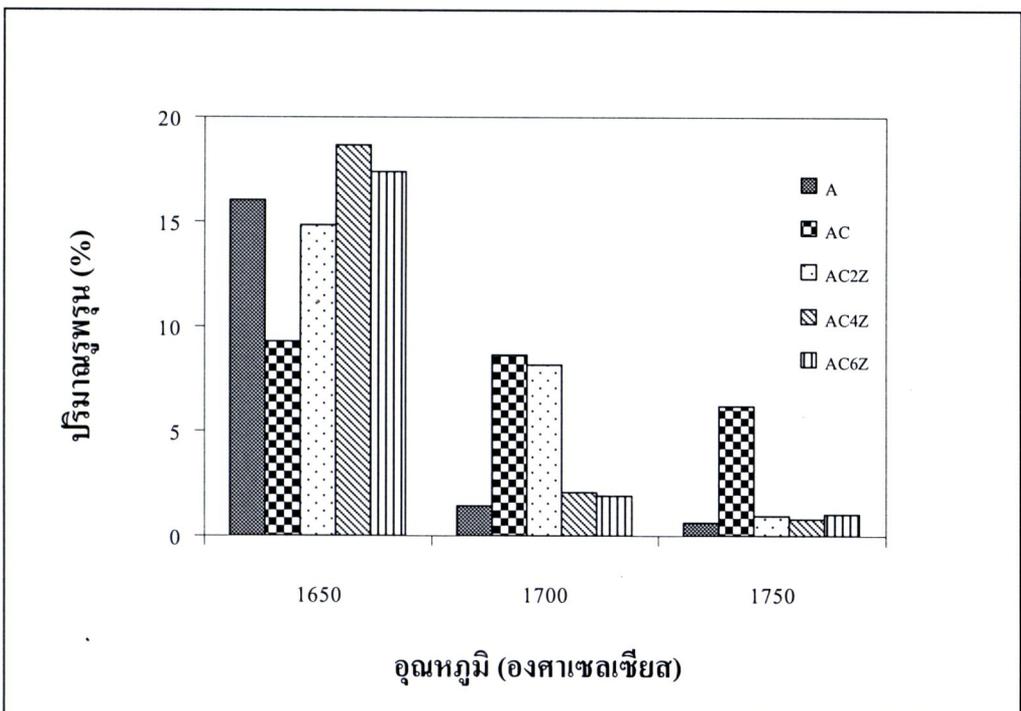
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเติมแต่งต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของแต่ละตัวอย่างแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของวัสดุเซิงประกอบแต่ละตัวอย่าง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รหัสตัวอย่าง	ความหนาแน่น (Bulk Density) (กรัม/เซนติเมตร ³)	ปริมาณรูพรุน (%) (Apparent Porosity)
1650	A1650	3.20	16.01
	AC1650	3.39	9.28
	AC2Z1650	3.25	18.67
	AC4Z1650	3.34	14.86
	AC6Z1650	3.37	16.02
1700	A1700	3.55	1.45
	AC1700	3.41	8.65
	AC2Z1700	3.47	8.20
	AC4Z1700	3.56	2.07
	AC6Z1700	3.60	1.89
1750	A1750	3.60	0.64
	AC1750	3.45	6.22
	AC2Z1750	3.55	0.93
	AC4Z1750	3.62	0.80
	AC6Z1750	3.64	1.04



รูปที่ 4.11 แสดงค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ

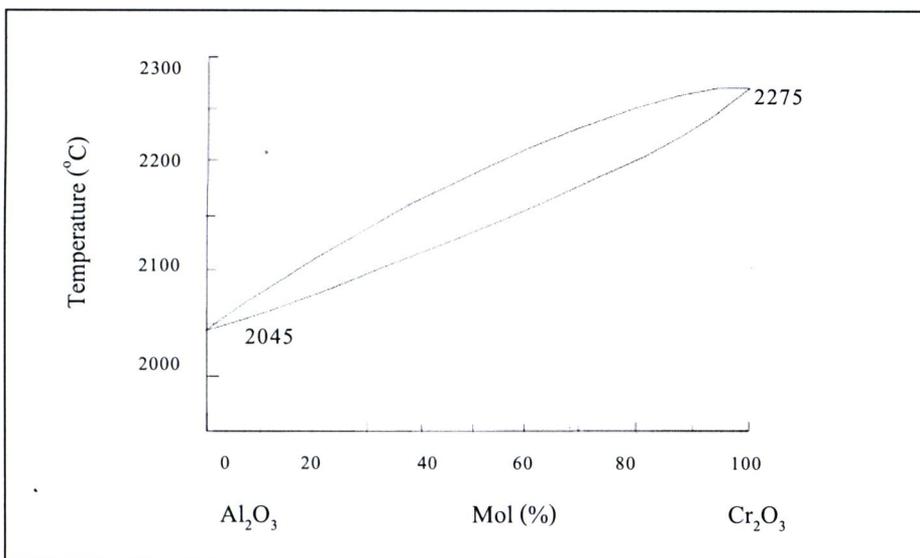


รูปที่ 4.12 แสดงปริมาณรูพรุนของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของแต่ละตัวอย่าง ดังตารางที่ 4.4 รูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 พบว่า โครเมียที่เติมเข้าไปส่งผลให้ความหนาแน่นของอะลูมินา ลดลง เนื่องจากโครเมียมนั้นมีจุดหลอมเหลวที่สูง (ประมาณ 2330°C) (H. Gitzen, 1997) มีผลทำให้ความสามารถในการเผาไหม้ของอะลูมินา ลดลงจึงส่งผลให้ปริมาณของรูพรุนในอะลูมินาเพิ่มขึ้น และหากพิจารณาแผนภูมิวิภาคระหว่างอะลูมินาและโครเมีย ซึ่งสอดคล้องกับในรูปที่ 4.13 ที่แสดงให้เห็นว่าโครเมียมีผลในการเพิ่มอุณหภูมิการเผาไหม้ของอะลูมินา และพบว่าการเผาไหม้โครเมียในบรรยากาศปกตินั้น โครเมียจะเกิดการเปลี่ยนรูปจาก Cr_2O_3 ไปเป็น CrO_3 ดังสมการที่ 4.1 ให้ความหนาแน่นของอะลูมินา ลดลง (Hirata et al., 2000)

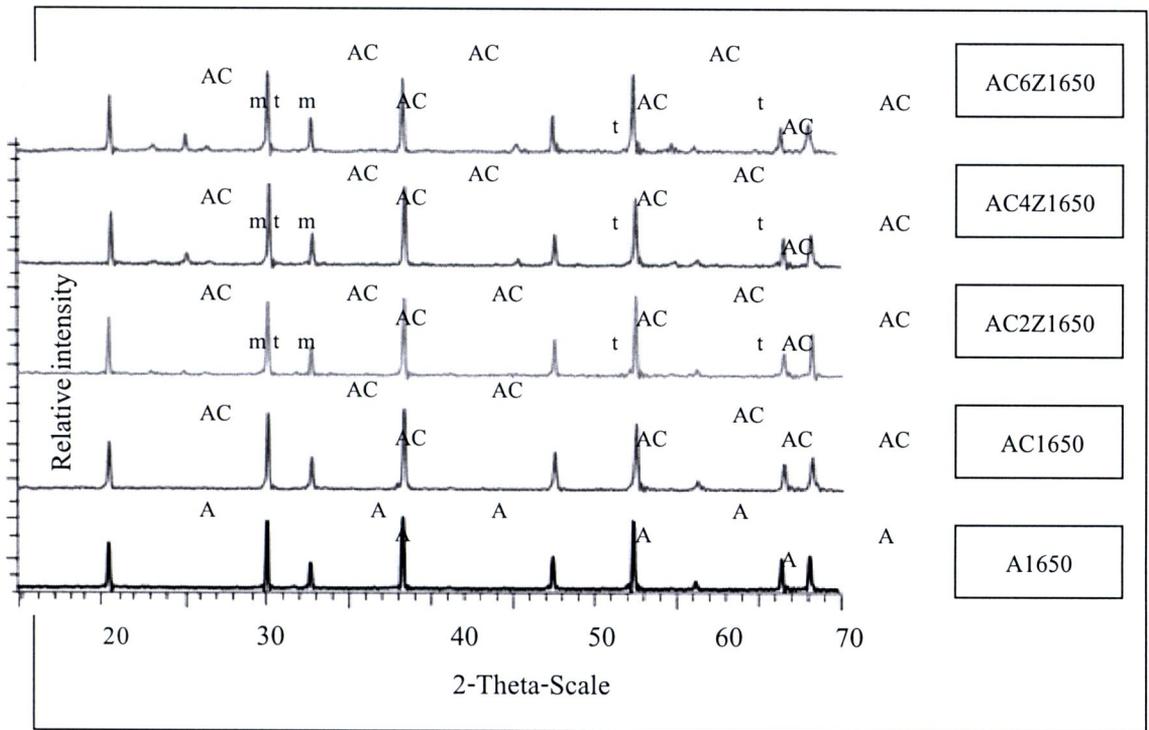


ในขณะที่การเติม 4Y เซอร์โคเนีย (ผงเซอร์โคเนียที่ผ่านการทำให้เสถียรโดยใช้ 4% โมลอิธเทียมออกไซด์) ในปริมาณร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนัก นั้นจะทำให้ความหนาแน่นของอะลูมินา-โครเมียเซรามิกมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก m-ZrO_2 เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการขยายตัวใหญ่ขึ้นส่งผลให้ปริมาณของรูพรุนในวัสดุเชิงประกอบลดลง (Yoshihiko Takano et al., 1998) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนาแน่นของแต่ละตัวอย่างจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการสุกตัวเพิ่มขึ้น (P.G.Rao et al., 2003)

