บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษา คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของของผงโลหะผสมของเหล็ก ทองแดง และ แกรไฟต์ เป็นส่วนผสม

โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการศึกษาวิจัยทั้งหมด ดังนี้

1. การเตรียมชิ้นงานและการขึ้นรูปชิ้นงาน
2. การตรวจสอบรูปทรง ของผงเหล็ก ผงทองแดง และแกรไฟต์
    2.1) การตรวจสอบรูปทรงของผงวัสดุ
3. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ
    3.1) อัตราส่วนผสมในโลหะผสม
    3.2) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)
    3.3) การเปลี่ยนแปลงขนาด (dimensional change)
4. การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล
    4.1) แรงดัดชนิด 2 แกน (biaxial bending strength)
    4.2) โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elastic)
    4.3) ความแข็ง (Hardness)
5. การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ

3.1 การเตรียมชิ้นงาน และการขึ้นรูปชิ้นงาน

3.1.1 วัสดุ และอุปกรณ์

วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมและขึ้นรูปชิ้นงาน สำหรับการศึกษาวิจัยนี้ คือ

1) ผงเหล็ก ชนิด NC 100.24

2) ผงทองแดง

3) ผงแกรไฟต์

4) สารหล่อลื่น (Lubricant) ชนิด ซิงก์สเตอเรต(Zine-sterate)

5) เครื่องผสม (Mixer) ขนาดความจุ 5 กิโลกรัม

6) เครื่องอัดแบบเพลาข้อเหวี่ยง (mechanical eccentric press)

7) เตาเผาสายพาน ภายใต้บรรยากาศก๊าซแอมโมเนีย

3.1.2 วิธีการเตรียมชิ้นงานสำหรับผงโลหะผสม

วิธีการในการเตรียมขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับงานวิจัยนี้ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) สุ่มชั่งผงโลหะชนิดต่างๆตามส่วนผสมที่กำหนดไว้ในตารางแผนการทดลองตารางที่ 3.1

2) นำส่วนผสมที่ชั่งแล้วทั้งหมดมาผสมกันในเครื่องผสม (Mixer) โดยส่วนผสมที่มีลักษณะเป็นผงจะถูกผสมให้เข้ากัน

3) นำผงของส่วนผสมที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ไปใส่ในแม่พิมพ์ (mold) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ซึ่งแม่พิมพ์ได้ติดตั้งในเครื่องอัดแบบเพลาข้อเหวี่ยง (mechanical eccentric press) แล้ว โดยตั้งแรงอัดที่ไว้ที่ 10 ตัน และทำการอัดผงโลหะในแม่พิมพ์ ซึ่งจะได้ชิ้นงานเป็นแผ่นทรงกระบอกบาง หนาประมาณ 3 มิลลิเมตร

4) นำชิ้นงานที่ได้รับการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปแล้ว เข้าเตาเผาแบบสายพานซึ่งเตาสายพานนี้ ยาวประมาณ 50 ฟุต บรรยายกาศภายในเตาเผาเป็นก๊าซแอมโมเนีย โดยอุณหภูมิในการเผานั้นตามที่กำหนดไว้ในตารางแผนการทดลอง ตารางที่ 3.1 เวลาที่ใช้ในการเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง นับตั้งแต่ใส่ชิ้นงาน จนชิ้นงานถูกนำออกมาจากเตาเผา ปล่อยให้เย็นในบรรยากาศ

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของผงโลหะผสมระหว่าง เหล็ก ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา

ส่วนผสมที่	เหล็ก (% โดยน้ำหนัก)	ทองแดง (% โดยน้ำหนัก)	แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิการเผา (องศาเซสเซียส)
1	100	0	0	1120
2	98	2	0	1120
3	96	4	0	1120
4	94	6	0	1120
5	92	8	0	1120
6	90	10	0	1120
7	99.6	0	0.4	1120
8	97.6	2	0.4	1120
9	95.6	4	0.4	1120
10	93.6	6	0.4	1120
11	91.6	8	0.4	1120
12	89.6	10	0.4	1120
13	99.2	0	0.8	1120
14	97.2	2	0.8	1120
15	95.2	4	0.8	1120
16	93.2	6	0.8	1120
17	91.2	8	0.8	1120
18	89.2	10	0.8	1120
19	98.8	0	1.2	1120
20	96.8	2	1.2	1120
21	94.8	4	1.2	1120
22	92.8	6	1.2	1120
23	90.8	8	1.2	1120
24	88.8	10	1.2	1120

