

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การบดและขึ้นรูปชิ้นงานซีลิกอน

3.1.1.1 Disc Grinding Mill (HERZOG รุ่น HSM 100A)

3.1.1.2 Attritor (Union Process Szegvari รุ่น 01-HD)

3.1.1.3 Retsch Sieve มาตรฐาน ASTM E 11 ขนาด 60, 120, 325 และ 400 mesh

3.1.1.4 Hydraulic Pressing (AMSLER)

3.1.1.5 Cold Isostatic Pressing

3.1.1.6 Furnace 1500 Model LTF 15/75

3.1.1.7 Over pressure and Vacuum sintering Furnace (Shimadzu รุ่น PVSG20/20)

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การตบแต่งชิ้นงาน

3.1.2.1 Drilling Machine

3.1.2.2 Machine Tool Plant-Sliven CU 500 M

3.1.2.3 CNC ESKER

3.1.2.4 Cutting Machine Struers Accutom-5 และ CNB Cut-off wheel Struers
355CA

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบและตรวจสอบ

3.1.3.1 เครื่องวัดความหนาแน่นจริง (Ultracycnometer)

3.1.3.2 เครื่องวัดขนาดผง (Mastersizer)

3.1.3.3 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Testing Machine MVK-H2 Mitutoyo)

3.1.3.4 เครื่องทดสอบโมดูลัสของยัง (Grindosonic Model MK51)

3.1.3.5 เครื่องวัดความขรุขระผิว (Dektak³ ST Surface Profiler Measuring System)

3.1.3.6 เครื่องวิเคราะห์เฟส (X-Ray Diffractometer System JDX-3530: XRD)

3.1.3.7 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง
(Optical Microscope: OM โปรแกรม AxioVision 3.0)

3.1.3.8 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด
(Scanning Electron Microscope (JEOL) JSM-5410: SEM)

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

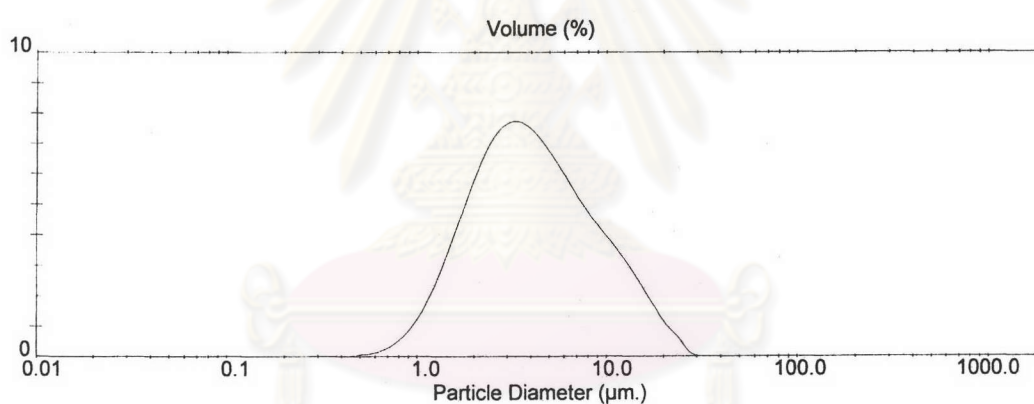
3.2.1 วัสดุ: โลหะซิลิคอน

ผงซิลิคอนที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเฉลี่ย 3.42 ไมครอน ซึ่งมีส่วนผสมดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณธาตุผสมของโลหะซิลิคอน ตรวจสอบโดย X-Ray Fluorescent (XRF)

ชนิดของผง	ปริมาณธาตุผสม (% by wt)				
	Si	Ca	Fe	Al	W
Silicon Metal Powder	99.11	0.47	0.17	0.14	0.10

Trace element: Na, Mg, K, Ti, Cr, Mn [กัญยาทิพย์, 2543]



รูปที่ 3.1 การกระจายตัวของขนาดผงซิลิคอนขนาดเฉลี่ย 3.42 ไมครอน

3.2.2 ตัวประสาน (Binder)

3.2.2.1 สารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ความเข้มข้น 3% โดยมวลต่อปริมาตร

3.2.3 แก๊สที่ใช้ควบคุมบรรยากาศภายในเตา

3.2.3.1 แก๊สผสมระหว่างอาร์กอนและไฮโดรเจน ในอัตราส่วน 95 : 5 (Common grade)

ใช้ในการบดผงด้วยเครื่อง Attritor และใช้ในการเผาพูนีกขึ้นต้น (Pre-Sintering)

3.2.3.2 แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99% (HP grade) ใช้ในการไนไตรเดชัน

