สารบาญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบาญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการตารางผนวก	(10)
รายการรูป	(12)
รายการรูปผนวก	(18)
ตัวย่อและสัญลักษณ์	(20)
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	12
2.3 การหลอมโลหะเพื่อใช้ในการผลิตผงโลหะ	16
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 ขั้นตอนการวิจัย การออกแบบและสร้างเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์	29
3.1 ออกแบบ และสร้างเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอน	29
3.1.1 ออกแบบและสร้างเครื่องจ่ายโลหะเหลว	30
3.1.2 ออกแบบและสร้างห้องพ่นโลหะเหลว	38
3.1.3 ออกแบบและสร้างเตาหลอมโลหะแบบเตาเบ้า	48

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบการทำงานของเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอน	50
วิธีการทดลอง	50
รายการทดลองการผลิตผงโลหะชนิดโลหะบริสุทธิ์	52
รายการทดลองการผลิตผงโลหะผสมชนิดต่าง ๆ	53
ข้อตกลงและเงื่อนไขในการทำวิจัย	54
ผลการทดลองการผลิตผงโลหะชนิดโลหะบริสุทธิ์	56
ผลการทดลองการผลิตผงโลหะผสมชนิดต่าง ๆ	62
4.1 อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆที่มีผลต่อภาวะการทำงาน	68
4.2 วิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดผงโลหะ	82
4.3 วิเคราะห์รูปร่าง	103
4.4 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของธาตุผสม	109
4.5 วิเคราะห์ความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะที่ผลิตได้	128
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	135
5.1 สรุปผล	135
5.2 ข้อเสนอแนะ	138
บรรณานุกรม	140
ภาคผนวก	142
ค่าการกระจายตัวของผงโลหะชนิดต่าง ๆที่ได้จากการผลิต	143
ประวัติผู้เขียน	191
บทความที่นำเผยแพร่ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3 (MSAT)	192

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	สถิติการนำเข้าผงโลหะและโลหะเกล็ดบางประเภทจากต่างประเทศ	3
1.2	สถิติการนำเข้าผงโลหะของบริษัทเค เพา เดอร์ เมทัล จำกัด	4
2.1	ข้อดีและข้อเสียของหัวฉีดแบบ External mixing	13
2.2	ข้อดีและข้อเสียของลักษณะการจัดวางห้องพ่นโลหะเหลว	28
3.1	ภาวะที่ใช้ในการทดลองพ่นโลหะเหลวด้วยหัวฉีดแบบ Confined I	35
3.2	ภาวะที่ใช้ในการทดลองพ่นโลหะเหลวด้วยหัวฉีดแบบ Confined II	36
3.3	ภาวะที่ใช้ในการทดลองพ่นโลหะเหลวด้วยหัวฉีดแบบ Single jet nozzle	37
3.4	ภาวะที่ใช้ในการทดลองพ่นโลหะเหลวด้วยหัวฉีดแบบ Double jet nozzle	37
3.5	ภาวะที่ใช้ในการทดลองพ่นโลหะเหลวด้วยหัวฉีดแบบ Triple jet nozzle	38
3.6	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงโลหะที่ตกลงพื้นเทียบกับระทาง	43
3.7	ปริมาณผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า 53 μm ที่ถูกดูดออกจากห้องพ่น	46
3.8	ผลการทดลองถังคัดแยกฝุ่นในการดักจับผงโลหะขนาดเล็ก	47
3.9	ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของเตาหลอมโลหะ	49
4.1	ค่าตัวแปรควบคุมต่าง ๆที่กำหนด	51
4.2.1	รายการทดลองการผลิตผงโลหะชนิดโลหะบริสุทธิ์	52
4.2.2	รายการทดลองการผลิตผงโลหะผสมชนิดต่าง ๆ	53
4.3	ผลทดลองการผลิตผงโลหะบริสุทธิ์ที่กำหนดใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท= 50°C	56
4.4	ผลทดลองการผลิตผงโลหะบริสุทธิ์ที่กำหนดใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท= 100°C	58
4.5	ผลทดลองการผลิตผงโลหะบริสุทธิ์ที่กำหนดใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท= 150°C	60
4.6	ผลทดลองการผลิตผงโลหะผสมชนิดต่าง ๆที่กำหนดใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท= 50°C	62
4.7	ผลทดลองการผลิตผงโลหะผสมชนิดต่าง ๆที่กำหนดใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท= 100°C	64
4.8	ผลทดลองการผลิตผงโลหะผสมชนิดต่าง ๆที่กำหนดใช้อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท= 150°C	66
4.9	ผลทดลองการผลิตผงโลหะบริสุทธิ์เมื่อควบคุมอัตราการไหลโลหะเหลวในปริมาณต่าง ๆ	71
4.10	ผลทดลองการผลิตผงโลหะผสมเมื่อควบคุมอัตราการไหลโลหะเหลวในปริมาณต่างๆ	73
4.11	ผลทดลองการผลิตผงโลหะบริสุทธิ์เมื่อควบคุมแรงดันแก๊สที่ใช้พ่นในระดับต่าง ๆ	75

รายการตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.12	ผลทดลองการผลิตผงโลหะผสมเมื่อควบคุมแรงดันแก๊สที่ใช้พ่นในระดับต่าง ๆ	77
4.13	ผลทดลองการผลิตโลหะบริสุทธิ์ เมื่อควบคุมอัตราการไหลของโลหะเหลวน้อยสุด แรงดันอากาศสูงสุด เทียบกับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ระดับต่าง ๆ	79
4.14	ผลทดลองการผลิตโลหะผสม เมื่อควบคุมอัตราการไหลของโลหะเหลวน้อยสุด แรงดันอากาศสูงสุด เทียบกับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ระดับต่าง ๆ	81
4.15	การกระจายตัวของผงโลหะทองแดง	83
4.16	การกระจายตัวของผงโลหะดีบุก	85
4.17	การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียม	87
4.18	การกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี	89
4.19	การกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว	91
4.20	การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง 4 %	93
4.21	อัตราการไหลของโลหะเหลวชนิดต่าง ๆ	95
4.22	เปรียบเทียบขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการคัดแยกและการคำนวณ	98
4.23	อิทธิพลของแรงดันอากาศ และอุณหภูมิซูเปอร์ฮีท ที่มีผลต่อขนาด d_{50}	99
4.24	ผลการวิเคราะห์ธาตุผสมที่พบในผงโลหะและก้อนโลหะที่ผลิต	121
4.25	ค่าความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะบริสุทธิ์ที่ได้จากการผลิต	131
4.26	ค่าความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะผสมที่ได้จากการผลิต	133

รายการตารางผนวก

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ผ.1 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 50°C แรงดัน 140 psi 143

ผ.2 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 100°C แรงดัน 140 psi 145

ผ.3 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi 147

ผ.4 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi 149

ผ.5 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียม เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 50°C แรงดัน 140 psi 151

ผ.6 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียม เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 100°C แรงดัน 140 psi 153

ผ.7 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียม เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi 155

ผ.8 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียม เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi 157

ผ.9 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุก เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 50°C แรงดัน 140 psi 159

ผ.10 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุก เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 100°C แรงดัน 140 psi 161

ผ.11 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุก เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi 163

ผ.12 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุก เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi 165

ผ.13 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 50°C แรงดัน 140 psi 167

ผ.14 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 100°C แรงดัน 140 psi 169

ผ.15 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi 171

ผ.16 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi 173

ผ.17 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 50°C แรงดัน140 psi 175

ผ.18 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท100°C แรงดัน140 psi 177

ผ.19 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน120 psi 179

ผ.20 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน100 psi 181

ผ.21 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 50°C แรงดัน 140 psi 183

รายการตารางผนวก(ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ผ.22 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 100°C แรงดัน 140 psi	185
ผ.23 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi	187
ผ.24 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi	189