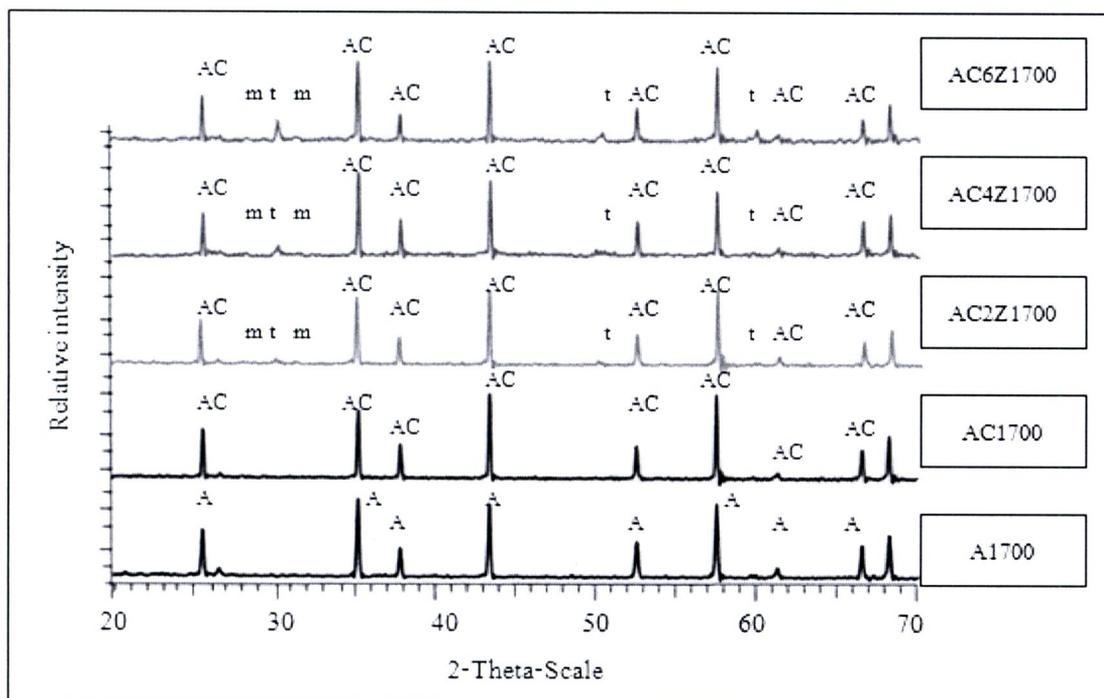


รูปที่ 4.13 แสดงแผนภูมิวิภาคระหว่างอะลูมินาและโครเมียออกไซด์ (E.N. Bunting, 1931)

4.2.2 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อการเปลี่ยนแปลงวัฏภาค

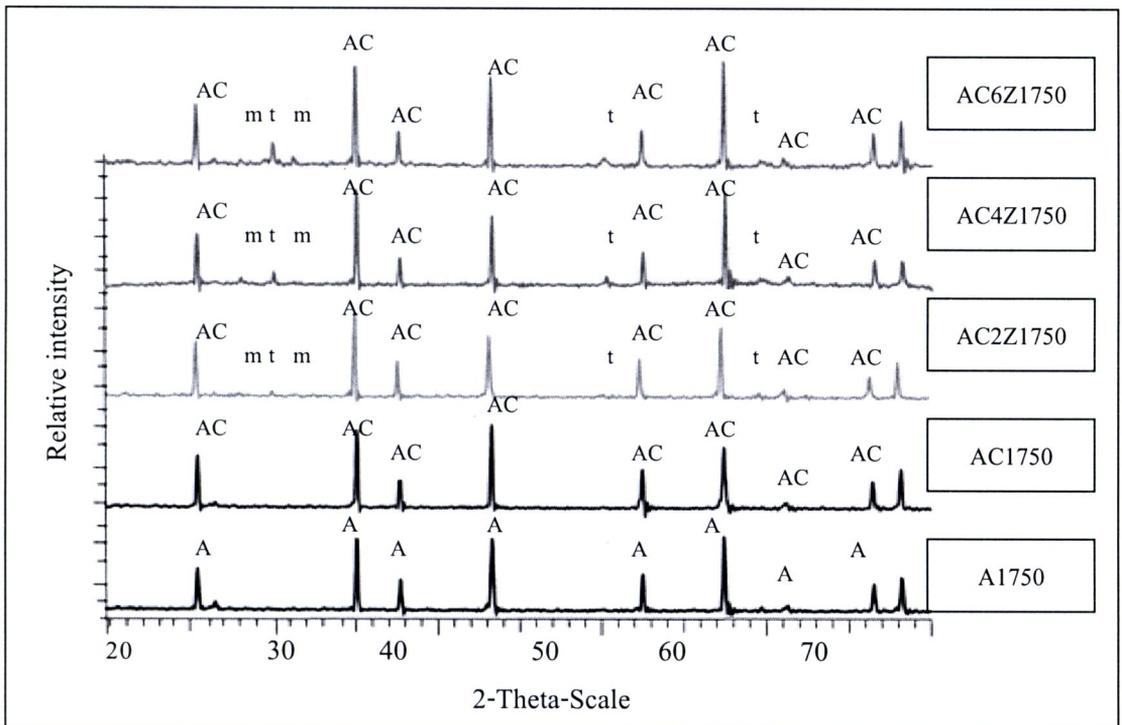


รูปที่ 4.14 แสดง XRD แพทเทิร์น ของตัวอย่างที่ส่วนผสมต่าง ๆ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1650°C โดย A AC m และ t เป็นสัญลักษณ์แทนวัฏภาคของอะลูมินา อะลูมินาโครเมียโซลิคโซลูชั่น m-ZrO₂ และ t-ZrO₂ ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 แสดง XRD แพทเทิร์น ของตัวอย่างที่ส่วนผสมต่าง ๆ ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1700°C โดย A AC m และ t เป็นสัญลักษณ์แทนวัฏภาคของอะลูมินา อะลูมินาโครเมียโซลิโดโซลูชัน m-ZrO₂ และ t-ZrO₂ ตามลำดับ

