

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง วิเคราะห์และทดสอบสมบัติทั้งหมด แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์	ผู้ผลิต	แบบ/รุ่น
Particle Size Analyzer	Malvern	Mastersizer S
X-Ray Diffractometer (XRD)	Bruker	D5005
Ball Mill	P.S.C.M.	-
Dryer	ELE	Model SDO 225E1
Vibrator/Shaker	Retsch	AS200
Compression Machine (200 tons)	ELE	ADR2000
Vernier	Mitutoyo	Diamond
High Temperature Furnace (1800°C)	Labquip	Vecstar/VF2
Microhardness Tester	Wilson	450SVD CK-AH
High Speed Diamond Saw	Buehler	Isomet 1000
Grinder&Polisher Machine	Buehler	Ecomet 5
Ultrasonic	NEY	28H
Ion Sputtering Device	JEOL	JFC-1100E
Scanning Electron Microscope (SEM)	JEOL	JSM-6400
Universal Testing Machine	Instron	5569

### 3.2 วัสดุและสารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ประเภทสาร	ชื่อการค้า	ชนิด/เกรด	ผู้ผลิต
สารตั้งต้น	Aluminum Oxide Chromium Oxide	CA 5 M -	Suzhou Dexin Advanced Ceramics Co., Ltd. Carlo Erba Regenti
สารเติมแต่งสมบัติ	Zirconium Oxide	m-ZrO <sub>2</sub>	Riedel-de Haen
สารเพิ่มการยึดเกาะ	Tapioca Starch	Premium Quality	Kriangkrai LTD., Part
สาร Starbilizer	Yttrium Oxide	-	Riedel-de Haen

#### 3.2.1 ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide Powder)

ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (อะลูมินา) สูตรเคมี Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ใช้เกรด CA 5 M เป็นอะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก สิ่งเจือปนหลักได้แก่ โซเดียมออกไซด์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ซิลิการ้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และเหล็กออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก (Suzhou Dexin Advanced Ceramics Co., Ltd.)

#### 3.2.2 ผงโครเมียมออกไซด์ (Chromium Oxide Powder)

ผงโครเมียมออกไซด์ (โครเมีย) สูตรเคมี Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในโรงงานเซรามิกองค์ประกอบหลักประกอบด้วย โครเมียร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก แอมโมเนียมร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก คลอไรด์ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก ตะกั่วร้อยละ 0.002 โดยน้ำหนัก ซัลเฟตร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก เหล็กร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก Water - soluble matter ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักและมลทินอื่น ๆ ร้อยละ 1.718 โดยน้ำหนัก (ข้อมูลจาก บริษัท คาโรเอบรา รีเจนต์ จำกัด)

### 3.2.3 ผงเซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium Oxide Powder)

ผงเซอร์โคเนียมออกไซด์ (เซอร์โคเนีย) สูตรเคมี  $ZrO_2$  เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในโรงงานเซรามิก องค์ประกอบหลักประกอบด้วย เซอร์โคเนียร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก ไททานีयर้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ซิลิการ้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ซัลเฟตร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก เหล็กร้อยละ 0.03 โดยน้ำหนัก และมลทินอื่น ๆ ร้อยละ 0.37 โดยน้ำหนัก (ข้อมูลจาก บริษัท รีเดอร์ เดอ ฮัท จำกัด)

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าองค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้น

องค์ประกอบทางเคมี	อะลูมินา (%wt)*	โครเมียม (%wt)**	เซอร์โคเนีย (%wt)***
$Al_2O_3$	95.0	-	-
$Cr_2O_3$	-	98.0	-
$ZrO_2$	-	-	99.0
$SiO_2$	0.2	-	0.3
$SO_4$	-	0.01	0.2
Fe	-	0.05	0.03
$Fe_2O_3$	0.02	-	-
$Na_2O$	0.3	-	-
CaO	0.1	-	-
$NH_4$	-	0.01	-
Cl	-	0.002	-
Ti	-	-	0.1
Water-soluble matter	-	0.2	-
• อื่น ๆ	4.38	1.718	0.37

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

\*\* ข้อมูลจาก บริษัท คาโร เอบรา รีเจนต์ จำกัด

\*\*\* ข้อมูลจาก บริษัท รีเดอร์ เดอ ฮัท จำกัด

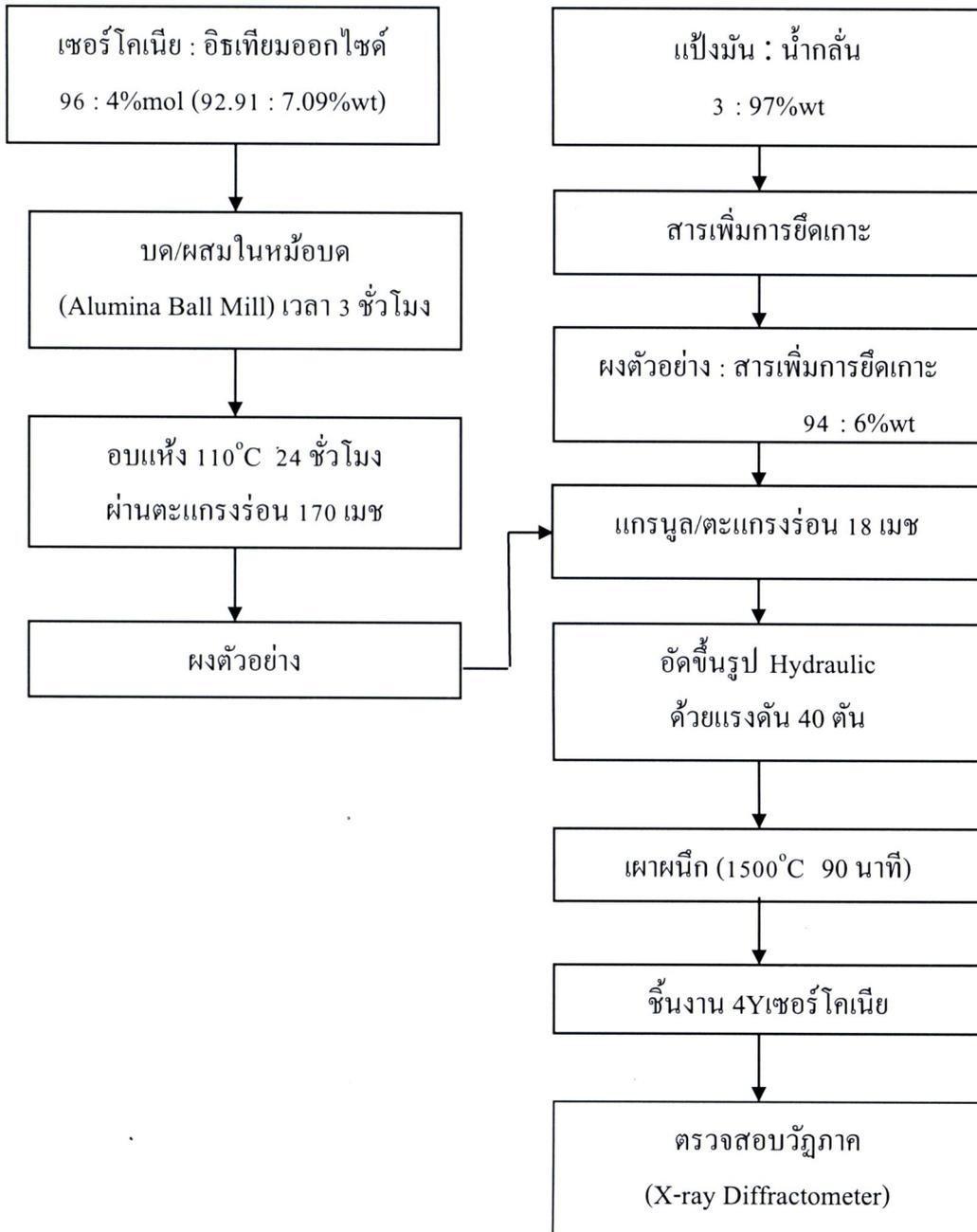
### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การทดลองเบื้องต้น

