บทที่ 2

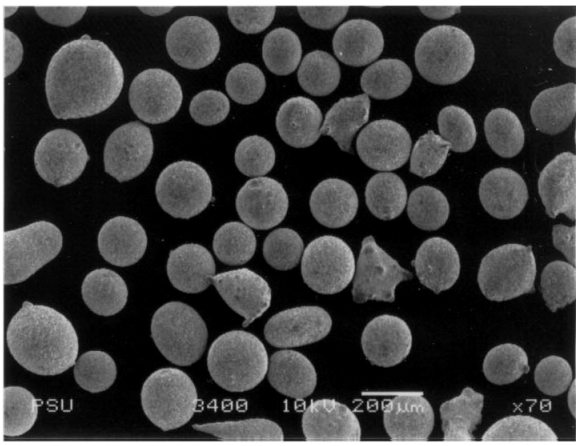
วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

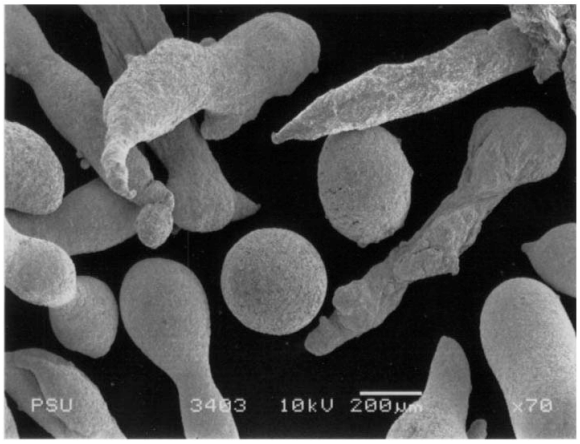
วัสดุสำคัญที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ ผงบรอนซ์ ผลิตโดยวิธีอะตอมไมเซชั่น ซึ่งมี 3 ขนาด เป็นผงบรอนซ์ที่มีส่วนผสม 90Cu-10Sn มีสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของผงบรอนซ์ที่ได้มานั้นเมื่อนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM; JEOL JSM-5800LV) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผงบรอนซ์มีรูปร่างลักษณะโดยส่วนมากเป็นทรงกลม แต่ก็ยังมีรูปร่างแบบไม่แน่นอนปนเข้ามาด้วย ดังรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของผงบรอนซ์จากผู้ผลิต

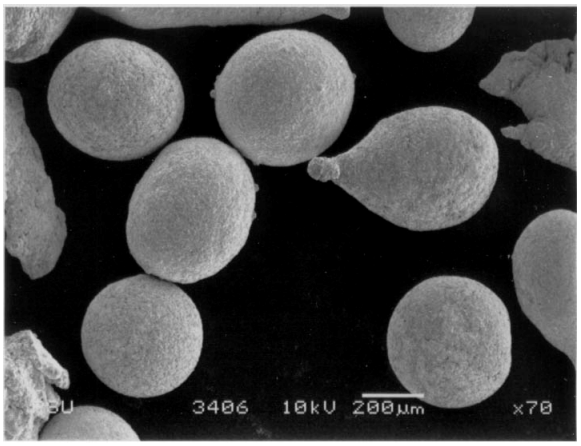
Materials	Apparent density (g/cc)	Flow ability (sec for 50 g/ 5 mm hole)
Lunar 90Cu 10Sn 150	5.2	2.3
Lunar 90Cu 10Sn 250	4.9	3.0
Lunar 90Cu 10Sn 350	4.7	5.4