รายการรูป

รูปที่		หน้า
1.1	น้ำหนักชิ้นส่วนที่ผลิตจากผงโลหะที่ใช้ในรถยนต์ 1 คัน	2
1.2	ปริมาณการผลิตผงเหล็กในทวีปอเมริกาเหนือ	2
1.3	ปริมาณการผลิตสัมพัทธ์ของผงโลหะชนิดต่าง ๆ	3
2.1	กลไกการแตกตัวของโลหะเหลวด้วยวิธี Atomization	10
2.2	Secondary breakup ของหยดโลหะเหลว	11
2.3	ลักษณะหัวฉีดแบบ Free-fall และ Confined	12
2.4	ตัวอย่างลักษณะต่าง ๆของหัวฉีดที่มีการออกแบบไว้	14
2.5	เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ	16
2.6	เตาหลอมโลหะแบบเตาเบ้า	17
2.7	ลักษณะของขั้นตอนการแตกกระจายของแผ่นโลหะหลอม	22
2.8	เครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอนแบบดึงโลหะเหลวขึ้นจากด้านล่าง	25
2.9	เครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอนแบบปล่อยโลหะเหลวลงจากด้านบน	26
2.10	เครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวตั้ง	27
3.1	แบบร่างแสดงส่วนประกอบต่าง ๆของ Tundish	30
3.2	แสดงการจัดวางอิฐฉนวนและชุดลวดความร้อนของ Tundish	31
3.3	Tundish ที่ดำเนินการสร้างเสร็จแล้ว	31
3.4	Confined (closed) nozzle ลักษณะที่ 1	32
3.5	Confined (closed) nozzle ลักษณะที่ 2	33
3.6	หัวฉีดแบบ Single jet nozzle	33
3.7	หัวฉีดแบบ Double jet nozzle	34
3.8	หัวฉีดแบบ Triple jet nozzle	34
3.9	ลักษณะภายในของ Confined (closed) nozzle I	35
3.10	ลักษณะภายในของ Confined (closed) nozzle II	36
3.11	แบบร่างเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอน	39
3.12	การวัดค่าแรงลมที่พุ่งออกจากหัวฉีด	40
3.13	การทดสอบหาลักษณะการพุ่งของลมที่ออกจากหัวฉีดด้วยการใช้ควัน	42

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ลักษณะแนวการพุ่งของลมที่พ่นออกจากหัวฉีด	42
3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงโลหะที่ตกลงพื้นเทียบกับระยะทาง	43
3.16 ขนาดจริงที่ใช้สร้างห้องพ่นโลหะเหลว	44
3.17 ห้องพ่นโลหะเหลว (Atomizing chamber) ที่สร้างเสร็จแล้ว	45
3.18 ขนาดส่วนต่าง ๆของ Cyclone	46
3.19 ปริมาณผงโลหะที่ดักเก็บได้ในส่วนต่าง ๆของถังคัดแยก	47
3.20 แบบร่างเตาหลอมโลหะ Crucible	48
3.21 เตาหลอมโลหะ Crucible ที่สร้างเสร็จแล้ว	49
4.1 ผงโลหะอะลูมิเนียมที่ได้จากการผลิต อยู่ภายใน Atomizing chamber	55
4.2 ผงโลหะทองแดงผสมที่ได้จากการผลิต อยู่ภายใน Atomizing chamber	55
4.3 ปริมาณผงโลหะดีบุกที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 50°C	56
4.4 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 50°C	57
4.5 ปริมาณผงโลหะทองแดงที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 50°C	57
4.6 ปริมาณผงโลหะดีบุกที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 100°C	58
4.7 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 100°C	59
4.8 ปริมาณผงโลหะทองแดงที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 100°C	59
4.9 ปริมาณผงโลหะดีบุกที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 150°C	60
4.10 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 150°C	61
4.11 ปริมาณผงโลหะทองแดงที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 150°C	61
4.12 ปริมาณผงโลหะดีบุกผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 50°C	62
4.13 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 50°C	63
4.14 ปริมาณผงโลหะทองแดงผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 50°C	63
4.15 ปริมาณผงโลหะดีบุกผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 100°C	64
4.16 ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 100°C	65
4.17 ปริมาณผงโลหะทองแดงผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 100°C	65
4.18 ปริมาณผงโลหะดีบุกผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 150°C	66

