

การผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ

PRODUCTION OF 925 STERLING SILVER POWDER BY GAS
ATOMIZATION PROCESS

มนตรี ขาวสุข

คุณิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาคุษิบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ

มนตรี ขาวสุข

คุณูปการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วย
ก๊าซ

Production of 925 Sterling Silver Powder by Gas Atomization
Process

ชื่อ - นามสกุล

นายมนตรี ขาวสุข

สาขาวิชา

วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมอุตสาหการ)

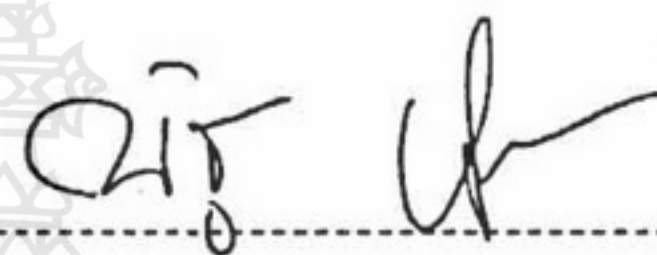
อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.

ปีการศึกษา

2567

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



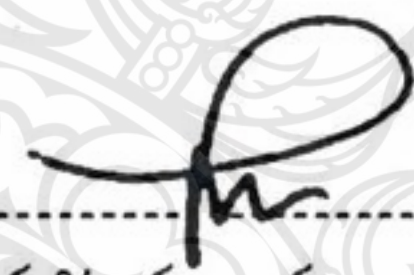
ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐพล ชมแสง, ป.ด.)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มีมนต์, Ph.D.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พันธุ์พงษ์ คงพันธุ์, Ph.D.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณิตพลกรัง, D.Eng.)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีดิ์, Ph.D.)

วันที่ 9 เดือน กันยายน พ.ศ. 2567

หัวข้อขุณิพนธ์	การผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ
ชื่อ-นามสกุล	นายมนตรี ชาวสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมอุตสาหการ)
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของหัวพ่นก๊าซชนิด Close-Couple Nozzle ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกัน 2 รูปแบบที่มีผลต่อปริมาณผลผลิต ลักษณะรูปร่าง ขนาด การกระจายตัวของขนาดอนุภาคโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผลิตด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ และผ่านการร่อนคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร

หัวพ่นก๊าซที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยรูปแบบที่ 1 หัวพ่นก๊าซแบบรูปปล่อยก๊าซรูเดียว ต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะและรูปแบบที่ 2 หัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ มีตัวแปรทดลองอุณหภูมิน้ำโลหะหลอมเหลว 1060, 1160 และ 1260 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของก๊าซ 400, 500 และ 600 ลิตรต่อนาที โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวกลาง

จากผลการทดลอง พบว่า กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซของหัวพ่นแบบที่ 1 มีประสิทธิภาพดีกว่าหัวพ่นแบบที่ 2 โดยที่ให้ปริมาณผลผลิตมีค่าเท่ากับร้อยละ 36.5 และ 30.2 ตามลำดับ ลักษณะรูปร่างของอนุภาคเป็นทรงกลมเช่นเดียวกัน ขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน ให้ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบกว่า อุณหภูมิน้ำโลหะและอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ได้ปริมาณผลผลิตเพิ่มขึ้น ค่าความกลมเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคเล็กลง การกระจายตัวของอนุภาคแคบลง ผงโลหะที่ผลิตได้สามารถอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบได้ และหลอมรวมติดกันได้ดีจากการหลอมด้วยเลเซอร์

คำสำคัญ : อะตอมไมเซชัน หัวพ่นก๊าซ อุณหภูมิน้ำโลหะ อัตราการไหลของก๊าซ ลักษณะรูปร่างอนุภาค
พื้นผิวอนุภาค โครงสร้างจุลภาค

Dissertation Title Production of 925 Sterling Silver Powder by Gas Atomization Process

Name - Surname Mr. Montri Kawsuk

Program Engineering (Industrial Engineering)

Dissertation Advisor Associate Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.

Academic Year 2024

ABSTRACT

This research aimed to study the influence of two different types of Close-Couple Nozzle gas on the yield, shape, size, and particle size distribution of 925 sterling silver produced by the gas atomization process and separated by a 50- μm screen.

The gas nozzles used in the experiment consisted of Model 1, a single-hole gas nozzle continuously around the end of the metal tube, and Model 2, a multi-hole gas nozzle around the end of the metal tube. The experimental variables were the molten metal temperature of 1060, 1160 and 1260 °C, the gas flow rate of 400, 500 and 600 L/min, and nitrogen gas was used as the medium.

The experimental results showed that the gas atomization process of nozzle type 1 was more efficient than nozzle type 2, with the yield values of 36.5 and 30.2%, respectively. The shape of the particles was spherical, with similar particle sizes, resulting in a narrower particle size distribution. The increased metal slurry temperature and gas flow rate resulted in higher yield, higher roundness, smaller particle size, and narrower particle distribution. The produced metal powders could be compressed into test pieces and were well fused together by laser melting.

Keywords: atomization, gas nozzle, molten metal temperature, gas flow rate, particle morphology, particle surface, microstructure

กิตติกรรมประกาศ

การทำดุขุณินพนธ์เรื่องการผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากผู้จัดทำได้รับคำแนะนำจากคณาจารย์ ที่คอยชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาขณะที่ได้ทำการจัดทำโครงการ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาดุขุณินพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ วรรณศรี อาจารย์ที่ปรึกษาดุขุณินพนธ์ที่คอยควบคุมการจัดทำดุขุณินพนธ์ให้สามารถดำเนินการไปได้จนแล้วเสร็จ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา บุคลากรทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์เครื่องทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพทำให้ดุขุณินพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวทั้งหมดที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จที่คอยให้การสนับสนุนและให้กำลังใจ ตลอดจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี



มนตรี ชาวสุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญรูป.....	(8)
สารบัญตาราง.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	15
1.3 สมมุติฐานงานวิจัย.....	15
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	16
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	17
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	18
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.1 กรรมวิธีการผลิตผงโลหะ.....	19
2.2 การทำให้น้ำโลหะเหลวแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะและผงโลหะ.....	24
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อรูปร่าง ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผง.....	27
2.4 โลหะเงินผสมสเตอร์ลิง[34].....	31
2.5 การตรวจสอบลักษณะจำเพาะของผงโลหะ.....	34
2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	42
2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทาง Image J.....	45
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	50
3.1 วัสดุ และวัสดุสิ้นเปลืองที่ใช้สำหรับการทดลองศึกษาวิจัย.....	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการดำเนินการทดลองศึกษาวิจัยผลิตผงโลหะ.....	53
3.3 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ตรวจสอบต่างๆ ที่ใช้สำหรับการดำเนินการศึกษาวิจัย.....	61
3.4 ขั้นตอนการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925.....	67
3.5 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลขนาด ความแปรปรวน ขนาดและการกระจายตัว โลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ได้จากการทดลองไปตุ้โครงสร้างจุลภาค.....	70
บทที่ 4 ผลการทดลองหัวพ่นก๊าซแบบ Close-Coupled Nozzle 1.....	72
4.1 ผลการทดลองผลิตโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยหัวพ่นแบบที่ 1	72
4.2 ผลการทดลองผลิตโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยหัวพ่นแบบที่ 2.....	88
4.3 อภิปรายเปรียบเทียบผลการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตรที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่น 2 รูปแบบ.....	99
4.4 อภิปรายผลการทดลองขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยหัวพ่นก๊าซที่มีลักษณะแตกต่างกัน 2 รูปแบบ.....	105
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	106
5.1 ผลการศึกษาวิจัย.....	107
5.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	108
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	108
บรรณานุกรม.....	110
ภาคผนวก.....	121
ภาคผนวก ก ปริมาณ ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะหัวพ่นแบบที่ 1.....	122
ภาคผนวก ข ปริมาณ ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะหัวพ่นแบบที่ 2.....	134
ภาคผนวก ค วารสารทางวิชาการและบทความการประชุมวิชาการ.....	146
ประวัติผู้เขียน.....	151

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ลักษณะการออกแบบหัวพ่นที่ใช้สำหรับการทดลองผลิตผงโลหะ	
จากการศึกษาของสมหมายและคณะ[4].....	16
รูปที่ 1.2 น้ำโลหะเกิดการแข็งตัวเกาะติดกับท่อลำเลียงน้ำโลหะที่อยู่ภายในหัวพ่น.....	16
รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตโลหะผง [24].....	20
รูปที่ 2.2 กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ[26]	21
รูปที่ 2.3 กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ[27].....	22
รูปที่ 2.4 กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยแรงหมุนเหวี่ยง[28].....	23
รูปที่ 2.5 กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยพลาสมา[29].....	24
รูปที่ 2.6 กลไกการแตกตัวของน้ำโลหะเหลวด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน[30].....	25
รูปที่ 2.7 กลไกการแตกตัวของน้ำโลหะครั้งที่สอง (Secondary breakup) [30].....	26
รูปที่ 2.8 การฟอร์มตัวของผงโลหะในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ[30].....	27
รูปที่ 2.9 รูปร่างของอนุภาคผงโลหะ (Particle Shape) [31].....	28
รูปที่ 2.10 โลหะเงินสเตอร์ลิง 925.....	31
รูปที่ 2.11 แผนภาพสมดุลโลหะเงิน - ทองแดง [28].....	33
รูปที่ 2.12 รูปร่างแบบต่างๆ ของผงโลหะที่มีความแตกต่างกัน [39].....	36
รูปที่ 2.13 ตะแกรงร่อนเบอร์ต่างๆ [41].....	37
รูปที่ 2.14 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscopy) [43].....	41
รูปที่ 2.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope (SEM).....	42
รูปที่ 3.1 เม็ดโลหะเงินและทองแดงบริสุทธิ์.....	50
รูปที่ 3.2 เครื่องหลอมผสมเทหยดเม็ดโลหะ	51
รูปที่ 3.3 เม็ดโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ได้จากการเตรียม.....	52
รูปที่ 3.4 วัสดุสิ้นเปลืองสำหรับการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925.....	52
รูปที่ 3.5 เครื่องอะตอมไมเซอร์ด้วยก๊าซแนวตั้งที่ใช้สำหรับการดำเนินการทดลองผลิต	
อนุภาคโลหะผงเงินสเตอร์ลิง 925 [65].....	54

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.6 แผนภาพรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆของเครื่องอะตอมไมเซอร์ด้วยก๊าซแนวตั้ง.....	54
รูปที่ 3.7 ลักษณะของหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 ซึ่งเป็นหัวพ่นแบบ Close-coupled nozzle 1 ที่มีช่องปล่อยก๊าซช่องเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ.....	56
รูปที่ 3.8 จากงานวิจัยของ Srivastava V. C. และคณะ [60].....	56
รูปที่ 3.9 ลักษณะหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2 ซึ่งเป็นหัวพ่นแบบ Close-Coupled Nozzle 2 แบบที่มีช่องปล่อยก๊าซหลายรูรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ.....	57
รูปที่ 3.10 จากงานวิจัยของ Singh และคณะ[69].....	58
รูปที่ 3.11 ลักษณะและหลักการของหัวพ่นก๊าซแบบ Close-Coupled.....	58
รูปที่ 3.12 เครื่องชั่ง ยี่ห้อ AND model EK1200i.....	59
รูปที่ 3.13 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ (Flow Rat Gas).....	60
รูปที่ 3.14 เทอร์โมคัปเปิล Type R [65].....	60
รูปที่ 3.15 เครื่อง X - Ray Fluorescence Spectrometer วิเคราะห์ตรวจสอบส่วนผสม ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925.....	61
รูปที่ 3.16 ตะแกรงและเครื่องร้อนอนุภาคผงโลหะ.....	62
รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscopy) [43].....	63
รูปที่ 3.18 ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อวิเคราะห์ตรวจสอบลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะในเบื้องต้น	63
รูปที่ 3.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope (SEM)	64
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างภาพถ่ายลักษณะรูปร่างและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของอนุภาคผงโลหะ ที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	64
รูปที่ 3.21 โปรแกรม ImageJ.....	65
รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการทำงานแต่ละขั้นตอน.....	66
รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล.....	66

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.24 เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค ยี่ห้อ Horiba รุ่น LA 950.....	67
รูปที่ 3.25 โลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ใช้ในการทดลอง.....	67
รูปที่ 3.26 ประกอบหัวพ่นเข้ากับฝาเครื่องอะตอมไมเซอร์.....	68
รูปที่ 3.27 (ก.) ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องพ่นละอองโลหะด้วยก๊าซ (ข.) แสดงระบบควบคุมเตาหลอมโลหะ.....	68
รูปที่ 3.28 (ก) แม่พิมพ์แบบกด (ข) เครื่องเลเซอร์ (SLM) [78]	71
รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบปริมาณอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1.....	75
รูปที่ 4.2 อิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมปัจจัยการผลิตที่มีผลต่อปริมาณผงโลหะ ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1.....	76
รูปที่ 4.3 แสดงค่าประสิทธิภาพของหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 ที่มีผลต่อปริมาณผงโลหะ ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1.....	77
รูปที่ 4.4 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ได้จากการทดลอง ผลิตภายใต้สภาวะต่างๆ ด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1.....	78
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการจำแนกลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ได้จากการทดลองผลิตภายใต้สภาวะต่างๆ ด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1.....	79
รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่มีลักษณะ รูปร่างเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ที่ได้จากการทดลองผลิตภายใต้สภาวะต่างๆ ด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1	79
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 จากกล้องจุลทรรศน์ แบบแสงสำหรับการวิเคราะห์ตรวจสอบค่าความกลมของอนุภาค.....	80
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1.....	81

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.9	อิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมปัจจัยการผลิตที่มีผลต่อปริมาณผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1.....	82
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของหัวพ่นก๊าซที่มีผลต่อปริมาณการผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่1....	83
รูปที่ 4.11	กราฟเปรียบเทียบค่าขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1.....	85
รูปที่ 4.12	ชิ้นงานการทดลองขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925.....	87
รูปที่ 4.13	ลักษณะรูปร่างการหลอมโลหะด้วยเลเซอร์เฉพาะจุด (SLM) กับสภาวะต่างๆ	87
รูปที่ 4.14	กราฟเปรียบเทียบปริมาณอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2.....	90
รูปที่ 4.15	อิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ (Close-Coupled Nozzle2).....	91
รูปที่ 4.16	แสดงค่าประสิทธิภาพของหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ (Close-Coupled Nozzle2).....	91
รูปที่ 4.17	ลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925.....	92
รูปที่ 4.18	ตัวอย่างการจำแนกลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ได้จากการทดลองผลิตภายใต้สภาวะต่างๆ ด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2.....	93
รูปที่ 4.19	ลักษณะรูปร่างพื้นผิวมีลักษณะเป็นเดนไดรต์แบบหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2 กับสภาวะต่างๆ.....	93
รูปที่ 4.20	ภาพตรวจวัดค่าความกลมด้วยกล้องจุลทรรศน์ Optical Microscopy (OM).....	94
รูปที่ 4.21	กราฟเปรียบเทียบค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2.....	95
รูปที่ 4.22	กราฟเปรียบเทียบขนาดและการกระจายตัวของผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925.....	97
รูปที่ 4.23	ทดลองขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925.....	98
รูปที่ 4.24	ลักษณะรูปร่างการหลอมโลหะด้วยเลเซอร์เฉพาะจุด (SLM) กับสภาวะต่างๆ.....	99

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะรูปร่างของโลหะ[32].....	29
ตารางที่ 2.2 รูปร่างของผงโลหะตามกระบวนการผลิต[32].....	30
ตารางที่ 2.3 ปริมาณธาตุโลหะมีค่าผสมมาตรฐานต่างๆ [37,38].....	32
ตารางที่ 2.4 ธาตุผสมบางชนิดที่ใช้ในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง [36].....	33
ตารางที่ 2.5 รายละเอียดตะแกรงมาตรฐาน [41].....	38
ตารางที่ 2.6 ขนาดของตะแกรงกรองตามมาตรฐานต่างๆ [41].....	39
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ภายใต้สภาวะต่างๆ ทดลองด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 โดยทำการทดลองครั้งละ 1000 กรัม.....	74
ตารางที่ 4.2 แสดงผลวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณ ผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1.....	76
ตารางที่ 4.3 ค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1.....	81
ตารางที่ 4.4 วิเคราะห์ทางสถิติเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลวและ อัตราการไหลของก๊าซที่มีผลต่อค่าความกลม.....	82
ตารางที่ 4.5 ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อน ขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1.....	84
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ภายใต้สภาวะต่างๆ ทดลองด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2 โดยทำการทดลองครั้งละ 1000 กรัม.....	89
ตารางที่ 4.7 แสดงผลวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าตัวแปรที่ต่อปริมาณ ผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2.....	91
ตารางที่ 4.8 ค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อน ขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2.....	95
ตารางที่ 4.9 ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อน ขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2.....	98
ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัวพ่นก๊าซแบบต่างๆ.....	104

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ เป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่สร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจให้แก่ประเทศได้อย่างมหาศาลในแต่ละปี ซึ่งผู้บริโภคทั้งสุภาพบุรุษและสตรีให้ความสนใจพิจารณาการเลือกเครื่องประดับที่สอดคล้องกับวิถีชีวิต ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยในการทำเครื่องประดับผสมผสานกัน เช่น นาฬิกา Huawei Fit Smartwatch ผังเพชร สายนาฬิกา จี้ห้อยคอ แหวน หูฟังไร้สาย หรือโทรศัพท์มือถือที่ตกแต่งด้วยโลหะมีค่า อัญมณีและพลอยสีต่างๆ เป็นต้น [1] อุตสาหกรรมการทำเครื่องประดับโดยทั่วไปมีขั้นตอนการขึ้นรูปเครื่องประดับ ได้แก่ การขึ้นรูปด้วยมือ ด้วยการปั๊ม การหล่อขึ้นรูป และการขึ้นรูปด้วยไฟฟ้า (Electroforming) ซึ่งต้องอาศัยช่างผู้มีความชำนาญในการผลิต [2-4] ซึ่งต้องผ่านกรรมวิธีการหล่อหลอม การตีหรือทุบขึ้นรูปโลหะ หรือต้องใช้เครื่องมือการผลิตเฉพาะทาง ซึ่งมีราคาสูง เครื่องหล่อโลหะแบบหล่อดูดสุญญากาศ เครื่องแกะแว็กซ์ (Wax) และต้องผ่านกระบวนการต่างๆ ที่ซับซ้อนหลายอีกหลายขั้นตอน [5] การหล่อขึ้นรูปชิ้นงานเครื่องประดับมีการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีอย่างก้าวกระโดด จึงมีการนำองค์ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีต่างๆ [6-9] เข้ามาบูรณาการในกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับได้เป็นอย่างดี โดยหนึ่งในเทคโนโลยีและที่น่าสนใจคือ กระบวนการทางด้านโลหะผง (Metal Powder) ซึ่งประเทศไทยได้เริ่มมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำผงโลหะมีค่าเข้ามาใช้กับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับแล้วบ้าง เช่น การขึ้นรูปเครื่องประดับจากผงโลหะผสมกับผงประสานอินทรีย์ให้มีลักษณะคล้ายดิน (Metal Clay) เพื่อให้ง่ายในการปั้นขึ้นรูป หากเป็นโลหะเงินมีเปอร์เซ็นต์ถึง 99.0 ส่วนทองจะเป็น 24K [10-13] การขึ้นรูปเครื่องประดับเงินด้วยวิธีการอัดผงโลหะของอนุภาคนาโนของเงิน [14-16] ด้วยข้อดีที่ว่า การขึ้นรูปโลหะผงสามารถกำหนดกระบวนการทางกลได้ ลดเศษวัสดุ สามารถควบคุมส่วนผสมทางเคมีได้ตามต้องการ ชิ้นงานที่ผลิตได้มีผิวที่ดี สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนที่ไม่สามารถขึ้นรูปโดยวิธีอื่นได้ ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการขึ้นรูปโดยวัสดุผงมีศักยภาพสูงเมื่อเทียบกับกรรมวิธีการผลิตแบบอื่น แต่การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางด้านโลหะผงของโลหะมีค่าสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยยังไม่มีเป็นที่แพร่หลายในประเทศ เนื่องจากอนุภาคผงโลหะมีค่ามีราคาสูง และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จึงทำให้กระบวนการผลิตโลหะผงจากโลหะมีค่าเป็นกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับตอบสนองความ

ต้องการในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทย โดยโลหะเงินเป็นโลหะอีกชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศ นักวิจัยได้มีความพยายามนำกรรมวิธีการผลิตผงเงินเพื่อนำมาใช้ในการผลิตชิ้นงานเครื่องประดับ จากการศึกษาข้อมูลทางด้านโลหะผงของโลหะมีค่าในประเทศไทย พบว่า ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก เนื่องจากองค์ความรู้ทางด้านวิชาการของศาสตร์แขนงนี้ยังขาดผู้เชี่ยวชาญที่มีความชำนาญในด้านการผลิต และขาดความรู้ด้านกระบวนการผลิตโลหะผงสำหรับผลิตชิ้นงานเครื่องประดับให้กับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ [17-20]

เทคโนโลยีทางด้านโลหะผงวิทยา (Powder Metallurgy Technology) เป็นเทคโนโลยีโลหะผงที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรม โดยมีการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ หลายสาขา การผลิตโลหะผงด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชัน เป็นกระบวนการผลิตผงโลหะที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากกระบวนการอะตอมไมเซชันมีกำลังผลิตสูง สามารถผลิตได้ทั้งโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม นอกจากนี้โลหะผงที่ได้ยังมีการแข็งตัวอย่างรวดเร็วส่งผลให้โลหะผงมีโครงสร้างละเอียด เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานจะได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูง สำหรับการผลิตผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันในประเทศไทยยังอยู่ในระหว่างการศึกษาเพื่อทำการผลิต เนื่องจากยังขาดองค์ความรู้เชิงบูรณาการ ในการออกแบบและสร้างเครื่องมือรวมถึงการจัดหาอุปกรณ์ที่จำเป็นในกระบวนการผลิตผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชัน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตผงโลหะและการวิจัยทางด้านโลหะผงวิทยา [21] กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ เป็นกระบวนการที่น้ำโลหะเหลวถูกทำให้แตกตัวเป็นละอองด้วยก๊าซที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ในขั้นตอนแรกโลหะจะถูกหลอมภายในบ้าหลอม และถูกทำให้ไหลผ่านช่องเล็กๆ ด้วยแรงแคพิลลารี (Capillary Force) หรือแรงโน้มถ่วง ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการออกแบบหัวพ่น จากนั้นก๊าซเฉื่อย (ไนโตรเจน อาร์กอนหรือฮีเลียม) จะถูกพ่นออกจากหัวพ่นด้วยความเร็วสูง โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงความดันทำให้ก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างรวดเร็ว เมื่อก๊าซปะทะกับลำกระแสน้ำโลหะเหลวจะทำให้เกิดการแตกออกเป็นละอองน้ำโลหะ ตามมาด้วยการเย็นตัวและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว และตกลงถึงพักหรือภาชนะรองรับ สำหรับการทำอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซที่อุณหภูมิสูง (สำหรับโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมละลายสูง) ต้องมีการออกแบบถึงพักหรือภาชนะรองรับให้มีระยะห่างมากพอที่จะทำให้ น้ำโลหะเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ก่อนกระทบผนังหรือกันถึง

งานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะทำการศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบหรือลักษณะของหัวพ่นแบบ Close-Coupled 2 แบบที่มีลักษณะแตกต่างกันสำหรับการผลิตผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ (Gas Atomization) วัสดุที่ใช้ในการทดลองผลิตเป็นโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และเพื่อทำการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบรูปแบบหรือชนิดของหัวพ่น อิทธิพลของอุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลว (Molten

Temperature) อัตราการไหลของก๊าซ (Gas Flow Rate) ที่ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ ลักษณะรูปร่าง ลักษณะโครงสร้างจุลภาค ขนาดและการกระจายตัวของผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผลิตด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ โดยกำหนดตัวแปรคงที่สำหรับการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยขนาดรูเทหรือลำกระแสน้ำโลหะ ชนิดของก๊าซที่ทำให้ลำกระแสน้ำโลหะเกิดการแตกตัวเป็นละออง

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยหัวพ่นแบบ Close-Coupled ที่มีรูปแบบหรือลักษณะที่แตกต่างกัน 2 แบบของกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ (Gas Atomization)

1.2.2 เพื่อศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบรูปแบบหรือลักษณะของหัวพ่นที่แตกต่างกัน 2 แบบที่ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้จากการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ภายใต้สภาวะของการทดลองที่แตกต่างกัน

1.2.3 เพื่อศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิน้ำโลหะหลอมเหลว อัตราการไหลของก๊าซ ที่ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ ลักษณะรูปร่าง ลักษณะโครงสร้างจุลภาค ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดไม่เกิน 50 ไมโครเมตร ที่นิยมนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่อง 3D printer ระบบ SLM

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

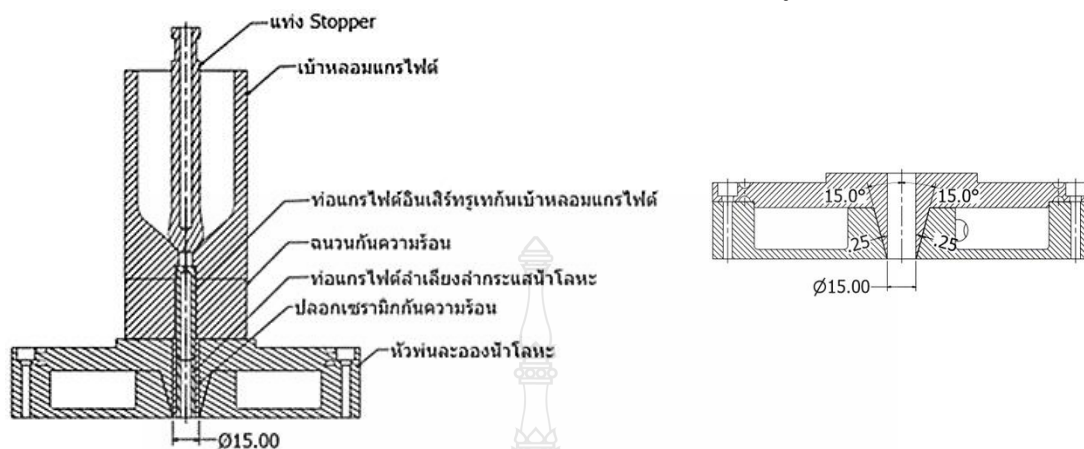
จากการศึกษาของงานวิจัยสมหมายและคณะ [4] เรื่องของอิทธิพลของอุณหภูมิเทน้ำโลหะและอัตราการไหลของก๊าซ ที่มีผลต่ออนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 การผลิตอนุภาคผงโลหะด้วยเครื่องอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ พบว่า กระบวนการผลิตดังกล่าวเกิดจากความไม่เสถียร ซึ่งส่งผลต่อเนื่องถึงประสิทธิภาพการผลิต (ปริมาณผลผลิต) อนุภาคผงโลหะมีค่า ซึ่งหัวพ่นแบบเดิมที่เคยศึกษามาจากสมหมายและคณะ[4] ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1.1 มีข้อเสียหรือข้อจำกัดดังต่อไปนี้

1.3.1 น้ำโลหะเกิดการแข็งตัวขัดขวางการไหลของน้ำโลหะที่จะลำเลียงไปยังหัวพ่น ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 1.2ก)

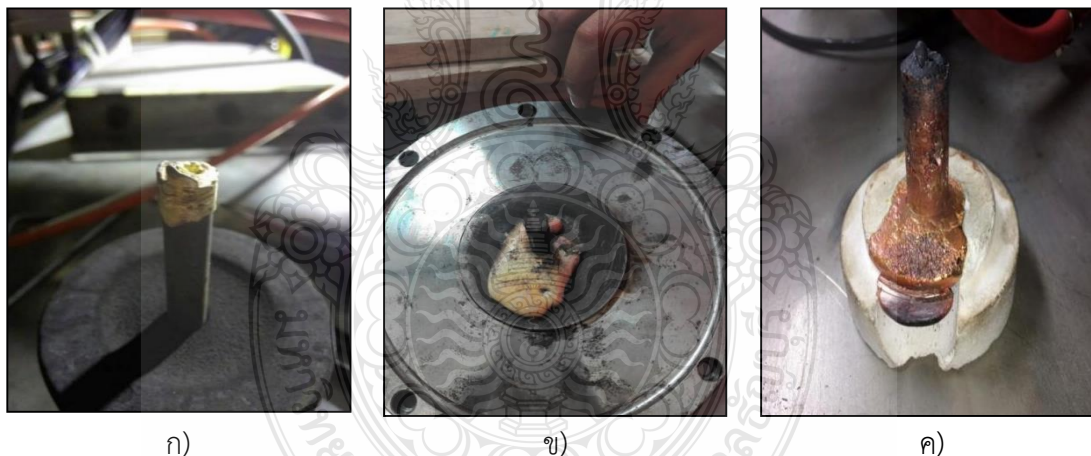
1.3.2 น้ำโลหะไหลย้อนกลับเข้าไปในรูหรือท่อลำเลียงน้ำโลหะ และน้ำโลหะบางส่วนเกิดการแข็งตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ภายในห้องหลอมโลหะ ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 1.2 (ข) และรูปที่ 1.2 (ค)

จากปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตอนุภาคผงโลหะของเครื่องอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซสำหรับผลิตผงโลหะมีค่า ทำให้เกิดการตั้งสมมติฐานการออกแบบหัวพ่นก๊าซชนิดใหม่ การศึกษากระบวนการผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ซึ่งมีงานวิจัยเกี่ยวข้องให้ศึกษาค้นคว้าที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดอื่น อุณหภูมิน้ำโลหะหลอมเหลว อัตราการไหลของก๊าซ ที่อาจจะส่งผลทำให้ได้

ปริมาณผลผลิตผงโลหะและนอกจากนี้ ยังรวมถึงการแก้ปัญหา น้ำโลหะเกิดการแข็งตัวขัดขวางการไหลของน้ำโลหะที่จะลำเลียงไปยังหัวพ่นและปัญหา น้ำโลหะไหลย้อนกลับเข้าไปในรูหรือท่อลำเลียงน้ำโลหะ



รูปที่ 1.1 ลักษณะการออกแบบหัวพ่นที่ใช้สำหรับการทดลองผลิตผงโลหะจากการศึกษาของสมหมาย และคณะ[4]



รูปที่ 1.2 น้ำโลหะเกิดการแข็งตัวเกาะติดกับท่อลำเลียงน้ำโลหะที่อยู่ภายในหัวพ่น

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 วัสดุในการทดลอง เป็นโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่มีส่วนผสมของเงินบริสุทธิ์ 92.5 wt% และทองแดงบริสุทธิ์ 7.5 wt%

1.4.2 ทำการทดลองผลิตผงโลหะด้วยเครื่องผลิตโลหะผงแบบพ่นด้วยก๊าซแนวตั้ง (Vertical Gas Atomizer)

1.4.3 หัวพ่นก๊าซ (Nozzle) แบบ Close-Coupled ที่มีรูปแบบหรือลักษณะที่ต่างกัน 2 แบบ ซึ่งประกอบด้วย หัวพ่นก๊าซแบบรูปหล่อก๊าซชุดเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ และ หัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปหล่อก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ

1.4.4 อุณหภูมิน้ำโลหะหลอมเหลว (Molten Temperature) ที่ใช้ในการทดลองพ่นก๊าซให้เกิดการแตกตัวเป็นละออง ประกอบด้วย อุณหภูมิ 1060, 1160 และ 1260 องศาเซลเซียส

1.4.5 อัตราการไหลของก๊าซ (Gas Flow Rate) ที่ใช้ในการทดลองพ่นก๊าซให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัวเป็นละออง ประกอบด้วยอัตราการไหล 400, 500, 600 ลิตร/นาที่

1.4.6 ขนาดรูเท้าน้ำโลหะกันเบ้าหลอม (Pouring Hole) หรือขนาดลำกระแสน้ำโลหะมีค่าเท่ากับ 3 มิลลิเมตร

1.4.7 ใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวกลางในการทำให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะ

1.4.8 ตรวจสอบลักษณะจำเพาะ ได้แก่ ขนาดและการกระจายตัว และลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะเงินที่ได้จากการทดลอง

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโลหะผงโดยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ

1.5.2 ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับเครื่องอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ

1.5.3 ออกแบบและสร้างหัวพ่นก๊าซ (Nozzle) แบบ Close-Coupled ที่มีรูปแบบหรือลักษณะที่ต่างกัน 2 แบบ

1.5.4 จัดเตรียมโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และก๊าซไนโตรเจนเพื่อใช้ในการทดลอง

1.5.5 ดำเนินการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ภายใต้สภาวะต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบการทดลอง

1.5.6 ตรวจวัดช่วงตวงปริมาณผลผลิตผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิต

1.5.7 คัดแยกขนาดอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิต

1.5.8 วิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณผลผลิตอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นแบบ Close-Coupled ที่มีรูปแบบหรือลักษณะที่ต่างกัน 2 แบบ

1.5.9 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสภาวะของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะที่มีผลต่อลักษณะรูปร่าง ลักษณะโครงสร้างจุลภาค ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดไม่เกิน 50 ไมโครเมตร ของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925

1.5.10 ทดลองอัดขึ้นรูปผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 เป็นชิ้นทดสอบ และหลอมผงโลหะด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์ชนิดที่นิยมใช้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

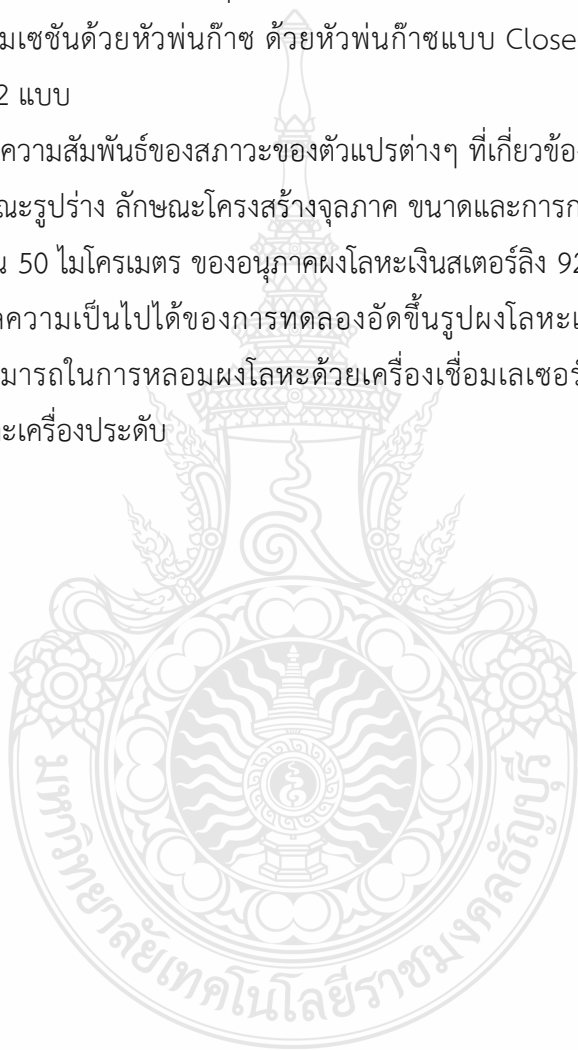
1.5.11 สรุปผลการทดลอง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ข้อมูลปริมาณผลผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ได้จากการผลิตด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยหัวพ่นก๊าซ ด้วยหัวพ่นก๊าซแบบ Close-Coupled ที่มีรูปแบบหรือลักษณะที่แตกต่างกัน 2 แบบ

1.6.2 ได้ข้อมูลความสัมพันธ์ของสภาวะของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะที่มีผลต่อลักษณะรูปร่าง ลักษณะโครงสร้างจุลภาค ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดไม่เกิน 50 ไมโครเมตร ของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925

1.6.3 ได้ข้อมูลความเป็นไปได้ของการทดลองอัดขึ้นรูปผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 เป็นชิ้นทดสอบ และความสามารถในการหลอมผงโลหะด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์ชนิดที่นิยมใช้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ



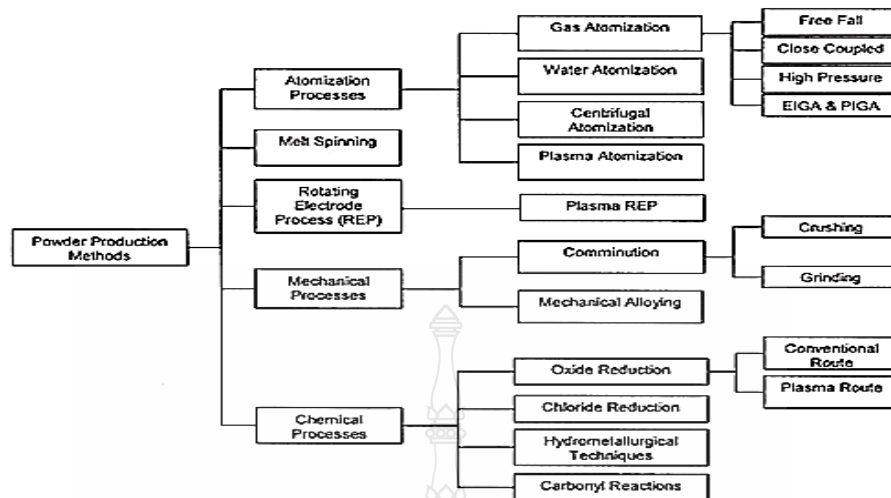
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงกรรมวิธีการผลิตผงโลหะ การผลิตโลหะผงด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ กลไกการแตกตัวเป็นละอองของน้ำโลหะเหลว (Mechanism of Atomization) ในกระบวนการอะตอมไมเซชัน โลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ลักษณะการทดสอบ การออกแบบสร้างหัวพ่นผลิตผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 กรรมวิธีการผลิตผงโลหะ

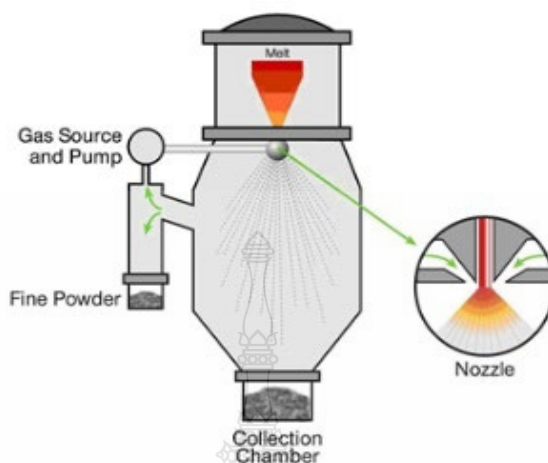
กรรมวิธีการผลิตผงโลหะสามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่มคือ กระบวนการอะตอมไมเซชัน (Atomization Processes) การปั่นหลอม (Melt Spinning) การใช้แรงเหวี่ยง (Rotating Electrode Process (REP)) กระบวนการทางกล (Mechanical Processes) และ กระบวนการทางเคมี (Chemical Processes) [22,23] ในกรรมวิธีการผลิตผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันเป็นกระบวนการที่ได้นิยมใช้มากที่สุดสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 วิธี จำแนกตามวิธีการทำให้น้ำโลหะเหลวแตกตัว คือ อะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ (Gas Atomization) อะตอมไมเซชันด้วยน้ำ (Water Atomization) อะตอมไมเซชันด้วยแรงหมุนเหวี่ยง (Centrifugal Atomization) อะตอมไมเซชันด้วยพลาสมา (Plasma Atomization) หลักการทั่วไปของกระบวนการอะตอมไมเซชัน ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การหลอมก้อนโลหะให้เป็นของเหลว (Melting) การทำให้น้ำโลหะแตกตัวเป็นละออง (Disintegration or Atomization) การเย็นตัวและแข็งตัวของละอองน้ำโลหะกลายเป็นอนุภาคผงโลหะ (Cooling and Solidification) อีกทั้งยังสามารถแยกรายละเอียดปลีกย่อยตามวิธีการที่ทำให้น้ำโลหะเหลวแตกตัวเป็นละออง [24] แผนแสดงดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตโลหะผง [24]