3.3 การเตรียมชิ้นงาน

3.3.1 การบดและผสมผง

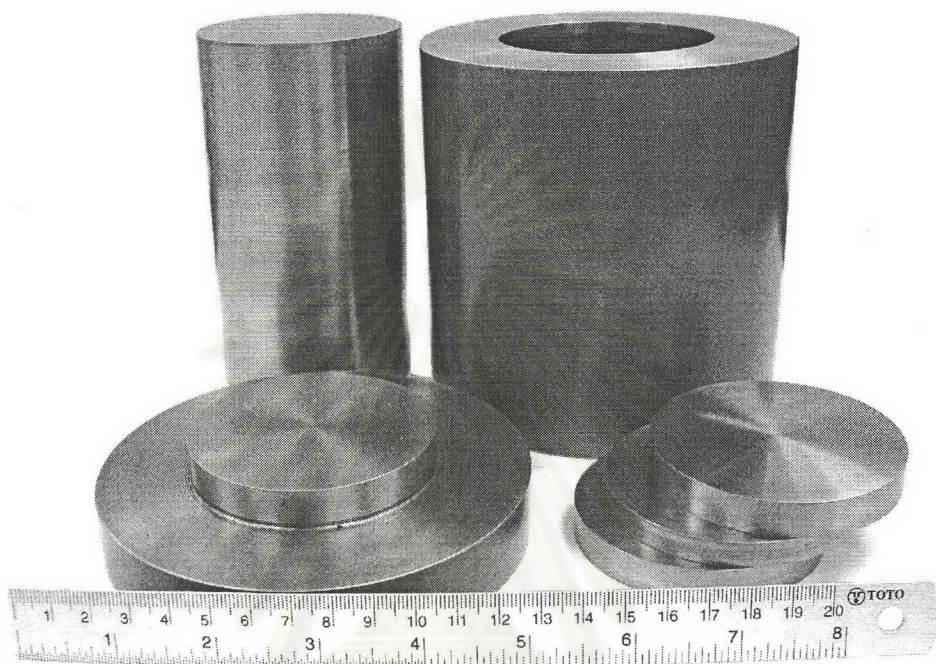
- 3.3.1.1 ทบก้อนโลหะซัลฟิดคอนให้ได้ขนาดเล็กประมาณ 2-3 มิลลิเมตร
- 3.3.1.2 บดโลหะซัลฟิดคอน ด้วยเครื่อง Disc grinding mill โดยใส่ผงครั้งละ 20 กรัม ใช้เวลาบด 30 วินาที ด้วยความเร็วสูงสุด
- 3.3.1.3 ร่อนผงด้วยตะแกรงของ Retsch ตามมาตรฐาน ASTM E11 ขนาด 60 และ 120 mesh ตามลำดับ จะได้ผงที่มีขนาดเล็กกว่า 125 ไมครอน
- 3.3.1.4 บดผงที่ได้ต่อไปด้วยเครื่อง Attritor โดยใส่ผงครั้งละ 450 กรัม ต่อลูกบด Tungsten carbide 6 กิโลกรัม (ตามมาตรฐานของเครื่อง) ในบรรยากาศผสมอาร์กอนและไฮโดรเจนในอัตราส่วน 95:5 ใช้เวลาในการบด 4 ชั่วโมง (เวลานานขึ้น ขนาดผงที่ได้จะลดลง)
- 3.3.1.5 ร่อนผงที่ได้ด้วยตะแกรงของ Retsch ตามมาตรฐาน ASTM E 11 ขนาด 325 และ 400 mesh ตามลำดับ ซึ่งจะได้ผงที่มีขนาดเล็กกว่า 38 ไมครอน
- 3.3.1.6 วัดขนาดผงที่ได้ด้วยเครื่อง Mastersizer
- 3.3.1.7 ผ่นสารละลาย PVA ที่มีความเข้มข้น 3 % โดยมวลต่อปริมาตร (โดยละลายผง PVA ในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 80°C ในอัตราส่วน PVA 3 กรัม : น้ำ 100 มิลลิลิตร) ลงบนผงซัลฟิดคอนที่เตรียมไว้แล้วผสมให้ทั่ว
- 3.3.1.8 นำผงที่ผสมตัวประสานแล้วไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50°C ประมาณ 45 นาที
- 3.3.1.9 ร่อนผงที่ได้ผ่านตะแกรงขนาด 120 mesh อีกครั้งก่อนนำไปอัดขึ้นรูปเพื่อไม่ให้ผงเกาะตัวกัน

3.3.2 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานซัลฟิดคอน

ทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบหัวฉีดน้ำมันขนาด $\varnothing \times H = 71 \times 43$ มิลลิเมตร โดย

- 3.3.2.1 นำผงที่ได้ข้างต้น ชั่งน้ำหนักประมาณ 230-240 กรัม อัดด้วยไฮดรอลิกแบบแนวเดียว (Uniaxial Press) ใน Stainless steel Die รูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้แรงดัน 0.25 tons/cm^2 (10 ตัน) ได้ชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 71 มิลลิเมตร และความสูงประมาณ 43 มิลลิเมตร (ความสูงจะขึ้นอยู่กับปริมาณผงและแรงดันที่ใช้อัด) ดังรูปที่ 3.3

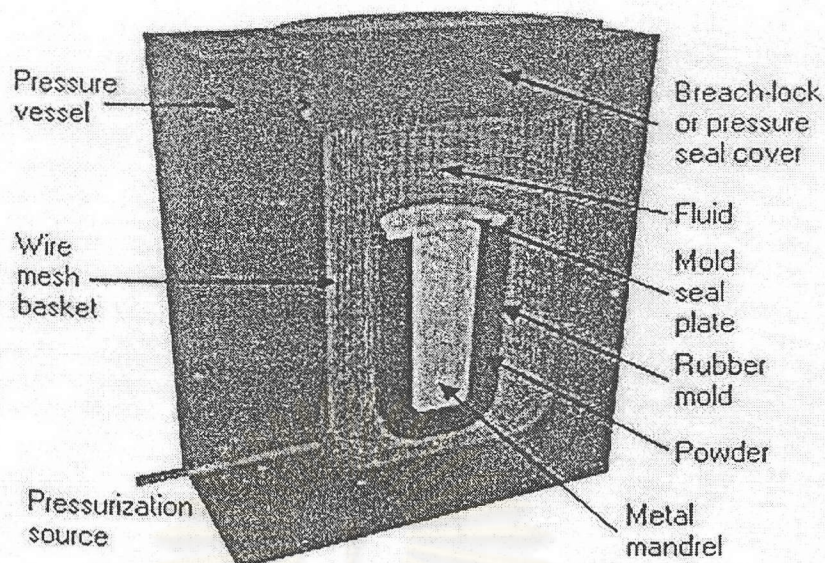
3.3.2.2 จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ ไปทำ Cold Isostatic Press (CIP) โดยใส่ชิ้นงานใน
 ถังยางที่เป็นสุญญากาศ ที่แรงดัน 300 MPa เป็นเวลา 2 นาที แสดงเครื่องมือ CIP
 ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 Die รูปทรงกระบอก ซึ่งทำด้วยเหล็ก SKD11