ตารางที่ 3.1(ต่อ) ส่วนผสมของผงโลหะผสมระหว่าง เหล็ก ทองแดง แกรไฟต์ และอุณหภูมิการเผา

ส่วนผสมที่	เหล็ก (% โดยน้ำหนัก)	ทองแดง (% โดยน้ำหนัก)	แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิการเผา (องศาเซสเซียส)
25	100	0	0	950
26	98	2	0	950
27	96	4	0	950
24	94	6	0	950
29	92	8	0	950
30	90	10	0	950
31	99.6	0	0.4	950
32	97.6	2	0.4	950
33	95.6	4	0.4	950
34	93.6	6	0.4	950
35	91.6	8	0.4	950
36	89.6	10	0.4	950
37	99.2	0	0.8	950
38	97.2	2	0.8	950
39	95.2	4	0.8	950
40	93.2	6	0.8	950
41	91.2	8	0.8	950
42	89.2	10	0.8	950
43	98.8	0	1.2	950
44	96.8	2	1.2	950
45	94.8	4	1.2	950
46	92.8	6	1.2	950
47	90.8	8	1.2	950
48	88.8	10	1.2	950

ตารางที่ 3.1(ต่อ) ส่วนผสมของผงโลหะผสมระหว่าง เหล็ก ทองแดง แกรไฟต์ และอุณหภูมิการเผา

ส่วนผสมที่	เหล็ก (% โดยน้ำหนัก)	ทองแดง (% โดยน้ำหนัก)	แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิการเผา (องศาเซสเซียส)
49	100	0	0	880
50	98	2	0	880
51	96	4	0	880
52	94	6	0	880
53	92	8	0	880
54	90	10	0	880
55	99.6	0	0.4	880
56	97.6	2	0.4	880
57	95.6	4	0.4	880
58	93.6	6	0.4	880
59	91.6	8	0.4	880
60	89.6	10	0.4	880
61	99.2	0	0.8	880
62	97.2	2	0.8	880
63	95.2	4	0.8	880
64	93.2	6	0.8	880
65	91.2	8	0.8	880
66	89.2	10	0.8	880
67	98.8	0	1.2	880
68	96.8	2	1.2	880
69	94.8	4	1.2	880
70	92.8	6	1.2	880
71	90.8	8	1.2	880
72	88.8	10	1.2	880

หมายเหตุ : การทดลองจะกระทำซ้ำ 2 ครั้ง (two replicates)

3.2 การตรวจสอบรูปทรงผงวัสดุ

เป็นการศึกษาลักษณะรูปทรงของผงเหล็ก ผงทองแดง และแกรไฟต์ ด้วยภาพถ่ายจากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) จากบริษัท Jeol Co., Ltd รุ่น JSM-5410 LV ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการนำผงวัสดุที่ต้องการจะทำการศึกษา โรยบนเทปกาว 2 หน้าซึ่งติดอยู่บนแท่นทองเหลืองสำหรับติดชิ้นงาน(stub) นำแท่นทองเหลืองนั้น ไปผ่านกระบวนการฉาบทอง เมื่อผ่านขั้นตอนการฉาบทองแล้ว จึงนำผงวัสดุไปส่องดูกับ เครื่อง SEM เลือกความต่างศักย์ของเครื่อง กำลังขยายที่เหมาะสม ระยะโฟกัส ความสว่าง และ ความคมชัด จากนั้นจึงทำการถ่ายภาพตามตำแหน่งที่ต้องการ

3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นส่วนภายหลังการเผา มีดังนี้ คือ

1. อัตราส่วนผสมในโลหะผสม
2. ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)
3. การเปลี่ยนแปลงขนาด (dimension change)

