

## บทที่ 4

### การทดสอบการทำงานของเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอน

จากการดำเนินการออกแบบและสร้างเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอนเพื่อผลิตผงโลหะ ดังรายละเอียดที่ผ่านมาแล้ว ในบทนี้เป็นขั้นตอนของการผลิตผงโลหะด้วยเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอนซึ่งได้ออกแบบและสร้างขึ้น ผงโลหะที่ทำการทดลองผลิตคือ ดีบุก อะลูมิเนียม และ ทองแดง โดยได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ที่มีผลต่อขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะจากการผลิตโดยวิธีแก๊สอะตอมไมเซอร์ ตัวแปรควบคุมดังกล่าวคือ

- ความดันของแก๊ส
- อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะหลอม
- อัตราการไหลของโลหะหลอม

วิธีการทดลอง ได้กำหนดแผนการทดลองเพื่อให้สอดคล้องกับตัวแปรควบคุมที่จะทำการศึกษา โดยมีลำดับการทดลองดังนี้

- 1) กำหนดค่าแรงดันแก๊สคงที่ กำหนดระดับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะเหลวคงที่ ปรับอัตราการไหลของโลหะเหลว
- 2) กำหนดค่าแรงดันแก๊สคงที่ กำหนดอัตราการไหลของโลหะเหลวคงที่ ปรับระดับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะเหลว
- 3) กำหนดอัตราการไหลของโลหะเหลวคงที่ กำหนดอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทคงที่ ปรับค่าแรงดันของแก๊ส

จากทดลองการทำงานของหัวฉีดพ่นโลหะเหลวแบบ Jet nozzle ทั้งสามแบบพบว่าหัวฉีดแบบ Triple jet nozzle ให้ผลดีกว่าหัวฉีดแบบอื่น ๆ คือสามารถผลิตผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า  $210 \mu\text{m}$  ได้ในปริมาณมากกว่าหัวฉีดชนิดอื่น การทดลองผลิตผงโลหะชนิดต่าง ๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรควบคุมจึงกำหนดใช้หัวฉีดพ่นโลหะเหลวแบบ Triple jet nozzle โดยได้ทดลองผลิตผงโลหะชนิดต่าง ๆ ดังนี้

- ผงโลหะดีบุก
- ผงโลหะอะลูมิเนียม

- ผงโลหะทองแดง
- ผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว 39%
- ผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4%
- ผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี 38%

การผลิตผงโลหะแต่ละชนิดได้กำหนดแผนการทดลองในการใช้ตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ตามรายการที่แสดงในตารางที่ 4.2.1 และ 4.2.2

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ที่กำหนด

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่กำหนด	หน่วย
แรงดันของแก๊ส	$(P_1) = 100$ , $(P_2) = 120$ , $(P_3) = 140$	psi
อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท	$(T_1) = 50$ , $(T_2) = 100$ , $(T_3) = 150$	$^{\circ}\text{C}$
เส้นผ่านศูนย์กลางปลายหัวจ่ายโลหะเหลว	$(d_1) = 2$ , $(d_2) = 3$ , $(d_3) = 4$	mm

**หมายเหตุ** ค่าตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ที่กำหนดใช้เป็นค่าที่พิจารณาตามเหตุผลดังนี้

- ค่าแรงดันของแก๊สที่เป็นค่าแรงดันสูงสุด = 140 psi เพราะเครื่องอัดอากาศที่มีอยู่แล้ว ซึ่งเป็นเครื่องที่นำมาใช้ในการทดลองนี้มีประสิทธิภาพในการอัดอากาศได้แรงดันสูงสุดที่ 140 psi (ค่าแรงดันที่ใช้ทั่วไป 50 – 1,200 psi)
- อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่เป็นค่าสูงสุด =  $150^{\circ}\text{C}$  เพราะชุดให้ความร้อนเบ้าจ่ายโลหะเหลวสร้างอุณหภูมิสูงสุดได้ไม่เกิน  $1,200^{\circ}\text{C}$  และเป็นระดับอุณหภูมิสูงสุดสำหรับใช้ผลิตผงโลหะทองแดงซึ่งเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงที่สุดในกลุ่มโลหะที่ใช้ในการทดลองนี้ (ค่าอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ใช้ทั่วไป  $75 - 150^{\circ}\text{C}$ )
- ขนาดผ่านศูนย์กลางหัวจ่ายโลหะเหลว (Melt diameter) พิจารณาตามประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศ ประสิทธิภาพของหัวฉีดตลอดจนชนิดของวัสดุที่สามารถจัดหาได้

รวมการทดลอง ทั้งหมด 162 การทดลอง

ตารางที่ 4.2.1 แสดงรายการทดลองการผลิตผงโลหะชนิดโลหะบริสุทธิ์

☐ = รายการทดลองที่กำหนด เมื่อ  $P_{1-3}$ ,  $T_{1-3}$ ,  $d_{1-3}$  คือตัวแปรต่างๆที่กำหนดใช้เป็น  
 ภาวะควบคุมการทำงาน และ A = อะลูมิเนียม S = ดีบุก และ C = ทองแดง

รายการ	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
1	ASC			ASC			ASC		
2	ASC			ASC				ASC	
3	ASC			ASC					ASC
4		ASC		ASC			ASC		
5		ASC		ASC				ASC	
6		ASC		ASC					ASC
7			ASC	ASC			ASC		
8			ASC	ASC				ASC	
9			ASC	ASC					ASC
10	ASC				ASC		ASC		
11	ASC				ASC			ASC	
12	ASC				ASC				ASC
13		ASC			ASC		ASC		
14		ASC			ASC			ASC	
15		ASC			ASC				ASC
16			ASC		ASC		ASC		
17			ASC		ASC			ASC	
18			ASC		ASC				ASC
19	ASC					ASC	ASC		
20	ASC					ASC		ASC	
21	ASC					ASC			ASC
22		ASC				ASC	ASC		
23		ASC				ASC		ASC	
24		ASC				ASC			ASC
25			ASC			ASC	ASC		
26			ASC			ASC		ASC	
27			ASC			ASC			ASC

ตารางที่ 4.2.2 แสดงรายการทดลองการผลิตผงโลหะผสมชนิดต่าง ๆ

= รายการทดลองที่กำหนด เมื่อ  $P_{1-3}, T_{1-3}, d_{1-3}$  คือตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดใช้เป็น

ภาวะควบคุมการทำงาน และ L = ดิบุกผสมตะกั่ว M = อะลูมิเนียมผสมทองแดง N = ทองแดงผสมสังกะสี

รายการ	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
28	LMN			LMN			LMN		
29	LMN			LMN				LMN	
30	LMN			LMN					LMN
31		LMN		LMN			LMN		
32		LMN		LMN				LMN	
33		LMN		LMN					LMN
34			LMN	LMN			LMN		
35			LMN	LMN				LMN	
36			LMN	LMN					LMN
37	LMN				LMN		LMN		
38	LMN				LMN			LMN	
39	LMN				LMN				LMN
40		LMN			LMN		LMN		
41		LMN			LMN			LMN	
42		LMN			LMN				LMN
43			LMN		LMN		LMN		
44			LMN		LMN			LMN	
45			LMN		LMN				LMN
46	LMN					LMN	LMN		
47	LMN					LMN		LMN	
48	LMN					LMN			LMN
49		LMN				LMN	LMN		
50		LMN				LMN		LMN	
51		LMN				LMN			LMN
52			LMN			LMN	LMN		
53			LMN			LMN		LMN	
54			LMN			LMN			LMN

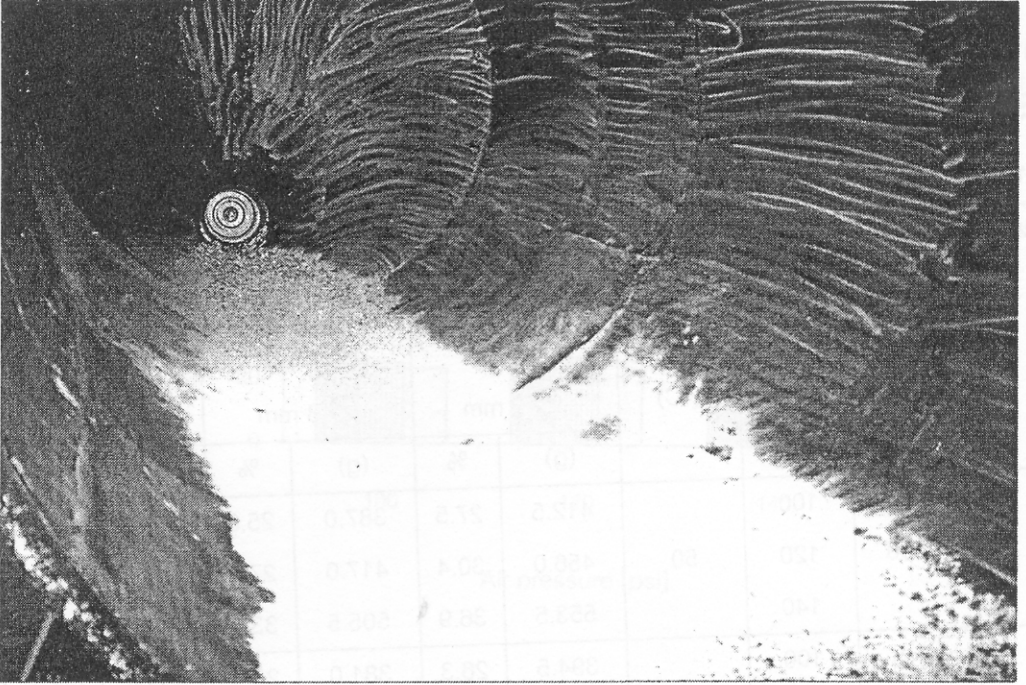


### ข้อตกลงและเงื่อนไขในการทำวิจัย

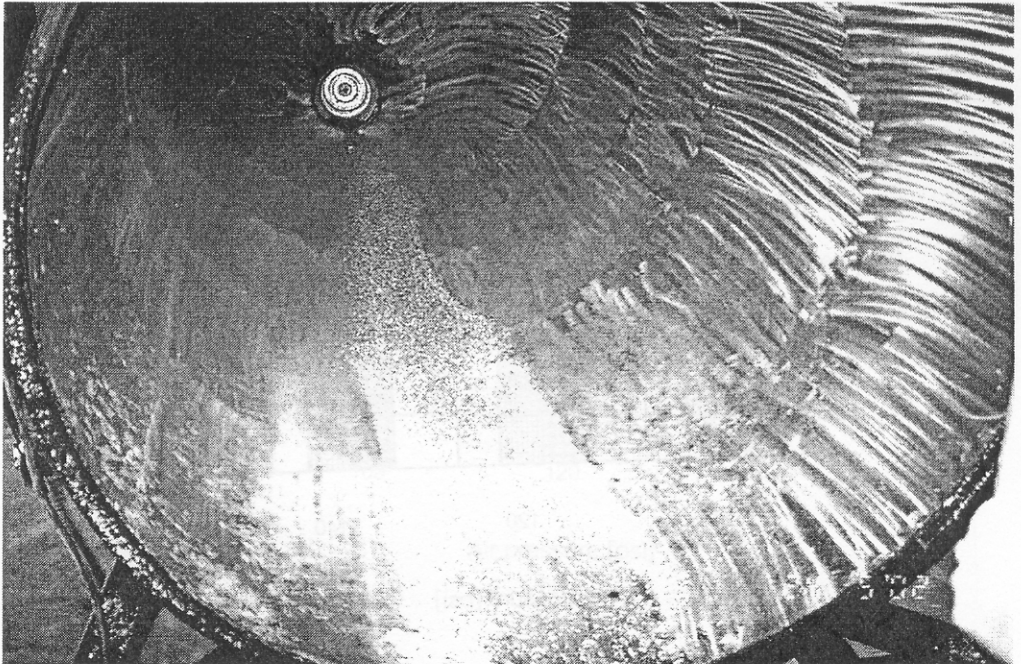
การทำวิจัยนี้มีข้อตกลงเบื้องต้นว่าปริมาณผงโลหะที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้งอยู่ภายใต้เงื่อนไขต่อไปนี้

- ผงโลหะที่ผ่านการคัดแยกขนาดแล้วโดยวิธีการคัดแยกด้วยชุดตะแกรงมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM E 11 และเป็นผงโลหะเฉพาที่มีขนาดในช่วงเล็กกว่า 210  $\mu\text{m}$  ซึ่งได้จากการผลิตแต่ละครั้ง
- ปริมาณโลหะที่ทำการหลอมเพื่อการทดลองแต่ละครั้งแบ่งตามชนิดของโลหะ ดังนี้
 

ดีบุก (Sn)	ปริมาณที่หลอมครั้งละ	1,500 กรัม
อะลูมิเนียม (Al)	ปริมาณที่หลอมครั้งละ	1,500 กรัม
ทองแดง (Cu)	ปริมาณที่หลอมครั้งละ	2,000 กรัม
ดีบุก + ตะกั่ว 39%	ปริมาณที่หลอมครั้งละ	1,500 กรัม
อะลูมิเนียม + ทองแดง 4%	ปริมาณที่หลอมครั้งละ	1,500 กรัม
ทองแดง + สังกะสี 38%	ปริมาณที่หลอมครั้งละ	2,000 กรัม
- ปริมาณโลหะเหลวที่พ่นต่อครั้งหมายถึงปริมาณของโลหะเหลวที่ถูกพ่นเข้าสู่ห้องพ่นเท่านั้น เนื่องจากในการปฏิบัติงานจริงมีความจำเป็นต้องปล่อยให้โลหะเหลวจำนวนหนึ่งไหลทิ้งไป เพื่อให้ท่อจ่ายโลหะเหลวมีระดับอุณหภูมิใกล้เคียงกับ อุณหภูมิของโลหะเหลวนอกจากนั้นจะมีโลหะอีกจำนวนหนึ่งที่ติดค้างอยู่บริเวณก้นของเบ้าจ่ายโลหะและในส่วน ของท่อจ่ายโลหะเหลวด้วย



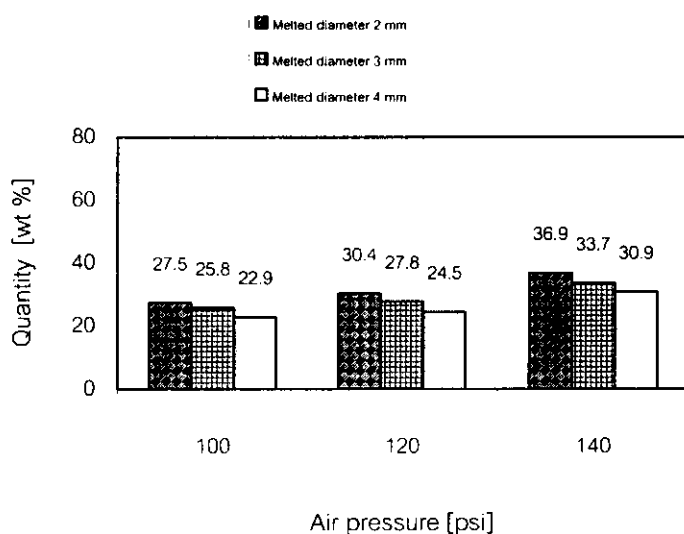
รูปที่ 4.1 ผงโลหะอะลูมิเนียมซึ่งได้จากการผลิต ที่อยู่ภายในห้องพนโลหะเหลว ก่อนการนำมาทำการคัดแยกขนาดด้วยชุดตะแกรงมาตรฐาน



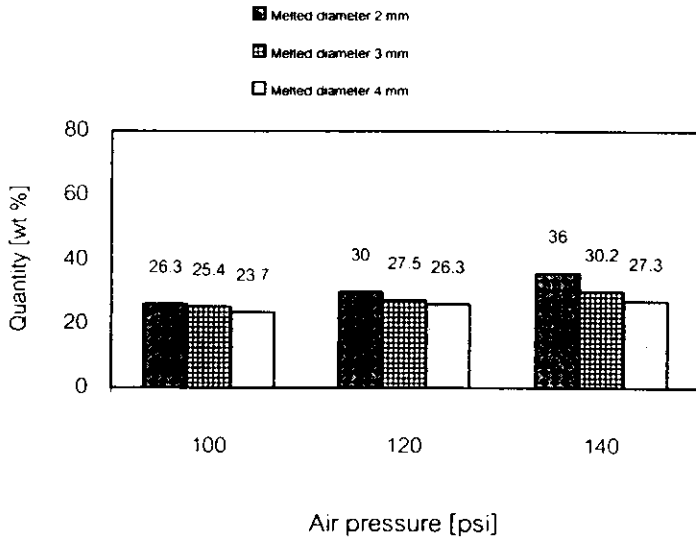
รูปที่ 4.2 ผงโลหะทองแดงซึ่งได้จากการผลิต ที่อยู่ภายในห้องพนโลหะเหลว ก่อนการนำมาทำการคัดแยกขนาดด้วยชุดตะแกรงมาตรฐาน

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองรายการที่ 1 ถึง 9 ตามการทดลองจากตารางที่ 4.2.1 โดยใช้ตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานคือ กำหนดอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะหลอม = 50°C แรงดันอากาศที่ใช้พ่นสามระดับ คือ 100 120 และ 140 psi อัตราการไหลของโลหะหลอมจากขนาดผ่านศูนย์กลาง หัวจ่ายโลหะเหลวสามขนาด คือ 2 mm 3 mm และ 4 mm ได้ผงโลหะ -210 $\mu$ m

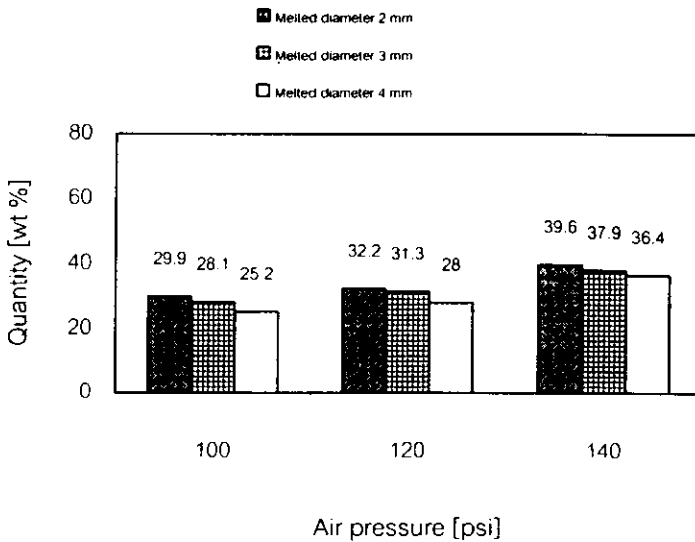
ชนิดโลหะ	ปริมาณโลหะเหลวที่พ่นต่อครั้ง(g)	แรงดันอากาศที่ใช้ (psi)	อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท (°C)	ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 2 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 3 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 4 mm	
				(g)	%	(g)	%	(g)	%
ดีบุก	1,500	100	50	412.5	27.5	387.0	25.8	343.5	22.9
		120		456.0	30.4	417.0	27.8	367.5	24.5
		140		553.5	36.9	505.5	33.7	463.5	30.9
อะลูมิเนียม	1,500	100	50	394.5	26.3	381.0	25.4	355.5	23.7
		120		450.0	30.0	412.5	27.5	394.5	26.3
		140		540.0	36.0	453.0	30.2	409.5	27.3
ทองแดง	2,000	100	50	598.0	29.9	562.0	28.1	504.0	25.2
		120		644.0	32.2	626.0	31.3	560.0	28.0
		140		792.0	39.6	758.0	37.9	728.0	36.4



รูปที่ 4.3 ปริมาณผงโลหะดีบุกที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว 50°C



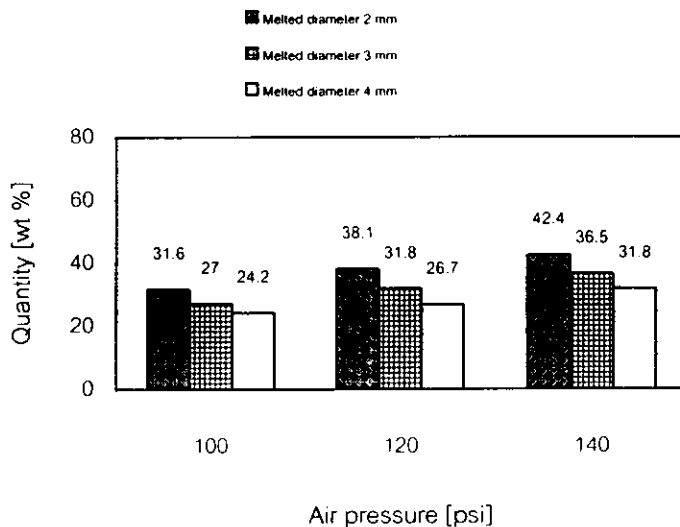
รูปที่ 4.4 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว  $50^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.5 ปริมาณผงโลหะทองแดงที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว  $50^{\circ}\text{C}$

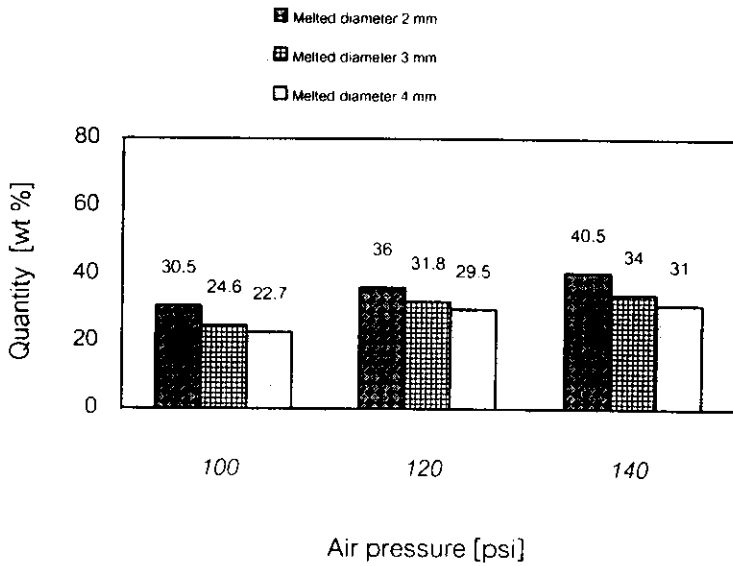
ตารางที่ 4.4 ผลจากการทดลองจากรายการที่ 10 ถึง 18 ตามการทดลองจากรายการที่ 4.2.1 โดยใช้ตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานคือ กำหนดอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะหลอม =  $100^{\circ}\text{C}$  แรงดันอากาศที่ใช้พ่นลมระดับ คือ 100 120 และ 140 psi อัตราการไหลของโลหะหลอมจากขนาดผ่านศูนย์กลางหัวจ่ายโลหะเหลวสามขนาด คือ 2 mm 3 mm และ 4 mm ได้ผงโลหะ  $-210\mu\text{m}$

ชนิดโลหะ	ปริมาณโลหะเหลวที่พ่นต่อครั้ง(g)	แรงดันอากาศที่ใช้ (psi)	อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท ( $^{\circ}\text{C}$ )	ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 2 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 3 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 4 mm	
				(g)	%	(g)	%	(g)	%
ดีบุก	1,500	100	100	474.0	31.6	405.0	27.0	363.0	24.2
		120		571.5	38.1	477.0	31.8	400.5	26.7
		140		636.0	42.4	547.5	36.5	477.0	31.8
อะลูมิเนียม	1,500	100	100	457.5	30.5	369.0	24.6	340.5	22.7
		120		540.0	36.0	477.0	31.8	442.5	29.5
		140		607.5	40.5	510.0	34.0	465.0	31.0
ทองแดง	2,000	100	100	670.0	33.5	580.0	29.0	430.0	21.5
		120		750.0	37.5	650.0	32.5	520.0	26.0
		140		910.0	45.5	800.0	40.0	730.0	36.5