รูปที่ 3.3 รูปทรงชิ้นงานต้นแบบหัวฉีดน้ำมันภายหลังจากอัดขึ้นรูป



รูปที่ 3.4 เครื่องมือสำหรับกระบวนการ CIP

3.4 การเผาผนึกขั้นต้น (Pre-sintering)

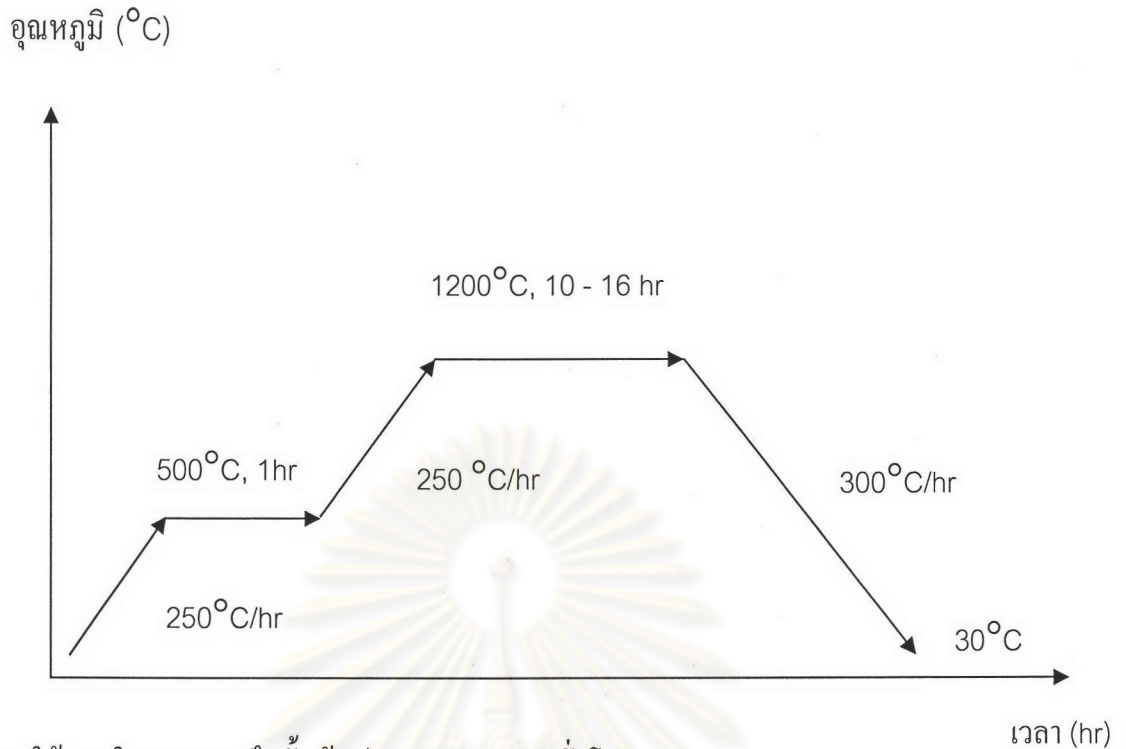
นำชิ้นงานที่ได้เข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลาประมาณ 10 ชั่วโมง จากนั้นนำเข้าเตา Tube Furnace (LTF 15/75) โดยควบคุมอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อน ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การ Heat treatment สำหรับการเผาผนึกขั้นต้น Silicon Compact

Heating Step	Heating Rate ($^{\circ}\text{C/hr}$)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Dwell time (hr)
Calcination & Binder Removal	250	500	1
Pre- Sintering	250	1200	⊗ 10 - 16
Cooling	300	30	-

[Kuljira & Benja, 1998]

⊗ ทำการปรับเปลี่ยนเวลาแห่งของการเผาผนึกขั้นต้นที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 10, 12, 14 และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ



รวมใช้เวลาในการเผาไหม้ขึ้นต้นประมาณ 20 - 26 ชั่วโมง

รูปที่ 3.5 แผนภาพกระบวนการ Heating profile ของ Silicon compact

3.5 การตรวจสอบสมบัติของชิ้นงานที่ผ่านการเผาไหม้ขึ้นต้น

นำชิ้นงานที่ผ่านการเผาไหม้ขึ้นต้นเป็นเวลา 10, 12, 14 และ 16 ชั่วโมงตามลำดับ ตรวจสอบสมบัติดังนี้

3.5.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

3.5.1.1 การวัดความหนาแน่นของชิ้นงาน

ชั่งน้ำหนักชิ้นงานและวัดขนาดเพื่อหาปริมาตรของชิ้นงาน จากนั้นนำค่าที่ได้มาแทนค่าในสูตรดังสมการที่ 3.1

$$\rho = m / V \quad [3.1]$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (g/cm^3)

m คือ น้ำหนักชิ้นงาน (g)

และ V คือ ปริมาตรของชิ้นงาน (cm^3)

3.5.2 การตรวจสอบสมบัติทางกล

3.5.2.1 การวัดความแข็ง (Hardness, HV)

ทดสอบความแข็งของชิ้นงานแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness, HV) ตามมาตรฐาน JIS R 1610 ด้วยเครื่อง Hardness Testing Machine MVK-H2 มีขั้นตอนดังนี้

3.5.2.1.1 ขัดเพื่อเตรียมผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 200, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

3.5.2.1.2 นำชิ้นงานเคลือบทองด้วยเครื่อง FINE-COATER (JEOL JFC-1200) โดยใช้กระแสไฟฟ้า 15 A เป็นเวลา 120 วินาที เพื่อให้สามารถมองเห็นรอยกดชัดเจน