2.1.1 อะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ

กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ เป็นกระบวนการที่น้ำโลหะเหลวถูกทำให้แตกตัวเป็นละอองด้วยก๊าซที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ซึ่งขั้นตอนแรกโลหะจะถูกหลอมภายในเบ้าหลอม และถูกทำให้ไหลผ่านช่องเล็กๆ ด้วยแรงแคพิลลารี (Capillary Force) หรือแรงโน้มถ่วงขึ้นอยู่กับการออกแบบหัวพ่น จากนั้นก๊าซจะถูกพ่นออกจากหัวพ่นด้วยความเร็วสูง โดยอาศัยการที่ลำกระแสน้ำโลหะเหลวถูกปะทะด้วยก๊าซเฉื่อย (ไนโตรเจน อาร์กอน หรือฮีเลียม) ที่พ่นจากหัวพ่นอะตอมไมซ์ ทำให้เกิดการแตกตัวที่มีลักษณะเป็นละอองอนุภาคผง โดยทำให้ก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างรวดเร็ว เมื่อก๊าซปะทะกับลำกระแสน้ำโลหะเหลวจะทำให้เกิดการแตกออกเป็นละอองน้ำโลหะ เกิดการเย็นตัวและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว อนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้มีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดเล็ก ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 50 ถึง 300 ไมโครเมตร [25] ตกถึงถังพักหรือภาชนะรองรับ สำหรับการทำอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซที่อุณหภูมิสูง (สำหรับโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมละลายสูง) ต้องมีการออกแบบถังพักหรือภาชนะรองรับให้มีระยะห่างมากพอที่จะทำให้น้ำโลหะเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ก่อนกระทบผนังหรือกันถัง [26] ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2

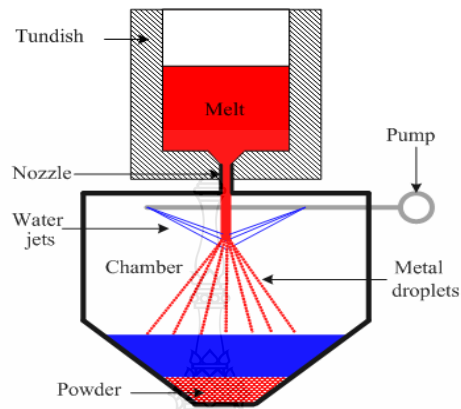


รูปที่ 2.2 กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ[26]

2.1.2 อะตอมไมเซชันด้วยน้ำ

กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ เป็นกระบวนการที่ใช้น้ำแรงดันสูงสำหรับการทำให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัว กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ จะมีอัตราการเย็นตัวที่สูงกว่ากระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ สำหรับหัวพ่นน้ำอาจมีเพียงหัวพ่นเดียวหรือหลายหัวพ่น โดยน้ำจะถูกฉีดเข้าปะทะกับลำกระแสน้ำโลหะเหลวโดยตรงทำให้เกิดการแตกตัว และทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วเป็นอนุภาคผงด้วยแรงดันของน้ำ [27] ผงโลหะที่ได้มีรูปร่างแบบไม่แน่นอน (Irregular) มีผิวขรุขระ ขนาดอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 100 ไมโครเมตร นอกจากนี้ ผงโลหะที่ผลิตได้อาจเกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) ได้บ้าง ซึ่งการเปลี่ยนของเหลวจากน้ำเป็นน้ำมันอาจมีส่วนช่วยในการควบคุมรูปร่างของผงโลหะและช่วยลดการเกิดออกซิเดชัน ดังหลักการที่แสดงในรูป 2.3

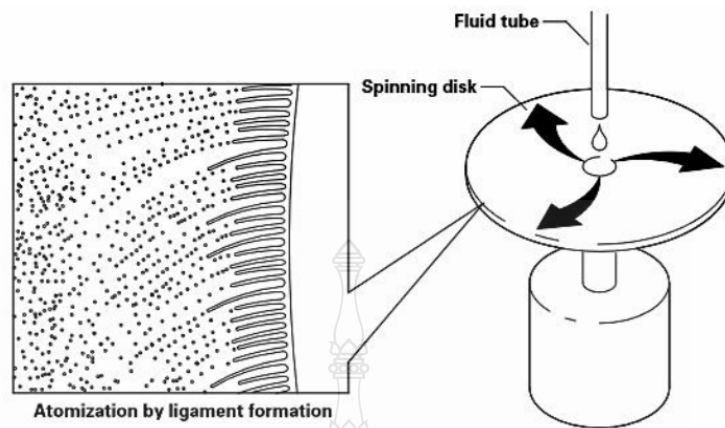
Water atomization



รูปที่ 2.3 กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ[27]

2.1.3 อะตอมไมเซชันด้วยแรงหมุนเหวี่ยง

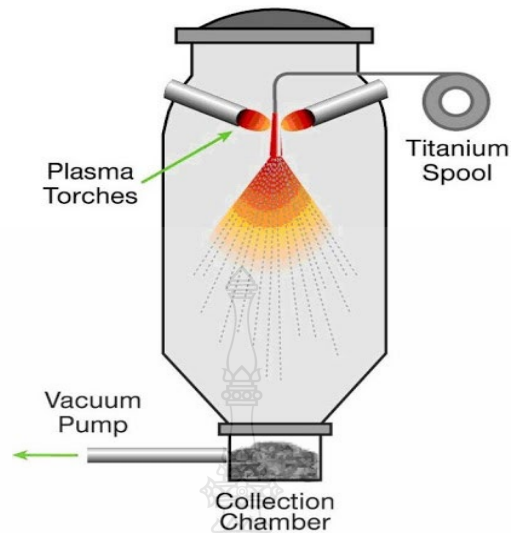
กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยแรงหมุนเหวี่ยง เป็นกระบวนการที่ใช้หลักการแรงเหวี่ยงสลัดน้ำโลหะที่อยู่บนผิวจานหมุนเพื่อทำให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัวเป็นละอองน้ำขนาดเล็กและเย็นตัวกลายเป็นผงโลหะ วิธีการนี้จะได้ผงโลหะที่สะอาด และมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่มีกำลังการผลิตที่ต่ำ รวมทั้งอุปกรณ์มีราคาแพงและได้ขนาดผงอนุภาคค่อนข้างหยาบเมื่อเทียบกับกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ ขนาดอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 200 ไมโครเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วรอบ ขนาดและรูปทรงของจานหมุน อัตราการป้อนน้ำโลหะและอุณหภูมิน้ำโลหะที่ถูกหมุนเหวี่ยงด้วยแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง [28] ดังหลักการที่แสดงในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยแรงหมุนเหวี่ยง[28]

2.1.4 อะตอมไมเซชันด้วยพลาสมา

กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการแปลงพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับพลาสมาไปเป็นพลังงานความร้อนสูง ซึ่งจะสร้างไอพ่นของก๊าซเฉื่อยที่แตกตัวเป็นไอออนที่ร้อนจัดด้วยความเร็วสูง ทำให้เส้นโลหะแตกตัวเป็นละอองอนุภาคผง ในขณะที่โซนอุณหภูมิสูงที่ขยายออกไป ช่วยให้เกิดกระบวนการอบเพื่อให้ได้โครงสร้างเม็ดอนุภาคทรงกลมอย่างสมบูรณ์ และขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยสำหรับการผลิตผงไทเทเนียมประมาณ 125 ไมโครเมตร [29] ดังหลักการที่แสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยพลาสมา[29]

2.2 การทำให้น้ำโลหะเหลวแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะและผงโลหะ

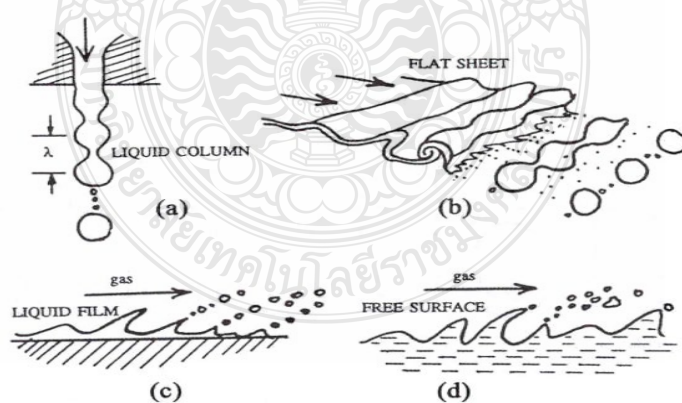
กลไกการแตกตัวเป็นละอองของน้ำโลหะเหลว (Mechanism of Atomization) ของกระบวนการอะตอมไมเซชัน ใช้หลักการของการทำให้น้ำโลหะเหลว (Molten Metal) แตกตัวเป็นหยดหรือละอองที่มีขนาดเล็กหรือละเอียดมาก แล้วทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจนละอองน้ำโลหะเหลวแข็งตัวกลายเป็นเม็ดอนุภาคของแข็งหรือผงโลหะที่มีขนาดต่างๆ ซึ่งการทำให้น้ำโลหะเหลวเป็นละอองนั้นต้องมีแรงมากระทำต่อน้ำโลหะเหลว การแตกตัวของน้ำโลหะเหลวด้วยแรงกระแทกจากของไหลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง (ก๊าซ หรือของเหลวที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง หรือมีพลังงานจลน์สูง) โดยที่น้ำโลหะเหลวและของไหลที่ใช้เป็นตัวกลางในการทำให้เกิดการแตกตัวต่างเป็นของไหลทั้งคู่ แรงกระแทกจากของไหลมีผลทำให้ลำกระแสน้ำโลหะเหลว (Melt Stream) ไม่เสถียรและเกิดการแตกตัวด้วยกลไกผสมผสานกัน การแตกตัวของน้ำโลหะเหลวไม่ได้เกิดจากกลไกใดกลไกหนึ่งเพียงกลไกเดียวซึ่งกลไกที่กล่าวถึงนี้ประกอบด้วย

2.2.1 การแตกตัวของลำกระแสน้ำโลหะเหลวที่ไหลออกจากรูเล็กๆ (Orifice) ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.6 a) ซึ่งการแตกตัวด้วยกลไกนี้เกิดจาก 2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ น้ำหนักของหยดน้ำโลหะเหลวและแรงตึงผิว (Surface Tension) ของน้ำโลหะเหลว

2.2.2. การแตกตัวของโลหะเหลวที่เป็นแผ่นบาง ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.6 b) ในกลไกนี้แรงกระแทกจากของไหล ซึ่งมีความเร็วสูงจะทำให้ น้ำโลหะเหลวที่เป็นแผ่นบางเรียบก่อตัวเป็นคลื่นที่ไม่เสถียร และแตกตัวต่อไปเป็นรูปร่างคล้ายไส้กรอก หรือที่นิยมเรียกว่า “ลิกาเมนต์ (Ligaments)” และแรงกระแทกที่มีอยู่อย่างต่อเนื่องมีผลทำให้ลิกาเมนต์ถูกกระแทกต่อไปอีกและมีผลทำให้เกิดการแตกตัวเป็นหยดหรือละอองที่ละเอียดต่อไป

2.2.3. การแตกตัวของแผ่นฟิล์มโลหะเหลวบนผิวของแข็ง ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.6 c) ในกลไกนี้แรงกระทำจากก๊าซที่มีความเร็วสูงจะฉีกแผ่นฟิล์มบนผิวของแข็งฉีกขาดออกเป็นชิ้นเล็กๆ และก่อตัวเป็นทรงกลมเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำโลหะเหลว

2.2.4. การแตกตัวของผิวอิสระของน้ำโลหะเหลว ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.6 d) โดยกลไกการแตกตัวแบบนี้จะมีลักษณะที่คล้ายกับแบบที่ 3 และคล้ายกับกรณีของการเกิดละอองน้ำบนผิวน้ำที่ลมพัดด้วยความเร็วที่เพียงพอ



รูปที่ 2.6 กลไกการแตกตัวของน้ำโลหะเหลวด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน [30]

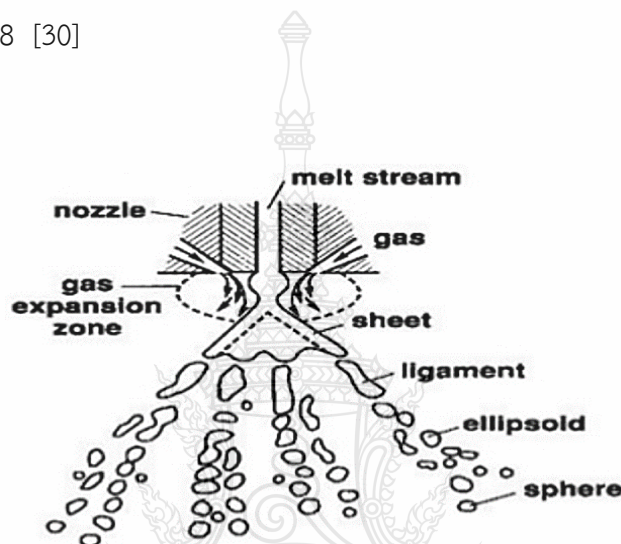
หลังจากที่น้ำโลหะเหลวแตกตัวเป็นหยดหรือละอองเล็กๆ แล้วหากแรงกระแทกยังคงมีอยู่อย่างต่อเนื่องจะมีผลทำให้หยดหรือละอองน้ำโลหะเหลวสามารถเกิดการแตกตัวต่อไปได้อีก และเรียกการแตกตัวที่เกิดขึ้นอีกครั้งในขั้นนี้ว่า “การแตกตัวครั้งที่สอง (Secondary Breakup)” ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 ลักษณะ ขึ้นอยู่กับค่า Gas Phase Weber Number ($We_g = \rho_g \Delta U^2 D / \sigma$) โดยค่า Gas Phase Weber Number นี้จะมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับแรงตึงผิวของน้ำโลหะเหลว ดังนั้น หากน้ำโลหะเหลวมีแรงตึงผิวสูง หยดของเหลวจะถูกแรงกระทำและมีรูปร่างเป็นถุงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนท้ายที่สุด ถุงทนแรงกระทำไม่ไหวเกิดการแตกตัวเป็นละอองที่มีขนาดเล็กและละเอียดยิ่งขึ้น ดังลักษณะของกลไกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่แสดงในรูปที่ 2.7 แถวบน และในทำนองเดียวกันในทางตรงกันข้าม หากน้ำโลหะเหลวมีแรงตึงผิวต่ำ หยดของเหลวเมื่ออยู่ภายใต้แรงกระทำจะฟอร์มตัวเป็นรูปแมงกะพรุน และต่อมาท้ายที่สุดจะแตกตัวเป็นหยดหรือละอองขนาดเล็กและละเอียดเช่นกัน ดังลักษณะของกลไกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่แสดงในรูปที่ 2.7 แถวล่าง



รูปที่ 2.7 กลไกการแตกตัวของน้ำโลหะครั้งที่สอง (Secondary breakup) [30]

กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ถ้ามีการใส่พลังงานให้กระแทกกับลำกระแส น้ำโลหะมาก ผงโลหะที่ได้จะยังมีขนาดเล็กและละเอียดยิ่งขึ้น การปะทะกันระหว่างก๊าซกับน้ำโลหะเหลวที่บริเวณทางออกของหัวพ่นมีผลทำให้ลักษณะทางกายภาพของการอะตอมไมเซชันเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยก๊าซที่แผ่รอบๆ น้ำโลหะเหลวจะมีความดันลดลงและทำให้น้ำโลหะเหลวเกิดการแตกกระจายกลายเป็นละอองน้ำโลหะ การ

ลดลงของความดันของก๊าซทำให้น้ำโลหะเหลวกระจายเป็นรูปทรงกรวยกลวงหลังจากออกมาจากหัวพ่น ซึ่งกรวยบางลักษณะจะไม่มีคมเสถียร เนื่องจากมีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงและส่งผลให้ละอองน้ำโลหะเกิดการแตกตัวออกไปได้อีกอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเกี่ยวข้องกับการแตกตัวแยกขาดออกจากกันของน้ำโลหะเหลวจากการขยายตัวของก๊าซอย่างรวดเร็ว โดยแรงดันที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีการขยายตัวของก๊าซมีผลทำให้น้ำโลหะเหลวก่อตัวเป็นแผ่นกลวงบางกลายเป็นลิกาเมนต์ รูปร่างรี และทรงกลมในท้ายที่สุด ดังลักษณะการแตกตัวที่แสดงในรูปที่ 2.8 [30]

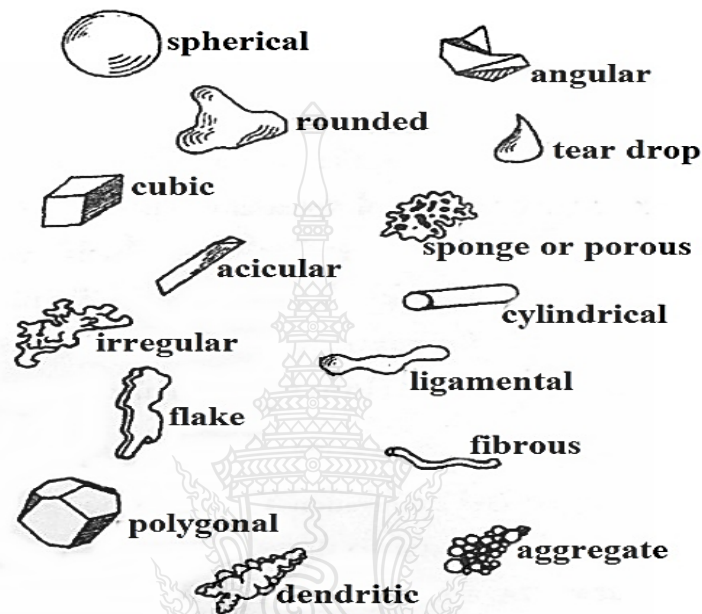


รูปที่ 2.8 การฟอร์มตัวของผงโลหะในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ[30]

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อรูปร่าง ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผง

ปัจจัยที่มีผลต่อรูปร่าง ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะที่ผลิตด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซที่สำคัญได้แก่ 1) ก๊าซเฉื่อย (ชนิดของก๊าซ ความดันหรืออัตราการไหล ความเร็วของก๊าซและอุณหภูมิก๊าซ) 2) น้ำโลหะเหลว (ชนิดของโลหะ อุณหภูมิ ความหนืด และอัตราการไหลของน้ำโลหะ) 3) หัวพ่น (ชนิดของหัวพ่น ขนาดของท่อลำเลียงน้ำโลหะ มุมกระทำการระหว่างก๊าซที่พุ่งชนกระแทกและลำกระแสน้ำโลหะ และระยะห่างของการพุ่งชนกระแทกน้ำโลหะหรือระยะห่างระหว่างช่องพ่นก๊าซกับลำกระแสน้ำโลหะ) ซึ่งการแปรเปลี่ยนค่าของตัวแปรหรือปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลให้อนุภาคผงโลหะมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันออกไป [31] กระบวนการผลิตผงโลหะแต่ละประเภทรูปร่างจะมีความแตกต่างกัน

การระบุรูปร่างเชิงปริมาณกระทำได้น้อยข้างยาก จึงนิยมจะบอกในเชิงคุณภาพมากกว่ารูปร่างของผงโลหะที่แตกต่างกัน จะมีชื่อเรียกต่างกันไปดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 รูปร่างของอนุภาคผงโลหะ (Particle Shape) [31]

พื้นฐานการวิเคราะห์รูปร่างของโลหะผงประกอบด้วยสองแนวทาง คือ วิเคราะห์จากการวัดขนาดจำเพาะของอนุภาค และวิเคราะห์จากเส้นโครงร่างผิว (Surface Contour) ของอนุภาค รูปร่างของผงโลหะมีผลต่อ Inter-Particle Friction, Flowability, Compressibility ซึ่งมีผลต่อการนำไปใช้ในขั้นตอนการอัดและเผาประสาน การระบุรูปร่างเชิงปริมาณกระทำได้น้อยข้างยาก จึงนิยมที่จะระบุรูปร่างผงโลหะเชิงคุณภาพมากกว่าโดยมีชื่อเรียกตามรูปร่างที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะรูปร่างของโลหะ [32]

ชื่อเรียก	ลักษณะ
Acicular	เป็นเข็ม, แฉ่ง
Angular	เป็นเหลี่ยม มุม ด้านมีแหลมคม
Aggregate	กลุ่มก้อนรวมตัวเป็นกระจุก
Polygonal	ทรงหลายเหลี่ยม
Dendritic	เป็นกิ่งก้าน
Flaky	เป็นแผ่น
Fibrous	เป็นเส้น
Granular	เป็นก้อน มีลักษณะเป็นปกติทั้งอนุภาค
Nodular	รูปร่างกลมแต่ไม่สมบูรณ์
Spherical	ทรงกลม
Sponge	เป็นก้อนมีรูพรุนภายใน
Ligament	เป็นก้อน กลมมน รี
Irregular	ไม่สามารถอธิบายได้

สำหรับการระบุรูปร่างของผงโลหะเชิงปริมาณส่วนใหญ่อาศัยพื้นที่ผิวของผงโลหะ โดยนิยมให้ Sphericity (Ψ) ดังสมการที่ 2.1 เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของทรงกลมต่อพื้นที่ผิวของผงโลหะ โดยพื้นที่ผิวของทรงกลมได้จากทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับผงโลหะ ซึ่งค่า Sphericity จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ และถ้ามีค่าน้อยหมายถึงมีความซับซ้อนของรูปร่างของผงโลหะ รูปร่างของผงโลหะจะขึ้นกับกรรมวิธีการผลิตของผงโลหะ แสดงดังตารางที่ 2.2 วิธีการวิเคราะห์รูปร่างผงโลหะส่วนใหญ่นิยมใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเนื่องจากให้รายละเอียดสูง

$$\Psi = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลม}}{\text{พื้นที่ผิวของผงโลหะ}} \quad (2.1)$$

ตารางที่ 2.2 รูปร่างของผงโลหะตามกระบวนการผลิต[32]

Power Production Process	Possible Power Shape
Gas Atomization	Spherical, Ellipsoid
Water Atomization	Irregular, Ligament
Milling	Angular, Aggregate
Power Production Process	Possible Power Shape
Carbon Reduction, Hydrogen Reduction	Sponge
Electrochemical	Dendritic
Carbonyl	Spherical, Round

จากการศึกษาของ B. Zheng, และคณะ [33] ได้อธิบายปัจจัยที่มีผลต่อรูปร่างและขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงไว้ดังนี้

1. ชนิดของก๊าซ ที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซโดยส่วนใหญ่จะใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน หรือฮีเลียม ซึ่งทำให้ไม่มีปัญหาในเรื่องการเกิดออกซิเดชัน แต่เนื่องจากก๊าซดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง ซึ่งจะมีผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูง จึงมีการออกแบบห้องพ่นโลหะเหลว (Atomizing Chamber) ให้เป็นระบบที่สามารถนำก๊าซเฉื่อยที่พ่นออกไปแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2. อัตราการไหลของก๊าซและความเร็วของก๊าซที่ใช้ในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ เป็นปัจจัยสำคัญอย่างมาก สำหรับการออกแบบหัวพ่นที่กำหนด หากมีการใช้อุณหภูมิ น้ำโลหะที่เหมาะสมจะช่วยลดขนาดของอนุภาคโดยการเพิ่มความเร็วสัมผัสกับขนาดของอนุภาคและความดันก๊าซ

3. อุณหภูมิและความหนืดของน้ำโลหะเหลวอุณหภูมิ น้ำโลหะมีผลต่อความหนาแน่น ความหนืด และแรงตึงผิวของน้ำโลหะ การเพิ่มอุณหภูมิ น้ำโลหะให้สูงขึ้นมีผลทำให้ความหนาแน่น ความหนืดและแรงตึงผิวของน้ำโลหะลดต่ำลง ซึ่งมีผลต่อการแตกตัวของน้ำโลหะเหลวไปเป็นละออง เมื่อถูกพ่นกระแทกด้วยก๊าซความเร็วสูง หรืออาจกล่าวได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ น้ำโลหะให้สูงขึ้นความสามารถในการแตกตัวเพิ่มขึ้น และมีผลทำให้ได้อนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็กลง [33,42,43]

2.4 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง [34]

2.4.1 โลหะเงินบริสุทธิ์

โลหะเงินมีสัญลักษณ์ธาตุ คือ Ag ซึ่งมาจากภาษาละติน ชื่อว่า Argentum เงินเป็นโลหะที่มี ความวาวและอ่อน มีความเหนียวสูง สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและ ความร้อนได้ดีไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิห้อง แต่ในขณะที่โลหะเงินหลอมละลายใน อากาศออกซิเจนจะแพร่เข้าไปได้โลหะเงินบริสุทธิ์ไม่นิยมนำมาทำเครื่องประดับ เนื่องจากมีความ อ่อนสูง ทำให้เสียรูปทรงได้ง่าย ความสามารถในการยึดเกาะอัญมณีไม่ดีจึงนิยมนา โลหะอื่น ๆ มาผสมเป็นธาตุเจือเพื่อเพิ่มความแข็งและสมบัติต่าง ๆ [35]

2.4.2 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง

โลหะเงินคือหนึ่งในกลุ่มโลหะมีค่าที่ได้รับความนิยมในตลาดทั้งในและต่างประเทศสูง เนื่องจากมีราคาไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะมีค่าชนิดอื่น ๆ และมีสมบัติสะท้อนแสงได้สูง จึงทำให้ผิวโลหะมีลักษณะมันวาวหลังการขัด ทั้งยังมีความอ่อนตัว สามารถขัดขึ้นเงาได้ สามารถดัดขึ้นรูปหรือตีแผ่เป็นแผ่นบางๆ ได้ดี จึงมักนิยมนำมาทำเครื่องประดับ แต่เนื่องจากโลหะเงินมีขีดจำกัดด้านความแข็งและความแข็งแรง การแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงมีการนำโลหะอื่นๆ มาผสมกับเงินบริสุทธิ์เพื่อเพิ่มความแข็งแรง จะทำให้โลหะเงินมีความสามารถในการทนต่อการขีดข่วน ไม่ลดความสามารถในการที่แผ่และความมันวาวลง เรียกโลหะเงินนี้ว่า โลหะเงิน 925 (Sterling Silver) และถูกจัดเป็นมาตรฐานเดียวกันทั่วโลก ในการใช้โลหะเงิน 925 มาใช้ทำเครื่องประดับ จากสาเหตุดังกล่าวจึงมีการพัฒนาสมบัติทางกลให้เหมาะสมกับการใช้งาน 92.5wt% และมีทองแดง (Cu) 7.5wt% [36] เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยเฉพาะด้านความแข็งและความแข็งแรง เรียกว่าเงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โลหะเงินสเตอร์ลิง 925

โลหะเงินสเตอร์ลิง 925 เป็นเงินที่มีส่วนผสมของธาตุอื่นๆ ในอัตราส่วนเงินบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 925 ใน 1000 ส่วน ส่วนธาตุที่ผสมเข้าไบนั้นจะมีไม่เกิน 7.5% โดยน้ำหนัก ตามที่มาตรฐาน ISO 9202:1991(E) ที่ได้กำหนดส่วนผสมต่างๆ ของโลหะมีค่าไว้ใช้ในการทำเครื่องประดับ โดยคิดใน 1000 ส่วน (Values in parts per thousand) ได้ดังตารางแสดงที่ 2.3

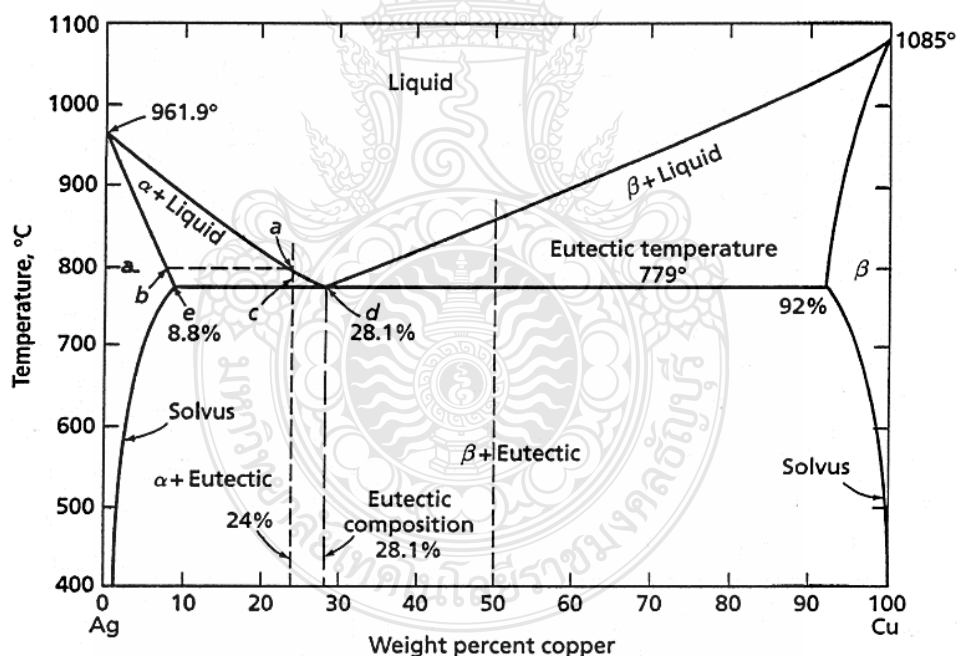
ตารางที่ 2.3 ปริมาณธาตุโลหะมีค่าผสมมาตรฐานต่างๆ [37,38]

โลหะมีค่าผสม	ปริมาณธาตุใน 1000 ส่วนอย่างต่ำ
Gold alloy	375 (ทองคำกะรัต 9K)
	585 (ทองคำกะรัต 14K)
	750 (ทองคำกะรัต 18K)
	916 (ทองคำกะรัต 22K)
Platinum alloy	850
	900
	950
Palladium alloy	500
	950
Silver alloy	800
	835
	925

เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยเฉพาะด้านความแข็งและความแข็งแรง เรียกว่าเงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver) ซึ่งเงินสเตอร์หลังการหล่อ(As-cast Sterling - Silver Alloy) มีลักษณะโครงสร้างจุลภาค ประกอบด้วยเดนไดรต์ (Dendrites) ของ α -Ag และ โครงสร้างยูเทกติก (Eutectic Structure) ของ α -Ag และ β -Cu สูง นอกจากทองแดงซึ่งถือเป็นธาตุผสมหลัก (Major Alloying Element) ซึ่งมีผลต่อสมบัติด้านความแข็ง ความแข็งแรงที่ดีขึ้นแล้วยังมีธาตุผสมรอง (Minor Alloying Element) คือ ธาตุที่มีปริมาณ น้อยในโลหะผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติ ดังตารางแสดงที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ธาตุผสมบางชนิดที่ใช้ในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง [36]

ธาตุ	wt%	อิทธิพลของธาตุผสม
ทองแดง (Cu)	0.10	เพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการอบชุบความร้อน
นิกเกิล(Ni)	0.002	ทำให้เกรนละเอียดและมีความเหนียวหลังการหล่อ
ซิลิคอน (Si)	0.005	เพิ่มความต้านทานการหมอง ช่วยลดโพรงอากาศ และทำให้น้ำโลหะไหลตัวได้ดี
ดีบุก (Sn)	0.01	เพิ่มความต้านทานการหมองและความแข็งแรง
สังกะสี (Zn)	0.01	เพิ่มการไหลตัวของน้ำโลหะเพิ่มความต้านทานการหมอง และลดความเปราะหลังหล่อ
แพลเลเดียม (Pd)	0.05	เพิ่มความต้านทานการหมอง



รูปที่ 2.11 แผนภาพสมดุลโลหะเงิน - ทองแดง [28]

ทองแดงเป็นโลหะที่มีระบบผลึกเป็น fcc เหมือนกับโลหะเงิน จึงสามารถละลายได้ดีใน โลหะเงิน มักถูกนำมาผสมกับโลหะเงิน เพื่อใช้ผลิตเงินสเตอร์ลิง จากแผนภาพวัฏภาคของโลหะผสมเงิน-ทองแดงดังแสดงในรูปที่ 2.11 แสดงว่า ทองแดงสามารถละลายในเงิน ได้ในรูปสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ซึ่งเรียกว่าวัฏภาค α -Ag ได้สูงที่สุด 8.8wt% โลหะ ผสมเงินสเตอร์ลิงที่ถูกหล่อขึ้นภายใต้สภาวะสมดุลเมื่อปล่อยให้เกิดการแข็งตัววัฏภาคที่เกิดขึ้นจะ ประกอบด้วยสารละลายของแข็งปฐมภูมิ (Primary Solid Solution) ของ α ที่เป็นเนื้อเดียวและมี Ag สูงแต่โดยทั่วไปแล้วการแข็งตัวของงานหล่อจะไม่อยู่ในสภาวะสมดุล ทำให้โครงสร้างภายหลัง การแข็งตัวประกอบด้วยสารละลายของแข็ง α ปฐมภูมิที่มีปริมาณเงินสูง ซึ่งเริ่มเกิดที่อุณหภูมิ ประมาณ 796 °C องค์ประกอบทางเคมีของโลหะเหลวจะเปลี่ยนแปลงไประหว่างแข็งตัว โดยความเข้มข้นของทองแดงจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ระหว่างการแข็งตัวและความสามารถในการละลายของทองแดงใน α -Ag จะลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลงจนตกตะกอนออกมาเป็นสารละลายของแข็งทุติยภูมิ (Secondary Solid Solution) ของวัฏภาค β ซึ่งมี Cu สูง ในที่สุดของเหลวที่เหลือซึ่งมีปริมาณทองแดงสูงขึ้นจะ กลายเป็นโครงสร้างยูเทกติกที่ประกอบด้วยวัฏภาคยูเทกติก ซึ่ง β มักจะเห็นเป็นสีเข้มในกล้องจุลทรรศน์ศาสตร์แสงยูเทกติก α จากพฤติกรรมการแข็งตัวดังกล่าว ทำให้เงินสเตอร์ลิงสามารถเพิ่มความแข็งแรง ได้ โดยกระบวนการทางความร้อน เช่น การบ่มเพิ่มความแข็งแรง (Age Hardening) [36]

2.5 การตรวจสอบลักษณะจำเพาะของผงโลหะ

2.5.1 ขนาดของผงโลหะ

ขนาดผงโลหะเป็นลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่ง เนื่องจากเกี่ยวข้องกับปริมาณพื้นที่ผิวต่อหน่วยมวล ความสามารถในการไหลตัวของผงโลหะ เวลาที่ใช้ในการเผาประสาน รวมถึงแรงที่ต้องใช้ในการอัดผงโลหะ โดยทั่วไปขนาดของโลหะผงมักแทนด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แต่จากขนาด รูปร่างของผงโลหะมีความแตกต่างกันและซับซ้อนมาก จึงมีการนิยามตัวแปรของขนาดของโลหะผง ตัวอย่าง เช่น โลหะผงรูปทรงกลม ใช้รัศมีของทรงกลมในการนิยามขนาด โลหะผงรูปทรงจานต้องใช้รัศมีและความหนาในการนิยามขนาด สำหรับโลหะผงที่มีรูปร่างซับซ้อนมากอาจไม่สามารถใช้ในการนิยามได้ โลหะผงส่วนใหญ่มักมีรูปทรงไม่สมบูรณ์ ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคโลหะผงขึ้นอยู่กับรูปร่างของอนุภาคและเทคนิคที่ใช้ในการวัดวิธีหนึ่งในการบอกขนาดของผงโลหะคือ การบอกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่ากับทรงกลม โดยเทียบเท่าด้วยตัวแปรต่างๆ เช่น พื้นที่ผิว ปริมาตร พื้นที่ภาพฉาย เป็นต้น

- เส้นผ่านศูนย์กลางที่มีพื้นผิวเท่ากับทรงกลม (Surface Diameter : d_s) หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีพื้นที่ผิวที่เท่ากับพื้นที่ผิวของอนุภาคที่ต้องการวัดขนาด

$$S = 4\pi r^2 = \pi D^2 \quad (2.2)$$

$$d_s = \left(\frac{S}{\pi}\right)^{1/2} \quad (2.3)$$

- เส้นผ่านศูนย์กลางปริมาตร (Volume Diameter, d_v) คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมที่มีปริมาตรที่เท่ากับปริมาตรของอนุภาคที่ต้องการวัดขนาด

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{\pi}{6} D^3 \quad (2.4)$$

$$d_v = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{1/3} \quad (2.5)$$

- เส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ (Projected Area Diameter, d_a) คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมที่มีพื้นที่หน้าตัดที่เท่ากับพื้นที่ภายใต้เส้นขอบของอนุภาค (Projected Area) ที่ต้องการวัดขนาดเมื่ออนุภาควางอยู่ในรูปที่มั่นคงที่สุดในแนวราบ

$$A = \pi r^2 = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2.6)$$

$$d_a = \left(\frac{4A}{\pi}\right)^{1/2} \quad (2.7)$$

- เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นรอบวง (Perimeter Diameter, d_p) เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมที่มีเส้นรอบวงที่เท่ากับเส้นรอบวงที่ภายใต้เส้นขอบของอนุภาค

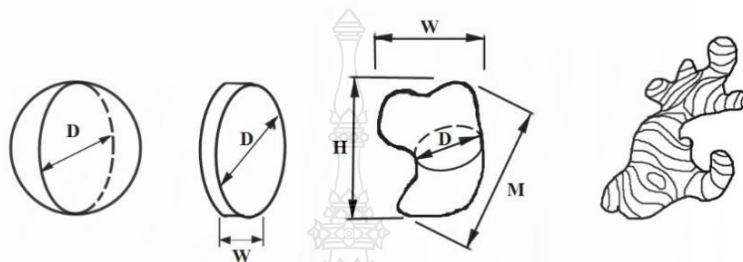
$$P = 2\pi r = \pi D \quad (2.8)$$

$$d_p = \left(\frac{P}{\pi}\right) \quad (2.9)$$

2.5.2 วิธีวัดขนาดผงโลหะ (Methods for Determining Particle Size)

ในปัจจุบันการวัดอนุภาคของผงโลหะมีหลายวิธีแต่ละวิธีจะได้ผลของขนาดที่มีความแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลักการหรือวิธีที่เหมาะสมกับการใช้งาน ขนาดของผงโลหะมีความสำคัญที่สุดอย่าง

หนึ่งของนักโลหวิทยา เพราะขนาดของผงโลหะจะเกี่ยวพันโดยตรงกับปริมาณพื้นที่ผิวต่อหน่วยมวล ความสามารถต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น หรือแม้แต่เวลาในการอบประสานและยังรวมไปถึงแรงที่มากระทำ ในการอัดขึ้นรูปตามรูปที่ 2.12 ที่ได้แสดงรูปร่างแบบต่างๆ ของผงโลหะที่มีความแตกต่างกัน จึงจำเป็นที่ จะต้องนิยามตัวแปรต่างๆ ยิ่งเม็ดโลหะมีความซับซ้อนเท่าไร ตัวแปรก็จะมากตามไปด้วย อย่าเม็ดโลหะที่มี ลักษณะเป็นทรงกลม ก็จะมีตัวแปรแค่สองตัวคือ รัศมีและความหนา



รูปที่ 2.12 รูปร่างแบบต่างๆ ของผงโลหะที่มีความแตกต่างกัน [39]

วิธีที่ได้รับความนิยมในการวัดขนาดของเม็ดโลหะคือ การบอกเป็นค่าศูนย์กลางเทียบเท่ากับทรงกลม โดยการเปรียบเทียบกับตัวแปรต่างๆ เช่น ปริมาตร พื้นที่ผิว หรือแม้แต่พื้นที่ภาพฉายเองก็ตาม สำหรับรูปทรงที่มีพื้นที่เทียบเท่ากับทรงกลม (Surface Diameter) คือ ขนานของผงโลหะนั้นมีพื้นที่ผิวเท่ากับค่าหนึ่ง แล้วนำไปคิดเทียบเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมเท่ากับเท่าไร ในขณะเดียวกันหากเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่ากับทรงกลม ก็หมายความว่าผงโลหะนั้นมีปริมาตรหนึ่ง เมื่อนำค่านั้นมาคิดเป็นเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากันจะมีค่าเท่าใด โดยการวัดอนุภาคผงโลหะแบ่งได้ดังนี้ [40]