3.3.1 การตรวจสอบอัตราส่วนผสมในโลหะผสม

เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ของเหล็ก ทองแดง และแกรไฟต์ ในโลหะผสมหลังจากการเผา เพื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ในส่วนผสมก่อนการเผา จากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) จากบริษัท Jeol Co., Ltd รุ่น JSM-6400 พร้อมชุดวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์ธาตุ โดยการนำชิ้นงานที่ต้องการจะทำการศึกษา ติดกับแท่นทองเหลืองสำหรับติดชิ้นงาน (stub) นำแท่นทองเหลืองนั้น เข้าเครื่อง SEM แล้วเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำการเลือกธาตุที่จะทำการศึกษา จากนั้นจึงทำการเลือกตำแหน่งบนชิ้นงานที่ต้องการ เมื่อตำแหน่งที่ต้องการแล้ว ใช้คำสั่งให้คอมพิวเตอร์คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ของธาตุในชิ้นงาน

3.3.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

นำชิ้นงานที่เตรียมได้ มาวัดหา ค่าความถ่วงจำเพาะ ด้วยวิธีการแทนที่น้ำ (Archimedes's Method) โดยใช้ขวดแก้ว Pycnometer ขนาดความจุ 100 ซีซี. (ดังแสดงในรูปที่ 3.1) โดยในการวัดค่าความถ่วงจำเพาะนี้ จะกระทำซ้ำ 2 ครั้ง

สูตรที่ใช้สำหรับคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นงาน แสดงได้ดังสมการที่ (3.1) ตามมาตรฐาน ASTM D-792

$$\text{Sp.gr.} = \frac{a}{(a+w-b)} \qquad (3.1)$$

เมื่อ Sp.gr. = ความถ่วงจำเพาะ

a = น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่ชั่งในอากาศ (กรัม)

w = น้ำหนักรวมของน้ำและภาชนะใส่ (กรัม)

b = น้ำหนักรวมของชิ้นทดสอบ น้ำและภาชนะ (กรัม)

3.3.3 การเปลี่ยนแปลงขนาด (dimension change)

นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเผาแล้ว และอยู่ในสภาพที่เย็นตัวในอุณหภูมิปกติ มาทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (L_S) และทำการวัดเส้นผ่านศูนย์ของแม่พิมพ์ (L_D) โดยเปรียบเทียบเป็นเปอรเซ็นต์

สำหรับสูตรที่ใช้สำหรับคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงขนาด แสดงได้ดังสมการ 3.2 ตามมาตรฐาน ASTM E-18

$$D\% = \frac{\left[L_{Ss} - L_D\right]}{L_D} x100 \qquad (3.2)$$

เมื่อ D = การเปลี่ยนแปลงขนาด (เปอร์เซ็นต์)

L_S = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

L_D = เส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ (มิลลิเมตร)

3.4 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนภายหลังการเผา มีดังนี้ คือ

1. คุณสมบัติภายใต้แรงดัดชนิด 2 แกน (biaxial bending properties)
2. ความแข็ง (hardness)
3. การตรวจสอบลักษณะเกรนของผงโลหะผสมภายหลังการดัดชนิด 2 แกน
4. การตรวจสอบการกระจายของผงโลหะผสมภายหลังการดัดชนิด 2 แกน

3.4.1 คุณสมบัติภายใต้แรงดัดชนิด 2 แกน (biaxial bending properties)

นำชิ้นงานรูปทรงกระบอกแบน ทดสอบเพื่อหาค่าแรงดัดชนิด 2 แกน(biaxial bending strength) และ โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) โดยใช้อุปกรณ์ทดสอบแรงดัดชนิด 2 แกน ที่มีส่วนรองรับเป็นลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.318 mm. จำนวน 3 ลูก บนเส้นรอบวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระยะ 25.2 mm. และบอลแต่ละลูกห่างกัน 120 องศา และมีหัวเข็มเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.58 mm. (ดังแสดงในรูปที่ 3.2) โดยใส่อุปกรณ์ทดสอบบนที่รองรับของเครื่องทดสอบแรงดัด ชนิด 2 แกน ของบริษัท Hounsfield Test Equipment., Ltd. รุ่น H10K-C (ดังแสดงในรูปที่ 3.3) เลือกใช้เมนูสำหรับการทดสอบเป็น Compression to Extension (N) Bottom Zone โดยจะเป็นการให้แรงกดผ่านหัวเข็ม ในแนวดิ่งตรงตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงาน เครื่องทดสอบจะเพิ่มแรงกดด้วยอัตราคงที่จนกระทั่งชิ้นทดสอบแตก ด้วยวิธีการวัดแบบดังกล่าว ทำให้สามารถวัดค่าแรงกด และ ระยะแอ่น ณ จุดที่ชิ้นงานแตกหัก