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.19	ปริมาณผงโลหะอะลูมิเนียมผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 150°C	67
4.20	ปริมาณผงโลหะทองแดงผสม ที่ได้จากการใช้ค่าแรงดันต่าง ๆ ซูเปอร์ฮีท 150°C	67
4.21	การแตกตัวเป็นละอองของอะลูมิเนียมเมื่อใช้หัวจ่าย ∅ 2 mm	69
4.22	การแตกตัวเป็นละอองของอะลูมิเนียมเมื่อใช้หัวจ่าย ∅ 3 mm	70
4.23	การแตกตัวเป็นละอองของอะลูมิเนียมเมื่อใช้หัวจ่าย ∅ 4 mm	70
4.24	ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn, Al, Cu ที่ผลิตได้จากภาวะซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi เทียบกับหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ	72
4.25	ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn-alloy, Al-alloy, Cu-alloy ที่ผลิตได้จากภาวะซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดันอากาศสูงสุด 140 psi เทียบกับหัวจ่ายโลหะเหลวขนาดต่าง ๆ	74
4.26	ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn, Al, Cu ที่ผลิตได้จากภาวะซูเปอร์ฮีท 150°C หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กสุด เทียบกับแรงดันอากาศระดับต่าง ๆ	76
4.27	ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn-alloy, Al-alloy, Cu-alloy ที่ผลิตได้จากภาวะซูเปอร์ฮีท 150°C หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กสุด เทียบกับแรงดันอากาศระดับต่าง ๆ	78
4.28	ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn, Al, Cu ที่ผลิตได้จากภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กสุด เทียบกับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ระดับต่าง ๆ	80
4.29	ความสัมพันธ์ของปริมาณผงโลหะ Sn-alloy, Al-alloy, Cu-alloy ที่ผลิตได้จากภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กสุด เทียบกับอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ระดับต่าง ๆ	81
4.30	ค่าการกระจายตัวผงโลหะทองแดงทุกขนาด เมื่อใช้ภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กสุด อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด	84
4.31	ค่าการกระจายตัวผงโลหะดีบุกทุกขนาด เมื่อใช้ภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กสุด อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด	86
4.32	ค่าการกระจายตัวผงโลหะอะลูมิเนียมทุกขนาด เมื่อใช้ภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กสุด อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด	88

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 ค่าการกระจายตัวผงโลหะทองแดงผสมสังกะสีทุกขนาด เมื่อใช้ภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กสุด อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด	90
4.34 ค่าการกระจายตัวผงโลหะดีบุกผสมตะกั่วทุกขนาด เมื่อใช้ภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กสุด อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด	92
4.35 ค่าการกระจายตัวผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดงทุกขนาด เมื่อใช้ภาวะแรงดันอากาศสูงสุด หัวจ่ายโลหะเหลวเล็กสุด อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงสุด	94
4.36 ขนาดเฉลี่ย(d_{50})ผงโลหะทองแดง ทองแดงผสม เทียบกับแรงดันอากาศระดับต่าง ๆ	95
4.37 ขนาดเฉลี่ย(d_{50})ผงโลหะอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมผสม เทียบกับแรงดันอากาศระดับต่าง ๆ	96
4.38 ขนาดเฉลี่ย(d_{50})ผงโลหะดีบุก ดีบุกผสม เทียบกับแรงดันอากาศระดับต่าง ๆ	96
4.39 ขนาดเฉลี่ย(d_{50})ผงโลหะทองแดง ทองแดงผสม เทียบกับซูเปอร์ฮีทระดับต่าง ๆ	97
4.40 ขนาดเฉลี่ย(d_{50})ผงโลหะอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมผสม เทียบกับซูเปอร์ฮีทระดับต่าง ๆ	97
4.41 ขนาดเฉลี่ย(d_{50})ผงโลหะดีบุก ดีบุกผสม เทียบกับซูเปอร์ฮีทระดับต่าง ๆ	98
4.42 ลักษณะรูปร่างแบบต่าง ๆของผงวัสดุ	103
4.43 ชุดตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในการคัดขนาดผงโลหะชนิดต่าง ๆ	104
4.44 รูปร่างผงโลหะดีบุกขนาด –53 μm (50 x)	105
4.45 รูปร่างผงโลหะดีบุกขนาด –74 μm (100 x)	105
4.46 รูปร่างผงโลหะอะลูมิเนียมขนาด –74 μm (50 x)	105
4.47 รูปร่างผงโลหะอะลูมิเนียมขนาด –74 μm (100 x)	106
4.48 รูปร่างผงโลหะทองแดงขนาด –74 μm (50 x)	106
4.49 รูปร่างผงโลหะทองแดงขนาด –74 μm (100 x)	106
4.50 รูปร่างผงโลหะทองแดงผสมสังกะสีขนาด –74 μm (50 x)	107
4.51 รูปร่างผงโลหะทองแดงผสมสังกะสีขนาด –74 μm (100 x)	107
4.52 รูปร่างผงโลหะดีบุกผสมตะกั่วขนาด –74 μm (50 x)	107
4.53 รูปร่างผงโลหะดีบุกผสมตะกั่วขนาด –74 μm (100 x)	108