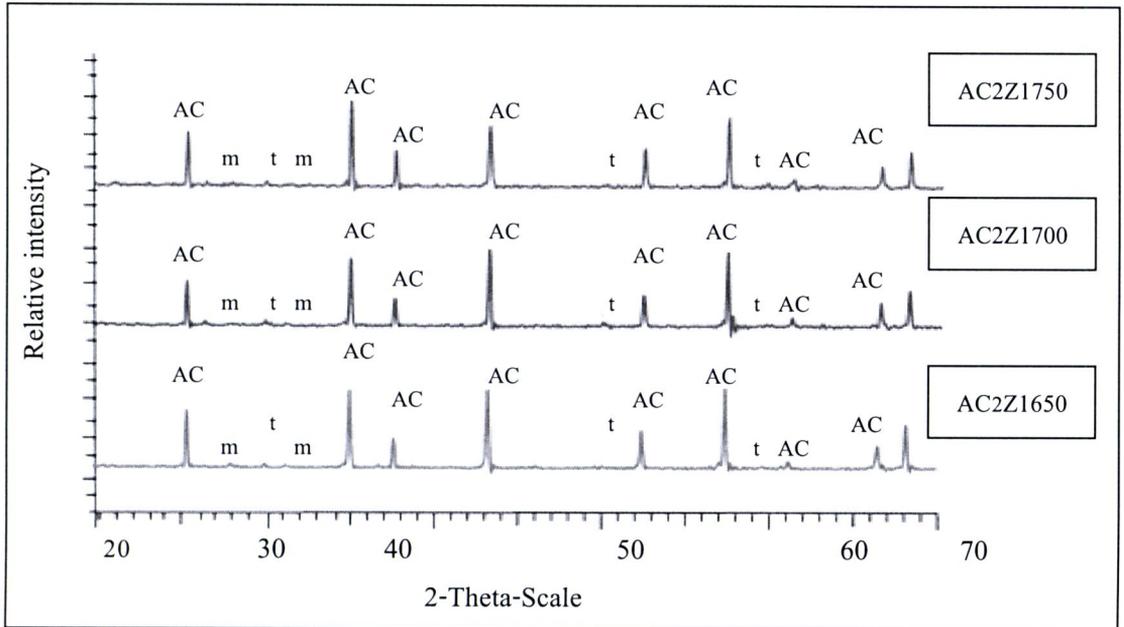




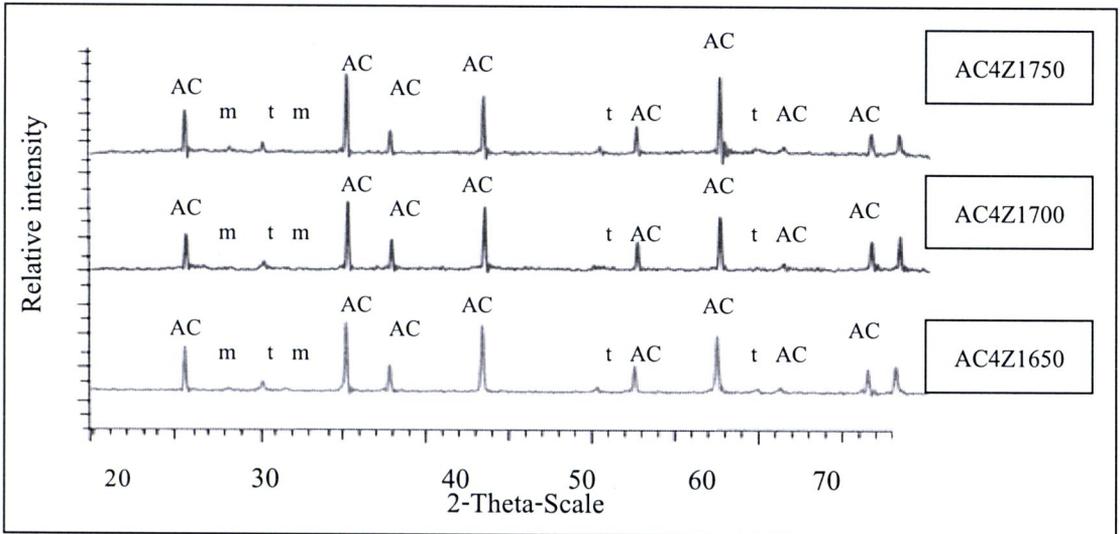
รูปที่ 4.16 แสดง XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานที่ส่วนผสมต่าง ๆ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1750°C โดย A AC m และ t เป็นสัญลักษณ์แทนวัฏภาคของอะลูมินา อะลูมินาโครเมียโซลิดโซลูชั่น m-ZrO₂ และ t-ZrO₂ ตามลำดับ

รูปที่ 4.14-4.16 แสดงผลการวิเคราะห์ทางวัฏภาคด้วยเครื่อง XRD ของแต่ละตัวอย่างหลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิเดียวกันพบว่า อะลูมินาร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก แสดงพีกของอัลฟาอะลูมินาซึ่งมีลักษณะเหมือนกับ XRD แพทเทิร์นของผงอะลูมินาซึ่งแสดงในรูปที่ 4.1 และเมื่อเติมโครเมียเข้าไปพบว่า โครเมียจะซึมผ่าน (Diffuse) อะลูมินาระหว่างการเผาผนึกเกิดเป็นสารละลายของของแข็ง (Solid Solution) อะลูมินาโครเมียอย่างสมบูรณ์ (Takehiko Hirata et al., 2000) พบว่า พีกที่มีความเข้ม (Intensity) สูงสุดอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 35.14 องศา พีกที่มีความเข้มชั้นรองลงมาอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 43.34 และ 57.48 องศา ตามลำดับ (Card number 01-073-0027) ซึ่ง วัฏภาคเหล่านี้เกิดจากการซึมผ่าน (Diffuse) ระหว่างการเผาผนึก และเมื่อเติม 4Yเซอร์โคเนีย ในปริมาณร้อยละ 2 4 และ 6 โดยน้ำหนัก เข้าไปในตัวอย่างก็จะปรากฏวัฏภาคของ m-ZrO₂ (Card number 00-037-1484) และ t-ZrO₂ (Card number 01-070-4430) ซึ่งวัฏภาคเหล่านี้จะมีปริมาณพีกเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ 4Yเซอร์โคเนียที่เติมเข้าไป และจะไม่ปรากฏพีกอื่น ๆ เข้ามาเจือปน และเมื่อ

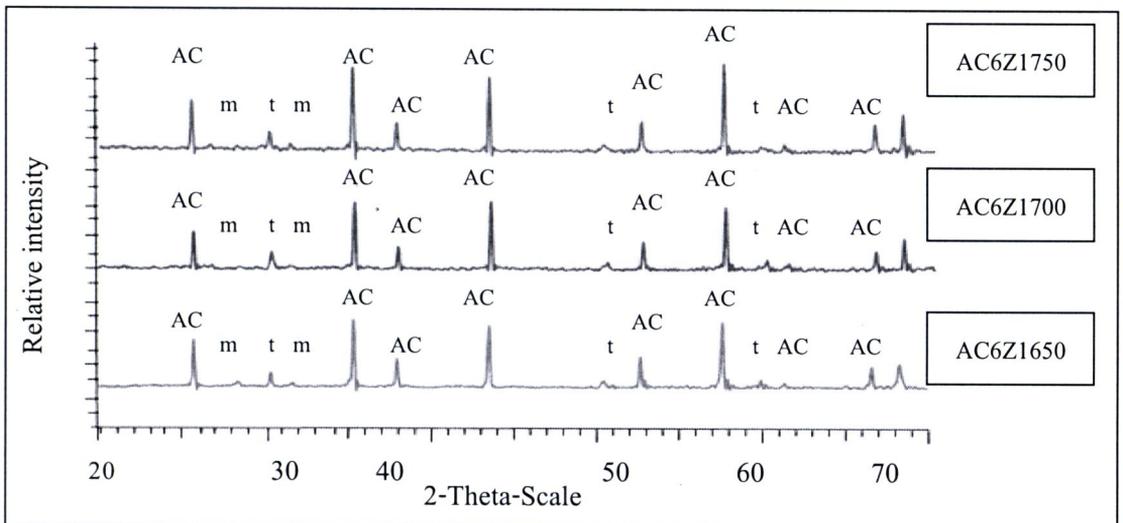
พิจารณาตัวอย่างที่มีปริมาณของ 4Y เซอร์โคเนียที่เติมเข้าไปในปริมาณที่ร้อยละ 2 4 และ 6 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันดังรูปที่ 4.17-4.19 พบว่าไม่ปรากฏฟิสิกอื่น ๆ เข้ามาเจือปนเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.17 แสดง XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วย 4Y เซอร์โคเนียร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดย A AC m และ t เป็นสัญลักษณ์แทนวัฏภาคของอะลูมินา อะลูมินาโครเมียไฮดรอกไซด์โซลูชัน m-ZrO₂ และ t-ZrO₂ ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 แสดง XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วย 4Yเซอร่าโคเนียร้อยละ 4 โดย น้ำหนัก หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดย A AC m และ t เป็นสัญลักษณ์แทนวัฏภาคของอะลูมินา อะลูมินาโครเมียโซลิดโซลูชั่น $m\text{-ZrO}_2$ และ $t\text{-ZrO}_2$ ตามลำดับ