##### 3.3.1.1 การ Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4% โมลอิทเทียมออกไซด์ (4Y)



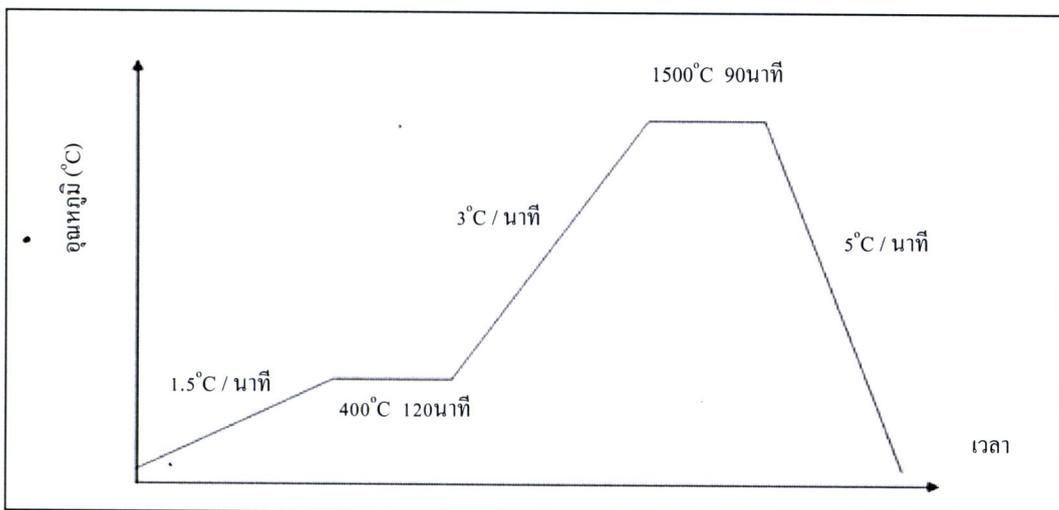
ขั้นตอนและวิธีการ Stabilize เซอร์โคเนีย แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการ Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4% โมลอิทเทียมออกไซด์ (4Y)

### 3.3.1.2 การเตรียมผง Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4%โมลอิทธิพลออกไซด์ (4Y)

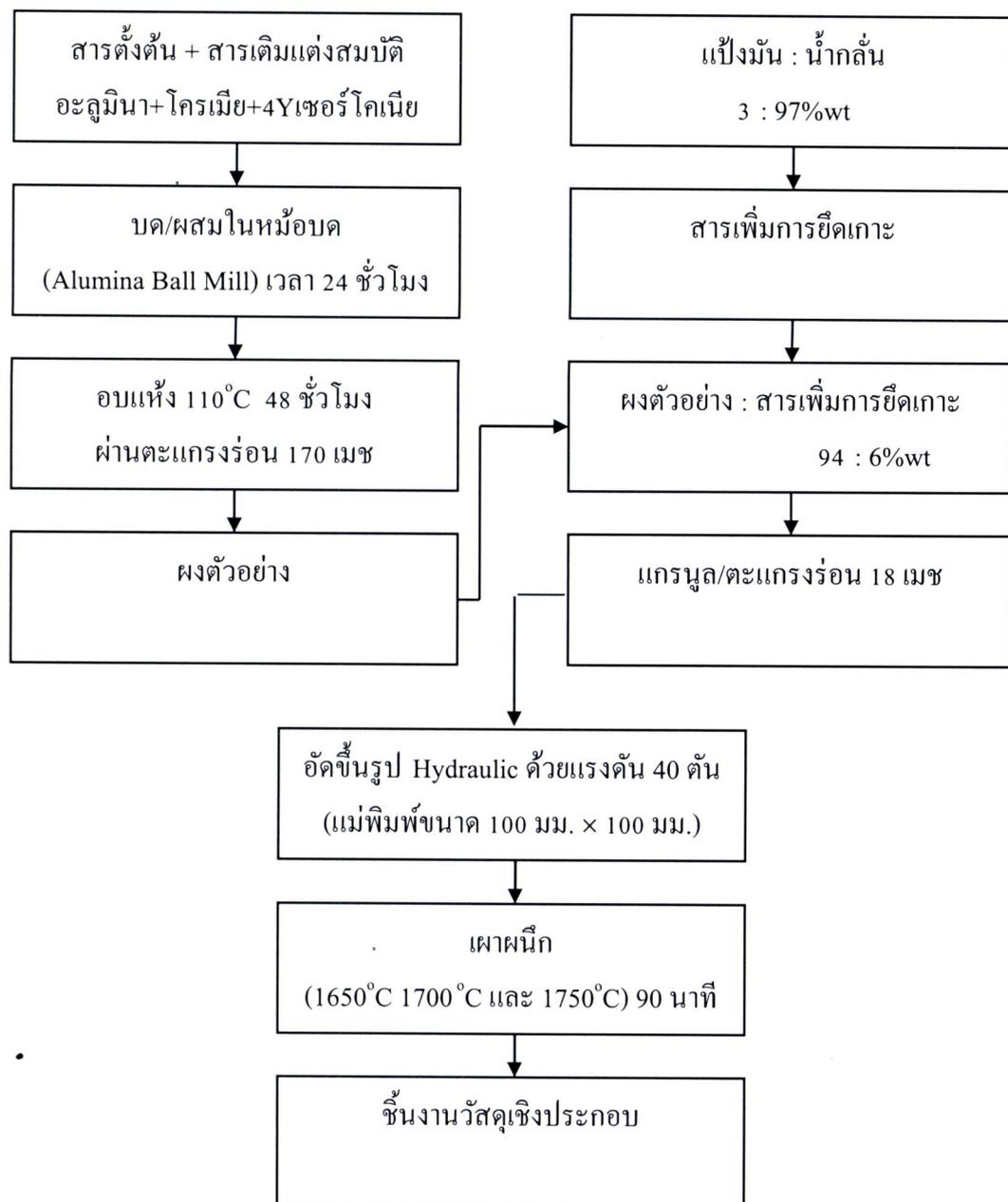
- 1) นำเซอร์โคเนียมาผสมแบบเปียกในหม้อบดกับอิทธิพลออกไซด์ จนเข้ากันในอัตราส่วน 96 : 4%โมล (92.91 : 7.09%wt) โดยใช้เวลาบดผสม 3 ชั่วโมง
- 2) นำผงที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปบด แล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 170 เมช (Mesh)
- 3) เตรียมสารเพิ่มการยึดเกาะซึ่งสามารถทำได้โดยนำน้ำกลั่นและ แป้งมัน (Tapioca Starch) มาผสมในอัตราส่วนร้อยละ 97 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำไปต้มแล้วทำการกวนจนกว่าแป้งมันละลายจนหมดกลายเป็นน้ำกาวเหนียว
- 4) นำผงตัวอย่างที่ได้จาก ข้อ 2. มาบดผสมกับสารเพิ่มการยึดเกาะที่ได้จาก ข้อ 3. ในอัตราส่วนร้อยละ 97 ต่อ 6 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำผงตัวอย่างที่มีความเหนียวไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 18 เมช เพื่อให้ได้อนุภาคที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมง่ายต่อการขึ้นรูป
- 5) นำผงตัวอย่างที่ได้จากข้อ 4. มาทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกโดยใช้แรงอัด 40 ตัน แม่พิมพ์อัดขนาด 100 x 100 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C โดยใช้เวลาเผาแซ่ 90 นาที
- 6) นำชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกที่ได้จากข้อ 5. มาทำการบดแห้งด้วยโกร้งแล้วนำผงที่ได้ไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 120 เมช (Mesh) จากนั้นนำผงตัวอย่างที่ได้ไปทำการตรวจสอบวิฤภาคด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นตัวอย่างการเตรียมผง Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4%โมลอิทธิพลออกไซด์ (4Y)