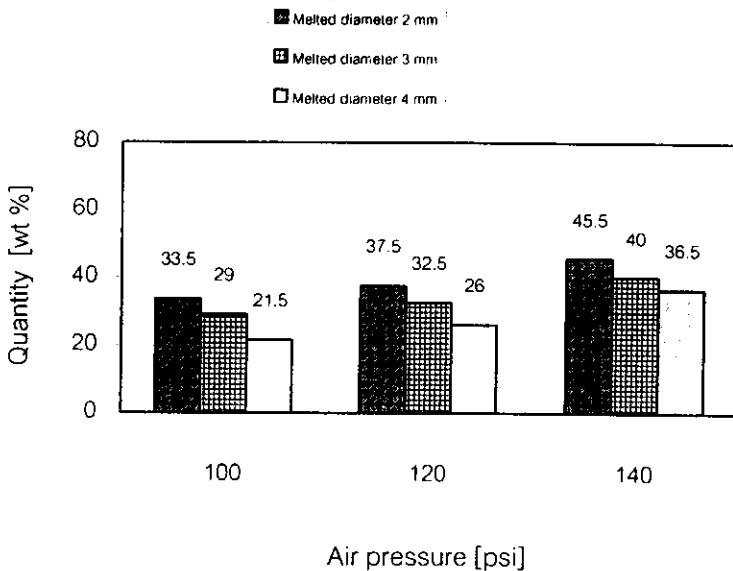


รูปที่ 4.6 ปริมาณผงโลหะดีบุกที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว  $100^{\circ}\text{C}$





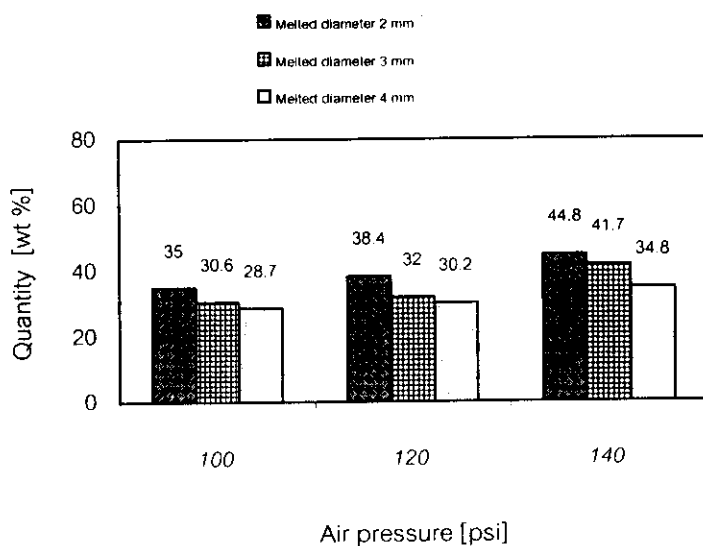
รูปที่ 4.7 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้ อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว 100°C



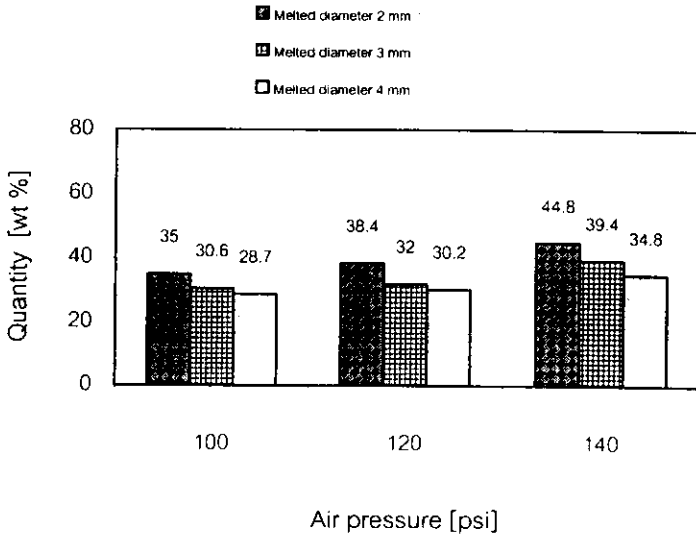
รูปที่ 4.8 ปริมาณผงโลหะทองแดงที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้ อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว 100°C

ตารางที่ 4.5 ผลจากการทดลองจากรายการที่ 19 ถึง 27 ตามการทดลองจากรายการที่ 4.2.1 โดยใช้ตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานคือ กำหนดอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะหลอม = 150°C แรงดันอากาศที่ใช้พ่นสามระดับ คือ 100 120 และ 140 psi อัตราการไหลของโลหะหลอมจากขนาดผ่านศูนย์กลางหัวจ่ายโลหะเหลวสามขนาด คือ 2 mm 3 mm และ 4 mm ได้ผงโลหะ -210 $\mu$ m

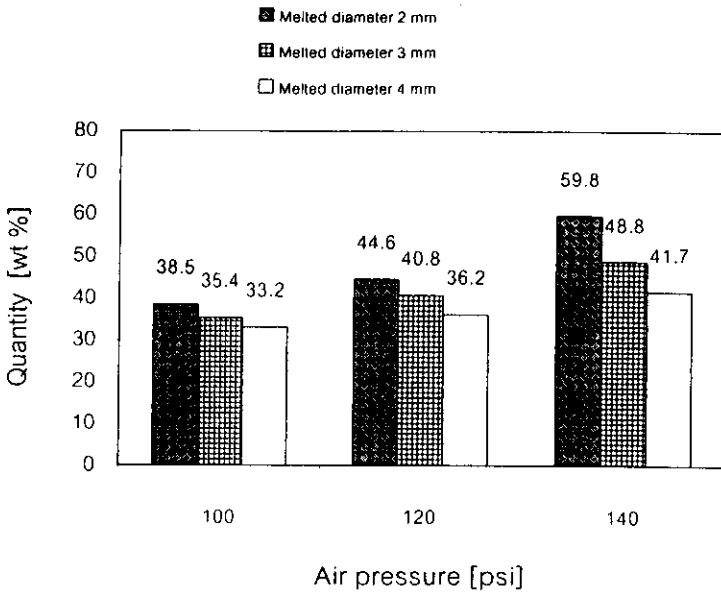
ชนิดโลหะ	ปริมาณโลหะเหลวที่พ่นต่อครั้ง(g)	แรงดันอากาศที่ใช้ (psi)	อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท (°C)	ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 2 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 3 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 4 mm	
				(g)	%	(g)	%	(g)	%
ดีบุก	1,500	100	150	576.0	38.4	483.0	32.2	427.5	28.5
		120		625.5	41.7	495.0	33.0	462.0	30.8
		140		744.0	49.6	609.0	40.6	502.5	33.5
อะลูมิเนียม	1,500	100	150	525.0	35.0	459.0	30.6	430.5	28.7
		120		576.0	38.4	480.0	32.0	453.0	30.2
		140		672.0	44.8	625.5	39.4	522.0	34.8
ทองแดง	2,000	100	150	770.0	38.5	708.0	35.4	664.0	33.2
		120		892.0	44.6	816.0	40.8	724.0	36.2
		140		1,196.0	59.8	976.0	48.8	834.0	41.7



รูปที่ 4.9 ปริมาณผงโลหะดีบุกที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว 150°C



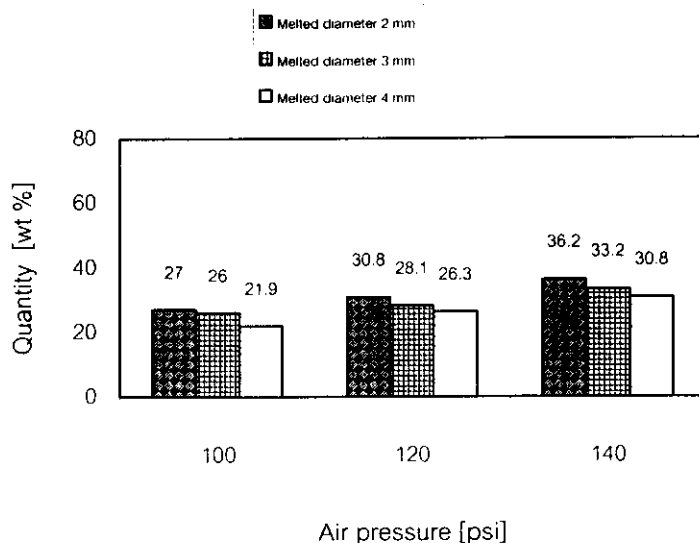
รูปที่ 4.10 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้ อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว 150°C



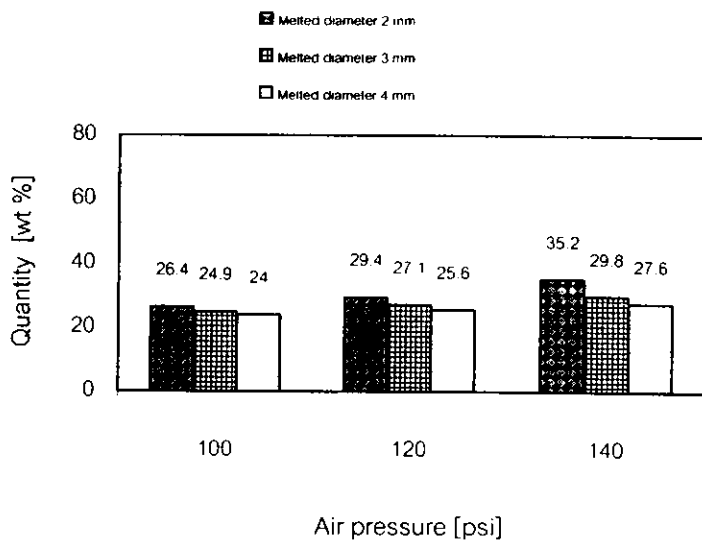
รูปที่ 4.11 ปริมาณผงโลหะทองแดงที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้ อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว 150°C

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองรายการที่ 28 ถึง 36 ตามการทดลองจากตารางที่ 4.2 โดยใช้ตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานคือ กำหนดอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะหลอม = 50°C แรงดันอากาศที่ใช้พ่นตามระดับ คือ 100 120 และ 140 psi อัตราการไหลของโลหะหลอมจากขนาดผ่านศูนย์กลางหัวจ่ายโลหะเหลวสามขนาด คือ 2 mm 3 mm และ 4 mm ได้ผงโลหะ -210 $\mu$ m

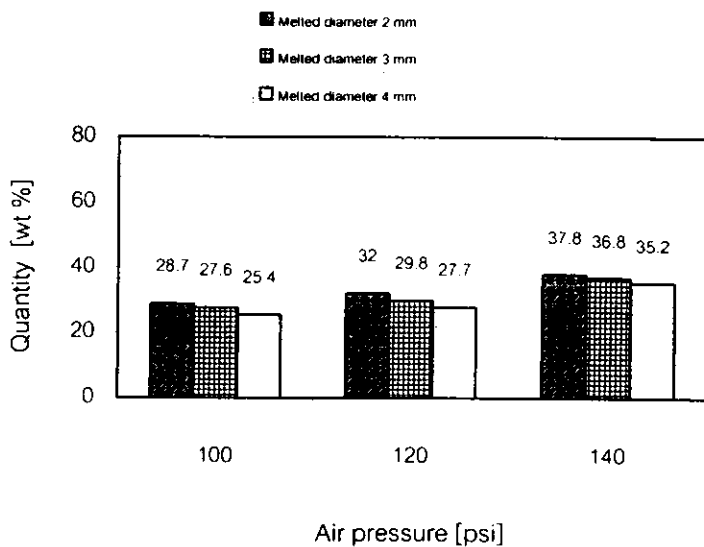
ชนิดโลหะ	ปริมาณโลหะเหลวที่พ่นต่อครั้ง(g)	แรงดันอากาศที่ใช้ (psi)	อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท (°C)	ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 2 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 3 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 4 mm	
				(g)	%	(g)	%	(g)	%
Sn + Pb 39%	1,500	100	50	405.0	27.0	390.0	26.0	328.5	21.9
		120		462.0	30.8	421.5	28.1	394.5	26.3
		140		543.0	36.2	498.0	33.2	462.0	30.8
Al + Cu 4%	1,500	100	50	396.0	26.4	373.5	24.9	360.0	24.0
		120		441.0	29.4	406.5	27.1	384.0	25.6
		140		528.0	35.2	447.0	29.8	414.0	27.6
Cu + Zn 38%	2,000	100	50	574.0	28.7	552.0	27.6	508.0	25.4
		120		640.0	32.0	596.0	29.8	554.0	27.7
		140		756.0	37.8	736.0	36.8	704.0	35.2



รูปที่ 4.12 ปริมาณผงโลหะดิบทุกผสมตะกั่วที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่างๆเทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว 50°



รูปที่ 4.13 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดงที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว  $50^{\circ}\text{C}$

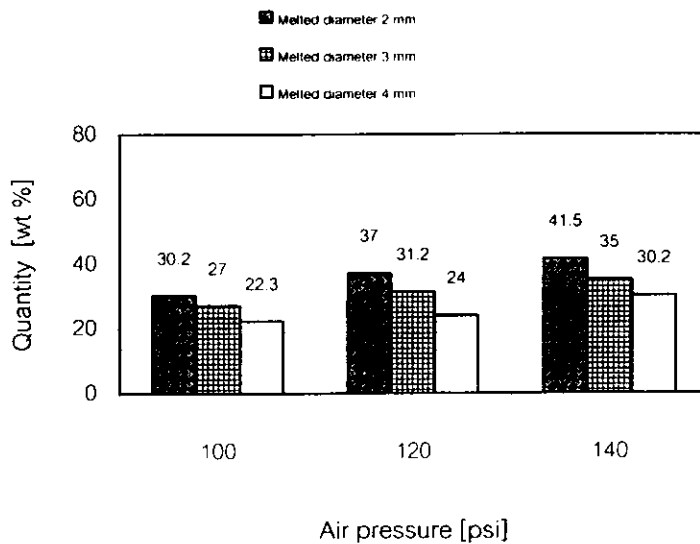


รูปที่ 4.14 ปริมาณผงโลหะทองแดงผสมสังกะสีที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว  $50^{\circ}\text{C}$

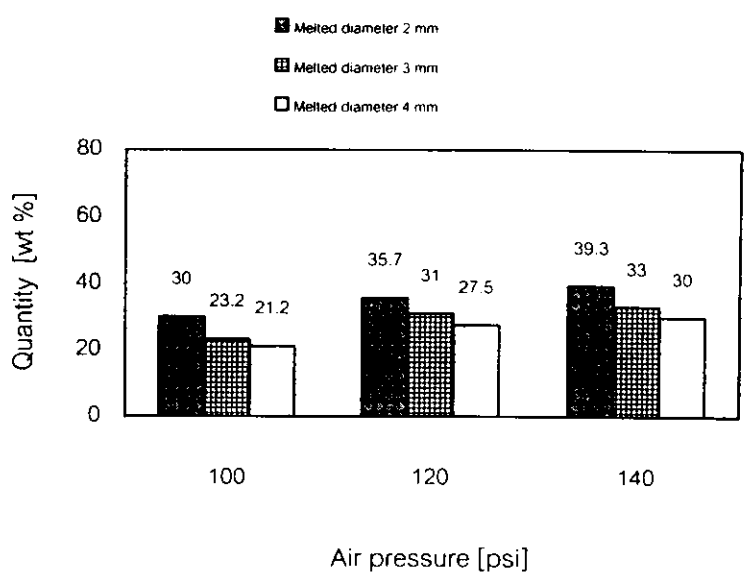


ตารางที่ 4.7 ผลจากการทดลองจากรายการที่ 37 ถึง 45 ตามการทดลองจากรายการที่ 4.2 โดยใช้ตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานคือ กำหนดอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะหลอม = 100°C แรงดันอากาศที่ใช้พ่นสามระดับ คือ 100 120 และ 140 psi อัตราการไหลของโลหะหลอมจากขนาดผ่านศูนย์กลางหัวจ่ายโลหะเหลวสามขนาด คือ 2 mm 3 mm และ 4 mm ได้ผงโลหะ -210 $\mu$ m

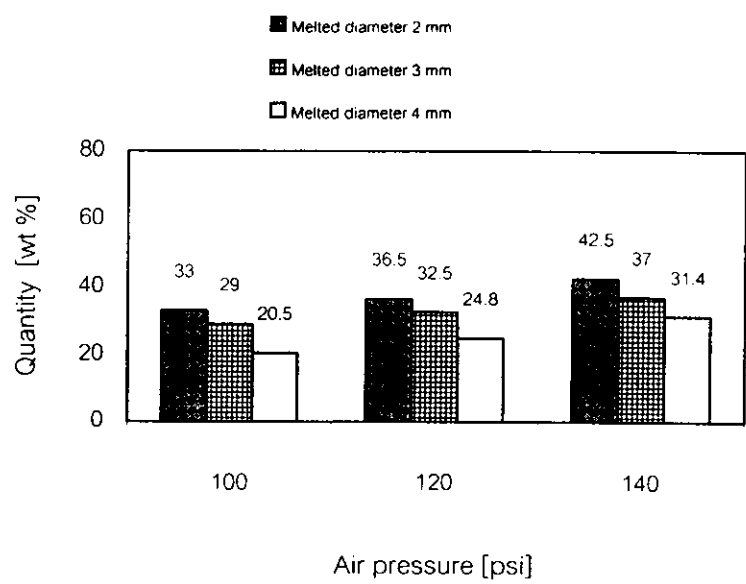
ชนิดโลหะ	ปริมาณโลหะเหลวที่พ่นต่อครั้ง(g)	แรงดันอากาศที่ใช้ (psi)	อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท (°C)	ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว Ø 2 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว Ø 3 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว Ø 4 mm	
				(g)	%	(g)	%	(g)	%
Sn + Pb 39%	1,500	100	100	453.0	30.2	405.0	27.0	334.5	22.3
		120		555.0	37.0	468.0	31.2	360.0	24.0
		140		622.5	41.5	525.0	35.0	453.0	30.2
Al + Cu 4%	1,500	100	100	450.0	30.0	348.0	23.2	318.0	21.2
		120		353.5	35.7	465.0	31.0	412.5	27.5
		140		589.5	39.3	495.0	33.0	450.0	30.0
Cu + Zn 38%	2,000	100	100	660.0	33.0	580.0	29.0	410.0	20.5
		120		730.0	36.5	650.0	32.5	496.0	24.8
		140		850.0	42.5	740.0	37.0	628.0	31.4



รูปที่ 4.15 ปริมาณผงโลหะดีบุกผสมตะกั่วที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว 100°C



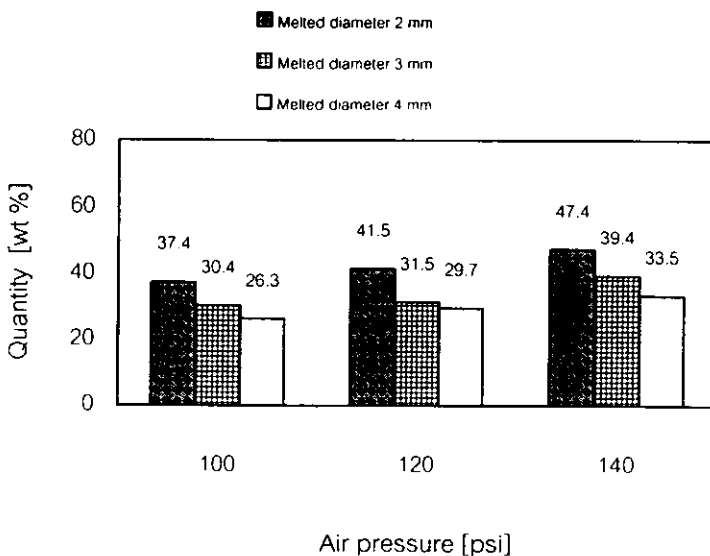
รูปที่ 4.16 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดงที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว 100°C



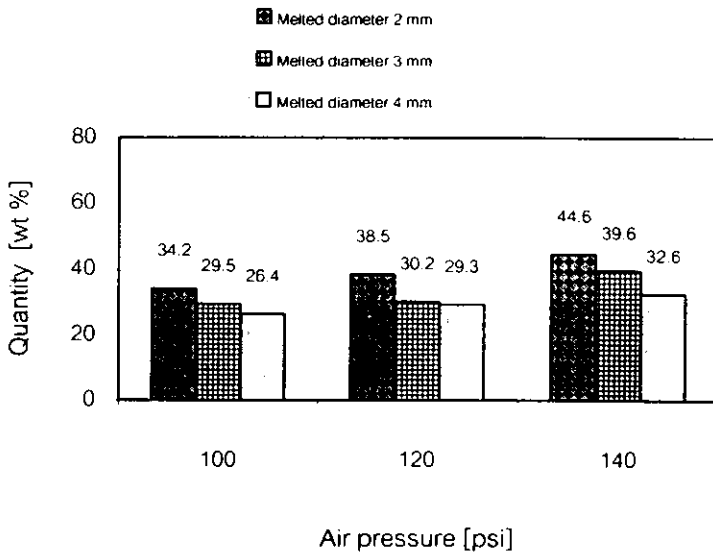
รูปที่ 4.17 ปริมาณผงโลหะทองแดงผสมสังกะสีที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว 100°C

ตารางที่ 4.8 ผลจากการทดลองจากรายการที่ 46 ถึง 54 ตามการทดลองจากรายการที่ 4.2 โดยใช้ตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานคือ กำหนดอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะหลอม = 150°C แรงดันอากาศที่ใช้พ่นสามระดับ คือ 100, 120 และ 140 psi อัตราการไหลของโลหะหลอมจากขนาดผ่านศูนย์กลางหัวจ่ายโลหะเหลวสามขนาด คือ 2 mm 3 mm และ 4 mm ได้ผงโลหะ -210 $\mu$ m

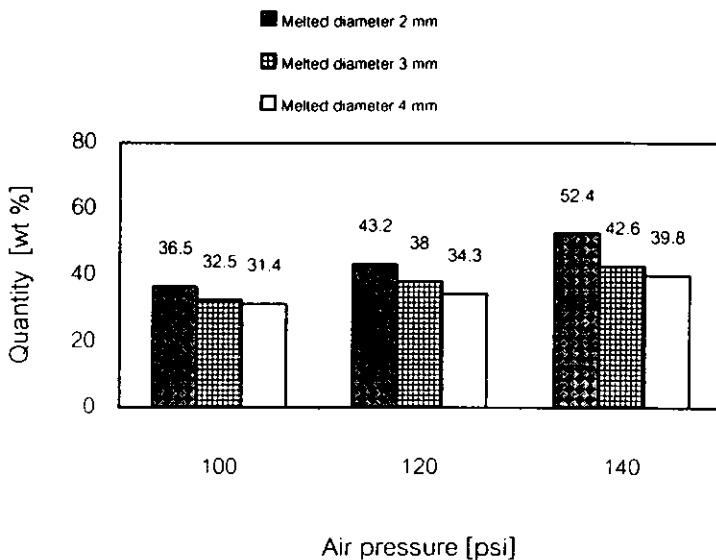
ชนิดโลหะ	ปริมาณโลหะเหลวที่พ่นต่อครั้ง(g)	แรงดันอากาศที่ใช้ (psi)	อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท (°C)	ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 2 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 3 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 4 mm	
				(g)	%	(g)	%	(g)	%
				Sn + Pb 39%	1,500	100 120 140	150	561.0 622.5 711.0	37.4 41.5 47.4
Al + Cu 4%	1,500	100 120 140	150	513.0 377.5 669.0	34.2 38.5 44.6	442.5 453.0 594.0	29.5 30.2 39.6	396.0 439.5 489.0	26.4 29.3 32.6
Cu + Zn 38%	2,000	100 120 140	150	730.0 864.0 1,048.0	36.5 43.2 52.4	650.0 760.0 852.0	32.5 38.0 42.6	628.0 686.0 796.0	31.4 34.3 39.8



รูปที่ 4.18 ปริมาณผงโลหะดีบุกผสมตะกั่วที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว 150°C



รูปที่ 4.19 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดงที่ได้จากการใช้  
ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ  
เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว 150°C



รูปที่ 4.20 ปริมาณผงโลหะทองแดงผสมสังกะสีที่ได้จากการใช้ค่า  
แรงดันต่าง ๆ เทียบกับขนาดหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ  
เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลว 150°C

ผลจากการทดสอบการทำงานของเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอน ในการผลิตผงโลหะ ตามรายการทดลองในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นโลหะ 3 ชนิด คือ

- โลหะดีบุก
- โลหะอะลูมิเนียม
- โลหะทองแดง

เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้จากการใช้ค่าตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานในแบบต่าง ๆ พบว่าอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ มีผลต่อภาวะการทำงานและสมบัติด้านต่าง ๆ ของผงโลหะ ซึ่งทำการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

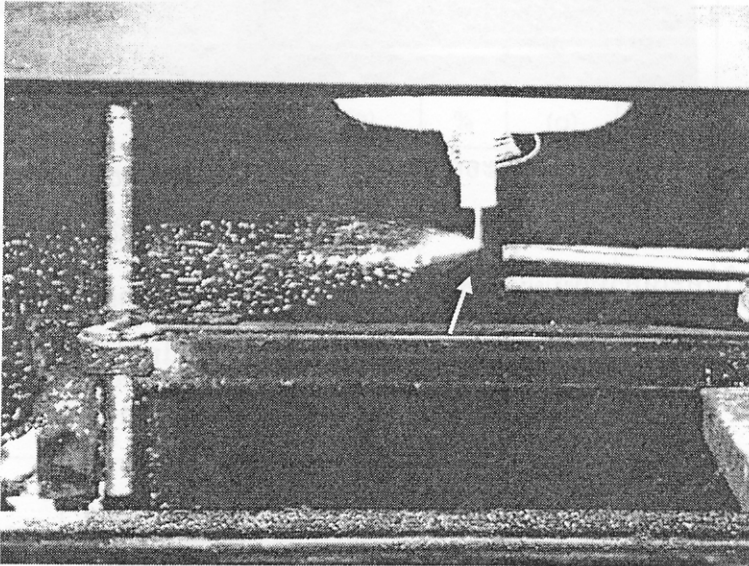
#### 4.1 อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อภาวะการทำงาน

4.1.1 อิทธิพลของอัตราการไหลของโลหะเหลวที่มีผลต่อภาวะการทำงานของเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอน จากการทดลองจำนวน 81 การทดลอง ตามรายละเอียดที่ได้แสดงแล้วตามตารางที่ 4.3 – 4.8 พบว่า กรณีของการใช้ตัวแปรควบคุมที่กำหนดใช้ค่าแรงดันอากาศสูงสุดที่ 140 psi อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุดที่ 150°C เทียบกับอัตราการไหลต่าง ๆ ของโลหะเหลว ซึ่งควบคุมด้วยการกำหนดขนาดความโตของขนาดผ่านศูนย์กลางหัวจ่ายโลหะเหลวที่ขนาดต่าง ๆ คือ 2 3 และ 4 mm ให้ผลคือ ที่อัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด(หัวจ่ายโลหะเหลวขนาด 2 mm) ซึ่งเป็นขนาดเล็กสุดที่ได้ทำการทดลองเทียบกับขนาดที่เล็กกว่า 2 mm แล้วปรากฏว่าไม่สามารถปล่อยให้โลหะเหลวไหลได้อย่างต่อเนื่องจนหมดโดยจะเกิดการแข็งตัวของน้ำโลหะบริเวณหัวจ่ายชั้นก่อน ซึ่งจะเกิดขึ้นกับโลหะทุกชนิดที่ใช้ในการทดลอง การใช้ตัวแปรควบคุมอัตราการไหลที่น้อยสุดสำหรับการทดลองนี้จึงจัดว่าเป็นภาวะการทำงานที่ให้ผลดีที่สุดสำหรับเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอนเครื่องนี้ เพราะเหตุว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของโลหะเหลวให้มีปริมาณมากขึ้น(หัวจ่ายโลหะเหลวโตขึ้น) จะส่งผลให้การกระแทกของอากาศที่พุ่งออกจากหัวฉีดกระแทกให้โลหะเหลวแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็กได้น้อยลง ซึ่งภาวะดังกล่าวนับเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งของการทดลองนี้ เนื่องจากเครื่องอัดอากาศที่ใช้สามารถสร้างแรงดันสูงสุดได้เพียง 140 psi โดยมีความจุของถังพักอากาศขนาด 200 ลิตร เมื่อทำการฉีดพ่นโดยใช้หัวฉีดแบบ Triple jet nozzle ซึ่งเป็นหัวฉีดที่มีความเหมาะสมกว่าหัวฉีดชนิดอื่นดังผลการทดลองตามตารางที่ 3.1 – 3.5 จะทำให้แรงดันลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากการพ่นผ่านไป 40 วินาที ในทางกลับกันเมื่อมีปริมาณโลหะเหลวมากขึ้น(หัวจ่ายโลหะเหลวโตขึ้น) จะยิ่งส่งผลให้ความสามารถในการทำให้โลหะเหลวเกิดการแตกตัวเป็นละอองที่มี

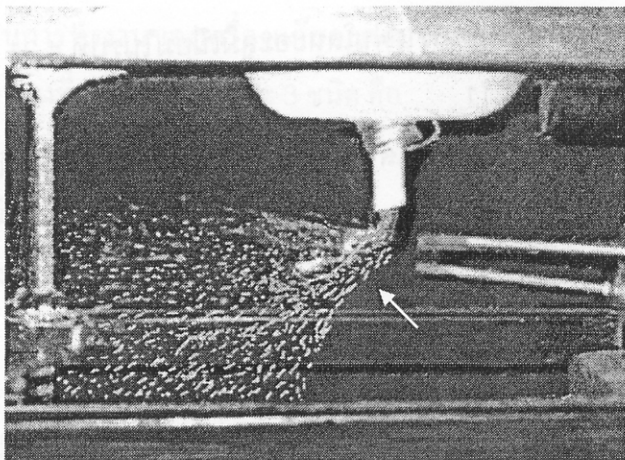


ขนาดเล็กได้น้อยลง ดังตัวอย่างที่แสดงการพ่นโลหะอะลูมิเนียมในรูปที่ 4.21 – 4.23 และจากผลการทดลองตามตารางที่ 4.9 และ 4.11

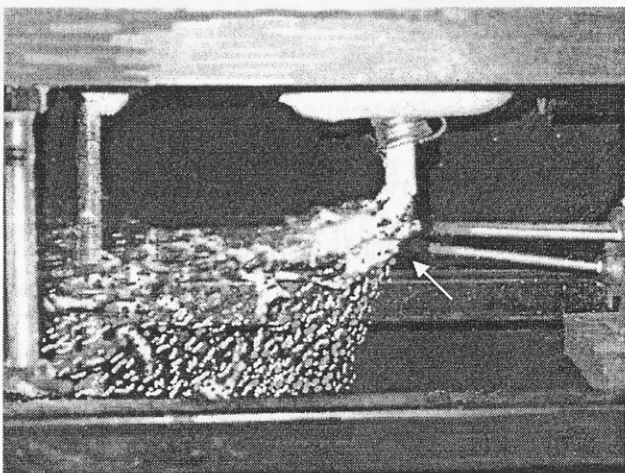
หมายเหตุ ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลวแต่ละขนาดหมายถึงผงโลหะเฉพาะที่มีขนาดเล็กกว่า  $210 \mu\text{m}$  เท่านั้น



รูปที่ 4.21 ลักษณะการแตกตัวเป็นละอองของอะลูมิเนียมเมื่อใช้หัวจ่ายขนาด  $\varnothing 2 \text{ mm}$  พ่นด้วยแรงดันสูงสุด 140 psi อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด  $150^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลของโลหะเหลวที่น้อยทำให้ปริมาณและแรงดันอากาศที่ใช้สามารถกระแทกให้โลหะเหลวแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็กซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างสมบูรณ์มาก การสูญเสียโลหะเหลวที่ถูกกระแทกไม่หมด(บริเวณปลายลูกศรชี้)แทบไม่เกิดขึ้นเลย



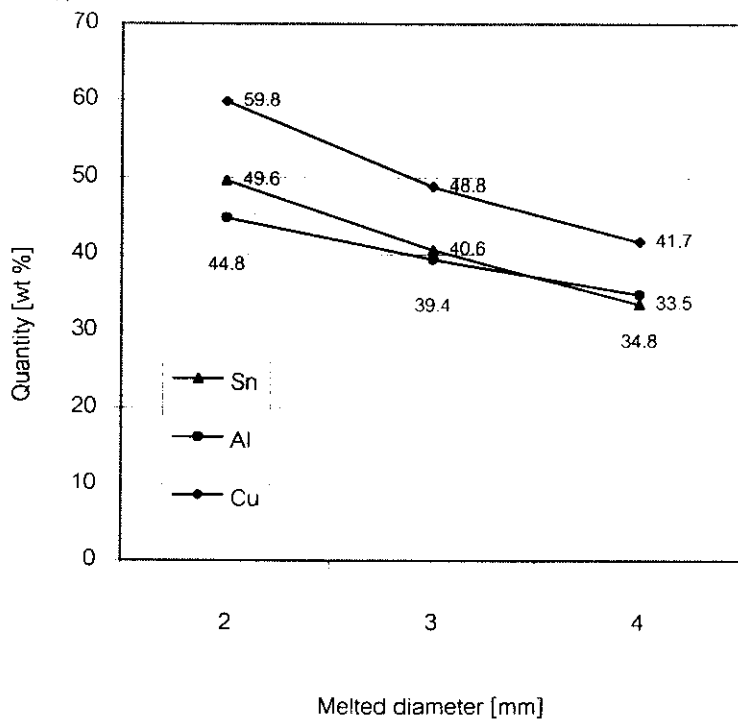
รูปที่ 4.22 ลักษณะการแตกตัวเป็นละอองของอะลูมิเนียมเมื่อใช้หัวจ่ายขนาด  $\text{Ø } 3 \text{ mm}$  พ่นด้วยแรงดันสูงสุด 140 psi อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด  $150^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลโลหะเหลวที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณและแรงของอากาศที่มีค่าเท่าเดิม กระแทกให้โลหะเหลวแตกตัวได้น้อยลง จะเห็นว่ามีโลหะเหลวจำนวนหนึ่ง (บริเวณปลายลูกศรชี้) ซึ่งแตกตัวได้น้อยและมีอุณหภูมิลดลง จะตกลงในระยะทางที่ใกล้



รูปที่ 4.23 ลักษณะการแตกตัวเป็นละอองของอะลูมิเนียมเมื่อใช้หัวจ่ายขนาด  $\text{Ø } 4 \text{ mm}$  พ่นด้วยแรงดันสูงสุด 140 psi อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด  $150^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลที่มากที่สุดสำหรับการทดลองนี้เมื่อเทียบกับปริมาณและแรงดันของอากาศ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดแล้วที่สามารถทำได้ จะมีผลทำให้การแตกตัวของโลหะเหลว มีปริมาณที่น้อยลงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนั้นยังมีโลหะเหลวจำนวนหนึ่งที่ยังมีขนาดโตอยู่จะตกลงด้านล่างเกือบเป็นแนวตั้ง ซึ่งหมายถึงโอกาสที่จะได้ผงโลหะขนาดเล็กยังมีโอกาสน้อยลง

ตารางที่ 4.9 ผลจากการทดลองจากรายการที่ 19 ถึง 27 ตามการทดลองจากรายการที่ 4.1 โดยใช้ตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานคือ กำหนดอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะหลอม = 150°C แรงดันอากาศสูงสุดที่ใช้พ่น 140 psi เทียบกับอัตราการไหลของโลหะหลอมจากขนาดผ่านศูนย์กลางหัวจ่ายโลหะเหลวสามขนาด คือ  $\varnothing$  2 mm 3 mm และ 4 mm ได้ผงโลหะ -210 $\mu$ m ดังนี้

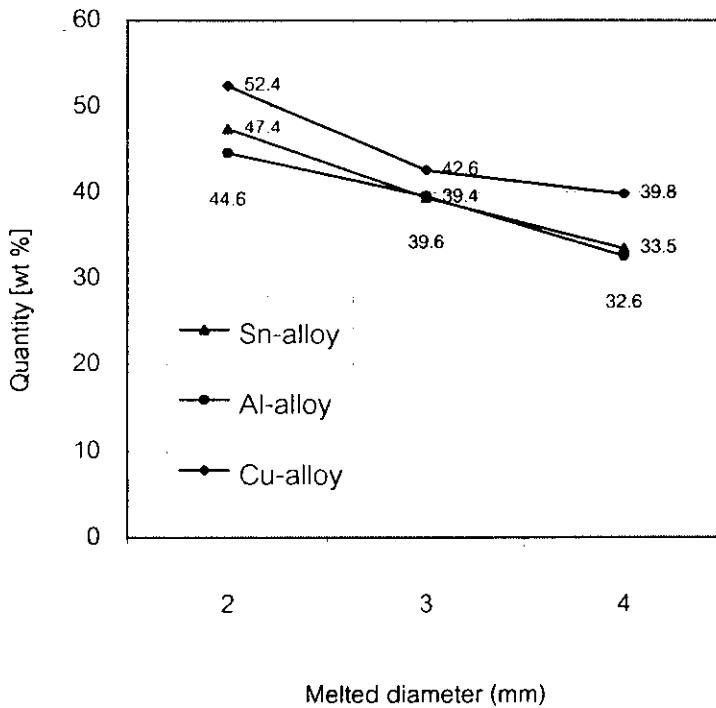
ชนิดโลหะ	ปริมาณโลหะเหลวที่พ่นต่อครั้ง(g)	แรงดันอากาศที่ใช้ (psi)	อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท (°C)	ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 2 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 3 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 4 mm	
				(g)	%	(g)	%	(g)	%
ดีบุก	1,500	140	150	744.0	49.6	609.0	40.6	502.5	33.5
อะลูมิเนียม	1,500	140	150	672.0	44.8	625.5	39.4	522.0	34.8
ทองแดง	2,000	140	150	1,196.0	59.8	976.0	48.8	834.0	41.7



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn, Al, Cu ( $-210\mu\text{m}$ ) ที่ได้จากการผลิตโดยใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด  $150^{\circ}\text{C}$  แรงดันอากาศสูงสุด  $140\text{ psi}$  เทียบกับอัตราการไหลโลหะเหลวที่ต่างกัน

ตารางที่ 4.10 ผลจากการทดลองจากรายการที่ 52 ถึง 54 ตามการทดลองจากรายการที่ 4.2 โดยใช้ตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานคือ กำหนดอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะหลอม = 150°C แรงดันอากาศสูงสุดที่ใช้พ่น 140 psi เทียบกับอัตราการไหลของโลหะหลอมจากขนาดผ่านศูนย์กลางหัวจ่ายโลหะเหลวสามขนาด คือ 2 mm 3 mm และ 4 mm ได้ผงโลหะ -210 $\mu$ m ดังนี้

ชนิดโลหะ	ปริมาณโลหะเหลวที่พ่นต่อครั้ง(g)	แรงดันอากาศที่ใช้ (psi)	อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท (°C)	ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 2 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 3 mm		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 4 mm	
				(g)	%	(g)	%	(g)	%
Sn + Pb 39%	1,500	140	150	711.0	47.4	591.0	39.4	502.5	33.5
Al + Cu 4%	1,500	140	150	669.0	44.6	594.0	39.6	489.0	32.6
Cu + Zn 38%	2,000	140	150	1,048.0	52.4	852.0	42.6	796.0	39.8



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn+Pb 39% , Al+Cu 4% , Cu+Zn38% (-210 $\mu$ m) ที่ได้จากการผลิตโดยใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด 150°C แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi เทียบกับอัตราการไหลโลหะเหลวที่ต่างกัน

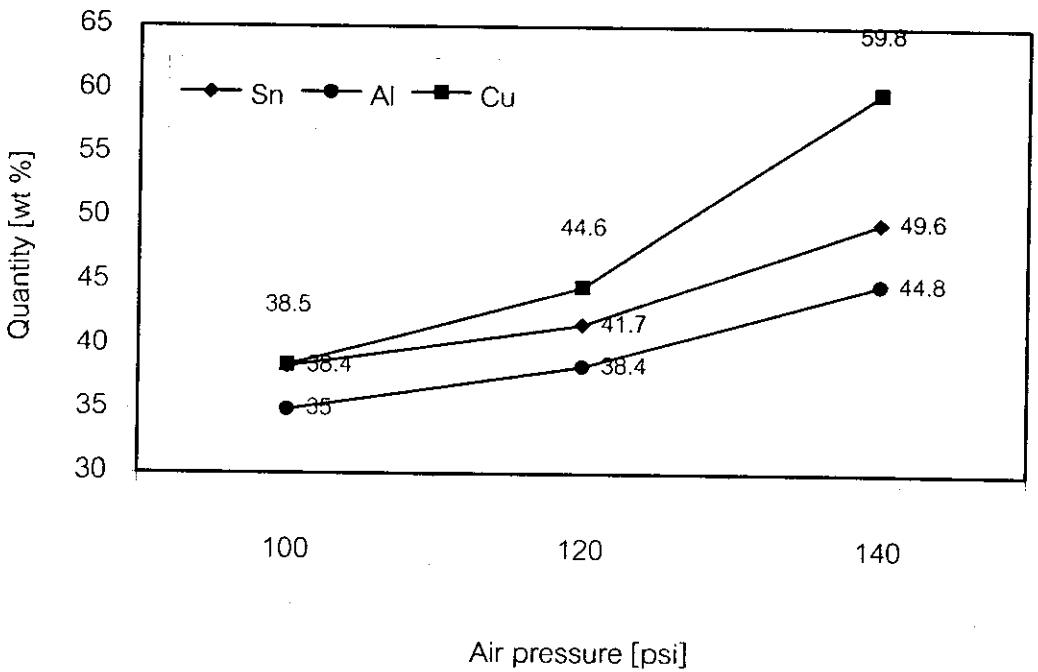
จากข้อมูลของผลการทดลองตามตารางที่ 4.9 - 4.10 และกราฟในรูปที่ 4.24 - 4.25 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้อัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด จะมีผลทำให้ภาวะการทำงานของเครื่องสามารถผลิตผงโลหะชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเล็กกว่า 210  $\mu$ m ได้ในปริมาณมากกว่าการใช้อัตราการไหลของโลหะเหลวที่เพิ่มขึ้น

4.1.2 อิทธิพลของแรงดันที่มีผลต่อภาวะการทำงานสำหรับการพ่นโลหะเหลวเพื่อให้เกิดการแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็ก แรงดันของแก๊สหรืออากาศจัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญยิ่งอีกตัวแปรหนึ่ง จากการทดลองจำนวน 162 การทดลอง ตามรายละเอียดที่ได้แสดงแล้วจากตารางที่

4.3 – 4.8 พบว่า กรณีของการใช้ตัวแปรควบคุมที่กำหนดใช้ค่าอัตราการไหลของโลหะเหลวน้อยสุด (หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing$  2mm) อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุดที่  $150^{\circ}\text{C}$  เทียบกับค่าแรงดันที่ระดับต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป คือ 100, 120 และ 140 psi ผลซึ่งได้จากการทดลองคือ เมื่อค่าแรงดันที่ใช้พ่นโลหะเหลวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็กของโลหะเหลวมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งหมายถึงการได้มาของผงโลหะขนาดเล็ก จึงแสดงให้เห็นว่าหากใช้แรงดันที่มีค่าสูงขึ้นไปอีกก็จะทำให้สามารถทำให้โลหะเหลวแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็กได้เพิ่มมากขึ้น โดยจากการทดลองทั้ง 162 การทดลอง จะให้ผลไปในลักษณะเดียวกันคือ ไม่ว่าจะใช้ภาวะควบคุมที่อัตราการไหลของโลหะเหลวปริมาณใดๆ (หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing$  2, 3 และ 4 mm) อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ระดับใดๆ (50, 100 และ  $150^{\circ}\text{C}$ ) หากใช้ค่าแรงดันแก๊สสูงสุด (เฉพาะกรณีการทำวิจัยนี้ ประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องอัดอากาศที่ใช้สามารถสร้างแรงดันสูงสุดได้ไม่เกิน 140 psi) ก็จะส่งผลให้ได้ปริมาณผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า  $210\ \mu\text{m}$  มากกว่าการใช้ค่าแรงดันที่ต่ำกว่าเสมอของทุกๆ การทดลอง ดังผลจากการทดลองตามตารางที่ 4.11 – 4.12 และกราฟในรูปที่ 4.26 – 4.27

ตารางที่ 4.11 ผลจากการทดลองจากรายการที่ 19 ถึง 27 ตามการทดลองจากรายการที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn, Al และ Cu ( $-210\ \mu\text{m}$ ) ที่ผลิตได้โดยใช้ตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานคือ กำหนดอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะหลอม =  $150^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลของโลหะเหลว (หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing$  2 mm) เทียบกับแรงดันอากาศที่ใช้พ่นสามระดับ คือ 100 120 และ 140 psi อัตราการไหลของโลหะหลอมจากขนาดผ่านศูนย์กลางหัวจ่ายโลหะเหลว

ชนิดโลหะ	ปริมาณโลหะเหลวที่พ่นต่อครั้ง(g)	แรงดันอากาศที่ใช้ (psi)	อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท ( $^{\circ}\text{C}$ )	ปริมาณผงโลหะ( $-210\ \mu\text{m}$ )ที่ได้จากหัวจ่ายโลหะเหลว $\varnothing$ 2 mm	
				(g)	%
ดีบุก	1,500	100	150	576.0	38.4
		120		625.5	41.7
		140		744.0	49.6
อะลูมิเนียม	1,500	100	150	525.0	35.0
		120		576.0	38.4
		140		672.0	44.8
ทองแดง	2,000	100	150	770.0	38.5
		120		892.0	44.6
		140		1,196.0	59.8

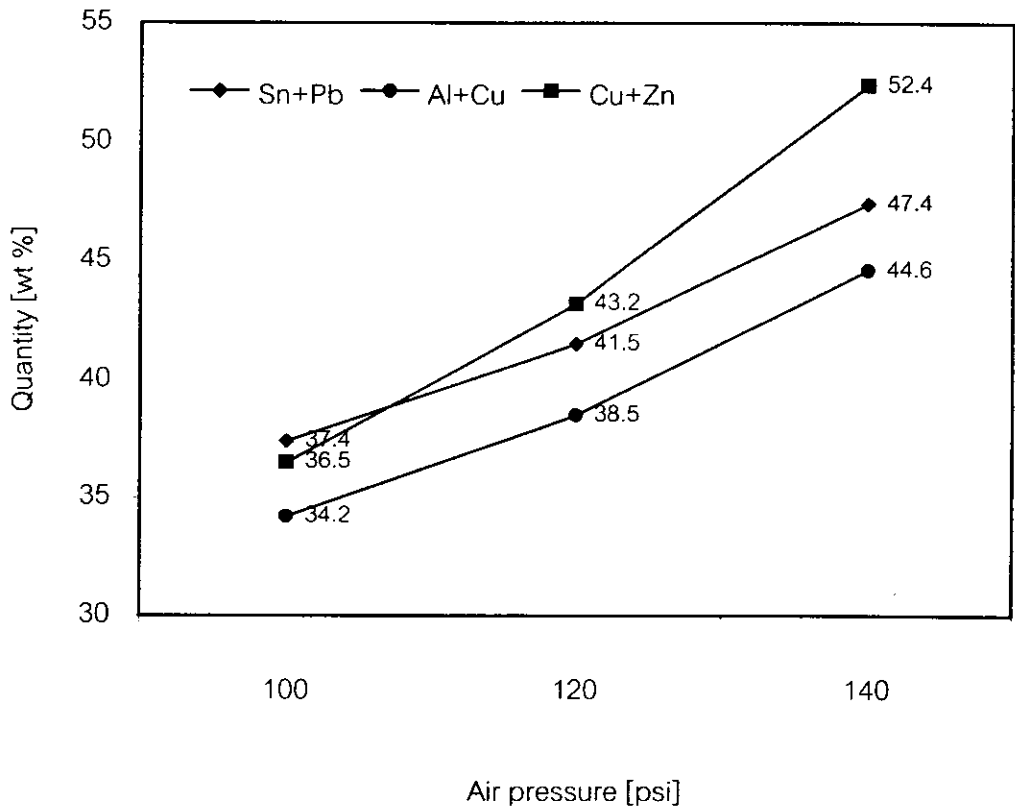


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn, Al และ Cu ( $-210\mu\text{m}$ ) ที่ผลิตได้เมื่อใช้อัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด (หัวจ่ายโลหะเหลว  $\text{Ø} 2 \text{ mm}$ ) อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท  $150^\circ\text{C}$  เทียบกับค่าแรงดันอากาศที่ใช้พ่นระดับต่าง ๆ