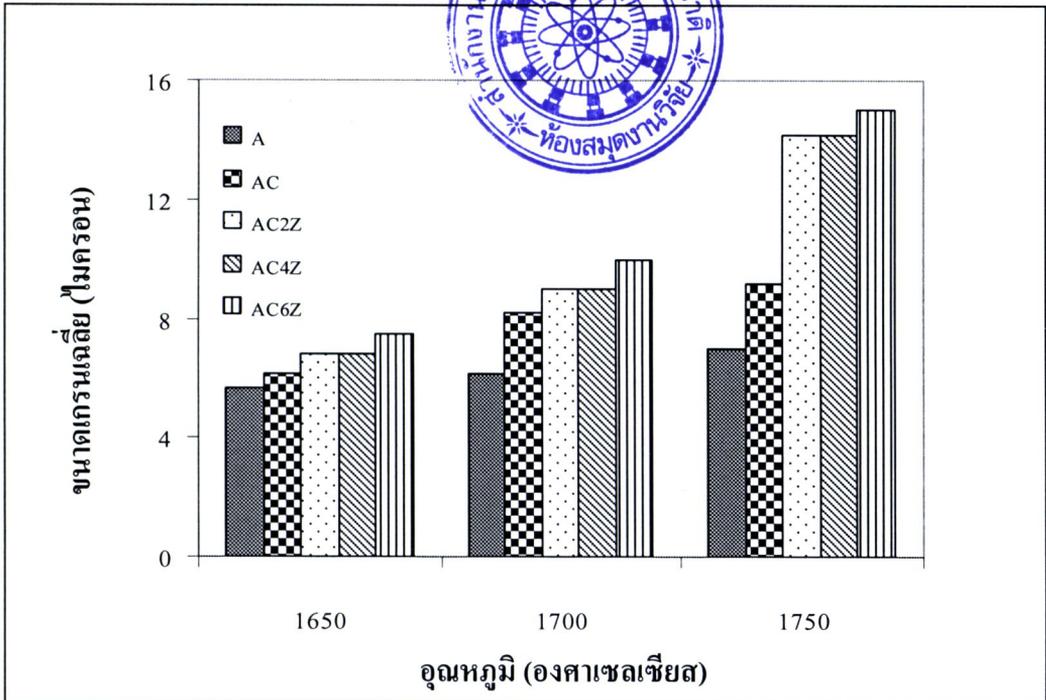
รูปที่ 4.19 แสดง XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วย 4Yเซอร่าโคเนียร้อยละ 6 โดย น้ำหนัก หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดย A AC m และ t เป็นสัญลักษณ์แทนวัฏภาคของอะลูมินา อะลูมินาโครเมียโซลิดโซลูชั่น $m\text{-ZrO}_2$ และ $t\text{-ZrO}_2$ ตามลำดับ

4.2.3 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อขนาดเกรน

ตารางที่ 4.5 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งที่มีต่อขนาดเกรนของวัสดุเชิงประกอบแต่ละตัวอย่าง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รหัสตัวอย่าง	ขนาดเกรนเฉลี่ย* (ไมครอน)
1650	A1650	5.65
	AC1650	6.15
	AC2Z1650	6.79
	AC4Z1650	6.93
	AC6Z1650	7.51
1700	A1700	6.15
	AC1700	8.19
	AC2Z1700	9.00
	AC4Z1700	9.61
	AC6Z1700	9.98
1750	A1750	7.00
	AC1750	9.18
	AC2Z1750	14.20
	AC4Z1750	14.50
	AC6Z1750	15.00

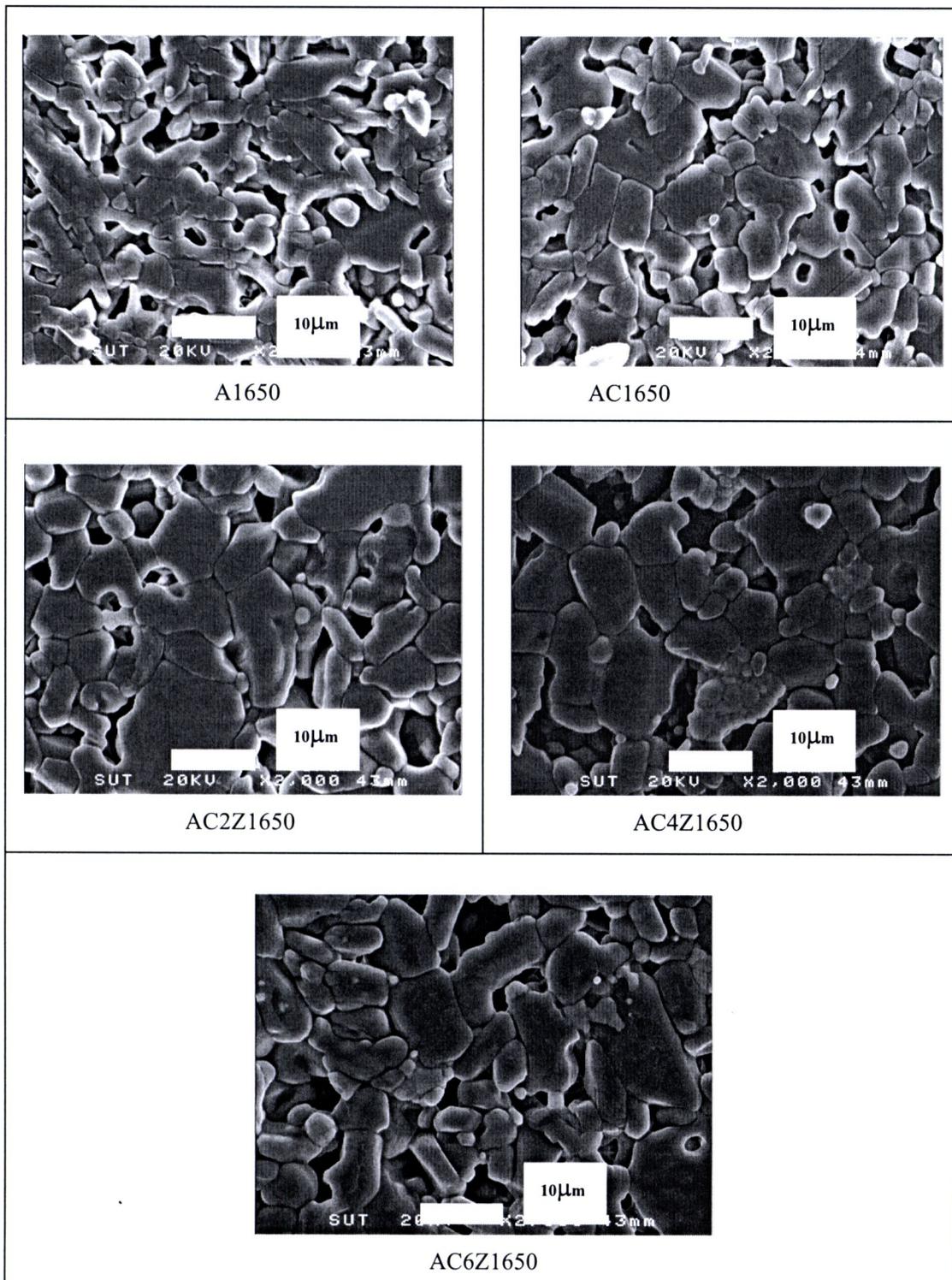
หมายเหตุ: * เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
จำนวน 100 เกรน



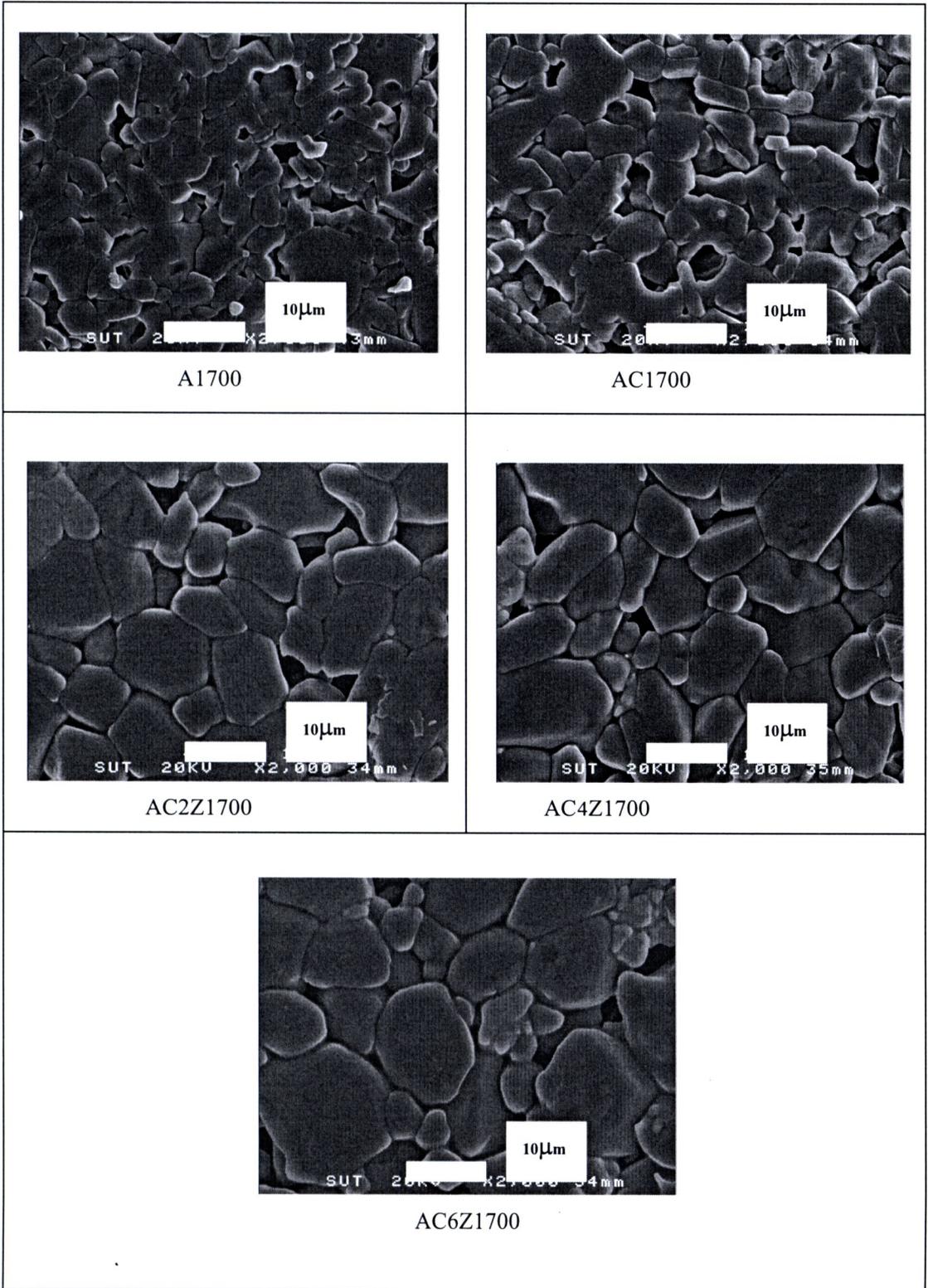
รูปที่ 4.20 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากการศึกษาผลของสารเติมแต่งสมบัติที่มีต่อขนาดเกรน ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.20 พบว่า โครเมียมที่เติมเข้าไปส่งผลให้ขนาดเกรนเฉลี่ยของอะลูมินาเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจาก Cr ions ที่อยู่บริเวณ Grain Boundary และเชื่อว่า Cr ions จะทำให้เกรนเติบโตอย่างรวดเร็ว (Doh-Hyung Riu et al., 2000) ในขณะที่การเติม 4Y เซอร์โคเนียในปริมาณร้อยละ 2 4 และ 6 โดยน้ำหนัก นั้นจะทำให้เกรนโตขึ้นตามปริมาณ 4Y เซอร์โคเนียที่เติมเข้าไปและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาก็พบว่าเกรนจะโตขึ้นตามอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