สำหรับการทดสอบนี้ ได้กำหนดค่าความเร็ว สำหรับการทดสอบ (test speed) ไว้ที่ 2 มิลลิเมตร/นาที และจำนวนชิ้นงานที่จะต้องทำการทดสอบสำหรับแต่ละตัวอย่างเท่ากับ 10 ชิ้น

สำหรับสูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงดัดชนิด 2 แกน และ โมดูลัสความยืดหยุ่น แสดงไว้ในสมการที่ 3.3 และ 3.4

$$S = \frac{-0.2387P(X-Y)}{d^2} \qquad (3.3)$$

เมื่อ S = ค่าความเค้นดึงสูงสุดที่จุดศูนย์กลาง (N/mm^2)

P = ค่าแรงกดที่ทำให้แตกหัก (N)

$X = (1+\nu)\ln(\frac{B}{C})^2+\{\frac{(1-\nu)}{2}\}(\frac{B}{C})^2$

$Y = (1+\nu)\{1+\ln(\frac{A}{C})^2\}+(1-\nu)(\frac{A}{C})^2$

A = รัศมีของบอลรองรับ(มิลลิเมตร)

B = รัศมีของพื้นที่รับแรงกด(มิลลิเมตร)

C = รัศมีของชิ้นงาน(มิลลิเมตร)

d = ความหนาของชิ้นงานที่รอยแตก(มิลลิเมตร)

ν = ค่าสัดส่วนของปัวซอง เท่ากับ 0.23*

$$E = \frac{12D(1-\nu^2)}{h^3} \qquad (3.4)$$

เมื่อ E = โมดูลัสความยืดหยุ่น (N/mm^2)

D = Flexural rigidty = $\dfrac{(3+\nu)\,Pa^2}{16\,\pi\,(1+\nu)\,w}$

P = ค่าแรงกดที่ทำให้แตกหัก (N)

w = ระยะแอ่น (มิลลิเมตร)

h = ความสูงของชิ้นงาน((มิลลิเมตร)

a = รัศมีของบอลรองรับ(มิลลิเมตร)

ν = ค่าสัดส่วนของปัวซอง เท่ากับ 0.23*

*<u>หมายเหตุ</u> : ค่าสัดส่วนของปัวซอง สำหรับผงโลหะผสมที่มีผงเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก อ้างอิงจาก หนังสือ Metals Handbook 9th ed. Vol 7

3.4.2 ความแข็ง (Hardness)

นำชิ้นงานทำการวัดหาค่าความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (hardness tester) แบบร็อคเวล (rockwell) ชนิด สเกลที(T) ขนาด 15 กิโลกรัม ของบริษัท Affri Commerciale Testing,Ltd. รุ่น 206RT2D (ดังแสดงในรูปที่ 3.3) ในการวัดค่าความแข็งนี้ ได้ตั้งค่าแรงเริ่มต้น(pre load) ที่ 3 กิโลกรัม และ แรงเพิ่มเติมเท่ากับ 15 กิโลกรัม โดยใช้หัวกดที่เป็นลูกบอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.58 มิลลิเมตร ยกชิ้นงานจนชนหัวกด ปล่อยแรงกดนำลงบนชิ้นงาน เป็นเวลา 3 วินาที แล้วจึงปล่อยแรงเพิ่มเติม ลงบนชิ้นงาน (ในกรณีของเครื่องนี้จะแสดงผลของค่าความแข็งปรากฏบนหน้าปัดเครื่อง)

สำหรับสูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าความแข็ง HRT แสดงไว้ในสมการที่ 3.5 ตามมาตรฐาน ASTM E-18

$$HRT = 100 - e \qquad (3.5)$$

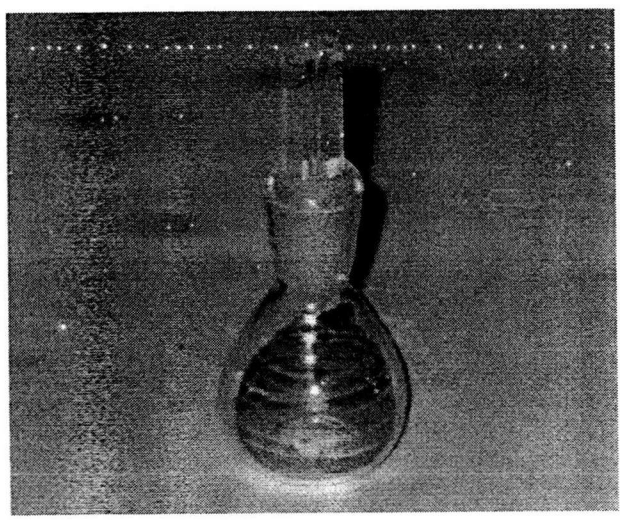
เมื่อ e = ความลึกที่เพิ่มขึ้นเมื่อกดด้วยความแรงเพิ่มขึ้น

3.4.3 การตรวจสอบลักษณะเกรนของผงโลหะผสมภายหลังการดัดชนิด 2 แกน

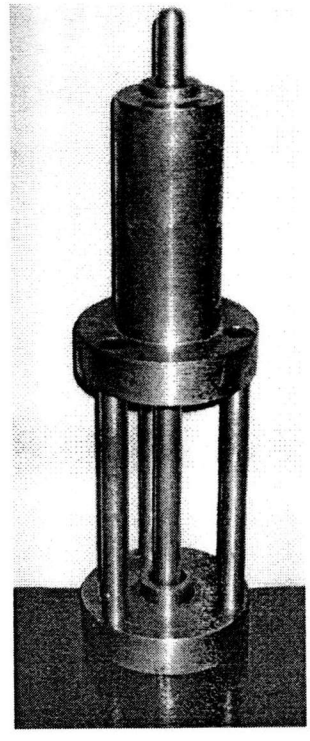
เป็นการศึกษาลักษณะเกรนของผงโลหะผสม ในชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์ ของ Nikon Co., Ltd รุ่น OPTIPHOT -100S โดยการนำชิ้นงานที่ต้องการจะศึกษา มาทำตัวเรือนด้วยเรซิ่น เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดเล็ก เพื่อสะดวกในการจับถือ แล้วนำชิ้นงานมาทำการขัดผิว ด้วยเครื่องขัดผิวโลหะ ของ Struer Co., Ltd รุ่น ROTOPOL-21 หมุนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที โดยใช้กระดาษทรายน้ำ เบอร์ 320 500 800 1000 และ 1,200 ตามลำดับ จากนั้นทำการขัดมันต่อ บนจานหมุนผ้าสักหลาด ซึ่งหมุนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที โดยใช้ผงขัดเพชร ที่มีความแข็งประมาณ 8,000 HV จากนั้นนำชิ้นงานที่ขัดผิวมันแล้ว ไปกัดผิวด้วย กรดไนตริก(HNO_3) 5 มิลลิลิตร ผสมกับ เอทิลแอลกอฮอล์(C_2H_5OH) 100 มิลลิลิตร ใช้เวลาจุ่ม 30 วินาที เสร็จแล้วจึงนำไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ปรับความเข้มแสง กำลังขยายที่เหมาะสม ระยะโฟกัส ความสว่าง และ ความคมชัด จากนั้นจึงทำการถ่ายภาพตามตำแหน่งที่ต้องการ

