บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

จุดประสงค์ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เพื่อศึกษาวิจัยการผลิตแผ่นรองรับอะลูมินา สำหรับใช้งานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะได้อธิบายตามลำดับดังต่อไปนี้

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

วัตถุดิบและสารเคมี ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ส่วนมากได้จากประเทศญี่ปุ่น เพราะยังหาซื้อได้ยากในประเทศไทย เนื่องจากในประเทศไทยเรายังมีการศึกษาในเรื่องนี้น้อยมาก ทำให้ตลาดทางด้านนี้ยังแคบอยู่

ตารางที่ 9 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

วัตถุดิบ - สารเคมี	ชื่อทางการค้า	ชื่อทางเคมี	สูตรทางเคมี
ผงละลุมินา (Alumina Powder)	Tabular alumina A-12-325	อะลุมินา	Al_2O_3
สารช่วยปรับปรุงคุณสมบัติ	Lab grade magnesia	แมกนีเซีย	MgO
สารช่วยกระจายลอยตัว (Deflocculant)	A30-SL	แอมโมเนียมโพลีอะคริเลท (Ammonium Poly acrylate)	
สารช่วยเพิ่มการยึดเกาะ (Binder)	WA-320	โพลีอะคริเลท เอสเทอร์ (Polyacylate ester)	
สารไล่ฟอง (Defoamer)	Pronarl 502		
สารช่วยละลาย	น้ำกลั่น	distilled water	H_2O

3.1.1 ผงอะลุมินา (Alumina powders)

ผงอะลุมินาที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ แทบุลาร์ อะลุมินา ชนิด A-12-325 หมายถึง อะลุมิน่าที่ผ่าน 325 เมช ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 สมบัติของแทบุลาร์ อะลูมินา ชนิด A-12-325

สมบัติ		ค่าที่วัดได้
Chemical analysis wt.%	Al_2O_3	99.32
	Na_2O	.19
	SiO_2	.041
	Fe_2O_3	0.044
	B_2O_3	0.003
Soluble	Na_2O	0.40
Surface area		1.0 m^2/g
Median Particle size		4 μ m
Green density		2.14 g/cm^3
Fired density		3.57 g/cm3
Shrinkage		14.54 %

ที่มา : Aluminum Company of America (Alcoa)

3.1.2 สารช่วยปรับปรุงคุณสมบัติ (Additive)

สารช่วยปรับปรุงคุณสมบัติที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ แมกนีเซีย (MgO) มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว เป็นชนิดที่ใช้ในห้องทดลอง (Lab. grade)

3.1.3 สารช่วยกระจายลอยตัว (Deflocculant)

สารช่วยกระจายลอยตัวที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ เกลือแอมโมเนียม โพลีอะคริเลท (Ammonium salt polyacrylate) ชื่อทางการค้า คือ A30-SL สั่งโดยตรง

จากประเทศญี่ปุ่น ลักษณะเป็นของเหลวข้น สีน้ำตาล

3.1.4 สารช่วยเพิ่มการยึดเกาะ (Binder)

สารช่วยเพิ่มการยึดเกาะที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ โพลีอะคริเลทเอสเทอร์ (Polyacrylate-ester) ชื่อทางการค้า คือ WA-320 สั่งโดยตรงจากประเทศญี่ปุ่น ลักษณะเป็นของเหลวข้นสีขาวขุ่น

3.1.5 สารไล่ฟอง (Defoamer)

สารไล่ฟองที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ สารซิลิโคนที่มีแอลกอฮอล์เปอร์เซนต์สูง (ไม่ทราบชื่อที่แท้จริง) ชื่อทางการค้า คือ Pronarl 502 สั่งโดยตรงจากประเทศญี่ปุ่น ลักษณะเป็นของเหลวข้นสีขาวใส

3.1.6 สารช่วยในการขึ้นรูป (Dispersion)

สารช่วยในการขึ้นรูปที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ น้ำกลั่น (Distilled water)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการศึกษาวิจัย

ตารางที่ 11 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัยมีดังนี้

ลำดับที่	เครื่องมือ	ที่มา
1	เตาเผาอุณหภูมิสูง (1600 °C) (Super Burn Furnace)	สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ (ม.จุฬา)
2	หม้อบดและลูกบดชนิดอะลูมินา (Alumina Potmill and Media) หม้อบดอะลูมินา 98% ลูกบดอะลูมินา 86% พร้อมเครื่องบด	สร้างขึ้นเอง
3	เครื่องวัดความหนืด (Viscometer)	บริษัทแห่งหนึ่ง
4	เครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดูโครงสร้างของสาร Scanning Electron Microscope	ศูนย์เครื่องมือ (ม.จุฬา)
5	เครื่องหาขนาดอนุภาพ (Particle Size Analyzer)	สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ (ม.จุฬา)
6	เครื่องวัดความแข็งแรง (MOR)	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ (ม.จุฬา)
7	เครื่องหาค่าการขยายตัวเมื่อถูกความ-ร้อนของสาร (Dilatometer)	คอมพาวเคลย์
8	เครื่องหาค่า pH (pH Meter)	ม.เกษตรศาสตร์
9	เครื่องเอ็กซ์-เรย์หาองค์ประกอบของ-สาร (X-Ray Diffractometer)	ภาควิชาฟิสิกส์ (ม.จุฬา)