1. การวัดขนาดอนุภาคโดยตะแกรง(Sieving) เป็นตะแกรงที่ใช้ในการแยกขนาดผงโลหะ มีลักษณะเป็นตารางที่เกิดจากการสานกันของเส้นใย (Woven Wire) หรือเป็นแผ่นเจาะรู (Perforated Plate) ทำจากวัสดุหลายประเภท เช่น ใยเส้นไหม พลาสติก โลหะสัมฤทธิ์ ทองเหลือง ลวดเหล็ก ตะแกรงแต่ละอันมีขนาดช่องเปิด (Aperture) ที่ไม่เท่ากันขึ้นกับจำนวนเส้นใยที่มาสานกัน ซึ่งขนาดของช่องเปิด หมายถึง ระยะกึ่งกลางของลวดเส้นหนึ่งถึงเส้นลวดอีกเส้นหนึ่ง และขนาดรูเปิด (Opening) หมายถึง ระยะระหว่างขอบลวดเส้นหนึ่งถึงขอบลวดอีกเส้นหนึ่งโดยไม่รวมความหนาของเส้นลวด ขนาดของตะแกรงตามหน่วยมาตรฐานของ U.S. Tyler (U.S. Tyler Standard) ระบุเป็นเมช (Mesh) หมายถึง จำนวนช่องเปิดในช่วงความยาว 1 นิ้ว ตัวอย่าง เช่น ตะแกรงเบอร์ 50 หมายถึงตะแกรงที่มีจำนวนช่องเปิด 50 ช่อง ในช่วงความ

ยาว 1 นิ้ว ขนาดของตะแกรงตามหน่วยมาตรฐานของ U.S. ASTM (American Society for Testing and Materials) ระบุเป็นมิลลิเมตรหรือไมครอน โครเมตร ซึ่งวัดจากความกว้างของช่องเปิดของตะแกรง ข้อดีของการวัดขนาดผงโลหะโดยวิธีตะแกรง ได้แก่ ทำได้ง่าย ใช้เวลาน้อย ราคาถูก ปัจจัยที่มีผลต่อการวัดขนาดผงโลหะโดยวิธีนี้ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงขนาดรูเปิด ปริมาณผงโลหะที่ใส่ในตะแกรง ความแรงของการเขย่า ระยะเวลาในการร่อน และชนิดและรูปทรงของผงโลหะ การวัดอนุภาคผงโลหะโดยใช้ตะแกรงร่อน (Analytical Sieving Method) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด เป็นการวัดขนาดอย่างคร่าวๆ วิธีการวัดขนาดอนุภาคโดยใช้ตะแกรงเหมาะกับอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่คือมากกว่า 70 ไมครอน โครเมตร วัดได้แค่ 2 มิติ คือกว้างกับยาวเท่านั้น วัสดุที่ใช้ทำตะแกรงส่วนใหญ่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม เส้นผ่าศูนย์กลางของตะแกรง 200 มิลลิเมตร ตัวอย่างที่วัดได้ประมาณ 25-100 กรัม ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุ การวัดขนาดอนุภาคผงโลหะด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และจำนวนขนาดของเบอร์ตะแกรงต้องครอบคลุมขนาดตัวอย่างในการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ตะแกรงร่อนเบอร์ต่างๆ [41]

การวิเคราะห์หาความละเอียดโดยตะแกรงร่อนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1.1 ตะแกรงมาตรฐานอเมริกา (U.S Sieve) เป็นตะแกรงตาสี่เหลี่ยมจัตุรัส เริ่มจากเบอร์ 4, 8, 16, 30, 50 และ 100 ในการคัดขนาดตัวเลขจะบอกจำนวนซึ่งต่อความยาว 1 นิ้วเช่น เบอร์ 50 หมายความว่า 1 นิ้ว แบ่งเป็น 50 ช่องดังนั้น ตารางนี้จะมี 2500 ช่องนั่นเอง

1.2 ตะแกรงมาตรฐานของเทเลอร์ (Tyler Sieve) มีลักษณะคล้ายของอเมริกา คือ เป็นตา
สี่เหลี่ยมจัตุรัสแต่มีขนาดแตกต่างกันเล็กน้อยและไม่เป็นที่นิยมเท่าแบบ อเมริกา รายละเอียดตะแกรง
มาตรฐาน 2 ชนิดที่กล่าวมาแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 รายละเอียดตะแกรงมาตรฐาน [41]

ตะแกรงอเมริกัน (U.S. Sieve)	ขนาดช่องว่าง (มิลลิเมตร)	ตะแกรงเทเลอร์ (Tyler Sieve)	ขนาดช่องว่าง (มิลลิเมตร)
1 1/2"	38.10	1 1/2"	38.10
1"	25.40	1"	26.67
3/4"	19.05	3/4"	18.85
(1/2")	12.70	(1/2")	13.34
3/8"	9.53	3/8"	9.42
No.4	4.75	No.4	4.70
No.8	2.38	No.8	2.36
No.16	1.19	No.16	1.17
No.30	0.589	No.30	0.589
No.50	0.297	No.50	0.295
No.100	0.15	No.100	0.147

โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) เป็นตัวที่แสดงถึงค่าความละเอียดของมวลรวมว่ามี
มากน้อยเพียงใด (ค่าที่น้อยกว่าแสดงถึงความละเอียดที่มากกว่า) หากได้จากการวิเคราะห์มวลรวมของ
ตะแกรงมาตรฐาน โดยนำค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ติดบนตะแกรงมาตรฐานแต่ละเบอร์มารวมกันและ
หารด้วย 100 ตะแกรงที่ใช้ในการคำนวณความละเอียดคือเบอร์ 100, 50, 30, 16, 8, 4, 3/8, 1/2 หรือ
ขนาดที่ใหญ่กว่าในอัตราส่วน 2:1 ทั้งนี้ไม่รวมขนาดของตะแกรงที่มีขนาดครึ่งหนึ่งของมาตรฐานนั้นๆ (Half
Size) ความหมายอีกนัยหนึ่งของค่าโมดูลัสความละเอียด คือ ขนาดตะแกรงโดยเฉลี่ย ของทั้งหมดโดยใช้
ตะแกรงเบอร์ 100 เป็นตะแกรงที่ 1 และเรียงต่อไปเรื่อยๆ (ในอัตราส่วน 2:1) ตะแกรงมาตรฐาน การ
วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคโดยใช้ตะแกรงร่อนอาจใช้ทั้งวัสดุเปียกและแห้งส่วนมากใช้กับวัสดุที่มีความ

ละเอียดสูง เช่น ดิน การเขย่าตะแกรงร้อนอาจใช้เครื่องเขย่าวัสดุที่ละเอียดที่สุดจะค้างในตะแกรงสุดท้าย ตะแกรงจะมีมาตรฐานเรียกตามหมายเลข (Mesh Number) เช่นตะแกรงหมายเลข 100 แสดงถึงใน 1 นิ้วมี 100 รู หากเลขมีความละเอียดสูงขึ้นความละเอียดก็จะสูงตาม ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ขนาดของตะแกรงกรองตามมาตรฐานต่างๆ [41]

มาตรฐานอเมริกา (ASTM)			มาตรฐาน อังกฤษ (BSI)			มาตรฐาน คานาดา			แบบไทเลอร์ (U.S.)		
ขนาด ตะแกรง	ขนาดรู ตะแกรง นิ้ว	ขนาดรู ตะแกรง มม.	ขนาด ตะแกรง	ขนาดรู ตะแกรง นิ้ว	ขนาดรู ตะแกรง มม.	ขนาด ตะแกรง	ขนาดรู ตะแกรง นิ้ว	ขนาดรู ตะแกรง มม.	ขนาด ตะแกรง	ขนาดรู ตะแกรง นิ้ว	ขนาดรู ตะแกรง มม.
2.5	0.315	8	-	-	-	-	-	-	2.5	0.312	7.925
3	0.265	6.73	-	-	-	-	-	-	3	0.263	6.68
3.5	0.223	5.66	-	-	-	-	-	-	3.5	0.221	5.613
4	0.187	4.76	-	-	-	-	-	-	4	0.185	4.699
5	0.157	4	5	0.132	3.34	-	-	-	5	0.156	3.962
6	0.132	3.36	6	0.1107	2.81	-	-	-	6	0.131	3.327
7	0.111	2.83	7	0.0949	2.41	-	-	-	7	0.11	2.794
8	0.0937	2.38	8	0.081	2.05	-	-	-	8	0.093	2.362
10	0.0787	2	10	0.066	1.67	10	0.0787	2	9	0.078	1.981
12	0.0661	1.68	12	0.0553	1.4	-	-	-	10	0.065	1.651
14	0.0555	1.41	14	0.0474	1.2	-	-	-	12	0.055	1.397
16	0.0469	1.19	16	0.0395	1	-	-	-	14	0.046	1.168
18	0.0394	1	18	0.0336	0.85	18	0.0395	1	16	0.039	0.991
20	0.0331	0.84	22	0.0275	0.7	-	-	-	20	0.0358	0.833
25	0.028	0.71	25	0.0236	0.6	-	-	-	24	0.0276	0.701
30	0.0232	0.59	30	0.0197	0.5	-	-	-	28	0.0232	0.589
35	0.0197	0.5	36	0.0166	0.421	35	0.0197	0.5	32	0.0195	0.495
40	0.0165	0.42	-	-	-	-	-	-	35	0.0164	0.417

ตารางที่ 2.6 ขนาดของตะแกรงกรองตามมาตรฐานต่างๆ (ต่อ)

มาตรฐานอเมริกา (ASTM)			มาตรฐาน อังกฤษ (BSI)			มาตรฐาน คานาดา			แบบไทเลอร์ (U.S.)		
ขนาด ตะแกรง	ขนาดรู ตะแกรง		ขนาด ตะแกรง	ขนาดรู ตะแกรง		ขนาด ตะแกรง	ขนาดรู ตะแกรง		ขนาด ตะแกรง	ขนาดรู ตะแกรง	
	นิ้ว	มม.		นิ้ว	มม.		นิ้ว	มม.		นิ้ว	มม.
45	0.0138	0.35	44	0.0139	0.353	45	0.0139	0.355	42	0.0138	0.351
50	0.0117	0.297	52	0.0116	0.295	-	-	-	48	0.0116	0.295
60	0.0098	0.25	60	0.0099	0.252	60	0.0098	0.25	60	0.0097	0.246
70	0.0083	0.21	72	0.0083	0.211	-	-	-	65	0.0082	0.208
80	0.007	0.177	85	0.007	0.177	80	0.0071	0.18	80	0.0069	0.175
100	0.0059	0.149	100	0.006	0.152	100	0.0059	0.15	100	0.0058	0.147
120	0.0049	0.125	120	0.0049	0.125	120	0.0049	0.125	115	0.0049	0.124
140	0.0041	0.105	150	0.0041	0.105	140	0.0041	0.106	150	0.0041	0.104
170	0.0035	0.088	170	0.0035	0.088	170	0.035	0.09	170	0.0035	0.088
200	0.0029	0.074	200	0.003	0.076	200	0.003	0.075	200	0.0029	0.074
230	0.0024	0.062	240	0.0026	0.065	230	0.0024	0.063	250	0.0024	0.061
270	0.0021	0.053	300	0.0021	0.053	270	0.0021	0.053	270	0.0021	0.053
325	0.0017	0.044	-	-	-	325	0.0017	0.045	325	0.0017	0.043

2. การวัดขนาดผงโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscopy)

ใช้วัดขนาดผงโลหะในช่วง 0.5 - 100 ไมครอน ครอน กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้วัดขนาดอนุภาคต้องมีอุปกรณ์วัดขนาดติดตั้งอยู่ในตัวเครื่อง เช่น ไมโครมิเตอร์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายไม้บรรทัดเล็กๆ มีสเกล (Scale) บอกขนาด นำไมโครมิเตอร์ติดตั้งเข้าไปในเลนส์ตากล้องก่อนทำการวัดขนาดผงโลหะทุกครั้ง การวัดขนาดผงโลหะด้วยวิธีนี้ควรวัดขนาดผงโลหะจำนวน 300 – 500 ขึ้นไป จึงจะได้ข้อมูลที่ถูกต้องและยอมรับได้ ข้อดีของการวัดขนาดผงโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์ คือ สามารถมองเห็นรูปร่าง ลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของผงโลหะ ส่วนข้อเสียของวิธีนี้ คือ ใช้เวลานาน อีกทั้งรูปร่างและตำแหน่งของผงโลหะมีผลอย่างมากต่อขนาดที่

วัดได้สำหรับผงโลหะที่มีรูปร่างไม่สมมาตรจึงเป็นการยากที่จะตัดสินใจว่าจะวัดในมิติใด [42] ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscopy) [43]

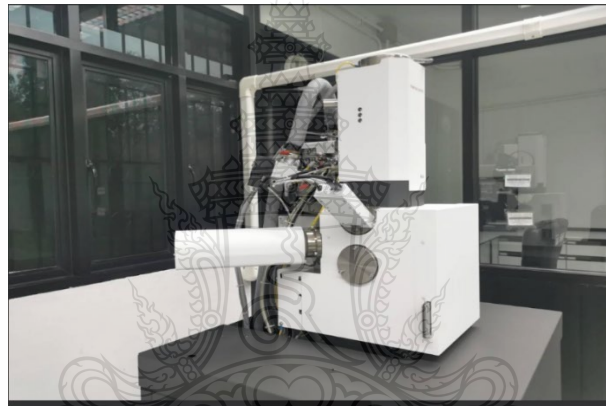
3. การวัดขนาดผงโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูงในการตรวจสอบวัตถุแทนแสงธรรมดา เนื่องจากความยาวคลื่นของลำอนุภาคอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถให้ประสิทธิภาพของกำลังขยายและการแจกแจงรายละเอียดได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโดยสามารถแยก รายละเอียดของวัตถุที่เล็กขนาด 0.1 ไมครอนหรือ 1 มิลลิเมตร จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงมากถึง 500,000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมี 2 ชนิด ได้แก่ Transmission Electron Microscope (TEM) และ Scanning Electron Microscope (SEM)

- Transmission Electron Microscope (TEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบางซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่าน ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ

เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร)

- Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของอนุภาคที่ทำการสำรวจ [44] ซึ่งรูปที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ข้อดีของเครื่อง SEM ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ มีความรวดเร็วและใช้งานง่ายดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope (SEM)

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ [45]

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเป็นเครื่องมือที่สำคัญและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัย โดยวิธีการทางสถิติจะประกอบด้วยการรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และการสรุปข้อมูลเพื่อนำไปตัดสินใจใช้ในด้านต่างๆ สามารถใช้วิธีการทางสถิติสรุปลักษณะที่สำคัญของกลุ่มตัวอย่าง เช่น การหาค่าเฉลี่ย การหาค่ากลาง การหาค่าความแปรปรวน การหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวมไปถึงการสร้างรูปภาพต่างๆ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีการทางสถิติในการหาความสัมพันธ์ต่างๆ เช่น การทดสอบ t (t-test) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) การวิเคราะห์ความถดถอยและความสัมพันธ์ (Regression and Correlation) และการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เป็นต้น

1) การใช้ P-value ในการทดสอบสมมติฐาน

วิธีการรายงานผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่ง คือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ระดับความเชื่อมั่น หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด (α) โดยค่า P-value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธสมมติฐานหลักที่ว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีค่าเท่ากันในทุกกรณีแม้จะเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นก็ตาม ($H_0: \mu_1 = \mu_2$) นอกจากนี้ยังสามารถนิยามค่า P-value เป็นค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญ ซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ก็ได้ โดยปกติจะสามารถบอกได้ว่าการทดสอบทางสถิตินั้นมีนัยสำคัญต่อเมื่อสมมติฐานหลักถูกปฏิเสธกล่าวได้ว่าอาจจะพิจารณาค่า P-value ว่าเป็นค่า α ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ชุดข้อมูลนั้นมีนัยสำคัญ

2) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

ความแปรปรวน (Variance) เป็นวิธีการวัดการกระจายของข้อมูลซึ่งมีความสัมพันธ์กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เนื่องจากความแปรปรวนสามารถคำนวณได้จากค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสอง (Sum of Square, SS) สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) หรือ ANOVA เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างมากกว่าสองกลุ่มขึ้นไป โดยความแตกต่างระหว่างกลุ่มจะถูกวัดในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือความแปรปรวน ซึ่งในที่นี้คือค่าเฉลี่ยของความแปรผันในการทดสอบสมมติฐานโดยใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน ตัวแปรที่ศึกษาอาจมีเพียงตัวเดียวหรือหลายตัวแปรก็ได้ ซึ่งในแต่ละตัวแปรอาจจะแบ่งได้หลายระดับขึ้นอยู่กับแต่ละกระบวนการ โดยที่ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) หรือปัจจัยหลัก (Main Effect) นั้น อาจจะเป็นข้อมูลเชิงปริมาณหรือเชิงคุณภาพก็ได้แต่ตัวแปรตามหรือปัจจัยตอบสนอง (Response) นั้นจะต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณก่อนการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ความแปรปรวน จำเป็นต้องตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) โดยทดสอบตามสมมติฐานรูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลการทดลองต้องมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 (Independently Distributed) และค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพ (Constant Variance, σ^2) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้

3) การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

การออกแบบการทดลองเป็นการออกแบบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่ (Optimization) ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกันด้วย

วิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาที่ละเอียด ปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของปัจจัย (Factors) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของผลตอบ (Reponse) ที่เกิดขึ้น

กระบวนการที่มีปัจจัย (Factors) หรือผลตอบแทน (Reponse : x_1, x_2, x_3, x_4) ต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่า Y ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพ (Quality Characteristic) ของกระบวนการ ในการออกแบบการทดลองเราต้องทำการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของ Y และ X อื่นๆ โดยที่พยายามใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ได้จะทำให้เรามีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ (Process Knowledge) เพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการต่อไป [46] การวิเคราะห์ผลการทดลอง DOE (Design of Experiments) ด้วยโปรแกรม Minitab สามารถทำได้ตามขั้นตอนดังนี้:

1. การเลือกปัจจัยและระดับ:
กำหนดปัจจัย (Factors) ที่ต้องการศึกษา เช่น อุณหภูมิ, เวลา, ความดัน เป็นต้น
กำหนดระดับ (Levels) ของแต่ละปัจจัย เช่น อุณหภูมิ 100°C และ 150°C
2. การสร้างแบบการทดลอง:
เปิดโปรแกรม Minitab และไปที่เมนู *Stat > DOE > Factorial > Create Factorial Design*
เลือกจำนวนปัจจัยและระดับที่ต้องการ จากนั้นคลิก OK
3. การป้อนข้อมูลการทดลอง:
ป้อนข้อมูลการทดลองที่ได้จากการทดลองจริงลงในตารางที่ Minitab สร้างขึ้น
4. การวิเคราะห์ข้อมูล:
ไปที่เมนู *Stat > DOE > Factorial > Analyze Factorial Design*
เลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) ที่ต้องการวิเคราะห์ จากนั้นคลิก OK
5. การตรวจสอบค่าเศษเหลือ (Residuals):
ตรวจสอบค่าเศษเหลือเพื่อดูว่ามีความผิดปกติหรือไม่ โดยไปที่เมนู *Stat > DOE > Factorial > Residual Plots*
6. การหาค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด:
ใช้เมนู *Stat > DOE > Factorial > Response Optimizer* เพื่อหาค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดตามเงื่อนไขที่กำหนด

7. การสรุปผลและการนำเสนอ:

สรุปผลการวิเคราะห์และนำเสนอในรูปแบบกราฟหรือรายงานตามที่ต้องการ

2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทาง ImageJ

เป็นซอฟต์แวร์เปิดให้ใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งช่วยให้ผู้ใช้โปรแกรม ตรวจสอบ วัดปริมาณ และตรวจสอบข้อมูลภาพทางวิทยาศาสตร์ได้ [47] บทบาทสำคัญในด้านวิทยาศาสตร์ชีวภาพและเติบโตอย่างมากในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา [48] เมื่อมีวิธีการถ่ายภาพใหม่ๆ เกิดขึ้นและชุดข้อมูลมีความซับซ้อนมากขึ้น การวิเคราะห์ภาพช่วยให้ผู้ใช้สามารถดึงข้อมูลจากภาพในลักษณะที่สามารถทำซ้ำได้เพื่อให้สิ่งนี้เกิดขึ้น อัลกอริทึมและพารามิเตอร์ที่ใช้จะต้องเปิดกว้างและสอดคล้องกัน หากส่วนประกอบใดของอัลกอริทึมเป็นกรรมสิทธิ์ นักวิจัยอาจไม่สามารถทำซ้ำงานหรือติดตามการเปลี่ยนแปลงด้วยความโปร่งใสอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจำเป็นต่อกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ซอฟต์แวร์ที่เปิดใช้แบบฟรีหนึ่งในเหตุผลหลักที่ทำให้ ImageJ ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย การวิเคราะห์ภาพยังมีบทบาทสำคัญในทางชีวการแพทย์สำหรับการตีความการวินิจฉัย [49] ในขณะที่ความแพร่หลายของชุดข้อมูลหลายมิติขนาดใหญ่ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แม้กระทั่งสำหรับผู้ใช้อใหม่ ผู้ใช้ที่ไม่มีประสบการณ์การเขียนโปรแกรมอย่างเป็นทางการ สามารถบันทึกการกระทำโดยใช้ Macro Recorder²³ โดยดำเนินการด้วยตนเองใน ImageJ จากนั้น ผู้ใช้สามารถแชร์กับผู้อื่นได้อย่างง่ายดายด้วย Script Editor ในด้านวิศวกรรมซอฟต์แวร์ โครงสร้างแบบโมดูลาร์ของ ImageJ ช่วยให้โปรแกรมเมอร์สามารถขยาย ImageJ ได้หลากหลายวิธี รวมถึงความสามารถในการใช้ส่วนประกอบของ ImageJ เป็นส่วนประกอบสำหรับเครื่องมือซอฟต์แวร์ของตนเองและสร้างสะพานเชื่อมกับ ImageJ ได้เติบโตจากเครื่องมือง่ายๆ สำหรับวิเคราะห์ภาพสองมิติ กลายเป็นแพลตฟอร์มที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการวิเคราะห์ภาพทางชีววิทยาสสมัยใหม่ การเติบโตนี้เกิดจากการทำงานอย่างไม่มีรู้จักเหน็ดเหนื่อยของ Wayne Rasband ผู้สร้าง ImageJ1 การมีส่วนร่วมของชุมชน Fiji และ ImageJ2 ที่เกิดขึ้นใหม่และทำงานร่วมกันได้ดี รวมถึงกลุ่มผู้ใช้และนักพัฒนาจำนวนมากที่นำเอาระบบนิเวศ ImageJ มาใช้ในการทำงานของตน ระบบนิเวศนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นด้วยความตั้งใจที่จะให้ผู้ใช้และผู้พัฒนาสามารถปรับใช้ได้ และประเพณีการช่วยเหลือและการเข้าถึงยังคงดำเนินต่อไปผ่านวิกิ ImageJ, ฟอรัมภาพชุมชนวิทยาศาสตร์ และคลังข้อมูล GitHub การเข้าถึงคลังข้อมูลโค้ดแบบเปิดฟรีช่วยให้นักพัฒนาสามารถปรับโซลูชันที่มีอยู่ให้เข้ากับชุดข้อมูลภาพขั้นสูงมากขึ้น โดยดึงเอาความก้าวหน้าในด้านการมองเห็นด้วยคอมพิวเตอร์และการเรียนรู้ของ

เครื่องมือใช้ โซลูชันล้ำสมัยได้รับการผลักดันผ่าน ImageJ Updater ให้กับผู้ใช้หลายหมื่นคน ซึ่งเสนอคำติชมโดยตรงต่อนักพัฒนาในระดับขนาดใหญ่ เมื่อมีระบบใหม่ที่ต้องตามรูปแบบการเขียนโปรแกรมและเทคโนโลยีที่แตกต่างกันเกิดขึ้นโดยไม่ถูกจำกัดด้วยโค้ดเก่าที่สะสมมานานหลายทศวรรษความท้าทายสำหรับระบบนิเวศ ImageJ ก็คือการรักษาความเกี่ยวข้องของบิโวลชันนี้เน้นย้ำถึงความพยายามอย่างต่อเนื่องภายในระบบนิเวศ ImageJ เพื่อปรับตัวให้เข้ากับความต้องการที่เกิดขึ้นใหม่และความท้าทายในการวิเคราะห์ภาพทางชีววิทยาสสมัยใหม่ แม้ว่าคุณสมบัติและความสามารถในการปรับตัวของโครงสร้างพื้นฐาน ImageJ และจำนวนผู้ใช้และนักพัฒนาจำนวนมากที่ลงทุนในซอฟต์แวร์นี้จะทำให้ซอฟต์แวร์นี้เป็เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ แต่หนทางข้างหน้าจะชัดเจนว่าจะต้องสร้างสะพานเชื่อมไปยังแพลตฟอร์มใหม่ ๆ ต่อไปเพื่อประโยชน์ของวิทยาศาสตร์ที่ใหญ่ขึ้น[49,50,51]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 1948 ทอมป์สัน [52] ได้ทำการศึกษากระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซแบบ Close - Coupled วิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์ในกระบวนการ เช่น ความดันแก๊ส อุณหภูมิโลหะ และอัตราการไหลของโลหะมีต่อขนาดผง การทดสอบการกำหนดค่าหัวพ่นแบบต่างๆอย่างใดก็ตาม ในช่วงปี 1980 เนื่องจากความสนใจในโครงสร้างจุลภาคของผงและคุณสมบัติพิเศษที่เพิ่มขึ้น กิจกรรมการวิจัยจึงขยายตัว Couper และ Singer [53] ได้ทำการตรวจสอบแรงดันแก๊สในการดำเนินงานเพื่อค้นหาแรงดัน "จุดวิกฤต" ที่ปลายแหลมเหลวซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อหลีกเลี่ยงการไหลย้อนกลับของการหลอมและการเยือกแข็งที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันสูงในฟองอากาศหมุนเวียนสำหรับการออกแบบหัวพ่น พบว่าถึงจุดวิกฤตสำหรับแรงดันเมื่อหยุดนิ่งในช่วง 900-1200 psig (62-83 บาร์) ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเมื่อหยุดและแรงดันเฉพาะที่ที่ทางออกของกระแหลอมละลาย ทางด้านของ Ayers และ Anderson [54] ศึกษาภาพรวมของแอปพลิเคชันและกระบวนการผลิตผงที่มีขนาดเล็กมาก ($<10\mu\text{m}$) กระบวนการต่างๆ ถูกแบ่งย่อยตามหลักการทางกายภาพต่างๆ ที่เกี่ยวข้องระหว่างแรงดันเมื่อหยุดนิ่งและการขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค พบว่า ผลผลิตที่ดีที่สุดโดยสัมพันธ์กับแรงดัน ค่าแรงดันคงที่ในส่วนการศึกษาการผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซของสมหมายและคณะ[4] ได้ทำหัวพ่นแบบ Free-Fall ที่มีการกำหนดตัวแปรที่ทำการศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิเทน้ำโลหะและอัตราการไหลของก๊าซ ผลจากการศึกษา พบว่า อุณหภูมิเทน้ำโลหะ

และอัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันมีผลทำให้ขนาด รูปร่างและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 มีค่าแตกต่าง ซึ่งรูปร่างของอนุภาคผงโลหะที่ได้มีลักษณะรูปร่างเป็นเม็ดอนุภาคทรงกลม

ในปีค.ศ. 1998 Ridder และคณะ [55] ได้ทำการถ่ายภาพด้วยความเร็วสูงและเทคนิคการกระเจิงด้วยเลเซอร์เพื่อกำหนดกลไกการเกิดอนุภาคและขนาดของอนุภาคสิ่งนี้ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับความเข้าใจในกระบวนการเพื่อให้สามารถพัฒนาระบบป้อนกลับที่มีประสิทธิภาพเพื่อควบคุมกระบวนการทำให้เป็นด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ต่อมาในปี 1999 Sedat O' zbilin และคณะ[56] ได้ศึกษาอิทธิพลของแรงดันของแก๊สที่มีผลต่อรูปร่างอนุภาคของผงอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม หัวพ่นที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ Confined ก๊าซอาร์กอนเป็นตัวกลางที่ใช้แรงดันที่ 1.05-1.85 เมกะปาสกาล และก๊าซฮีเลียมแรงดันที่ใช้ 1.03-1.77 เมกะปาสกาล ทำการตรวจสอบของผงโลหะโดย SEM พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผงแมกนีเซียมมีการกระจายตัวของขนาดระหว่าง 12.97 ถึง 24.13 ไมโครเมตร และผงอะลูมิเนียมมีการกระจายตัวของขนาดความแตกต่างกันระหว่าง จาก 9.2 ถึง 20.7 ไมโครเมตร ผลในการทดลองอนุภาคมีขนาดเล็กจะมีลักษณะทรงกลม ในปี ค.ศ. 2000 Mates และคณะ [57] นำเสนอรูปแบบหัวพ่นที่ต่อกันสี่แบบที่แตกต่างกัน สามแบบที่มีจำนวนหัวพ่นแบบแยกส่วน และอีกแบบที่มีร่องวงแหวน การวัดแรงดัน Axial Pitot ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่าง ความยาวของเจ็ตเหนือเสียง และแรงดัน ประมวลผลภาพพิสูจน์แล้วว่า การแตกของหยดเกิดจากแรงดันแต่ไม่ได้จำกัดอยู่ที่บริเวณปลายหัวฉีด: การทำให้เป็นผงโลหะยังคงห่างจากทางออกของท่อเท ดังนั้นระยะที่แรงดันสูงก็มีบทบาทสำคัญเช่นกัน ปรับปรุงปฏิริยาระหว่างของเหลวและก๊าซ การผลิตผงอนุภาคดีบุกด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซโดยใช้ดีบุกบริสุทธิ์ร้อยละ 99.6 เป็นสารตั้งต้นในการผลิตของกิตติชัย พักพันธ์ [58] ตัวแปรที่ได้ทำการศึกษาในที่นี้ คือ ความดันก๊าซ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อลำเลียงน้ำโลหะและน้ำโลหะอุณหภูมิเหนือจุดหลอมละลายของดีบุก เพื่อศึกษาการออกแบบหัวพ่น พบว่า การพ่นด้วยแรงดันก๊าซที่ต่ำกว่า 2 เมกะปาสกาล หัวพ่นแบบ Close-Coupled จะให้สัดส่วนน้ำหนักของอนุภาคผงดีบุกที่มีขนาด 180 ไมโครเมตร ปริมาณมากกว่าการใช้หัวพ่นแบบ Free-Fall ในขณะที่การพ่นด้วยแรงดันก๊าซที่มากกว่า 2 เมกะปาสกาล หัวพ่นทั้งสองแบบให้ปริมาณอนุภาคผงดีบุกที่มีขนาด 180 ไมโครเมตร การทดลองผลิตผงดีบุกด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ของ Rahmi U' nal [59] ออกแบบหัวพ่นเป็นแบบ Confined Nozzle การเพิ่มแรงดันและอัตราการไหลของก๊าซ พบว่า การศึกษาอัตราการไหลของโลหะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซและความยาวของหัวพ่นที่ยื่นเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ได้ขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากขึ้น Lydia Achelis และ Volker Uhlenwinkel [60] ปีค.ศ. 2008 ศึกษาแรงดัน

ก๊าซที่ใช้ในการผลิตผงโลหะด้วยการอบการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ อะตอมไมเซชันสองแบบ ขั้นแรกให้ Pressure Swirl Atomiser พ่นด้วยหัวพ่นแบบมีศูนย์กลางเพื่อสร้างหยดทรงกลม ปกติในการผลิตผงโลหะด้วยการอบการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ จะมีเม็ดโลหะขนาดเล็กเกาะที่ผิวของอนุภาคของผงเอง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านั้นจำเป็นต้องลดการหมุนวนของก๊าซภายในห้องอะตอมไม การทดลองใช้ดีบุกบริสุทธิ์ผงที่ได้มาวิเคราะห์โดยเลนส์เลเซอร์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสแกน ในขณะที่ทำการศึกษการผลิตอนุภาคผงโลหะอลูมิเนียมของ Mullis A.M และคณะ [61] ปีค.ศ. 2011 ใช้หัวพ่นแบบ Close-Coupled ที่มีลักษณะแตกต่างกัน 4 รูปแบบ เทคนิคการถ่ายภาพนิ่งความเร็วสูงเพื่อให้เห็นภาพพฤติกรรมการไหลและการแตกตัวเป็นละอองของอนุภาค ซึ่งบริเวณปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะมีลักษณะเว้าเข้ามารับการปะทะหรือกระแทก ผลจากการศึกษาพบว่าหัวพ่นรูปแบบที่ 4 มีความเร็วของการไหลปะทะหรือกระแทกของก๊าซกับลำกระแสน้ำโลหะเพื่อให้เกิดการแตกตัวเป็นละออง ลดการสูญเสียพลังงานจลน์และความเร็วของก๊าซที่ใช้ในการทำให้น้ำโลหะแตกตัวสามารถผลิตอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็ก สำหรับการผลิตผงโลหะ Atomization แบบสองเฟส (Gas Solid Two Phase) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการผลิตผงโลหะของ Chaorun Sic [62] ปี ค.ศ. 2017 วัสดุที่ใช้ 7055Al ผลการทดลอง แสดงถึงข้อดีและคุณลักษณะเฉพาะของการทดลอง เมื่อความดันแก๊สอาร์กอน 0.6 เมกะปาสคาล และอัตราการไหลอนุภาคเหล็ก $235.6 \text{ g / min}^{-1}$ พบว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของการกระจายตัว (D_{50}) ที่ผลิตได้มีขนาด 22.8 ไมโครเมตร ซึ่งลดลง 52.7% เมื่อเทียบกับการพ่นก๊าซแบบเดิมภายใต้พารามิเตอร์การทดลองเดียวกัน $D_{50} = 48.2$ ไมโครเมตร ในปีค.ศ. 2020 Ernesto Urionabarrenetxea และคณะ [63] หัวพ่นอะตอมไมซ์แบบ Close-Coupled ถูกวิเคราะห์จากการทดลองทั้งหมด 66 การทดลอง ผงโลหะบริสุทธิ์สามชนิด (ทองแดง ดีบุกและเหล็ก) และโลหะผสมสองชนิด (ทองแดง Cu-15 wt% Sn และเหล็กกล้าไร้สนิม SS 316 L) ไนโตรเจน อาร์กอนและฮีเลียมถูกใช้เป็นแก๊สอะตอมไมซ์ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนก๊าซต่อโลหะของอัตราการไหลของปริมาตร (GMRV) ในการทำนายค่ามัธยฐานขนาดอนุภาคของผงที่ผลิตในงานนี้ ศึกษาสัญญาณวิทยาของผงที่ผลิตขึ้นโดยการสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ส่วนบทความมีการเสนอเทคโนโลยีใหม่ในการเตรียมผงโลหะทรงกลม ผงโลหะทรงกลมหลายชนิด โดยใช้เทคโนโลยีการหลอมโลหะทรงกลมที่อุณหภูมิสูง (HRS) ของ Qipeng Bao และคณะ [64] ปีค.ศ. 2021 ทดลองใช้ผงทองแดง ศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนและอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของผงทองแดง HRS พบว่า ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของอนุภาค การขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค อนุภาค ปริมาณออกซิเจน ความหนาแน่นรวม ความสิ้นไหล และอัตราการทำให้เป็นทรงกลมของผงทองแดง ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงข้อดีเฉพาะบางประการของเทคโนโลยี HRS ในการเตรียมผง

โลหะทรงกลม เมื่ออุณหภูมิอยู่ที่ 1,623 เคลวิน อนุภาคของผงทองแดง HRS จะเป็นทรงกลมที่สมบูรณ์แบบ ซึ่งมีพื้นผิวเรียบและมีความหนาแน่นสูงโดยไม่มีรูพรุนอยู่ภายใน

จากการสำรวจงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้ว การผลิตอนุภาคผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ มีปัจจัยต่างๆที่สำคัญ ประกอบไปด้วย พฤติกรรมการแตกตัวของน้ำโลหะกลายเป็นละอองน้ำโลหะตามมาด้วยการเปลี่ยนแปลงเป็นอนุภาคผงโลหะ ชนิดหรือรูปแบบของหัวพ่น และปัจจัย ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตอนุภาคผงโลหะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิต รูปร่าง ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะชนิดต่างๆ ที่ได้ศึกษามาทั้งหมด ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางซึ่งมีประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยการผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซต่อไป



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการต่างๆ เพื่อทำการทดลองศึกษาวิจัย ซึ่งประกอบด้วย วัสดุต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เครื่องมืออุปกรณ์ โดยเครื่องมืออุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลองประกอบด้วย เครื่องอะตอมไมเซอร์ด้วยก๊าซแนวตั้ง (Vertical Gas atomizer Machine) และหัวพ่นก๊าซแบบ Closed-couple ที่มีรูปแบบหรือลักษณะที่แตกต่างกัน 2 แบบ วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่มีส่วนผสมของโลหะเงินและทองแดงเป็นหลัก วัสดุสิ้นเปลืองที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยเบ้าหลอมแกรไฟต์ แท่ง Stopper Graphite ก๊าซตัวกลางที่ทำให้โลหะเกิดการแตกตัวเป็นละอองของเหลว และนอกจากนี้ยังรวมถึงรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการต่างๆ ซึ่งจะได้กล่าวถึงอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.1 วัสดุ และวัสดุสิ้นเปลืองที่ใช้สำหรับการทดลองศึกษาวิจัย

3.1.1 โลหะเงินสเตอร์ลิง 925

การเตรียมวัสดุโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ใช้สำหรับการทดลอง ผู้วิจัยดำเนินการเตรียมโดยการนำเม็ดโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.99% ที่ผลิตโดยบริษัท บางกอกแอสเสย์ ออฟฟิส จำกัด ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1ก) มาทำการหลอมผสมกับเม็ดโลหะทองแดงบริสุทธิ์ 99.9% ที่ผลิตโดยบริษัท เอส เอช แอนด์ ซันส์ จำกัด ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1ข) โดยเริ่มจากการนำโลหะเงินบริสุทธิ์มาหลอมผสมรวมกับทองแดงบริสุทธิ์ในอัตราส่วนเงิน 92.5 wt% และทองแดง 7.5 wt% เพื่อให้ได้โลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ตรงกับความต้องการของหัวข้อการวิจัย ซึ่งเป็นโลหะเงินผสมที่นิยมใช้สำหรับการทำเครื่องประดับตามมาตรฐาน มอก.21-2515 ดังแสดงในรูปที่ 3.1



ก) เม็ดโลหะเงินบริสุทธิ์



ข) เม็ดทองแดงบริสุทธิ์

รูปที่ 3.1 เม็ดโลหะเงินและทองแดงบริสุทธิ์

3.1.2 การหลอมผสมโลหะเงินสเตอร์ลิง 925

การหลอมผสมโลหะเงินบริสุทธิ์กับทองแดงบริสุทธิ์เพื่อเตรียมเป็นวัตถุดิบโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ผู้วิจัยดำเนินการหลอมผสมด้วยเครื่องหลอมผสมเทเมนต์โลหะ ยี่ห้อ Indutherm รุ่น GU500 micro ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา [65] ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.2ก) และ 3.2ข) ซึ่งทำการหลอมผสมโลหะภายในระบบปิด ปกคลุมผิวหน้าโลหะด้วยก๊าซไนโตรเจน โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการหล่อหลอมผสมโลหะ ซึ่งทำการหลอมผสมโลหะที่อุณหภูมิ 1200°C และหลอมแช่ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 5 นาที ดังรายละเอียดการดำเนินการที่แสดงในรูปที่ 3.2ค) – 3.2ง) หลังจากทีโลหะหลอมผสมเข้าด้วยกันได้ตามระยะเวลาที่กำหนด จึงทำการยกแท่ง stopper เพื่อให้หน้าโลหะไหลลงไปในถังน้ำที่รองรับอยู่ด้านล่างห้องหลอมผสมโลหะ โดยส่วนผสมของโลหะที่ทำการทดลองจำนวน 1 กิโลกรัม ประกอบด้วยโลหะเงินบริสุทธิ์ 92.5 wt.% ทองแดง 7.5 wt.% ซึ่งหลังจากทำการทดลองหลอมผสมโลหะชนิดต่างๆ แล้วได้ตัวอย่างเมตโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 เครื่องหลอมผสมเทเมนต์โลหะ