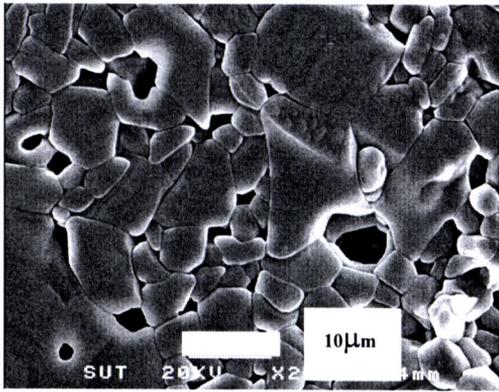
4.2.4 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อโครงสร้างจุลภาค



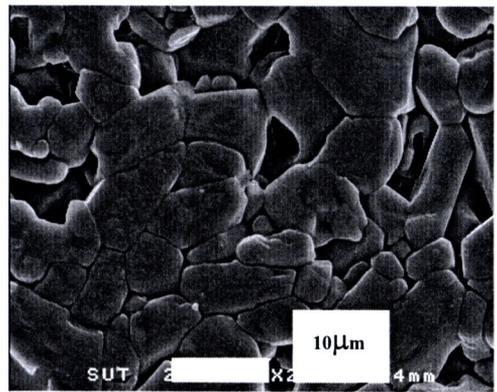
รูปที่ 4.21 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1650°C



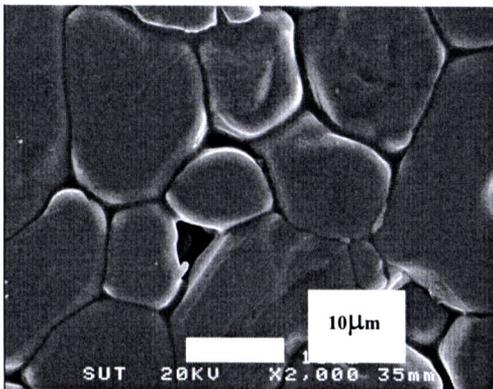
รูปที่ 4.22 แสดง โครงสร้างจุลภาคของแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1700°C



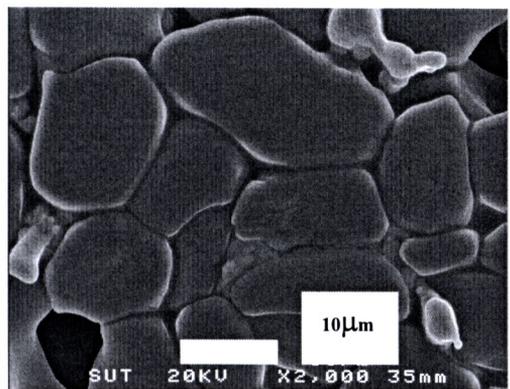
A1750



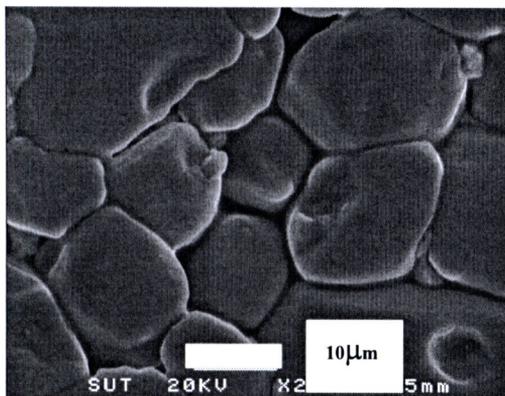
AC1750



AC2Z1750



AC4Z1750



AC6Z1750

รูปที่ 4.23 แสดง โครงสร้างจุลภาคของแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1750°C

เมื่อศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของแต่ละตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.21-4.23) พบว่า ตัวอย่างที่เติมโครเมียมเข้าไปจะมีขนาดของเกรนที่โตขึ้นซึ่งสาเหตุเกิดจากการที่มี Cr ions จำนวนมากที่อยู่บริเวณรอยต่อระหว่างขอบเกรนของอะลูมินากับโครเมียม ซึ่ง Cr ions นั้นจะส่งผลให้เกรนมีขนาดโตขึ้นอย่างรวดเร็ว และบริเวณขอบเกรนมีลักษณะไม่พอดีกัน (Doh Hyung Riu et al., 2000) (ตามคำอธิบายในหัวข้อที่ 4.2.3) และเมื่อปริมาณของ 4Y เซอร์โคเนียเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้เกรนมีขนาดโตขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาผนึก พบว่าขนาดของเกรนจะโตขึ้นซึ่งจะสอดคล้องกับ ค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนดังตารางที่ 4.4 ที่มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามอุณหภูมิเผาผนึก

4.2.5 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อความทนต่อการตัดโค้ง ความเหนียว ความแข็ง และ ความเปราะ

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเติมแต่งต่อความทนต่อการตัดโค้ง ความเหนียว ความแข็ง และความเปราะของตัวอย่างที่ได้จากงานวิจัยแสดงไว้ในตารางที่ 4.6

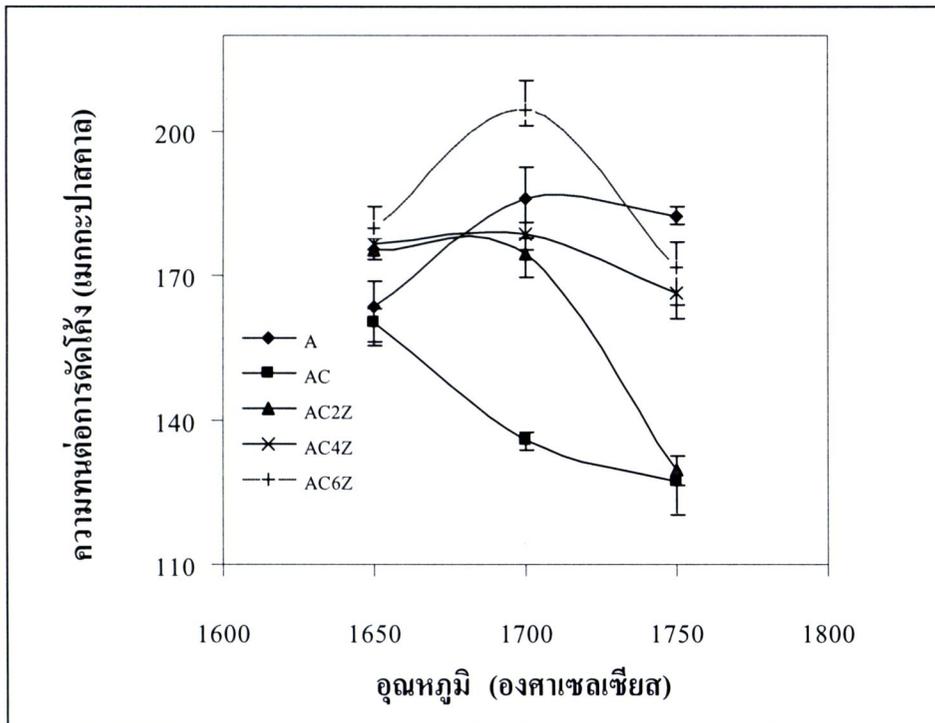
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้ง ความเหนียว ความแข็ง และความเปราะ ของวัสดุเชิงประกอบของแต่ละตัวอย่าง ที่ผ่านการเผาพริกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เป็นเวลา 90 นาที

