

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(2)
Abstract	(3)
สารบัญ	(4)
รายการตาราง	(6)
รายการตารางผนวก	(8)
รายการรูป	(9)
รายการรูปผนวก	(15)
ตัวย่อและสัญลักษณ์	(16)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	6
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	6
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 กลไกการแตกตัวเป็นละอองของโลหะเหลว	8
2.2 ประเภทของหัวพ่นแก๊ส	11
2.3 การหลอมโลหะเพื่อใช้ในการผลิตผงโลหะ	15
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 ขั้นตอนการวิจัย การออกแบบและสร้างเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์	27
3.1 ออกแบบ และสร้างเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอน	27
3.1.1 ออกแบบและสร้างเครื่องจ่ายโลหะเหลว	28
3.1.2 ออกแบบและสร้างห้องพ่นโลหะเหลว	36
3.1.3 ออกแบบและสร้างเตาหลอมโลหะแบบเตาเบ้า	45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การทดสอบการทำงานของเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอน	48
วิธีการทดลอง	48
รายการทดลองการผลิตผงโลหะชนิดโลหะบริสุทธิ์	50
รายการทดลองการผลิตผงโลหะผสมชนิดต่าง ๆ	51
ข้อตกลงและเงื่อนไขในการทำวิจัย	52
ผลการทดลองการผลิตผงโลหะชนิดโลหะบริสุทธิ์	54
ผลการทดลองการผลิตผงโลหะผสมชนิดต่าง ๆ	60
4.1 อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อภาวะการทำงาน	66
4.2 วิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดผงโลหะ	80
4.3 วิเคราะห์รูปร่าง	100
4.4 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของธาตุผสม	106
4.5 วิเคราะห์ความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะที่ผลิตได้	125
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	132
5.1 สรุปผล	132
5.2 ข้อเสนอแนะ	135
บรรณานุกรม	137
ภาคผนวก	139
ค่าการกระจายตัวของผงโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการผลิต	140

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	สถิติการนำเข้าผงโลหะและโลหะเกล็ดบางประเภทจากต่างประเทศ	3
1.2	สถิติการนำเข้าผงโลหะของบริษัทเค เพา เคอร์ เมทัล จำกัด	4
2.1	ข้อดีและข้อเสียของหัวฉีดแบบ External mixing	12
2.2	ข้อดีและข้อเสียของลักษณะการจัดวางห้องพ่นโลหะเหลว	26
3.1	ภาวะที่ใช้ในการทดลองพ่นโลหะเหลวด้วยหัวฉีดแบบ Confined I	33
3.2	ภาวะที่ใช้ในการทดลองพ่นโลหะเหลวด้วยหัวฉีดแบบ Confined II	34
3.3	ภาวะที่ใช้ในการทดลองพ่นโลหะเหลวด้วยหัวฉีดแบบ Single jet nozzle	35
3.4	ภาวะที่ใช้ในการทดลองพ่นโลหะเหลวด้วยหัวฉีดแบบ Double jet nozzle	35
3.5	ภาวะที่ใช้ในการทดลองพ่นโลหะเหลวด้วยหัวฉีดแบบ Triple jet nozzle	36
3.6	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงโลหะที่ตกลงพื้นเทียบกับระยะทาง	41
3.7	ปริมาณผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า $53 \mu\text{m}$ ที่ถูกคูดอกจากห้องพ่น	43
3.8	ผลการทดลองถึงขีดแยกฝุ่นในการดักจับผงโลหะขนาดเล็ก	44
3.9	ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของเตาหลอมโลหะ	47
4.1	ค่าตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ที่กำหนด	49
4.2.1	รายการทดลองการผลิตผงโลหะชนิดโลหะบริสุทธิ์	50
4.2.2	รายการทดลองการผลิตผงโลหะผสมชนิดต่าง ๆ	51
4.3	ผลทดลองการผลิตผงโลหะบริสุทธิ์ที่กำหนดใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท = 50°C	54
4.4	ผลทดลองการผลิตผงโลหะบริสุทธิ์ที่กำหนดใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท = 100°C	56
4.5	ผลทดลองการผลิตผงโลหะบริสุทธิ์ที่กำหนดใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท = 150°C	58
4.6	ผลทดลองการผลิตผงโลหะผสมชนิดต่าง ๆ ที่กำหนดใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท = 50°C	60
4.7	ผลทดลองการผลิตผงโลหะผสมชนิดต่าง ๆ ที่กำหนดใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท = 100°C	62
4.8	ผลทดลองการผลิตผงโลหะผสมชนิดต่าง ๆ ที่กำหนดใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท = 150°C	64
4.9	ผลทดลองการผลิตผงโลหะบริสุทธิ์เมื่อควบคุมอัตราการไหลโลหะเหลวในปริมาณต่าง ๆ	69
4.10	ผลทดลองการผลิตผงโลหะผสมเมื่อควบคุมอัตราการไหลโลหะเหลวในปริมาณต่าง ๆ	71
4.11	ผลทดลองการผลิตผงโลหะบริสุทธิ์เมื่อควบคุมแรงดันแก๊สที่ใช้พ่นในระดับต่าง ๆ	73

รายการตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ผลทดลองการผลิตผงโลหะผสมเมื่อควบคุมแรงดันแก๊สที่ใช้พ่นในระดับต่าง ๆ	75
4.13 ผลทดลองการผลิตโลหะบริสุทธิ์ เมื่อควบคุมอัตราการไหลของโลหะเหลวที่น้อยสุด แรงดันอากาศสูงสุด เทียบกับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ระดับต่าง ๆ	77
4.14 ผลทดลองการผลิตโลหะผสม เมื่อควบคุมอัตราการไหลของโลหะเหลวที่น้อยสุด แรงดันอากาศสูงสุด เทียบกับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ระดับต่าง ๆ	79
4.15 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดง	81
4.16 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุก	83
4.17 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียม	85
4.18 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี	87
4.19 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว	89
4.20 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4 %	91
4.21 อัตราการไหลของโลหะเหลวชนิดต่าง ๆ	93
4.22 เปรียบเทียบขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการคัดแยกและการคำนวณ	96
4.23 อิทธิพลของแรงดันอากาศ และอุณหภูมิซูเปอร์ฮีท ที่มีผลต่อขนาด d_{50}	96
4.24 ผลการวิเคราะห์ธาตุผสมที่พบในผงโลหะและก้อนโลหะที่ผลิต	118
4.25 ค่าความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะบริสุทธิ์ที่ได้จากการผลิต	128
4.26 ค่าความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะผสมที่ได้จากการผลิต	130

รายการตารางภาคผนวก

ตารางผนวกที่	หน้า
ผ.1 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi	140
ผ.2 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi	142
ผ.3 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียม เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi	144
ผ.4 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียม เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi	146
ผ.5 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุก เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi	148
ผ.6 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุก เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi	150
ผ.7 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi	152
ผ.8 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi	154
ผ.9 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi	156
ผ.10 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi	158
ผ.11 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi	160
ผ.12 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi	162

รายการรูป

รูปที่	หน้า
1.1	2
1.2	2
1.3	3
2.1	10
2.2	11
2.3	11
2.4	13
2.5	15
2.6	16
2.7	22
2.8	24
2.9	24
2.10	25
3.1	28
3.2	29
3.3	29
3.4	30
3.5	31
3.6	31
3.7	32
3.8	32
3.9	33
3.10	34
3.11	37
3.12	38
3.13	40

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ลักษณะแนวการพุ่งของลมที่พ่นออกจากหัวฉีด	40
3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงโลหะที่ตกลงพื้นเทียบกับระยะทาง	41
3.16 ขนาดจริงที่ใช้สร้างห้องพ่นโลหะเหลว	42
3.17 ห้องพ่นโลหะเหลว (Atomizing chamber) ที่สร้างเสร็จแล้ว	43
3.18 ขนาดส่วนต่าง ๆ ของ Cyclone	44
3.19 ปริมาณผงโลหะที่ดักเก็บได้ในส่วนต่าง ๆ ของถังคัดแยก	45
3.20 แบบร่างเตาหลอมโลหะ Crucible	46
3.21 เตาหลอมโลหะ Crucible ที่สร้างเสร็จแล้ว	46
4.1 ผงโลหะอะลูมิเนียมที่ได้จากการผลิต อยู่ใน Atomizing chamber	53
4.2 ผงโลหะทองแดงผสมที่ได้จากการผลิต อยู่ใน Atomizing chamber	53
4.3 ปริมาณผงโลหะดีบุกที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 50°C	54
4.4 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 50°C	55
4.5 ปริมาณผงโลหะทองแดงที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 50°C	55
4.6 ปริมาณผงโลหะดีบุกที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 100°C	56
4.7 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 100°C	57
4.8 ปริมาณผงโลหะทองแดงที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 100°C	57
4.9 ปริมาณผงโลหะดีบุกที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 150°C	58
4.10 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 150°C	59
4.11 ปริมาณผงโลหะทองแดงที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 150°C	59
4.12 ปริมาณผงโลหะดีบุกผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 50°C	60
4.13 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 50°C	61
4.14 ปริมาณผงโลหะทองแดงผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 50°C	61
4.15 ปริมาณผงโลหะดีบุกผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 100°C	62
4.16 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 100°C	63
4.17 ปริมาณผงโลหะทองแดงผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 100°C	63
4.18 ปริมาณผงโลหะดีบุกผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 150°C	64