3.5.2.1.3 ทดสอบความแข็งของชิ้นงาน โดยใช้หัวกด Vickers ด้วยแรงกด 1000 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที ทดสอบชิ้นละไม่น้อยกว่า 50 จุด และหาค่าเฉลี่ยของความแข็ง กำหนดความแข็งโดยใช้สมการ 3.2

$$HV = 1.8544 P / d^2 \quad [3.2]$$

เมื่อ HV คือ ค่าความแข็งของชิ้นงานแบบ Vickers (kg/mm^2)

P คือ แรงที่ใช้กด (kg)

d คือ ค่าความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมทั้งสองของรอยกด (mm)

3.5.2.2 การวัดโมดูลัสของยัง (Young's modulus, E: Pa)

ทดสอบค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) ด้วยเครื่อง Grindosonic ตามมาตรฐาน ASTM C 1259-01

3.5.2.2.1 ตัดชิ้นงานที่ผ่านการเผาขึ้นที่อุณหภูมิที่เวลาแช่ต่าง ๆ เป็นแท่งสี่เหลี่ยม (bar shape) ขนาด 5 x 15 x 2 มิลลิเมตร

3.5.2.2.2 ชั่งน้ำหนักชิ้นงาน (m), วัดความกว้าง (b), ความยาว (L), และความหนา (t) เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับค่า T_1 ดังสมการ 3.3

$$T_1 = 1 + 6.585(1 + 0.0752\mu + 0.8109\mu^2)(t/L)^2 - 0.868 (t/L)^4 \quad [3.3]$$

$$- \left[\frac{8.340(1 + 0.2023\mu + 2.173\mu^2)(t/L)^4}{1.000 + 6.338(1 + 0.1408\mu + 1.536\mu^2)(t/L)^2} \right]$$

เมื่อ μ คือ Poisson's ratio ของซิลิคอน ($\mu_{Si} = 0.17$)

3.5.2.2.3 ทดสอบค่าโมดูลัสของยังด้วยเครื่อง Grindosonic โดยเคาะบริเวณกึ่งกลางงานเป็นจำนวน 10 ครั้ง บันทึกค่าความถี่กำทอนพื้นฐาน (fundamental resonant frequency, f_r : Hz) ที่ได้ในแต่ละครั้งและหาค่าเฉลี่ยความถี่

3.5.2.2.4 นำค่าเฉลี่ยความถี่ของแต่ละชิ้นและข้อมูลข้างต้นมาคำนวณหาค่าโมดูลัสของยัง ตามสมการที่ 3.4

$$E = 0.9465(mf_r^2/b) (L^3/t^3)T_1 \quad [3.4]$$

เมื่อ E คือ โมดูลัสของยัง (Pa)

m คือ น้ำหนักชิ้นงาน (g)

b, L และ t คือ ความกว้าง ความยาวและความหนาของชิ้นงาน (mm) ตามลำดับ

f_r คือ ความถี่กำทอนพื้นฐานของชิ้นงาน (fundamental resonant frequency, Hz)

T_1 คือ correction factor สำหรับ fundamental flexural mode

3.5.2.3 การวัดความเหนียวต่อการแตกหัก (Fracture Toughness, K_{IC} : Pa m^{1/2})

ทดสอบค่า Fracture Toughness ด้วยวิธี Indentation Fracture (IF method) ตามมาตรฐาน JIS R 1607 1990 โดยพิจารณาปริมาณรอยแตกที่เกิดขึ้นจากการกดแบบ Vickers hardness ดังรูปที่ 3.6 และมีขั้นตอนดังนี้

3.5.2.3.1 จัดเตรียมผิวชิ้นงานและเคลือบทองเช่นเดียวกับการวัดความแข็ง

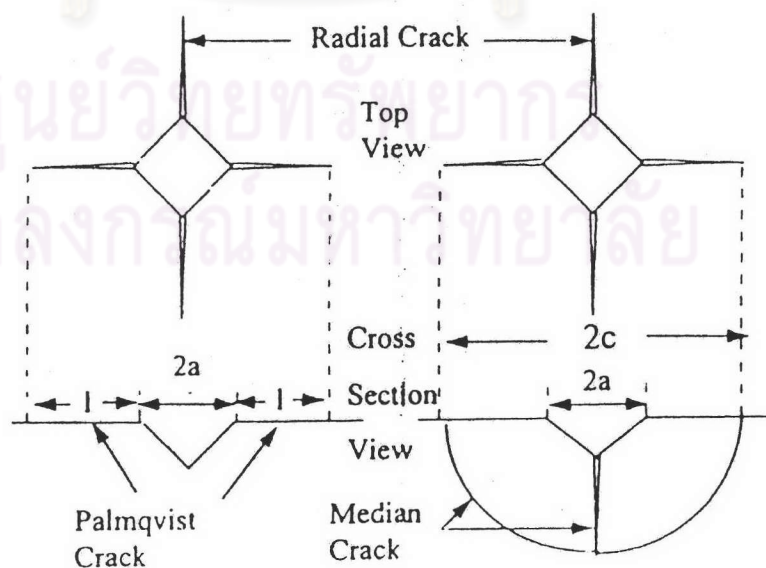
3.5.2.3.2 ทดสอบชิ้นงานโดยใช้หัวกดเพชรรูปพีระมิด ด้วยแรงกด 45 กิโลกรัม เป็นเวลา 15 วินาที (ด้วยเครื่อง Hardness Tester ARK-F1000) ทดสอบชิ้นละไม่น้อยกว่า 5 จุดและหาค่าเฉลี่ย ซึ่งแต่ละจุดที่ใช้หาค่าเฉลี่ยได้นั้นต้องเป็นไปตามเกณฑ์ดังนี้