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สูตร	ความทนต่อการตัด โค้ง (เมกกะปาสกาล)	ความเหนียว (เมกกะปาสกาล× เมตร ^{0.5})	ความแข็งวิก เกอร์ (จิกกะปาสกาล)	ความเปราะ** x10 ⁶ (1/เมตร)
1650	A	163.4 ± 5.78	3.03 ± 0.42	7.25 ± 0.08	58.03 ± 1.28
	AC	160.32 ± 3.09	3.24 ± 0.15	8.46 ± 0.05	66.83 ± 0.57
	AC2Z	175.27 ± 1.96	3.40 ± 0.22	6.69 ± 0.15	46.4 ± 0.99
	AC4Z	176.46 ± 2.45	3.75 ± 0.17	5.79 ± 0.03	36.03 ± 0.33
	AC6Z	180.11 ± 3.59	4.03 ± 0.13	5.74 ± 0.05	30.0 ± 0.49
1700	A	186.12 ± 6.12	3.33 ± 0.33	8.09 ± 0.12	54.63 ± 1.64
	AC	135.58 ± 1.65	3.42 ± 0.29	8.69 ± 0.05	58.17 ± 0.57
	AC2Z	174.67 ± 4.72	3.48 ± 0.15	7.95 ± 0.04	53.63 ± 0.6
	AC4Z	178.53 ± 2.43	4.25 ± 0.21	7.56 ± 0.07	45.93 ± 0.7
	AC6Z	204.64 ± 4.12	5.60 ± 0.26	7.18 ± 0.05	24.07 ± 0.24
1750	A	182.32 ± 1.47	2.92 ± 0.37	8.12 ± 0.08	38.9 ± 0.48
	AC	127.23 ± 4.83	3.86 ± 0.31	8.62 ± 0.14	41.9 ± 0.96
	AC2Z	129.51 ± 2.50	4.02 ± 0.20	7.23 ± 0.07	31.77 ± 0.57
	AC4Z	166.48 ± 3.40	4.53 ± 0.33	6.67 ± 0.05	26.53 ± 0.52
	AC6Z	171.79 ± 5.44	6.35 ± 0.34	6.23 ± 0.04	13.33 ± 0.21

หมายเหตุ: * ความเหนียวคำนวณจากสมการที่ (3-5) หน้า 35

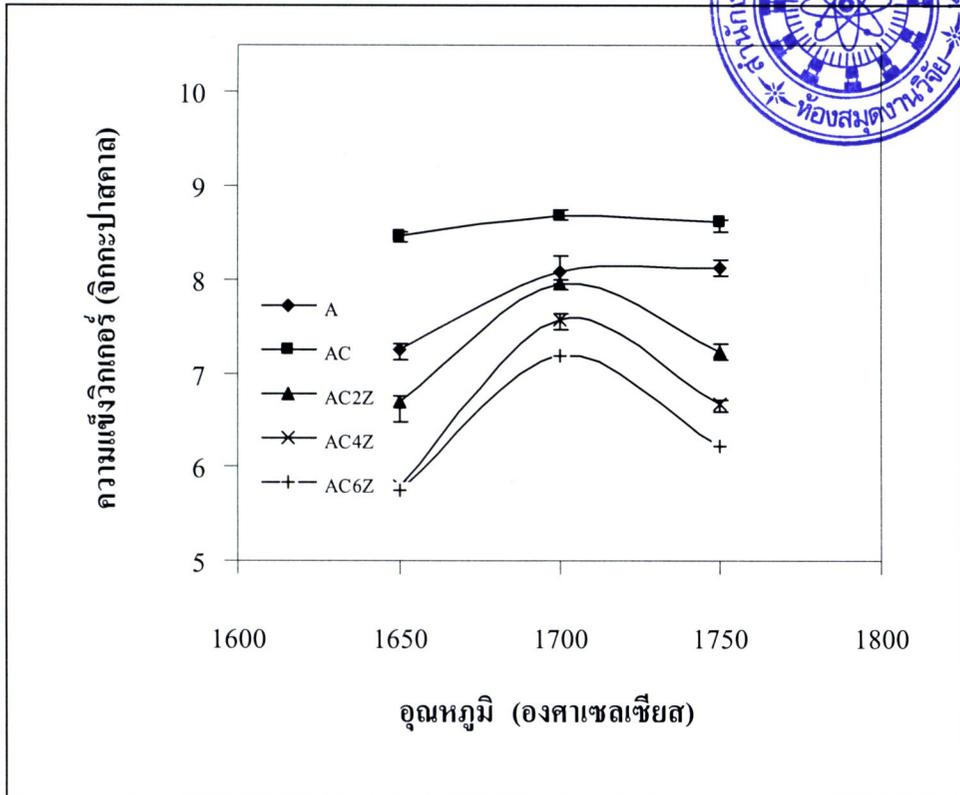
** ความเปราะคำนวณจากสมการที่ (3-6) หน้า 38

ตัวอย่างทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง



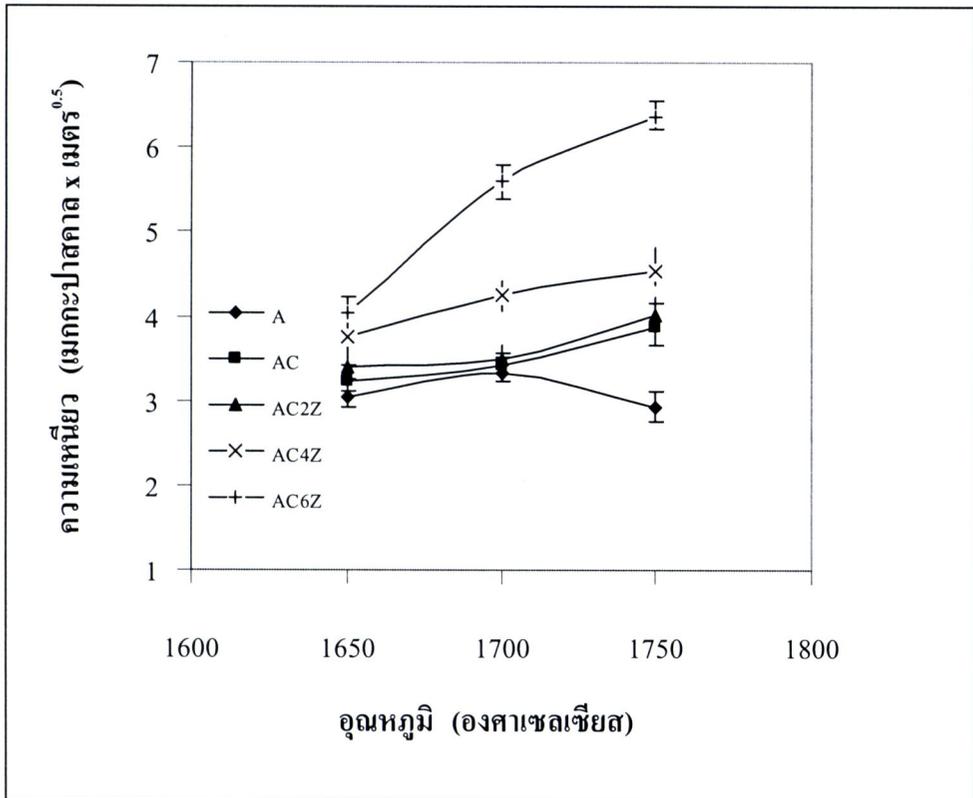
รูปที่ 4.24 แสดงค่าความทนต่อการดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.24 เมื่อเติมโครเมียมเข้าไปในอะลูมินา พบว่าค่าความทนต่อการดัดโค้งของอะลูมินาลดลงสาเหตุเกิดจากขนาดของเกรนที่โตขึ้น (K.Shibata et al., 1997) และบริเวณขอบเกรนไม่พอดีกัน (Doh Hyung Riu et al., 2000) ซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายตามรูปที่ 4.21-4.23 และการเติมโครเมียมนี้มีผลให้อุณหภูมิการเผาของอะลูมินาสูงขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณรูพรุนในอะลูมินาเพิ่มมากขึ้น ดังเหตุผลที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.1 ซึ่งปริมาณรูพรุนที่เพิ่มนี้เป็นสาเหตุให้ความทนต่อการดัดโค้งของอะลูมินาลดลง ในขณะที่การเติม 4Y เซอร์โคเนีย ในปริมาณร้อยละ 2 4 และ 6 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณ 4Y เซอร์โคเนียมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความทนต่อการดัดโค้งเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุเกิดจาก 4Y เซอร์โคเนียนั้นจะช่วยลดปริมาณรูพรุนของวัสดุลง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความทนต่อการดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบจะเพิ่มขึ้นและเริ่มลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้มากกว่า 1700°C เนื่องจากขนาดของเกรนที่โตขึ้น ซึ่งตัวอย่าง AC6Z1700 จะมีค่าความทนต่อการดัดโค้งสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 204.64 ± 4.12 MPa