รูปที่ 3.3 เม็ดโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ได้จากการเตรียม

3.1.3 วัสดุสิ้นเปลืองสำหรับการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925

วัสดุสิ้นเปลืองสำหรับการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ประกอบด้วย
 เบ้าหลอมแกรไฟต์ แท่ง Stopper Graphite ท่อลำเลียงน้ำโลหะและฉนวนเซรามิก ก๊าซไนโตรเจนความ
 บริสุทธิ์ 99.99 ดังรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วัสดุสิ้นเปลืองสำหรับการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925

3.2 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการดำเนินการทดลองศึกษาวิจัยผลิตผงโลหะ

3.2.1 เครื่องหลอมผสมเทเม็ดโลหะ

เครื่องหลอมผสมเทเม็ดโลหะที่ใช้สำหรับการดำเนินการหลอมผสมเตรียมเม็ดโลหะเงินสเตอร์ลิง ผู้วิจัยเลือกใช้เครื่องหลอมโลหะ ยี่ห้อ Indutherm รุ่น GU500 micro ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.2 ก) และ 3.2 ข) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา โดยเครื่องหลอมผสมโลหะดังกล่าว เป็นเครื่องหลอมระบบไฟฟ้าเหนี่ยวนำความร้อน ห้องหลอมผสมโลหะเป็นแบบระบบปิด สามารถควบคุมบรรยากาศในการหลอมให้ได้ตามต้องการ โดยปราศจากออกซิเจนด้วยการเติมก๊าซเฉื่อย (ไนโตรเจน หรืออาร์กอน) เพื่อทำหน้าที่เป็นก๊าซปกคลุม ควบคุมบรรยากาศของการหลอมให้ปราศจากออกซิเจน

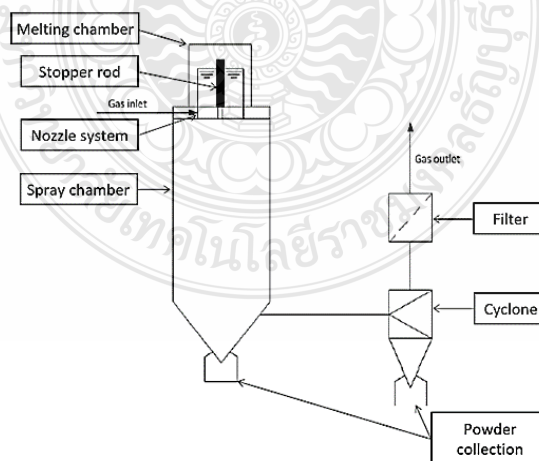
3.2.2 เครื่องอะตอมไมเซอร์ด้วยก๊าซแนวตั้งที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัย

เครื่องผลิตอนุภาคผงโลหะที่ใช้สำหรับการดำเนินการทดลองศึกษาวิจัยในที่นี้ เป็นเครื่องอะตอมไมเซอร์ด้วยก๊าซแนวตั้ง (Vertical Gas Atomizer Machine) ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (มทร.อีสาน) โดยเครื่องดังกล่าว เป็นเครื่องต้นแบบที่ได้จากการวิจัยพัฒนา ออกแบบและสร้างขึ้นโดยคณะวิจัยของสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มทร.อีสาน นครราชสีมา ผศ.สุรัตน์ วรรณศรีและคณะ [65] เป็นเครื่องมือเหมาะสำหรับการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะสำหรับโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมละลายสูง โดยใช้หลักการของการพ่นก๊าซเพื่อทำให้ลำกระแสน้ำโลหะหลอมเหลวเกิดการแตกตัวเป็นหยดหรือละอองด้วยก๊าซที่พ่นออกจากหัวพ่น และอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความดันของก๊าซเพื่อทำให้ก๊าซเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างรวดเร็ว เมื่อก๊าซพุ่งชนกระแทกลำกระแสน้ำโลหะที่หลอมละลาย ทำให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัวออกในลักษณะเดียวกับละอองน้ำ หลังจากนั้นละอองน้ำโลหะที่แตกตัวจะเกิดการแข็งตัวและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว และถูกแรงดันจากก๊าซผลักเข้าไปในถังหรือภาชนะรองรับการพ่นก๊าซ (Spray Tank or Atomized Chamber) เพื่อเก็บรวบรวมอนุภาคผงโลหะ โดยเครื่องอะตอมไมเซอร์ด้วยก๊าซแนวตั้งดังกล่าว ถังหรือภาชนะรองรับการพ่นก๊าซมีความสูงเท่ากับ 6 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังมีค่าเท่ากับ 0.970 เมตร ตัวถังหรือทำจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ห้องหลอมโลหะสามารถทำการหลอมโลหะได้ครั้งละ 1 กิโลกรัม เป็นห้องหลอมโลหะระบบปิดที่สามารถควบคุมบรรยากาศของการหลอมโลหะได้ด้วยการใช้ก๊าซเฉื่อย (ไนโตรเจน หรืออาร์กอน) ทำหน้าที่ปกคลุมผิวหน้าโลหะ เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างน้ำโลหะกับ

ออกซิเจนในบรรยากาศในระหว่างที่ทำการหล่อหลอมผสมโลหะให้เป็นเนื้อเดียวกันและในระหว่างที่ทำการพ่นละอองน้ำโลหะด้วยก๊าซเพื่อให้เกิดการอะตอมไมซ์ ซึ่งมีรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 เครื่องอะตอมไมเซอร์ด้วยก๊าซแนวตั้งที่ใช้สำหรับการดำเนินการทดลองผลิตอนุภาคโลหะผง
เงินสเตอร์ลิง 925 [65]



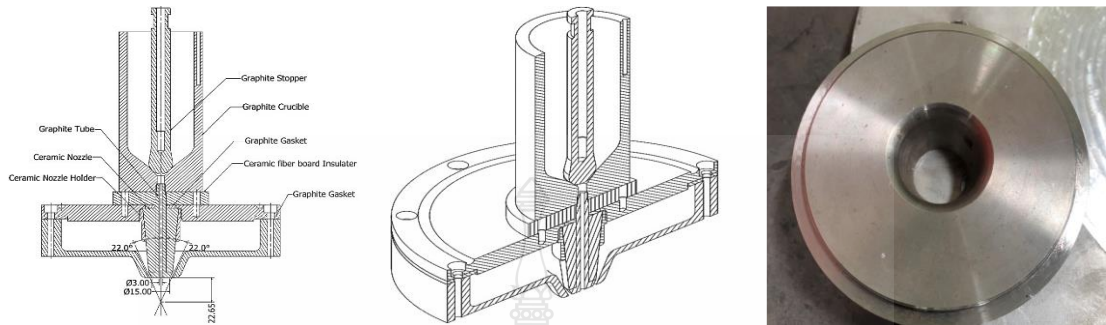
รูปที่ 3.6 แผนภาพรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องอะตอมไมเซอร์ด้วยก๊าซแนวตั้ง

3.2.3 หัวพ่นก๊าซที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัย

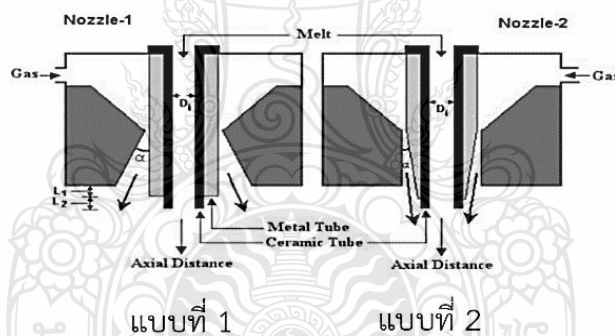
การออกแบบสร้างหัวพ่นก๊าซสำหรับการทดลองผลิตผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ต้องอาศัยองค์ความรู้หลายแขนงนอกเหนือจากความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการอะตอมไมซ์ด้วยก๊าซ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบและกำหนดอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลอง เครื่องอะตอมไมเซชันมีบทบาทสำคัญสำหรับการทำให้เกิดการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ โดยหัวพ่นทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของลำกระแสน้ำโลหะหลอมเหลว (Melt Stream) ให้ปะทะกับการไหลของก๊าซที่เป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดการอะตอมไมซ์ในตำแหน่งที่ต้องการ การวิจัยพัฒนาเกี่ยวกับหัวพ่นมาอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาหัวพ่นช่วยให้สามารถพัฒนาการผลิตอนุภาคผงโลหะให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กลงและละเอียดขึ้น [66,67]

1) หัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 (Nozzle 1) ในการออกแบบหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 ซึ่งเป็นหัวพ่นแบบ Close-Coupled Nozzle ที่มีช่องปล่อยก๊าซช่องเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srivastava V. C. และคณะ [68] ในปี 2014 ที่ได้ทำการศึกษาการผลิตอนุภาคผงโลหะผสม Al – 6.5 wt-% Si โดยใช้หัวพ่นแบบ Close-Coupled มีช่องปล่อยก๊าซช่องเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ โดยมีการติดตั้งท่อเซรามิก (Ceramic tube) เพื่อทำหน้าที่เป็นท่อลำเลียงน้ำโลหะอยู่ในบล็อกโลหะ (Metal Tube) ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.8 โดยบล็อกโลหะที่ทำหน้าที่ประคองท่อเซรามิกและป้องกันปัญหาการช็อคความเย็น (Cooling Shock) ของท่อเซรามิกที่เป็นสาเหตุทำให้ท่อเซรามิก แตกร้าวเสียหายจากการเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างฉับพลันในขณะที่ทำการพ่นด้วยก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำโลหะเป็นอย่างมาก โดยบล็อกโลหะที่ติดตั้งมีลักษณะแตกต่างกัน 2 รูปแบบ โดยการทำให้บริเวณทางออกของก๊าซมีลักษณะแตกต่างกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการขยายตัวของก๊าซที่ออกจากหัวพ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตอนุภาคผงโลหะ แต่ไม่มีการบอกรายละเอียดเกี่ยวกับขนาดลำกระแสน้ำโลหะ มุมปะทะของก๊าซอะตอมไมซ์ (Atomizer gas) กับลำกระแสน้ำโลหะ และระยะปะทะหรือระยะโฟกัสที่ลำกระแสน้ำโลหะถูกกระทบด้วยก๊าซ ผลจากการศึกษา พบว่า หัวพ่นรูปแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพในผลิตหรือการทำให้ น้ำโลหะแตกตัวเป็นละอองได้ดีกว่า โดยขนาดอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดเล็กกว่า จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นของสมหมาย และคณะ [4] และของ Srivastava V. C. และคณะ [68] จึงนำมาเป็นแนวทางและหลักการในการออกแบบหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 (Nozzle 1) ซึ่งเป็นหัวพ่นแบบ Close-Coupled Nozzle ที่มีช่องปล่อยก๊าซช่องเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ โดยรูปแบบของหัวพ่นก๊าซลักษณะนี้มีประสิทธิภาพในผลิตหรือการทำให้ น้ำโลหะแตกตัวเป็นละอองได้ดีกว่า เนื่องจากออกแบบให้มีท่อลำเลียงน้ำโลหะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร เท่าเดิมเช่นเดียวกับผลงานวิจัยของสมหมาย และคณะ [4] แต่เปลี่ยนมุมปะทะของก๊าซอะตอมไมซ์กับลำกระแสน้ำโลหะให้มีค่าเท่ากับมุม

22 องศา ส่งผลให้มีระยะปะทะหรือระยะโฟกัสที่ลำกระแสน้ำไหลจะถูกกระแทกด้วยก๊าซมีค่าลดลงเหลือเท่ากับ 22.65 มิลลิเมตร



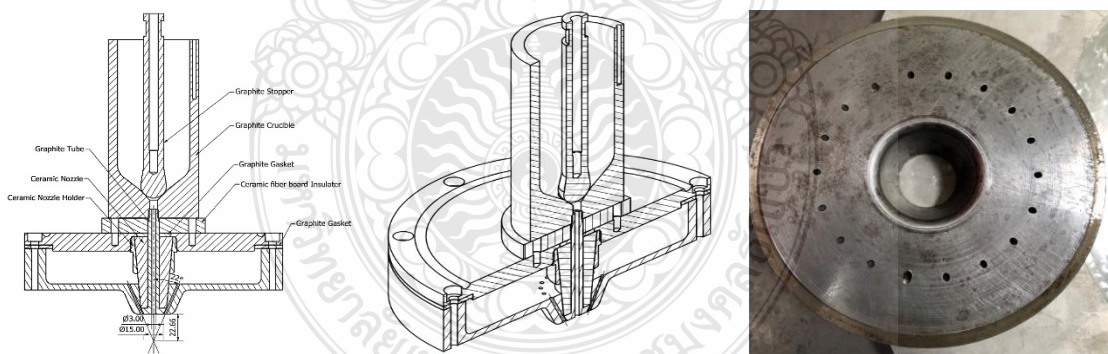
รูปที่ 3.7 ลักษณะของหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 ซึ่งเป็นหัวพ่นแบบ Close-Coupled Nozzle 1 ที่มีช่อง
ปล่อยก๊าซช่องเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ



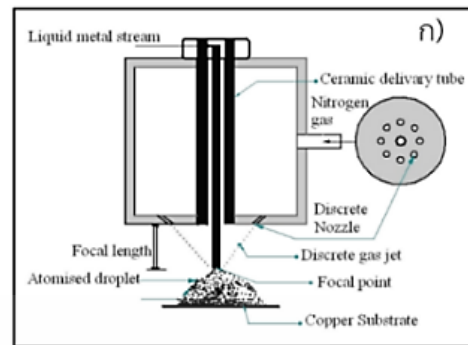
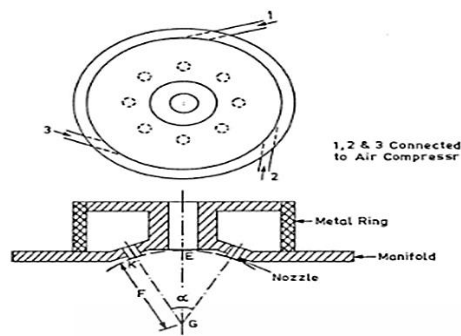
รูปที่ 3.8 จากงานวิจัยของ Srivastava V. C. และคณะ [60]

2) หัวพ่นก๊าซแบบที่ 2 (Nozzle 2) ในการออกแบบหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2 ซึ่งเป็นหัวพ่นแบบ Close-Coupled Nozzle ที่มีช่องปล่อยก๊าซหลายรูรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ โดยออกแบบให้มีท่อลำเลียงน้ำโลหะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร เท่าเดิมเช่นเดียวกับหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 แต่มีการดัดแก้ไขรายละเอียดบางอย่างเพิ่มเติม โดยการเปลี่ยนลักษณะของช่องปล่อยก๊าซที่มีลักษณะเป็นรูปล่อยก๊าซจำนวน 18 รู รอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร มุมปะทะของก๊าซจะตอมไม่ซัดกับลำกระแสน้ำโลหะกำหนดให้มีค่าเท่าเดิมมุม 22 องศา และมีระยะปะทะหรือระยะโฟกัสที่ลำกระแสน้ำโลหะถูกกระแทกด้วยก๊าซมีค่าลดลงเหลือเท่ากับ

22.65 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 ดังรายละเอียดต่างที่แสดงด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.9 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh และคณะ [69] ที่ได้ออกแบบหัวพ่นก๊าซแบบ Free-Fall Nozzle ที่มีช่องปล่อยก๊าซหลายรูรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะจำนวน 4 และ 6 รู โดยมีมุมปะทะของก๊าซอะตอมไม่ซึ่กับลำกระแสน้ำโลหะมีค่าเท่ากับมุม 20 40 และ 60 องศา ดังแผนภาพแสดงลักษณะของการออกแบบหัวพ่นก๊าซที่แสดงในรูปที่ 3.10 แต่ไม่มีการบอกรายละเอียดเกี่ยวกับระยะปะทะหรือระยะโพกัสที่ลำกระแสน้ำโลหะถูกกระแทกด้วยก๊าซและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูปล่อยก๊าซ และผลที่ได้จากการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะ พบว่า จำนวนรูปล่อยก๊าซที่เพิ่มขึ้นและมุมปะทะของก๊าซอะตอมไม่ซึ่กับลำกระแสน้ำโลหะที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความเร็วของก๊าซลดลงตามแนวแกน แต่อัตราการไหลเพิ่มขึ้นจากการที่มีจำนวนรูปล่อยก๊าซเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กลงและมีปริมาณเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ การออกแบบหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2 ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dayanand และคณะ [70] ที่ได้ทำการศึกษาการผลิตอนุภาคผงโลหะผสมของ Al-17Si ที่ผลิตด้วยกระบวนการอะตอมไม่เซชันด้วยก๊าซ โดยใช้หัวพ่นแบบ Free-Fall และทดสอบด้วยหัวพ่นจำนวน 3 หัวพ่น ซึ่งแต่ละหัวพ่นมีรูปล่อยก๊าซจำนวน 6 รู แต่ละมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร รูเท้าน้ำโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร มุมองศาของการปะทะกับลำกระแสน้ำโลหะแตกต่างกัน 15 30 และ 50 องศา เพื่อศึกษาอิทธิพลของมุมองศาของการปะทะที่มีผลทำให้ความเร็วของก๊าซลดลงตามแนวแกน การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำโลหะหลอมเหลวส่งผลได้้อนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็ก

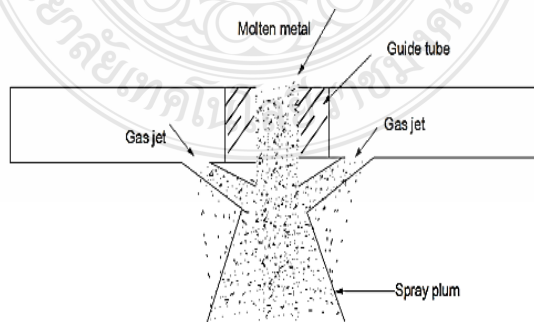


รูปที่ 3.9 ลักษณะของหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 ซึ่งเป็นหัวพ่นแบบ Close-Coupled Nozzle 2 แบบที่มีช่องปล่อยก๊าซหลายรูรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ



รูปที่ 3.10 จากงานวิจัยของ Singh และคณะ[69]

หัวพ่นก๊าซแบบ Close-Coupled เป็นหัวพ่นก๊าซใช้หลักการของการทำให้ก๊าซพุ่งผ่านหัวพ่นเข้าชนกระแทกลำกระแสน้ำโลหะหลอมเหลวตรงบริเวณที่อยู่ห่างจากปลายท่อเลี้ยงน้ำโลหะ (Guide Tube) ด้วยระยะทางที่สั้นกว่าหัวพ่นก๊าซแบบ Free-Fall ซึ่งช่องพ่นก๊าซของหัวพ่นก๊าซแบบ Close-Coupled กับท่อลำเลี้ยงน้ำโลหะถูกสร้างให้เป็นชิ้นเดียวกันหรืออยู่ติดกันมากกว่าหัวพ่นก๊าซแบบ Free-Fall ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.11 [71,72] ซึ่งมีข้อดีคือ ลดการสูญเสียพลังงานจลน์และความเร็วของก๊าซที่ใช้ในการทำให้น้ำโลหะแตกตัวสามารถผลิตอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็กและละเอียดกว่า แต่มีข้อเสียคือ ก๊าซที่ใช้ทำให้น้ำโลหะเหลวแตกตัวเป็นละอองจะหล่อเย็นอุปกรณ์ลำเลี้ยงน้ำโลหะที่ร้อนกว่า ทำให้เกิดปัญหา Thermal Shock ได้ อัตราการไหลของก๊าซบริเวณปลายเปิดของอุปกรณ์ลำเลี้ยงน้ำโลหะอาจก่อให้เกิด Back Pressure หรือ Suction Effect อย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่ง Back Pressure เป็นอุปสรรคต่อการไหลของน้ำโลหะ



รูปที่ 3.11 ลักษณะและหลักการของหัวพ่นก๊าซแบบ Close-Coupled

3.2.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งน้ำหนักที่ใช้สำหรับการตรวจวัดวัตถุดิบและวัสดุโลหะชนิดต่างๆ ในการทดลอง ประกอบด้วย

- 1) เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 กรัม ยี่ห้อ AND Model EK-1200i ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 1,200 กรัม ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.12ก)
- 2) เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 กรัม ยี่ห้อ AND Model EK-610i ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 600 กรัม ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.12ข)



เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 กรัม



เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 กรัม

รูปที่ 3.12 เครื่องชั่ง ยี่ห้อ AND Model EK1200i

3.2.5 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน หรือที่เรียกว่า Flow Meter หรือเครื่องวัดอัตราการไหล เป็นอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับการวัดค่าปริมาณการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้สำหรับการทำให้โลหะเกิดการแตกตัวเป็นละอองของเหลว การดำเนินการวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน ยี่ห้อ SMC Model PF2A7 Series ที่มีการวัดอยู่ในช่วง 150 – 3000 ลิตร/นาที ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดการไหลของก๊าซไนโตรเจน วัดอัตราการไหลของก๊าซโดยใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 3.13 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ (Gas Flow Rate)

3.2.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิน้ำโลหะ

การวัดอุณหภูมิน้ำโลหะที่ใช้ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิล Type R ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.14 สำหรับการวัด เนื่องจากอุปกรณ์สำหรับการวัดอุณหภูมิที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำสูง เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิล Type R ทำจากโลหะผสมของแพลตินัมและโรเดียม (Platinum/Rhodium) ที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี โดยมีช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 0°C ถึง 1600°C ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดอุณหภูมิน้ำโลหะเงินสเตอร์ 925 ที่ต้องการทดลองที่อุณหภูมิไม่เกิน 1300°C

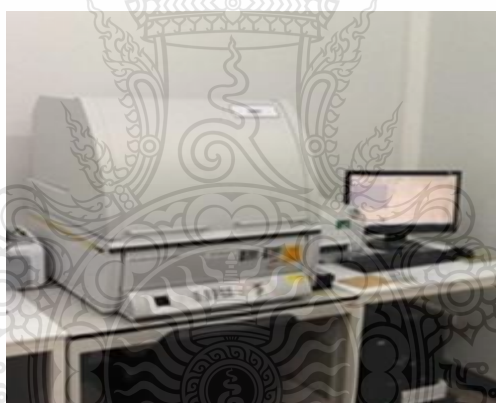


รูปที่ 3.14 เทอร์โมคัปเปิล Type R [73]

3.3 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ตรวจสอบต่างๆ ที่ใช้สำหรับการดำเนินการศึกษาวิจัย

3.3.1 เครื่องวิเคราะห์ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925

เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์การวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยเครื่อง X - Ray Fluorescence Spectrometer ยี่ห้อ Fischer รุ่น XDAL ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.15 จากศูนย์มาตรฐานอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา เครื่อง X - Ray Fluorescence Spectrometer ยี่ห้อ Fischer รุ่น XDAL เป็นอุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูง ใช้สำหรับการวิเคราะห์ชั้นบางๆ และการวิเคราะห์วัสดุในระดับ ppm (Parts Per Million) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหมาะสำหรับการวัดความหนาของชั้นเคลือบที่บางมากๆ (น้อยกว่า 0.05 ไมโครเมตร) และการวิเคราะห์วัสดุที่ซับซ้อน และนอกจากนี้ เครื่อง X - Ray Fluorescence รุ่นนี้เป็นเครื่องที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะมีและโลหะชนิดอื่นในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทย



รูปที่ 3.15 เครื่อง X - Ray Fluorescence Spectrometer วิเคราะห์ตรวจสอบส่วนผสมของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925

3.3.2 เครื่องร่อนคัดแยกอนุภาคผงโลหะ

เครื่องร่อนคัดแยกอนุภาคผงโลหะเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการคัดแยกและกรองอนุภาคผงโลหะให้มีขนาดอนุภาคที่เท่ากัน เพื่อให้ได้ผงโลหะที่มีคุณภาพสูงและเหมาะสมสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดการร่อนคัดแยกขนาดอนุภาคผงโลหะออกเป็นช่วงตามขนาดของตะแกรงร่อนที่มีอยู่ ซึ่งประกอบด้วย ตะแกรงร่อนขนาด 100 75 และ 50 ไมโครเมตร โดยเครื่องยี่ห้อ Haver & Boecker Model Haver EML 20 Digital Plus ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่

3.16 ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา



รูปที่ 3.16 ตะแกรงและเครื่องร่อนอนุภาคผงโลหะ

3.3.3 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบต่างๆ ของอนุภาคผงโลหะ

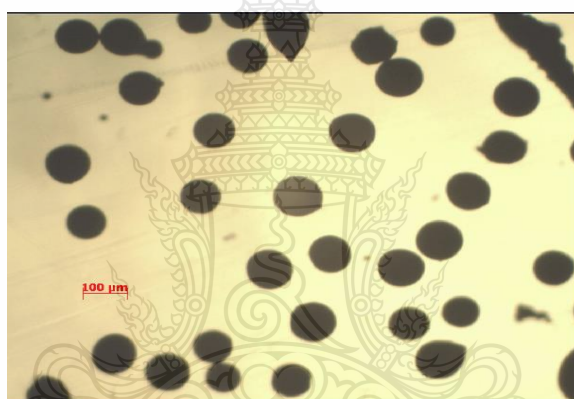
เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบต่างๆ ของอนุภาคผงโลหะ ประกอบด้วย การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและจุลภาคของอนุภาคผงโลหะ ซึ่งสามารถแบ่งออกตามลักษณะงานที่ต้องการวิเคราะห์ตรวจสอบดังต่อไปนี้

- 1) การวิเคราะห์ตรวจสอบลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะ
- 2) การวิเคราะห์ตรวจสอบลักษณะรูปร่างและโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคผงโลหะ
- 3) การวิเคราะห์ตรวจสอบความกลมของอนุภาคผงโลหะ
- 4) การวิเคราะห์ตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะ

การวิเคราะห์ตรวจสอบลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะคร่าวๆ ว่าอนุภาคผงโลหะมีลักษณะรูปร่างเป็นอย่างไร ซึ่งในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้การวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) ที่กำลังขยายต่ำ โดยทำการวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยกล้องยี่ห้อ Olympus รุ่น BX60M ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์มาตรวิทยาอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมาที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.17 และตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากการถ่ายภาพเพื่อวิเคราะห์ตรวจสอบลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ Olympus รุ่น BX60M

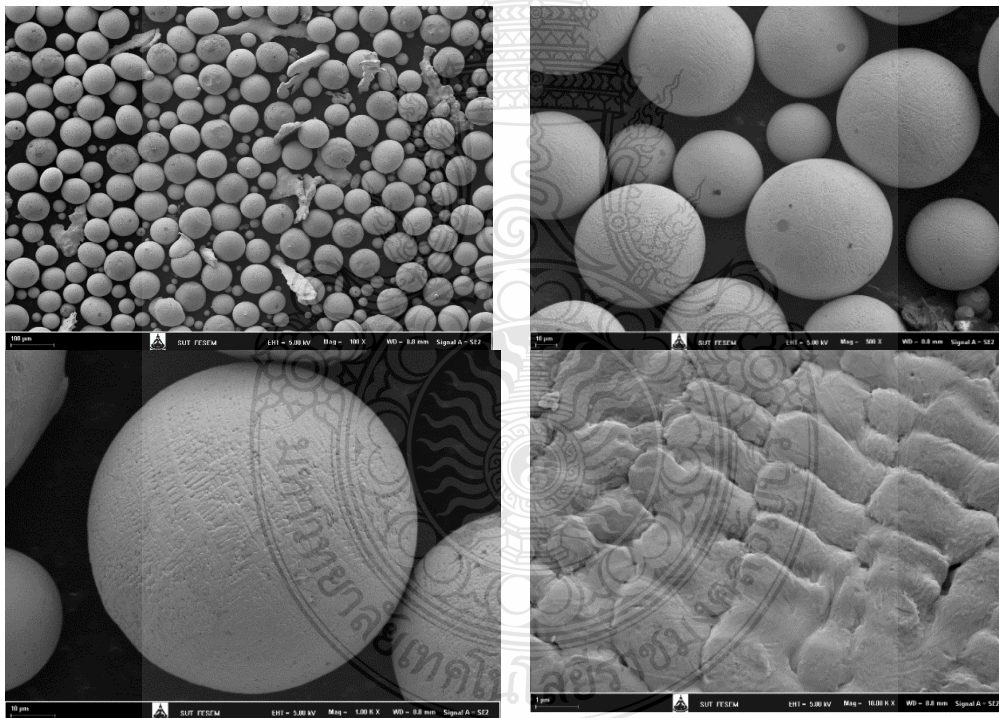


รูปที่ 3.18 ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อวิเคราะห์ตรวจสอบลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะในเบื้องต้น

การวิเคราะห์ตรวจสอบลักษณะรูปร่างและโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคผงโลหะในที่นี้ ดำเนินการวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีความคมชัดและกำลังขยายที่สูงขึ้นมากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่ใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบในเบื้องต้น เพื่อให้เห็นรายละเอียดเกี่ยวกับรูปร่างลักษณะพื้นผิวของเม็ดอนุภาคผงโลหะ ซึ่งในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้การวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ยี่ห้อยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Apreo 2 SEM ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.19 ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากอุทยานเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี และตัวอย่างภาพลักษณะรูปร่างและโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการวิเคราะห์ตรวจสอบมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

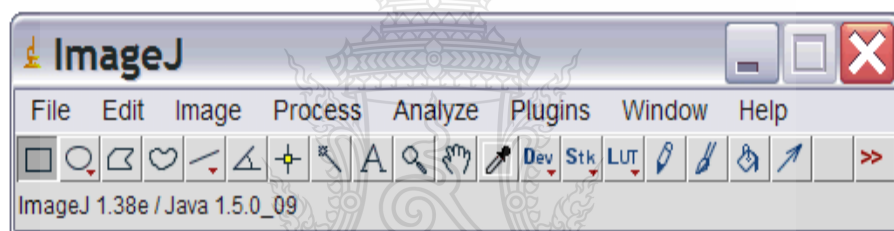


รูปที่ 3.20 ตัวอย่างภาพถ่ายลักษณะรูปร่างและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์ตรวจสอบความกลมของอนุภาคผงโลหะ เป็นการวิเคราะห์เกี่ยวกับคุณภาพของอนุภาค เนื่องจากเป็นคุณสมบัติหรือคุณลักษณะที่สำคัญของอนุภาค ซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทาง

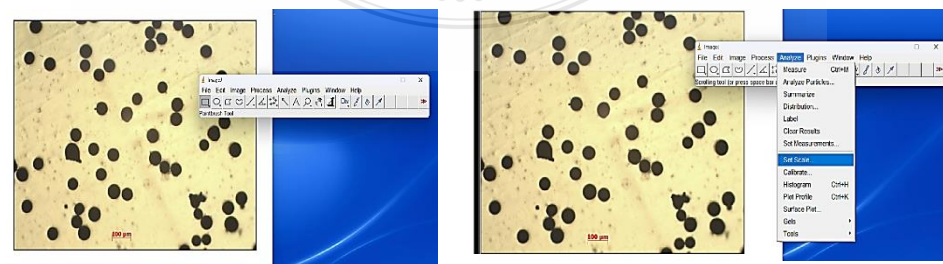
กายภาพและเคมีของวัสดุ เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรง และการกระจายตัวของอนุภาคในกระบวนการผลิต โดยอนุภาคที่มีความกลมสูงจะมีการไหลที่ดีขึ้น ซึ่งสำคัญในกระบวนการผลิตที่ต้องการการไหลของผงอย่างต่อเนื่อง เช่น การพิมพ์สามมิติและการฉีดขึ้นรูปโลหะ และนอกจากนี้ยังมีความสำคัญต่อการเคลือบผิวและการกระจายตัวในของเหลว โดยอนุภาคที่มีความกลมสูงจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่น้อยลง ทำให้การเคลือบผิวมีความสม่ำเสมอและมีคุณภาพสูงขึ้น อนุภาคที่มีความกลมสูงจะกระจายตัวในของเหลวได้ดีขึ้น ซึ่งมีความสำคัญในกระบวนการผลิตที่ต้องการการกระจายตัวของอนุภาคในของเหลว เช่น การผลิตสีและหมึกพิมพ์

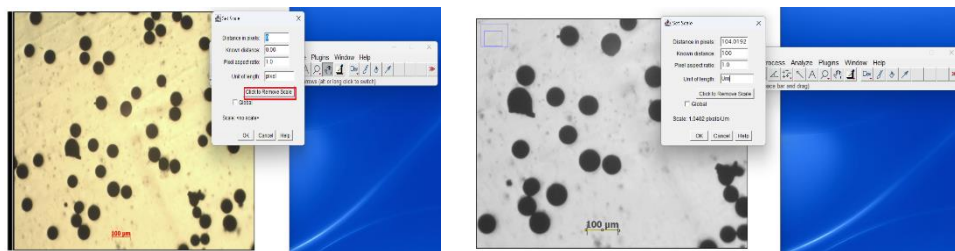
การวิเคราะห์ตรวจสอบความกลมของอนุภาคผงโลหะที่ดำเนินการในที่นี่ ดำเนินการวิเคราะห์ตรวจสอบโดยการนำภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมาวิเคราะห์ด้วย ซอร์ฟแวร์ ImageJ Version 2019 ซึ่งมีหลักการในการวิเคราะห์ตรวจสอบดังต่อไปนี้ ขั้นตอนแรกในการวัดค่า ImageJ เปิดโปรแกรม ImageJ แล้วเลือก File คลิกเปิดดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 โปรแกรม ImageJ

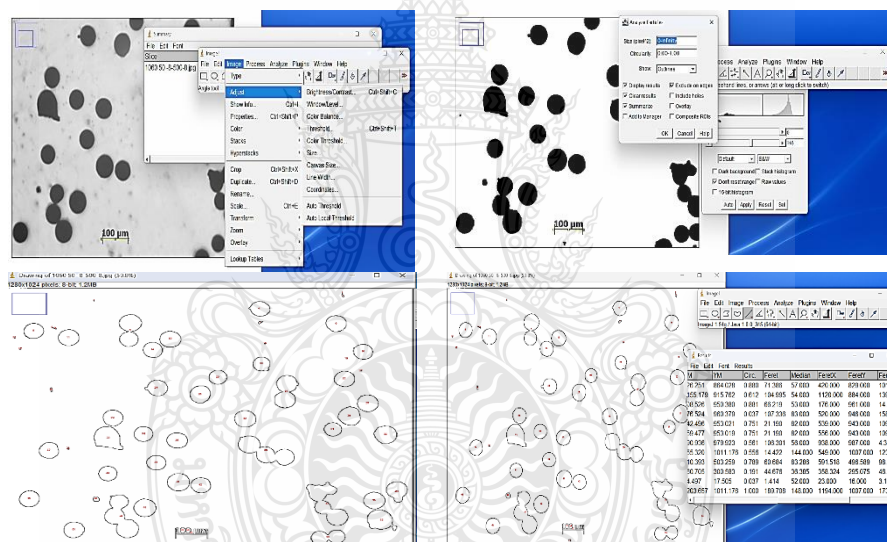
ขั้นตอนต่อไปทำการเลือกรูปที่ต้องการวัดค่าโดยการเปลี่ยน Type เป็น 8-bit จากนั้นเซตสเกล Straight Line Selection คลิกทับเส้นขนาด 100 ไมโครเมตร จากนั้นได้ค่าสเกลใส่ค่า Know Distance 100 ใส่หน่วยค่าวัดเป็น Um เพื่อให้เป็นไมโครเมตรแสดงดังรูป 3.22





รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการทำงานแต่ละขั้นตอน

ขั้นตอนต่อไปทำการเซตค่า Adjust เลือก Threshold เมื่อเลือกแล้วกดเซตแล้วเลือก Analyze Particles แล้วคลิกจะได้ค่า 0-Infinity ค่า Circularity 0.00-1.00 แล้วคลิก Ok ต่อจากนั้นจะได้ค่าความกลม แล้วโปรแกรมจะรันค่าความกลมที่ต้องการจะนำไปทำกราฟวิเคราะห์ต่อไปดังแสดงรูป 3.23



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะทำการวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยเครื่อง Laser Scattering Particle Size Distribution Analyses ยี่ห้อ Horiba รุ่น LA 950 โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความกว้างในการกระจายตัวของอนุภาคแสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค ยี่ห้อ Horiba รุ่น LA 950

3.4 ขั้นตอนการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925

ขั้นตอนการดำเนินการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.4.1 ทำการชั่งโลหะสเตอร์ลิง 925 ตามมาตรฐาน มอก 21-2515 ที่ได้จากการผสมโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.99% กับทองแดงบริสุทธิ์ 99.9% ด้วยอัตราส่วนเงินต่อทองแดง 92.5: 7.5 ที่ใช้สำหรับถาดสแตนเลสใช้ในผงโลหะนำไปชั่งน้ำหนัก การทดลองครั้งละ 1000 กรัมแสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 โลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ใช้ในการทดลอง

3.4.2. ติดตั้งหัวพ่นก๊าซแบบรูปล่อยก๊าซชุดเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ (Close-Coupled Nozzle 1) และ หัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ (Close-Coupled Nozzle 2) เข้ากับฝายึดหัวพ่นเพื่อเตรียมทำการทดลองในแต่ละครั้งลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ประกอบหัวพ่นเข้ากับฝาเครื่องอะตอมไมเซอร์

3.4.3. ต่อท่อก๊าซไนโตรเจนเข้ากับหัวพ่นและระบบอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ ของเครื่องแสดงดัง

รูปที่ 3.27

3.4.4. ทดลองเปิดวาล์วก๊าซเพื่อปรับตั้งค่าความดันก๊าซและวัดอัตราการไหลของก๊าซให้คงที่สำหรับการใช้พ่นละอองน้ำโลหะ

3.4.5. ติดตั้งเบ้าหลอมแกรไฟต์และแท่ง Stopper แกรไฟต์เข้ากับห้องหลอมโลหะ

3.4.6. ทดสอบระบบควบคุมกลไกการ ปิด-เปิด ฝาถังรองรับการพ่นละอองน้ำโลหะ

3.4.7. ทดสอบระบบควบคุมกลไกการยกขึ้น-กดลงของแท่ง Stopper แกรไฟต์เพื่อปิด-เปิดรูเทกเก็บเบ้าหลอมแกรไฟต์และควบคุมการไหลของลำกระแสน้ำโลหะ

3.4.8. ทดสอบระบบควบคุมกลไกการปิด-เปิดห้องหลอมโลหะ



(ก.)

1. วัดอัตราการไหลของแก๊สในห้องหลอมโลหะ
2. วัดอัตราการไหลของแก๊สที่หัวพ่น
3. ชุดควบคุมการ เปิด-ปิด ถัง
4. ชุดควบคุมการ เปิด-ปิด ฝาเตาหลอม
5. ชุดควบคุมการ เปิด-ปิด โลหะหลอมเหลว

(ข.)