(ก) Lunar 90Cu 10Sn 150



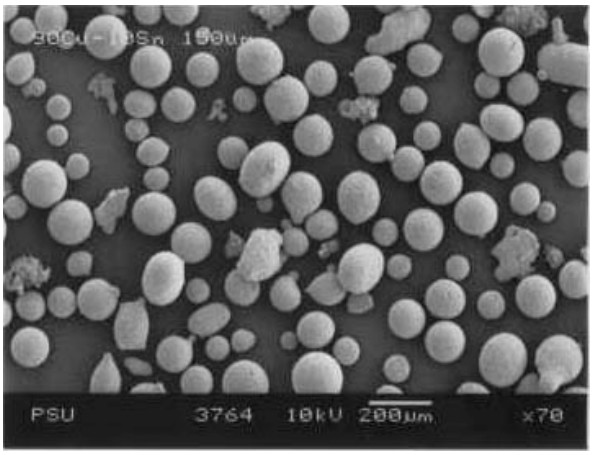
(ข) Lunar 90Cu 10Sn 250



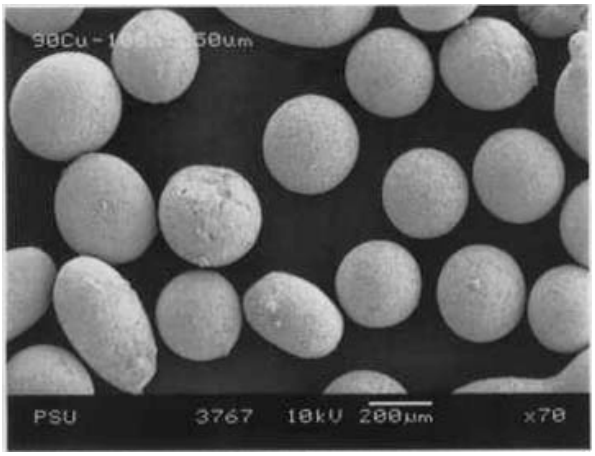
(ค) Lunar 90Cu 10Sn 350

รูปที่ 2.1 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 70 เท่า ของผงบรอนซ์ที่ซื้อมาทั้ง 3 ขนาด

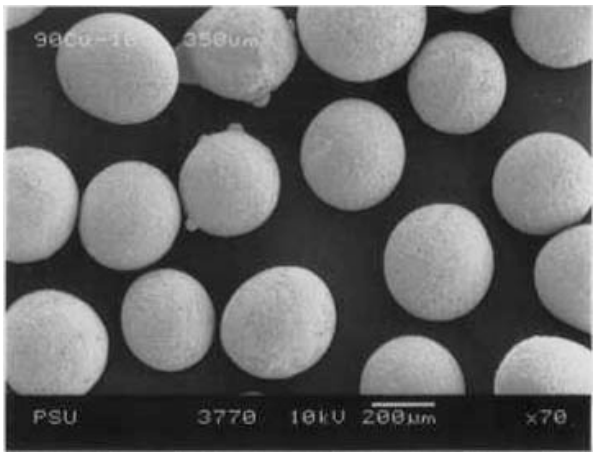
ดังนั้นจึงต้องนำผงบรอนซ์ทั้ง 3 ขนาด ไปทำการร่อนคัดขนาดใหม่และนำไปถ่ายภาพเพื่อดูรูปทรงซ้ำอีกครั้ง (รูปที่ 2.2) เห็นได้ว่าผงบรอนซ์มีรูปทรงที่กลมใกล้เคียงกันมากขึ้น เมื่อนำไปวัดการกระจายตัวของผงโลหะด้วยเครื่อง Laser particle size analyzer (BECKMAN COULTER, LS 230) จะได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคในแต่ละขนาดนั้นการกระจายตัวที่แคบ และได้ค่าดังตารางที่ 2.2