ลำดับที่	เครื่องมือ	ที่มา
10	เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้า	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ (ม.จุฬา)
11	เครื่องดอกเตอร์ เบลด (Doctor blade)	สร้างขึ้นเอง
12	เครื่องชั่งไฟฟ้า	วค.พระนคร
13	เครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี (x-ray fluorescence)	ศูนย์เครื่องมือ (ม.จุฬา)
14	เครื่องหาความราบเรียบผิว (Surface roughness tester)	ศูนย์เครื่องมือ (ม.จุฬา)

3.2.1 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Super burn furnace)

เตาเผานับได้ว่าเป็นเครื่องมือที่จำเป็น และสำคัญอย่างยิ่งในการทำอุตสาหกรรมเซรามิก หรืออาจจะกล่าวได้ว่าเป็นหัวใจของงาน ชนิดนี้ทีเดียว ซึ่งความสำเร็จทั้งหลายขึ้นอยู่กับเตาเผาเป็นหลักสำคัญ

เตาเผาเซรามิก ถ้าแบ่งตามชนิดของเชื้อเพลิงแล้ว เราเรียกชื่อเตาเผานั้นตามชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ เช่น เตาแก๊ส เตาฟืน เตาถ่านหิน เตาน้ำมัน เตาไฟฟ้า

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เราเลือกใช้เตาไฟฟ้า เพราะว่าเตาไฟฟ้าเป็นเตาที่สามารถควบคุมบรรยากาศในการเผาแบบออกซิเดรชั่นได้ดีที่สุด เผาได้ที่อุณหภูมิสูงตามชนิดของฮีทเตอร์ และวัสดุที่ใช้บุห้องเผาไหม้ เป็นเตาเผาแบบซุปเปอร์เบิร์น คือ สามารถเผาได้ที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 1500 องศาเซลเซียสขึ้นไป ใช้โมลิบดินัมเป็นฮีตเตอร์ควบคุมอุณหภูมิ และตั้งโปรแกรมการเผาด้วยระบบคอมพิวเตอร์

3.2.2 เครื่องบด (Grinding machine)

เครื่องบดเป็นสิ่งจำเป็นอีกเครื่องหนึ่งที่จะต้องใช้ในการบดเพื่อลดขนาดอนุภาค และผสมไปในตัวพร้อมกัน เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ในอุตสาหกรรมเซรามิก มีหม้อบดหลายชนิด เช่น ชนิดพอร์ชเลน ไฮอะลูมินา พลาสติก ยางเซอร์โคเนีย ทังสเตนคาร์ไบด์ เป็นต้น ในการบดผงอะลูมินามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้หม้อบดและลูกบดชนิดอะลูมินา เพื่อให้การบดมีประสิทธิภาพ และไม่มีสิ่งเจือปนอันเกิดจากการสึกหรอของหม้อบดและลูกบด ผสมเป็นส่วนเกินในอะลูมินาสเลอร์รี

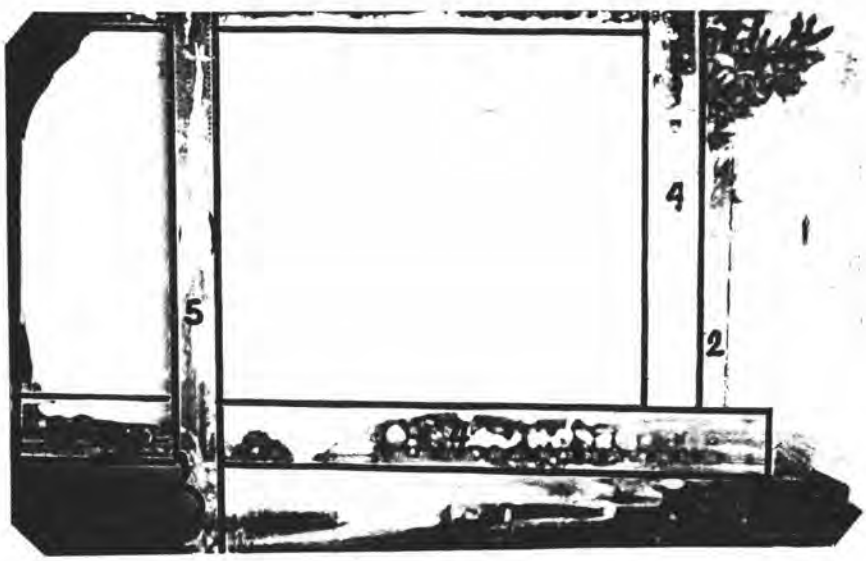
เครื่องบดที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้จัดเตรียมขึ้นเองด้านในเป็นไฮอะลูมินา ด้านนอกเป็นเหล็กชุบโครเมียม