รูปที่ 3.27 (ก.) ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องพ่นละอองโลหะด้วยก๊าซ

(ข.) แสดงระบบควบคุมเตาหลอมโลหะ

3.4.9. จัดวางตำแหน่งของหัวพ่นก๊าซและห้องหลอมโลหะให้ตรงกัน

3.4.10. เปิด-ปิดสวิตช์ชุดอุปกรณ์เหนี่ยวนำกำเนิดความร้อนเพื่ออุ่นเบ้าหลอมแกรไฟต์ โดยการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งเบ้าหลอมแกรไฟต์มีอุณหภูมิเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส

3.4.11. เมื่อเข้าหลอมแกรไฟต์มีอุณหภูมิเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส ตรวจสอบเช็คการอุดปิดรูเทกันเข้าหลอมแกรไฟต์ของแท่ง Stopper แกรไฟต์ให้ปิดให้สนิท

3.4.12. นำเม็ดโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ใส่ลงไปในเข้าหลอมแกรไฟต์

3.4.13. ปิดฝาห้องหลอมโลหะ เพื่อเตรียมการทดลองในสภาวะการทดลอง เมื่อใส่เข้าแกรไฟต์ลงไปแล้วให้ทำการตรวจสอบระบบเปิด-ปิด โลหะหลอมเหลวอีกครั้ง เพื่อป้องกันการรั่วไหลของโลหะหลอมเหลวขณะทำการทดลอง จากนั้นนำโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 จำนวน 1000 กรัม ที่ได้ทำการเตรียมไว้ใส่ลงในเข้าแกรไฟต์

3.4.14. เปิดวาล์วปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปปกคลุมห้องหลอมโลหะ

3.4.15. เปิดสวิตช์ชุดอุปกรณ์เหนี่ยวนำกำเนิดความร้อนเพื่อทำการหลอมเม็ดโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ให้หลอมละลายและเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าจุดหลอมละลาย ที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส พร้อมกับตั้งอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนตามตัวแปรที่กำหนด และรอจนอุณหภูมิถึงตามตัวแปรที่กำหนด เตาหลอมจะตัดการทำงาน

3.4.16. เมื่ออุณหภูมิน้ำโลหะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่กำหนด ทำการยกแท่ง Stopper แกรไฟต์เพื่อปล่อยน้ำโลหะให้ไหลลงไปยังหัวพ่นก๊าซพร้อมๆ กับเปิดวาล์วก๊าซเพื่อป้อนก๊าซไนโตรเจนแก๊สไนโตรเจนที่อยู่ในระบบจะวิ่งผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหลไปสู่หัวพ่นที่เป็นแบบ Close-Coupled Nozzle และพุ่งเข้าปะทะกับลำน้ำโลหะหลอมเหลว

3.4.17. ขั้นตอนต่อไปจะปล่อยให้ลำน้ำโลหะหลอมเหลวไหลออกจากหัวพ่นจนหมดหรือไม่สามารถทำการพ่นละอองต่อไปได้ โดยสามารถสังเกตพฤติกรรมการพ่นละอองน้ำโลหะได้จากช่องกระจกนิรภัยสำหรับสังเกตพฤติกรรมการแตกตัวของลำกระแสน้ำโลหะที่ติดตั้งบริเวณด้านข้างของถังรองรับการพ่นละอองน้ำโลหะ

3.4.18. หลังจากทำการพ่นก๊าซเพื่อให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะเรียบร้อยแล้ว ปิดวาล์วก๊าซไนโตรเจนที่ป้อนเข้าไปยังหัวพ่นก๊าซและห้องหลอมโลหะ

3.4.19. ปิดสวิตช์ชุดอุปกรณ์เหนี่ยวนำกำเนิดความร้อน

3.4.20. เปิดฝาดังเก็บอนุภาคผงโลหะที่อยู่ส่วนล่างของถังอะตอมไมเซอร์ เพื่อนำอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ออกมาทำการตรวจสอบคัดแยกขนาดโดยเครื่องตะแกรงร่อนและเก็บตัวอย่างที่ผลิตได้จากการทดลอง สู่ภาชนะรองรับด้านล่าง หลังจากดำเนินการพ่นละอองน้ำโลหะเสร็จสิ้นแล้ว นำอนุภาคโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ได้ไปทำการชั่งตวงน้ำหนัก เพื่อตรวจสอบหาปริมาณอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้และปริมาณโลหะที่ตกค้างอยู่ภายในเข้าหลอม ท่อลำเลียงน้ำโลหะ และภายในถังหรือภาชนะรองรับการพ่นละอองโลหะ จากนั้นจึงทำการร่อนคัดแยกขนาดอนุภาคผงโลหะด้วยตะแกรงร่อนขนาด ต่างๆ เป็นเวลา 6 นาที ทำการชั่งตวงน้ำหนักผงอนุภาคที่ร่อนผ่านตะแกรงร่อนอีกหนึ่งครั้ง และ

ทำการทดลองซ้ำจนครบของการทดลองทั้งหมดของทั้ง 2 หัวพ่นของกระบวนการในการทดลองด้วยวิธี กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ

3.5 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ความแปรปรวน ขนาดและการกระจายตัวของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ได้จากการทดลองไปตุ้โครงสร้างจุลภาค

3.5.1. ผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ได้จากการทดลอง เพื่อตรวจสอบหาปริมาณอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้ จากนั้นจึงทำการร่อนคัดแยกขนาดอนุภาคผงโลหะด้วยตะแกรงร่อนตามขนาดเข้าเป็น เวลา 6 นาที และทำการชั่งตวงน้ำหนักผงอนุภาคที่ร่อนผ่านตะแกรงร่อนอีกครั้ง

3.5.2 วัดค่าความกลมด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscopy) ขนาดอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ภายใต้สภาวะต่างๆมาทำการวิเคราะห์ค่าความกลมด้วยซอฟต์แวร์ ImageJ version 2019

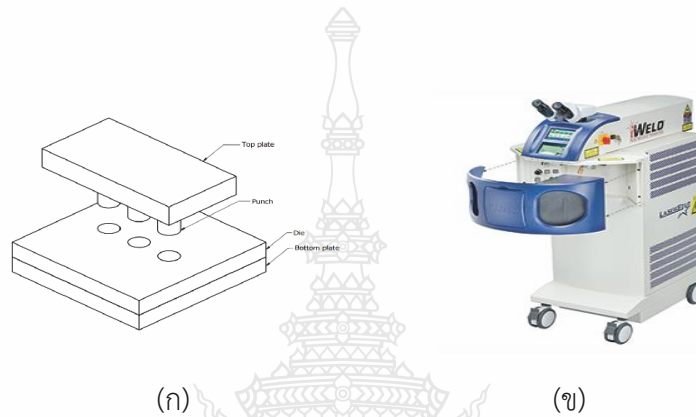
3.5.3 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เป็นวิธีหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในการศึกษาปัจจัย การออกแบบการทดลอง หมายถึง การวางแผน การทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสม สามารถนำไป วิเคราะห์ทางสถิติหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผล ได้การออกแบบ โดยโปรแกรม Minitab 17

3.5.4. ตรวจสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผง ด้วยเครื่อง Laser scattering particle size distribution analyzer LA-950 ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.5.5. ตรวจสอบรูปร่างของอนุภาคผงโลหะและลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

3.5.6 ทดสอบการทดลองอัดขึ้นรูปผงโลหะประกอบด้วย อนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ ได้จากการทดลองผลิตด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ผ่านการร่อนคัดแยกให้มีขนาด วัสดุตัว ประสาน เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ AND model HR200 ความละเอียด 0.1 mg เครื่องอัดไฮดรอลิกส์ ยี่ห้อ Enmach Model EM 20 โดยแต่ละสภาวะการทดลองทำการลอง 3 ซ้ำ ซึ่งมีปัจจัยหรือตัวแปร ควบคุมประกอบการอัดขึ้นรูป 3 อุณหภูมิประกอบด้วย 1060 1160 และ 1260 องศาเซลเซียส และ อัตราการไหลของก๊าซ 400 500 และ 600 ลิตรต่อนาที ชั่งตวงอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และ ใช้กาบเป็นตัวประสานผงโลหะเงิน นำแม่พิมพ์เข้าเครื่องอัดไฮดรอลิกส์เพื่อทำการอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ด้วยความดันที่กำหนด และอัดแช่ให้แน่น นำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องอัดแสดงดังรูปที่ 3.28 ได้ขึ้นทดสอบ

นำไปทดสอบวัสดุด้วยเชื่อมด้วยเครื่องเลเซอร์ Selective Laser Melting: SLM รุ่น iWeld Professional มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี สาขาเทคโนโลยีอวกาศและเครื่องประดับ ลักษณะโครงสร้างจุลภาค ในการยิงเลเซอร์เฉพาะจุดการทดลองแบบเติมแต่งเนื้อในผิว (AM) คือ เทคโนโลยีการผลิตแบบเติมแต่งที่หลอมโลหะผงอย่างเลือกจุดและทำให้แข็งตัว [73-77] ซึ่งแตกต่างอย่างสิ้นเชิงจากเทคนิคการผลิตแบบใช้วัสดุเท่ากันต่างจากแบบดั้งเดิม



รูปที่ 3.28 (ก) แม่พิมพ์แบบกด (ข) เครื่องยิงเลเซอร์ (SLM) [78]

บทที่ 4

ผลการทดลองผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองต่างๆ ที่ได้จากการทดลองผลิตและวิเคราะห์ ตรวจสอบต่างๆ สมบัติต่างๆ ของอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ (Gas Atomization) โดยหัวพ่นก๊าซที่มีรูปแบบหรือลักษณะที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ เพื่อศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบรูปแบบหรือลักษณะของหัวพ่นที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้จากการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ภายใต้สภาวะของการทดลองที่แตกต่างกัน และนอกจากนี้ยังรวมถึงการวิเคราะห์ตรวจสอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะและคุณสมบัติต่างๆ ของอนุภาค ซึ่งประกอบด้วยการศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลว อัตราการไหลของก๊าซ ที่ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ ลักษณะรูปร่าง ลักษณะโครงสร้างจุลภาค ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดไม่เกิน 50 ไมโครเมตรที่นิยมนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่อง 3D printer ระบบ SLM ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1

4.1.1 ปริมาณอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1

จากการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยหัวพ่นก๊าซแบบ Close-Couple Nozzle แบบที่ 1 ที่มีรูปลอยก๊าซคู่เดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะภายใต้สภาวะของการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1060, 1160 และ 1260 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซที่ 400, 500 และ 600 ลิตรต่อนาที โดยทำการทดลองผลิตครั้งละ 1000 กรัม หลังจากการทดลองผลิตภายใต้สภาวะต่างๆ ดังที่กล่าวข้างต้น นำผงโลหะที่ได้มาทำการร่อนคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงขนาด 100, 75 และ 50 ไมโครเมตร และอนุภาคผงโลหะเงินขนาดต่างๆ ดังรายละเอียดที่แสดงใน ตารางที่ 4.1 และตารางที่ ก1 ภาคผนวก ก

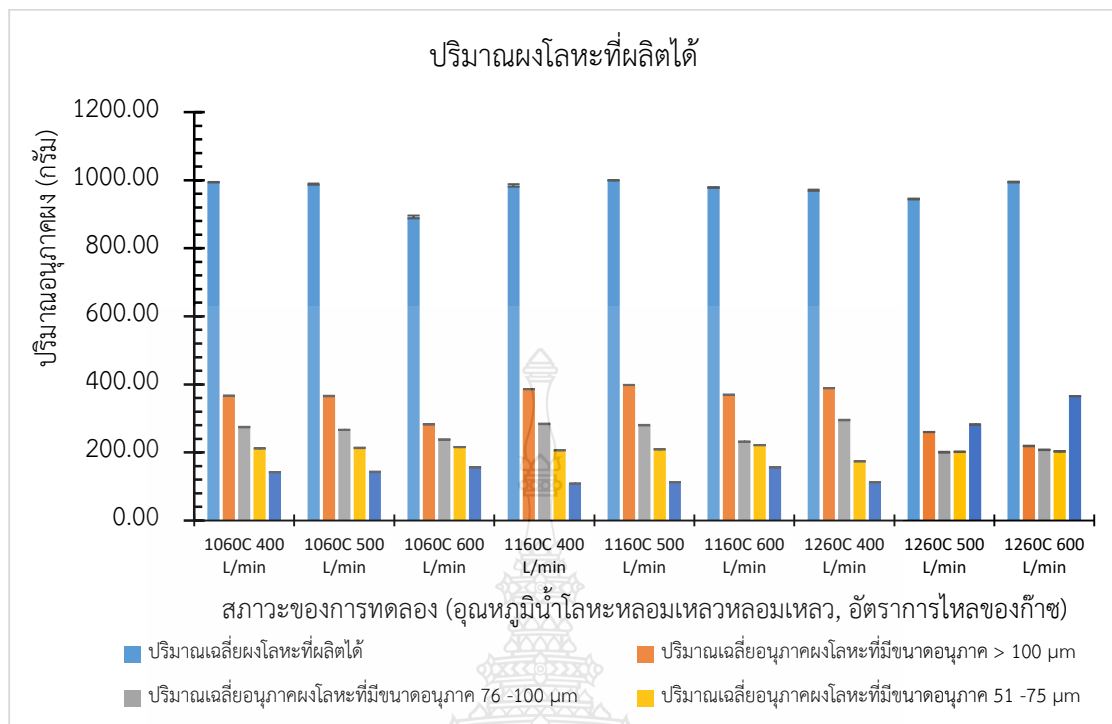
ผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ทุกสภาวะของการทดลองได้ปริมาณผงโลหะใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 970 – 990 กรัม หรือคิดเป็น 97% – 99% ของปริมาณโลหะที่ใช้ผลิต และเมื่อมีการร่อนคัดแยกขนาดอนุภาคด้วยตะแกรงร่อนขนาดต่างๆ พบว่า จะได้ปริมาณอนุภาคขนาดต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1 และกราฟเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 4.1 โดยภายใต้สภาวะอุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลว 1260 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซ 600 ลิตรต่อนาที สามารถผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่มีขนาดอนุภาค ≤ 50 ไมโครเมตร ได้ปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 365.445 กรัม และนอกจากนี้ จากข้อมูลของ

กราฟที่เปรียบเทียบเกี่ยวกับสถานะของการทดลองผลิตผงโลหะกับปริมาณของอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดต่างๆ แสดงให้เห็นว่า อนุกรมเม็หน้าโลหะที่เพิ่มขึ้นและอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ได้ปริมาณอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็กเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของอนุภาคที่มีขนาด ≤ 50 ไมโครเมตร ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่อนุกรมเม็หน้าโลหะที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความตึงผิวของน้ำโลหะหรือความหนืดและความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมของน้ำโลหะมีแนวโน้มมีค่าลดลงสามารถไหลตัวได้ดีขึ้นและส่งผลให้น้ำโลหะสามารถแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะได้ง่ายขึ้นและมีขนาดเล็กลงได้มากขึ้น และเมื่อมีการบูรณาการร่วมกับอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้น จะยังส่งผลให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็กได้มากยิ่งขึ้นจากอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้น



ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ภายใต้สภาวะต่างๆ ทดลองด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 โดยทำการทดลองครั้งละ 1000 กรัม

อุณหภูมิ โลหะ หลอมเหลว (°C)	อัตราการ ไหลของก๊าซ (l/min)	ปริมาณเฉลี่ยผงโลหะที่ผลิตได้			ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะที่มี ขนาดอนุภาค > 100 µm			ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะที่ มีขนาดอนุภาค 76 -100 µm			ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะที่ มีขนาดอนุภาค 51 -75 µm			ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะที่ มีขนาดอนุภาค ≤ 50 µm		
		(g)	SD	%	(g)	SD	%	(g)	SD	%	(g)	SD	%	(g)	SD	%
1060	400	994.11	1.21	99.41	366.67	0.58	36.67	274.33	0.58	27.43	211.67	0.58	21.17	141.45	0.10	14.14
	500	988.53	1.93	98.85	365.67	0.58	36.57	266.67	0.58	26.67	213.33	0.58	21.33	142.87	0.76	14.29
	600	892.20	4.48	89.22	282.67	0.58	28.27	238.14	0.78	23.81	215.33	0.58	21.53	156.06	0.91	15.61
1160	400	985.14	3.83	98.51	386.12	0.11	38.61	284.12	0.20	28.41	206.37	0.57	20.64	108.53	0.50	10.85
	500	999.69	0.08	99.97	398.33	0.58	39.83	280.33	0.58	28.03	208.67	0.58	20.87	112.36	0.36	11.24
	600	978.94	1.63	97.89	369.73	0.54	36.97	231.72	0.53	23.17	221.33	0.58	22.13	156.16	0.02	15.62
1260	400	970.80	1.69	97.08	389.03	0.53	38.90	295.26	0.38	29.53	174.03	0.95	17.40	112.49	0.49	11.25
	500	944.69	1.74	94.47	260.00	0.58	26.00	200.39	1.20	20.04	202.30	0.94	20.23	282.01	0.01	28.20
	600	994.81	1.73	99.48	218.76	0.67	21.88	207.59	0.73	20.76	203.02	0.02	20.30	365.44	0.35	36.54



รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบปริมาณอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1

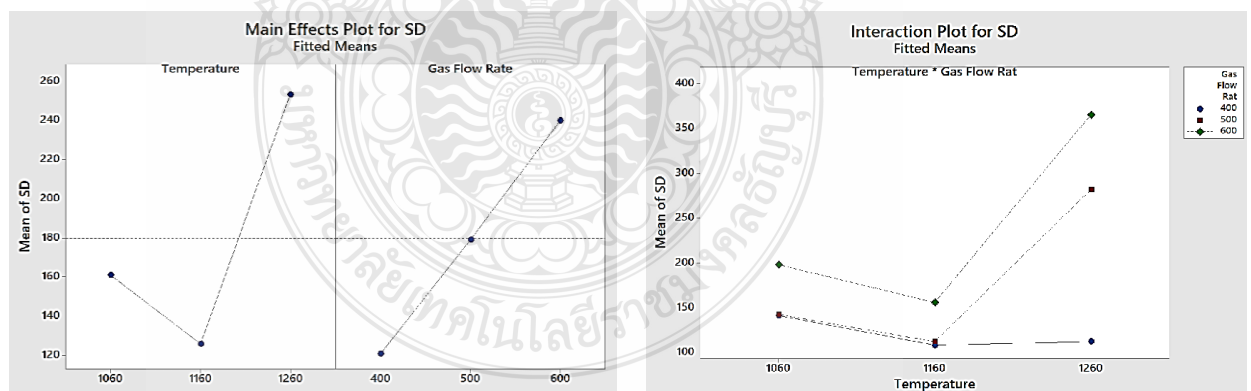
จากการวิเคราะห์ทางสถิติของอิทธิพลของอุณหภูมิ น้ำ โลหะ หลอม เหลว และอัตราการไหลของก๊าซที่มีผลต่อปริมาณอนุภาคผงโลหะ พบว่าอุณหภูมิ น้ำ โลหะ หลอม เหลว: อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะเพิ่มปริมาณอนุภาคผงโลหะ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิช่วยให้โลหะมีการกระจายตัวที่ดีขึ้นและลดการเกาะตัวของอนุภาค [45] อัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นช่วยในการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะ ทำให้ปริมาณอนุภาคเพิ่มขึ้น [46] การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการวิจัย โดยใช้วิธีการต่างๆ เช่น การหาค่าเฉลี่ย ค่ากลาง ค่าความแปรปรวน และการทดสอบ t (t-test) รวมถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการออกแบบการทดลอง (DOE) เพื่อหาผลกระทบของตัวแปรจากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ น้ำ โลหะ หลอม เหลว และอัตราการไหลของก๊าซมีผลกระทบต่อผลลัพธ์ของการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า P-Value ของปัจจัยอุณหภูมิ น้ำ โลหะ หลอม เหลว * อัตราการไหลของก๊าซ เท่ากับ 0.000* ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนี้มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก (Main Effect) และในทางกลับกันอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ของปัจจัยต่างๆ มีผลกระทบต่อปริมาณของอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 เมื่อพิจารณาค่าความแปรปรวนที่แสดงในตารางที่ 4.2

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ระดับของปัจจัยทั้งสองเป็นภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณผงโลหะที่มากที่สุด ดังกราฟผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งระดับอุณหภูมิน้ำโลหะหลอมเหลว 1260 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซ 600 ลิตรต่อนาที เป็นสภาวะการผลิตเหมาะสมที่สุด ทำให้ได้ปริมาณผงโลหะมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.3

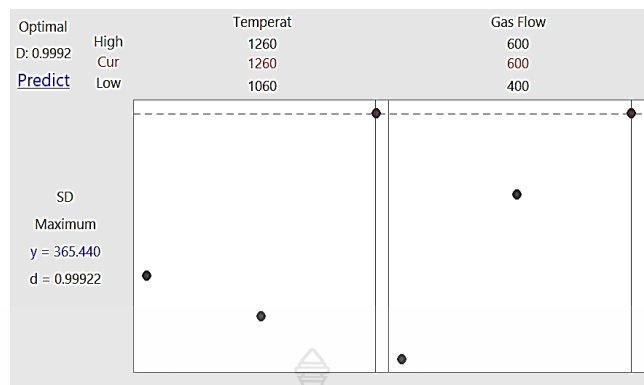
ตารางที่ 4.2 แสดงผลวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อปริมาณผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
อุณหภูมิน้ำโลหะหลอมเหลวหลอมเหลว	2	78176	39087.9	66.99	0.000*
อัตราการไหลของก๊าซ	2	63903	31951.7	54.76	0.000*
อุณหภูมิน้ำโลหะหลอมเหลวหลอมเหลว * อัตราการไหลของก๊าซ	4	46288	11571.9	19.83	0.000*
Error	18	10503	583.5		
Total	26	198870			

S 24.1559 R-sq 94.72% R-sq(adj) 92.37% R-sq(pred) 88.12%



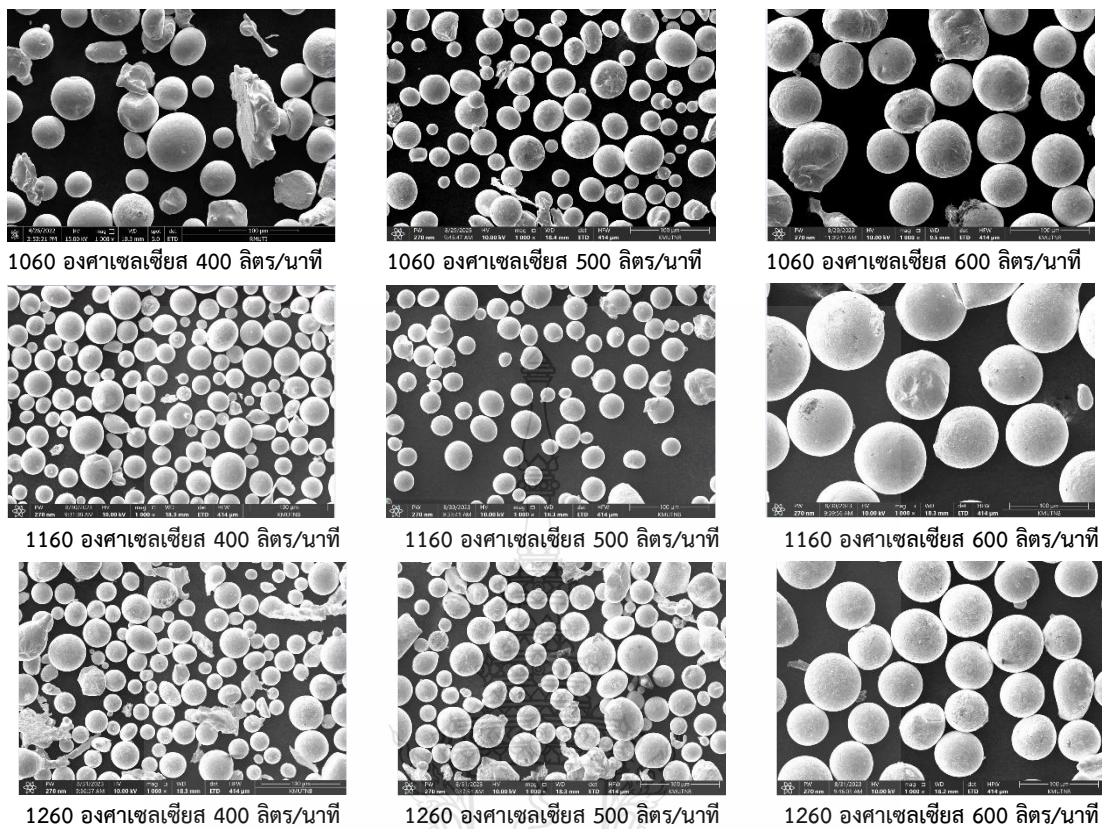
รูปที่ 4.2 อิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมปัจจัยการผลิตที่มีผลต่อปริมาณผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1



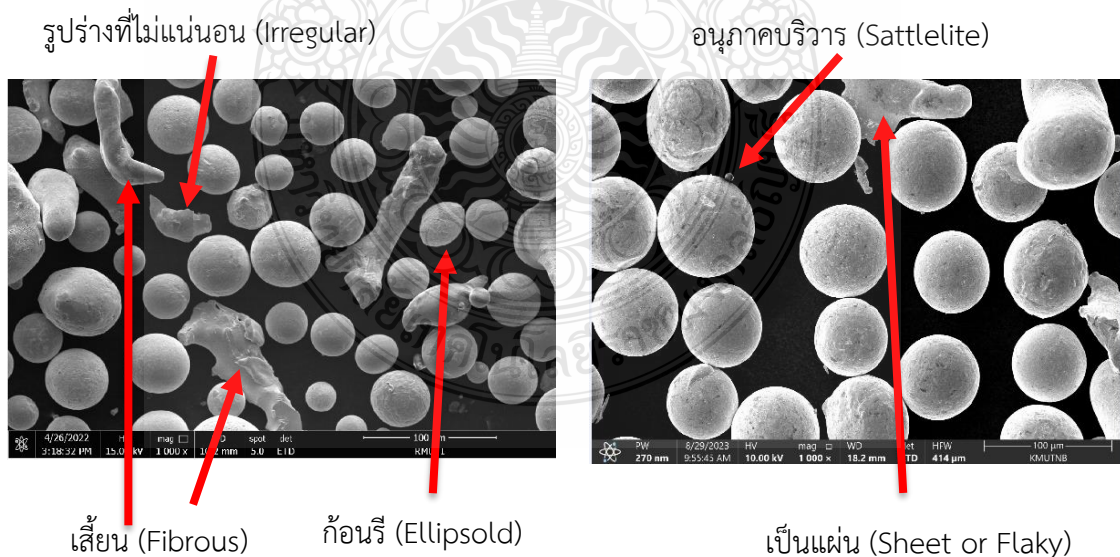
รูปที่ 4.3 แสดงค่าประสิทธิภาพของหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 ที่มีผลต่อปริมาณผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1

4.1.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1

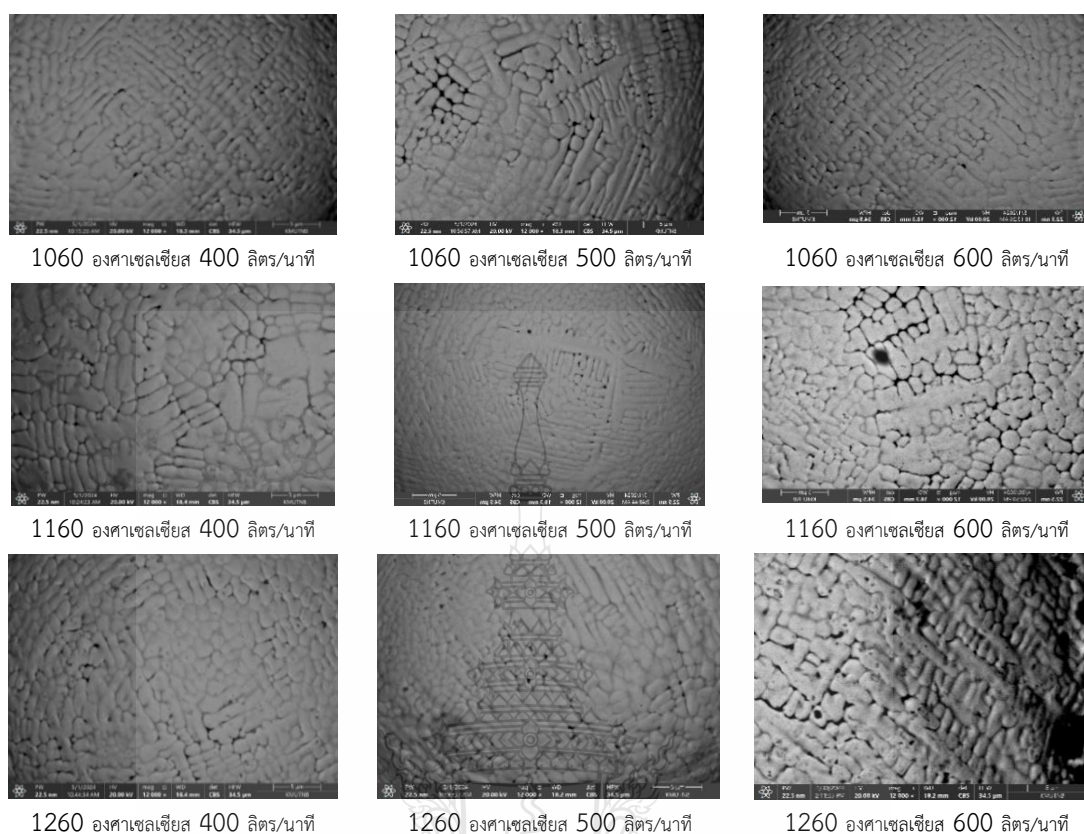
จากการวิเคราะห์ตรวจสอบลักษณะรูปร่างอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 ภายใต้สภาวะต่างๆ ด้วยภาพถ่าย SEM ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่า อนุภาคผงที่ได้มีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงต่างๆ ซึ่งประกอบรูปร่างเป็นแผ่น (Sheet or Flaky) เส้นมน (Ligament) เส้นใย (Fibrous) ก้อนรี (Ellipsoidal) รูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) แต่อนุภาคส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปร่างทรงกลมหรือเกือบเป็นทรงกลม (Spherical) และนอกจากนี้ ยังมีอนุภาคทรงกลมบางส่วนมีอนุภาคบริวาร (Satellite) เกาะอยู่ที่ผิว ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อเพิ่มกำลังขยายภาพ SEM เพื่อศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของอนุภาค พบว่า พื้นผิวอนุภาคมีลักษณะเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite) เกิดเป็นแกนผลึก (Coring) ภายในเกรน ซึ่งโครงสร้างจุลภาคลักษณะนี้ มักพบกับโลหะที่มีการเย็นตัวในสภาวะเร็วกว่าสภาวะสมดุล ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.4 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ได้จากการทดลองผลิตภายใต้สภาวะต่างๆ ด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1



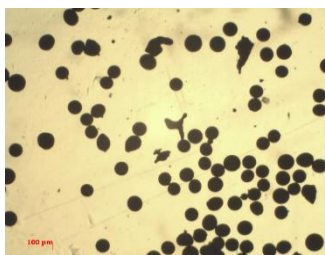
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการจำแนกลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ได้จากการทดลองผลิตภายใต้สภาวะต่างๆ ด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1



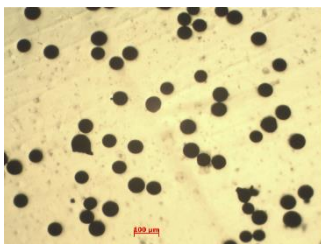
รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่มีลักษณะรูปร่างเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ที่ได้จากการทดลองผลิตภายใต้สภาวะต่างๆ ด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1

4.1.3 ค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1

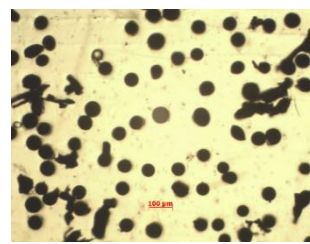
การวิเคราะห์ตรวจสอบค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 ภายใต้สภาวะต่างๆ ดำเนินการวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยการนำภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscopy) ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.7 มาการวิเคราะห์ตรวจสอบค่าความกลมของอนุภาคด้วย Software ImageJ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ตรวจสอบ พบว่า ภายใต้สภาวะของการผลิตที่แตกต่างกันไม่มีผลทำให้ค่าความกลมของอนุภาคมีความแตกต่างกันมากนัก ค่าความกลมของอนุภาคมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.84-0.88 ดังผลการวิเคราะห์ตรวจสอบที่แสดงในตารางที่ 4.3 และกราฟเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 4.8 โดยมีค่าความกลมสูงสุดเท่ากับ 0.884 ภายใต้สภาวะของการทดลองผลิตที่อุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลว 1260 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซ 600 ลิตรต่อนาที



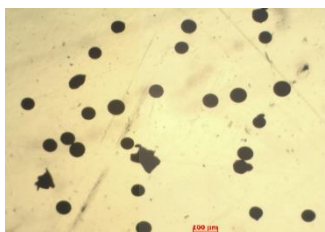
1060 อองศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที่



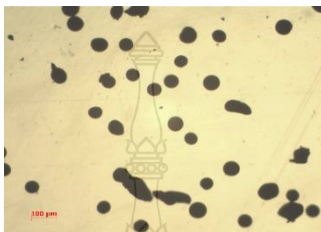
1060 อองศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที่



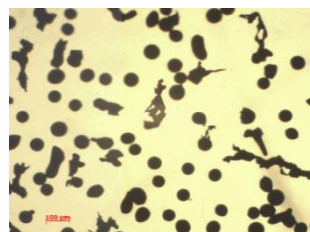
1060 อองศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที่



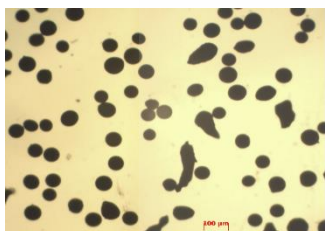
1160 อองศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที่



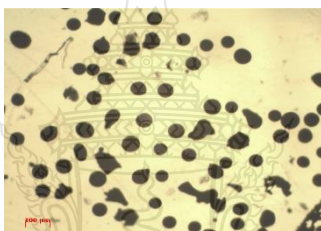
1160 อองศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที่



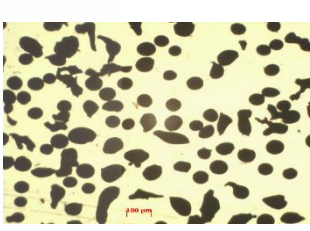
1160 อองศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที่



1260 อองศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที่



1260 อองศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที่

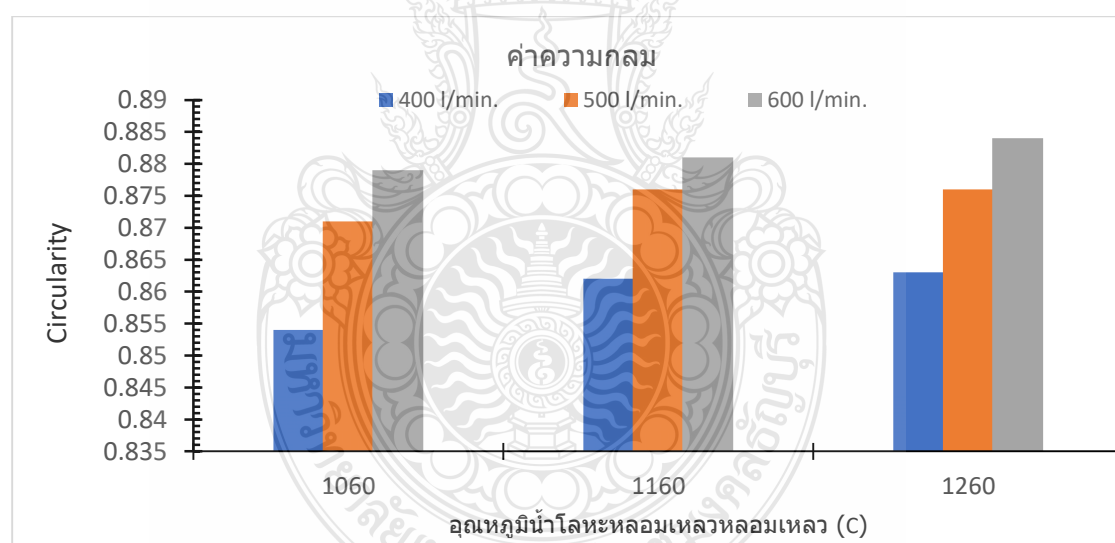


1260 อองศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที่

รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 จากห้องจุลทรรศน์แบบแสงสำหรับการวิเคราะห์ตรวจสอบค่าความกลมของอนุภาค

ตารางที่ 4.3 ค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1

อุณหภูมิ โลหะ หลอมเหลว(°C)	อัตราการไหล ของก๊าซ (l/min)	ค่าความกลม Circularity						
		1	2	3	4	5	Aver.	SD
1060	400	0.815	0.877	0.882	0.842	0.854	0.854	0.0273
	500	0.875	0.904	0.856	0.898	0.823	0.871	0.0330
	600	0.868	0.878	0.897	0.879	0.874	0.879	0.0108
1160	400	0.811	0.886	0.877	0.86	0.878	0.862	0.0303
	500	0.869	0.872	0.887	0.874	0.88	0.876	0.0072
	600	0.904	0.825	0.894	0.878	0.903	0.881	0.0329
1260	400	0.887	0.872	0.842	0.832	0.884	0.863	0.0250
	500	0.875	0.864	0.881	0.88	0.881	0.876	0.0073
	600	0.884	0.909	0.865	0.876	0.886	0.884	0.0162



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1

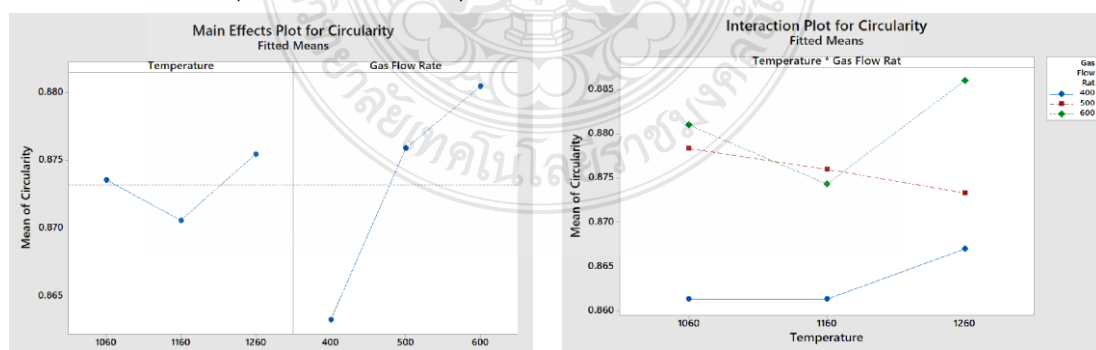
จากการวิเคราะห์ทางสถิติเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิโลหะหลอมเหลวและอัตราการไหลของก๊าซที่มีผลต่อค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 แสดงให้เห็นว่า จากการวิเคราะห์ทางสถิติเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิโลหะหลอมเหลวและอัตรา

การไหลของก๊าซที่มีผลต่อปริมาณอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบแบบที่ 1 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลวและอัตราการไหลของก๊าซมีผลกระทบต่อผลลัพธ์ของการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า P-Value ของปัจจัย อุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลว*อัตราการไหลของก๊าซ เท่ากับ 0.993* ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าโดยค่า P-Value แสดงว่าปัจจัยนี้มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก (Main Effect) และในทางกลับกัน อิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ของปัจจัยต่างๆ มีผลกระทบต่อปริมาณของอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น เมื่อพิจารณาค่าความแปรปรวนที่แสดงในตารางที่ 4.4 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ระดับของปัจจัยทั้งสองเป็นภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณผงโลหะที่มากที่สุด ดังกราฟผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่แสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งระดับอุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลว 1260 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซ 600 ลิตรต่อนาที แสดงว่าค่าความกลมที่สุดในแต่ละสภาวะในการทดลองผงโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.10

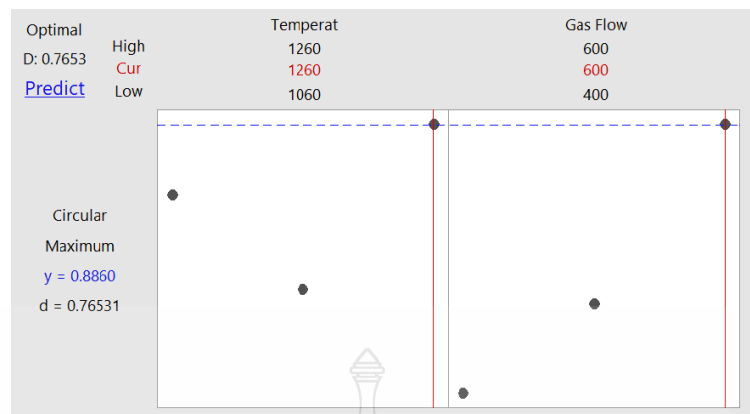
ตารางที่ 4.4 วิเคราะห์ทางสถิติเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลวและอัตราการไหลของก๊าซที่มีผลต่อค่าความกลม