1. ต้องวัดความยาวรอยแตกและความยาวเส้นทแยงมุมทั้งสองแนว ภายใน 10 นาทีหลังการกด
2. ผลต่างของความยาวรอยแตกทั้งสองแนวต้องไม่มากกว่า 10% ของค่าความยาวรอยแตกเฉลี่ยทั้งสองแนว
3. ความยาวรอยแตก (แนวที่สนใจ) ต้องไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุม (แนวที่สนใจ) โดยพิจารณาทั้งสองแนว

3.5.2.3.3 คำนวณค่า Fracture Toughness ดังสมการที่ 3.5

$$K_{IC} = 0.018(E/HV)^{1/2}(P/C^{3/2}) = 0.026 \frac{E^{1/2} P^{1/2} a}{C^{3/2}} \quad [3.5]$$

- เมื่อ K_{IC} = ค่าความเหนียวต่อการแตกหัก ($\text{Pa m}^{1/2}$) { $\text{kgf/mm}^{3/2}$ }
- E = ค่าโมดูลัสของยัง (Pa) { kgf/mm^2 }
- HV = ค่าความแข็งแบบ Vickers (Pa) { kgf/mm^2 }
- HV = $1.8544 P / (2a)^2$
- P = ภาระที่ใช้ในการกด (N) { kgf }
- C = ครึ่งหนึ่งของความยาวรอยแตกเฉลี่ย (m) { mm }
- a = ครึ่งหนึ่งของความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ย (m) { mm }



รูปที่ 3.6 ลักษณะรอยกดจากการวัดความแข็งแบบ Vickers

3.5.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

3.5.3.1 จัดเพื่อเตรียมผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 200, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

3.5.3.2 กัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้นเป็นเวลา 20 วินาที

3.5.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่าและถ่ายรูปผลการทดลอง

3.5.4 การกลึงและเจาะชิ้นงาน Silicon compact

การขึ้นรูปหัวฉีดน้ำมันซิลิคอนที่ผ่านการเผาขึ้นต้น ใช้มีดกลึงและดอกสว่านที่ทำด้วย Cemented carbide (Tungsten carbide) และพิจารณาเลือกชิ้นงานที่มีความแข็งสูงสุด เป็นตัวกำหนดความเร็วรอบ (Speed) และอัตราป้อน (Feed) ที่เหมาะสม เพื่อเป็นแนวทางในการขึ้นรูปหัวฉีดน้ำมันจากซิลิคอนที่มีความแข็งต่ำกว่า (จากการทดลองถ้า machine ชิ้นงานที่มีความแข็งต่ำกว่าก่อนและนำ speed, feed ของชิ้นงานดังกล่าวไปใช้ machine ชิ้นงานที่มีความแข็งสูงกว่า ชิ้นงานมีโอกาสเสียหายโดยเกิดการบิ่น กระเทาะและแตกร้าวได้ง่าย)

3.5.4.1 การกลึง (Turning)

3.5.4.1.1 กลึงชิ้นงานที่ผ่านการเผาขึ้นต้น (Dwell time 14 hr, \varnothing_{avg} 66.53 mm, Hardness 83.36 HV) ด้วยเครื่อง Machine tool plant-SLVIVEN CU 500M โดยใช้มีดกลึง Tungsten carbide กลึง-ปอกชิ้นงานให้สำเร็จดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ชิ้นงาน Silicon compact ภายหลังจากการกลึงเป็นหัวฉีดน้ำมัน

3.5.4.1.2 หาความเร็วตัด (Cutting Speed) ที่เหมาะสม โดยปรับเปลี่ยนความเร็วรอบ (speed) ในช่วง 300 - 350 rpm คือ 300, 330 และ 350 rpm ตามลำดับ
คำนวณความเร็วตัด (Cutting Speed, V) จากสมการที่ 3.6

$$V = \pi DN \quad [3.6]$$

เมื่อ V = ความเร็วตัด (m/min)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (m)

N = ความเร็วรอบ (rpm)

3.5.4.1.3 ปรับเปลี่ยนอัตราป้อนต่อรอบของมีดกลึง (feed) ในช่วง 0.111 – 0.131 mm/rev (หรือคิดเป็นอัตราเร็วการป้อนของมีดกลึง, feed rate ตั้งแต่ 33.30, 36.63, 38.28, 39.93, 41.58, 43.23 และ 45.85 mm/min)

3.5.4.1.4 สังเกตและวัดความขรุขระของผิวชิ้นงาน (Surface roughness, Ra) ด้วยเครื่อง Dektak³ ST Surface Profile ที่แรงกด 30 มิลลิกรัม ระยะทางที่หัวกดเคลื่อน 9 วินาที และบันทึกภาพ profile ไว้

3.5.4.1.5 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงที่ความเร็วรอบและอัตราเร็วการป้อนของมีดกลึงที่สภาวะต่าง ๆ

3.5.4.1.6 คำนวณอัตราการขจัดวัสดุออก (Material Removal Rate, MRR) จากสมการที่ 3.7

$$MRR = (\pi/4) \cdot (D_o^2 - D_f^2) \cdot fr \cdot N \quad [3.7]$$

เมื่อ MRR = อัตราการขจัดวัสดุออก (mm³/min)

D_o = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนกลึง (mm)

D_f = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังกลึง (mm)

fr = อัตราป้อนต่อรอบของมีดกลึง (mm/rev)

N = ความเร็วรอบ (rpm)

3.5.4.1.7 คำนวณแฟคเตอร์การกลึง (MRR/V, mm²/rev)

3.5.4.1.8 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์การกลึง (MRR/V) ของชิ้นงานที่ผ่านการกลึงที่ความเร็วรอบและอัตราเร็วการป้อนมีดกลึงสภาวะต่าง ๆ

3.5.4.2 การเจาะ (Drilling)