3.2.3 อุปกรณ์ที่ช่วยในการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เครื่องมือที่หาไม่ได้ คือ ดอกเตอร์เบลด (Doctor Blade) ฉะนั้นผู้ทำการศึกษาวิจัยจึงต้องสร้างเครื่องมือขึ้นมาชุดหนึ่งที่มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับดอกเตอร์เบลด ซึ่งจะต้องอาศัยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 12 อุปกรณ์ที่ใช้ช่วยในการศึกษาวิจัย

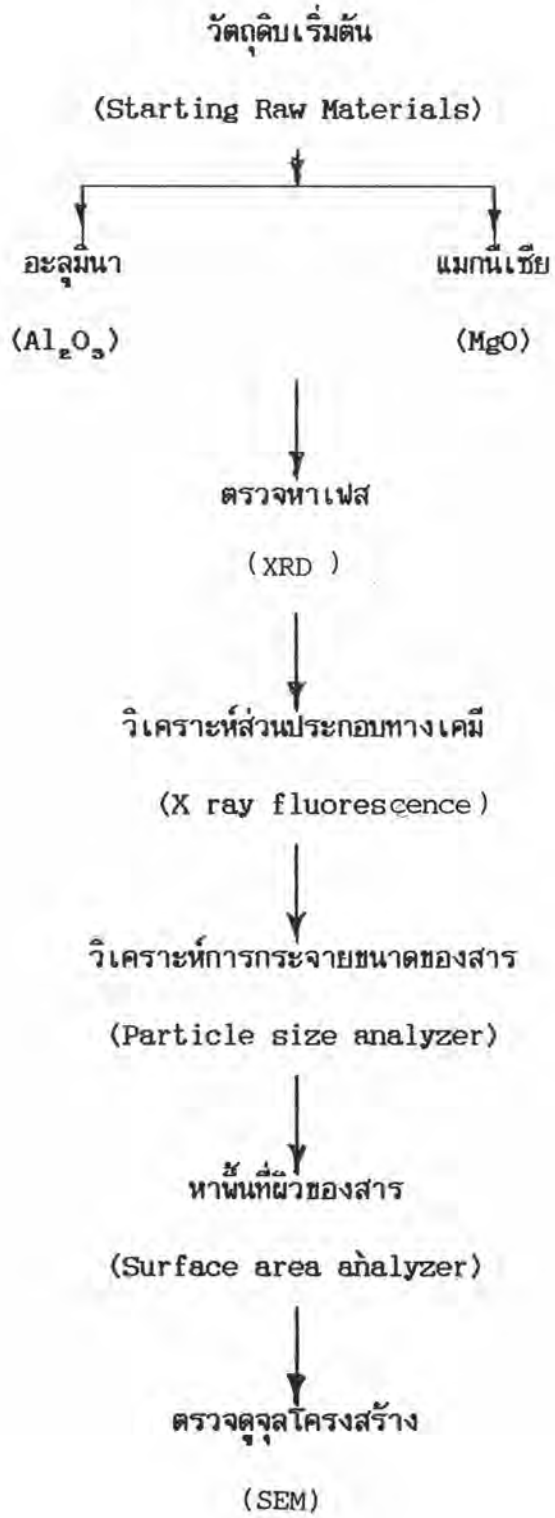
ลำดับที่	อุปกรณ์	หน้าที่
1	กระจกแผ่นเรียบ ขนาด 15" x 15"	เป็นพื้นแทนสายพาน
2	แผ่นฟิล์มใส	ตัวรองรับอะลูมินาสลิปแทนแผ่นพลาสติก
3	โต๊ะ	แท่นเครื่อง
4	ไม้บรรทัดพลาสติกชนิดบาง 1.0 ม.ม. 4 อัน	แทนที่ตั้งใบมีดบังคับอลูมินาสเลอร์รี
5	ไม้ฟุตเหล็ก 1 อัน	แทนใบมีดของดอกเตอร์เบลด
6	คัดเตอร์	ใช้ตัดชิ้นงาน
7	เวอร์เนีย	ใช้วัดขนาดของชิ้นงาน