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Temperature	2	0.000109	0.000055	0.07	0.935*
Gas Flow Rate	2	0.001433	0.000717	0.88	0.433*
Temperature*Gas Flow Rate	4	0.000198	0.000049	0.06	0.993*
Error	18	0.014695	0.000816		
Total	26	0.016436			

S 0.0285728 R-sq 10.59% R-sq(adj) 0.00%



รูปที่ 4.9 อิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมปัจจัยการผลิตที่มีผลต่อปริมาณผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของหัวพ่นก๊าซที่มีผลต่อปริมาณการผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1

4.1.4 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1

การศึกษาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผลิตโดยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 ด้วยเครื่อง Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer Model LA-950 พบว่า สภาวะของการทดลองที่แตกต่างกัน มีผลทำให้ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังสรุปผลการวิเคราะห์ทดสอบที่แสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.11 โดยมีตัวอย่างใบรับรองผลการวิเคราะห์ทดสอบที่แสดงในภาคผนวก ก ซึ่งประกอบด้วยค่าต่างๆ ดังนี้

Median Size (มัธยฐาน) เป็นค่ากลางของข้อมูลที่ได้จากการพิจารณาดำเนินการของข้อมูลที่อยู่ตรงกลางโดยข้อมูลต้องทำการเรียงลำดับตามปริมาณจากมากไปน้อยหรือจากน้อยไปมาก ซึ่งค่ามัธยฐานสามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้เป็นอย่างดี สำหรับในกรณีที่ข้อมูลมีการกระจายที่ผิดปกติ อาจเกิดจากการที่มีข้อมูลบางตัวมีค่ามากหรือน้อยจนผิดปกติ

Mean Size (ค่าเฉลี่ย) เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการหารผลรวมของข้อมูลทั้งหมดด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด

Variance (ความแปรปรวน) เป็นค่าความแปรปรวนของข้อมูล ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดความแปรผันของตัวแปรสุ่ม หรือวัดการกระจายของตัวแปรสุ่มว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด ถ้าค่าความแปรปรวนมีค่ามาก แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายมาก แต่ถ้าความแปรปรวนมีค่าน้อย แสดงได้ว่าข้อมูลมีการกระจายน้อย

Standard Deviation: SD (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) เป็นค่าที่ใช้วัดการกระจายตัวของข้อมูลที่ดีที่สุดและใช้มากที่สุดในทางสถิติ การหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากกลุ่มตัวอย่าง (S) หาได้จากสมการ 4.1

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (4.1)$$

เมื่อ S คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

X_i คือ ข้อมูลชุดที่ i

$\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูล

n คือ จำนวนข้อมูล

Mode Size (ฐานนิยม) เป็นค่านำมาใช้ในการกรณีที่ข้อมูลมีการซ้ำกันมากๆ จนผิดปกติ ซึ่งค่าฐานนิยมจะเป็นค่ากลางหรือตัวแทนของข้อมูลที่สามารถอธิบายลักษณะที่เกิดขึ้นได้ดีกว่าค่าเฉลี่ยเลขคณิตและค่ามัธยฐาน นอกจากนี้ค่าฐานนิยมยังมีข้อพิเศษมากกว่าค่าเฉลี่ยและมัธยฐาน ตรงที่สามารถใช้ได้กับข้อมูลที่เป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative) และข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative) และนอกจากนี้ค่าฐานนิยมยังสามารถมีค่าได้มากกว่า 1 ค่า การหาค่าฐานนิยมในกรณีที่ข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงความถี่สามารถทำได้โดยการนับจำนวนข้อมูล ถ้าข้อมูลชุดใดมีจำนวนซ้ำกันมากที่สุดก็จะเป็นค่าฐานนิยม

Span เป็นค่าความกว้างในการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่ขึ้นกับค่ามัธยฐาน (D_{50}) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ 4.2

$$\text{Span} = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \quad (4.2)$$

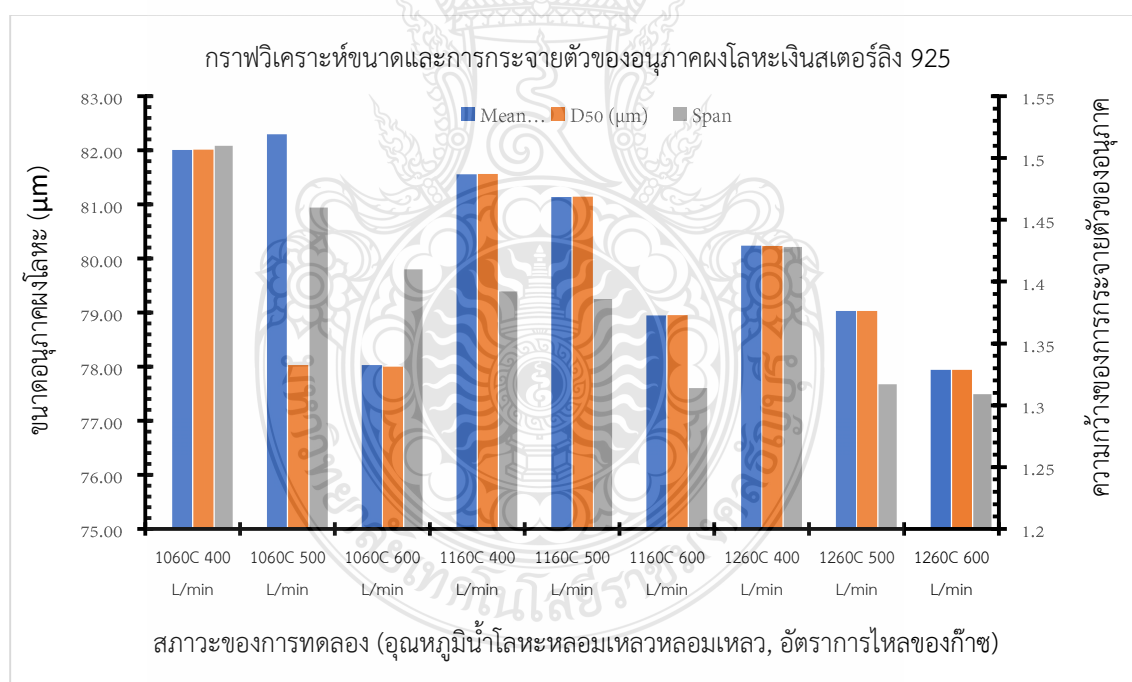
D_{10} เป็น 10 เปอร์เซนต์โดยปริมาณที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้ ซึ่งเป็นขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก

D_{50} เป็น 50 เปอร์เซนต์โดยปริมาณที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้ ซึ่งเป็นขนาดของอนุภาคที่มีขนาดกลาง

D_{90} เป็น 90 เปอร์เซนต์โดยปริมาณที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้ ซึ่งเป็นขนาดของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

ตารางที่ 4.5 ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อน
ขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1

อุณหภูมิ น้ำโลหะ (°C)	อัตราการ ไหลของ ก๊าซ (L/min)	Median size (μm)	Mean Size (μm)	Variance (μm^2)	SD (μm)	Mode size (μm)	Span	D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)
1060	400	82.01	94.20	2557.90	50.57	82.37	1.510	45.79	82.01	169.68
	500	82.30	97.13	3033.10	55.07	82.21	1.460	45.26	78.03	159.25
	600	78.03	91.69	2542.30	50.42	72.60	1.410	45.06	78.00	157.25
1160	400	81.56	93.53	2454.20	49.54	82.31	1.392	46.40	81.56	159.94
	500	81.14	93.59	2459.90	49.60	82.20	1.386	46.74	81.14	159.21
	600	78.95	90.00	2122.60	46.07	82.01	1.314	46.41	78.95	159.39
1260	400	80.24	91.77	2216.90	47.08	82.14	1.428	47.31	80.23	155.48
	500	79.03	90.78	2231.30	47.24	81.97	1.317	46.60	79.03	150.71
	600	77.94	89.55	2126.60	47.76	72.86	1.309	46.22	77.94	148.32



รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบค่าขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่าน
ตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1

ผลจากการวิเคราะห์ตรวจสอบขนาดอนุภาคผงโลหะ พบว่า ภายใต้สภาวะของการทดลองที่อุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลวและอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่ามัธยฐาน (Median size) หรือค่า D_{50} มีแนวโน้มมีขนาดเล็กลง และค่าการกระจายตัวขนาดอนุภาค (Span) มีแนวโน้มมีค่าลดลงหรือแคบลง ดัง รายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 4.5 และกราฟเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งภายใต้สภาวะของ อุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลว 1260 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซ 600 ลิตรต่อนาที จะได้ค่า D_{50} ของอนุภาคผงโลหะที่เล็กที่สุดมีค่าเท่ากับ 77.94 ไมโครเมตร และมีค่าการกระจายตัวขนาดอนุภาคที่ แคบที่สุดเท่ากับ 1.309 และนอกจากนี้ จากข้อมูลของกราฟที่เปรียบเทียบเกี่ยวกับสภาวะของการทดลอง ผลิตภัณฑ์ผงโลหะกับขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะ แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ น้ำโลหะที่ เพิ่มขึ้นและอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ได้ปริมาณอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเกิด จากการที่อุณหภูมิ น้ำโลหะที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความตึงผิวของน้ำโลหะหรือความหนืดและความแข็งแรง ของพันธะระหว่างอะตอมของน้ำโลหะมีแนวโน้มมีค่าลดลง สามารถไหลตัวได้ดีขึ้นและส่งผลให้น้ำโลหะ สามารถแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะได้ง่ายขึ้นและมีขนาดเล็กลงได้มากขึ้น และเมื่อมีการบูรณาการร่วมกับ อัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้น จะยิ่งส่งผลให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็กได้มากยิ่งขึ้น จากอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้น และส่งผลต่อเนื่องทำให้ค่าการกระจายตัวขนาดอนุภาคแคบลงตามไป ด้วย

4.1.5 การทดลองขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อน ขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นแบบที่ 1

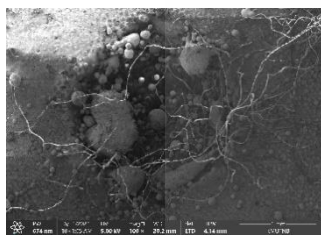
ในการทดลองนี้ ได้ทำการขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านการ ร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ซึ่งได้มาจากการผลิตด้วยหัวพ่นแบบที่ 1 โดยการทดลองใช้ผงโลหะเงิน สเตอร์ลิง 925 ที่ผลิตโดยวิธีการทำให้เป็นอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ และนำไปใช้เป็นวัสดุทดลองในการ ขึ้นรูปและทดสอบดังนี้ วิธีการทดลอง การเตรียมตัวอย่างผงโลหะที่ผ่านการร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ถูกใช้ในการผลิตขึ้นทดสอบ แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปผงโลหะแสดงในรูปที่ 4.12 นำชิ้นงานที่ได้ไปทดลองโดยใช้ เครื่องเชื่อมเลเซอร์รุ่น iWeld Professional เชื่อมด้วยเลเซอร์ช่วยให้เห็นการรวมตัวกันของผงโลหะใน แต่ละสภาวะของอุณหภูมิและแรงดันก๊าซแต่ละสภาวะ ใช้การยิงเลเซอร์เฉพาะจุดโดยทำการยิงซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของขึ้นทดสอบของการเชื่อมและการรวมตัวของผงโลหะ รูปภาพลักษณะโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.13

สรุปการขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 โดยการใช้เลเซอร์เชื่อมช่วยให้สามารถ ตรวจสอบการรวมตัวของผงโลหะ ผลลัพธ์จากการทดลองนี้มีความสำคัญในการเข้าใจพฤติกรรมของผง โลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ภายใต้กระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ และช่วยในการปรับปรุงกระบวนการ

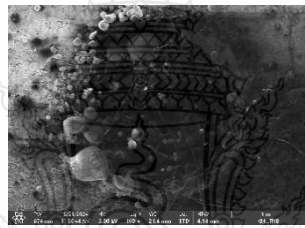
เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพดียิ่งขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของน้ำโลหะหลอมเหลวที่ 1160 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซ 400 ลิตรต่อนาที เป็นสภาวะที่ดีที่สุด



รูปที่ 4.12 ชิ้นงานการทดลองขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925



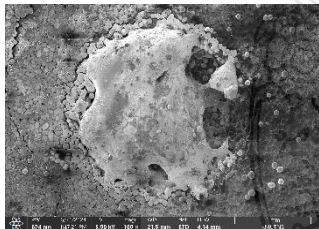
1060 องศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที



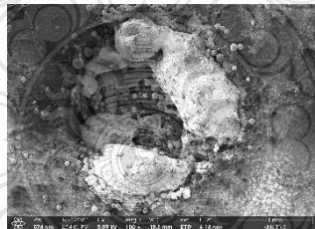
1060 องศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที



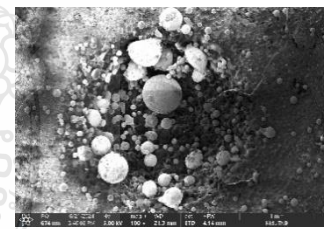
1060 องศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที



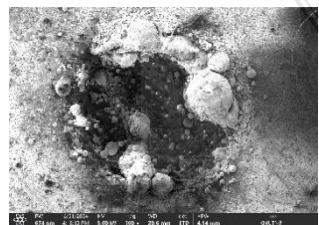
1160 องศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที



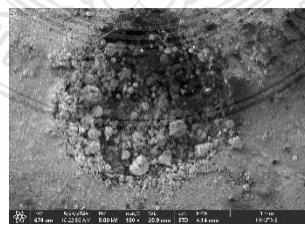
1160 องศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที



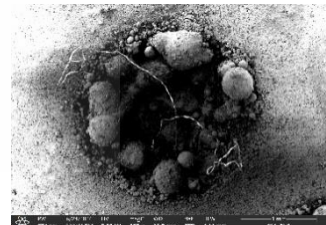
1160 องศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที



1260 องศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที



1260 องศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที



1260 องศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที

รูปที่ 4.13 ลักษณะรูปร่างการหลอมโลหะด้วยเลเซอร์เฉพาะจุด (SLM) กับสภาวะต่างๆ

4.2 ผลการทดลองผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยหัวพ่นแบบที่ 2

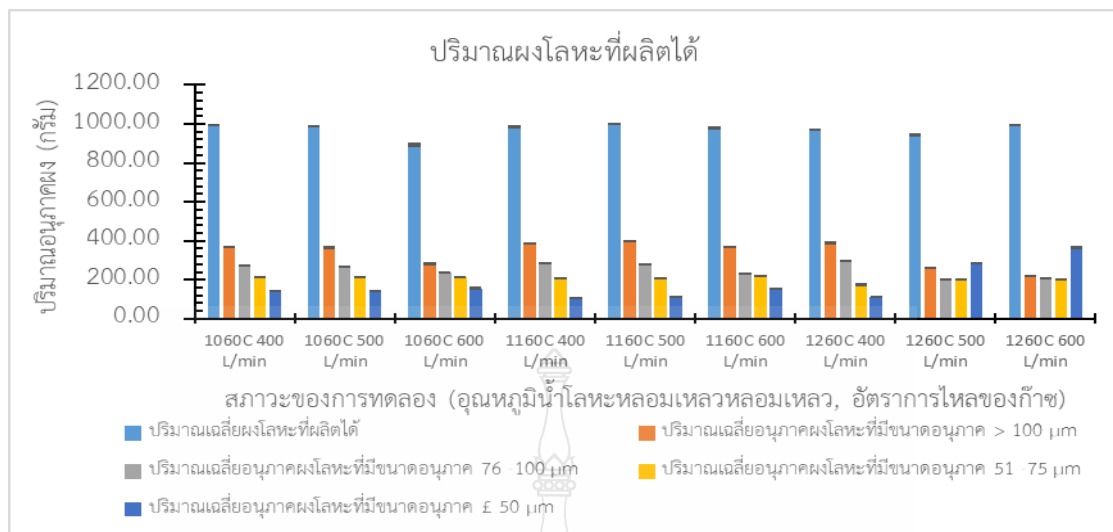
4.2.1 ปริมาณอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2

จากการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยหัวพ่นก๊าซแบบ Close-Couple Nozzle แบบที่ 2 ที่มีหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ ภายใต้สภาวะของการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1060, 1160 และ 1260 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซที่ 400, 500 และ 600 ลิตรต่อนาที โดยทำการทดลองผลิตครั้งละ 1000 กรัม หลังจากการทดลองผลิตภายใต้สภาวะต่างๆ ดังที่กล่าวข้างต้น นำผงโลหะที่ได้มาทำการร่อนคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงขนาด 100, 75 และ 50 ไมโครเมตร และอนุภาคผงโลหะเงินขนาดต่างๆ ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 4.6 และตารางที่ ข1 ในภาคผนวก ข

ผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ทุกสภาวะของการทดลองได้ปริมาณผงโลหะใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 980 — 990 กรัม หรือคิดเป็น 98% — 99% ของปริมาณโลหะที่ใช้ผลิต และเมื่อมีการร่อนคัดแยกขนาดอนุภาคด้วยตะแกรงร่อนขนาดต่างๆ พบว่า จะได้ปริมาณอนุภาคขนาดต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.6 และกราฟเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 4.14 โดยภายใต้สภาวะอุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลว 1260 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซ 600 ลิตรต่อนาที สามารถผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่มีขนาดอนุภาค ≤ 50 ไมโครเมตรได้ปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 302.615 กรัม และนอกจากนี้ จากข้อมูลของกราฟที่เปรียบเทียบเกี่ยวกับสภาวะของการทดลองผลิตผงโลหะกับปริมาณของอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดต่างๆ แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิเทน้ำโลหะที่เพิ่มขึ้นและอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ได้ปริมาณอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็กเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของอนุภาคที่มีขนาด ≤ 50 ไมโครเมตร ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่อุณหภูมิเทน้ำโลหะที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความตึงผิวของน้ำโลหะหรือความหนืดและความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมของน้ำโลหะมีแนวโน้มมีค่าลดลงสามารถไหลตัวได้ดีขึ้นและส่งผลให้น้ำโลหะสามารถแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะได้ง่ายขึ้นและมีขนาดเล็กลงได้มากขึ้น และเมื่อมีการบูรณาการร่วมกับอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้น จะยิ่งส่งผลทำให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็กได้มากยิ่งขึ้นจากอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองผลิตผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ภายใต้สภาวะต่างๆ ทดลองด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2 โดยทำการทดลองครั้งละ 1000 กรัม

อุณหภูมิ น้ำ โลหะ หลอมเหลว (°C)	อัตราการ ไหลของก๊าซ (l/min)	ปริมาณเฉลี่ยผงโลหะที่ ผลิตได้			ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผง โลหะที่มีขนาด > 100 µm			ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะที่ มีขนาด 76 -100 µm			ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะที่ มีขนาด 51 -75 µm			ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะ ที่มีขนาด ≤ 50 µm		
		(g)	SD	%	(g)	SD	%	(g)	SD	%	(g)	SD	%	(g)	SD	%
1060	400	999.69	0.15	99.97	398.33	0.13	39.83	280.33	0.60	28.03	204.35	0.57	20.43	112.36	0.28	11.24
	500	999.47	0.25	99.95	392.09	0.56	39.21	267.15	0.27	26.72	203.68	0.20	20.37	116.53	0.27	11.65
	600	999.89	0.04	99.99	393.90	1.11	39.39	274.74	6.43	27.47	204.35	0.71	20.43	112.36	0.36	11.24
1160	400	990.05	0.24	99.01	367.65	1.04	36.77	264.43	1.54	26.44	206.37	0.77	20.64	151.59	1.49	15.16
	500	999.38	0.66	99.94	347.82	1.53	34.78	269.22	0.29	26.92	210.74	0.35	21.07	171.14	0.12	17.11
	600	999.60	0.29	99.96	348.73	0.86	34.87	267.09	0.23	26.71	205.61	0.97	20.56	178.17	0.10	17.82
1260	400	989.76	0.32	98.98	300.04	0.08	30.00	233.97	0.33	23.40	203.02	0.02	20.30	252.74	1.07	25.27
	500	989.77	0.95	98.98	305.15	0.57	30.52	227.30	0.42	22.73	203.02	0.02	20.30	254.30	0.47	30.26
	600	999.25	0.54	99.93	281.00	0.58	28.10	221.61	0.92	22.16	194.03	0.95	19.40	302.62	1.16	25.43



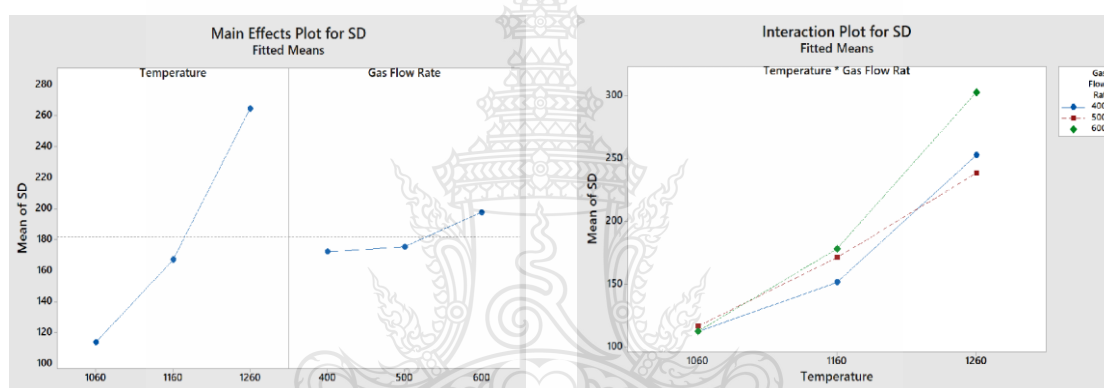
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบปริมาณอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2

จากการวิเคราะห์ทางสถิติของอิทธิพลเกี่ยวกับหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ (Close-Coupled Nozzle 2) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ น้ำ โลหะ หลอม เหลว และอัตราการไหลของก๊าซ ดังกราฟผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่แสดงในรูปที่ 4.15 โดยค่า P-Value ของปัจจัยอุณหภูมิ น้ำ โลหะ หลอม เหลว * อัตราการไหลของก๊าซ เท่ากับ 0.000* ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนี้มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก (Main Effect) และในทางกลับกัน อิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ของปัจจัยต่างๆ มีผลกระทบต่อปริมาณของอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น เมื่อพิจารณาค่าความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 4.7 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ระดับของปัจจัยทั้งสองเป็นภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณผงโลหะที่มากที่สุด ซึ่งระดับอุณหภูมิ น้ำ โลหะ หลอม เหลว 1260 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซ 600 ลิตรต่อนาทีเป็นสภาวะการผลิตเหมาะสมที่สุดทำให้ได้ปริมาณผงโลหะมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.16

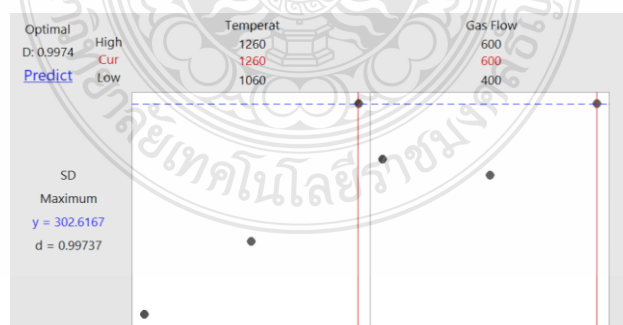
ตารางที่ 4.7 แสดงผลวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าตัวแปรที่ต่อปริมาณผงโลหะที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Temperature	2	105256	52628.1	2143.39	0.000*
Gas Flow Rate	2	3481	1740.5	70.88	0.000*
Temperature*Gas Flow Rate	4	4528	1132.0	46.10	0.000*
Error	18	442	24.6		
Total	26	113707			

S 4.95516 R-sq 99.61% R-sq(adj) 99.44



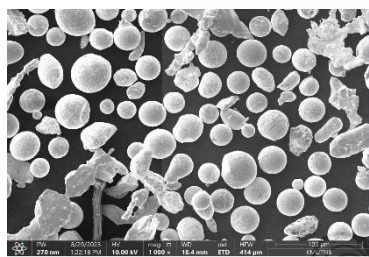
รูปที่ 4.15 อิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล้อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ (Close-Coupled Nozzle2)



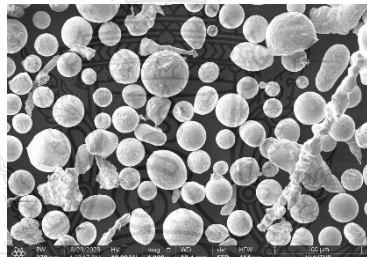
รูปที่ 4.16 แสดงค่าประสิทธิภาพของหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล้อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ (Close-Coupled Nozzle2)

4.2.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2

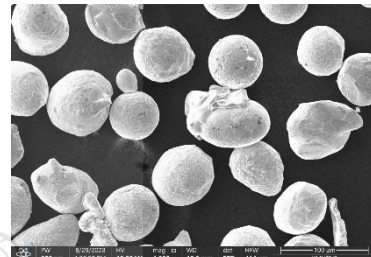
จากการวิเคราะห์ตรวจสอบลักษณะรูปร่างอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 ภายใต้สภาวะต่างๆ ด้วยภาพถ่าย SEM ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.17 พบว่า อนุภาคผงที่ได้มีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงต่างๆ ซึ่งประกอบรูปร่างเป็นแผ่น (Sheet or Flaky) เส้นมน (Ligament) เส้นใย (Fibrous) ก้อนรี (Ellipsoidal) รูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) แต่อนุภาคส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปร่างทรงกลมหรือเกือบเป็นทรงกลม (Spherical) และนอกจากนี้ ยังมีอนุภาคทรงกลมบางส่วนมีอนุภาคบริวาร (Satellite) เกาะอยู่ที่ผิว ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.18 เมื่อเพิ่มกำลังขยายภาพ SEM เพื่อศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของอนุภาค พบว่า พื้นผิวอนุภาคมีลักษณะเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite) เกิดเป็นแกนผลึก (Coring) ภายในเกรน ซึ่งโครงสร้างจุลภาคลักษณะนี้ มักพบกับโลหะที่มีการเย็นตัวในสภาวะเร็วกว่าสภาวะสมดุล ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.19



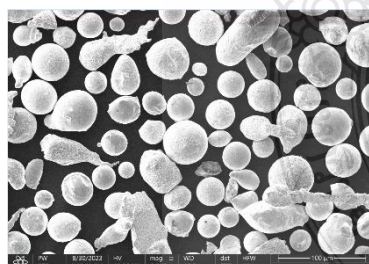
1060 งบศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที่



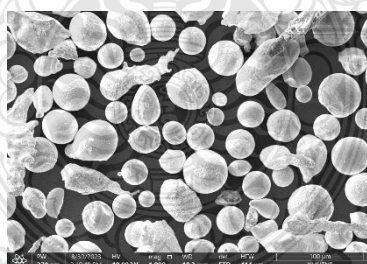
1060 งบศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที่



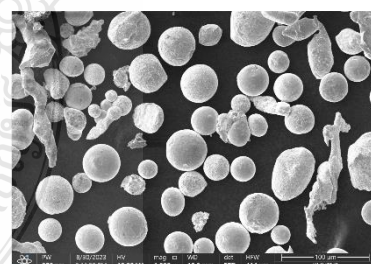
1060 งบศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที่



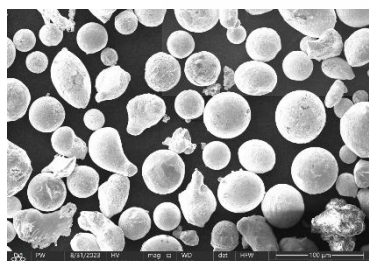
1160 งบศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที่



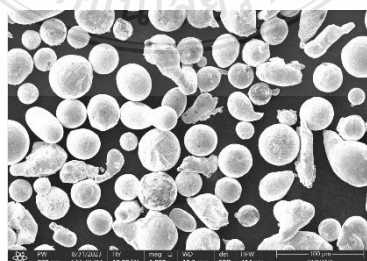
1160 งบศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที่



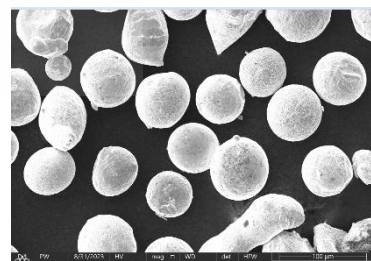
1160 งบศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที่



1260 งบศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที่

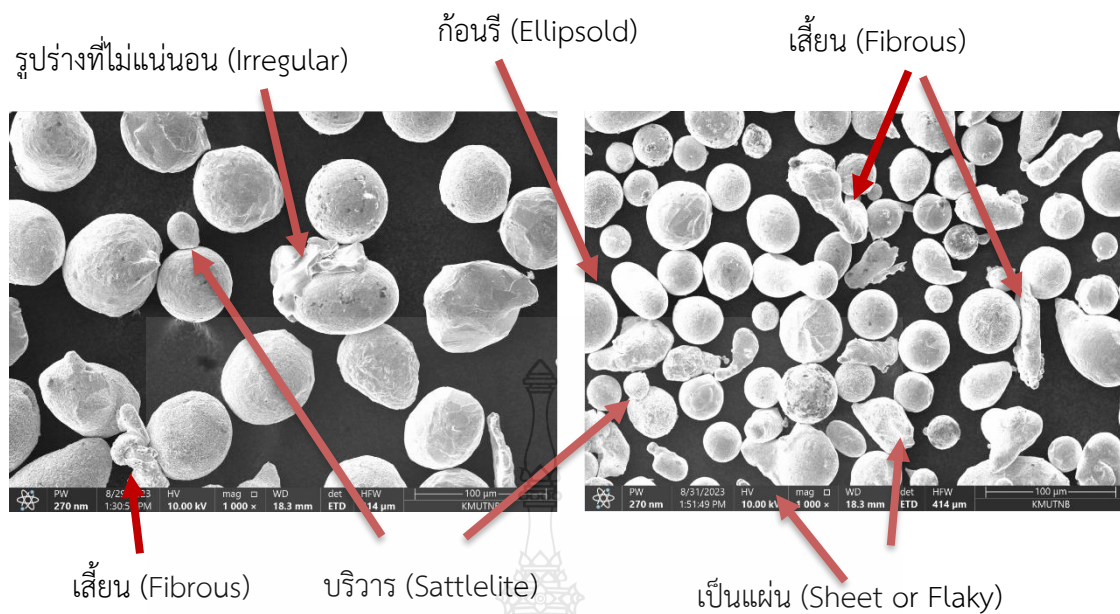


1260 งบศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที่

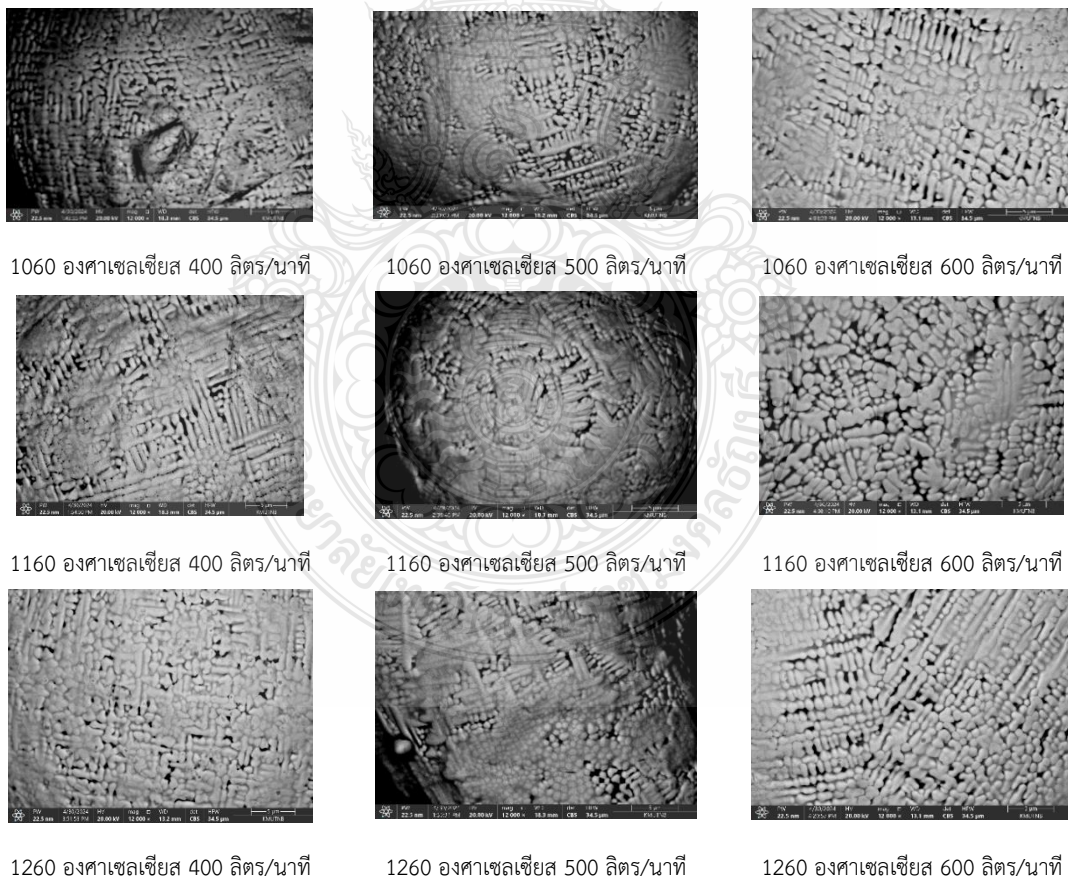


1260 งบศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที่

รูปที่ 4.17 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925



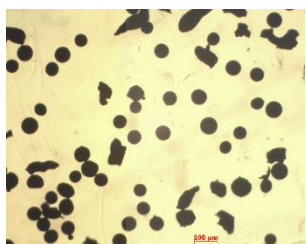
รูปที่ 4.18 ตัวอย่างการจำแนกลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ได้จากการทดลองผลิตภายใต้สภาวะต่างๆ ด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2



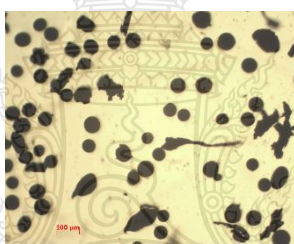
รูปที่ 4.19 ลักษณะรูปร่างพื้นผิวมีลักษณะเป็นเดนไดรต์แบบหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2 กับสภาวะต่างๆ

4.2.3 ค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2

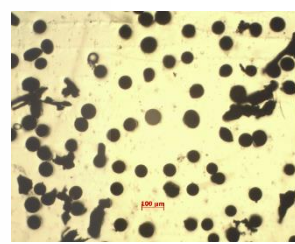
การวิเคราะห์ตรวจสอบค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2 ภายใต้สภาวะต่างๆ ดำเนินการวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยการนำภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscopy) ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.20 มาการวิเคราะห์ตรวจสอบค่าความกลมของอนุภาคด้วย Software ImageJ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ตรวจสอบ พบว่า ภายใต้สภาวะของการผลิตที่แตกต่างกันไม่มีผลทำให้ค่าความกลมของอนุภาคมีความแตกต่างกันมากนัก ค่าความกลมของอนุภาคมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.86-0.87 ดังผลการวิเคราะห์ตรวจสอบที่แสดงในตารางที่ 4.8 และกราฟเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 4.21 โดยมีค่าความกลมสูงสุดเท่ากับ 0.869 ภายใต้สภาวะของการทดลองผลิตที่อุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลว 1260 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซ 600 ลิตรต่อนาที



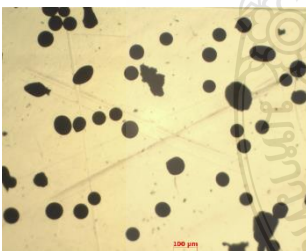
1060 องศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที



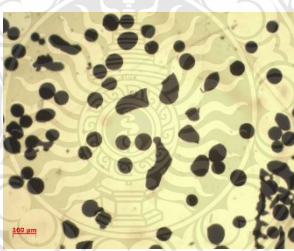
1060 องศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที



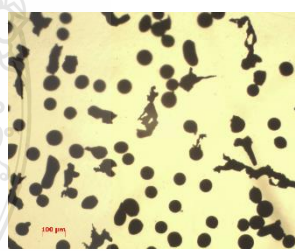
1060 องศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที



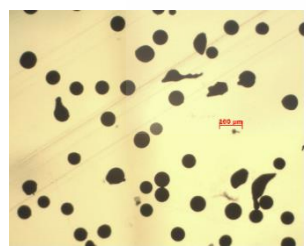
1160 องศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที



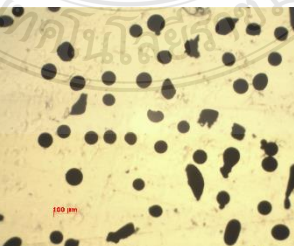
1160 องศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที



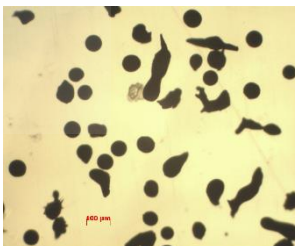
1160 องศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที



1260 องศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที



1260 องศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที

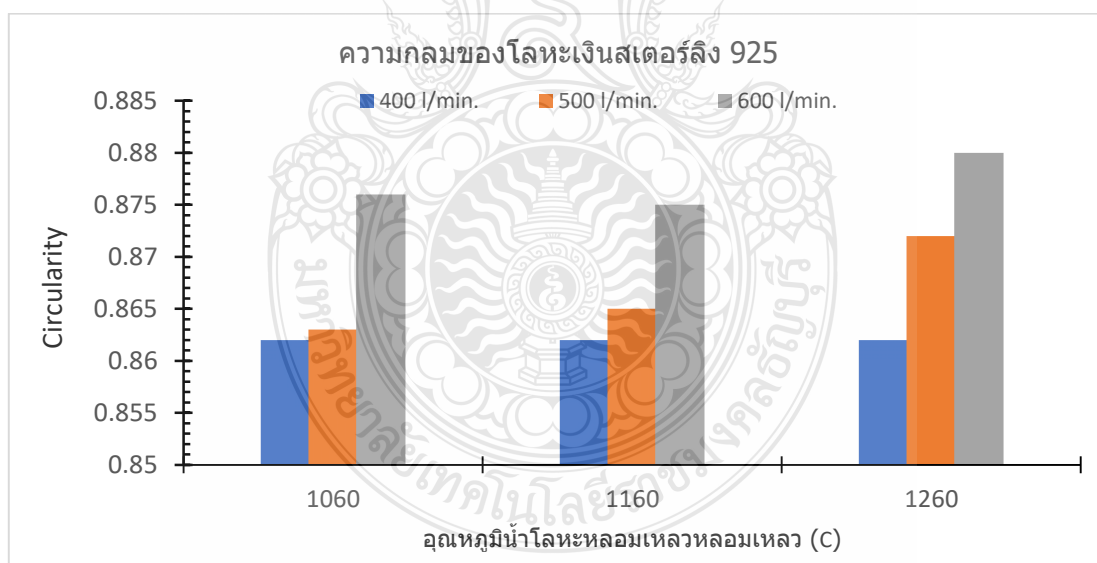


1260 องศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที

รูปที่ 4.20 ภาพตรวจวัดค่าความกลมด้วยกล้องจุลทรรศน์ Optical Microscopy (OM)

ตารางที่ 4.8 ค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2

อุณหภูมิน้ำโลหะ หลอมเหลว(°C)	อัตราการ ไหลของก๊าซ (l/min)	ค่าความกลม Circularity						
		1	2	3	4	5	Aver.	SD
1060	400	0.833	0.868	0.871	0.86	0.878	0.862	0.017
	500	0.847	0.849	0.854	0.881	0.883	0.863	0.018
	600	0.856	0.861	0.882	0.886	0.894	0.876	0.016
1160	400	0.829	0.859	0.867	0.874	0.882	0.862	0.020
	500	0.848	0.855	0.863	0.875	0.885	0.865	0.015
	600	0.883	0.859	0.862	0.874	0.898	0.875	0.016
1260	400	0.828	0.858	0.867	0.875	0.884	0.862	0.022
	500	0.844	0.856	0.874	0.887	0.899	0.872	0.022
	600	0.864	0.874	0.883	0.904	0.913	0.888	0.020