รูปที่ 4.25 แสดงค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ

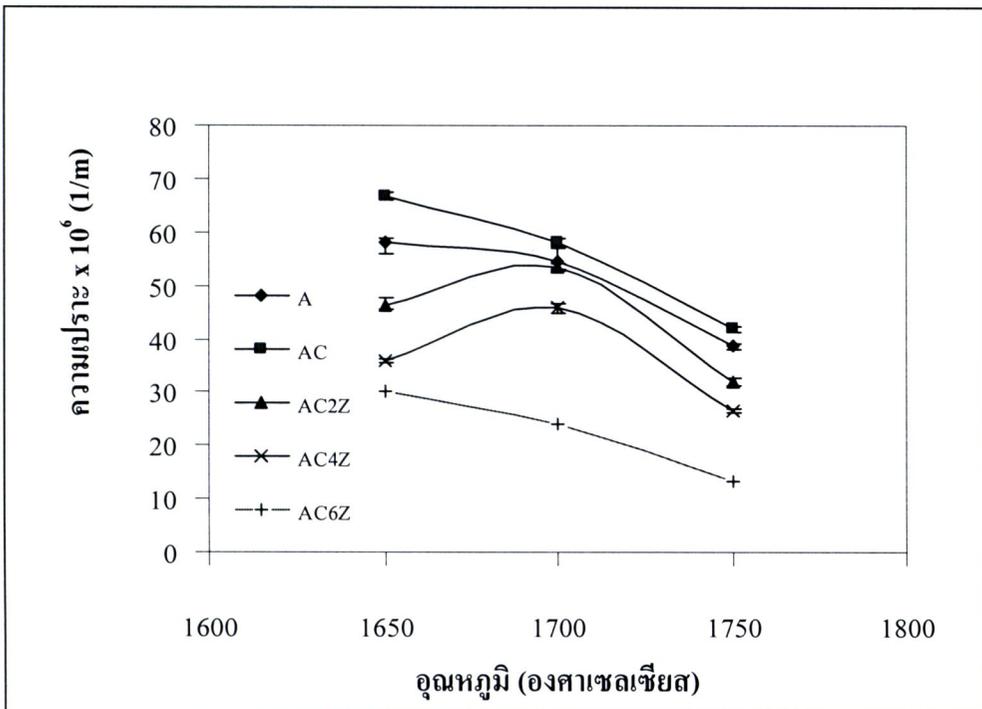
ส่วนการศึกษาค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบจากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.25 พบว่า โครเมียที่เติมเข้าไปจะช่วยให้อะลูมินามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายตามรูปที่ 4.21-4.23 (ในหัวข้อที่ 4.2.4) ในขณะที่การเติม 4Y เซอร์โคเนียในปริมาณร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนัก เข้าไปนั้นยังส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุลดลงตามปริมาณของ 4Y เซอร์โคเนียที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎ Rule of Mixture ของ (Y. Takano et al., 1998) ที่ได้อธิบายไว้ว่าวัสดุจะมีความแข็งแรงที่ดีได้นั้นจะขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งที่ใช้ หากสารเติมแต่งที่ใช้มีปริมาณของวัฏภาคที่มีความแข็งแรงที่สูงในปริมาณมากก็จะส่งผลให้วัสดุที่ได้นั้นมีค่าความแข็งแรงที่สูงขึ้น โดยค่าความแข็งแรงของ Cr_2O_3 มีค่าประมาณ 23 GPa ส่วน ZrO_2 มีค่าประมาณ 9.4 GPa



รูปที่ 4.26 แสดงค่าความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.26 การเติมโครเมียมเข้าไปในอะลูมินาพบว่าจะทำให้ค่าความเหนียวของอะลูมินาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สาเหตุเกิดจากเกรนที่โตขึ้น (K.Shibata et al., 1997) และเหตุผลอีกประการคือ ในวัสดุที่มีเกรนขนาดใหญ่จะสามารถยับยั้งการวิ่งของรอยร้าว (Crack Propagation) ได้ดีกว่าวัสดุที่มีเกรนขนาดเล็ก (Doh Hyung Riu et al., 2000) จึงเป็นผลให้วัสดุที่มีเกรนขนาดใหญ่มีความเหนียวมากกว่าวัสดุที่มีเกรนขนาดเล็ก และโครเมียมนี้จะมีส่วนที่ช่วยในการเพิ่มปริมาณรูพรุนในอะลูมินา (ตามคำอธิบายในหัวข้อที่ 4.2.1) ซึ่งปริมาณรูพรุนที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวจะช่วยในการดูดซับพลังงานจากรอยร้าว และเมื่อเติม 4Y เซอร์โคเนียในปริมาณร้อยละ 2 4 และ 6 โดยน้ำหนักเข้าไป พบว่าค่าความเหนียวของอะลูมินา-โครเมียมเซรามิกจะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของ 4Y เซอร์โคเนียที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติม 4Y เซอร์โคเนียในวัสดุจะส่งผลให้เกิดวัฏภาคของ $t\text{-ZrO}_2$ ขึ้นภายในวัสดุ ซึ่งวัฏภาคดังกล่าวมีผลในการช่วยเพิ่มความเหนียวให้กับวัสดุ โดยกระบวนการการเกิดความเหนียวโดยอาศัยการเปลี่ยนวัฏภาคจาก $t\text{-ZrO}_2$ ไปเป็น $m\text{-ZrO}_2$ (Stress Induces Phase

Transformation) ของ (Y.Takano et al., 1998) จึงเป็นสาเหตุทำให้วัสดุที่เติม 4Y เซอร์โคเนียมีค่าความเหนียวที่สูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิในการเผาขึ้นค่าความเหนียวของวัสดุจะมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยค่าความเหนียวที่สูงที่สุดได้แก่ ตัวอย่าง AC6Z1750 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $6.35 \pm 0.34 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$



รูปที่ 4.27 แสดงค่าความเปราะของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นว่าการเติมโครเมียมเข้าไปในอะลูมินาส่งผลให้มีความเปราะเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครเมียมมีผลทำให้ค่าความแข็งของอะลูมินาเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติม 4Y เซอร์โคเนีย เข้าไปในอะลูมินา-โครเมียมเซรามิก พบว่ามีค่าความเปราะจะลดลงตามปริมาณของ 4Y เซอร์โคเนียที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก 4Y เซอร์โคเนียมีผลทำให้ค่าความแข็งลดลงและมีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ J.B.Quinn ที่ได้อธิบายไว้ว่า วัสดุที่มีค่าความแข็งสูงจะมีความต้านทานการเปลี่ยนรูป (Deformation) ที่สูง เมื่อมีแรงมากระทำ จึงทำให้วัสดุมีความเข้มข้นของความเค้นสะสม (Stress Concentration) มากจึงทำให้เกิดรอยแตกขึ้นภายในวัสดุ วัสดุจึงมีค่าความเปราะสูง ในขณะที่วัสดุที่มีค่าความแข็งต่ำและมีค่าความเหนียวสูง วัสดุจะมี Fracture Surface Energy ที่สูง สามารถเปลี่ยนรูปได้ง่ายเมื่อมีแรง

มากระทำ ทำให้มีความเข้มข้นของความเค้นสะสมต่ำในบริเวณที่มีแรงกระทำ วัสดุจึงมีค่าความเปราะน้อยหรือมีความเหนียวสูงนั่นเอง ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิในการเผาผนึกจะส่งผลให้ค่าความเปราะมีค่าลดลง (J.B.Quinn, 1997)

4.2.6 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อความต้านทานการเจาะทะลุ

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเติมแต่งต่อความต้านทานการเจาะทะลุ ของแต่ละตัวอย่างแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