(ก) Lunar 90Cu 10Sn 150

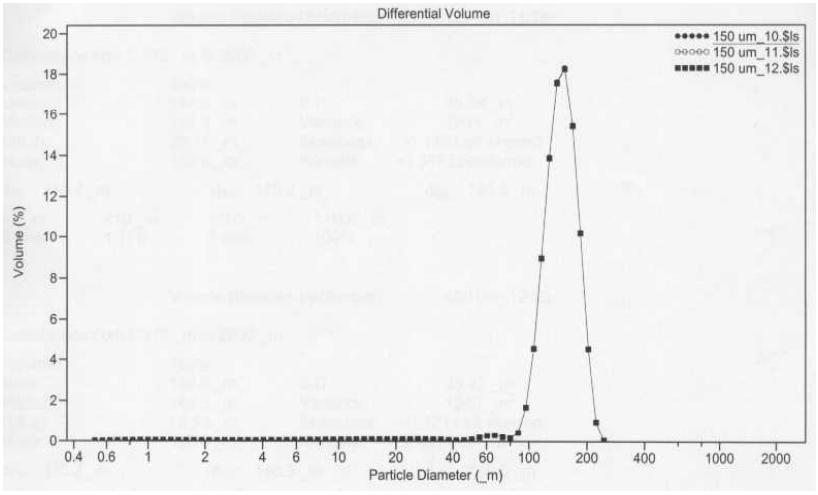


(ข) Lunar 90Cu 10Sn 250

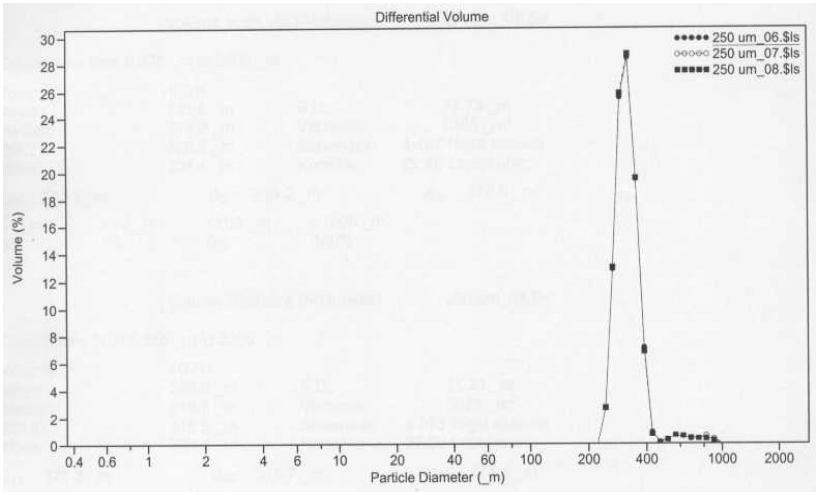


(ค) Lunar 90Cu 10Sn 350

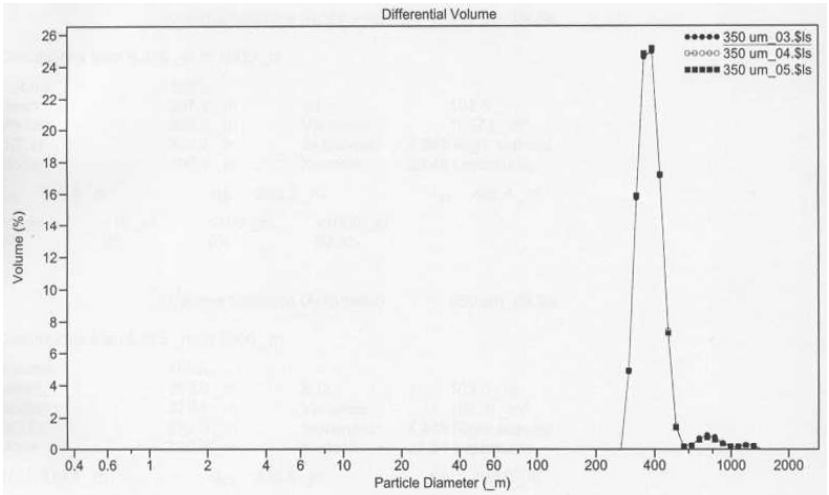
รูปที่ 2.2 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 70 เท่า ของผงบรอนซ์ทั้ง 3 ขนาด ที่ทำการคัดขนาดใหม่



(ก) Lunar 90Cu 10Sn 150



(ข) Lunar 90Cu 10Sn 250



(ค) Lunar 90Cu 10Sn 350

รูปที่ 2.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวในของเหลวของผงบรอนซ์ทั้ง 3 ขนาด ด้วยเครื่อง laser particle size analyzer

ตารางที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของผงบรอนซ์ในของเหลวด้วยเครื่อง laser particle size analyzer

Materials	Mean size (μm)
Lunar 90Cu 10Sn 150	149.2
Lunar 90Cu 10Sn 250	319.5
Lunar 90Cu 10Sn 350	381.4

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

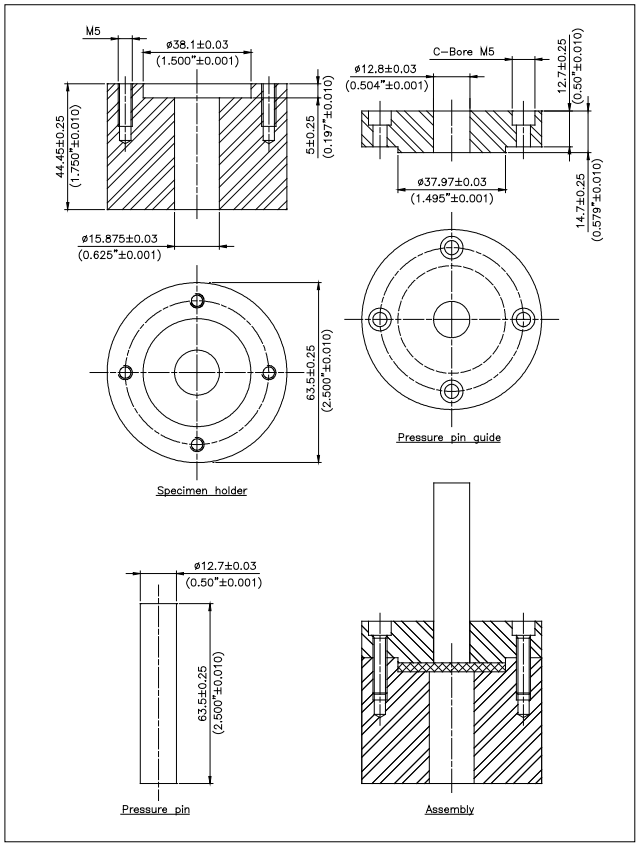
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยเครื่องมือที่มีอยู่แล้ว และเครื่องมือที่ต้องจัดสร้างขึ้นมาใหม่ ดังนี้

2.2.1 เครื่องมือที่มีอยู่แล้ว คือเครื่องมือที่เป็นครุภัณฑ์ต่างๆ ของภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ได้แก่