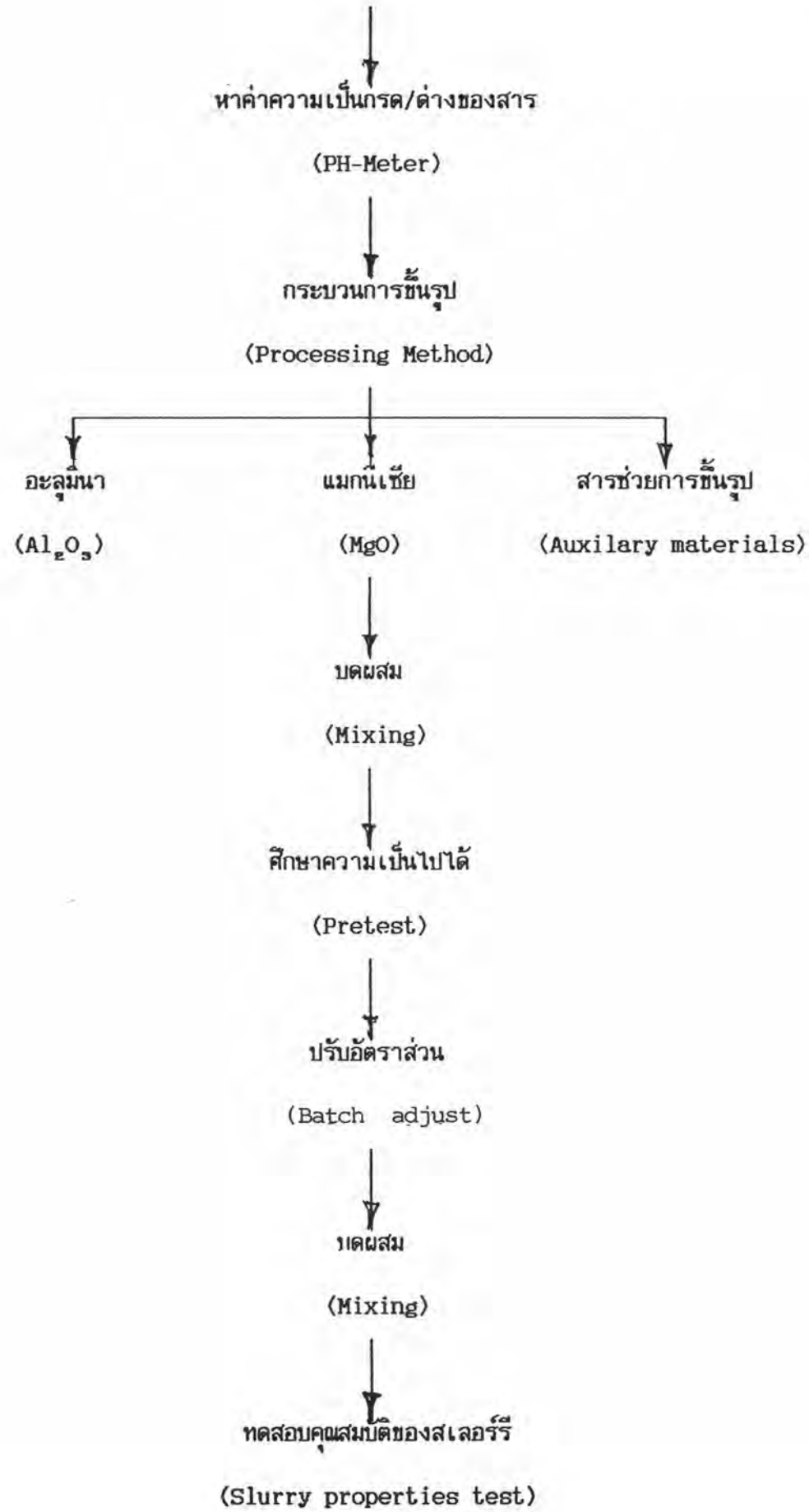


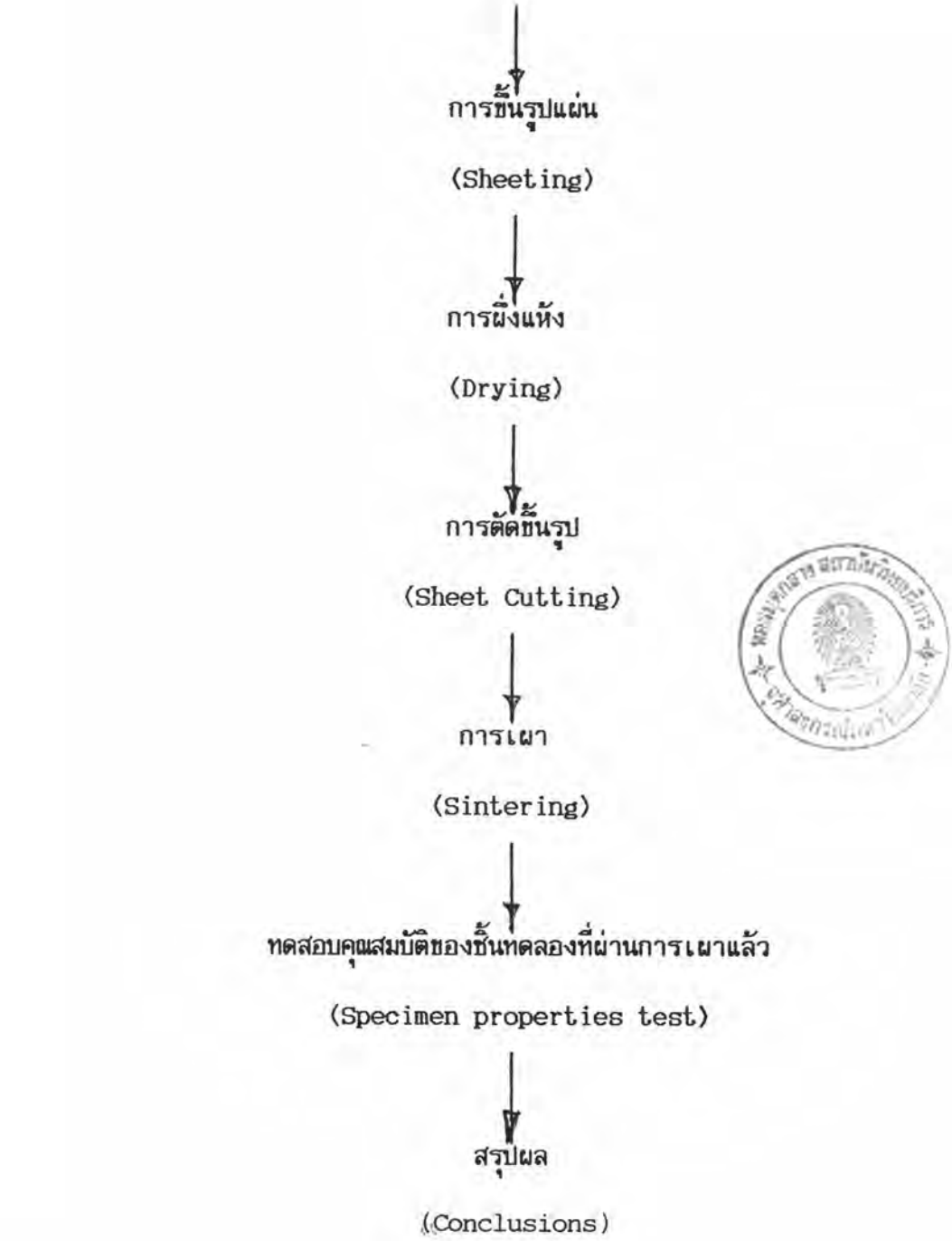
ภาพที่ 32 วิธีการใช้อุปกรณ์ช่วยในการศึกษาวิจัย