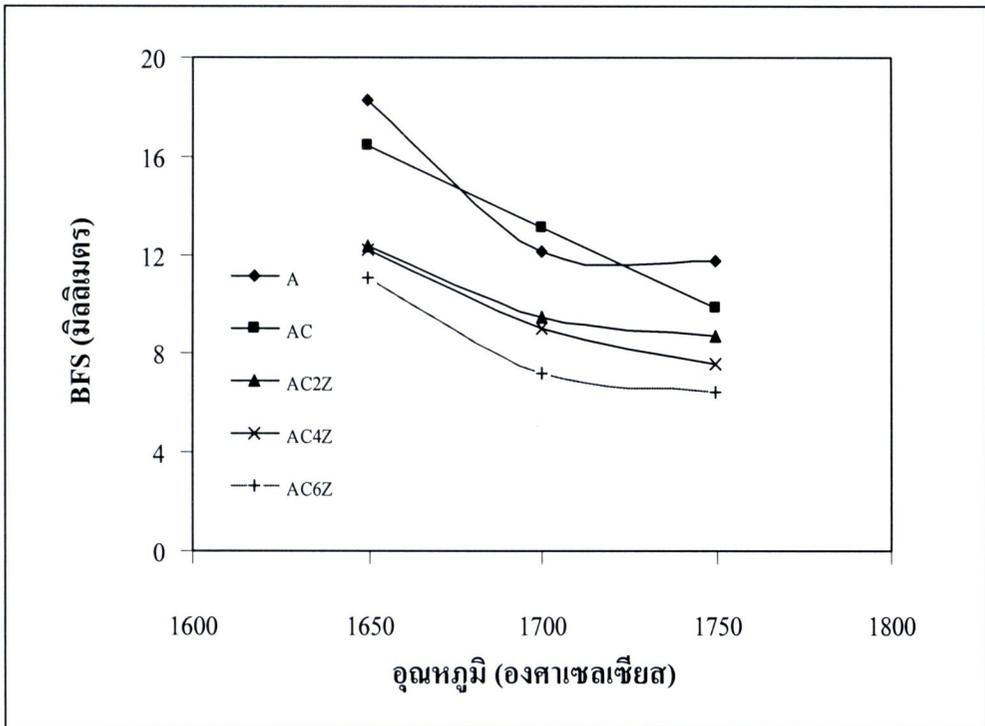
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความต้านทานการเจาะทะลุและระยะไป่งหลัง (BFS)* ของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เป็นเวลา 90 นาที

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สูตร	Back Face Signature** (BFS, มิลลิเมตร)	ความต้านทานการเจาะทะลุ***
1650	A	18.22	ไม่ทะลุ
	AC	16.44	ไม่ทะลุ
	AC2Z	12.38	ไม่ทะลุ
	AC4Z	12.22	ไม่ทะลุ
	AC6Z	11.04	ไม่ทะลุ
1700	A	12.12	ไม่ทะลุ
	AC	13.1	ไม่ทะลุ
	AC2Z	9.5	ไม่ทะลุ
	AC4Z	9.02	ไม่ทะลุ
	AC6Z	7.16	ไม่ทะลุ
1750	A	11.78	ไม่ทะลุ
	AC	9.86	ไม่ทะลุ
	AC2Z	8.68	ไม่ทะลุ
	AC4Z	7.54	ไม่ทะลุ
	AC6Z	6.42	ไม่ทะลุ

หมายเหตุ: * ทดสอบและวัดค่าตามมาตรฐาน NIJ ด้วยความร่วมมือกับศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีการบินและอวกาศ กองทัพอากาศ

** วิธีวัดแสดงในหน้า 37-38

*** วิธีวัดแสดงในหน้า 37



รูปที่ 4.28 แสดงค่า BFS ของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่าการเติมโครเมียมเข้าไปในอะลูมินาส่งผลให้มีค่า BFS ที่เพิ่มขึ้นและเริ่มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาผนึกในขณะที่เมื่อเติม 4Y เซอร์โคเนียเข้าไปในอะลูมินา-โครเมียมเซรามิก พบว่าค่า BFS ลดลงตามปริมาณ 4Y เซอร์โคเนียที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิในการเผาผนึกจะส่งผลให้ BFS มีค่าที่ลดลง เนื่องจากวัสดุมีความเหนียวเพิ่มขึ้น และทุกตัวอย่างไม่มีรอยทะเลาะ ซึ่งทั้งหมดนี้จะสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.5 และทั้งหมดมีค่า BFS น้อยกว่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน NIJ ที่ 44 มิลลิเมตร

4.3 ผลของความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่มีต่อความต้านทานการเจาะทะลุ

ผลของความหนาของวัสดุเชิงประกอบ จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 พบว่าวัสดุเชิงประกอบซึ่งประกอบด้วยอะลูมินาร้อยละ 91 โดยน้ำหนัก โครเมียร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และ 4Y เซอร์โคเนียร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1700°C จะมี

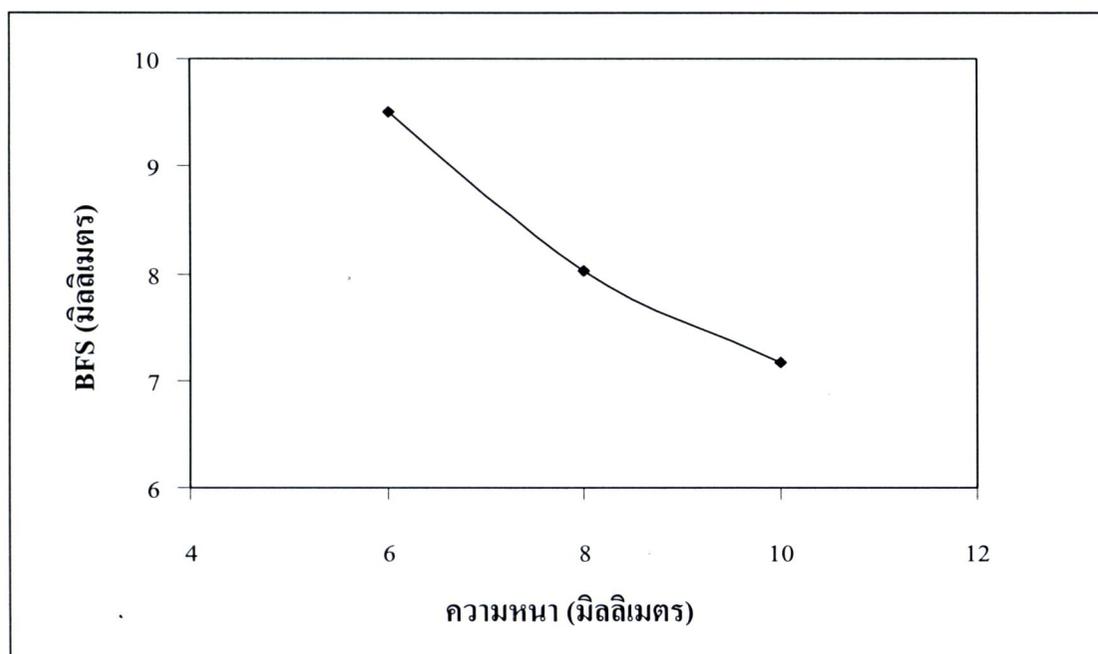
สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด ดังนั้นในการศึกษาผลของความหนาต่อความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุเชิงประกอบ จึงได้เลือกวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมดังกล่าวข้างต้นมาทำการศึกษา โดยตัวอย่างมีความหนา 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อความต้านทานการเจาะทะลุ ของแต่ละตัวอย่าง แสดงไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงผลของความหนาที่มีต่อความต้านทานการเจาะทะลุและระยะโป่งหลัง (BFS)* ของตัวอย่างสูตร AC6Z1700

ความหนา (มิลลิเมตร)	Back Face Signature (BFS, มิลลิเมตร)	ความต้านทานการเจาะทะลุ
10	7.16	ไม่ทะลุ
8	8.02	ไม่ทะลุ
6	9.50	ไม่ทะลุ

หมายเหตุ:* ทดสอบและวัดค่าตามมาตรฐาน NIJ ด้วยความร่วมมือกับศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีการบินและอวกาศ กองทัพอากาศ



รูปที่ 4.29 แสดงค่า BFS ของตัวอย่างสูตร AC6Z1700 ที่มีความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่แตกต่างกัน

โดยปกติแล้ววัสดุเซรามิกเมื่อมีแรงกระทำจะมี New Surface หรือรอยแตกเกิดขึ้นทำให้ความเค้นลดลงได้ ในขณะที่เดียวกันวัสดุก็จะมีความต้านทานต่อแรงกระทำลดลง เนื่องจากมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งผลกระทบอันนี้จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการป้องกันความต้านทานการเจาะทะลุลดลง ดังนั้นการเพิ่มความหนาของวัสดุจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันความต้านทานการเจาะทะลุได้ และความหนาที่เพิ่มขึ้นยังสามารถช่วยดูดซับ (Absorption) แรงที่มากกระทำได้มากขึ้น (Vemuri Madhu et al., 2005) ซึ่งจากตารางที่ 4.8 และ รูปที่ 4.29 พบว่าเมื่อวัสดุเชิงประกอบมีความหนาเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่า BFS จะลดลง