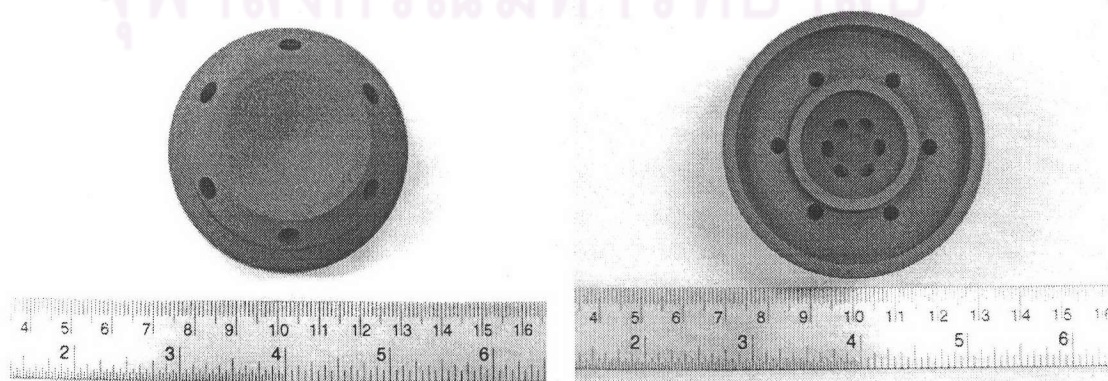
ทดลองเจาะรูชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกขั้นต้นด้วยดอกสว่านที่ทำจากเหล็กกล้าความเร็วสูง (High speed steel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.8 มิลลิเมตร มีมุมจิกมาตรฐาน 118 องศา และมุมจิกที่ได้จากการลับคมเป็นมุม 60, 75 และ 85 องศา ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.8 โดยใช้ความเร็วรอบการหมุนดอกสว่าน (Speed) 1000 rpm และอัตราการป้อนดอกสว่าน, (Feed rate) 60 mm/min สังเกตลักษณะที่ได้และถ่ายภาพรูเจาะเพื่อเป็นแนวทางในการเจาะรูชิ้นงานหัวฉีดน้ำมันต่อไป



รูปที่ 3.8 มุมจิกของดอกสว่าน High speed steel 118, 85, 75 และ 60 องศา ตามลำดับ

การเจาะรูชิ้นงานซิลิคอนเป็นหัวฉีดน้ำมันจะขึ้นอยู่กับขนาดของรู โดยใช้อัตราป้อน (Feed) ดอกสว่านต่ำ อยู่ในช่วง 0.08-0.1 mm/rev และความเร็วรอบการหมุนดอกสว่าน (Speed) สูง อยู่ในช่วง 800-1200 rpm

3.5.4.2.1 นำชิ้นงานซิลิคอนที่ผ่านการกลึง-ปอกผิวสำเร็จเป็นหัวฉีดน้ำมัน มาเจาะรูด้วยเครื่อง CNC โดยใช้ดอกสว่าน Tungsten carbide ซึ่งมีมุมจิกมาตรฐาน 60 องศา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5, 3.8 และ 5.1 ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ชิ้นงาน Silicon compact ภายหลังการเจาะรูเป็นหัวฉีดน้ำมัน

- 3.5.4.2.2 หากความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับแต่ละขนาดครู่เจาะ โดยปรับเปลี่ยนความเร็วรอบ ตั้งแต่ 800, 1000 และ 1200 rpm ตามลำดับ เพื่อให้ได้ความเร็วตัด (V) อยู่ในช่วง 11.50 - 13.50 m/min
- 3.5.4.2.3 ปรับเปลี่ยนอัตราเร็วการป้อนดอกสว่าน (feed rate) ตั้งแต่ 60, 80, 100 และ 120 mm/min เพื่อให้ได้อัตราป้อน (feed) อยู่ในช่วง 0.08 - 0.1 mm/rev
- 3.5.4.2.4 ตัดชิ้นงานที่เจาะรูและวัดความขรุขระของผิวรูเจาะ ด้วยเครื่อง Dektak³ ST Surface Profile ที่แรงกด 30 มิลลิกรัม ระยะทางที่หัวกดเคลื่อน 9 วินาที และบันทึกภาพ profile ไว้
- 3.5.4.2.5 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของผิวชิ้นงานที่ผ่านการเจาะรูขนาดต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบและอัตราเร็วการป้อนดอกสว่านที่สภาวะต่าง ๆ
- 3.5.4.2.6 คำนวณอัตราการขจัดวัสดุออก (Material Removal Rate, MRR) จากสมการที่ 3.8

$$MRR = (\pi \cdot D^2 / 4) \cdot fr \cdot N \quad [3.8]$$

เมื่อ	MRR	=	อัตราการขจัดวัสดุออก (mm ³ /min)
	D	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดอกสว่าน (mm)
	fr	=	อัตราป้อนต่อรอบของดอกสว่าน (mm/rev)
	N	=	ความเร็วรอบ (rpm)

3.5.4.2.7 คำนวณความเร็วตัด (Cutting Speed, V) จาก $V = \pi DN$ (m/min)

3.5.4.2.8 คำนวณแฟคเตอร์การเจาะ (MRR/V, mm²/rev)

3.5.4.2.9 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์การเจาะ (MRR/V) ของชิ้นงานที่ผ่านการเจาะความเร็วรอบและอัตราเร็วการป้อนดอกสว่านสภาวะต่าง ๆ

3.6 การไนไตรเดชัน (Nitridation)