ตารางที่ 4.12 ผลจากการทดลองจากรายการที่ 46 ถึง 54 ตามการทดลองจากรายการที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn+Pb 39% , Al+Cu 4% , Cu+Zn38% ( $-210\mu\text{m}$ ) ที่ผลิตได้โดยใช้ตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานคือ กำหนดอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะหลอม =  $150^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลของโลหะเหลวน้อยสุด(หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing 2\text{ mm}$ ) เทียบกับแรงดันอากาศที่ใช้พ่นสามระดับ คือ 100 120 และ 140 psi

ชนิดโลหะ	ปริมาณโลหะ เหลวที่พ่นต่อ ครั้ง(g)	แรงดัน อากาศที่ใช้ (psi)	อุณหภูมิ ซูเปอร์ฮีท ( $^{\circ}\text{C}$ )	ปริมาณผงโลหะ( $-210\mu\text{m}$ )ที่ได้จากหัวจ่าย โลหะเหลว $\varnothing 2\text{ mm}$	
				(g)	%
Sn + Pb 39%	1,500	100	150	561.0	37.4
		120		622.5	41.5
		140		711.0	47.4
Al + Cu 4%	1,500	100	150	513.0	34.2
		120		377.5	38.5
		140		669.0	44.6
Cu + Zn 38%	2,000	100	150	730.0	36.5
		120		864.0	43.2
		140		1,048.0	52.4

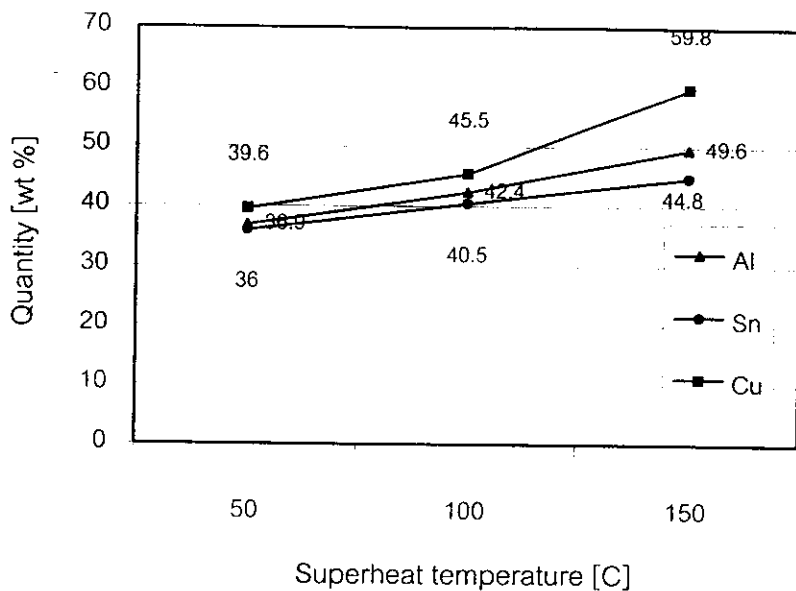


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn+Pb 39% , Al+Cu 4% , Cu+Zn38% (-210 $\mu$ m) ที่ผลิตได้เมื่อใช้อัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด (หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing$  2 mm) อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท 150°C เทียบกับค่าแรงดันอากาศที่ใช้พ่นระดับต่าง ๆ

4.1.3 อิทธิพลของอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่มีผลต่อภาวะการทำงานต่อการแตกตัวของโลหะเหลวเป็นละอองขนาดเล็ก ซึ่งหมายถึงการได้มาของผงโลหะที่มีขนาดละเอียดด้วย อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทนับเป็นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งจากการทดลองจำนวน 162 การทดลอง ตามรายละเอียดที่ได้แสดงแล้วจากตารางที่ 4.3 – 4.8 พบว่า กรณีของการใช้ตัวแปรควบคุมที่กำหนดใช้ค่าอัตราการไหลของโลหะเหลวน้อยสุด(หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing$  2 mm) ใช้ค่าแรงดันอากาศสูงสุดที่ 140 psi เทียบกับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะเหลวที่ค่าต่าง ๆ คือ 50°C, 100°C และ 150°C ผลที่ได้จากการทดลองคือ เมื่อค่าใช้ค่าอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด 150°C ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ใช้กันโดยทั่วไปสำหรับกระบวนการอะตอมไมเซชัน (ASM, 1984) พบว่าเมื่อกำหนดภาวะการทำงานให้อัตราการไหลของโลหะเหลว และแรงดันอากาศที่ใช้พ่นเป็นค่าคงที่ใดๆ หากใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุดก็จะส่งผลให้ได้ผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า 210  $\mu\text{m}$  ในปริมาณที่มากกว่าการใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ต่ำกว่าเสมอ ทั้งนี้เป็นเพราะว่า เมื่อโลหะเหลวมีอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทเพิ่มขึ้นจะทำให้หน้าโลหะมีความหนืด(Viscosity)ลดลง ซึ่งง่ายต่อการแตกกระจายเป็นละอองขนาดเล็กเมื่อมีแรงใดๆมากระแทก เพราะฉะนั้นระดับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทจึงนับเป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อขนาดของอนุภาคผงโลหะ ดังตัวอย่างผลซึ่งได้จากการทดลองตามตารางที่ 4.13 – 4.14 และกราฟในรูปที่ 4.28 – 4.29 ซึ่งเป็นการทดลองผลิตผงโลหะชนิดต่าง ๆ โดยการใช้ค่าแรงดันสูงสุด อัตราการไหลของโลหะเหลวน้อยสุด เทียบกับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 4.13 ผลจากการทดลองจากรายการที่ 1 ถึง 27 ตามการทดลองจากตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn, Al และ Cu ( $-210\mu\text{m}$ ) ที่ผลิตได้โดยใช้ตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานคือ อัตราการไหลของโลหะเหลวน้อยสุด(หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing$  2 mm) แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi เทียบกับระดับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะหลอมที่ระดับต่าง ๆ

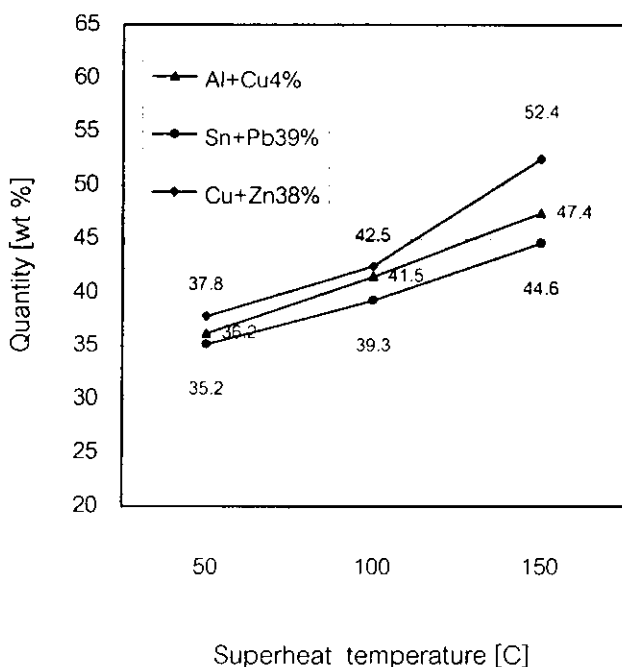
ชนิดโลหะ	ปริมาณโลหะที่พ่นต่อครั้ง (g)	ปริมาณผงโลหะที่ได้จากซูเปอร์ฮีท 50°C		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากซูเปอร์ฮีท 100°C		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากซูเปอร์ฮีท 150°C	
		(g)	%	(g)	%	(g)	%
Al	1,500	553.5	36.9	636.0	42.4	744.0	49.6
Sn	2,000	540.0	36.0	607.5	40.5	672.0	44.8
Cu	2,000	792.0	39.6	910.0	45.5	1,196.0	59.8



รูปที่ 4.28 ปริมาณผงโลหะ Sn, Al และ Cu ( $-210\mu\text{m}$ ) ที่ผลิตได้โดยใช้ตัวแปรควบคุม  
 ภาวะการทำงานคือ อัตราการไหลของโลหะเหลวน้อยสุด (หัวจ่ายโลหะเหลว  
 $\varnothing 2\text{ mm}$ ) แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi เทียบกับระดับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีท  
 ของโลหะหลอมที่ระดับต่าง ๆ

ตารางที่ 4.14 ผลจากการทดลองจากรายการที่ 1 ถึง 27 ตามการทดลองจากตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn+Pb 39%, Al+Cu 4% และ Cu+Zn 38% ( $-210\mu\text{m}$ ) ที่ผลิตได้โดยใช้ตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานคือ อัตราการไหลของโลหะเหลวน้อยสุด(หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing 2\text{ mm}$ ) แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi เทียบกับระดับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะหลอมที่ระดับต่าง ๆ

ชนิดโลหะ	ปริมาณโลหะที่พ่นต่อครั้ง	ปริมาณผงโลหะที่ได้จากซูเปอร์ฮีท $50^{\circ}\text{C}$		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากซูเปอร์ฮีท $100^{\circ}\text{C}$		ปริมาณผงโลหะที่ได้จากซูเปอร์ฮีท $150^{\circ}\text{C}$	
		(g)	%	(g)	%	(g)	%
Sn + Pb 39%	1,500	543.0	36.2	622.5	41.5	711.0	47.4
Al + Cu 4%	2,000	528.0	35.2	589.5	39.3	669.0	44.6
Cu + Zn 38%	2,000	756.0	37.8	850.0	42.5	1,048.0	52.4



รูปที่ 4.29 ปริมาณผงโลหะ Sn+Pb 39%, Al+Cu 4% และ Cu+Zn 38% ( $-210\mu\text{m}$ ) ที่ผลิตได้โดยใช้ตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานคือ อัตราการไหลของโลหะเหลวน้อยสุด(หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing 2\text{ mm}$ ) แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi เทียบกับระดับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะหลอมที่ระดับต่าง ๆ

4.2 วิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดผงโลหะ ผงโลหะชนิดต่างๆที่ผลิตได้จากเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอนที่ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อการทำวิจัยนี้มีการกระจายตัวของขนาดแตกต่างกันออกไปตามสมบัติเฉพาะของโลหะแต่ละชนิด การวิเคราะห์ขนาดกระทำโดยใช้ชุดตะแกรงมาตรฐานตาม ASTM E 11 ซึ่งมีข้อกำหนดดังนี้

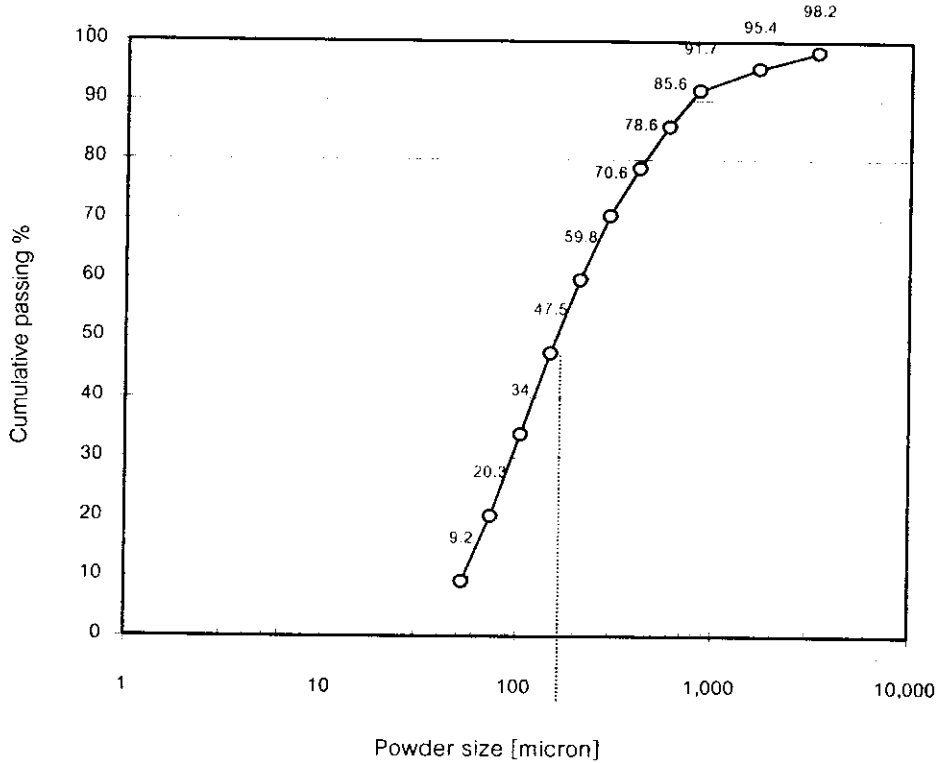
- ชุดตะแกรงคัดขนาดระหว่างการเขย่า ต้องมีอุปกรณ์เกาะที่ด้านข้างของชุดตะแกรง
- ปริมาณผงโลหะที่จะคัดแยกขนาดแต่ละครั้งเท่ากับ 100 g สำหรับผงโลหะที่มีค่าความหนาแน่นปรากฏมากกว่า  $1.50 \text{ g/cm}^3$  และเท่ากับ 50 g สำหรับผงโลหะที่มีค่าความหนาแน่นปรากฏน้อยกว่า  $1.50 \text{ g/cm}^3$
- เวลาที่ใช้ในการร่อนคัดขนาด / ครั้ง 15 นาที

(ASM, 1984)

**หมายเหตุ :** ผงโลหะชนิดต่างๆที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาด เป็นผงโลหะเฉพาะที่ได้จากผลิตโดยใช้ภาวะควบคุมที่ค่าแรงดันสูงสุด 140 psi อัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด(หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing 2 \text{ mm}$ ) และอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด( $150^\circ\text{C}$ ) ซึ่งเป็นภาวะการทำงานที่นับว่าดีที่สุดของเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอนเครื่องนี้ตามประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่นำมาใช้

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะทองแดงที่ได้จากการผลิตซึ่งใช้ตัวแปรควบคุม โดยใช้แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด 150°C และอัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด (หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing$  2 mm) ได้ผงโลหะขนาดต่างๆดังดังนี้

Sieve No.	Sieve opening (micron)	wt. % Retained	Cumulative wt.% Retained	Cumulative wt.% Passing
8	3,360	1.8	1.8	98.2
12	1,680	2.8	4.6	95.4
17	840	3.7	8.3	91.7
25	590	6.1	14.4	85.6
35	420	7.0	21.4	78.6
50	297	8.0	29.4	70.6
70	210	10.8	40.2	59.8
100	149	12.3	52.5	47.5
140	105	13.5	66.0	34.0
200	74	13.7	79.7	20.3
270	53	11.1	90.8	9.2
Pan	-53	9.2	100	0

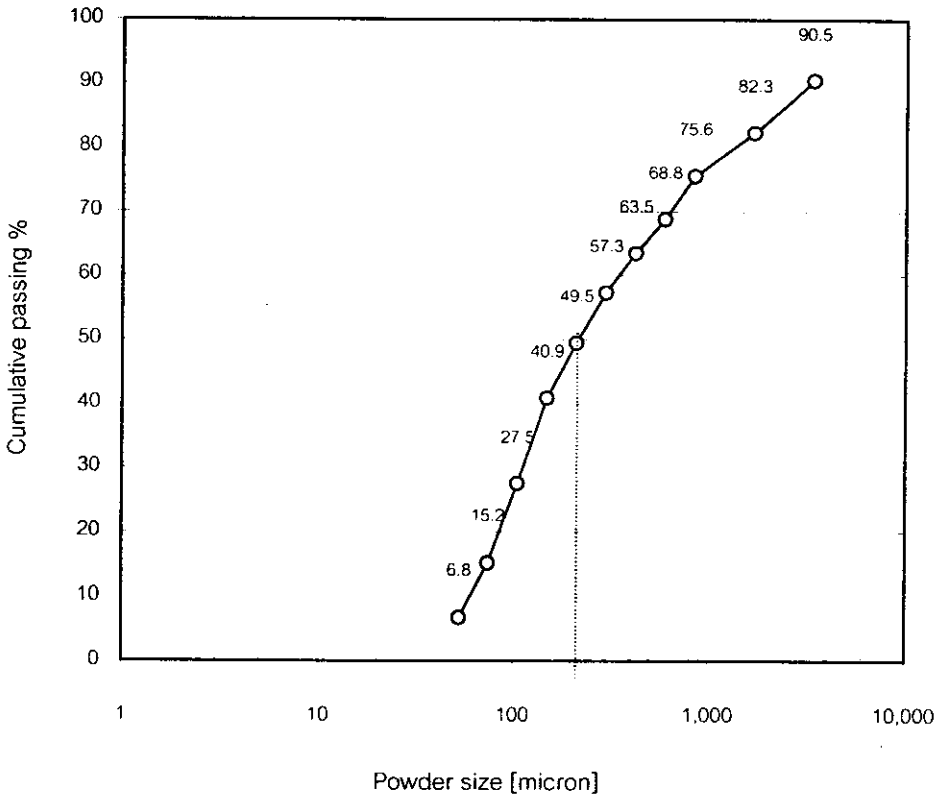


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะทองแดงทุกขนาดที่ได้จากการผลิต  
 จำนวนรวม 2,000 กรัม โดยใช้ภาวะการทำงานที่แรงดันอากาศสูงสุด  
 อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด และอัตราการใช้ของโลหะเหลวต่ำสุด  $d_{50}$   
 ของผงโลหะทองแดงอยู่ที่  $164 \mu\text{m}$



ตารางที่ 4.16 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะดิบที่ได้จากการผลิตซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมโดยใช้แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด 150°C และอัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด (หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing$  2 mm) ได้ผงโลหะขนาดต่าง ๆ ดังดังนี้

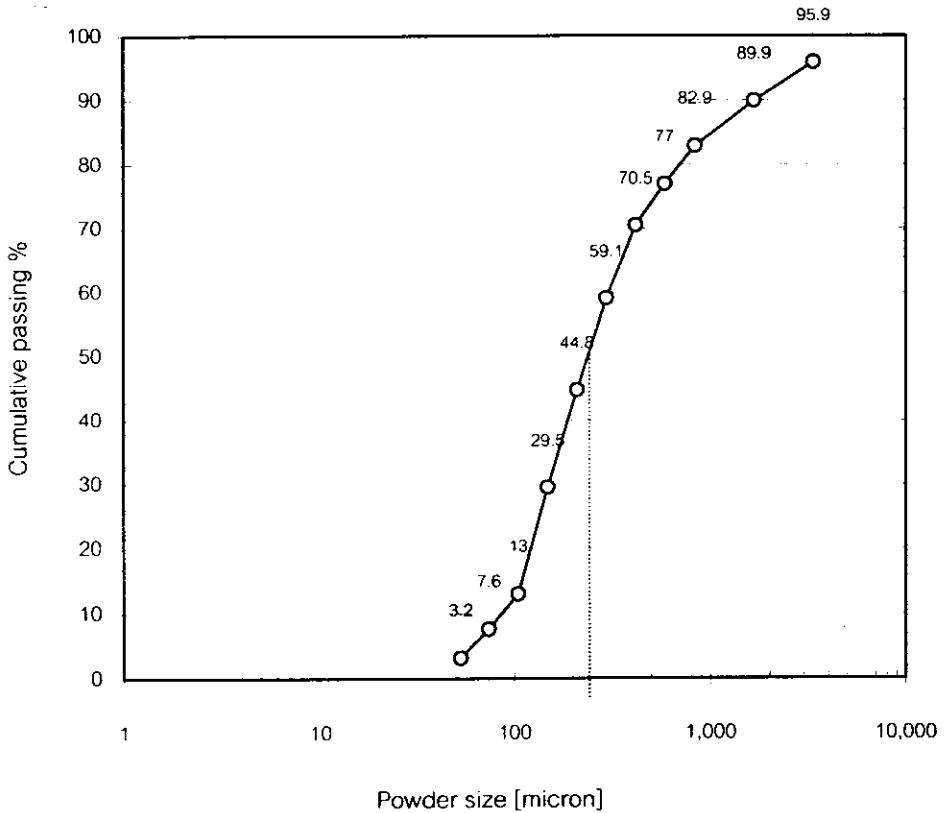
Sieve No.	Sieve opening (micron)	wt. % Retained	Cumulative wt. % Retained	Cumulative wt. % Passing
8	3,360	9.5	9.5	90.5
12	1,680	8.2	17.7	82.3
17	840	6.7	24.4	75.6
25	590	6.8	31.2	68.8
35	420	5.3	36.5	63.5
50	297	6.2	42.7	57.3
70	210	7.8	50.5	49.5
100	149	8.6	59.1	40.9
140	105	13.4	72.5	27.5
200	74	12.3	84.8	15.2
270	53	8.4	93.2	6.8
Pan	-53	6.8	100	0



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะดีบุกทุกขนาดที่ได้จากการผลิต  
 จำนวนรวม 1,500 กรัม โดยใช้ภาวะการทำงานที่แรงดันอากาศสูงสุด  
 อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด และอัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด  
 $d_{50}$  ของผงโลหะดีบุกอยู่ที่  $215 \mu\text{m}$

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมที่ได้จากการผลิตซึ่งใช้ตัวแปรควบคุม โดยใช้แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด 150°C และอัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด (หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing$  2 mm) ได้ผงโลหะขนาดต่าง ๆ ดังดังนี้

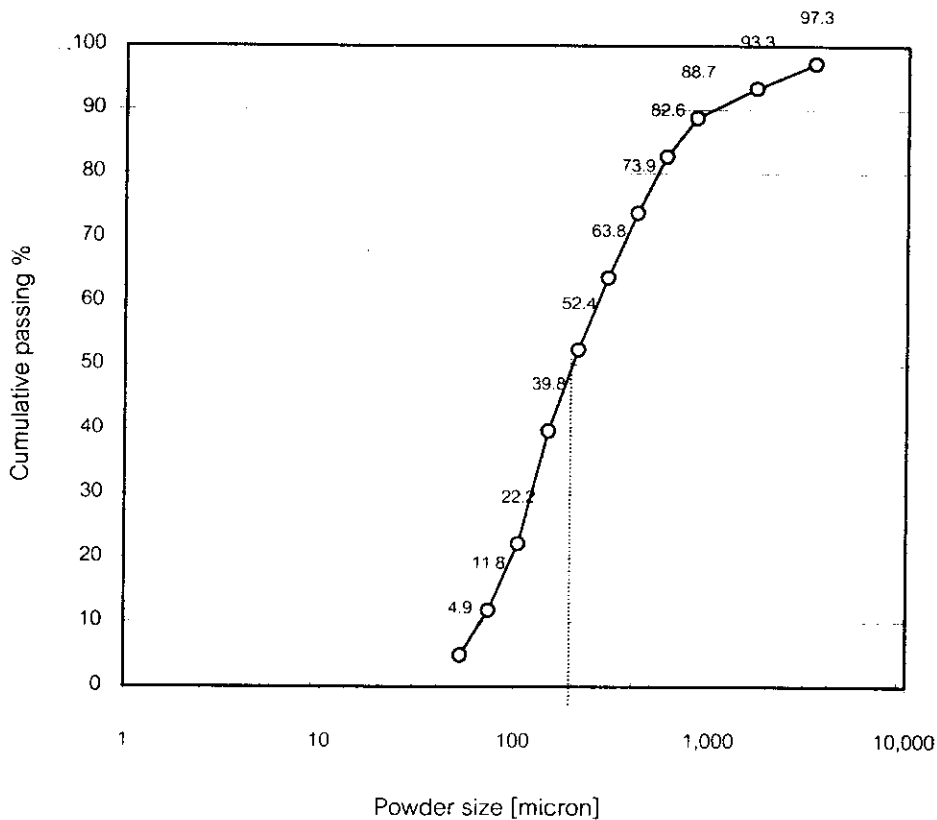
Sieve No.	Sieve opening (micron)	wt. % Retained	Cumulative wt.% Retained	Cumulative wt.% Passing
8	3,360	4.1	4.1	95.9
12	1,680	6.0	10.1	89.9
17	840	7.0	17.1	82.9
25	590	5.9	23.0	77.0
35	420	6.5	29.5	70.5
50	297	11.4	40.9	59.1
70	210	14.3	55.2	44.8
100	149	15.3	70.5	29.5
140	105	16.5	87.0	13.0
200	74	5.4	92.4	7.6
270	53	4.4	96.8	3.2
Pan	-53	3.2	100	0