3.4.4 การตรวจสอบการกระจายของผงโลหะผสมภายหลังการดัดชนิด 2 แกน

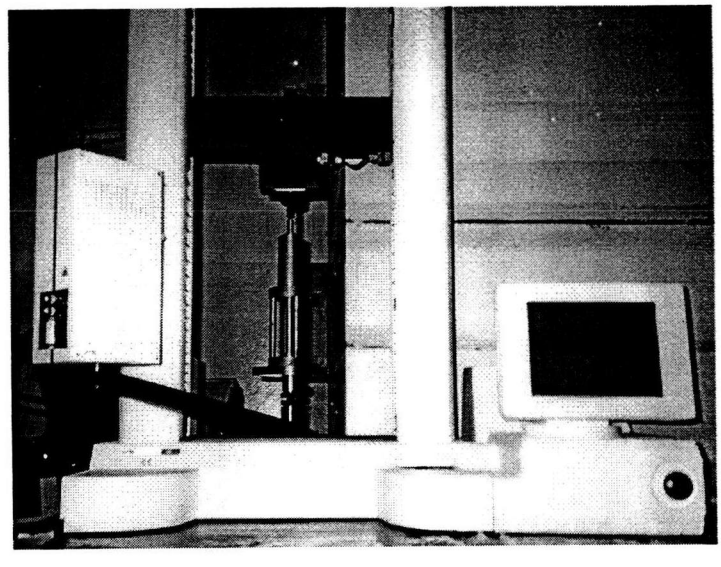
เป็นการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของเหล็ก ทองแดง และ แกรไฟต์ ในชิ้นงาน ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของบริษัท Jeol Co., Ltd รุ่น JSM-5410LV จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการนำชิ้นงานที่ต้องการจะศึกษา บริเวณผิวหน้าตัดซึ่งเกิดจากการดัดขาดไปติดบนเทป 2 หน้า ที่ติดอยู่บนแท่นทองเหลืองสำหรับติดชิ้นงาน (stub) นำแท่นทองเหลืองนั้นไปผ่านกระบวนการฉาบทอง เสร็จแล้วจึงนำไปส่องดูด้วยเครื่อง SEM เลือกความต่างศักย์ของเครื่อง กำลังขยายที่เหมาะสม ระยะโฟกัส ความสว่าง และ ความคมชัด จากนั้นจึงทำการถ่ายภาพตามตำแหน่งที่ต้องการ



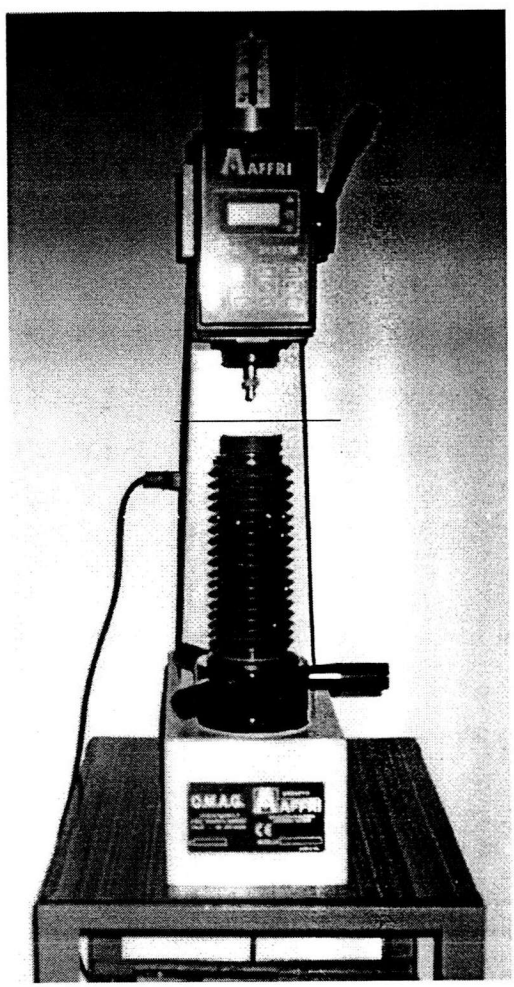
<u>รูปที่ 3.1</u> อุปกรณ์หาค่าความถ่วงจำเพาะ



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ทดสอบแรงดัดชนิด 2 แกน



รูปที่ 3.3 เครื่องและอุปกรณ์ทดสอบแรงดัดชนิด 2แกน



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบความแข็ง

3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของข้อมูลผลการทดลอง ที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ ในงานวิจัยฉบับนี้ มีดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)
2. การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

3.5.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพ เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของผลกระทบของทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผาที่มีต่อคุณสมบัติด้านต่างๆของผงโลหะผสม โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ชื่อ SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) ช่วยในการวิเคราะห์

3.5.2 การวิเคราะห์การถดถอย

เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลเพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกล กับสัดส่วนของทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผาของชิ้นงานผงโลหะผสม รวมไปถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกับคุณสมบัติ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ชื่อ SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) ช่วยในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์