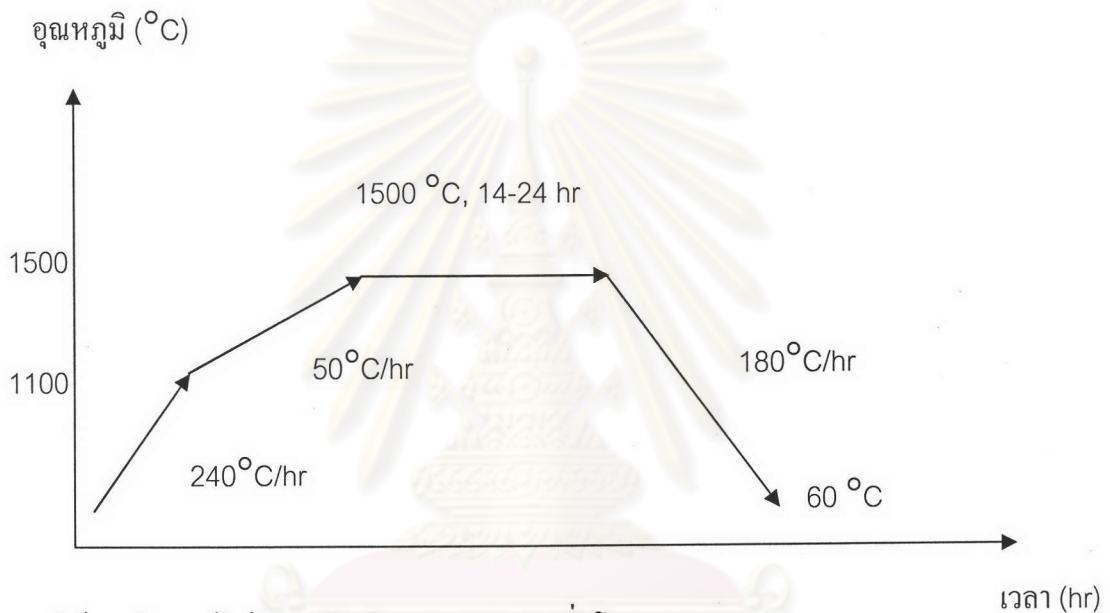
การไนไตรเดชัน ใช้เตา Over pressure and Vacuum sintering Furnace

โดยนำชิ้นงานภายหลังการทดสอบสมบัติต่าง ๆ หรือผ่านการขึ้นรูปเป็นหัวฉีดน้ำมันทำไนไตรเดชัน โดยควบคุมอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การ Heat Treatment สำหรับการไนไตรเดชัน

Heating Step	Heating Rate ($^{\circ}\text{C/hr}$)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Dwell time (hr)
Heating	240	1100	0
Nitriding	50	1500	*14 - 24
Cooling	180	60	0

*ทำการปรับเปลี่ยนเวลาแช่ของการไนไตรเดชันที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 14, 20, และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ



รวมใช้เวลาในการไนไตรเดชันประมาณ 35 - 45 ชั่วโมง

รูปที่ 3.10 แผนภาพกระบวนการ Nitridation ที่อุณหภูมิ 1500°C

3.7 การตรวจสอบสมบัติของชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชัน

3.7.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

3.7.1.1 การหาความหนาแน่นด้วยการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักของชิ้นงาน

3.3.7.1.1 ชั่งน้ำหนักชิ้นงานและวัดขนาดเพื่อหาปริมาตรของชิ้นงาน บันทึกค่าไว้

3.7.1.1.2 นำค่าที่ได้แทนค่าในสูตร ดังสมการที่ 3.1

3.7.1.2 การหาความหนาแน่นด้วยการแทนที่ด้วยน้ำ

3.7.1.2.1 อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100°C ประมาณ 5 ชั่วโมงและทิ้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนักชิ้นงานแห้งได้ W_D (Unsaturated dry Weight)

3.7.1.2.2 ต้มชิ้นงานในน้ำกลั่นที่เดือดประมาณ 5 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในน้ำ 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานซับด้วยผ้าสักหลาดพอหมาดและนำไปชั่งน้ำหนักได้ W_S (Saturate Weight)

3.7.1.2.3 นำชิ้นงานจาก 3.7.1.2.2 ไปชั่งน้ำหนักในน้ำจะได้น้ำหนักของชิ้นงานที่แขวนลอยในน้ำ คือ W_{SS} (Suspend Weight)

3.7.1.2.4 กำหนดหาความหนาแน่นของชิ้นงานทั้งชิ้น (Bulk density, ρ_b) ดังสมการที่ 3.9

$$\rho_b = \frac{W_D \times \rho_L}{W_S - W_{SS}} \quad [3.9]$$

ρ_L คือ ความหนาแน่นของน้ำหรือของเหลวที่แขวนลอย

3.7.1.3 การวัดความหนาแน่นด้วย Ultracycnometer

การหาความหนาแน่นจริง (True density, ρ_T) ด้วยเครื่อง Ultracycnometer และเป็นผลให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน (% Porosity) ที่มีในชิ้นงาน

3.7.1.3.1 บดซิลิคอนไนไตรด์ให้ละเอียดด้วยโกร่งอะลูมินา

3.7.1.3.2 ชั่งน้ำหนักผงซิลิคอนไนไตรด์ เพื่อนำค่าที่ได้ป้อนลงในเครื่อง

3.7.1.3.3 Calibrate เครื่อง โดย Calibrate V cell และ V added

3.7.1.3.4 ผ่านแก๊สฮีเลียมประมาณ 10 นาที ทำการตรวจสอบ 5 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง

3.7.2 การตรวจสอบสมบัติทางกล

3.7.2.1 การวัดความแข็ง (Hardness, HV) นำชิ้นงานซิลิคอนไนไตรด์ ที่ผ่านการทำไนไตรเคชันเป็นเวลาต่าง ๆ ทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness, HV) ตามมาตรฐาน JIS R 1610 ด้วยเครื่อง Hardness Testing Machine MVK-H2 มีขั้นตอนดังนี้