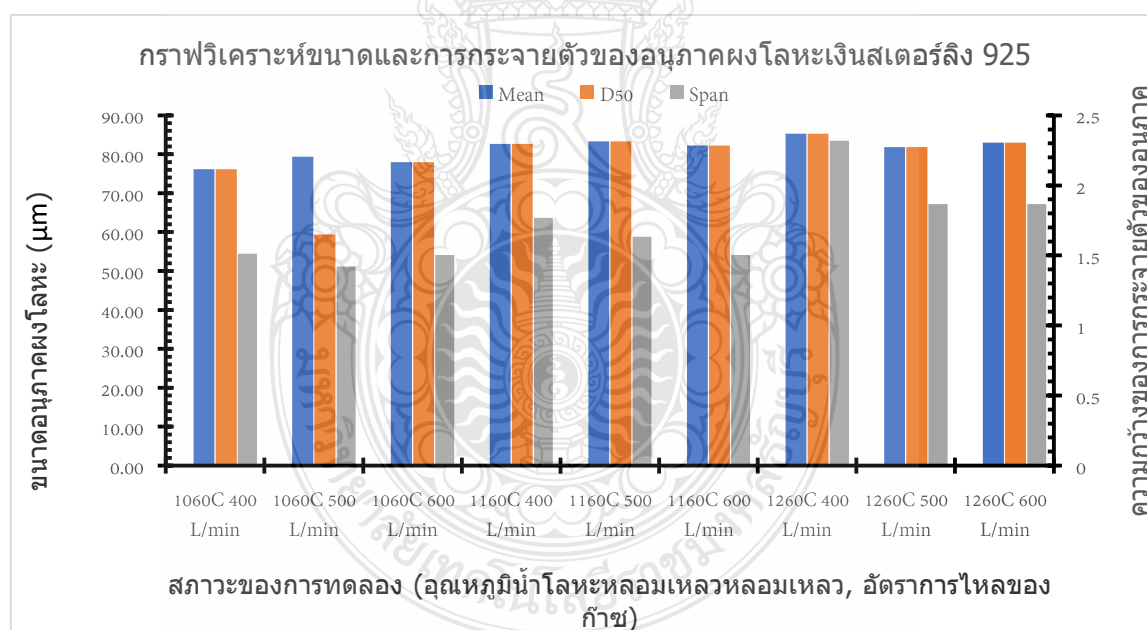
รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2

4.2.4 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2

การศึกษาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผลิตโดยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2 ด้วยเครื่อง Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer model LA-950 พบว่า สภาวะของการทดลองที่แตกต่างกัน มีผลทำให้ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.4 ผลจากการวิเคราะห์ตรวจสอบขนาดอนุภาคผงโลหะหัวพ่นรูปแบบที่ 2 พบว่า ภายใต้สภาวะของการทดลองที่อุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลวและอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่ามัธยฐาน (Median size) หรือค่า D_{50} มีแนวโน้มมีขนาดเล็กลง และค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Span) มีค่าลดลงหรือแคบลง ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 4.9 ในกรณีของอุณหภูมิเทน้ำโลหะที่ 1160 และ 1260 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซที่ 400 500 และ 600 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิเทน้ำโลหะที่เพิ่มขึ้นและอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ได้ปริมาณอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากการที่อุณหภูมิเทน้ำโลหะที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความตึงผิวของน้ำโลหะหรือความหนืดและความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมของน้ำโลหะมีแนวโน้มมีค่าลดลงสามารถไหลตัวได้ดีขึ้นและส่งผลให้น้ำโลหะสามารถแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะได้ง่ายขึ้นและมีขนาดเล็กลงได้มากขึ้น และเมื่อมีการบูรณาการร่วมกับอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้น จะยิ่งส่งผลให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็กได้มากยิ่งขึ้น แต่สำหรับภายใต้สภาวะของอุณหภูมิ น้ำโลหะหลอมเหลว 1060 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซ 400 ลิตรต่อนาที จะได้ค่า D_{50} ของอนุภาคผงโลหะที่เล็กที่สุดมีค่าเท่ากับ 76.17 ไมโครเมตร และมีค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบที่สุดเท่ากับ 1.512 จากข้อมูลของการเปรียบเทียบเกี่ยวกับสภาวะของการทดลองผลิตผงโลหะกับขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะ แสดงให้เห็นว่า อาจเกิดจากลักษณะโครงสร้างอนุภาคผงที่ได้มีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงต่างๆของตัวอย่างอนุภาคไปทำการตรวจสอบที่แสดงในรูปที่ 4.22

ตารางที่ 4.9 ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อน ขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2

อุณหภูมิ น้ำโลหะ (°C)	อัตราการไหล ของก๊าซ (L/min)	Median size (μm)	Mean Size (μm)	Variance (μm^2)	SD (μm)	Mode size (μm)	Span	D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)
1060	400	76.167	88.856	2599.5	50.985	72.680	1.512	40.725	76.167	155.941
	500	79.409	91.020	2483.1	49.231	82.264	1.420	43.180	59.409	155.956
	600	78.005	90.589	2627.3	51.257	82.056	1.504	41.695	78.005	159.069
1160	400	82.682	101.336	3923.0	62.633	82.175	1.768	44.010	82.682	190.229
	500	83.356	100.401	3520.8	59.336	82.242	1.633	46.209	83.356	182.404
	600	82.242	96.795	3076.2	55.463	82.371	1.503	45.887	82.242	169.516
1260	400	85.297	116.308	7103.4	84.281	72.264	2.320	42.557	85.297	240.498
	500	81.849	102.516	4452.5	66.727	72.747	1.867	43.053	81.849	195.866
	600	83.013	103.849	4526.5	67.279	82.111	1.867	43.378	83.013	198.398



รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบขนาดและการกระจายตัวของผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925

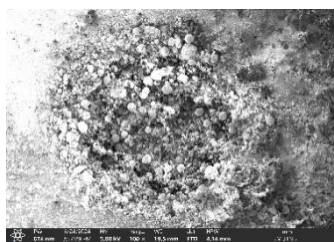
4.2.5 การทดลองขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อน ขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่นแบบที่ 2

ในการทดลองนี้ ได้ทำการขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านการร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ซึ่งได้มาจากการผลิตด้วยหัวพ่นแบบที่ 1 โดยการทดลองใช้ผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผลิตโดยวิธีการทำให้เป็นอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ และนำไปใช้เป็นวัสดุทดลองในการขึ้นรูปและทดสอบดังนี้ วิธีการทดลอง การเตรียมตัวอย่างผงโลหะที่ผ่านการร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ถูกใช้ในการผลิตขึ้นทดสอบ แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปผงโลหะแสดงในรูปที่ 4.23 นำชิ้นงานที่ได้ไปทดลองโดยใช้เครื่องเชื่อมเลเซอร์รุ่น iWeld Professional เชื่อมด้วยเลเซอร์ช่วยให้เห็นการรวมตัวกันของผงโลหะในแต่ละสถานะของอุณหภูมิและแรงดันก๊าซแต่ละสถานะ ใช้การยิงเลเซอร์เฉพาะจุดโดยทำการยิงซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของขึ้นทดสอบของการเชื่อมและการรวมตัวของผงโลหะรูปภาพลักษณะโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.24

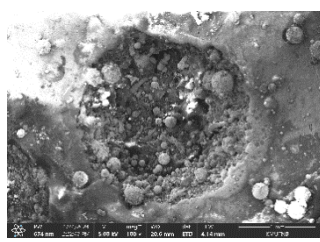
สรุปการขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 โดยการใช้เลเซอร์เชื่อมช่วยให้สามารถตรวจสอบการรวมตัวของผงโลหะ ผลลัพธ์จากการทดลองนี้มีความสำคัญในการเข้าใจพฤติกรรมของผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ภายใต้กระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ และช่วยในการปรับปรุงกระบวนการเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพดียิ่งขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของน้ำโลหะหลอมเหลวที่ 1160 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซ 400 ลิตรต่อนาที เป็นสถานะที่ดีที่สุด



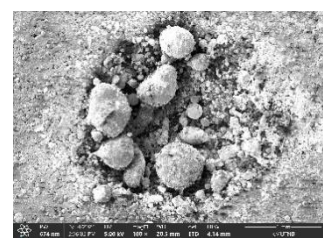
รูปที่ 4.23 ทดลองขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925



1060องศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที่



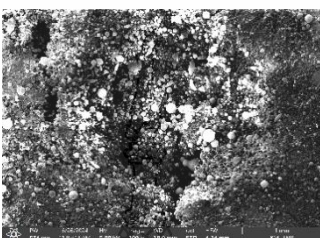
1060องศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที่



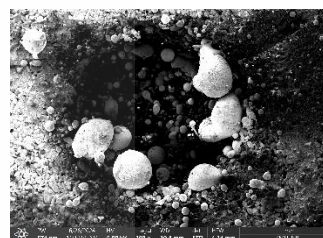
1060องศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที่



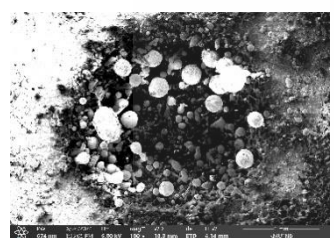
1160องศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที่



1160องศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที่



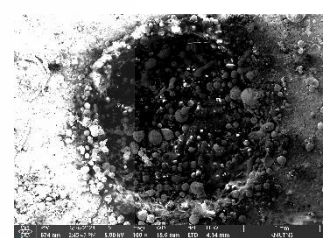
1160องศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที่



1260องศาเซลเซียส 400 ลิตร/นาที่



1260องศาเซลเซียส 500 ลิตร/นาที่



1260องศาเซลเซียส 600 ลิตร/นาที่

รูปที่ 4.24 ลักษณะรูปร่างการหลอมโลหะด้วยเลเซอร์เฉพาะจุด (SLM) กับสภาวะต่างๆ

4.3 อภิปรายเปรียบเทียบผลการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตรที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่น 2 รูปแบบ

4.3.1 หัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 และแบบที่ 2

จากผลการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ที่มีลักษณะเป็นหัวพ่นก๊าซแบบ Close-Couple Nozzle 1 ที่มีรูปล่อยก๊าซรูเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ และแบบหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ Close-Couple Nozzle 2 ภายใต้สภาวะของการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1060, 1160 และ 1260 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซที่ 400, 500 และ 600 ลิตรต่อนาที โดยทำการทดลองผลิตครั้งละ

1000 กรัม พบว่า ทุกสภาวะของการทดลองได้ปริมาณผงโลหะใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 970 — 990 กรัม หรือคิดเป็น 87% — 99% ของปริมาณโลหะที่ใช้ผลิต เมื่อวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของอุณหภูมิเหน้าโลหะ และอัตราการไหลของก๊าซที่มีผลต่อปริมาณ ลักษณะรูปร่าง ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะ โดยเลือกอนุภาคที่มีขนาดอนุภาค ≤ 50 ไมโครเมตรเป็นเกณฑ์ในการอภิปรายผลการทดลอง เนื่องจากเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง 3D printer สามารถแยกอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

4.3.2 ปริมาณผลผลิต

จากการศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยหัวพ่นก๊าซที่มีลักษณะเป็นหัวพ่นก๊าซแบบมีรูปล้อยก๊าซชุดเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ Close-Couple Nozzle 1 และ หัวพ่นแบบมีหลายรูปล้อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ Close-Couple Nozzle 2 ของอุณหภูมิเหน้าโลหะและอัตราการไหลของก๊าซที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตของหัวพ่นรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 ตามลำดับดังรายละเอียดที่แสดงในตาราง 4.1 กราฟเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 4.1 และ ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่า โดยอุณหภูมิเหน้าโลหะที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความตึงผิวของน้ำโลหะ (Surface Tension) หรือความหนืด (Viscosity) และความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอม (bonding strength) ของน้ำโลหะมีแนวโน้มมีค่าลดลง ส่งผลทำให้สามารถไหลตัว (Fluidity) ได้ดีขึ้นและน้ำโลหะสามารถแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะหยดเล็กๆ ได้ง่ายขึ้น และมีขนาดเล็กลงได้มากขึ้น เมื่อถูกกระทบด้วยตัวกลางที่เป็นก๊าซหรือของไหลที่ทำให้เกิดกระบวนการอะตอมไมซ์ (Atomized Process) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาวิจัยของ Jialun Wu et al.[79] ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิเหน้าโลหะหลอมเหลวที่มีผลต่อขนาดอนุภาคผงโลหะ ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิของน้ำโลหะที่มีเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความหนืดของโลหะหลอมเหลวจะลดลง นำไปสู่อนุภาคที่ละเอียดยิ่งขึ้น เนื่องจากความหนืดที่ต่ำกว่าจะทำให้ น้ำโลหะหลอมเหลวแตกตัวเป็นหยดเล็กๆ ได้ง่ายขึ้นในระหว่างกระบวนการของการทำให้เป็นละอองหรือกระบวนการอะตอมไมซ์ สำหรับในส่วนของการอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้น้ำโลหะแตกตัวเป็นปริมาณละอองของเหลวได้มากขึ้น เนื่องอัตราส่วนการไหลของก๊าซต่อโลหะ (Gas to metal flow ratio; GMR) ที่สูงขึ้นจะส่งผลทำให้อนุภาคละเอียดยิ่งขึ้น จากการที่มีพลังงานก๊าซมากขึ้นช่วยให้มีความสามารถสลายก้อนน้ำโลหะเหลวให้เป็นหยดเล็กๆ ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ A. Lampe et al. [80], A.J. Yule et al. [81], ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอัตราการไหลและความเร็วของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อขนาดละอองน้ำโลหะ ซึ่งผลจากการศึกษา พบว่า อัตราการไหลและความเร็วของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีผลช่วยให้การก่อตัวของละอองน้ำโลหะมีขนาดเล็กลง

4.3.3 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

จากการศึกษาวิเคราะห์หัตถิพลที่มีผลต่อลักษณะรูปร่างของอนุภาค ผลิตภัณฑ์ผงโลหะ เงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยหัวพ่นก๊าซที่มีลักษณะเป็นหัวพ่นก๊าซแบบมีรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ Close-Couple Nozzle 1 และ หัวพ่นแบบมีหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ Close-Couple Nozzle 2 ของอุณหภูมิเทน้ำโลหะและอัตราการไหลของก๊าซที่มีผลต่อลักษณะรูปร่างของอนุภาคของหัวพ่นรูปแบบที่ 1 ดังรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 และรูปแบบที่ 2 ดังรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 พบว่า อนุภาคผงที่ได้มีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงต่างๆ ซึ่งประกอบรูปร่างเป็นแผ่น (Sheet or Flaky) เส้นมน (Ligament) เส้นใย (Fibrous) ก้อนรี (Ellipsoidal) รูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) แต่อนุภาคส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปร่างทรงกลมหรือเกือบเป็นทรงกลม (Spherical) และนอกจากนี้ ยังมีอนุภาคทรงกลมบางส่วนมีอนุภาคบริวาร (Satellite) เกาะอยู่ที่ผิว ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.5, 4.18 โดยอนุภาคผงที่มีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่น เส้นมน เส้นใย ก้อนรี เกิดจากการที่น้ำโลหะบางส่วนแตกตัวด้วยกลไกการแตกตัวของน้ำโลหะครั้งที่หนึ่ง (Firstly breakup) กลายเป็นแผ่นบางแล้วเย็นตัวกลายเป็นของแข็งทันที โดยไม่มีโอกาสแตกตัวครั้งที่สองได้ ส่วนอนุภาคที่มีลักษณะรูปร่างทรงกลมเกิดจากการที่น้ำโลหะแตกตัวด้วยกลไกการแตกตัวของน้ำโลหะครั้งที่สอง (Secondary breakup) กลายเป็นละอองน้ำโลหะขนาดเล็กแล้วเย็นตัวกลายเป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก ตามทฤษฎีกลไกการแตกตัวของน้ำโลหะ [30] ที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.2 ในบทที่ 2 ซึ่งเป็นธรรมชาติของกระบวนการกระบวนการอะตอมไมซ์ด้วยที่จะได้ผลผลิตออกมาเป็นอนุภาคทรงกลม [82] และในส่วนของอนุภาคบริวารเกิดจากละอองน้ำโลหะขนาดเล็กมากๆ เกาะติดกับพื้นผิวของอนุภาคขนาดใหญ่กว่า ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อหยดละอองน้ำโลหะต่างๆ ชนกันและกลั้บมารวมกันบางส่วนก่อนที่จะแข็งตัวเต็มที่ อนุภาคบริวารที่เกิดขึ้นนี้อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผงโลหะที่ใช้ในการผลิตแบบเติมเนื้อ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษา He Xin-yu et al. [83] ที่ได้มีการอธิบายเกี่ยวกับกลไกการเกิดอนุภาคบริวารและทำการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมการเกิดอนุภาคบริวารโดยอาศัยการควบคุมการไหลของก๊าซในกระบวนการอะตอมไมซ์ด้วยก๊าซ โดยอาศัยการจำลองเชิงตัวเลขโดยซอฟต์แวร์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเชิง ANSYS Fluent ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สามารถป้องกันการกักเก็บอนุภาคละเอียดในอาณาบริเวณที่เกิดการหมุนวนของก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้อัตราการเกิดอนุภาคบริวารลดลง 45% และนอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของอนุภาค พบว่า พื้นผิวอนุภาคมีลักษณะเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite) เกิดเป็นแกนผลึก (Coring) ภายในเกรน โดยเดนไดรต์เป็นลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่มักพบกับโลหะที่มีการเย็นตัวในสภาวะเร็วกว่าสภาวะสมดุล ซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราการเย็นตัวของโลหะเป็นหลักซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษา N. Ciftci et al. [84] โดยอัตราการเย็นตัวหรือการระบายความร้อนที่สูงมีแนวโน้มที่จะสร้าง

เดนไดรต์ที่มีขนาดเล็กลงและมีผลทำให้มีความเหนียวที่สูงขึ้น และเมื่อกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์ของอนุภาคผงโลหะ พบว่า มีงานวิจัยจำนวนมากทำการศึกษาเกี่ยวกับการเกิด Secondary dendrite arm spacing (SDAS) ของอนุภาคผงโลหะจากกระบวนการอะตอมไมซ์ด้วยก๊าซ

4.3.4 ความกลมของอนุภาค

ความกลมของอนุภาคผงโลหะเป็นตัวแปรสำคัญในการประเมินคุณภาพของผงโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งาน เช่น การผลิตแบบเติมเนื้อ (AM) ซึ่งจะวัดรูปร่างของอนุภาคว่าอยู่ใกล้วงกลมสมบูรณ์เพียงใด โดยค่าที่เข้าใกล้ 1 แสดงถึงความกลมที่มากขึ้น จากการศึกษาอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยหัวพ่นก๊าซที่มีลักษณะเป็นหัวพ่นก๊าซแบบมีรูปล่อยก๊าซรูเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ Close-Couple Nozzle 1 และ หัวพ่นแบบมีหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ Close-Couple Nozzle 2 ของอุณหภูมิเหน้าโลหะและอัตราการไหลของก๊าซที่มีผลต่อลักษณะรูปร่างของอนุภาคของหัวพ่นรูปแบบที่ 1 ดังรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 4.7 ในส่วนที่แสดงดังตารางที่ 4.3 และกราฟเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 4.8 และรูปแบบที่ 2 รายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 4.20 ในส่วนที่แสดงในตารางที่ 4.8 และกราฟเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 4.21 ตามลำดับด้วย Software image J พบว่า ภายใต้สภาวะของการผลิตที่แตกต่างกันมี ไม่มีผลทำให้ค่าความกลมของอนุภาคมีความแตกต่างกันมากนัก ค่าความกลมของอนุภาคมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.84-0.88 โดยมีค่าความกลมสูงสุดเท่ากับ 0.88 ภายใต้สภาวะของการทดลองผลิตที่อุณหภูมิเหน้าโลหะหลอมเหลว 1260 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซ 600 ลิตรต่อนาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความกลมของอนุภาคมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยอุณหภูมิเหน้าโลหะเป็นตัวแปรสำคัญในกระบวนการอะตอมไมซ์ด้วยก๊าซ ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อความเป็นวงกลมของผงโลหะที่ผลิต สรุปลงโดยย่อเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิเหน้าโลหะต่อกระบวนการประกอบด้วย [85] 1) อัตราการการเย็นตัว โดยอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะที่สูงขึ้นจะนำไปสู่อัตราการเย็นตัวที่สูงขึ้น เมื่อน้ำโลหะถูกทำให้กลายเป็นละอองขนาดเล็ก การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและอาจส่งผลให้อนุภาคมีรูปร่างทรงกลมมากขึ้น เนื่องจากการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว 2) ความหนืด เนื่องจากความหนืดของน้ำโลหะจะลดลงแปรผกผันกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการทำให้เป็นละอองน้ำโลหะ นำไปสู่อนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเล็กละเอียดและได้ปริมาณมากขึ้น 3) แรงตึงผิว เนื่องอุณหภูมิเหน้าโลหะหลอมเหลวที่เพิ่มสูงขึ้นจะช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะ ซึ่งช่วยให้เกิดการก่อตัวของหยดทรงกลมในระหว่างกระบวนการทำให้เป็นละอองน้ำโลหะ [85] 4) ปฏิกริยาระหว่างก๊าซกับน้ำโลหะ โดยปฏิกริยาระหว่างก๊าซที่ทำให้เป็นน้ำโลหะแตกตัวเป็นละอองและน้ำโลหะจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นที่

อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้การแตกตัวของลำกระแสน้ำโลหะกลายเป็นอนุภาคทรงกลมละเอียด แต่ผลการวิจัยนี้มีความขัดแย้งกับผลการศึกษาของ S. Cacace et al. [86] ที่ได้สรุปผลการศึกษาเกี่ยวกับอัตราส่วนก๊าซต่อโลหะ (Gas to metal flow ratio; GMR) ไว้ว่า โดยทั่วไป GMR ที่สูงขึ้นจะนำไปสู่อนุภาคที่ละเอียดกว่าแต่สามารถลดความเป็นวงกลมลงได้ โดยเฉพาะในส่วนของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้รูปร่างของอนุภาคไม่สม่ำเสมอมากขึ้น แต่กลับมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ N. D. Shchetinina et al. [87] ที่ได้สรุปผลการศึกษาไว้ว่า ความดันแก๊สและอัตราการไหลที่สูงขึ้นสามารถปรับปรุงความเป็นวงกลมโดยช่วยให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งช่วยในการสร้างอนุภาคทรงกลมมากขึ้น

4.3.5 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

จากการศึกษาอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยหัวพ่นก๊าซที่มีลักษณะเป็นหัวพ่นก๊าซแบบมีรูปล่อยก๊าซรูเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ Close-Couple Nozzle 1 และ หัวพ่นแบบมีหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ Close-Couple Nozzle 2 ของอุณหภูมิเทน้ำโลหะและอัตราการไหลของก๊าซที่มีผลต่อลักษณะรูปร่างของอนุภาคของหัวพ่นรูปแบบที่ 1 ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 4.5 และกราฟเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปแบบที่ 2 รายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 4.9 และกราฟเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่า อุณหภูมิเทน้ำโลหะและอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่ามัธยฐาน (Median size) หรือค่า D50 มีแนวโน้มมีขนาดเล็กลง และค่าการกระจายตัวขนาดอนุภาค (Span) มีแนวโน้มมีค่าลดลงหรือแคบลง โดยภายใต้สภาวะของอุณหภูมิเทน้ำโลหะหลอมเหลว 1260 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซ 600 ลิตรต่อ นาที จะได้ค่า D50 ของอนุภาคผงโลหะที่เล็กที่สุดมีค่าเท่ากับ 77.94 ไมโครเมตร และมีค่าการกระจายตัวขนาดอนุภาคที่แคบที่สุดเท่ากับ 1.309 และนอกจากนี้ จากข้อมูลของกราฟที่เปรียบเทียบเกี่ยวกับสภาวะของการทดลองผลิตผงโลหะกับขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะ แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิเทน้ำโลหะที่เพิ่มขึ้นและอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ได้ปริมาณอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากการที่อุณหภูมิเทน้ำโลหะที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความตึงผิวของน้ำโลหะหรือความหนืดและความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมของน้ำโลหะมีแนวโน้มมีค่าลดลง สามารถไหลตัวได้ดีขึ้นและส่งผลให้น้ำโลหะสามารถแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะได้ง่ายขึ้นและมีขนาดเล็กลงได้มากขึ้น และนอกจากนี้ อุณหภูมิเทน้ำโลหะที่สูงมีผลให้อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะสูงขึ้นตามไปด้วยและมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและทำให้ได้โครงสร้างจุลภาคและขนาดอนุภาคโลหะที่ละเอียดยิ่งขึ้น [88,89] และเมื่อมีการบูรณาการร่วมกับอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้น จะยังส่งผลทำให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัว

เป็นละอองขนาดเล็กได้มากยิ่งขึ้นจากอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้น และส่งผลต่อเนื่องทำให้ค่าการกระจายตัวขนาดอนุภาคแคบลงตามไปด้วย เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มสูงขึ้น ช่วยการเพิ่มประสิทธิภาพในการให้น้ำโลหะแตกเป็นละอองที่มีขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น ทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กลง และการกระจายขนาดอนุภาคแคบลง จากการแตกตัวออกเป็นหยดละอองเล็กๆ [90] และนอกจากนี้ ยังมีผลทำให้อัตราส่วนก๊าซต่อโลหะ (GMR) เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ก๊าซที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณโลหะ ซึ่งยังช่วยให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงและละเอียดยิ่งขึ้นและยังทำให้การกระจายขนาดอนุภาคมีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น

4.3.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัวพ่นก๊าซ

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัวพ่นก๊าซแบบต่างๆ

ประสิทธิภาพของหัวพ่น	หัวพ่นก๊าซแบบที่ 1	หัวพ่นก๊าซแบบที่ 2
ปริมาณอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้ (พิจารณาจากอนุภาคที่มีขนาด ≤ 50 ไมโครเมตร)	ได้ปริมาณอนุภาคผงโลหะที่มีขนาด ≤ 50 ไมโครเมตร จำนวน 365.44 กรัม ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ น้ำโลหะ หลอมเหลวอัตราการไหลของก๊าซ	ได้ปริมาณอนุภาคผงโลหะที่มีขนาด ≤ 50 ไมโครเมตร จำนวน 302.62 กรัม ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ น้ำโลหะ หลอมเหลวอัตราการไหลของก๊าซ
ลักษณะรูปร่างของอนุภาค	รูปร่างส่วนใหญ่เป็นอนุภาคทรงกลม มีบริวารเล็กน้อย และมีโครงสร้างแบบเดนไดรต์	รูปร่างส่วนใหญ่เป็นอนุภาคทรงกลม มีบริวารเล็กน้อย และมีโครงสร้างแบบเดนไดรต์
ความกลมของอนุภาค	ผลของค่าความกลมแต่ละหัวพ่น 0.884	ผลของค่าความกลมแต่ละหัวพ่น 0.869
ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะ	ขนาดอนุภาค D50 ที่เล็กที่สุดมีค่าเท่ากับ 77.94 ไมโครเมตร แต่มีค่าความแคบของขนาดอนุภาคของผงโลหะที่เฉลี่ย (Span) เท่ากับ 1.37	ขนาดอนุภาค D50 ที่เล็กที่สุดมีค่าเท่ากับ 76.17 ไมโครเมตร มีค่าความแคบของขนาดอนุภาคของผงโลหะเฉลี่ย (Span) เท่ากับ 1.71

การออกแบบหัวพ่นก๊าซและจำนวนรูพ่นก๊าซ รวมถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูก๊าซ อาจส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคได้ การออกแบบหัวพ่นก๊าซที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความเป็นวงกลมได้โดยทำให้มีการทำให้เป็นละอองสม่ำเสมอ [91]

4.4 อภิปรายผลการทดลองขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยหัวพ่นก๊าซที่มีลักษณะแตกต่างกัน 2 รูปแบบ

การทดลองขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ไมโครเมตร ที่ได้จากการทดลองผลิตด้วยหัวพ่น 2 รูปแบบ เทคโนโลยีขึ้นสูงด้วยเลเซอร์ Selective Laser Melting: (SLM) ซึ่งเป็นเทคนิคการผลิตแบบเติมเนื้อ มีศักยภาพในการสร้างส่วนประกอบ ซึ่งแตกต่างอย่างสิ้นเชิงจากเทคนิคการผลิตแบบใช้วัสดุเท่ากันต่างจากแบบดั้งเดิม [92-94] เป็นเทคโนโลยีใหม่ คือ เทคโนโลยีการผลิตแบบเติมแต่งที่หลอมโลหะผงอย่างเลือกจุดและทำให้แข็งตัว สำหรับองค์ประกอบโลหะผสมอื่นๆ [95] โดยใช้เครื่องเชื่อมด้วยกำลังเลเซอร์รุ่น iWeld Professional เลเซอร์เฉพาะจุด เมื่อเปรียบเทียบของอนุภาคของหัวพ่นรูปแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และรูปแบบที่ 2 รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่า Close-Coupled Nozzle1 และ 2 ที่อุณหภูมิน้ำโลหะหลอมเหลว 1060 , 1160 และ 1260 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของก๊าซ 400,500 และ 600 ลิตรต่อนาที ลักษณะโครงสร้างที่ผ่านการ SEM มีลักษณะเป็นก้อนกลม มีบางอนุภาคที่ไม่ติดกัน มีการกระจายตัวหลังจากยิงเลเซอร์ อย่างไรก็ตามการทดลองนี้ผงโลหะรวมติดกันดีที่สุดอุณหภูมิน้ำโลหะหลอมเหลว 1160 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของก๊าซ 400 ลิตรต่อนาที ของทั้ง 2 รูปแบบหัวพ่น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การผลิตอนุภาคผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซมีข้อดีหลายประการที่ทำให้เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมการผลิตผงโลหะ เนื่องจากอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดเล็กและความสม่ำเสมอของคุณภาพผงโลหะสูงเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น กระบวนการมีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากกระบวนการนี้ลดการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก สามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์การผลิตเพื่อให้ได้คุณสมบัติของอนุภาคผงโลหะที่ต้องการ ประสิทธิภาพการผลิตสูง ผลิตได้ปริมาณมาก ทำให้เหมาะสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม จากเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการวิจัยพัฒนา โดยมีเป้าหมายที่ต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทย ซึ่งผู้วิจัยเลือกศึกษาวิจัยในส่วนของ การออกแบบพัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพของหัวพ่นก๊าซด้วยการออกแบบหัวพ่นก๊าซ 2 แบบที่มีลักษณะแตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตผงโลหะ โดยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 ออกแบบให้มีลักษณะเป็นหัวพ่นก๊าซแบบ Close-Coupled Nozzle ที่มีรูปล่อยก๊าซตรงเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ (หรือเรียกว่า “หัวพ่นก๊าซแบบที่ 1”) สำหรับในส่วนของหัวพ่นก๊าซแบบที่ 2 ออกแบบให้มีลักษณะเป็นหัวพ่นก๊าซแบบ Close-Coupled Nozzle ที่มีหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ (หรือเรียกว่า “หัวพ่นก๊าซแบบที่ 2”) ในที่นี้มีรูปล่อยก๊าซจำนวน 18 รู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร

หัวพ่นก๊าซทั้ง 2 แบบ ถูกออกแบบให้แนวปะทะของก๊าซทำมุมกับลำกระแสน้ำโลหะเท่ากับ 22 องศา ระยะความยาวโพกัสของการปะทะวัดระยะจากปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะเท่ากับ 22.65 มิลลิเมตร สำหรับนำมาใช้ในการทดลองผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ดำเนินการทดลองภายใต้สภาวะของการทดลองที่มีตัวแปรคงที่ประกอบ 1) ท่อลำเลียงน้ำโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร 2) วัตถุดิบโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ใช้ในการทดลองครั้งละ 1000 กรัม 3) ก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99.99% เป็นตัวกลางในการทดลอง สำหรับในส่วนของ การแปรเปลี่ยนตัวแปรต้นที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย 1) แปรเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำโลหะ 3 ค่า 1060 1160 และ 1260 องศาเซลเซียส 2) อัตราการไหลของแปรเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำโลหะ 3 ค่า 400 500 และ 600 ลิตรต่อนาที เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตผงโลหะของหัวพ่นแต่ละแบบ ภายใต้อิทธิพลของอุณหภูมิน้ำโลหะและอัตราการไหลของก๊าซที่มีผลต่อปริมาณการผลิตและคุณภาพของอนุภาคผงโลหะ (ลักษณะรูปร่าง ค่า

ความกลม ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่มีขนาด ≤ 50 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ

5.1 ผลการศึกษาวิจัย

ผลที่ได้จากการทดลองศึกษาวิจัย พบว่า

5.1.1 ปริมาณผลผลิต

1) ผลผลิตโดยรวมไม่มีการแยกขนาดอนุภาค หัวพ่นแบบที่ 1 สามารถผลิตจำนวนที่มากกว่าหัวพ่นแบบที่ 2

2) อนุภาคผงที่มีขนาด ≤ 50 ไมโครเมตร หัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 ผลิตได้จำนวน 365.44 กรัม ภายใต้สภาวะแปรเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำโลหะ 3 ค่า 1060 1160 และ 1260 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ 3 ค่า 400 500 และ 600 ลิตรต่อนาที หัวพ่นแบบที่ 2 ผลิตได้จำนวน 302.62 กรัม ภายใต้สภาวะแปรเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำโลหะ 3 ค่า 1060 1160 และ 1260 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ 3 ค่า 400 500 และ 600 ลิตรต่อนาที

3) อุณหภูมิน้ำโลหะที่สูงขึ้นมีผลทำให้ได้ปริมาณผลผลิตอนุภาคผงที่มีขนาด ≤ 50 ไมโครเมตร เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิน้ำโลหะที่สูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณผลผลิตของอนุภาคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

4) อัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นมีผลทำให้ได้ปริมาณผลผลิตอนุภาคผงที่มีขนาด ≤ 50 ไมโครเมตร เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณผลผลิตของอนุภาคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5.1.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

ลักษณะรูปร่างของอนุภาคที่ได้จากการผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีลักษณะไม่แตกต่างกัน โดยมีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงต่างๆ ซึ่งประกอบรูปร่างเป็นแผ่น (Sheet or Flaky) เส้นมน (Ligament) เส้นใย (Fibrous) ก้อนรี (Ellipsoidal) รูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) แต่อนุภาคส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมหรือเกือบเป็นทรงกลม (Spherical) อุณหภูมิน้ำโลหะที่สูงขึ้นมีผลทำให้ได้รูปร่างของอนุภาคที่มีลักษณะกลมเพิ่มขึ้นและอัตราการไหลของก๊าซที่สูงมีผลทำให้รูปร่างของอนุภาคที่มีลักษณะกลมเพิ่มขึ้น

5.1.3 ค่าความกลมของอนุภาค

ค่าความกลมของอนุภาคที่ได้จากการผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 0.884 และ 0.864 ตามลำดับ โดยอนุภาคน้ำโลหะที่สูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความกลมของอนุภาคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากความตึง ความหนืดของน้ำโลหะและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะอะตอมลดลงทำให้ไหลตัวได้ดีขึ้นและแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็กได้มากขึ้น

5.1.4 ค่าของขนาดและการกระจายตัว

ขนาดและการกระจายตัวที่ได้จากการผลิตด้วยหัวพ่นก๊าซแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน พบว่า อนุภาคน้ำโลหะและอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่ามัธยฐาน (Median Size) หรือค่า D_{50} แนวโน้มมีขนาดเล็กลง และค่าของขนาดและการกระจายตัวอนุภาค (Span) มีแนวโน้มมีค่าลดลงหรือแคบลง มีค่าค่าของขนาดและการกระจายตัวอนุภาคที่แคบที่สุดเท่ากับ 1.309 และนอกจากนี้ อนุภาคน้ำโลหะที่เพิ่มขึ้นและอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ได้ปริมาณอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากการที่อนุภาคน้ำโลหะที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความตึงผิวของน้ำโลหะหรือความหนืดและความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมของน้ำโลหะมีแนวโน้มมีค่าลดลงสามารถไหลตัวได้ดีขึ้นและส่งผลให้น้ำโลหะสามารถแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะได้ง่ายขึ้นและมีขนาดเล็กลงได้มากขึ้น

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

5.2.1 เครื่องมือในการตรวจสอบยังแพง วัสดุแพงและใช้อย่างจำกัด ในเมืองไทยในการทดลองผลิตนี้ไปพัฒนาต่อในเชิงลึกเกี่ยวกับกระบวนการทางด้านเทคโนโลยีโลหะผงวิทยา

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรมีการศึกษากระบวนการผลิตผงโลหะด้วยกระบวนการพ่นละอองโลหะด้วยการใช้ก๊าซชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงก๊าซไนโตรเจนมาทำการศึกษา เช่น อาร์กอน หรือ ฮีเลียม เพื่อหาชนิดของก๊าซที่เหมาะสมและป้องกันปัญหาการเกิดออกไซด์ในพื้นที่ผิวที่เกิดขึ้นในกระบวนการพ่นละอองโลหะด้วยก๊าซ

5.3.2 ควรมีการศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปด้วยวิธีการต่างๆ เช่น กระบวนการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing: MIM) หรือกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงโลหะ (Metal

Injection Mold: MIM) และนอกจากนี้ยังรวมถึงการศึกษาการหดตัวของชิ้นงานที่ผลิตจากผงโลหะเป็นต้น

5.3.3 งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของอัตราการไหลของก๊าซ อุณหภูมิของน้ำโลหะ และขนาดรูหน้าโลหะ ที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างของผงโลหะชนิดอื่นๆ ที่นอกเหนือจากโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้ที่ได้กล่าวถึงในข้างต้น ที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างที่ดีที่สุดของโลหะชนิดอื่นๆ