3.3 <u>วิธีดำเนินการศึกษาทดลอง</u>

ในการศึกษาทดลอง การผลิตแผ่นรองรับอะลูมินาสำหรับใช้ในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เขียนเป็นแผนผังได้ดังนี้




หาค่าความเป็นกรด/ด่างของสาร
(PH-Meter)
กระบวนการขึ้นรูป
(Processing Method)
อะลูมินา
(Al_2O_3)
แมกนีเซีย
(MgO)
สารช่วยการขึ้นรูป
(Auxilary materials)
ผสม
(Mixing)
ศึกษาความเป็นไปได้
(Pretest)
ปรับอัตราส่วน
(Batch adjust)
ผสม
(Mixing)
ทดสอบคุณสมบัติของสเลอร์รี
(Slurry properties test)



หอสมุดกลาง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.3.1 ศึกษาคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาวิจัย มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการวิเคราะห์ให้รายละเอียดอีกครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าเป็นสารที่ต้องการจริง เพื่อป้องกันการหยิบสารผิด หรือ

ความบกพร่องอันเกิดจากการค้า ของบริษัทที่จัดจำหน่าย ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้เสมอ หรือต้องการทราบข้อมูลบางอย่างเพิ่มเติม เพื่อประโยชน์ในการศึกษาวิจัย โดยการนำผงอะลูมินา (Al_2O_3) และสารแมกนีเซีย (MgO) ไปศึกษาเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1.1 ตรวจดูเฟส ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) ยี่ห้อฟิลลิป รุ่น 1023, PW 1730/10 ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 40 กิโลโวลท์ กระแส 30 มิลลิแอมแปร์ ใช้ Copper radiation

โดยเตรียมตัวอย่างผ่านตระแกรง 180 เมช อัดลงในโฮลเดอร์ (Holder) นำใส่เข้าในเครื่องให้ผ่านรังสีเอ็กซ์เรย์ซึ่งหมุนเป็นมุม 2 โดยเริ่มวัดจากมุม 2 องศา ถึงมุม 60 องศา ด้วยความเร็ว (Scanning speed) 2 องศาต่อนาที เครื่องจะบอกข้อมูลออกมาเป็นรูปพีก แล้วนำมาอ่านค่ามุมจากพีก นำค่ามุมไปเปรียบเทียบจากตาราง Copper Radiation นำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าของ JCPDS (Joint committee on powder diffraction standards)

3.3.1.2 วิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) โดยเตรียมตัวอย่างผ่าน 180 เมช

3.3.1.3 วิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคของสารด้วยเครื่อง Micromeritics sedigraph 5100 particle size analyzer อาศัยหลักการโดยกฎของสโตค (Stoke's law) และ เซนตริฟิวจ์ (Contrifugal force)

วิธีการโดยใช้สารตัวอย่างที่เป็นผงประมาณ 2 กรัมทำให้กระจายในน้ำกลั่น ผสมคาลกอน 0.2 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนักในอุลตราโซนิกบาธ นาน 30 นาที เมื่อเครื่องทำงานเครื่องคอมพิวเตอร์ จะอ่านค่าขนาดของอนุภาค (เส้นผ่าศูนย์กลาง) ออกมาเป็นไมโครเมตร (μm) ตั้งแต่ขนาดต่ำสุด ถึงขนาดสูงสุด คือ 100.00 ไมโครเมตร และบอกเปอร์เซนต์สารที่ละเอียดกว่า (% Cumulative mass finer) เปอร์เซนต์ที่มีอยู่ของแต่ละขนาด (% Mass in interval) ตลอดจนเขียนกราฟออกมาแสดงด้วย