- 3.7.2.1.1 ขัดเพื่อเตรียมผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 200, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ
- 3.7.2.1.2 นำชิ้นงานเคลือบทอง โดยใช้กระแสไฟฟ้า 15 A เป็นเวลา 120 วินาที เพื่อให้สามารถมองเห็นรอยกดชัดเจน
- 3.7.2.1.3 ทดสอบความแข็งของชิ้นงาน โดยใช้หัวกด Vickers ด้วยแรงกด 1000 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที โดยเลือกระยะการกดจากขอบสู่ใจกลางชิ้นงานแบบสุ่ม ทดสอบชิ้นละไม่น้อยกว่า 10 จุด และหาค่าเฉลี่ยของความแข็ง คำนวณความแข็งโดยใช้สมการ 3.2
- 3.7.3 วัดความขรุขระของผิวชิ้นงาน (Ra) ด้วยเครื่อง Dektak³ ST Surface Profile ในสภาวะการทดลองที่แรงกด 30 มิลลิกรัม ระยะทางที่หัวกดเคลื่อน 9 วินาที และบันทึกภาพ profile ไว้
- 3.7.4 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
- 3.7.4.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)
- 3.7.4.1.1 ขัดเพื่อเตรียมผิวชิ้นงานด้วยจานขัดเพชรขนาด 75 และ 20 ไมครอน ตามลำดับ แล้วขัดด้วยผงเพชรขนาด 9, 6, 3 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ
- 3.7.4.1.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 200 เท่าและถ่ายรูปผลการทดลอง
- 3.7.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM)
- 3.7.4.2.1 ขัดเพื่อเตรียมผิวชิ้นงานด้วยจานขัดเพชรขนาด 75 และ 20 ไมครอน ตามลำดับ แล้วขัดด้วยผงเพชรขนาด 9, 6, 3 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ
- 3.7.4.2.2 นำชิ้นงานเคลือบทอง โดยใช้กระแสไฟฟ้า 15 A เป็นเวลา 120 วินาที เพื่อให้ชิ้นงานนำไฟฟ้า
- 3.7.4.2.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) ร่วมกับ Energy Dispersive Spectrometer (EDS)

3.7.5 ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี

3.7.5.1 ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วย X-Ray Diffractometer

3.7.5.1.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการไนไตรเดชันเป็นเวลาต่าง ๆ ตัดตามขวางให้ได้ระนาบหรือทำให้เป็นผงโดยการบดด้วยโกร่งอะลูมินา

3.7.5.1.2 นำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD โดยใช้ step angle 0.04° .

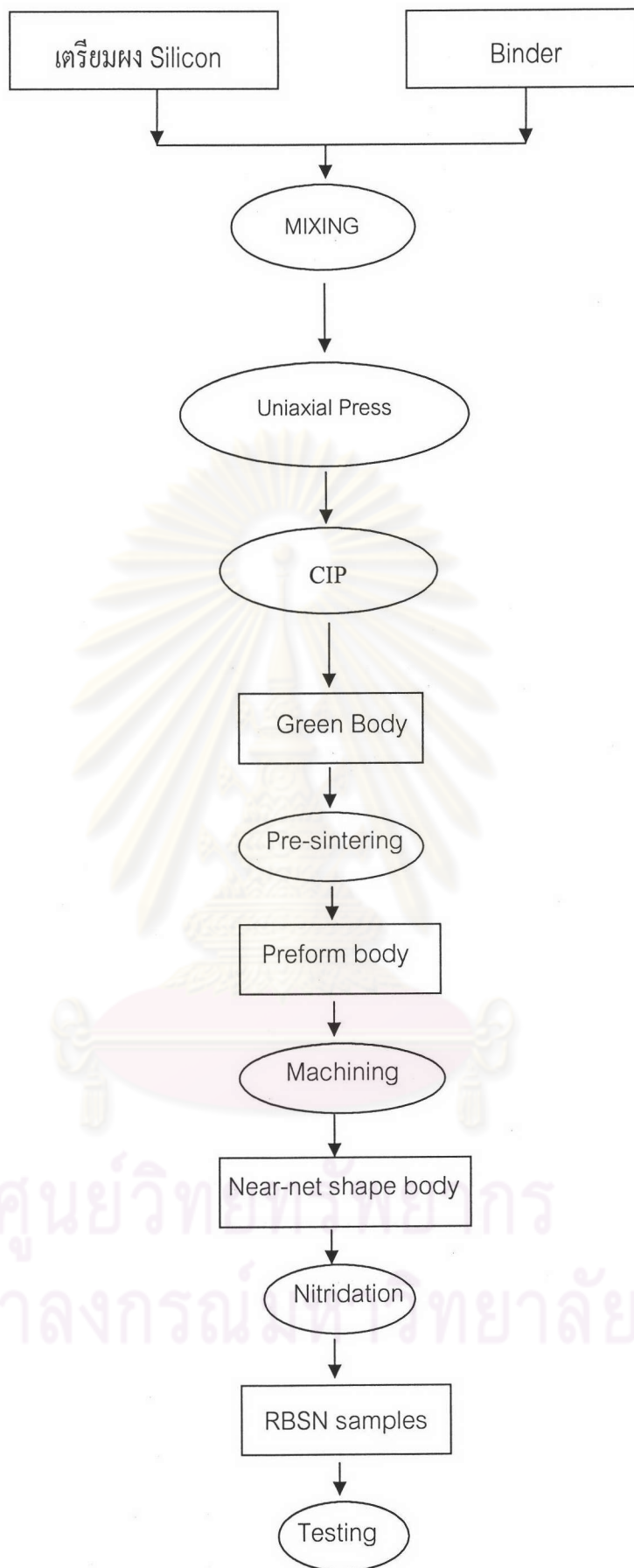
Count time 1.0 sec ใช้ Cu target receiving slit 0.2° , beam slit 1.0°

ตรวจหา peak ที่มุมตั้งแต่ 10° ถึง 90°

สามารถสรุปขั้นตอนการขึ้นรูปได้ดังรูปที่ 3.11



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.11 กระบวนการขึ้นรูปรีแอกชันบอนด์ซิลิคอนไนไตรด์ทั้งหมด