2.2.1.1 เตาอบอุณหภูมิสูงแบบท่อแนวนอน (Horizontal tube furnace) (CARBOLITE, CTF 18/75/600) ซึ่งได้ติดตั้งท่อก๊าซที่ใช้สำหรับควบคุมบรรยากาศภายในเตาเพิ่มเติมเข้าไป ดังรูปที่ 2.4

รูปที่ 2.4 ลักษณะการติดตั้งท่อก๊าซที่ใช้สำหรับควบคุมบรรยากาศภายในเตา

2.2.1.2 เครื่องทดสอบแบบ Universal testing machine (HOUNSFIELD, 100KS) ใช้เพื่อทดสอบความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานโดยได้สร้างอุปกรณ์สำหรับจับยึดชิ้นงานเพิ่มเติมเข้าไป (รูปที่ 2.5) ซึ่งได้ออกแบบและปรับแก้มาจากอุปกรณ์ตามมาตรฐาน MPIF Standard 39 (1994) ในการติดตั้งเพื่อใช้งานนั้นเครื่องทดสอบจะทำงานในลักษณะกด ดังนั้นอุปกรณ์นี้จะวางลงบนฐานรองดังรูปที่ 2.6



(ก) แบบงาน

(ข) อุปกรณ์ที่ทำเสร็จแล้ว

รูปที่ 2.5 อุปกรณ์สำหรับจับยึดชิ้นงานทดสอบแรงเฉือน

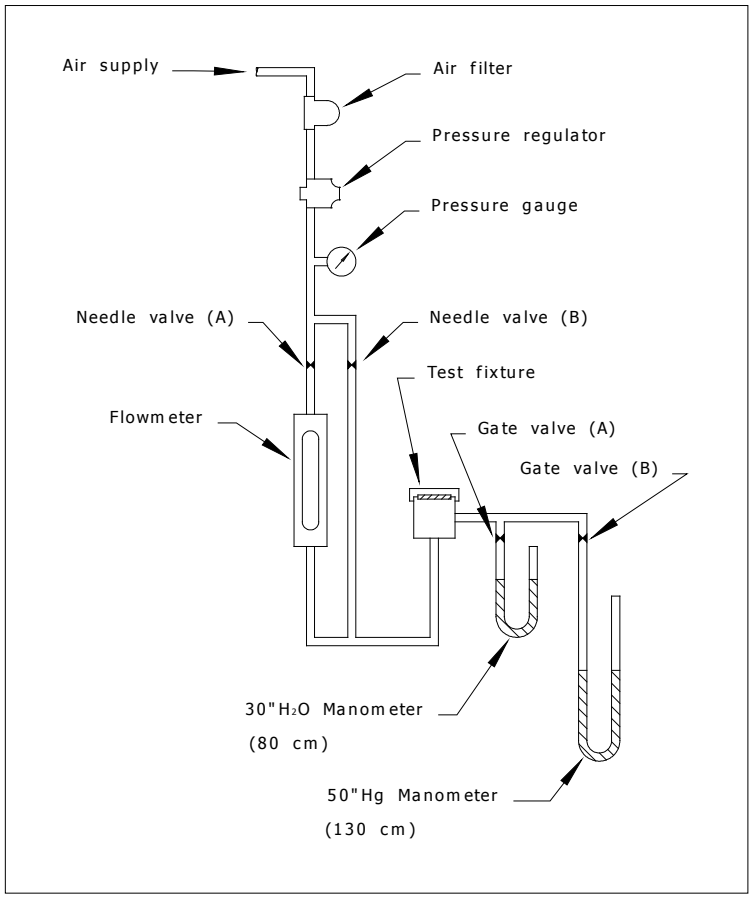
รูปที่ 2.6 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับจับยึดชิ้นงานทดสอบแรงเฉือน

2.2.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์ image analyzer เป็นกล้อง OLYMPUS รุ่น BH2-UMA ติดตั้งเข้ากับคอมพิวเตอร์ประมวลผล โดยใช้โปรแกรม UTHSCSA ImageTool ในการวิเคราะห์ผล

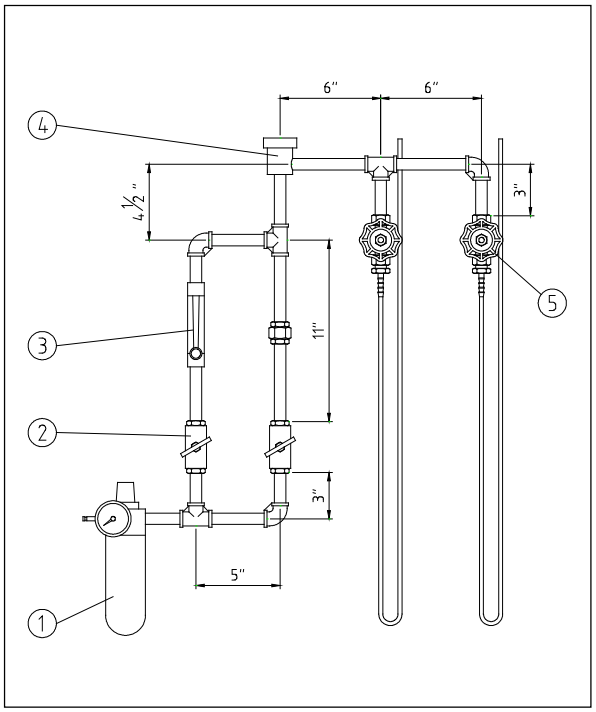
2.2.1.4 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 4 ตำแหน่ง (SARTORIUS) ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักของชิ้นงานที่ผลิตได้ เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงาน

2.2.2 เครื่องมือที่ต้องจัดสร้างขึ้นมาใหม่ มีดังนี้

2.2.2.1 เครื่องมือทดสอบหาความสามารถในการซึมผ่านและขนาดรูพรุนโตสุด เป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นมาโดยอ้างอิงแบบมาจากมาตรฐาน MPIF Standard 39 (1994) ดังรูปที่ 2.7 และได้มีการปรับปรุงเพื่อให้สะดวกในการใช้งานเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 2.8)

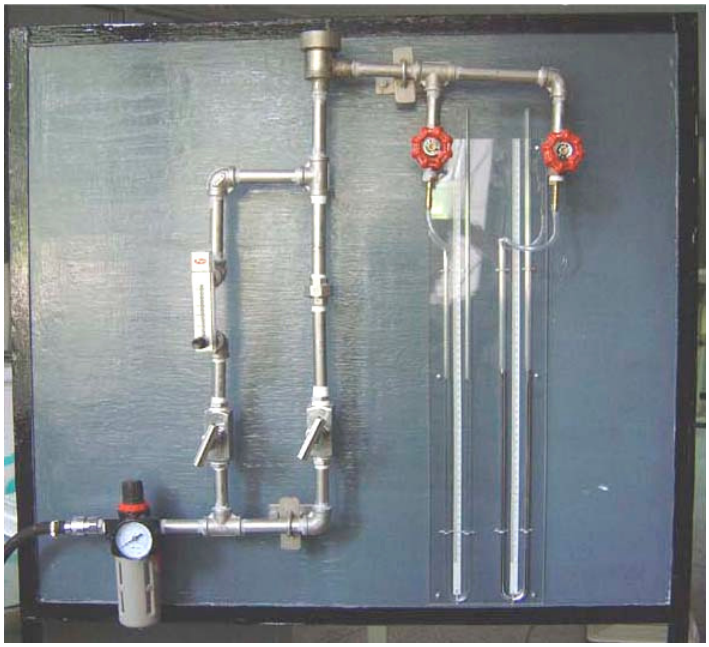


รูปที่ 2.7 แบบร่างของเครื่องมือทดสอบหาความสามารถในการซึมผ่านและขนาดรูพรุนโตสุด [MPIF Standard 39, 1994]



(ก) แบบที่ทำขึ้นใช้จริง ซึ่งประกอบด้วย

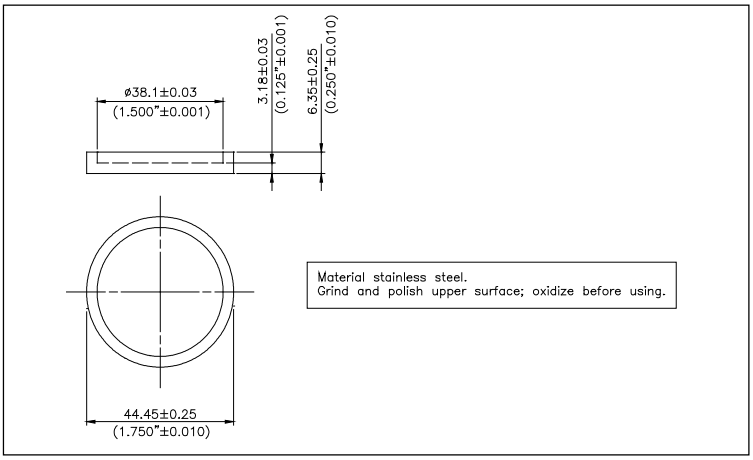
1. ชุดปรับความดันอากาศ
2. วาล์วเข็ม (Needle valve)
3. มาตรวัดอัตราการไหลของอากาศ
4. ฟิกเจอร์จับชิ้นงาน
5. วาล์ว (Gate valve)