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 150°C	65
4.20 ปริมาณผงโลหะทองแดงผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 150°C	65
4.21 การแตกตัวเป็นละอองของอะลูมิเนียมเมื่อใช้หัวจ่าย Ø 2 mm	67
4.22 การแตกตัวเป็นละอองของอะลูมิเนียมเมื่อใช้หัวจ่าย Ø 3 mm	68
4.23 การแตกตัวเป็นละอองของอะลูมิเนียมเมื่อใช้หัวจ่าย Ø 4 mm	68
4.24 ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn, Al, Cu ที่ผลิตได้จากภาวะซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi เทียบกับหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ	70
4.25 ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn-alloy, Al-alloy, Cu-alloy ที่ผลิตได้จากภาวะซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi เทียบกับหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ	72
4.26 ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn, Al, Cu ที่ผลิตได้จากภาวะซูเปอร์ฮีท 150°C หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กที่สุด เทียบกับแรงดันอากาศระดับต่าง ๆ	74
4.27 ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn-alloy, Al-alloy, Cu-alloy ที่ผลิตได้จากภาวะซูเปอร์ฮีท 150°C หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กที่สุด เทียบกับแรงดันอากาศระดับต่าง ๆ	76
4.28 ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn, Al, Cu ที่ผลิตได้จากภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กที่สุด เทียบกับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ระดับต่าง ๆ	78
4.29 ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn-alloy, Al-alloy, Cu-alloy ที่ผลิตได้จากภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กที่สุด เทียบกับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ระดับต่าง ๆ	79
4.30 ค่าการกระจายตัวผงโลหะทองแดงทุกขนาด เมื่อใช้ภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กที่สุด อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด	82
4.31 ค่าการกระจายตัวผงโลหะดีบุกทุกขนาด เมื่อใช้ภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กที่สุด อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด	84
4.32 ค่าการกระจายตัวผงโลหะอะลูมิเนียมทุกขนาด เมื่อใช้ภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กที่สุด อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด	86

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33. ค่าการกระจายตัวผงโลหะทองแดงผสมสังกะสีทุกขนาด เมื่อใช้ภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กสุด อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด	88
4.34. ค่าการกระจายตัวผงโลหะดีบุกผสมตะกั่วทุกขนาด เมื่อใช้ภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กสุด อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด	90
4.35. ค่าการกระจายตัวผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดงทุกขนาด เมื่อใช้ภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กสุด อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด	92
4.36. ขนาดเฉลี่ย(d_{50})ผงโลหะทองแดง ทองแดงผสม เทียบกับแรงดันอากาศระดับต่าง ๆ	97
4.37. ขนาดเฉลี่ย(d_{50})ผงโลหะอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมผสม เทียบกับแรงดันอากาศระดับต่าง ๆ	97
4.38. ขนาดเฉลี่ย(d_{50})ผงโลหะดีบุก ดีบุกผสม เทียบกับแรงดันอากาศระดับต่าง ๆ	98
4.39. ขนาดเฉลี่ย(d_{50})ผงโลหะทองแดง ทองแดงผสม เทียบกับซูเปอร์ฮีทระดับต่าง ๆ	98
4.40. ขนาดเฉลี่ย(d_{50})ผงโลหะอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมผสม เทียบกับซูเปอร์ฮีทระดับต่าง ๆ	99
4.41. ขนาดเฉลี่ย(d_{50})ผงโลหะดีบุก ดีบุกผสม เทียบกับซูเปอร์ฮีทระดับต่าง ๆ	99
4.42. ลักษณะรูปร่างแบบต่าง ๆ ของผงวัสดุ	100
4.43. ชุดตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในการคัดขนาดผงโลหะชนิดต่าง ๆ	101
4.44. รูปร่างผงโลหะดีบุกขนาด $-53 \mu\text{m}$ (50 x)	102
4.45. รูปร่างผงโลหะดีบุกขนาด $-74 \mu\text{m}$ (100 x)	102
4.46. รูปร่างผงโลหะอะลูมิเนียมขนาด $-74 \mu\text{m}$ (50 x)	103
4.47. รูปร่างผงโลหะอะลูมิเนียมขนาด $-74 \mu\text{m}$ (100 x)	103
4.48. รูปร่างผงโลหะทองแดงขนาด $-74 \mu\text{m}$ (50 x)	103
4.49. รูปร่างผงโลหะทองแดงขนาด $-74 \mu\text{m}$ (100 x)	104
4.50. รูปร่างผงโลหะทองแดงผสมสังกะสีขนาด $-74 \mu\text{m}$ (50 x)	104
4.51. รูปร่างผงโลหะทองแดงผสมสังกะสีขนาด $-74 \mu\text{m}$ (100 x)	104
4.52. รูปร่างผงโลหะดีบุกผสมตะกั่วขนาด $-74 \mu\text{m}$ (50 x)	105
4.53. รูปร่างผงโลหะดีบุกผสมตะกั่วขนาด $-74 \mu\text{m}$ (100 x)	105