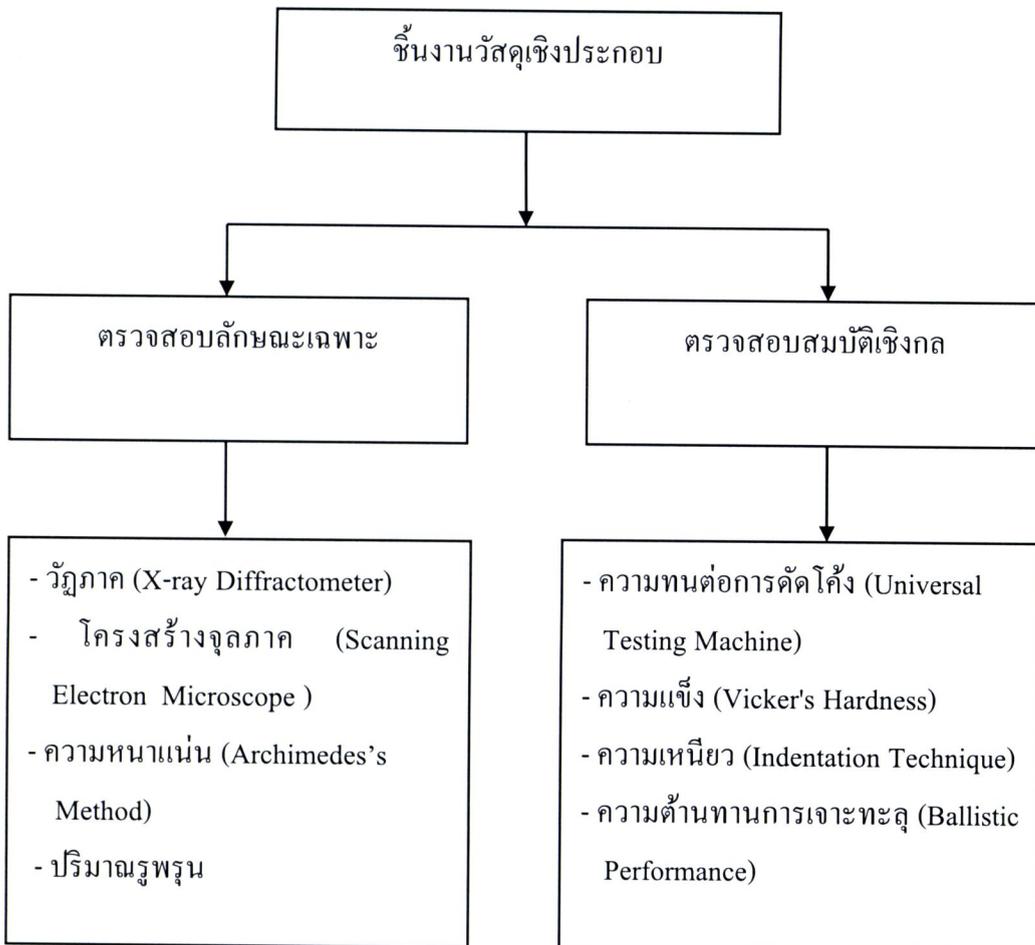
### 3.3.2 การทดลองในงานวิจัย

ขั้นตอนและวิธีการทดลองแบ่งเป็น 2 การทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.5