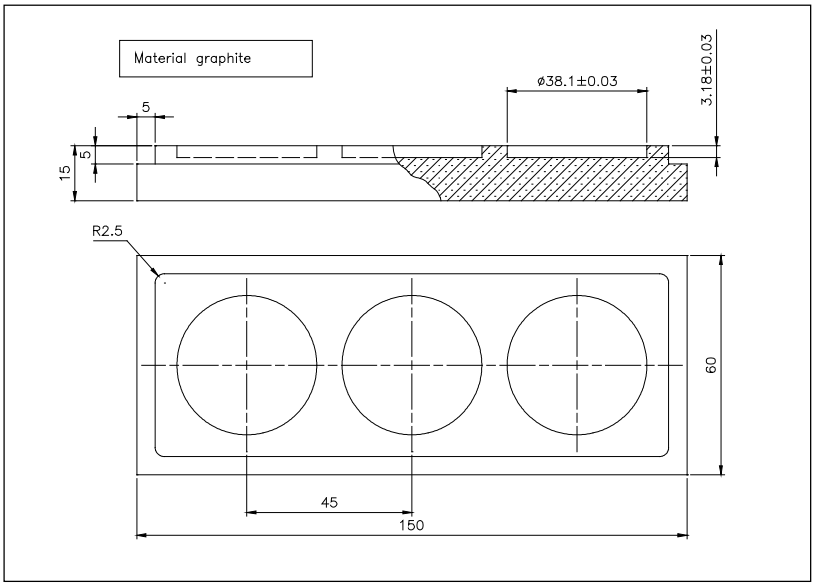
(ข) ภาพเครื่องมือทดสอบหาความสามารถในการซึมผ่านจริง

รูปที่ 2.8 เครื่องมือทดสอบหาความสามารถในการซึมผ่านและขนาดรูพรุนโตสุด

2.2.2.2 แม่พิมพ์สำหรับใช้ในการผลิตโลหะบรอนซ์พรุน จากมาตรฐาน MPIF Standard 39 (1994) เป็นแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีขนาดพื้นที่สำหรับเติมผงบรอนซ์เส้นผ่าศูนย์ กลาง 1.5 นิ้ว หรือ 38.1 มิลลิเมตร มีความลึกเท่ากับ 0.125 นิ้ว หรือ 3.18 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.9 และได้ออกแบบให้ผนังภายในมีความเอียง 1 องศา เพื่อให้ง่ายในการนำชิ้นงานออกเมื่ออบผนึกชิ้นงานเสร็จ นอกจากนี้ได้สร้างแม่พิมพ์ที่ทำจากกราไฟต์ขึ้นมา (ภาพที่ 2.10) โดยอ้างอิงขนาดของพื้นที่สำหรับเติมผงบรอนซ์ตามมาตรฐาน MPIF Standard 39 (1994) เช่นกัน



รูปที่ 2.9 แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ผลิตบรอนซ์พรุน [MPIF Standard 39, 1994]



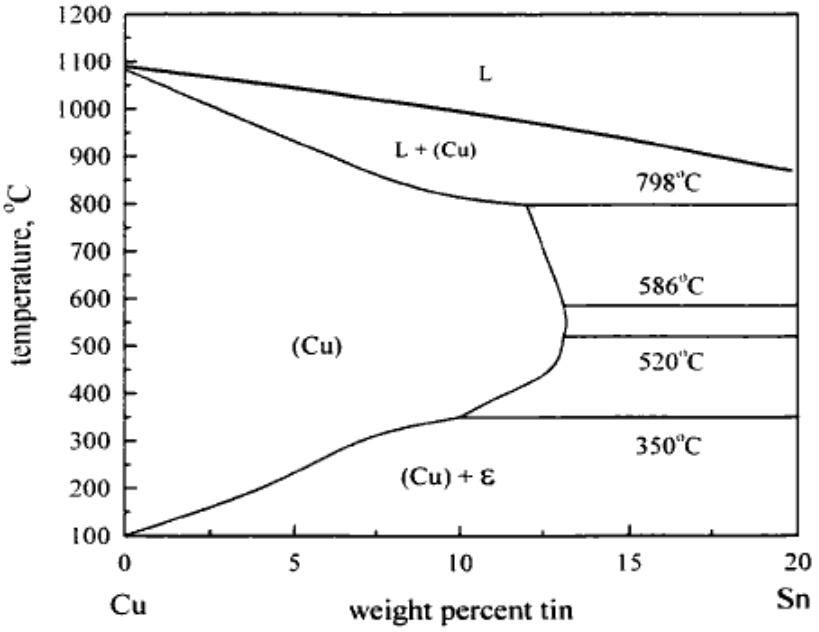
รูปที่ 2.10 แม่พิมพ์กราไฟต์ที่ใช้ผลิตบรอนซ์พรุน

หมายเหตุ: ขนาดพื้นที่สำหรับเติมผงโลหะอ้างอิงจาก MPIF Standard 39 (1994)