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมทุกขนาดที่ได้จากการผลิต  
 จำนวนรวม 1,500 กรัม โดยใช้ภาวะการทำงานที่แรงดันอากาศสูงสุด  
 อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด และอัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด  $d_{50}$   
 ของผงโลหะอะลูมิเนียมอยู่ที่  $240 \mu\text{m}$

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี 38 % ที่ได้จากการผลิตซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมโดยใช้แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด 150°C และอัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด (หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing$  2 mm) ได้ผงโลหะขนาดต่างๆดังนี้

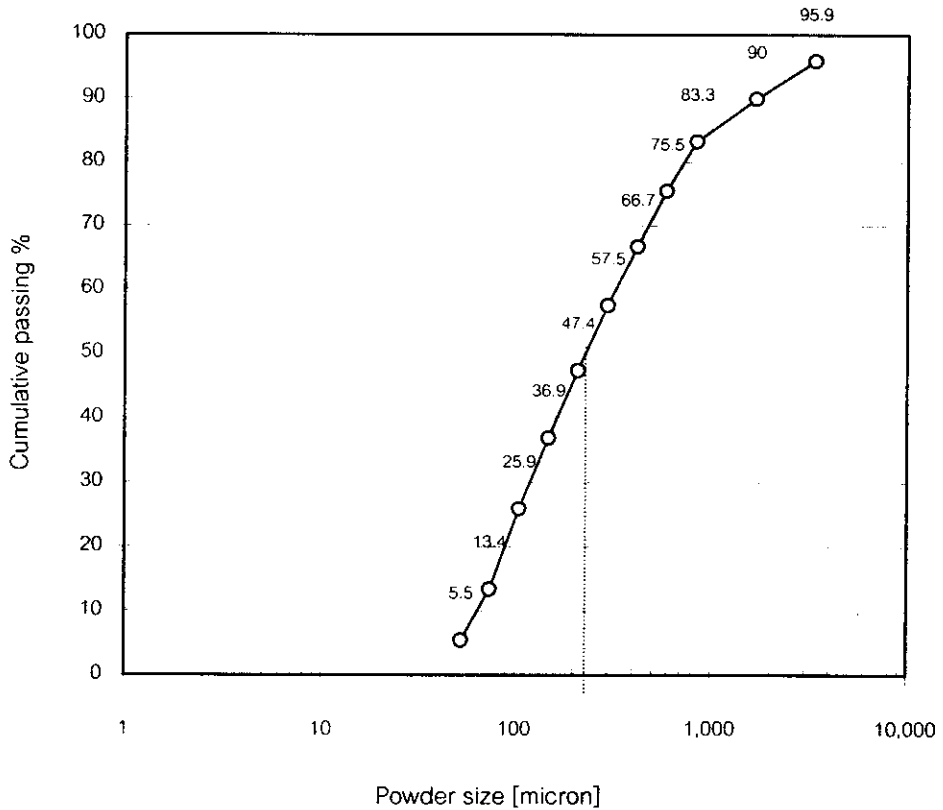
Sieve No.	Sieve opening (micron)	wt. % Retained	Cumulative wt. % Retained	Cumulative wt. % Passing
8	3,360	2.7	2.7	97.3
12	1,680	4.0	6.7	93.3
17	840	4.6	11.3	88.7
25	590	6.1	17.4	82.6
35	420	8.7	26.1	73.9
50	297	10.1	36.2	63.8
70	210	11.4	47.6	52.4
100	149	12.6	60.2	39.8
140	105	17.6	77.8	22.2
200	74	10.4	88.2	11.8
270	53	6.9	95.1	4.9
Pan	-53	4.9	100	0



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี 38 % ทุกขนาด  
 ที่ได้จากการผลิตจำนวนรวม 2,000 กรัม โดยใช้ภาวะการทำงานที่แรงดัน  
 อากาศสูงสุดอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด และอัตราการใช้ของโลหะเหลวต่ำสุด  
 $d_{50}$  ของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี 38 % อยู่ที่  $195 \mu\text{m}$

ตารางที่ 4.19 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว 39 % ที่ได้จากการผลิตซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมโดยใช้แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด 150°C และอัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด (หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing$  2 mm) ได้ผงโลหะขนาดต่างๆดังดังนี้

Sieve No.	Sieve opening (micron)	wt. % Retained	Cumulative wt. % Retained	Cumulative wt. % Passing
8	3,360	4.1	4.1	95.9
12	1,680	5.9	10.0	90.0
17	840	6.7	16.7	83.3
25	590	7.8	24.5	75.5
35	420	8.8	33.3	66.7
50	297	9.2	42.5	57.5
70	210	10.1	52.6	47.4
100	149	10.5	63.1	36.9
140	105	11.0	74.1	25.9
200	74	12.5	86.6	13.4
270	53	7.9	94.5	5.5
Pan	-53	5.5	100	0

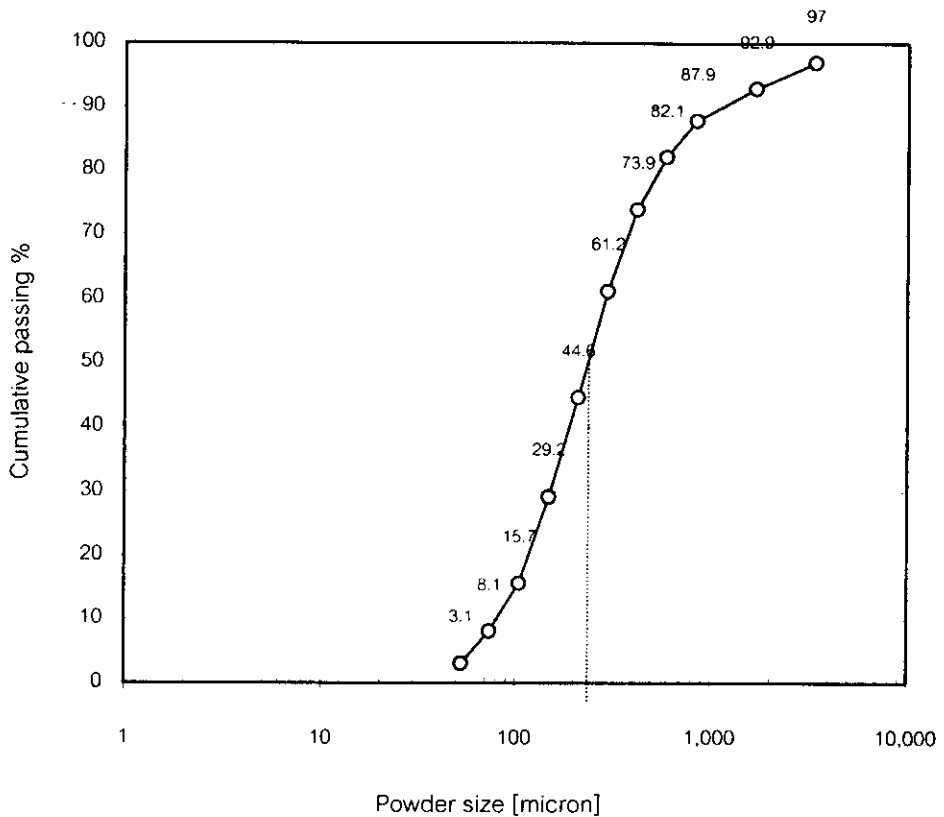


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงการกระจายตัวของผง โลหะดีบุกผสมตะกั่ว 39 % ทุกขนาดที่ได้จากการผลิตจำนวนรวม 1,500 กรัม โดยใช้ภาวะการทำงานที่แรงดันอากาศสูงสุด อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด และอัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด  $d_{50}$  ของผง โลหะดีบุกผสมตะกั่ว 39 % อยู่ที่  $230 \mu\text{m}$



ตารางที่ 4.20 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4 % ที่ได้จากการผลิตซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมโดยใช้แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด 150°C และอัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด (หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing$  2 mm) ได้ผงโลหะขนาดต่างๆดังดังนี้

Sieve No.	Sieve opening (micron)	wt. % Retained	Cumulative wt.% Retained	Cumulative wt.% Passing
8	3,360	3.0	3.0	97.0
12	1,680	4.1	7.1	92.9
17	840	5.0	12.1	87.9
25	590	5.8	17.9	82.1
35	420	8.2	26.1	73.9
50	297	12.7	38.8	61.2
70	210	16.6	55.4	44.6
100	149	15.4	70.8	29.2
140	105	13.5	84.3	15.7
200	74	7.6	91.9	8.1
270	53	5.0	96.9	3.1
Pan	-53	3.1	100	0



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4 %

ทุกขนาดที่ได้จากการผลิตจำนวนรวม 1,500 กรัม โดยใช้ภาวะการทำงาน

ที่แรงดันอากาศสูงสุด อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด และอัตราการไหลของ

โลหะเหลวต่ำสุด  $d_{50}$  ของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4 % อยู่ที่  $235\mu\text{m}$

ค่าการกระจายตัวของขนาดผงโลหะชนิดต่าง ๆ ซึ่งทำการผลิตโดยใช้ตัวแปรควบคุมที่แตกต่างกันไปจาก 6 รายการข้างต้นได้แสดงไว้ในภาคผนวก จากผลการทดลองที่ได้พบว่า ค่าแรงดันของอากาศที่ใช้พ่นโลหะเหลว ระดับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของโลหะเหลว ตลอดจนอัตราการไหลของโลหะเหลว จะมีอิทธิพลต่อขนาดของอนุภาคผงโลหะโดยตรง ขนาดเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) ของอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้โดยใช้ตัวแปรควบคุมภาวะการทำงานแบบต่าง ๆ (ตามเงื่อนไขที่กำหนดสำหรับการทำวิจัยนี้) ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4.21

อัตราการไหลของโลหะเหลวชนิดต่าง ๆ ภายใต้ภาวะควบคุมที่กำหนดให้โลหะเหลวมีระดับอุณหภูมิเกินจุดหลอมสูงสุด 150°C ไหลผ่านท่อจ่ายโลหะเหลวขนาดความโตผ่านศูนย์กลาง เล็กสุด 2 mm ซึ่งพบว่าเป็นภาวะควบคุมการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับค่าตัวแปรที่กำหนดใช้ในการทำวิจัยนี้ โดยมีอัตราการไหลของโลหะเหลวชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 อัตราการไหลของโลหะเหลวชนิดต่าง ๆ ภายใต้ภาวะควบคุมที่อุณหภูมิเกินจุดหลอม 150°C ปล่อยให้ไหลผ่านหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดเล็กสุด 2 mm จากโลหะเหลวชนิดละ 2 kg

ชนิดโลหะ	อัตราการไหลของโลหะเหลว (kg/min)	เวลาในการไหล (sec)
Sn	0.86	139
Al	0.93	129
Cu	0.51	222
Sn alloy	0.94	128
Al alloy	0.81	148
Cu alloy	0.60	200

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากหลักทฤษฎีและผลงานวิจัยต่าง ๆ จากที่หลาย ๆ ท่านได้เผยแพร่ไว้แล้วพบว่า การทำวิจัยนี้มีข้อมูลต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับหลักทฤษฎีของ Coombs et al (1990) เป็นอย่างมาก ตามสมการที่ 2.3 และอัตราการไหลของแก๊สหรืออากาศที่ใช้ในการทำวิจัยนี้ตามสมการที่ 3.3 มีค่าอัตราการไหลของอากาศ คือ 0.000028 kg/min ค่าแรงดันอากาศสูงสุดที่ใช้ 140 psi หรือ 9.66 bar

$$d_{av} = K; \frac{D^{1/2}(1 + M/A)^{1/2}}{(P + 1)} \dots\dots\dots(2.3)$$

เมื่อ  $d_{av}$  คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะ ( $\mu m$ )

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจ่ายโลหะหลอม (mm)

M คือ อัตราการไหลของโลหะหลอม (kg / min)

A คือ อัตราการไหลของแก๊สหรืออากาศ (kg / min)

P คือ แรงดันของแก๊ส (bar)

K, คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะทั้งของแก๊สและโลหะ

จากที่ Coombs et al (1990) ได้ทำการศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) ของผงโลหะตามสมการที่ 2.3 เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการทำวิจัยนี้พบว่า เป็นแนวทางที่สอดคล้องกับดังนี้ หมายเหตุ จากการทดลองแบบ Trial and error พบว่าค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะทั้งของแก๊สและโลหะสำหรับเครื่องแก๊สอะตอม ไมเซอร์แนวอนเครื่องนี้ควรมีค่าเท่ากับ 10 ดังรายการต่อไปนี้ สำหรับ โลหะดีบุก

$$d_{50} = K \frac{(1.414)\sqrt{1 + (0.86 / 0.000028)}}{(9.66 + 1)}$$

$$= 10 \frac{248}{10.66} = 232 \mu\text{m}$$

สำหรับ โลหะอลูมิเนียม

$$d_{50} = K \frac{(1.414)\sqrt{1 + (0.93 / 0.000028)}}{(9.66 + 1)}$$

$$= 10 \frac{258}{10.66} = 242 \mu\text{m}$$

สำหรับ โลหะทองแดง

$$d_{50} = K \frac{(1.414)\sqrt{1 + (0.51 / 0.000028)}}{(9.66 + 1)}$$

$$= 10 \frac{191}{10.66} = 179 \mu\text{m}$$

สำหรับโลหะดีบุกผสมตะกั่ว

$$d_{50} = K \frac{(1.414)\sqrt{1 + (0.94 / 0.000028)}}{(9.66 + 1)}$$

$$= 10 \frac{259}{10.66} = 242 \mu\text{m}$$

สำหรับโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง

$$d_{50} = K \frac{(1.414)\sqrt{1 + (0.81 / 0.000028)}}{(9.66 + 1)}$$

$$= 10 \frac{240.5}{10.66} = 225 \mu\text{m}$$

สำหรับโลหะทองแดงผสมสังกะสี

$$d_{50} = K \frac{(1.414)\sqrt{1 + (0.6 / 0.000028)}}{(9.66 + 1)}$$

$$= 10 \frac{207}{10.66} = 194 \mu\text{m}$$

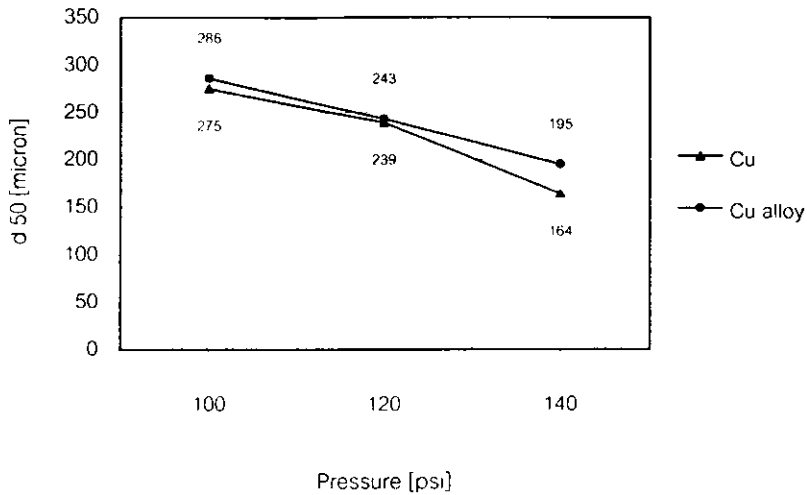
จากค่าขนาดเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) ของผงโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 2.3 เมื่อเทียบกับค่าขนาดเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) ซึ่งได้จากการคัดแยกด้วยชุดตะแกรงมาตรฐาน จะมีค่าของขนาดเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) ที่ใกล้เคียงและสอดคล้องกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 แสดงขนาดเฉลี่ยของขนาดอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้จากการใช้ภาวะควบคุมให้อุณหภูมิเกินจุดหลอมของโลหะเหลวสูงสุด 150°C แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi และอัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด (หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing$  2 mm)

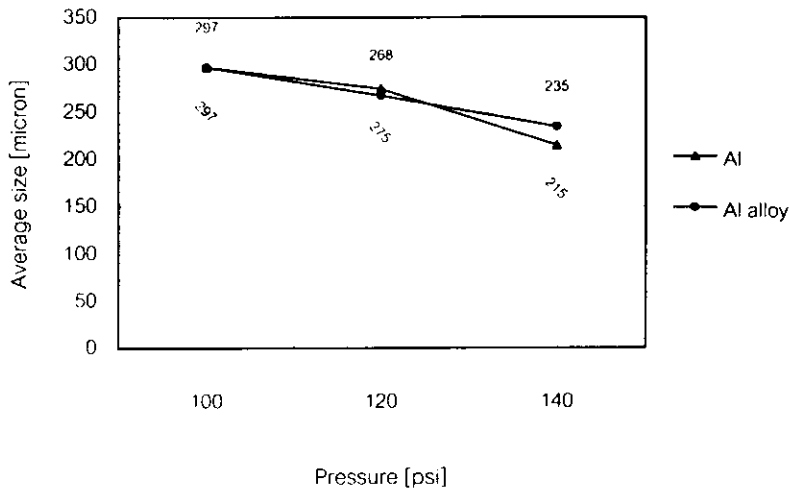
ชนิดผงโลหะ	ขนาดเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) ที่ได้จากการ คัดแยกด้วยชุดตะแกรงมาตรฐาน	ขนาดเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) ที่ได้จากการ คำนวณ
ผงโลหะดีบุก	215	232
ผงโลหะอะลูมิเนียม	240	242
ผงโลหะทองแดง	164	179
ผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว	230	242
ผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง	235	225
ผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี	195	194

ตารางที่ 4.23 อิทธิพลของแรงดันอากาศ และระดับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีท ที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) ของอนุภาคผงโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการผลิตภายใต้การกำหนดให้อัตราการไหลของโลหะเหลวต่ำสุด (หัวจ่ายโลหะเหลว  $\varnothing$  2 mm)

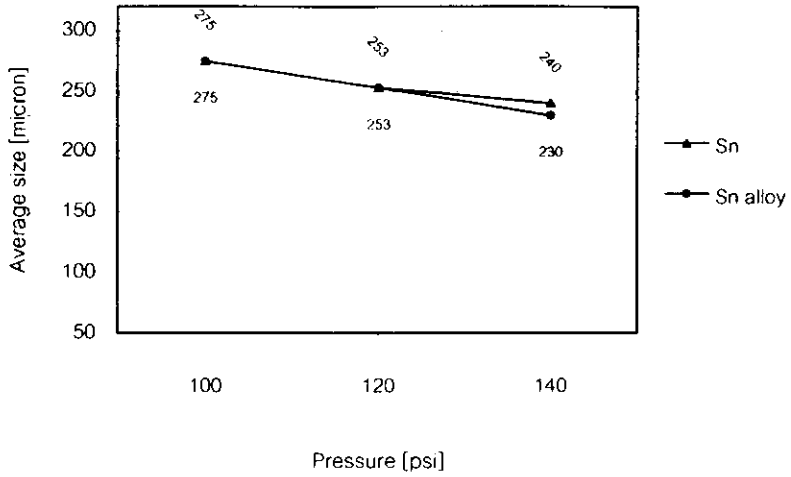
Metal	$d_{50}$ ( $\mu$ m) by Pressure (psi) at superheat = 150°C			$d_{50}$ ( $\mu$ m) by Superheat of molten metal (°C) at pressure = 140 psi		
	100	120	140	50	100	150
	Cu	275	239	164	282	232
Cu alloy	286	243	195	275	253	195
Al	297	275	215	297	268	215
Al alloy	297	268	235	286	268	235
Sn	275	253	240	286	253	240
Sn alloy	275	253	230	297	253	230



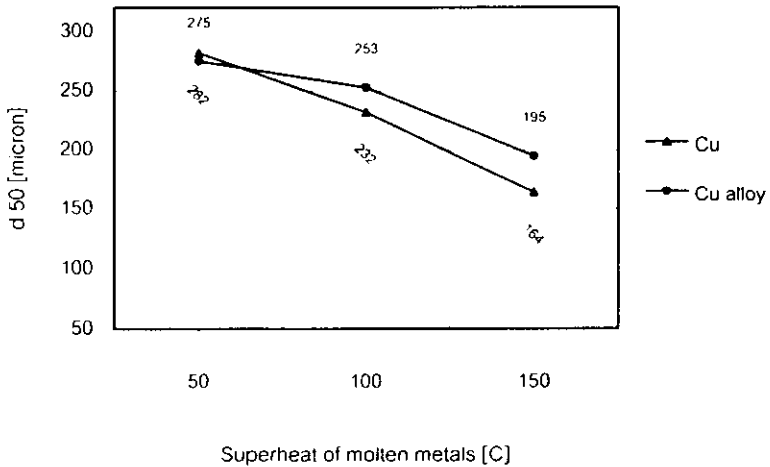
รูปที่ 4.36 ขนาดเฉลี่ย( $d_{50}$ )ของอนุภาคผงโลหะทองแดง และทองแดงผสมสังกะสี 38 % ซึ่งมีค่า  $d_{50}$  แตกต่างกันจากอิทธิพลของแรงดันที่ใช้ในการผลิต เมื่อใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด  $150^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.37 ขนาดเฉลี่ย( $d_{50}$ )ของอนุภาคผงโลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4% ซึ่งมีค่า  $d_{50}$  แตกต่างกันจากอิทธิพลของแรงดันที่ใช้ในการผลิต เมื่อใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด  $150^{\circ}\text{C}$

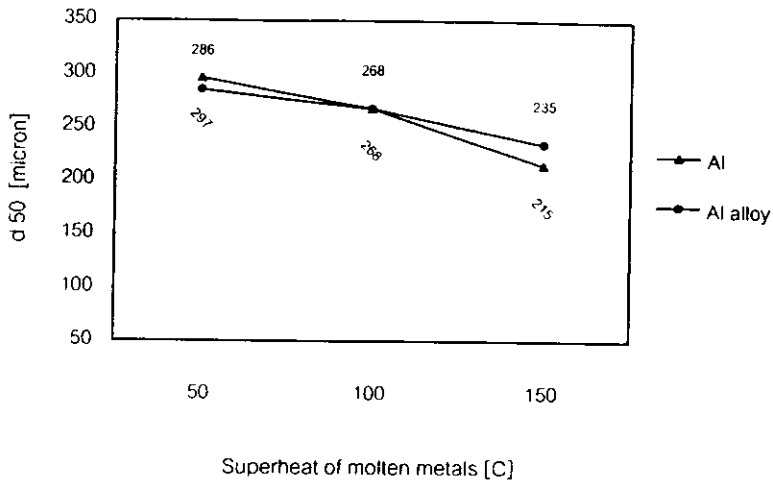


รูปที่ 4.38 ขนาดเฉลี่ย( $d_{50}$ )ของอนุภาคผงโลหะดีบุก และดีบุกผสมตะกั่ว 39 % ซึ่งมีค่า  $d_{50}$  แตกต่างกันจากอิทธิพลของแรงดันที่ใช้ในการผลิต เมื่อใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด  $150^{\circ}\text{C}$

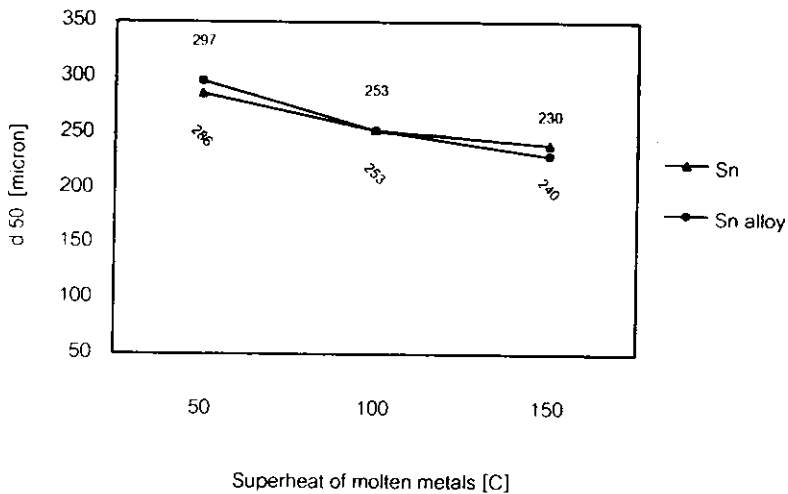


รูปที่ 4.39 ขนาดเฉลี่ย( $d_{50}$ )ของอนุภาคผงโลหะทองแดง และทองแดงผสมสังกะสี 38 % ซึ่งมีค่า  $d_{50}$  แตกต่างกันจากอิทธิพลของอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ใช้ในการผลิต เมื่อใช้แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi





รูปที่ 4.40 ขนาดเฉลี่ย( $d_{50}$ )ของอนุภาคผงโลหะอะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4 % ซึ่งมีค่า  $d_{50}$  แตกต่างกันจากอิทธิพลของอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ใช้ในการผลิต เมื่อใช้แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi .

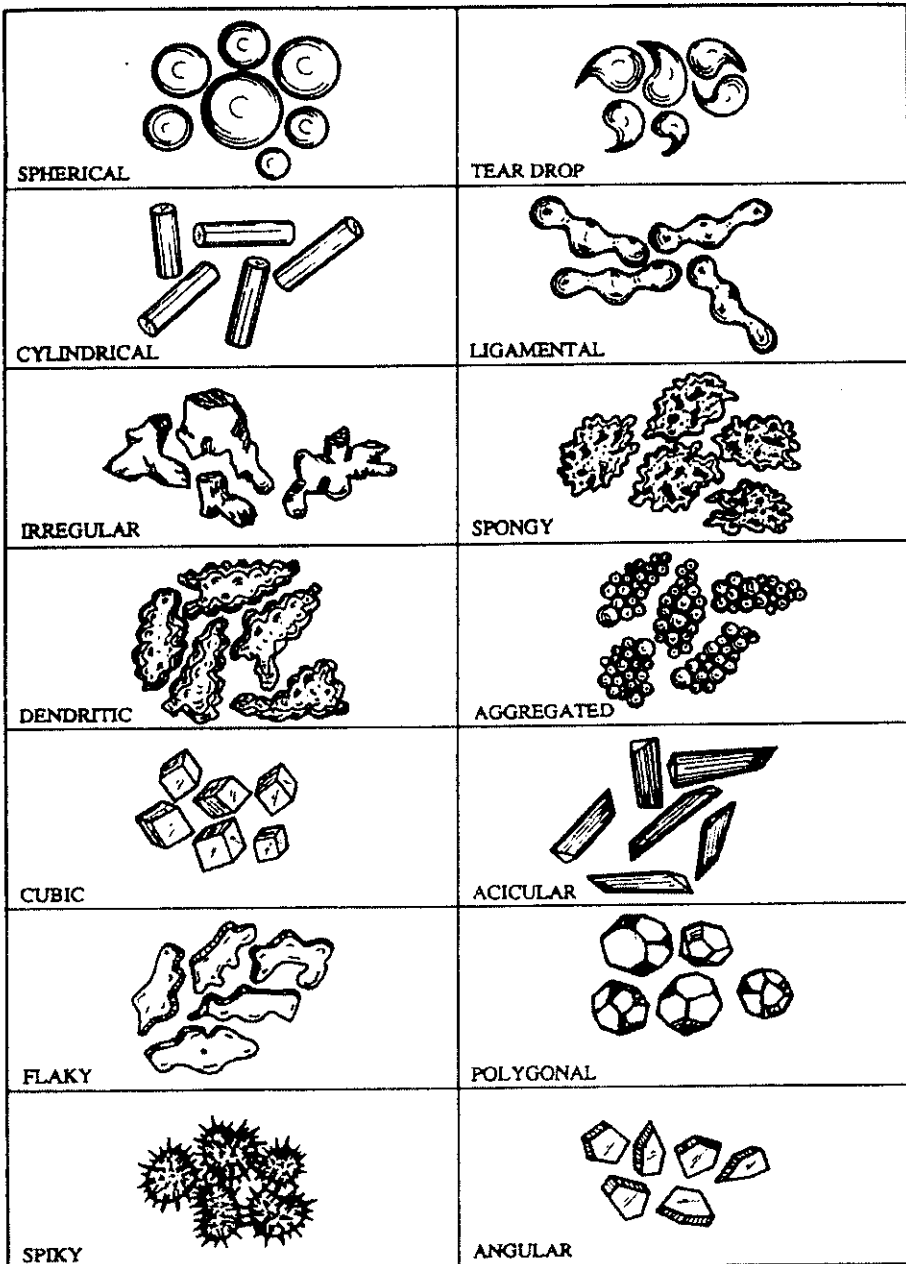


รูปที่ 4.41 ขนาดเฉลี่ย( $d_{50}$ )ของอนุภาคผงโลหะดีบุก และดีบุกผสมตะกั่ว 39 % ซึ่งมีค่า  $d_{50}$  แตกต่างกันจากอิทธิพลของอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ใช้ในการผลิต เมื่อใช้แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi

### 4.3 วิเคราะห์รูปร่าง

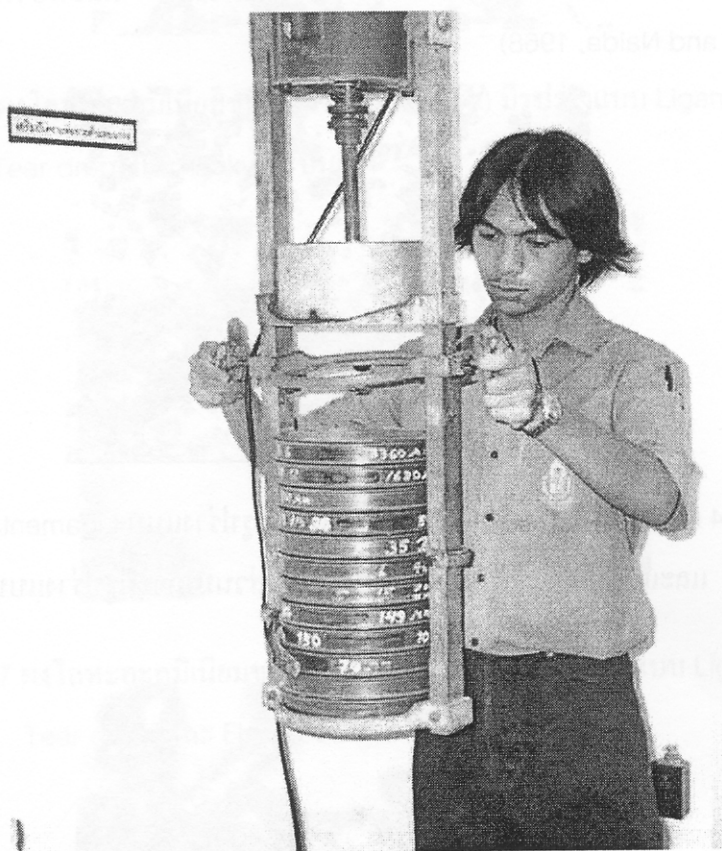
ผงโลหะโดยทั่วไปจะมีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะของโลหะแต่ละชนิด ตลอดจนกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิต ลักษณะรูปร่างของผงโลหะจะมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อสมบัติด้านต่าง ๆ เช่น

- ความหนาแน่นปรากฏ
- ความสามารถในการไหลตัว
- ความสามารถในการทำซินเตอร์



รูปที่ 4.42 ลักษณะรูปร่างแบบต่าง ๆ ของผงวัสดุ (Animesh Bose, 1995)

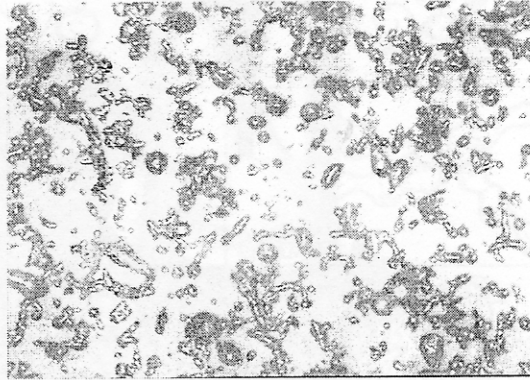
ผงโลหะแต่ละชนิดที่ได้จากการผลิตด้วยเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอนภายหลังจากการคัดแยกขนาดแล้วได้นำมาตรวจวิเคราะห์รูปร่าง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน OLYMPUS รุ่น CHH ซึ่งเป็นกล้องที่มี Scale bar เฉพาะที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ความละเอียด  $0.1 \mu\text{m}$  ผงโลหะที่นำมาใช้ตรวจวิเคราะห์รูปร่างเป็นผงโลหะที่ผ่านการคัดแยกขนาดด้วยชุดตะแกรงมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 4.43



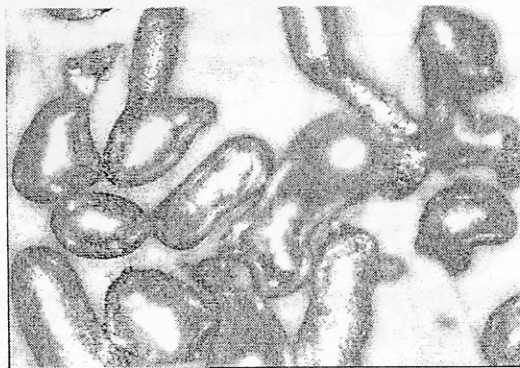
รูปที่ 4.43 ชุดตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในการคัดแยกขนาดผงโลหะชนิดต่าง ๆ

รูปร่างของผงโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการผลิตมีลักษณะที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.44-4.54 จะเห็นว่าผงดีบุกและดีบุกผสมตะกั่วที่ได้จะมีรูปร่างเป็น Tear drop, Ligamental และ Spherical ปะปนกัน (รูปที่ 4.44-4.45 และ 4.52-4.53) สำหรับรูปร่างของผงอะลูมิเนียมจะมีลักษณะเป็น Tear drop, Ligamental และ Flaky (รูปที่ 4.46-4.47) ในขณะที่ของอะลูมิเนียมผสม

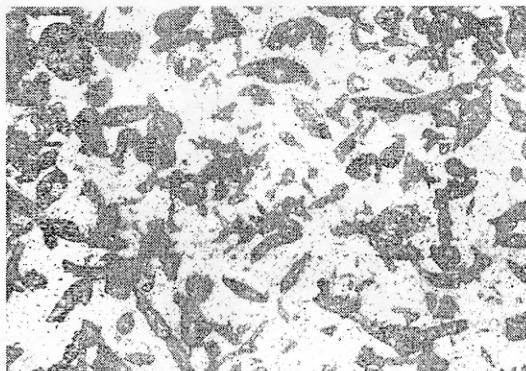
ทองแดงเป็นรูปร่าง Tear drop และ Ligamental (รูปที่ 4.54) ซึ่งต่างกับผงทองแดงที่ส่วนใหญ่มีรูปร่างกลม (รูปที่ 4.48-4.49) ส่วนทองแดงผสมสังกะสีมีรูปร่างแบบ Irregular และ Flaky ปะปนกัน (รูปที่ 4.50-4.51) เนื่องจากทองแดงบริสุทธิ์มีสภาพการนำความร้อนสูงมากและมากกว่าโลหะชนิดอื่นๆที่ทำการทดลอง มีแรงดึงดูดของน้ำโลหะสูงกว่า และอัตราการเย็นตัวที่ใช้สูง (ประมาณ  $1000^{\circ}\text{C/s}$ ) เมื่อเทียบกับอัตราการเย็นตัวของดีบุกประมาณ  $200^{\circ}\text{C/s}$  จึงทำให้อนุภาคมีรูปร่างกลม ดังนั้นสำหรับโลหะชนิดอื่นถ้าต้องการให้มีรูปร่างกลมควรมีการเพิ่มความดันแก๊ส หรือมุมของพวยแก๊สที่พุ่งเข้าปะทะลำของโลหะเหลวทำให้เกิดแรงเฉือนมากขึ้น และต้องเพิ่มอัตราการเย็นตัว (Nichiporenko and Naida, 1968)



รูปที่ 4.44 ผงโลหะดีบุกขนาด  $53\ \mu\text{m}$  (50 x) มีรูปร่างแบบ Ligamental, Tear drop และแบบ Spherical ปะปนกัน โดยส่วนมากจะมีรูปร่างแบบ Ligamental



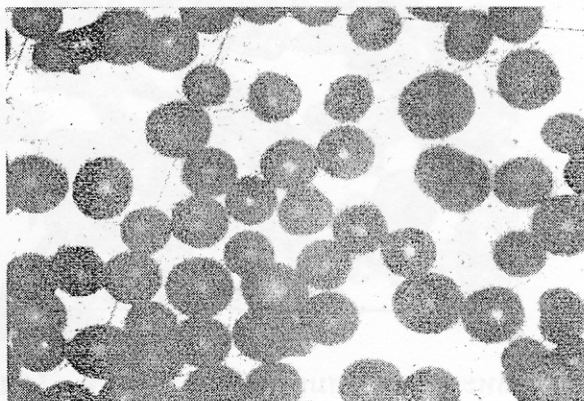
รูปที่ 4.45 ผงโลหะดีบุกขนาด  $74\ \mu\text{m}$  (100 x) มีรูปร่างแบบ Ligamental, Tear drop และแบบ Spherical ปะปนกัน โดยส่วนมากจะมีรูปร่างแบบ Ligamental



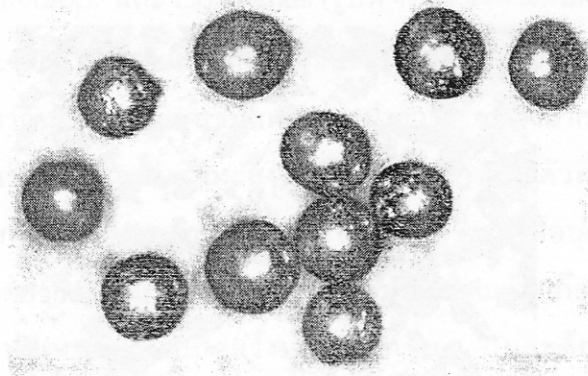
รูปที่ 4.46 ผงโลหะอะลูมิเนียมขนาด  $74 \mu\text{m}$  (50 x) มีรูปร่างแบบ Ligamental, Tear drop และ Flaky ปะปนกัน



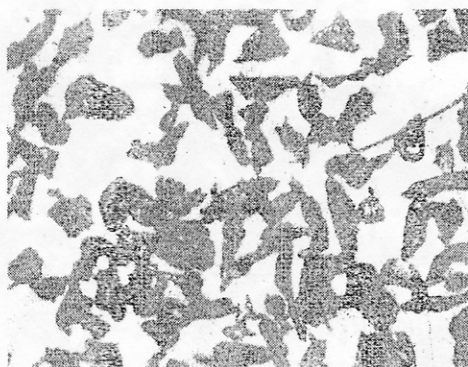
รูปที่ 4.47 ผงโลหะอะลูมิเนียมขนาด  $74 \mu\text{m}$  (100 x) มีรูปร่างแบบ Ligamental, Tear drop และ Flaky ปะปนกัน



รูปที่ 4.48 ผงโลหะทองแดงขนาด  $74 \mu\text{m}$  (50 x) มีรูปร่างแบบ Spherical

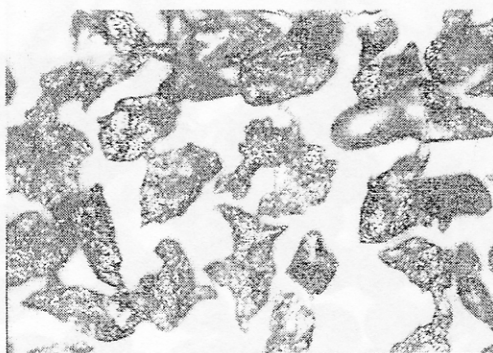


รูปที่ 4.49 ผงโลหะทองแดงขนาด - 74  $\mu\text{m}$  (100 x) มีรูปร่างแบบ Spherical



รูปที่ 4.50 ผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี 38 % ขนาด - 74  $\mu\text{m}$  (50 x)

มีรูปร่างแบบ Irregular และ Flaky ปะปนกัน



รูปที่ 4.51 ผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี 38 % ขนาด - 74  $\mu\text{m}$  (100 x)

มีรูปร่างแบบ Irregular และ Flaky ปะปนกัน





รูปที่ 4.52 ผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว 39 % ขนาด - 74  $\mu\text{m}$  (50 x) มีรูปร่างแบบ  
Ligamental และ Tear drop ปะปนกัน



รูปที่ 4.53 ผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว 39 % ขนาด - 74  $\mu\text{m}$  (100 x) มีรูปร่างแบบ  
Ligamental และ Tear drop ปะปนกัน



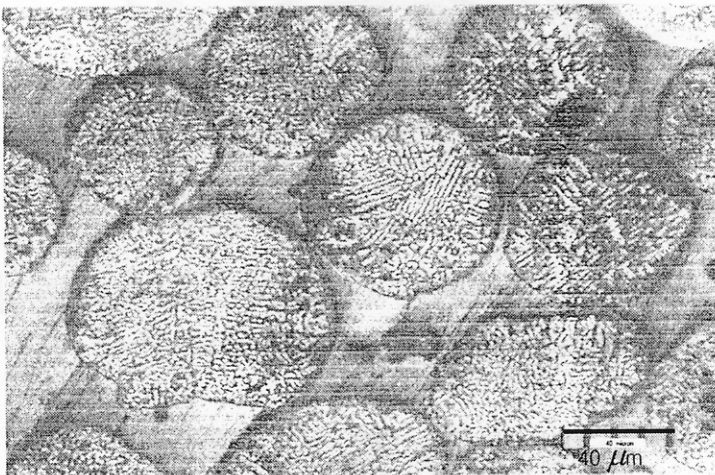
รูปที่ 4.54 ผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4 % ขนาด - 74  $\mu\text{m}$  (100 x)  
มีรูปร่างแบบ Tear drop และ Ligamental

#### 4.4 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของธาตุผสม

4.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผงโลหะที่ผลิตได้ ซึ่งมีอัตราการเย็นตัวเร็ว (High cooling rate) จะนำตัวอย่างไปหล่อเรซินและนำมาขัดผิวให้เป็นมันและใช้น้ำยาเฉพาะเจาะจงกัดผิวจนเห็นโครงสร้างจุลภาค แล้วนำมาถ่ายภาพเพื่อวิเคราะห์โครงสร้าง

##### 1) โลหะทองแดง

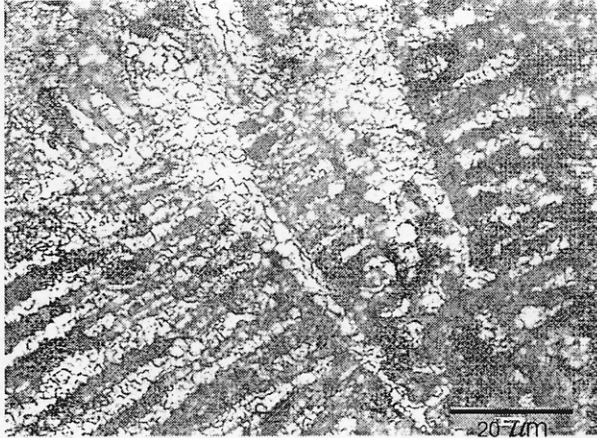
ทองแดงที่นำมาใช้ในการหลอมเป็นเส้นลวดสายไฟฟ้าซึ่งนับเป็นทองแดงชั้นดีที่มีความบริสุทธิ์สูง จากลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงพบว่า มีลักษณะของโครงสร้างแบบ Dendritic และมีขนาดเกรนเล็ก ทั้งนี้ เพราะในขณะที่ละอองโลหะทองแดงเหลวซึ่งมีขนาดเล็กจะเกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่พุ่งชนด้วยความเร็วสูงในปริมาณที่มากและต่อเนื่อง ทำให้มีเวลาสำหรับการเกิดผลึกที่สั้น (Solidification time มีน้อย) ส่งผลให้ผลึกที่เกิดขึ้นภายในผงโลหะไม่มีโอกาสที่จะขยายใหญ่ได้ (รูปที่ 4.55-4.56)



รูปที่ 4.55 ผงโลหะทองแดงเป็นแบบ Dendritic (200 x)

HCl + Ferric chloride etch.



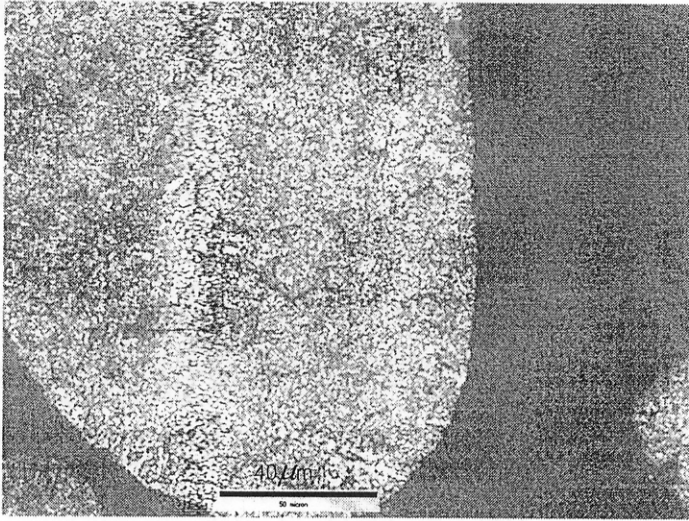


รูปที่ 4.56 ผงโลหะทองแดงเป็นแบบ Dendritic (500 x)

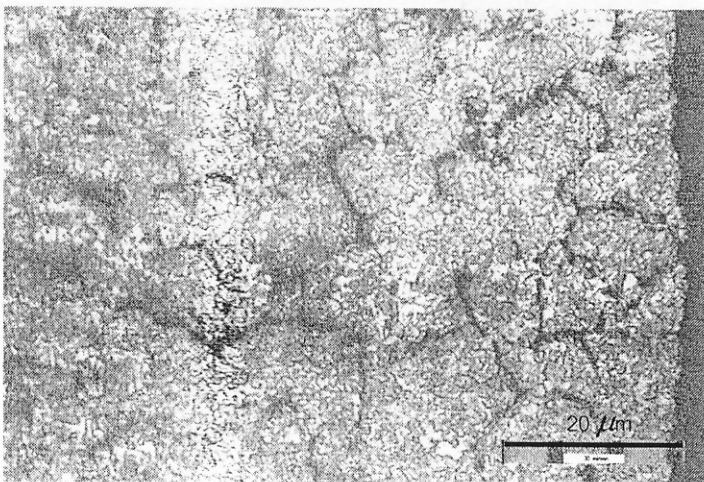
HCl + Ferric chloride etch.