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.54 รูปร่างผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดงขนาด –74 μm (100 x)	108
4.55 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะทองแดง (200 x)	109
4.56 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะทองแดง (500 x)	110
4.57 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะทองแดงที่แข็งตัวในเบ้า (500 x)	110
4.58 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะอะลูมิเนียม (200 x)	111
4.59 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะอะลูมิเนียม (500 x)	112
4.60 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะอะลูมิเนียมที่แข็งตัวในเบ้า (500 x)	112
4.61 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะดีบุก (200 x)	113
4.62 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะดีบุก (500 x)	114
4.63 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะดีบุกที่แข็งตัวในเบ้า (200 x)	114
4.64 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะดีบุกที่แข็งตัวในเบ้า (500 x)	115
4.65 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง (200 x)	115
4.66 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง (500 x)	116
4.67 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดงที่แข็งตัวในเบ้า (200 x)	116
4.68 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว (200 x)	117
4.69 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว (500 x)	117
4.70 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะดีบุกผสมตะกั่วที่แข็งตัวในเบ้า (200 x)	118
4.71 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะดีบุกผสมตะกั่วที่แข็งตัวในเบ้า (500 x)	118
4.72 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะทองเหลือง (200 x)	119
4.73 โครงสร้างจุลภาคผงโลหะทองเหลือง (500 x)	119
4.74 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะทองเหลืองที่แข็งตัวในเบ้า (200 x)	120
4.75 โครงสร้างจุลภาคก้อนโลหะทองเหลืองที่แข็งตัวในเบ้า (500 x)	120
4.76 ผลวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ก้อนโลหะตัวอย่าง Sn+Pb	122
4.77 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ก้อนโลหะตัวอย่าง Sn+Pb	122

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.78 ผลวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ผงโลหะตัวอย่าง Sn+Pb	123
4.79 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ผงโลหะตัวอย่าง Sn+Pb	123
4.80 ผลวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ก้อนโลหะตัวอย่าง Cu+Zn	124
4.81 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ก้อนโลหะตัวอย่าง Cu+Zn	124
4.82 ผลวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ผง'โลหะตัวอย่าง Cu+Zn	125
4.83 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ผงโลหะตัวอย่าง Cu+Zn	125
4.84 ผลวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ก้อนโลหะตัวอย่าง Al+Cu	126
4.85 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ก้อนโลหะตัวอย่าง Al+Cu	126
4.86 ผลวิเคราะห์ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ ผงโลหะตัวอย่าง Al+Cu	127
4.87 แผนภาพการกระจายตัวของธาตุ ผงโลหะตัวอย่าง Al+Cu	127
4.88 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะที่เพิ่มขึ้นเทียบกับรูปร่าง	128
4.89 Hall flowmeter ที่สร้างขึ้นตามมาตรฐาน ASTM B 212	129
4.90 ขนาดเครื่อง Hall flowmeter ตามมาตรฐาน ASTM B 212	130
4.91 ความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะ Cu, Sn, Al ที่ผลิตได้	132
4.92 ความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะ Cu-alloy, Sn-alloy, Al-alloy ที่ผลิตได้	134

รายการรูปผนวก

รูปผนวกที่ **หน้า**

ผ.1 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 50°C แรงดัน 140 psi 144

ผ.2 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 100°C แรงดัน 140 psi 146

ผ.3 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi 148

ผ.4 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi 150

ผ.5 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียม เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 50°C แรงดัน 140 psi 152

ผ.6 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียม เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 100°C แรงดัน 140 psi 154

ผ.7 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียม เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi 156

ผ.8 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียม เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi 158

ผ.9 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุก เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 50°C แรงดัน 140 psi 160

ผ.10 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุก เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 100°C แรงดัน 140 psi 162

ผ.11 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุก เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi 164

ผ.12 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุก เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi 166

ผ.13 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 50°C แรงดัน 140 psi 168

ผ.14 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 100°C แรงดัน 140 psi 170

ผ.15 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi 172

ผ.16 การกระจายตัวของผงโลหะทองแดงผสมสังกะสี เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi 174

ผ.17 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 50°C แรงดัน140 psi 176

ผ.18 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท100°C แรงดัน140 psi 178

ผ.19 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน120 psi 180

ผ.20 การกระจายตัวของผงโลหะดีบุกผสมตะกั่ว เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน100 psi 182

ผ.21 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 50°C แรงดัน 140 psi 184

รายการรูปผนวก(ต่อ)

รูปผนวกที่ **หน้า**

ผ.22 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 100°C แรงดัน 140 psi 186

ผ.23 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 120 psi 188

ผ.24 การกระจายตัวของผงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เมื่อใช้ซูเปอร์ฮีท 150°C แรงดัน 100 psi 190

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)