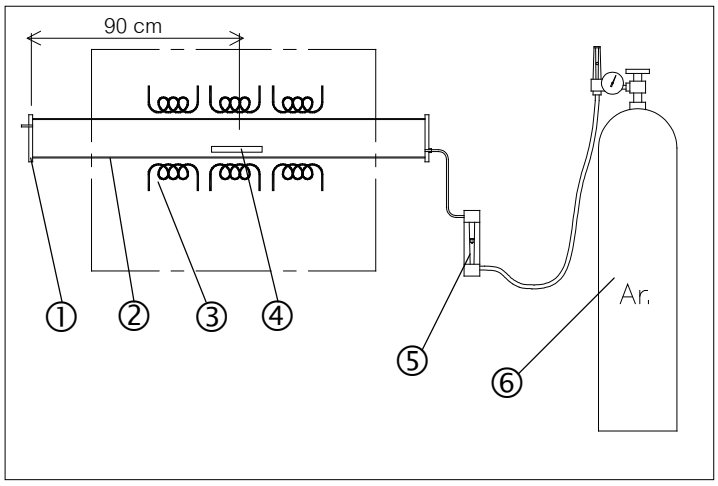
2.3 วิธีการดำเนินงาน

ในการผลิตโลหะบรอนซ์พรุนนั้นได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาค อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการอบผนึก และอิทธิพลของแม่พิมพ์ ที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศในโลหะบรอนซ์พรุน ขนาดรูพรุนโตสุด ความแข็งแรงเชิงกล ค่าความพรุน เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดในขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

2.3.1 ขั้นตอนการผลิตโลหะบรอนซ์พรุน โดยเติมผงบรอนซ์ลงในแม่พิมพ์แล้วใช้บรรทัดเหล็กปาดให้เสมอกัน ใช้อุณหภูมิอบผนึก 850 และ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวอ้างอิงจากงานวิจัยของ Moshksar (1993) งานวิจัยของ Liu, et al. (1999) และแผนภาพสมดุลของทองแดง - ดีบุก (รูปที่ 2.11) เวลาเผาแช่ 15 และ 30 นาที โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 4 ลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อตั้งค่าต่างๆ ตามที่ต้องการเสร็จแล้ว ให้นำแม่พิมพ์ใส่เข้าไปในเตาในตำแหน่งกึ่งกลางของท่อลึกประมาณ 90 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.12 แล้วปิดฝาเตาให้สนิทจากนั้นจึงปล่อยให้ก๊าซไหลผ่านและเริ่มให้เตาทำงานตามโปรแกรมที่ตั้งไว้ เมื่อเสร็จสิ้นการอบผนึกจะต้องรอจนอุณหภูมิชิ้นงานลดลงสู่อุณหภูมิห้องจึงจะนำชิ้นงานออกมา

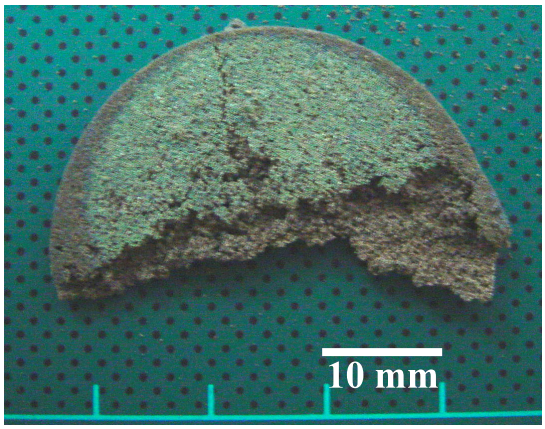


รูปที่ 2.11 แผนภาพสมดุลของทองแดง-ดีบุก



รูปที่ 2.12 ลักษณะระบบของเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ

จากการทดลองผลิตโลหะบรอนซ์พรุนในเบื้องต้นนั้นทำให้ทราบว่าที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ผงบรอนซ์ขนาด 320 และ 350 ไมโครเมตร นั้นไม่สามารถอบผนึกให้เป็นชิ้นงานได้ ดังรูปที่ 2.13 แต่หากเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถทำได้ ซึ่งทั้งนี้เนื่องจากผงอนุภาคโตจะต้องใช้อุณหภูมิในการอบผนึกที่สูงกว่าผงที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เพราะอนุภาคขนาดโตจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อยกว่า ดังนั้นอนุภาคขนาดเล็กสามารถอบผนึกได้เร็วกว่าขนาดโต เนื่องจากสามารถจะเกิดการแพร่ที่ผิว (Surface diffusion) และการแพร่ที่ขอบเกรน (Grain boundary diffusion) ได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีขนาดโต ดังนั้นการทดลองที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส สำหรับผงทั้งสองขนาดดังกล่าวจึงได้ตัดออกไปจากการทดลอง



รูปที่ 2.13 ลักษณะชิ้นงานจากผงอนุภาคขนาด 320 ไมโครเมตร
อบผนึกที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