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.54 รูปร่างผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดงขนาด $-74 \mu\text{m}$ (100 x)	105
4.55 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะทองแดง (200 x)	106
4.56 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะทองแดง (500 x)	107
4.57 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะทองแดงที่แข็งตัวในเบ้า (500 x)	107
4.58 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะอะลูมิเนียม (200 x)	108
4.59 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะอะลูมิเนียม (500 x)	109
4.60 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะอะลูมิเนียมที่แข็งตัวในเบ้า (500 x)	109
4.61 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะดีบุก (200 x)	110
4.62 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะดีบุก (500 x)	111
4.63 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะดีบุกที่แข็งตัวในเบ้า (200 x)	111
4.64 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะดีบุกที่แข็งตัวในเบ้า (500 x)	112
4.65 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง (200 x)	112
4.66 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง (500 x)	113
4.67 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดงที่แข็งตัวในเบ้า (200 x)	113
4.68 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว (200 x)	114
4.69 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว (500 x)	114
4.70 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะดีบุกผสมตะกั่วที่แข็งตัวในเบ้า (200 x)	115
4.71 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะดีบุกผสมตะกั่วที่แข็งตัวในเบ้า (500 x)	115
4.72 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะทองเหลือง (200 x)	116
4.73 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะทองเหลือง (500 x)	116
4.74 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะทองเหลืองที่แข็งตัวในเบ้า (200 x)	117
4.75 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะทองเหลืองที่แข็งตัวในเบ้า (500 x)	117
4.76 ผลวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ก้อนโลหะตัวอย่าง Sn+Pb	119
4.77 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ก้อนโลหะตัวอย่าง Sn+Pb	119

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.78 ผลวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ผงโลหะตัวอย่าง Sn+Pb	120
4.79 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ผงโลหะตัวอย่าง Sn+Pb	120
4.80 ผลวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ก้อนโลหะตัวอย่าง Cu+Zn	101
4.81 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ก้อนโลหะตัวอย่าง Cu+Zn	101
4.82 ผลวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ผงโลหะตัวอย่าง Cu+Zn	122
4.83 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ผงโลหะตัวอย่าง Cu+Zn	122
4.84 ผลวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ก้อนโลหะตัวอย่าง Al+Cu	123
4.85 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ก้อนโลหะตัวอย่าง Al+Cu	123
4.86 ผลวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ผงโลหะตัวอย่าง Al+Cu	124
4.87 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ผงโลหะตัวอย่าง Al+Cu	124
4.88 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะที่เพิ่มขึ้นเทียบกับรูปร่าง	125
4.89 Hall flowmeter ที่สร้างขึ้นตามมาตรฐาน ASTM B 212	126
4.90 ขนาดเครื่อง Hall flowmeter ตามมาตรฐาน ASTM B 212	127
4.91 ความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะ Cu, Sn, Al ที่ผลิตได้	129
4.92 ความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะ Cu-alloy, Sn-alloy, Al-alloy ที่ผลิตได้	131

รายการรูปภาคผนวก

รูปผนวกที่

หน้า

ผ.1	การกระจายตัวของผงโลหะทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi	141
ผ.2	การกระจายตัวของผงโลหะทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi	143
ผ.3	การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียม เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi	145
ผ.4	การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียม เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi	147
ผ.5	การกระจายตัวของผงโลหะดีบุก เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi	149
ผ.6	การกระจายตัวของผงโลหะดีบุก เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi	151
ผ.7	การกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi	153
ผ.8	การกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi	155
ผ.9	การกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi	157
ผ.10	การกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi	159
ผ.11	การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi	161
ผ.12	การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi	163

ตัวย่อและสัญลักษณ์

P/M = Powder metallurgy

μm = ขนาดของผงโลหะ (ไมครอน)

T = อุณหภูมิเกินจุดหลอมของโลหะ (เซลเซียส)

d = ขนาดผ่านศูนย์กลางของลำโลหะเหลว (มิลลิเมตร)

P = แรงดันของอากาศที่ใช้พ่นโลหะเหลว (ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว)

d_{50} = ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะ (ไมครอน)

V = ความเร็วของลม (เมตร ต่อ วินาที)

F = แรงที่วัดได้ (กิโลกรัม)

γ = น้ำหนักจำเพาะของอากาศ (กิโลกรัม ต่อ ลูกบาศก์เมตร)

ρ = ความหนาแน่นของแก๊ส (กิโลกรัม ต่อ ลูกบาศก์เมตร)