## 2) โลหะอะลูมิเนียม

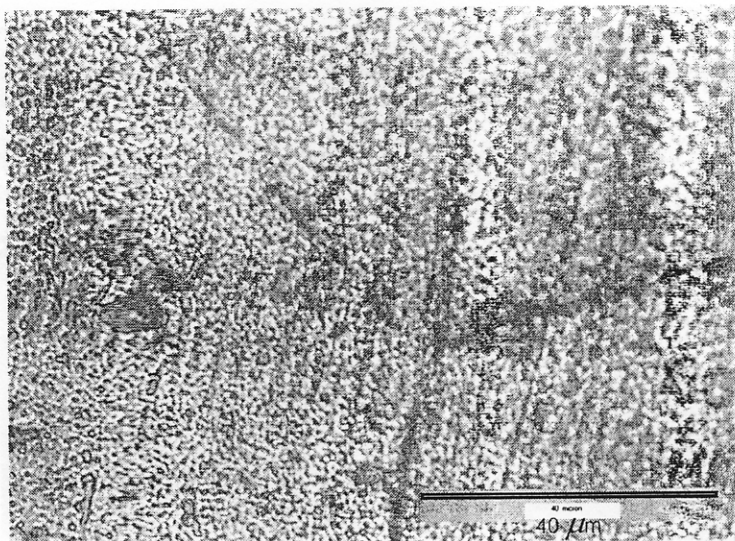
อะลูมิเนียมที่นำมาใช้ในการหลอมเป็นเส้นลวดสายไฟฟ้าซึ่งนับเป็นอะลูมิเนียมชนิดที่มีความบริสุทธิ์สูง จากลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงโลหะพบว่ามีลักษณะของโครงสร้างแบบ Dendritic และเกรนมีขนาดเล็ก ตามรูปที่ 4.57-4.58 ซึ่งเมื่อเทียบกับการเย็นตัวปกติในรูปที่ 4.59 จะได้เกรนที่มีขนาดใหญ่กว่า ทั้งนี้เนื่องจากโลหะมีการเย็นตัวที่ช้าทำให้มีเวลาสำหรับการเกิดผลึกมากพอ (Solidification time มีมาก) ส่งผลให้ผลึกมีขนาดโตและสมบูรณ์ ในขณะที่การพ่นด้วยเครื่อง Atomizer ซึ่งมีอัตราการเย็นตัวเร็ว ทำให้มีเวลาสำหรับการเกิดผลึกที่สั้น (Solidification time มีน้อย) ส่งผลให้ผลึกที่เกิดขึ้นภายในผงโลหะไม่มีโอกาสที่จะขยายใหญ่ได้



รูปที่ 4.57 ผงโลหะอะลูมิเนียม(200x) เกิดโพรงหดตัวของน้ำโลหะในระหว่าง Microcrystalline ที่เกิดจากการแข็งตัวของน้ำโลหะอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิด Microshrinkage ระหว่าง Grain HF 0.5 % etch.



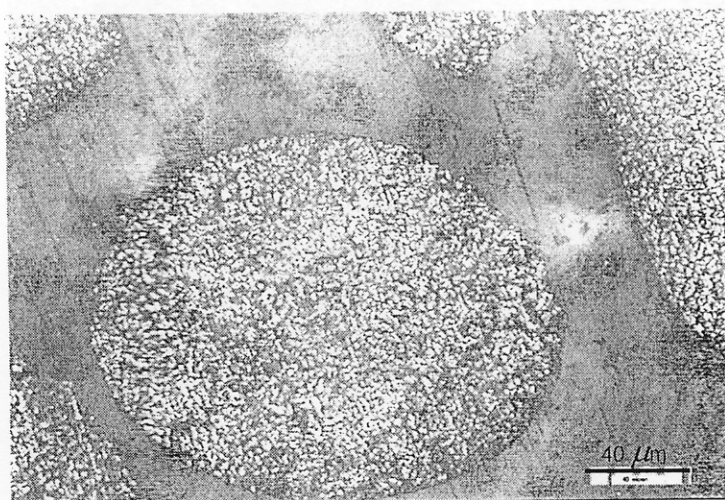
รูปที่ 4.58 โครงสร้างผงโลหะอะลูมิเนียม (500x) HF 0.5 % etch.



รูปที่ 4.59 โครงสร้างโลหะอะลูมิเนียมที่แข็งตัวในเป่าจ่าย(500x) ลักษณะเป็น Grain ที่สมบูรณ์ ผลึกมีขนาดโตกว่าผลึกที่เกิดในผงโลหะอย่างชัดเจน HF 0.5 % etch.

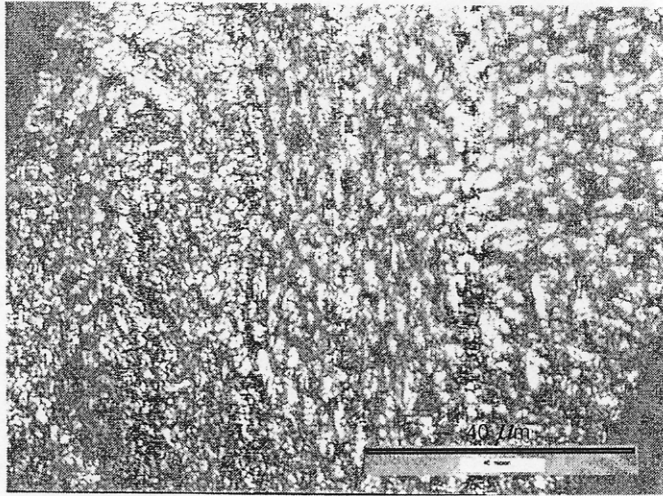
### 3) โลหะดีบุก

ดีบุกที่นำมาใช้ในการหลอมเป็นแท่งที่มีความบริสุทธิ์สูง โครงสร้างจุลภาคของผงโลหะดีบุกจะป็นดังรูปที่ 4.60 -4.61



รูปที่ 4.60 ผงโลหะดีบุก(200x) มีโครงสร้างแบบ Dendritic HCl + Ferric chloride etch.

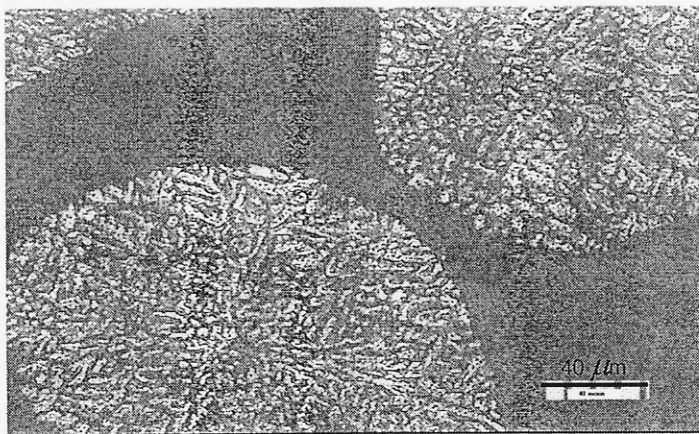




รูปที่ 4.61 ผงโลหะดีบุก(500x) มีโครงสร้างแบบ Dendritic  
HCl + Ferric chloride etch.

#### 4) โลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4 %

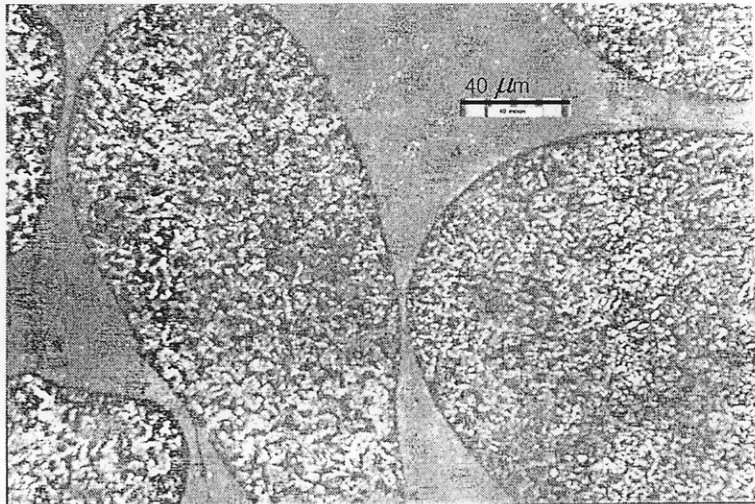
วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการหลอมคือเส้นลวดสายไฟฟ้าทั้งในส่วนของอะลูมิเนียมและทองแดง จากลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4% ซึ่งมีอัตราคาร์บอนสูงมากทำให้มีผลึกแบบ Dendritic และจากภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1,000 เท่า จะสังเกตเห็นโครงข่ายตามขอบผลึกได้ชัดเจน ผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ค่อนข้างละเอียด (รูปที่ 4.62)



รูปที่ 4.62 โครงสร้างผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4% (200x) HF 0.5 % etch.

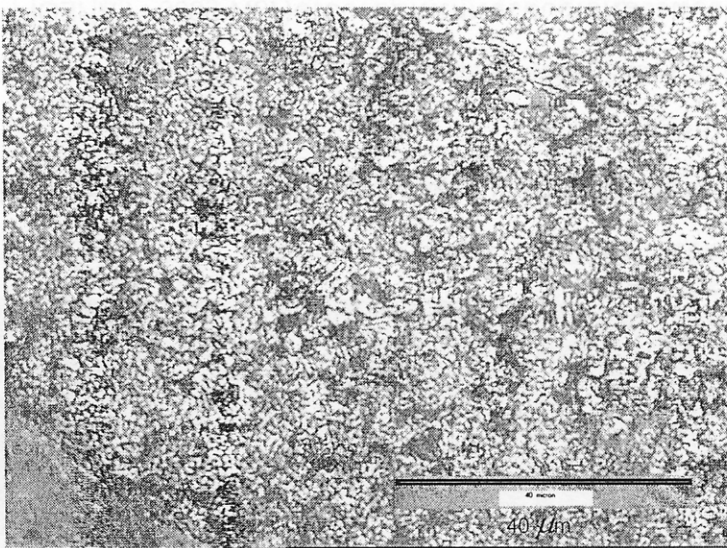
### 5) โลหะดีบุกผสมตะกั่ว 39%

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการหลอมเป็นแท่งดีบุกผสมตะกั่วสำเร็จรูปสำหรับใช้ในงานบัดกรีอ่อน (Soldering) โดยทั่วไปแล้วในทางการค้าจะผลิตให้มีส่วนผสมระหว่าง 61 wt% Sn + 39 wt% Pb เพื่อให้มีส่วนผสมเป็น Eutectic ทำให้มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำลง ลักษณะของโครงสร้างที่เกิดในส่วนที่เป็นผงโลหะมีลักษณะเป็นโครงสร้าง Eutectic (รูปที่ 4.63-4.64)



รูปที่ 4.63 โครงสร้างผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว 39% (200x)

HCl + Ferric chloride etch.

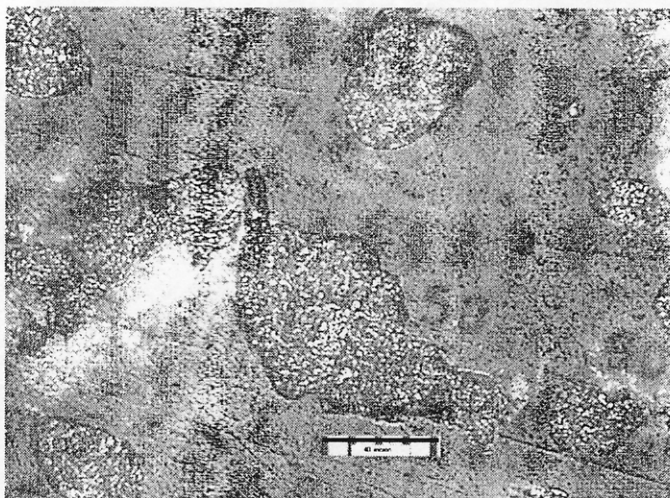


รูปที่ 4.64 โครงสร้างผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว 39% (500x)

HCl + Ferric chloride etch.

## 6) โลหะทองเหลือง

ทองเหลืองที่นำมาใช้ในการหลอมเป็นแท่งโลหะสำเร็จรูปที่ใช้ในการหล่องานเครื่องประดับ และงานปฏิมากรรมต่าง ๆ จากลักษณะโครงสร้างของผงโลหะทองเหลือง พบว่า ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคจะมีองค์ประกอบโครงสร้างเป็นสารละลายของแข็งสองชนิดแทรกปะปนรวมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน ตามปริมาณของสังกะสีที่มีอยู่ในเนื้อพื้น(Matrix structure) (รูปที่4.65)



รูปที่ 4.65 โครงสร้างผงโลหะทองเหลือง(200x) Ferric chloride etch.

4.4.2 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสม การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่ผสม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด(JSM-5800 LV, JEOL: Attached with Energy Dispersive X-ray Spectrometer(EDS: Oxford ISIS 300)) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

- เทคนิคที่ใช้ เป็นการวิเคราะห์พลังงานรังสีเอ็กซ์เชิงคุณภาพ และ x-ray mapping
- สภาวะการวิเคราะห์ High vacuum mode, 20 keV

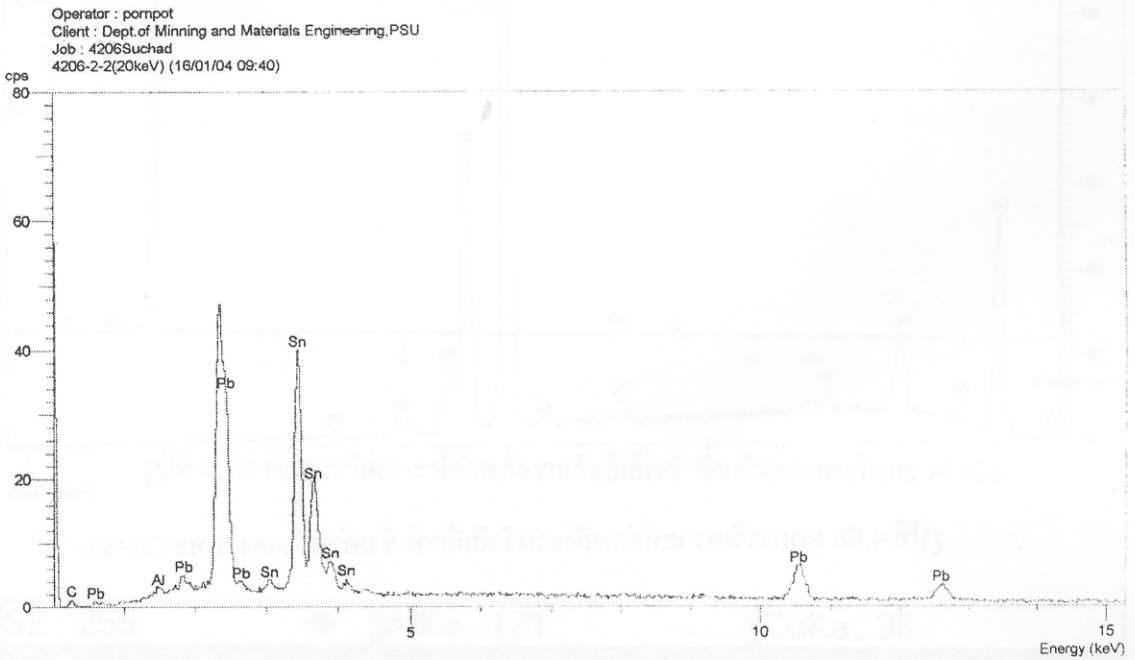
Teflon stub without coating and hot mount resin

การกระจายตัวของธาตุในเนื้อของโลหะผงชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.24

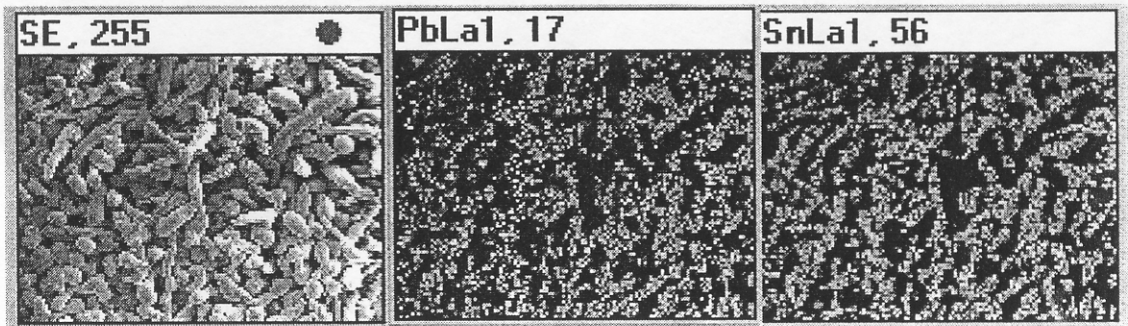


ตารางที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ชนิดของธาตุผสมที่พบในผงโลหะชนิดต่าง ๆ

ที่	ชนิดตัวอย่าง	ธาตุที่พบ	ธาตุที่ทำแผนภาพการกระจายของธาตุ
1	Sn+Pb cast	C, Al, Si, Sn, Pb	Al, Si, Sn, Pb
2	Sn+Pb powder	C, Al, Sn, Pb	Al, Sn, Pb
3	Brass cast	C, Al, Si, Sn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb	Al, Fe, Cu, Zn, Pb
4	Brass powder	C, Al, Si, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb	Al, Fe, Cu, Zn, Pb
5	Al+Cu 4% cast	C, Al, Si, Cu	Al, Cu
6	Al+Cu 4% powder	C, Al, Cu	Al, Cu

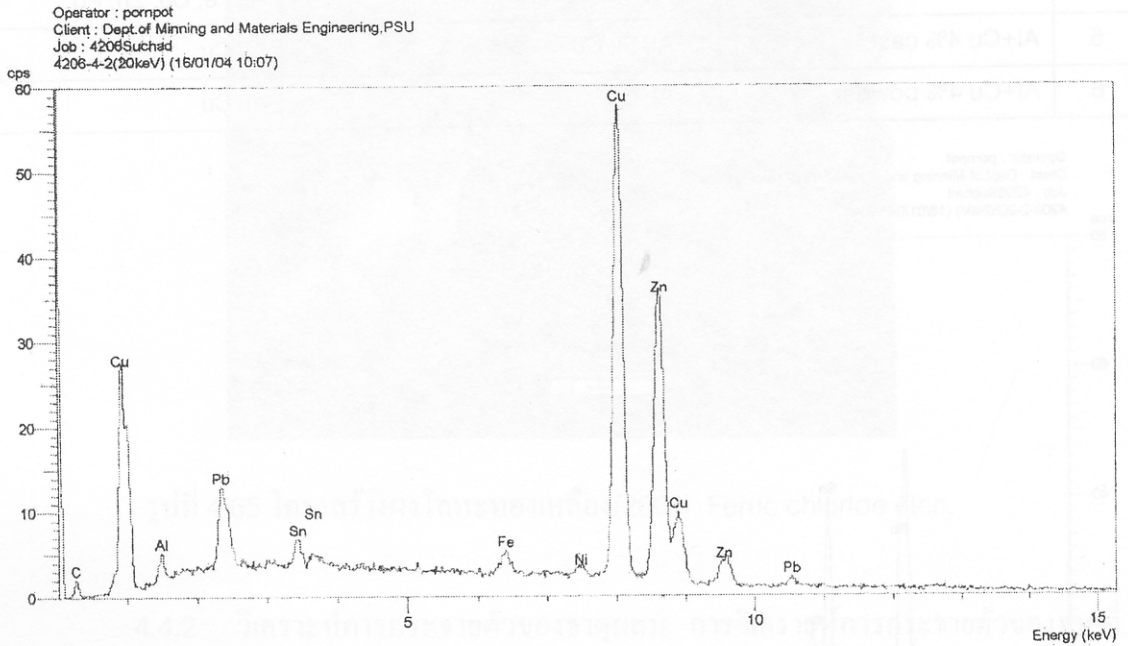


รูปที่ 4.66 ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ขึ้นตัวอย่างผงโลหะ Sn+Pb

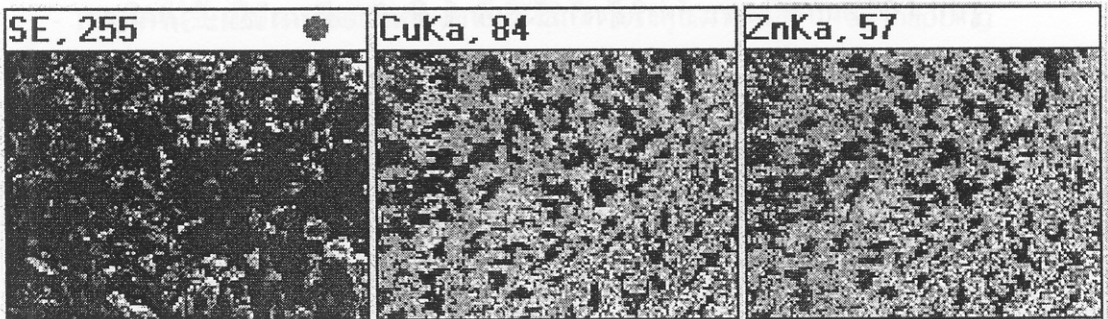


รูปที่ 4.67 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ขึ้นตัวอย่างผงโลหะ Sn+Pb

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ขึ้นตัวอย่างผงโลหะ Sn+Pb ธาตุที่ทำแผนภาพการกระจายตัวของธาตุคือ Al, Sn, Pb จะเห็นว่ามี การกระจายตัวของธาตุที่ตรวจพบกระจุกกระจายในเนื้อผงโลหะอย่างสม่ำเสมอ (รูปที่ 4.66-4.67)



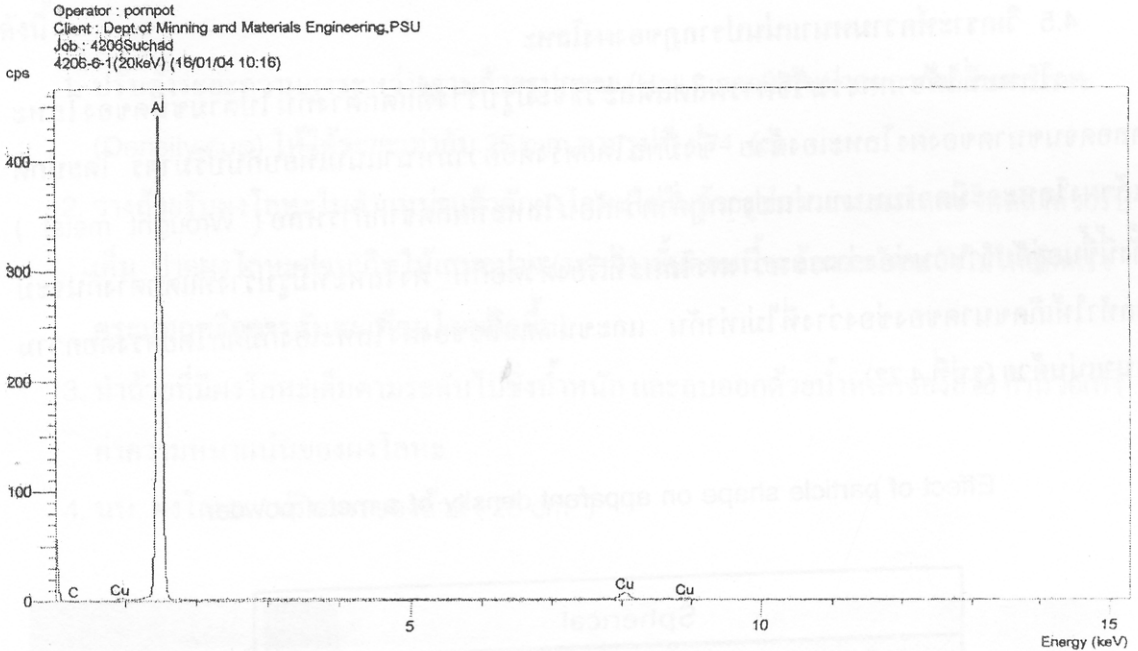
รูปที่ 4.68 ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ขึ้นตัวอย่างผงโลหะ Cu+Zn