3.3.1.4 หาพื้นที่ผิวจำเพาะของสาร (Specific surface area) ด้วยเครื่อง Micromeritics Flow Sorb 2300 surface area analyzer อาศัยหลักการ BET ตามวิธีของบลูนัวร์ เอ็มเน็ท และเทลเลอร์ โดยการที่ทำให้แก๊สซึมซับที่ผิวของอนุภาคแบบ monolayer ที่จุดเดือดของไนโตรเจนเหลว ภายใต้ 1 บรรยากาศ (-196 °C) แก๊สที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ แก๊สไนโตรเจนผสมฮีเลียม มีแก๊สไนโตรเจน 30 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร

วิธีการโดยใช้ผงสารตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์ประมาณ 0.4-1.5 กรัม ใส่ในหลอดแก้วทดลองแล้วทำการดูดแก๊ส (Degass) ที่ตกค้างออก โดยการอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปให้เกิดการซึมซับที่ -196 องศาเซลเซียส เครื่องคอมพิวเตอร์จะบอกพื้นที่ผิวของสารตัวอย่างเป็นตารางเมตร (m^2) แล้วจึงนำมาคำนวณเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะจากสูตร

$$\text{พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area)} = \frac{\text{พื้นที่ผิวที่วัดได้ (Measured surface area)}}{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ (Sample weight)}}$$

3.3.1.5 ศึกษารูปลักษณะและการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) การทำงานของเครื่องใช้หลักการตกกระทบของอิเล็กตรอนบนตัวอย่าง เพื่อให้เกิดอิเล็กตรอนอันดับที่ 2 (Secondary electron) แล้วจึงเปลี่ยนเป็นสัญญาณภาพ

วิธีการนำผงสารตัวอย่างไปติดบนสตัด (Stud) แล้วนำไปฉาบด้วยทอง นำเข้าเครื่อง ใช้กำลังขยาย 3,500 เท่า

3.3.1.6 หาค่าความเป็นกรดหรือค่าของสาร ด้วย pH มิเตอร์ โดยตั้งอุณหภูมิทดลองที่ 33 องศาเซลเซียส โดยหลักการที่ว่า ถ้าวัดค่า pH ได้ มากกว่า 7 สารนั้นมีคุณสมบัติเป็นด่าง ค่า pH น้อยกว่า 7 สารนั้นมีคุณสมบัติเป็นกรดและถ้าค่า pH เท่ากับ 7 ($\pm$ 0.8) สารนั้นมีคุณสมบัติเป็นกลาง

3.3.2 กระบวนการขึ้นรูป (Processing Method)

3.3.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปแบบแผ่นบางๆ (Sheet casting) บนแผ่นฟิล์มที่เตรียมขึ้น แทนเครื่องดอกเตอร์เบลด

3.3.2.1.1 ใช้ผงอะลูมินา 100 เปอร์เซนต์ บดผสมในน้ำกลั่น โดยไม่ใช้สารช่วยตัวอื่นบดนาน 30 ชั่วโมง แล้วนำไปขึ้นรูป เมื่อมีความเป็นไปได้ จึงทำการศึกษาขั้นต่อไป

3.3.2.1.2 ปรับอัตราส่วนการผสมระหว่างสารเริ่มต้นคือ อะลูมินา (Al_2O_3) กับสารช่วยลดจุดสุกตัว (Flux) คือแมกนีเซีย (MgO) เริ่มต้นด้วย 6 สูตรผสมโดยใช้แมกนีเซีย 1-6 เปอร์เซนต์ ถ้าใช้ไม่ได้จึงทำการปรับปรุงต่อไป โดยนำสูตรทั้ง 5 สูตร ไปทำการบด 30 ชั่วโมง แล้วนำไปขึ้นรูปบนแผ่นฟิล์ม ก่อนการขึ้นรูปจะต้องทำการศึกษาคุณสมบัติของสเลอร์รีก่อน โดยนำไปวัดความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ด้วยไฮโครมิเตอร์ และวัดความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด แบบ Gallenkamp Univeral Torsion Viscometer รุ่น VHA-200-M

3.3.2.1.3 ศึกษาคุณสมบัติของแผ่นทดลองที่เป็นผลิตภัณฑ์ดิบ (Green sheets) ในเรื่องเกี่ยวกับความยาก-ง่าย ในการขึ้นรูป ขนาด (Size) น้ำหนัก (Weight)

3.3.2.1.4 ศึกษาการเผา (Sintering) โดยเผาในบรรยากาศการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Oxidation) ในอุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาคุณสมบัติของแผ่นทดลองในด้านการหดตัว การสูญเสียน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ และความคงรูป

3.3.2.1.5 เมื่อทำการศึกษาทดลองมาถึงขั้นนี้แล้ว จะทำให้เราทราบว่าสูตรใดเป็นสูตรที่เราต้องการ เป็นสูตรที่อยู่ในรูปแบบที่ถูกต้องที่สุดคือ ไม่มีการบิดงอหลังการเผา และมีจุดสุกตัวต่ำสุด เราจึงนำสูตรนั้นมาทดลองต่อไป