2.3.2 ทดสอบหาสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานบรอนซ์พรุน ได้แก่ อัตราการหดตัว ความหนาแน่น ความพรุน ขนาดรูพรุนโตสุด หาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซ และสมบัติเชิงกล ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.2.1 หาอัตราการหดตัวจะวัดจากชิ้นงานทุกชิ้นที่ผลิตได้ โดยวัดความโตของชิ้นงานทำมุมทุกๆ 45 องศา (สี่ครั้งต่อชิ้น) แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการหดตัวจากสมการที่ 2.1

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{A - B}{A} \times 100 \tag{2.1}$$

เมื่อ A คือ ขนาดความโตภายในของแม่พิมพ์
B คือ ขนาดความโตของชิ้นงานที่ผลิตได้

2.3.2.2 คำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงานที่ผลิตได้ทุกชิ้น โดยนำชิ้นงานที่ผลิตได้ไปชั่งน้ำหนัก และวัดขนาด แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่น จากสมการที่ 2.2

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{2.2}$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของชิ้นงานโลหะบรอนซ์พรุน (g/cm^3)
m คือ มวลของชิ้นงานโลหะบรอนซ์พรุน (g)
V คือ ปริมาตรของชิ้นงานโลหะบรอนซ์พรุน (cm^3)

2.3.2.3 หาอัตราความพรุน และค่าความพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผลิตได้ทุกชิ้นที่ผลิต โดยคำนวณหาค่าจากสมการที่ 1.7 และ 1.8

2.3.2.4 ทดสอบหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน เป็นการทดสอบหาความสามารถในการให้อากาศไหลซึมผ่านชิ้นทดสอบ ซึ่งจะทำการวัดชิ้นงานทุกชิ้นที่ผลิตได้ มีวิธีการดังนี้

ก. ยึดชิ้นทดสอบเข้ากับฟิกเจอร์ของชุดทดสอบ โดยมีประเก็นยางกันซึมรองอยู่ที่ ผิวหน้าของชิ้นทดสอบเหลือพื้นที่ผิวเปิดขนาด 645.2 ตารางมิลลิเมตร (1 ตารางนิ้ว)

ข. ปล่อยอากาศไหลผ่านตัวกรอง โดยให้เพิ่มขึ้นทีละน้อยจนอัตราการไหลคงที่ในปริมาณ 30 ลิตรต่อนาที

ค. อ่านค่าความแตกต่างของความดันจากมานอมิเตอร์แล้วนำไปแทนค่าในสมการที่ 1.5

2.3.2.5 ทดสอบหาขนาดรูพรุนโตสุดของตัวกรอง เป็นการวัดค่าความแตกต่างของความดันที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดฟองอากาศฟองแรก โดยวัดจากชิ้นงานทุกชิ้น ซึ่งมีวิธีการดังนี้

ก. ชิ้นทดสอบจะถูกแช่ไว้ในแอลกอฮอล์อย่างน้อยสองนาที

ข. นำชิ้นทดสอบที่แช่แอลกอฮอล์ไว้แล้วไปยึดเข้ากับฟิกเจอร์ให้แน่นโดยมีประเก็นยางรองผิวหน้าของชิ้นงานทั้งสองด้าน

ค. เปิดให้แรงดันอากาศจำนวนน้อยๆ แก่ชิ้นทดสอบเพื่อป้องกันแอลกอฮอล์ภายในชิ้นทดสอบถูกขับทิ้งออกมา และเทราดแอลกอฮอล์จำนวน 2 มิลลิลิตร ลงบนผิวหน้าของชิ้นทดสอบ

ง. เปิดวาล์วเพิ่มปริมาณอากาศให้ไหลผ่านชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ จนมองเห็นฟองอากาศฟองแรกเกิดขึ้น

จ. อ่านค่าความแตกต่างของความดันจากมานอมิเตอร์แล้วนำไปแทนค่าในสมการที่ 1.6

2.3.2.6 วิธีการทดสอบความแข็งแรงเชิงกลจะใช้การทดสอบแบบแรงเฉือน วิธีการนี้เป็นการวัดแรงสูงสุดที่ทำให้วัสดุเริ่มเสียรูป โดยสุ่มเลือกชิ้นงานมาจากกลุ่มตัวอย่างละสองชิ้น แล้วทำการทดสอบตามขั้นตอนดังนี้

ก. ยึดชิ้นทดสอบเข้ากับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

ข. วางอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานบนเครื่องทดสอบแรงกด

ค. ทำการกดชิ้นทดสอบ โดยให้อัตราการเคลื่อนที่ของการกดที่ 250 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเป็นอัตราสูงสุดที่โปรแกรมของเครื่องทดสอบทำได้ กดจนชิ้นงานเริ่มเสียรูป

ง. บันทึกค่าแรงสูงสุดที่ได้ และนำไปคำนวณหาค่าความแข็งแรงเฉือนจากสมการที่ 1.4