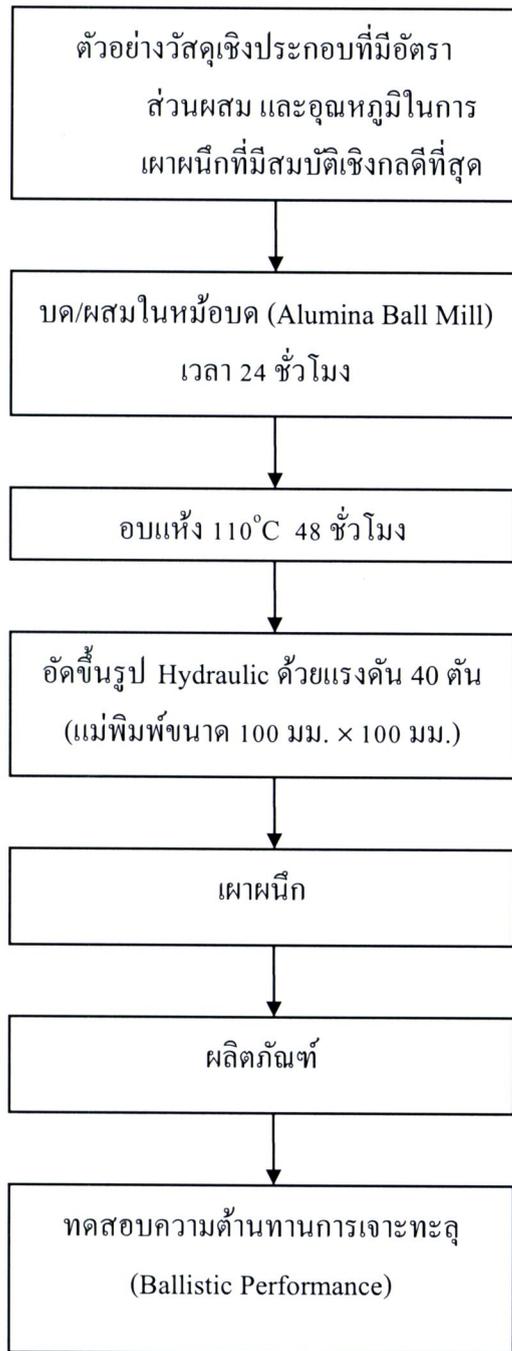


รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลอง ตามการทดลองที่ 1

หลังจากนั้นนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากระบวนการเตรียมในรูปที่ 3.3 จะนำมาตรวจสอบลักษณะเฉพาะและตรวจสอบสมบัติเชิงกลดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการตรวจสอบลักษณะเฉพาะและการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลอง ตามการทดลองที่ 2

จากรูปที่ 3.3 - 3.5 สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนและวิธีการทดลองโดยละเอียด ดังนี้

### 3.3.3 การออกแบบการทดลอง

การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้น ซึ่งได้แก่ อะลูมินา และโครเมีย ต่อสารเติมแต่งสมบัติ ซึ่งได้แก่ เซอร์โคเนีย ที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-โครเมีย/เซอร์โคเนีย มีสมบัติเชิงกลซึ่งได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็ง ความเหนียว และความต้านทานการเจาะทะลุ ที่เหมาะสมที่สุดต่อการใช้งาน โดยตัวแปรคือ ปริมาณของเซอร์โคเนีย ที่เติมลงในอะลูมินา และอุณหภูมิในการเผาพูนึก ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงอัตราส่วนผสมของสารตั้งต้น สารเติมแต่ง และอุณหภูมิในการเผาพูนึกของการทดลองที่ 1

รหัสตัวอย่าง	สารตั้งต้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		สารเติมแต่ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4Y-ZrO <sub>2</sub>		
A1650	100	0	0	1650	90
AC1650	97	3	0		
AC2Z1650	95	3	2		
AC4Z1650	93	3	4		
AC6Z1650	91	3	6		
A1700	100	0	0	1700	90
AC1700	97	3	0		
AC2Z1700	95	3	2		
AC4Z1700	93	3	4		
•AC6Z1700	91	3	6		
A1750	100	0	0	1750	90
AC1750	97	3	0		
AC2Z1750	95	3	2		
AC4Z1750	93	3	4		
AC6Z1750	91	3	6		

การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่มีต่อความต้านทานการเจาะทะลุ โดยการทดลองจะเลือกตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสม และ อุณหภูมิในการเผาผนึก ที่ทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบดีที่สุดจากการทดลองที่ 1 นำมาทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ (Ballistic Performance) โดยมีตัวแปรคือ ความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่มีค่าเท่ากับ 6 และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับ

### 3.3.4 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น

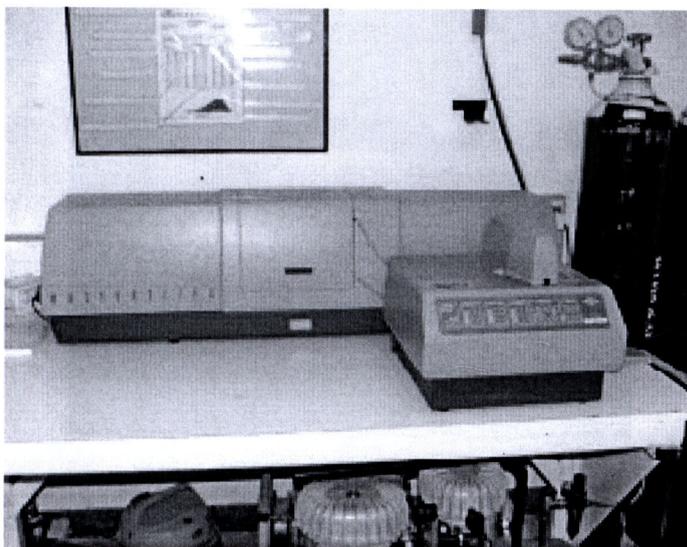
#### 3.3.4.1 การหาขนาดและการกระจายอนุภาคของผงตัวอย่าง

การหาขนาดและการกระจายอนุภาคของผงตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการการกระเจิงและการเลี้ยวเบนของแสง ใช้ซีเลียม-นีออนเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง

เครื่องมือ: Mastersizer S ของบริษัท Malvern Instruments Ltd.

วิธีการทดสอบ

- 1) ชั่งผงตัวอย่างโดยการสุ่มปริมาณ 2 กรัม
- 2) เตรียมสารละลาย Calgon 1 เปอร์เซ็นต์
- 3) เติมสารละลายในข้อ 2. ผสมกับผงตัวอย่าง 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 4) นำไปเขย่าด้วยเครื่องสั่นสะเทือนโดยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.6 แสดงเครื่อง Particle Size Analyzer

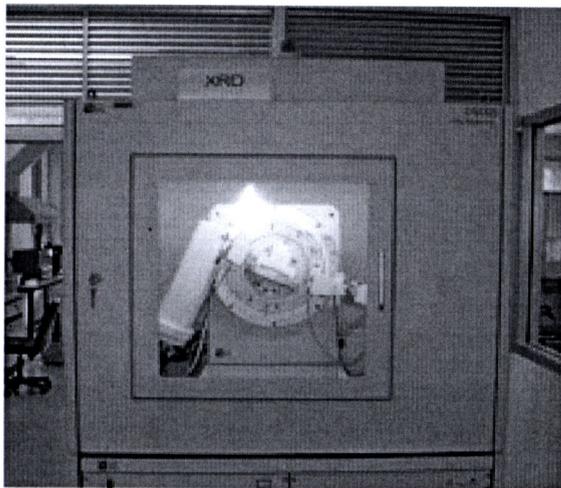
### 3.3.4.2 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส (Phase Analysis)

การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของตัวอย่าง โดยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) จากผลึกของสารจะให้แพทเทิร์น (Pattern) การเลี้ยวเบนเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิดตามกฎของแบรกก์ (Bragg's Law)

เครื่องมือ: XRD (PW3710 BASED) ของบริษัท Bruker ใช้  $\text{CuK}\alpha$  เป็นแหล่งกำเนิดรังสี  
วิธีการทดสอบ

- 1) โปรมองตัวอย่างลงบนกรอบใส่ผงตัวอย่าง (Sample holder)
- 2) ใช้แผ่นกระจกกดตัวอย่างที่อยู่ในกรอบใส่ผงตัวอย่างให้เรียบแน่น
- 3) นำฝาหลังปิดเข้ากับกรอบใส่ผงตัวอย่างแล้วนำไปตรวจวิเคราะห์ที่สถานะที่ใช้ในการทดสอบ

Generator tension	=	40 KV
Generator current	=	40 mA
Start angle	=	$20^\circ$
End angle	=	$70^\circ$
Time per step	=	0.1s
Step size	=	$0.02^\circ$



รูปที่ 3.7 แสดงเครื่อง X-ray diffraction, XRD

### 3.3.5 การเตรียมแผ่นตัวอย่าง

1) นำผงอะลูมินา มาบดผสมกับโครเมียมปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นสารตั้งต้น และสารเติมแต่งสมบัติซึ่งจะใช้ (4Y)เซอร์โคเนียปริมาณร้อยละ 0-6 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3.4 ทำการบดผสมด้วย Ball mill เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2) นำผงที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3) หลังจากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปบดแห้งด้วยโกร่ง เพื่อไม่ให้อนุภาคเกิดการจับตัวกันแล้วนำผงที่ได้ไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 170 เมช (Mesh) แล้วจะได้ผงตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่า 90 ไมครอน

4) เตรียมสารเพิ่มการยึดเกาะซึ่งสามารถทำได้โดยนำน้ำกลั่นและแป้งมัน (Tapioca Starch) มาผสมในอัตราส่วนร้อยละ 97 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำไปต้มแล้วทำการกวนจนกว่าแป้งมันละลายจนหมดกลายเป็นน้ำกาวเหนียว

5) นำผงตัวอย่างที่ได้จาก ข้อ 3. มาบดผสมกับสารเพิ่มการยึดเกาะที่ได้จาก ข้อ 4. ในอัตราส่วนร้อยละ 97 ต่อ 6 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำผงตัวอย่างที่มีความเหนียวไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 18 เมช เพื่อให้ได้อนุภาคที่มีลักษณะเป็นเม็ดแกรนูล ง่ายต่อการขึ้นรูป

6) นำผงตัวอย่างที่ได้จาก ข้อ 5. มาทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก (Compression Machine, 200 tons ของบริษัท ELE International) ดังรูปที่ 3.8 โดยใช้แรงอัด 40 ตัน แม่พิมพ์อัดขนาด 100 x 100 มิลลิเมตร ซึ่งจะอัดให้แผ่นตัวอย่างมีความหนา 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.8 แสดงเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกแรงอัดขนาด 200 ตัน

### 3.3.6 การเผาผนึกแผ่นตัวอย่าง

นำแผ่นตัวอย่างที่ผ่านการอัดขึ้นรูปจากข้อ 3.3.5 มาเผาผนึกด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง เพื่อให้ชิ้นงานสุกตัวและเพิ่มความหนาแน่นให้กับชิ้นงาน

เครื่องมือ : High Temperature Furnace (1800°C) ของบริษัท Labquip

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

ช่วงที่ 1

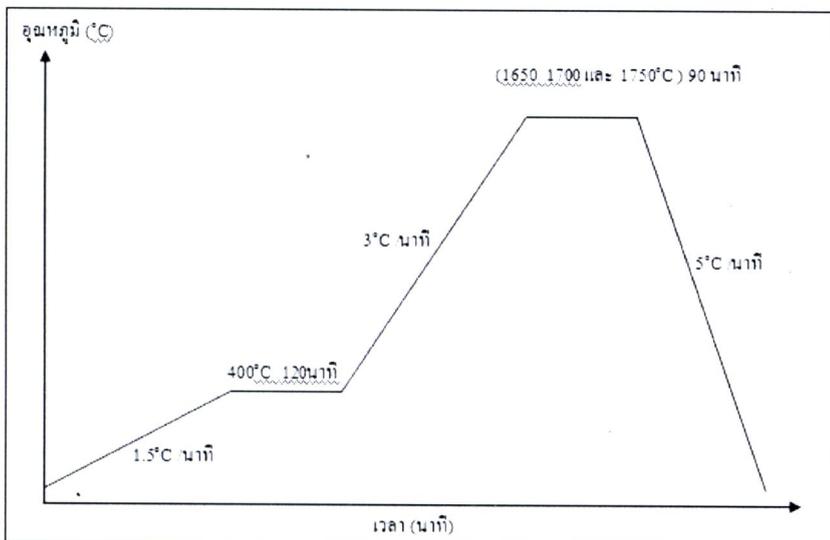
อุณหภูมิ	=	400 องศาเซลเซียส
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	=	1.5 องศาเซลเซียส/นาที
เวลาเผาแซ่	=	120 นาที

ช่วงที่ 2

อุณหภูมิ	=	1650 1700 และ 1750 องศาเซลเซียส
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	=	3 องศาเซลเซียส/นาที
เวลาเผาแซ่	=	90 นาที

ช่วงที่ 3

อุณหภูมิ	=	50 องศาเซลเซียส
อัตราการลดลงของอุณหภูมิ	=	5 องศาเซลเซียส/นาที
บรรยากาศ	=	ปกติ



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นตัวอย่าง

### 3.3.7 การทดสอบความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุนของตัวอย่าง

การทดสอบความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุนของตัวอย่าง จะดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C373-88

วิธีการทดสอบความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุน

- 1) นำชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกไปทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  จากนั้นนำไปพักไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น (Desiccator) แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง ( $W_D$ )
- 2) นำชิ้นงานในข้อที่ 1 ไปต้มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 5 ชั่วโมง (โดยการต้มนั้นต้องให้น้ำท่วมชิ้นงานตลอดเวลา) จากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) นำตัวอย่างในข้อที่ 2 ไปทำการชั่งน้ำหนักแขวนลอยในน้ำ ( $W_{SS}$ )
- 4) นำตัวอย่างที่ผ่านการชั่งน้ำหนักแขวนลอยในน้ำแล้ว มาชั่งน้ำหนักอิมมัวในน้ำ ( $W_S$ ) โดยใช้ผ้าชุบน้ำบิดให้หมาด แล้วเช็ดน้ำส่วนเกินที่ผิวออกแล้วจึงทำการชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำผลที่ได้ไปคำนวณค่าความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุน
- 5) การคำนวณหาความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุนของตัวอย่าง

$$\text{ปริมาตรของตัวอย่าง (V)} = \frac{W_S - W_{SS}}{\rho}$$

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ เท่ากับ  $1 \text{ g/cm}^3$

$$\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง (Bulk Density)} = \frac{W_D}{V}$$

$$\text{ปริมาตรรูพรุน (Apparent Porosity)} = \left[ \frac{W_S - W_D}{V} \right] \times 100$$

### 3.3.8 การทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง (Bending Strength)

ทดสอบความทนต่อการดัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM C1161-90 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงและแรงกดของวัสดุ (Universal Testing Machine)

- 1) การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ

- ตัดตัวอย่างทดสอบให้เป็นแท่งสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ  $10 \times 100 \times 10$  (กว้าง x ยาว x สูง) มิลลิเมตร ( $\pm 0.05$  มิลลิเมตร) ด้วยเครื่องตัดใบตัดเพชรความเร็วต่ำ (Low Speed Diamond Saw)

- ลบมุมเหลี่ยมของตัวอย่างด้วยกระดาษทรายละเอียดแล้วนำไปทดสอบสถานะที่ใช้ในการเตรียม

ใบตัดเพชรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว

$$\text{ความเร็วรอบ} = 150 \text{ รอบ/นาที}$$

$$\text{น้ำหนักกดตัด} = 150 \text{ กรัม}$$

ใช้น้ำหล่อเย็นขณะตัด

2) การทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง

เป็นการทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง โดยใช้เครื่องมือทดสอบแรงดึงและแรงกดของวัสดุ ใช้แรงกระทำกับชิ้นงาน 3 จุด (Three-point flexure)

เครื่องมือ : Universal Testing Machine ของบริษัท Instron

วิธีการทดสอบ

นำตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมาทดสอบ

สถานะที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจตุรกรรับตัวอย่าง	=	2 มิลลิเมตร
ความกว้างของจตุรกรรับตัวอย่าง (Support span)	=	50 มิลลิเมตร
ความเร็วในการกดดัดโค้ง (Crosshead speed)	=	0.1 มิลลิเมตร/นาที
จำนวนตัวอย่าง	=	15 ตัวอย่าง
ทดสอบซ้ำตัวอย่างละ	=	3 ครั้ง
ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง		

การคำนวณความทนต่อการดัดโค้งคำนวณได้จากสมการ (3-3)

$$MOR = \frac{3PL}{2bd^2} \text{ MPa} \tag{3-1}$$



- โดย MOR = ความทนต่อการดัดโค้งของชิ้นงาน  
 P = ขนาดของแรงกดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก  
 L = ความกว้างของจตุรกรรับตัวอย่าง  
 b = ความกว้างของตัวอย่าง  
 d = ความสูงของตัวอย่าง

การคำนวณค่าเฉลี่ยของความทนต่อการดัดโค้งคำนวณได้จากสมการ (3-2)

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} \tag{3-2}$$

- โดย  $\bar{X}$  = ค่าเฉลี่ยของความทนต่อการดัดโค้ง  
 $\sum X$  = ผลรวมของความทนต่อการดัดโค้ง  
 N = จำนวนตัวอย่าง

การคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความทนต่อการดัดโค้งคำนวณได้จากสมการ (3-3)

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (3-3)$$

- โดย S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
 $X_i$  = ค่าความทนต่อการดัดโค้งของตัวอย่าง  
 $\bar{X}$  = ค่าเฉลี่ยของความทนต่อการดัดโค้ง  
 $N$  = จำนวนตัวอย่าง

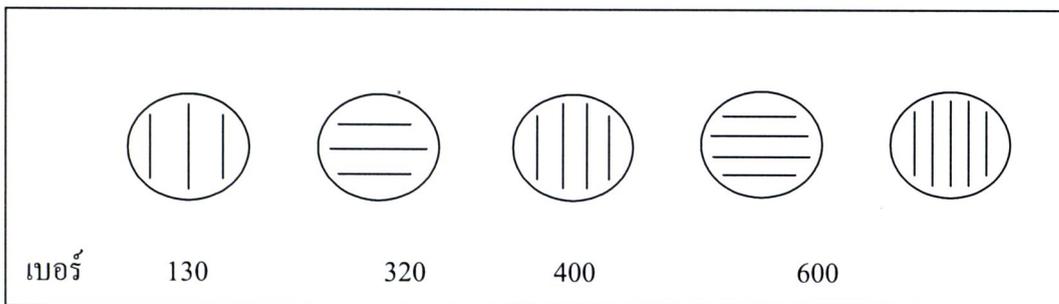
### 3.3.9 ทดสอบความแข็งจุลภาค (Microhardness Test)

การทดสอบความแข็งจุลภาคตามมาตรฐาน ASTM E384-89

เครื่องมือ : Microhardness Tester ของบริษัท Wilson

วิธีทดสอบ

- เตรียมตัวอย่างโดยการขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทราย เรียงลำดับในการขัดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ที่มีความหยาบไปหาละเอียด (เบอร์ 130-1000) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (เมื่อมีการเปลี่ยนกระดาษทรายต้องวางชิ้นงานให้ตัดกับรอยเดิมทุกครั้ง)



รูปที่ 3.10 แสดงการเรียงลำดับในการขัดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ที่มีความหยาบไปหาละเอียด

- นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1. มาขัดผิวละเอียดด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 0.3 ไมครอน และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับ บนงานขัดแบบผ้า

- 3) ทำความสะอาดด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ เพื่อขจัดคราบไขมัน
- 4) ล้างอนุภาคที่จับเกาะผิวหน้าตัวอย่างออก ด้วยเครื่องสั่นสะเทือนคลื่นความถี่สูงแล้วนำไปทดสอบ

5) สภาพที่ใช้ในการทดสอบ

น้ำหนักกด = 5 กิโลกรัม (49.033 นิวตัน)