3.3.2.2 ศึกษาการบดผสมโดยผสมสารช่วยการกระจายลอยตัว สารช่วยยึดเกาะ และสารช่วยอื่น ๆ เตรียมตัวอย่างละ 100 กรัม ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.2.2.1 นำสูตรที่ต้องการ หรือสูตรที่เห็นว่าน่าจะทำการทดลองต่อไป มาปรับปรุงอัตราส่วน ระหว่างสารช่วยการกระจายลอยตัวในช่วง 0.2-1.00 เปอร์เซนต์ กับเปอร์เซนต์น้ำ เพื่อให้ได้ความหนืด (Viscosity) ที่เหมาะสมในการขึ้นรูป

3.3.2.2.2 เติมสารช่วยการยึดเกาะ (Binder) ตั้งแต่ 1.00-10.00 เปอร์เซนต์ เพื่อศึกษาความยาก-ง่าย ในการขึ้นรูป

3.3.2.3 นำอะลูมินาสเลอร์รี ที่เตรียม ไปขึ้นรูปโดยเครื่องดอกเตอร์เบลดที่เตรียมขึ้น โดยมีการควบคุมความหนืด (Viscosity)

3.3.2.4 ศึกษาพฤติกรรมการแห้งตัวของชิ้นทดลองโดยการปล่อยให้แห้งเองตามธรรมชาติจนถึงระดับหนึ่ง แล้วจึงนำไปอบแห้งที่ 200 องศาเซลเซียส

3.3.2.5 ศึกษาความยากง่ายในการตัดขึ้นรูป (Sheet Cutting) ของแต่ละสูตร วัดขนาดไว้เพื่อหาเปอร์เซนต์การหดตัว (กว้าง x ยาว x หนา) ชั่งน้ำหนักเพื่อหาเปอร์เซนต์ความสูญเสียน้ำหนักหลังเผา

3.3.2.6 ศึกษาการเผา (Sintering) โดยนำชิ้นทดลองที่เตรียมได้ ไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 1410, 1440, 1470, 1500, 1530 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Oxidration) โดยแช่ไว้ที่อุณหภูมิสูงสุด 3 ชั่วโมง ควบคุมให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาต่อนาที

3.3.3 การตรวจสอบคุณสมบัติของชิ้นทดลองที่ผ่านการเผาแล้ว (Sintered sheet)

3.3.3.1 หาเปอร์เซนต์น้ำหนักที่หายไป (Weight lost) จากสูตร

$$\text{เปอร์เซนต์น้ำหนักที่หายไป} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนเผา} - \text{น้ำหนักหลังเผา}}{\text{น้ำหนักก่อนเผา}} \times 100$$

3.3.3.2 หาเปอร์เซนต์การหดตัว (Shrinkage) โดยคำนวณจากสูตร

$$\% \text{ การหดตัว} = \frac{\text{ขนาดของชิ้นทดลองก่อนเผา} - \text{ขนาดของชิ้นทดลองหลังเผา}}{\text{ขนาดของชิ้นทดลองก่อนเผา}} \times 100$$

3.3.3.3 หาค่าความหนาแน่น (Density) จากสูตร

$$\text{ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)} = \frac{\text{น้ำหนักสุทธิ}}{\text{ปริมาตร}}$$

3.3.3.4 หาเปอร์เซนต์ดูดซึมน้ำ (Water Absorbtion) จากสูตร

$$\% \text{ ดูดซึมน้ำ} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100$$

เมื่อ M_1 = น้ำหนักของชิ้นทดลองขณะแห้ง (กรัม)

M_2 = น้ำหนักของชิ้นทดลองขณะอิ่มน้ำ (กรัม)

โดยการนำชิ้นทดลองไปชั่งขณะแห้ง แล้วนำไปต้มในน้ำกลั่น ปล่อยให้เดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น นำมาเช็ดให้แห้งด้วยผ้าหมาด ๆ ที่สะอาด แล้วนำไปชั่งอีกครั้ง นำค่าที่ได้แทนค่าในสูตรดังกล่าว

3.3.3.5 ตรวจเฟสของชิ้นทดลองที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส โดยการนำชิ้นทดลองไปทุบให้ละเอียด ผ่านตะแกรงขนาด 180 เมช ไปตรวจหาเฟสด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (XRD) ยี่ห้อฟิลิปใช้ Cu กระแสไฟฟ้า 40.0 KV. 30.0 MA ผ่านรังสีเอ็กเรย์ ซึ่งหมุนเป็นมุม 2 เริ่มวัดที่มุม 2 องศา ถึง 60 องศา เพื่อเปรียบเทียบกับเฟสของชิ้นงานตัวอย่างของบริษัทอิเล็กโตรเซรามิกจำกัดที่นิคมอุตสาหกรรมลำพูน

3.3.3.6 นำชิ้นทดลองไปถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) เพื่อศึกษาจุลโครงสร้าง (Microstructure) ของชิ้นทดลองเกี่ยวกับขนาดของเกรน (Grain size) การเชื่อมต่อของขอบเกรน (Grain boundary) รูพรุน (Pores) การเรียงตัวและการกระจายของเกรน (Grain structure)

โดยนำไปศึกษาเปรียบเทียบกับชิ้นงานของบริษัทอิเลกโตรเซรามิก จำกัด ที่นิคมอุตสาหกรรมลำพูน