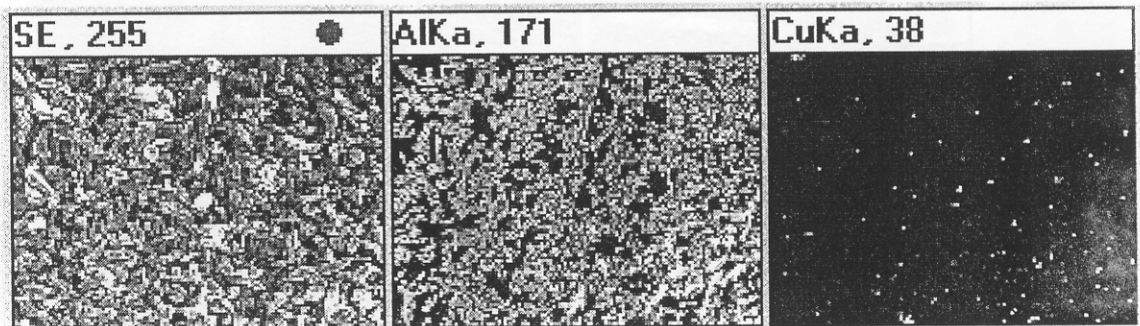
รูปที่ 4.69 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ขึ้นตัวอย่างผงโลหะ Cu+Zn



ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ซึ่ในตัวอย่างผงโลหะ Cu+Zn ธาตุที่ทำแผนภาพการกระจายตัวของธาตุคือ Cu และ Zn จะเห็นว่ามีการกระจายตัวของธาตุที่ตรวจพบกระจุกกระจายในเนื้อผงโลหะอย่างสม่ำเสมอ (รูปที่ 4.68-4.69)



รูปที่ 4.70 ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ซึ่ในตัวอย่างผงโลหะ Al+Cu



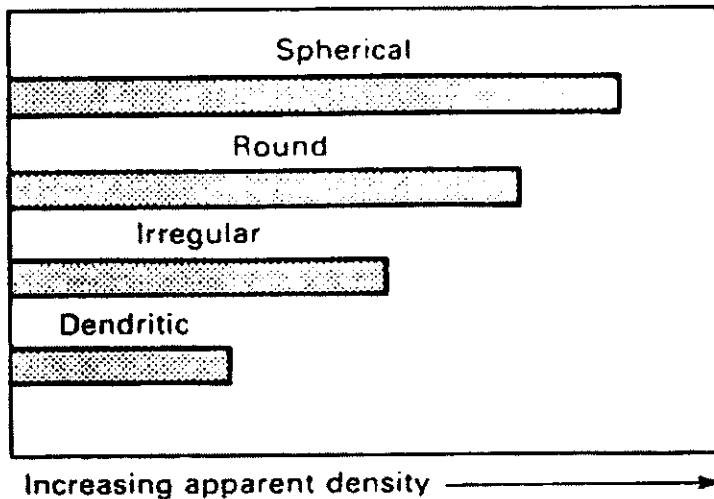
รูปที่ 4. 71 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ซึ่ในตัวอย่างผงโลหะ Al+Cu

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ขึ้นตัวอย่างผงโลหะ Al+Cu ธาตุที่ทำแผนภาพการกระจายของธาตุ Al และ Cu จะเห็นว่ามี การกระจายตัวของธาตุที่ตรวจพบกระจุกกระจายในเนื้อผงโลหะอย่างสม่ำเสมอเช่นเดียวกับที่เกิดในก้อนโลหะที่แข็งตัวในเบ้าง่าย (รูปที่ 4.70-4.71)

#### 4.5 วิเคราะห์ความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะ

ผงโลหะที่ได้จากกรรมวิธีการผลิตแต่ละวิธีจะมีรูปร่างที่แตกต่างกันไปตามชนิดของโลหะตลอดจนขนาดของผงโลหะเองด้วย ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความหนาแน่นเทียบกับปริมาตร โดยปกติแล้วผงโลหะจะมีความหนาแน่นปรากฏต่ำกว่าก้อนโลหะที่ผลิตจากการหล่อ ( Wrought metal ) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนช่องว่างระหว่างโลหะที่เรียงตัวต่อกัน ผงโลหะที่มีรูปร่างที่แตกต่างกันจะมีผลทำให้เกิดขนาดของช่องว่างที่ไม่เท่ากัน และขนาดเฉลี่ยของผงโลหะเองก็มีผลโดยตรงต่อความหนาแน่นด้วย (รูปที่ 4.72)

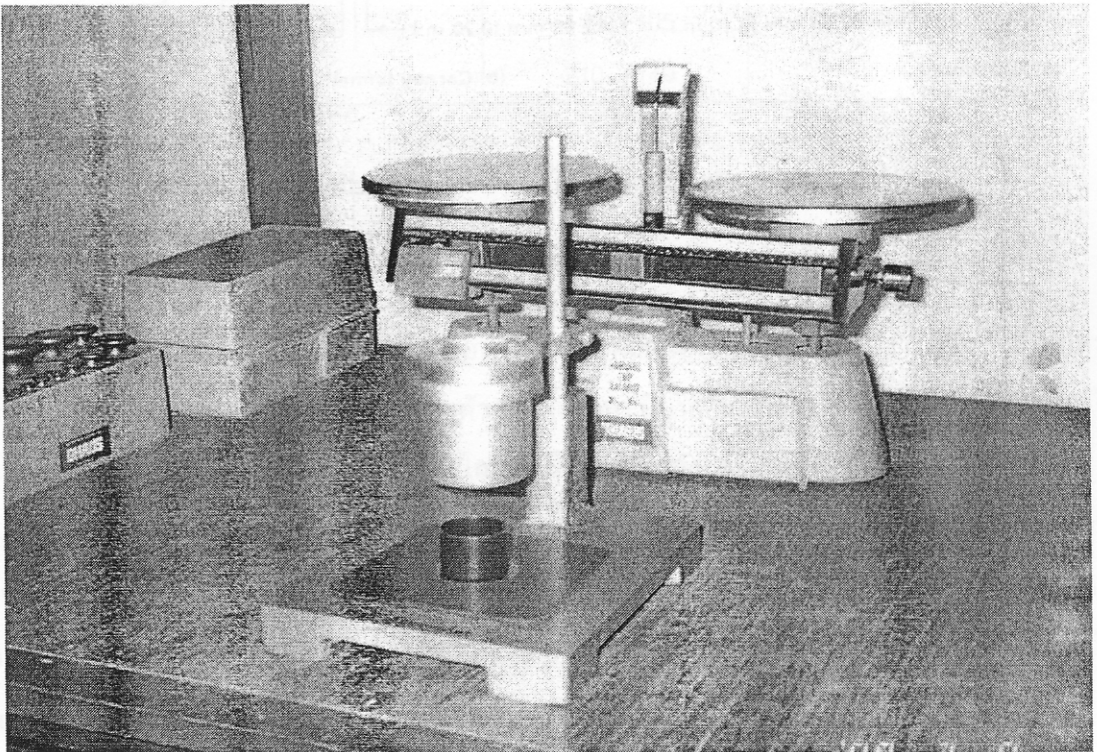
Effect of particle shape on apparent density of a metal powder



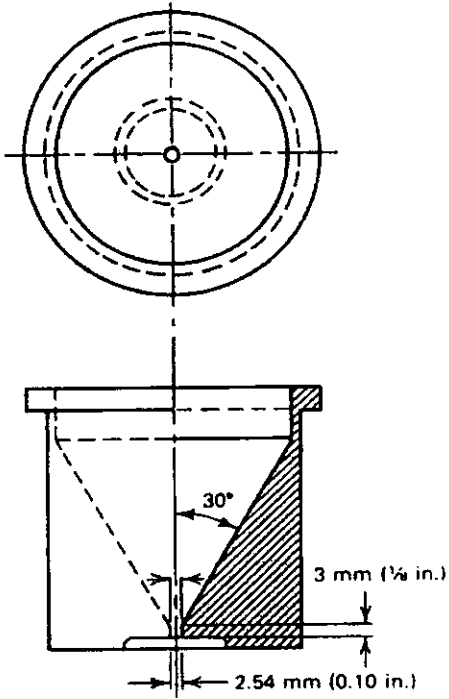
รูปที่ 4.72 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะที่เพิ่มขึ้นเทียบกับลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน (ASM, 1984)

การทดสอบเพื่อหาค่าความหนาแน่นปรากฏ ( Apparent Density ) ของผงโลหะในการทำวิจัยนี้ทำการวัดตามวิธีมาตรฐานของ ASTM B 212 และ MPIF 04 โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Hall flowmeter (รูปที่ 4.73) โดยมีวิธีการวัดค่าความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะตามขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

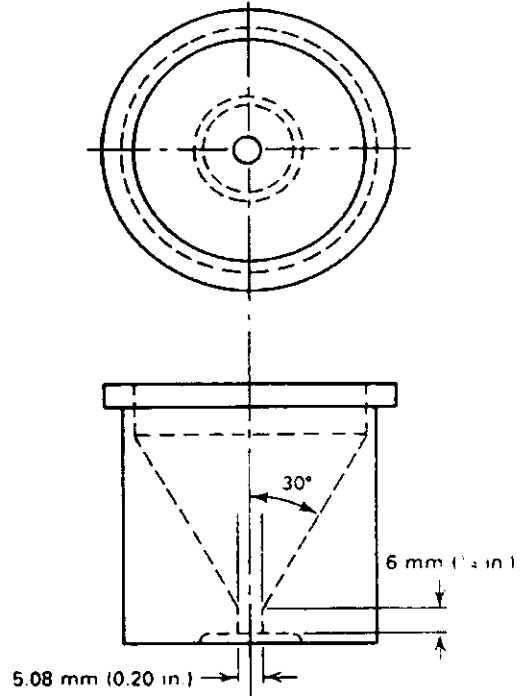
1. ปรับตั้งระยะความสูงระหว่างฐานด้วยรูปกรวย (Hall funnel) กับปากของถ้วยรับผงโลหะ (Density cup) ให้ได้ระยะเท่ากับ 25 mm ตามรูปที่ 4.74 (c)
2. วางถ้วยรับผงโลหะในตำแหน่งแล้วตักผงโลหะใส่ในถ้วยรูปกรวยจนผงโลหะไหลลงถ้วยรับเต็ม ปาดผงโลหะส่วนเกินให้เสมอปาก (ระหว่างขั้นตอนนี้จะต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดแรงกระแทกหรือการสั่นสะเทือนใดๆเกิดขึ้น)
3. นำถ้วยที่มีผงโลหะเต็มตามระดับไปชั่งน้ำหนัก และลบออกด้วยน้ำหนักของถ้วย คำนวณหาค่าความหนาแน่นของผงโลหะ
4. นน. ผงโลหะ / ปริมาตรของถ้วย ( 25 cm<sup>3</sup> )



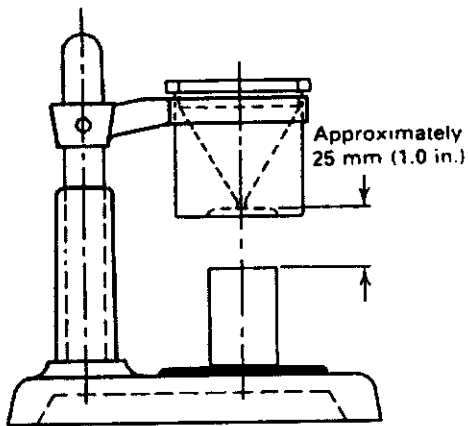
รูปที่ 4.73 Hall flow meter ที่สร้างขึ้นตามมาตรฐาน ASTM B 212



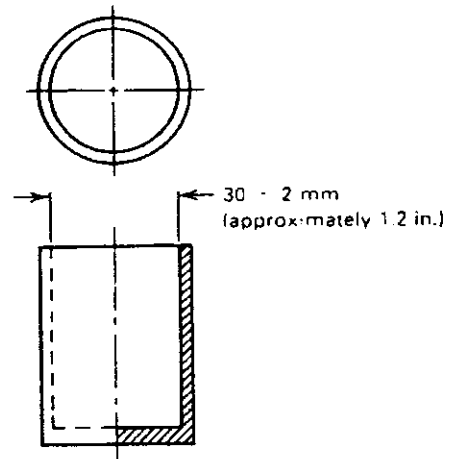
(a) Hall funnel



(b) Carney funnel



(c) Equipment assembly



(d) Density cup

รูปที่ 4.74 แสดงขนาดเครื่อง Hall flowmeter ตามมาตรฐาน ASTM B 212

(ASM, 1984)

ตารางที่ 4.25 ค่าความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะทองแดง ดีบุก และอะลูมิเนียมที่ได้จากการผลิต

Materials	Shape	Sieve Micron	Apparent Density (g / cm <sup>3</sup> )
Copper	Spherical	-53	4.95
		-47 +53	5.07
		-105 +74	5.12
		-149 +105	5.19
		-210 +149	5.36
Tin	Ligamental, Tear drop and Spherical	-53	3.87
		-47 +53	3.82
		-105 +74	3.78
		-149 +105	3.75
		-210 +149	3.64
Aluminum	Irregular, Tear drop and Flaky	-53	1.05
		-47 +53	1.03
		-105 +74	1.02
		-149 +105	1.05
		-210 +149	1.06

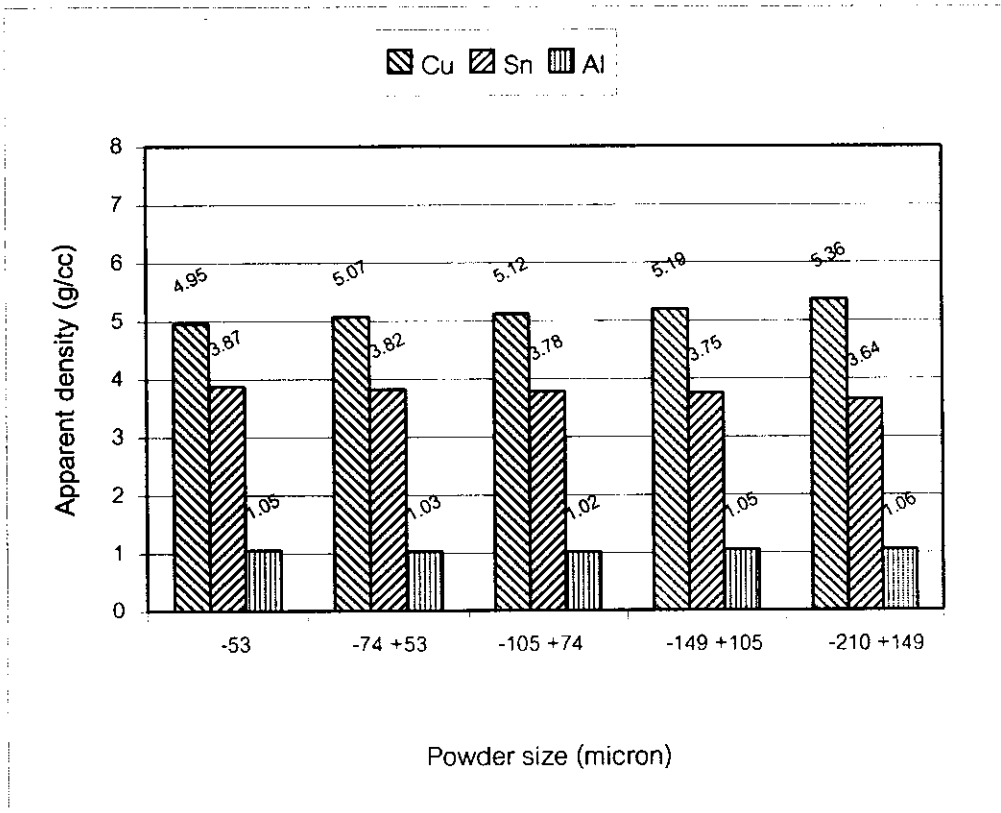
หมายเหตุ จากค่าความหนาแน่นปรากฏที่ทำการวัดได้ของโลหะทั้งสามชนิดตามตารางที่ 4.25 มีรายละเอียดที่น่าสังเกตดังนี้

- ผงโลหะทองแดง ลักษณะรูปร่างของผงโลหะที่ผลิตได้ทุกขนาดจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมมาก ซึ่งมีผลทำให้ค่าความอัดแน่นในการเรียงตัวของผงโลหะมีมาก จากค่าที่วัดได้ ผงโลหะที่มีขนาดโตกว่าจะมีความหนาแน่นปรากฏมากกว่าผงโลหะที่มีขนาดเล็กลง

- ผงโลหะดีบุก ลักษณะรูปร่างของโลหะที่ผลิตได้ส่วนใหญ่จะมีรูปร่างแบบ Ligamental โดยเฉพาะผงโลหะที่มีขนาดโตกว่า 74  $\mu\text{m}$  ส่วนผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า 74  $\mu\text{m}$  จากการตรวจสอบพบว่าส่วนใหญ่มีรูปร่างแบบ Tear drop และมีบ้างบางส่วนที่มีรูปร่างกลม จึงมีผลทำให้ผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า 74  $\mu\text{m}$  มีค่าความหนาแน่นปรากฏสูงกว่าเล็กน้อย

- ผงโลหะอะลูมิเนียม ลักษณะรูปร่างของโลหะที่ผลิตได้ส่วนใหญ่จะมีรูปร่างแบบ Ligamental และ Flaky เป็นส่วนมาก และมีเพียงเล็กน้อยที่มีรูปร่างค่อนข้างไปทาง Tear drop ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างมากในการเรียงตัวของผงโลหะ มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะที่รูปร่าง

แบบนี้มีค่าความหนาแน่นปรากฏค่อนข้างต่ำ คือต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นของโลหะที่ได้จากการหล่อ (Wrought metal) ส่วนผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า  $74 \mu\text{m}$  จากการตรวจสอบพบว่าส่วนใหญ่มีรูปร่างที่มีแนวโน้มจะเป็นแบบ Tear drop จึงมีผลทำให้ผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า  $74 \mu\text{m}$  มีค่าความหนาแน่นปรากฏสูงกว่าเล็กน้อย (รูปที่ 4.75 และตารางที่ 4.25)



รูปที่ 4.75 ความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะทองแดง ดีบุก และอะลูมิเนียมที่ผลิตได้

ตารางที่ 4.26 ค่าความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี 38 % ดีบุกผสมตะกั่ว 39 % และอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4 % ที่ผลิตได้

Materials	Shape	Sieve Micron	Apparent Density (g / cm <sup>3</sup> )
Copper alloy (Cu + Zn 38%)	Irregular and Flaky	-53	2.65
		-47 +53	2.61
		-105 +74	2.59
		-149 +105	2.58
		-210 +149	2.56
Tin alloy (Sn + Pb 39%)	Ligamental and Tear drop	-53	3.92
		-47 +53	3.87
		-105 +74	3.81
		-149 +105	3.79
		-210 +149	3.74
Aluminum alloy (Al + Cu 4%)	Tear drop and Ligamental	-53	1.07
		-47 +53	1.06
		-105 +74	1.05
		-149 +105	1.07
		-210 +149	1.08

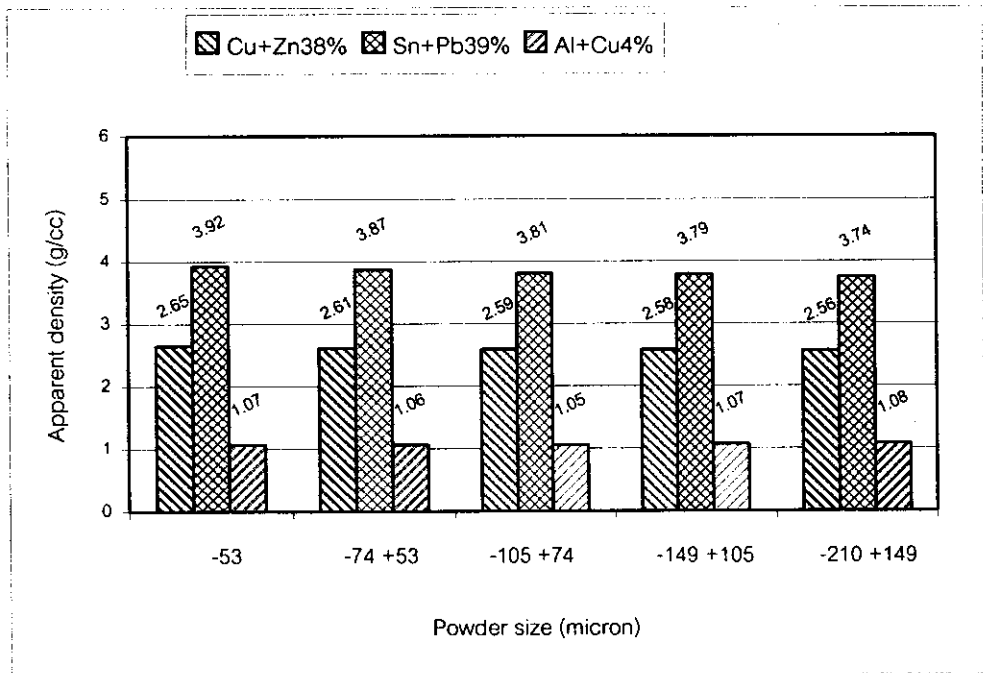
หมายเหตุ จากค่าความหนาแน่นปรากฏที่ทำการวัดได้ของโลหะผสมทั้งสามชนิดตามตารางที่ 4.26 มีรายละเอียดที่น่าสังเกตดังนี้

- ผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี 38 เปอร์เซ็นต์ (Brass) ลักษณะรูปร่างของผงโลหะที่ผลิตได้ส่วนมากจะมีรูปร่างเป็นแบบ Irregular และมีบางส่วนที่มีรูปร่างเป็นแบบ Flaky ซึ่งมีผลทำให้ค่าความอัดแน่นในการเรียงตัวของผงโลหะมีน้อย จากค่าที่วัดได้ ผงโลหะที่มีขนาดโตกว่าจะมีความหนาแน่นปรากฏน้อยกว่าผงโลหะที่มีขนาดเล็กลงทั้งนี้เนื่องจากการเรียงตัวของผงโลหะที่มีรูปร่างในลักษณะนี้มีโอกาสที่จะทำให้เกิดความไม่เป็นระเบียบขึ้นในการเรียงตัวต่อกันระหว่างผงโลหะด้วยกันเอง จึงมีผลทำให้ช่องว่างที่เกิดขึ้นมีจำนวนมาก โดยเฉพาะผงโลหะยังมีขนาดโตมากขึ้นเท่าใดจะยิ่งมีผลทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผงโลหะมากตามไปด้วย ในทางกลับกันเมื่อขนาดของผงโลหะมีขนาดเล็กลงและจากการตรวจสอบรูปร่างพบว่าขอบแหลมหรือเหลี่ยมของผงโลหะจะลดลง นั่นคือรูปร่างจะมีความโค้งมนมากขึ้นจึงมีผลทำให้ช่องว่างลดลง

- ผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว 39 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะรูปร่างของโลหะที่ผลิตได้ส่วนใหญ่จะมีรูปร่างแบบ Tear drop โดยเฉพาะผงโลหะที่มีขนาดโตกว่า 74  $\mu\text{m}$  ส่วนผงโลหะที่มีขนาดเล็ก

กว่า  $74 \mu\text{m}$  จากการตรวจสอบพบว่าส่วนใหญ่มีรูปร่างแบบ Ligamental จึงมีผลทำให้ผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า  $74 \mu\text{m}$  มีค่าความหนาแน่นปรากฏสูงกว่าเล็กน้อย

- ผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะรูปร่างของโลหะที่ผลิตได้ส่วนใหญ่จะมีรูปร่างแบบ Tear drop และมีบางส่วนที่มีรูปร่างค่อนข้างไปทาง Ligamental ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างมากในการเรียงตัวของผงโลหะ มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะที่รูปร่างแบบนี้มีค่าความหนาแน่นปรากฏค่อนข้างต่ำ คือต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นของโลหะที่ได้จากการหล่อ (Wrought metal) ส่วนผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า  $74 \mu\text{m}$  จากการตรวจสอบพบว่าส่วนใหญ่มีรูปร่างที่มีแนวโน้มจะเป็นแบบ Tear drop จึงมีผลทำให้ผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า  $74 \mu\text{m}$  มีค่าความหนาแน่นปรากฏสูงกว่าเล็กน้อย (รูปที่ 4.76 และตารางที่ 4.26)



รูปที่ 4.76 ความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี 38 % ดีบุกผสมตะกั่ว 39 % และอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4 % ที่ผลิตได้