เวลากดแช่ = 15 วินาที

กำลังขยายในการวัดรอยกด = 100 เท่า

จำนวนจุดกด = 5 จุด

หัวกดเป็นเพชรรูปทรงสี่เหลี่ยมปิรามิดมีมุมปลายแหลม 136 องศา

การคำนวณหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (HV) คำนวณตามสมการ (3-4)

$$H_v = 0.1891F / d^2 \quad (3-4)$$

โดย  $H_v$  = ความแข็งวิกเกอร์ หน่วยเป็น นิวตัน/ ตารางมิลลิเมตร

$d$  = เส้นทแยงมุมของรอยกด หน่วยเป็น มิลลิเมตร โดยหาได้จาก  $(d_1 + d_2) / 2$

$F$  = แรงที่ใช้กด หน่วยเป็น นิวตัน

### 3.3.10 การหาค่าความเหนียว

การหาค่าความเหนียวโดยใช้เทคนิคอินเดนเทนชันของแอนทิสและคณะ (Anstis G.R., Chantikul P., Lawn B.R., and Marshall D.B., 1981) คำนวณได้จากสมการ (3-5)

$$K_{IC} = \xi (E/H)^{1/2} P / C^{3/2} \quad (3-5)$$

โดย  $K_{IC}$  = ค่าความต้านทานการยืดยาวออกของรอยร้าว (ความเหนียว)

$E$  = ค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus)

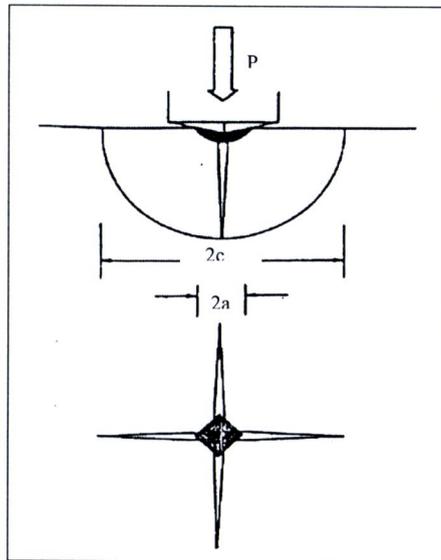
$H$  = ค่าความแข็ง

$P$  = ขนาดแรงกดอินเดนเทนชัน

$C$  = ความยาวรอยแตก/2

$\xi$  = ค่าคงที่ ที่ได้จากการทดลองอินเดนเทนชัน โดยการใช้หัวกดแบบวิกเกอร์ของแอนทิส และคณะ ซึ่งมีค่าประมาณ  $0.016 \pm 0.004$

สถานะที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความเหนียวใช้สถานะเดียวกันกับการทดสอบความแข็ง  
จุดภาค



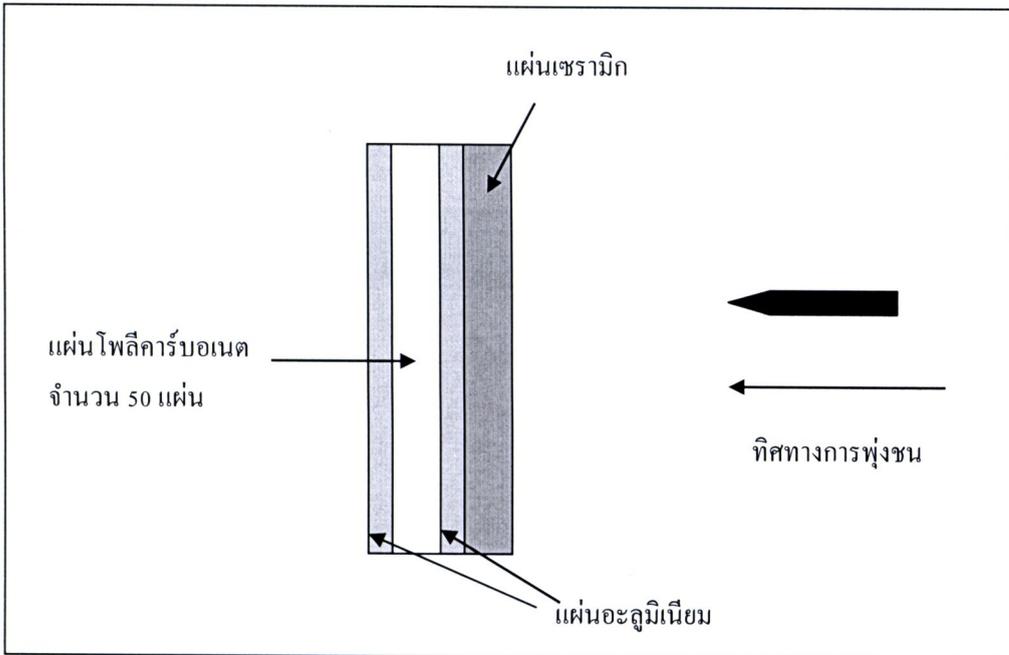
รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะรอยกดและความยาวรอยแตกของชิ้นงาน (Ansis et al., 1981)

### 3.3.11 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ (Ballistic Performance Testing)

การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุนั้นจะทดสอบตามมาตรฐาน NIJ.0101.03 และ NIJ.0101.04