3.3.3.7 หาสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นเมื่อได้รับความร้อน (Mean Coefficient of linear thermal expansion) หรือค่า COE ในช่วงอุณหภูมิ 25-150, 150-400 และ 400-800 องศาเซลเซียส โดยเตรียมชิ้นทดลอง ขนาด 0.8 x 0.8 x 2.5 เซนติเมตร จำนวน 5 แท่ง นำไปทดลองในเครื่องไดลาโนมิเตอร์ แล้วนำค่าที่ได้ มาแทนในสูตร

$$P = \left[\frac{L_2 - L_1}{L_o}\right] X \ 100 + A$$

$$= \left[\frac{\Delta L}{L_o}\right] X \ 100 + A$$

$$COE = \alpha = \frac{0.01\ P}{T_2 - T_1} \qquad \text{in./in. } ^{\circ}C$$

เมื่อ P = เปอร์เซนต์การขยายตัวตามเส้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น ถึงอุณหภูมิจุดที่อ่าน $(T_2 - T_1)$

L_o = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดลอง

L_1 = ความยาวของชิ้นทดลอง ณ อุณหภูมิเริ่มทดลอง (T_1)

L_2 = ความยาวของชิ้นทดลอง ณ อุณหภูมิที่อ่าน (T_2)

A = อัตราการขยายตัวตามเส้นของชิ้นทดลอง จาก 0 องศา ถึงอุณหภูมิทำการทดลอง ปกติจะให้เท่ากับ 0 แต่ถ้ามีปรากฏในเครื่องให้นำมาคำนวณด้วย

α = สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นจาก $T_1 - T_2$

3.3.3.8 การหาค่าความแข็งแรง (Bending strength) โดย เครื่อง MOR โดยการเตรียมชิ้นทดลองขนาด 1.0 x 1.0 x 10.00 เซนติเมตร จำนวน 10 แท่งด้วยวิธีการหล่อตัน นำไปเผาที่ 1500 °C นำค่าที่วัดได้มาคำนวณด้วยสูตร

$$M = \frac{3wL}{2b\,d^2} = \frac{10W}{bd^2}$$

เมื่อ M = ค่าความแข็งแรงที่จะต้านทานแรงทางขวาง (กก/ซม^2)

W = น้ำหนักกดเป็นกิโลกรัม

L = ระยะห่างจุดรองรับ

b = ความกว้างของชิ้นทดลองเป็นเซนติเมตร

d = ความหนาของชิ้นทดลองเป็นเซนติเมตร

3.3.3.9 หาค่าความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นทดลอง (Electrical resistance) ที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นโอห์ม ต่อ เซนติเมตร ด้วยเครื่อง Insulation tester ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น 2406 และ เครื่องวัดชนิดสามารถเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้โดยอัตโนมัติ (High voltage transformer) โดยการผ่านแรงเคลื่อนไฟฟ้า 220 โวลต์ เข้าหม้อแปลงไฟแรงสูง เพื่อเพิ่มแรงเคลื่อน แล้วตัวเลขจากหน้าปัดจะปรากฏให้เห็นค่ากระแส (I) และค่าแรงเคลื่อน (E) เพิ่มแรงเคลื่อนจนตัวเลขปรากฏหยุดนิ่ง อ่านค่าที่ได้มาคำนวณ จากสูตร

$$R = \frac{E}{I}$$

เมื่อ R = ความต้านทานไฟฟ้าเป็นโอห์ม

E = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นโวลต์

I = กระแสไฟฟ้าแอมแปร์

3.3.3.10 หาค่าความราบเรียบของพื้นผิวชิ้นทดลอง (Surface roughness) โดยการตัดชิ้นทดลองขนาด 0.08, 0.25, 0.8, 2.5, 8, 25 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานการ

หาความราบเรียบของผิวชิ้นงานทั้งหมด 10 ชิ้น (Japanese industrial standard surface roughness) ทำการทดลองในเครื่อง Surface roughness tester ยี่ห้อ Mitutoyo suftest 401 series 178 แล้วเครื่องจะอ่านค่าออกมา เป็น

$$R_a = \ldots\ldots\ldots \mu m$$

$$R_z = \ldots\ldots\ldots \mu m$$

R_a หมายถึงค่าเฉลี่ยความสูงของพีคจากเส้นกลางทั้งหมด (Mean line) ซึ่งคำนวนได้จากสูตร

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \ldots\ldots \mu m$$

R_z หมายถึงค่าผลต่างของพีคสูงสุด 5 พีค กับพีคต่ำสุด 5 พีค จาก 10 ตัวอย่าง ซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$R_z = (Y_{p1} + Y_{p2} \ldots + Y_{p5}) - (Y_{v1} + Y_{v2} \ldots + Y_{v5})$$

$$= \frac{1}{5} \left(\sum^{i=5} Y_{pi} \quad \sum^{i=5} yv_i \right) \ldots \mu m$$

ค่าต่างๆ วัดและคำนวณโดยเครื่องสำเร็จรูป

ภาพที่ 33 พีคที่ได้จากเครื่องหาความราบเรียบ

ที่มา : JIS. Surface roughness.