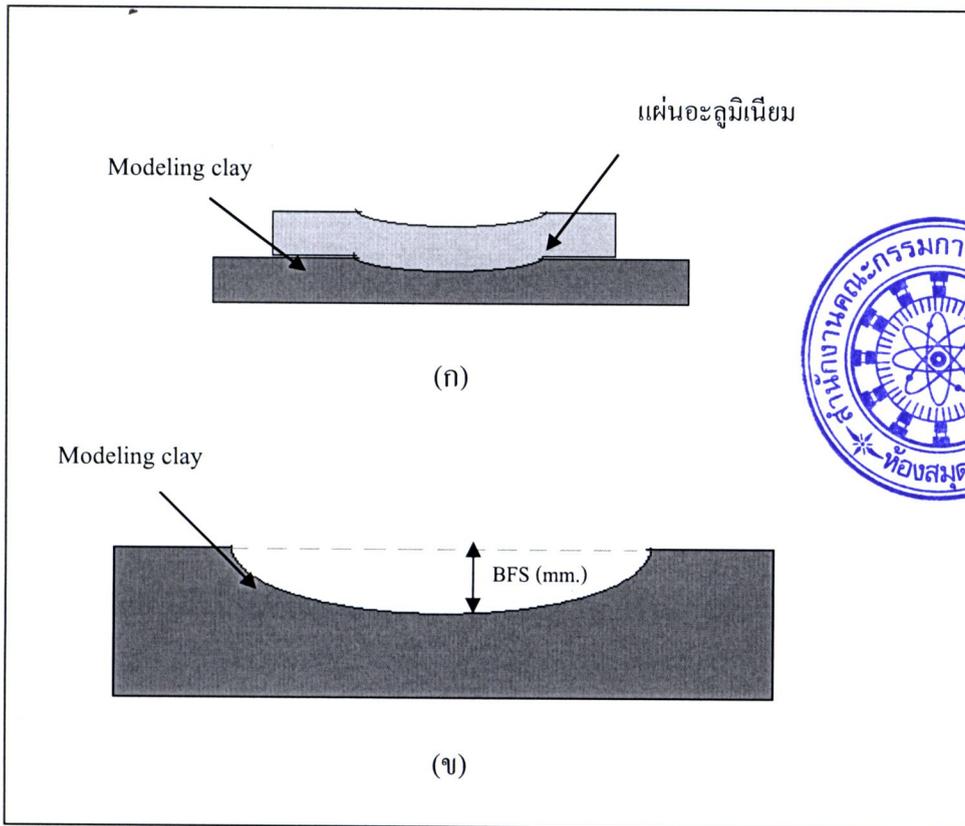
วิธีทดสอบ

- 1) เตรียมวัสดุ Backing Plate ซึ่งทำโดย การนำแผ่นอะลูมิเนียม ที่มีความหนา 1.38 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น มาปะกบด้านหน้าและหลังของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate) ที่มีความหนา 0.2 มิลลิเมตร จำนวน 50 แผ่น
- 2) นำแผ่นเซรามิกที่ได้จากงานวิจัยมาติดกับ Backing Plate ที่ได้จากข้อ 1. โดยใช้ Epoxy Resin เกรด High Strength ซึ่งตัวอย่างที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ

- 3) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 2. ไปทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุโดยใช้อาวุธปืน M16 A1 ใช้กระสุนขนาด 5.56 x 45 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วประมาณ 900 เมตรต่อวินาที ที่ระยะการยิง 15 เมตร ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3
- 4) นำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบจากข้อ 3. มาวัดการโป่งหลัง (Blunt Trauma) ซึ่งจะคิดค่าออกมาโดยเรียกว่า Back Face Signature (BFS) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร สำหรับการวัดค่า Back Face Signature (BFS) นั้นจะวัดโดยวิธี Modeling clay (E. Medvedovski, 2006) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งโดยทั่วไปตามมาตรฐาน NIJ จะยอมรับค่า BFS ได้ไม่เกิน 44 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.13 (ก) และ (ข) แสดงวิธีการวัดค่า BFS โดยวิธี Modeling clay

### 3.3.12 การหาค่าความเปราะ (Brittleness Factor)

การหาค่าความเปราะใช้เทคนิคของ J.B.Quinn (J.B.Quinn, 1997) คำนวณได้จากสมการ (3-6)

$$B = HE / K_{IC}^2 \quad (3-6)$$

- โดย
- B = ค่าความเปราะ
  - E = ค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus)
  - H = ค่าความแข็ง
  - $K_{IC}$  = ค่าความเหนียว

### 3.3.13 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Analysis)

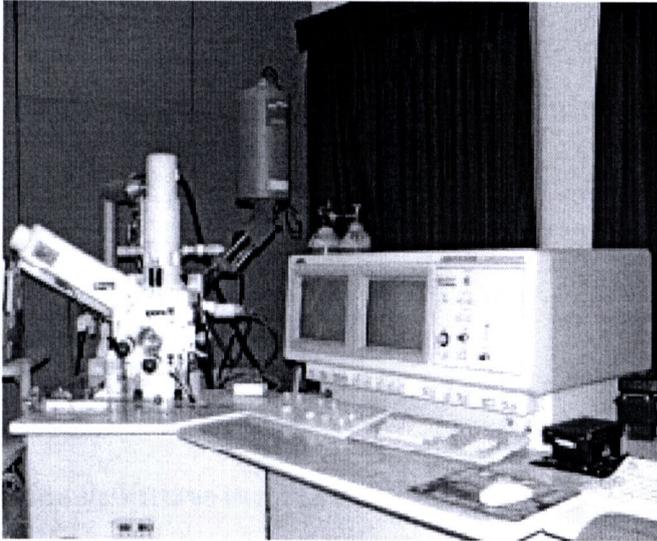
การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคทั่วไปของตัวอย่าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

#### 3.3.13.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

- 1) เตรียมตัวอย่างโดยการขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทราย เรียงลำดับในการขัดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ที่มีความหยาบไปหาละเอียด ดังแสดงตามรูปที่ 3.10
- 2) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1. มาขัดผิวละเอียดด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 0.3 ไมครอน และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับ บนจานขัดแบบผ้า
- 3) ทำความสะอาดตัวอย่างด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ จากนั้นใช้เครื่องเป่าแห้ง (Dryer) เป่าให้แห้ง
- 4) ขัดสิ่งปนเปื้อนที่อยู่บนผิวหน้าชิ้นงานออก โดยใช้เครื่องสั่นสะเทือนคลื่นความถี่สูง
- 5) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 4. นำไปฉาบทองด้วยเครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยไอออน (Ion Sputtering Device ของบริษัท JEOL)
- 6) นำตัวอย่างที่ผ่านการฉาบด้วยทองไปถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.14 แสดงเครื่อง Ion Sputtering Device



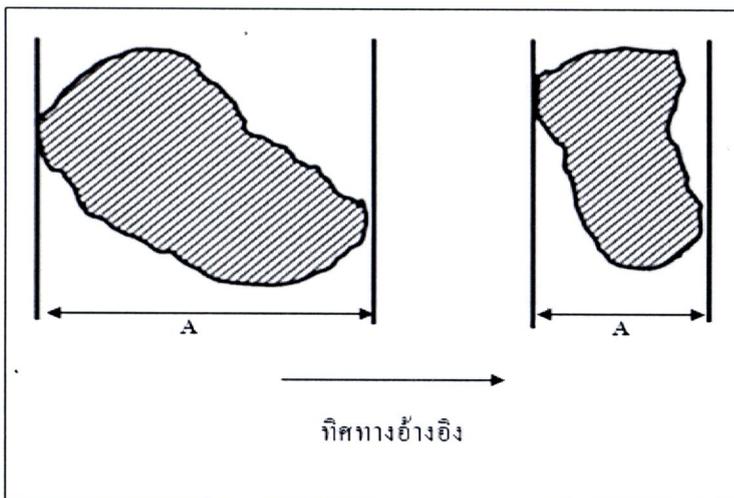
รูปที่ 3.15 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด

### 3.3.13.2 การวัดขนาดเกรนของตัวอย่าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบจะทำในลักษณะเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างในหัวข้อ 3.3.13.1

วิธีการทดสอบ

การทดสอบจะวัดขนาดเกรนของตัวอย่างตามวิธีของเฟอร์เรต์ (Ferret's method) โดยการลากเส้นขนานและเส้นสัมผัสที่ขอบทั้งสองข้างของเกรนที่ต้องการวัดจากนั้นกำหนดทิศทางอ้างอิง แล้วจึงทำการวัดขนาดของเกรนตามทิศทางนั้นตลอดดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงการวัดขนาดเกรนของตัวอย่างตามวิธีของเฟอร์เรต์