บรรณานุกรม

- [1] สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ, “สถานการณ์การส่งออกสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับไทยระหว่างเดือนมกราคม กุมภาพันธ์ ปี-2560” (Online), 2560, Available : [http:// www.thaitextile.org/index.php/blog//2017/04thti1004201702](http://www.thaitextile.org/index.php/blog//2017/04thti1004201702))12 มกราคม 2561.
- [2] ปรีศนา บุญศักดิ์ ,“รายงานผลการวิจัย การวิจัยปัญหาในงานหล่อและการพัฒนาแนวทางแก้ไขปัญหในงานหล่อเครื่องประดับสมัยใหม่” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครทุนสนับสนุนจากงบประมาณปี 2556.
- [3] พิมพ์ทอง ทองนพคุณ, หน่วยวิจัยอัญมณีและเครื่องประดับ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี, (Online), 2560 Available: gems.chanthaburi.buu.ac.th/documents/article/27.pdf 2 พฤษภาคม 2560.
- [4] สมหมาย ธรรมประโคน, ศิริชัย ต่อสกุล, และสุรัตน์ วรรณศรี (2018). อิทธิพลของอุณหภูมิเหน้าโลหะและอัตราการไหลของก๊าซ ที่มีผลต่ออนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925, เอกสารนำเสนอในการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัย ระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 9 Local & Global Sustainability: Meeting the Challenges & Sharing the Solutions 20 .มีนาคม 2561, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, ประเทศไทย.
- [5] H. Danninger, M. Jalilizyaeian, C. Gierl, E. Hryha and S. Bengtsson, Proceedings PM2010 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition, Florence, EPMA, Shrewsbury, 2010, Volume 3, 3–10.
- [6] S. Saccarola, M. Zanon. A. Karuppanagounder and F. Castro, Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, (Proceedings Powder Met 2011, San Francisco), compiled by I.E. Anderson, T.W. Pelletiers, MPIF, Princeton NJ 2011, Part 7, 45–53.
- [7] L. Alzati, R. Gilardi, G. Pozzi, and S. Fontana, Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, (Proceedings Powder Met 2011, Ft. Lauderdale FL), compiled by I.E. Anderson, T.W. Pelletiers, MPIF, Princeton NJ 2011, Part 7, 11–18.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [8] L. Forden, S. Bengtsson and M. Bergström, Proceedings PM2004 Powder Metallurgy World Congress, H. Danninger and R. Ratzi (eds), EPMA, Shrewsbury, 2004, Volume 5, 641–7.
- [9] Arnold V (2009), ‘Future potential of powder metallurgy applications in automotive industry’, Powder metallurgy for automotive and engineering industries, Ramakrishnan P (ed), Narosa Publishing House Pvt. Ltd., New Delhi, 33–44.
- [10] ASM International (1998), Powder Metal Technologies and Applications, Handbook, Volume 7, Materials Park, Ohio
- [11] Capus J (2011), ‘Powder metallurgy, progress and the ecofriendly car’, Metal Powder Rep, 2, 16–18.
- [12] เอกสารสัมมนาทางวิชาการ. “คุณสมบัติของโลหะมีค่าสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ” รวบรวมโดย ศูนย์วิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2541. (Online), 2560. Available: http://www.dtn.go.th/files/FTA/ASEAN-CHINA/Study/wto-ascn_jewelry.pdf.) 2 พฤษภาคม 2560.
- [13] Delarbre P and Krehl M (2000), Powder Metallurgy Aluminium and Light Alloys for Automotive Applications, W F Jondessa, Jr and R A Chernenkoff (eds), Metal Powder Industries Federation, New Jersey, 33–39.
- [14] Eckart S, Dollmeier K, Byrd K and Neubert H (2002), ‘An industry overview on applied powder metal joining techniques’, Powder Metallurgy in Automotive Applications-11, Rama Mohan T R R and Ramakrishnan P (eds), Oxford and IBH Publishing, New Delhi, 63–72.
- [15] Fujiki A (2001), ‘Present state and future prospects of powder metallurgy parts for automotive applications’, Mater Chem Phys, 67, 298–306.
- [16] Dunkley JJ. Atomization of metals—craft or science? In: Proceedings of 2nd international conference on spray deposition and melt atomization, Bremen University; p, 3–11, 2003.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [17] Williams B. Powder metallurgy—a global market review. In: International Powder Metallurgy Directory & Yearbook. 12th ed., vol. 1; p. 5–16, 2012/2013.
- [19] V.M. Leo Antony and Ramana G, Reddy. “Processes for Production of High-Purity Metal Powders,” JOM, vol. 55, pp. 18–14, 2003 .
- [20] Sunpreet Singha, Seeram Ramakrishna, Rupinder Singh, “Material issues in additive manufacturing: A review ,” Journal of Manufacturing, vol. 25, pp.185–200 ,2017.
- [21] N. Meemongkol, “Powder metallurgy,” University textbook, Songkla : Department of industrial engineering, Faculty of engineering Prince of Songkla University, 2005 .
- [22] S. Boonme. “Teaching Publications 4 3 1 3 2 8 Powder Metallurgy,” School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 2020.
- [23] Powder metallurgy is the manufacturing, 2563 ,October . (2 8 Networks.[Online]. Available:http://thelibraryofmanufacturing.com/powder_processes.html.
- [24] Gas Atomization. (2020, September18)Availableat:<http://www.mtinov.com/index.php?ac=article&at=list&tid=14>.
- [25] P. Sungkhaphaitoona, S. Wisutmethangoonb and T. Plookpho, “Influence of Process Parameters on Zinc Powder Produced by Centrifugal Atomisation,” Materials Research, pp.718-724, 201
- [26] P. Sungkhaphaitoon, “Production of Lead-Free Solder Powder by Atomization Process”, Burapha Science Journal Year 21 January – April. 2016.
- [27] A. S. Baskoro, S. Supriadi, and Dharmanto, “Review on plasma atomizer technology for metal powder,” in proceeding of MATEC web of conferences 269, 05004 (2019). [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201926905004>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [28] P. Bunnaul, S. Wisutmethangoon and L. Sikong, “Design and construction of gas atomizer for making metal powder,” Research, Prince of Songkla University, 2545.
- [29] W.G. Hopkins, “Fine Powder, Close or OpenDie Atomization,” Metal Powder Report, 45 (1) pp, 42.9–41,1990.
- [30] G. G. Nasr, A. J. Yule, and L. Bendig, Industrial Sprays and Atomization: Design, Analysis and Applications. New York, 2002.
- [31] Monnapas Morakotjinda, “Gas Atomization of Low Melting-Point Metal Powders”, Chiang Mai J. Sci. 2010; 37(1) : 55-63
- [32] Tornberg C. “Particle Size Prediction in an Atomization System”, Advances in Powder Metallurgy. Compiled by J.M. Capus and R.M. German, Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, 1992, 1: 137-150
- [33] B. Zheng, Y. Lin, Y. Zhou, and E. J. Lavernia, “Gas atomization of amorphous aluminum powder: Part II,” Metallurgical and Materials Transactions B., vol. 40, no. 6, pp, 995-1004, 2003.
- [34] โลหะเงิน (Silver) คุณสมบัติ และประโยชน์โลหะเงิน .(2562) Siamchemi .สืบค้นจาก <https://www.siamchemi.com/โลหะเงิน/> สืบค้นกันยายน 2564 15 . https://www.mat40256wk_ch2.pdf . สืบค้น 20 มีนาคม 2567.
- [35] โลหะเงิน สินทรัพย์ปลอดภัยและโอกาสในตลาดเครื่องประดับ, สืบค้น 20 มีนาคม 2567.
- [36] See, J.B, and Johnston, G.H. “Interactions Between Nitrogen Jets and Liquid Lead and Tin Streams,” Powder Technology Vol.21, pp,119-133,1978.
- [37] O. Hong-wu, C.Xin and H. Bai-yun, “Influence of melt superheat on breakup process of close-coupled gas atomization,” Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol 17, no 5, 967-973.Oct. 2007.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [39] R.M. German. Powder metallurgy sciences. 2nd ed. New Jersey: MPIF; 1994.
- [40] Materials Engineering Price of Songkla University , “ตะแกรงกรองมาตรฐาน ” (Online), 2560. Available: <https://www.mne.eg.psu.ac.th>. 10 พฤษภาคม 2560.
- [41] บุญรักษ์ กาญจนวราณิชย์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สารานุกรม , “การหาสภาวะการวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง ” (Online), 2560. Available: <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/1708> 7 พฤษภาคม 2560(
- [42] [https:// www. Advanced microscopy, simplified. - Olympus EMEA \(olympus-europa.com\)](https://www.advancedmicroscopy.com) สืบค้น 20 มีนาคม 2567.
- [43] <https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=cGPGFsWR&id=0CEB5181173F157D150F3350016343D2C196477> สืบค้น 20 มีนาคม 2567.
- [44] Riza, S.; Masood, S.; Wen, C. Laser-assisted additive manufacturing for metallic biomedical scaffolds. In Comprehensive Materials Processing; Elsevier: London, UK, 2014.
- [45] <https://pirun.ku.ac.th/~faasatp/734415/data/chapter2.pdf>. สืบค้น 20/08/67
- [46] http://www.com-tech.ubru.ac.th/~ekarach/document/data_analytics/03.pdf สืบค้น 20/08/67.
- [47] Cardona A, Tomancak P. Current challenges in open-source bioimage informatics. Nat Methods. 2012;9,pp.661–665.
- [48] Madabhushi A, Lee G. Image analysis and machine learning in digital pathology: Challenges and opportunities. Med Image Anal. 2016;33:170–175.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [49] Teigen LM, Kuchnia AJ, Nagel E, et al. Impact of software selection and ImageJ tutorial corrigendum on skeletal muscle measures at the third lumbar vertebra on computed Tomography scans in clinical populations. JPEN J Parenter Enteral Nutr. 2018;42:933–941.
- [50] Selvan AN, Cole LM, Spackman L, Naylor S, Wright C. Hierarchical cluster analysis to aid diagnostic image data visualization of MS and other medical imaging modalities. Methods Mol. Biol. 2017;1618:95–123.
- [51] Brookes SJ. Using ImageJ (Fiji) to analyze and present X-ray CT images of enamel. Methods Mol. Biol. 2019;1922:267–291.
- [52] J. S. Thompson, A Study of Process Variables in the Production of Aluminium Powder by Atomization, J. Inst. Metal., Volume 74, pp. 101–132, 1948.
- [53] M. J. Couper, R. F. Singer, Rapidly Solidified Aluminium Alloy Powder Produced by Optimization of the Gas Atomization Technique, Proc. Int'l. Conf. Rapidly Quenched Metals, pp. 1737-174, 1984.
- [54] J. D. Ayers, I.E. Anderson, Very Fine Metal Powders, J. of Metals, Volume 37, pp. 16- 21, 1985
- [55] S.D. Ridder, F.S. Biancaniello, Process Control During High Pressure Atomization, Mat. Sci. Eng. Volume 98, pp 47- 51, 1988
- [56] Sedat Ozbilen, “Influence of atomising gas pressure on particle shape of Al and Mg Powders” Powder Technology 102 _1999, 109–119.
- [57] S.P. Mates, S.D. Ridder, F.S. Biancaniello, Comparison of the supersonic length and dynamic pressure characteristics of discrete-jet and annular close-coupled nozzles used to produce fine metal powders, proceedings of TMS annual meeting in Nashville, Tennessee, pp. 71-81, 2000.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [58] กิตติชัย ฟักพันธุ์, “การผลิตผงดีบุกด้วยกระบวนการก๊าซอะตอมไมเซชัน,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี 2547.
- [59] Rahmi Unal, “The influence of the pressure formation at the tip of the melt delivery tube on tin powder size and gas/melt ratio in gas atomization method” *Journal of Materials Processing Technology* 180 (2006) 291–295.
- [60] Lydia Achelis, Volker Uhlenwinkel, “Characterisation of metal powders generated by a pressure gas atomiser” *Materials Science and Engineering A* 477 (2008) 15–20.
- [61] A.M. Mullis, M Close-Coupled rthy I.N., and Cochrane Received R.FHigh, “High Speed imaging of the flow during Close-Coupled gas atomization: Effect of melt delivery nozzle geometry,” *Journal of Materials Processing Technology* 211, pp,–1471 1477,2011.
- [62] Chaorun Si, “Characteristics of 7055Al alloy powders manufactured by gas-solid two-phase atomization a comparison with gas atomization process”, *Materials and Design* 118 (2017) 66–74.
- [63] E. Urionabarrenetxea, A. Avello, A. Rivas et al, “Experimental study of the influence of operational and geometric variables on the powders produced by close-coupled gas atomization”, *Materials and Design* 199, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109441>
- [64] Qipeng Bao ,Yiru Yang , Xiaochun Wen , Lei Guo, Zhancheng Guo,2021, "The preparation of spherical metal powders using the high-temperature Remelting spheroidization technology", *Materials and Design*, 199,109-382
- [65] สุรัตน์ วรรณศรี (2561). ออกแบบสร้างเครื่องพ่นละอองน้ำโลหะด้วยก๊าซและผลิตผงโลหะเงินเจือ 92.5% สำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ: รายงานฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [66] V.M. Leo Antony and Ramana G, Reddy. “Processes for Production of High-Purity Metal Powders,” JOM, vol. 55, pp. 18–14,
- [67] Powder metallurgy is the manufacturing, 2563 , October . (2 8 Networks.[Online]. Available:http://thelibraryofmanufacturing.com/powder_processes.html.
- [68] V. C. Srivastava and S. N. Ojha, “Effect of aspiration and gas–melt configuration in close coupled nozzle on powder productivity,” Powder Metallurgy Vol 49 NO 3, pp,218-211,2014.
- [69] D. Singh, S.C. Koria, and R.K. Dube, “Study of Free-Fall Gas Atomization of Liquid Metal to Produce Powder,” Powder Metallurgy, (2) 44, pp, 184–177,2001.
- [70] M. Dayanand Goudar, Srivastava V. C., and Rudrakshi G. B, “ Effect of Atomization Parameters on Size and Morphology of Al-17 Si Alloy Powder Produced by Free-Fall Atomizer,” Engineering Journal Volume 21 Issue 1, pp,155-168,2016.
- [71] See, J.B. and Johnston G.H.1978, “ Interactions Between Nitrogen Jet and liquid Lead and Tin streams”, Powder technology,vol. 21,pp. 119-133.
- [72] S.P. Mates and G.S. Settles, “A study of liquid metal atomization using close-coupled .nozzles. Part 1: Gas dynamic behavior,” Atomization Spray, 15, 19–40 ,2005
- [73] <https://www.cpmagnetic.com/product/30763-28921> สืบค้น 20 มีนาคม 2567.
- [74] Lian, C.; Yong, H.; Yingxin, Y.; Shiwei, N.; Haitao, R. The research status and development trend of additive manufacturing technology. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017, 89, 3651–3660.
- [75] Ma, W.L.; Tao, F.H.; Jia, C.Z.; Yang, J.C. Research Status and Application Analysis of 3D Printing Technology. Appl. Mech. Mater. 2014, 529, 697–700.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [76] Guoqing, W.; Yingzhou, H.; Weinan, Z.; Chenguang, S.; Hongsong, H. Research Status and Development Trend of Laser Additive Manufacturing Technology. In Proceedings of the 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), Changsha, China, 21–23 July 2017; IEEE: Changsha, China, 2017; pp. 1210–1213.
- [77] Zitelli, C.; Folgarait, P.; Di Schino, A. Laser Powder Bed Fusion of Stainless Steel Grades: A Review. *Met. Open Access Metall. J.* 2019, 9, 731. *Crystals* 2022, 12, 480 14 of 15.
- [78] <https://www.laserstar.net/en/products/manual-welding-solid-state-lasers/972-iweld-professional/> สืบค้น 25 มิถุนายน 2567
- [79] Jialun Wu, Min Xia, Shuangquan Guo, Junfeng Wang and Changchun Ge, Effect of Electrode Induction Melting Gas Atomization Process on Fine Powder Yields: Diameter of Free-Fall Gas Atomizer, *Volume Materials* 32, pages 3390–3400, (2023) doi: 10.3390/ma16062499.
- [80] A. Lampe and U. Fritsching: in *Process-Spray: Functional Particles Produced in Spray Processes*, U. Fritsching, ed., Springer, Berlin, 2016, pp. 751–94.
- [81] A.J. Yule and J.J. Dunkley: *Atomization of Melts: For Production and Spray Deposition*, 1st ed., Clarendon, Oxford, 1994.
- [82] Honghai, W., Kuangdi, X. (2024). Atomization Process to Produce Powder. In: Xu, K. (eds) *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0740-1_1446-1
- [83] HE Xin-yu, LI Xing-gang, Huang Yu-he, ZHU Qiang. Satellite-particle control technique based on gas-flow-regulation during gas atomization process. <https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021070004>
- [84] N. Ciftci, N. Ellendt, G. Coulthard, E. Soares Barreto, L. Mädler and V. Uhlenwinkel, Novel Cooling Rate Correlations in Molten Metal Gas Atomization, *Volume 50*, pages 666–677, (2019)

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [85] Dunkley J, Telford B. Control of satellite particles in gas atomization // World Congress on Powder Metallurgy and Particulate Materials. Orlando, 2002
- [86] V M Golod and V Sh Sufiarov. The evolution of structural and chemical heterogeneity during rapid solidification at gas atomization. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1234567890 192 (2017) 012009 doi:10.1088/1757-899X/192/1/012009
- [87] S. Cacace, M. Boccadoro, Q. Semeraro. Investigation on the effect of the gas-to-metal ratio on powder properties and PBF-LB/M processability. Progress in Additive Manufacturing (2024) 9:889–904. <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00490-z>
- [88] N. D. Shchetinina, V. V. Antipov, K. A. Speransky, and A. A. Pavlov. Investigation Of Influence Of Gas Atomization Parameters On The Granulometric Composition Of Aluminum Alloy Vas1 Powder. Metallurgist, Vol. 67, Nos. 5-6, September, 2023 (Russian Original Nos. 5-6, May–June, 2023), DOI 10.1007/s11015-023-01564-7
- [89] Dario Gianoglio, Nevaf Ciftci, Sarah Armstrong, Volker Uhlenwinkel, and Livio Battezzati. On the Cooling Rate-Microstructure Relationship in Molten Metal Gas Atomization. Metallurgical And Materials Transactions A. Volume 52a, September 2021. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06325-2>.
- [90] Guanzhi Li,Guibing Shi,Hongyi Miao,Dan Liu,Zongzhen Li,Mingxu Wang and ,Li Wang,Effects of the Gas-Atomization Pressure and Annealing Temperature on the Microstructure and Performance of FeSiBCuNb Nanocrystalline Soft Magnetic Composites, *Materials* 2023, 16(3), 1284; <https://doi.org/10.3390/ma16031284>
- [91] D. Singh, S. Dangwal. Effects of process parameters on surface morphology of metal powders produced by free fall gas atomization. Journal of Materials Science 41 (2006) 3853–3860

บรรณานุกรม (ต่อ)

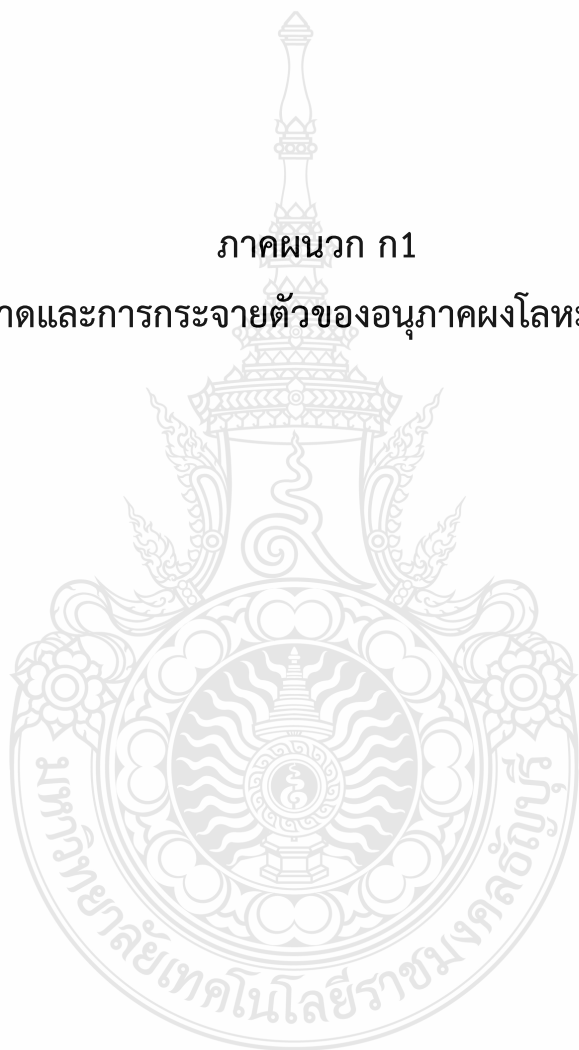
- [92] Malý M, Höller C, Skalon M, Meier B, Koutný D, Pichler R, Sommitsch C, Paloušek D Effect of process parameters and high-temperature preheating on residual stress and relative density of Ti6Al4V processed by selective laser melting. *Materials* 12(6), 2019, 930.
- [93] Chen P., Liu X., Sun Y., Zhou P., Wang Y., Zhang Y. Dendritic Cell Targeted Vaccines: Recent Progresses and Challenges. *Hum. Vaccines Immunother.* 2016;12:612–622. doi: 10.1080/21645515.2015.1105415.
- [94] Rehman Z.U., Umar S., Meng C., Ullah Z., Riaz F., Rehman S.U., Ding C. Dendritic Cell Harmonised Immunity to Poultry Pathogens; a Review. *Worlds Poult. Sci. J.* 2017;73:581–590. doi: 10.1017/S0043933917000496.
- [95] Merad M., Sathe P., Helft J., Miller J., Mortha A. The Dendritic Cell Lineage: Ontogeny and Function of Dendritic Cells and Their Subsets in the Steady State and the Inflamed Setting. *Annu. Rev. Immunol.* 2013;31:563–604. doi: 10.1146/annurev-immunol-020711-074950.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก1

ปริมาณ ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะหัวฟ่นแบบที่ 1



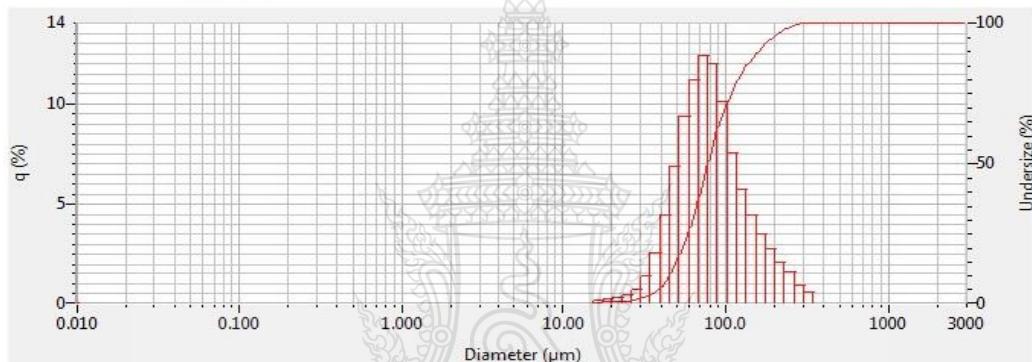
การทดลองที่	อุณหภูมิ น้ำโลหะ (°C)	อัตราการไหล ของก๊าซ (L/min)	ปริมาณเฉลี่ยผงโลหะที่ผลิตได้				ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะ ที่มีขนาด > 100 µm				ปริมาณเฉลี่ย อนุภาคผงโลหะที่มีขนาด 76 -100 µm (ผ่านตะแกรง 100)				ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะที่มีขนาด 51 -75 µm (ผ่านตะแกรง 75)				ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะที่มี ขนาด £ 50 µm (ผ่านตะแกรง 50)			
			(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%
1	1060	400	995.45	994.11	1.21	99.41	367	366.67	0.58	36.67	275	274.33	0.58	27.43	211	211.67	0.58	21.17	141.46	141.45	0.10	14.14
2			993.12				367				274				212				141.54			
3			993.75				366				274				212				141.34			
4		500	987.72	988.53	1.93	98.85	366	365.67	0.58	36.57	267	266.67	0.58	26.67	213	213.33	0.58	21.33	143.42	142.87	0.76	14.29
5			990.73				365				266				214				143.18			
6			987.13				366				267				213				142			
7		600	894.34	892.20	4.48	89.22	282	282.67	0.58	28.27	238.88	238.14	0.78	23.81	216	215.33	0.58	21.53	156	156.06	0.91	15.61
8			887.05				283				237.32				215				155.18			
9			895.22				283				238.23				215				157			
10	1160	400	980.73	985.14	3.83	98.51	386.22	386.12	0.11	38.61	284	284.12	0.20	28.41	206.09	206.37	0.57	20.64	108.58	108.53	0.50	10.85
11			987.5				386.15				284.35				206				109			
12			987.2				386				284				207.03				108			
13		500	999.78	999.69	0.08	99.97	398	398.33	0.58	39.83	280	280.33	0.58	28.03	209	208.67	0.58	20.87	112.36	112.36	0.36	11.24
14			999.62				399				280				208				112			
15			999.68				398				281				209				112.71			
16		600	977.14	978.94	1.63	97.89	369.51	369.73	0.54	36.97	231.8	231.72	0.53	23.17	221	221.33	0.58	22.13	156.14	156.16	0.02	15.62
17			980.32				370.35				232.2				221				156.18			
18			979.37				369.33				231.15				222				156.16			

การทดลองที่	อุณหภูมิ น้ำโลหะ (°C)	อัตราการไหล ของก๊าซ (l/min)	ปริมาณเฉลี่ยผงโลหะที่ผลิตได้				ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะ ที่มีขนาด > 100 µm				ปริมาณเฉลี่ย อนุภาคผงโลหะที่มีขนาด 76 -100 µm (ผ่านตะแกรง 100)				ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะที่มีขนาด 51 -75 µm (ผ่านตะแกรง 75)				ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะที่มีขนาด £ 50 µm (ผ่านตะแกรง 50)			
			(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%
19	1260	400	970.9	970.80	1.69	97.08	388.42	389.03	0.53	38.90	295.7	295.26	0.38	29.53	174.01	174.03	0.95	17.40	112.98	112.49	0.49	11.25
20			972.44				389.33				295.07				173.09				112			
21			969.07				389.33				295.01				174.98				112.48			
22		500	943.65	944.69	1.74	94.47	260.33	260.00	0.58	26.00	199	200.39	1.20	20.04	202.63	202.30	0.94	20.23	282.02	282.01	0.01	28.20
23			946.69				259.33				201.09				201.24				282			
24			943.72				260.33				201.07				203.03				282			
25		600	995.32	994.81	1.73	99.48	219.48	218.76	0.67	21.88	208.32	207.59	0.73	20.76	203	203.02	0.02	20.30	365.64	365.44	0.35	36.54
26			996.22				218.67				207.58				202.34				365.64			
27			992.88				218.14				206.87				203.03				365.04			

HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample name : Powder C1
 ID# : 202205110427030
 Data name : NS5642_65 Powder C1 Rep1
 Transmittance (R) : 86.8 (%)
 Transmittance (B) : 89.7 (%)
 Circulation speed : 5
 Agitation speed : 8
 Ultrasound : 02:00 (7)
 Iteration mode : Auto
 Distribution base : Volume
 Refractive index (R) : Silver
 Refractive index (B) : Silver
 Material :
 Source :
 Lot number :
 NICE623/55

Median size : 78.03272 (μm)
 Mean size : 91.69434 (μm)
 St. Dev. : 50.4207 (μm)
 Geo. mean size : 80.9510 (μm)
 Geo. St. Dev. : 1.6301 (μm)
 Mode size : 72.6023 (μm)
 Span : Off
 Diameter on cumulative % : (2)/10.00 (%) - 45.2558 (μm)
 : (9)/90.00 (%) - 159.2549 (μm)



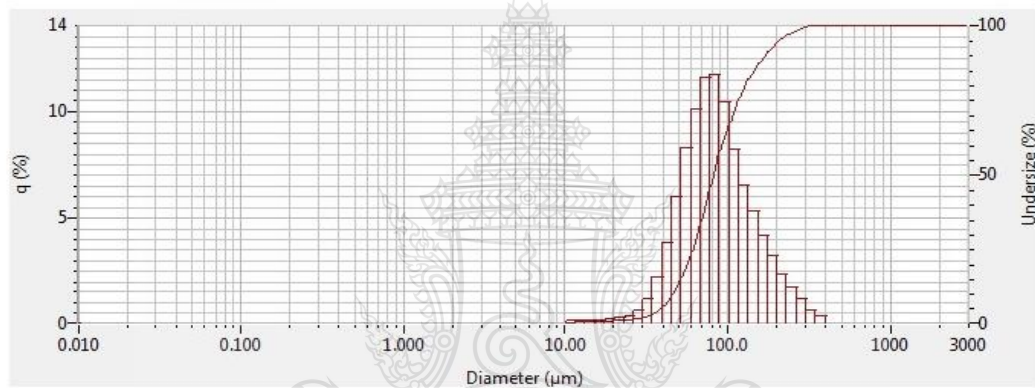
No	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)
1	0.011	0.000	0.000	25	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	75	300.518	0.849	99.529
2	0.013	0.000	0.000	26	0.389	0.000	0.000	52	11.565	0.000	0.000	76	344.206	0.471	100.000
3	0.015	0.000	0.000	27	0.445	0.000	0.000	53	13.246	0.000	0.000	77	394.244	0.000	100.000
4	0.017	0.000	0.000	28	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.000	0.000	78	451.596	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	29	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.109	0.109	79	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	30	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.141	0.250	80	592.387	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	31	0.766	0.000	0.000	57	22.797	0.208	0.458	81	678.904	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	32	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.348	0.806	82	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	33	1.006	0.000	0.000	59	29.907	0.690	1.496	83	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	34	1.151	0.000	0.000	60	34.255	1.287	2.743	84	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	35	1.318	0.000	0.000	61	39.234	2.906	5.249	85	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	36	1.510	0.000	0.000	62	44.935	4.596	9.645	86	1337.481	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	37	1.729	0.000	0.000	63	51.471	6.832	16.477	87	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	38	1.981	0.000	0.000	64	58.953	9.306	25.783	88	1754.613	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	39	2.269	0.000	0.000	65	67.523	11.115	36.898	89	2009.687	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	40	2.599	0.000	0.000	66	77.339	12.318	49.214	90	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	41	2.976	0.000	0.000	67	88.553	11.955	61.172	91	2636.467	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	42	3.409	0.000	0.000	68	101.480	10.061	71.233	92	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	43	3.905	0.000	0.000	69	116.210	7.524	78.757				
20	0.150	0.000	0.000	44	4.472	0.000	0.000	70	133.103	5.688	84.443				
21	0.172	0.000	0.000	45	5.122	0.000	0.000	71	152.483	4.437	88.880				
22	0.197	0.000	0.000	46	5.867	0.000	0.000	72	174.616	3.483	92.363				
23	0.226	0.000	0.000	47	6.720	0.000	0.000	73	200.000	2.718	95.080				
24	0.259	0.000	0.000	48	7.697	0.000	0.000	74	229.075	2.072	97.153				
25	0.296	0.000	0.000	49	8.816	0.000	0.000	75	262.376	1.527	98.680				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบรูปปล่อยก๊าซรูเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำ
 โลหะ อลูมิเนียม น้ำโลหะ 1060 อัตราการไหลของก๊าซ 400

HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample name : Powder C1
 ID# : 202205110428031
 Data name : NS5642_65 Powder C1 Rep2
 Transmittance (R) : 84.4 (%)
 Transmittance (B) : 85.6 (%)
 Circulation speed : 5
 Agitation speed : 8
 Ultrasound : 02:00 (7)
 Iteration mode : Auto
 Distribution base : Volume
 Refractive index (R) : Silver
 [Silver_0.2RI(0.200 - 0.200i),water(1.333)]
 Refractive index (B) : Silver
 [Silver_0.2RI(0.200 - 0.200i),water(1.333)]
 Material :
 Source :
 Lot number :
 MEDICAL

Median size : 82.29995 (μm)
 Mean size : 97.12998 (μm)
 St. Dev. : 55.0735 (μm)
 Geo. mean size : 84.8454 (μm)
 Geo. St. Dev. : 1.6740 (μm)
 Mode size : 82.2133 (μm)
 Span : Off
 Diameter on cumulative % : (2)10.00 (%) - 46.1302 (μm)
 (9)90.00 (%) - 169.7684 (μm)



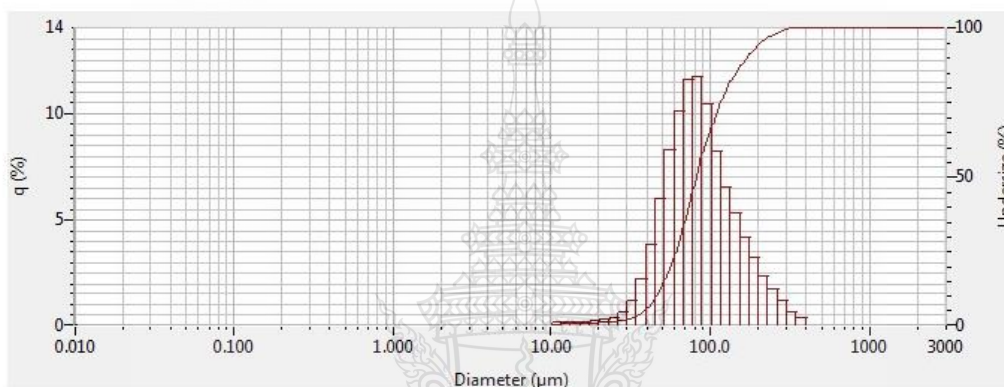
No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	76	300.518	1.082	99.066
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.885	0.102	0.102	77	344.206	0.801	99.866
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.246	0.104	0.206	78	394.244	0.334	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.110	0.316	79	451.856	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.123	0.439	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.151	0.589	81	592.387	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	57	22.797	0.209	0.799	82	678.904	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.333	1.132	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.597	1.729	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.265	1.144	2.873	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.315	0.000	0.000	61	39.234	2.151	5.024	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.938	3.801	8.855	87	1337.481	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	5.935	14.790	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.953	8.219	23.010	89	1754.613	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.523	10.069	33.099	90	2009.687	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	11.544	44.642	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	67	88.583	11.699	56.341	92	2636.467	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.480	10.380	66.720	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	8.203	74.924				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	6.527	81.450				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	5.258	86.709				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.616	4.152	90.861				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	3.173	94.039				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.075	2.327	96.366				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	75	262.375	1.618	97.963				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบรูปปล่อยก๊าซรูเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำ
 โลหะ อลูมิเนียม โลหะ 1060 อัตราการไหลของก๊าซ 500

HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample name : Powder C1
 ID# : 202205110428031
 Data name : NS5642_65 Powder C1 Rep2
 Transmittance (R) : 84.4 (%)
 Transmittance (B) : 85.6 (%)
 Circulation speed : 5
 Agitation speed : 8
 Ultrasound : 02:00 (7)
 Iteration mode : Auto
 Distribution base : Volume
 Refractive index (R) : Silver
 [Silver_0.2RI(0.200 - 0.200i),water(1.333)]
 Refractive index (B) : Silver
 [Silver_0.2RI(0.200 - 0.200i),water(1.333)]
 Material :
 Source :
 Lot number : NICEFACE

Median size : 82.29995 (µm)
 Mean size : 97.12998 (µm)
 St. Dev. : 55.0735 (µm)
 Geo. mean size : 84.8454 (µm)
 Geo. St. Dev. : 1.6740 (µm)
 Mode size : 82.2133 (µm)
 Span : Off
 Diameter on cumulative % : (2)10.00 (%) - 46.1302 (µm)
 (9)90.00 (%) - 169.7684 (µm)



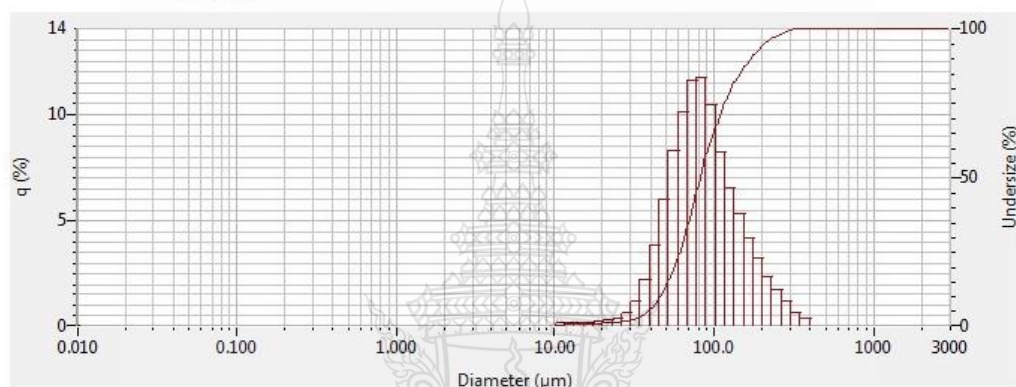
No.	Diameter (µm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (µm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (µm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (µm)	q (%)	Undersize (%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	76	300.518	1.082	99.065
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.565	0.102	0.102	77	344.206	0.801	99.866
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.246	0.104	0.206	78	394.244	0.334	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.110	0.316	79	451.556	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.123	0.439	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.151	0.589	81	592.387	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	57	22.797	0.209	0.799	82	678.504	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.333	1.132	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.597	1.729	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.285	1.144	2.873	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	61	39.234	2.121	5.054	86	1187.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.938	3.801	8.855	87	1337.481	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	5.935	14.790	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.953	8.219	23.010	89	1754.513	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.523	10.039	33.098	90	2009.687	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	11.544	44.642	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.975	0.000	0.000	67	88.533	11.699	56.341	92	2635.457	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.460	10.380	66.720	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	8.203	74.924				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	6.527	81.450				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	5.255	86.709				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.516	4.152	90.861				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	3.175	94.039				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.075	2.327	96.366				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	75	262.376	1.618	97.983				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบรูปปล่อยก๊าซรูเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำ
 โลหะ อลูมิเนียม โลหะ 1060 อัตราการไหลของก๊าซ 600

HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample name : Powder C1
 ID# : 202205110428031
 Data name : NS5642_65 Powder C1 Rep2
 Transmittance (R) : 84.4 (%)
 Transmittance (B) : 85.6 (%)
 Circulation speed : 5
 Agitation speed : 8
 Ultrasound : 02:00 (7)
 Iteration mode : Auto
 Distribution base : Volume
 Refractive index (R) : Silver
 [Silver_0.2RI(0.200 - 0.200i),water(1.333)]
 Refractive index (B) : Silver
 [Silver_0.2RI(0.200 - 0.200i),water(1.333)]
 Material :
 Source :
 Lot number :

Median size : 82.29995 (μm)
 Mean size : 97.12998 (μm)
 St. Dev. : 55.0735 (μm)
 Geo. mean size : 84.8454 (μm)
 Geo. St. Dev. : 1.6740 (μm)
 Mode size : 82.2133 (μm)
 Span : Off
 Diameter on cumulative % : (2)10.00 (%) - 46.1302 (μm)
 : (9)90.00 (%) - 169.7684 (μm)



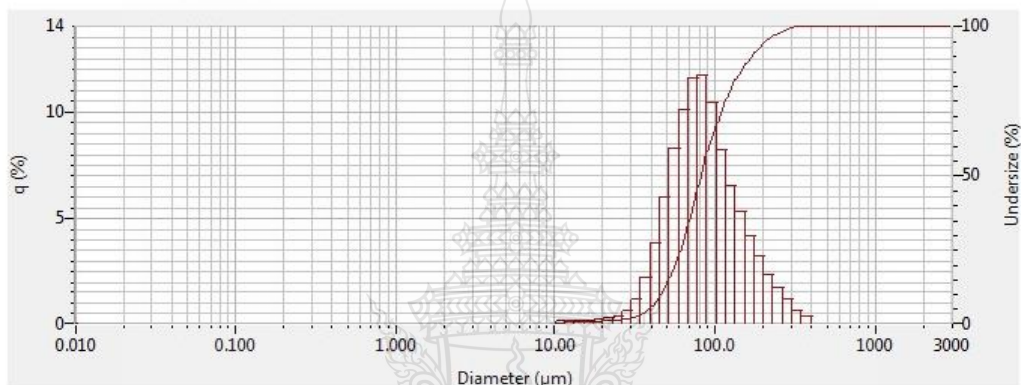
No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	76	300.518	1.082	99.066
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.565	0.102	0.102	77	344.206	0.801	99.866
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.245	0.104	0.206	78	394.244	0.334	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.110	0.316	79	451.556	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.123	0.439	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.151	0.589	81	592.387	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.768	0.000	0.000	57	22.787	0.209	0.798	82	678.504	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.335	1.132	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.597	1.729	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.255	1.144	2.873	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	61	39.234	2.151	5.054	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.938	3.301	8.355	87	1337.451	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	5.935	14.290	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.953	8.215	23.010	89	1754.613	0.000	100.000
15	0.078	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.523	10.039	33.059	90	2009.687	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	11.544	44.642	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	67	88.553	11.699	56.341	92	2635.467	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.480	10.380	66.720	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	3.203	74.924				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	5.527	81.450				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	5.253	86.709				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.616	4.152	90.861				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	3.175	94.039				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.075	2.327	96.366				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	75	262.375	1.618	97.983				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบรูปปล่อยก๊าซรูเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำ
 โลหะ อลูมิเนียม โลหะ 1160 อัตราการไหลของก๊าซ 400

HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample name : Powder C1
 ID# : 202205110428031
 Data name : NS5642_65 Powder C1 Rep2
 Transmittance (R) : 84.4 (%)
 Transmittance (B) : 85.6 (%)
 Circulation speed : 5
 Agitation speed : 8
 Ultrasound : 02:00 (7)
 Iteration mode : Auto
 Distribution base : Volume
 Refractive index (R) : Silver
 Refractive index (B) : Silver
 Material :
 Source :
 Lot number : NISSAN/ICE

Median size : 82.29995 (μm)
 Mean size : 97.12998 (μm)
 St. Dev. : 55.0735 (μm)
 Geo. mean size : 84.8454 (μm)
 Geo. St. Dev. : 1.6740 (μm)
 Mode size : 82.2133 (μm)
 Span : Off
 Diameter on cumulative % : (2)10.00 (%) - 46.1302 (μm)
 : (9)90.00 (%) - 169.7684 (μm)

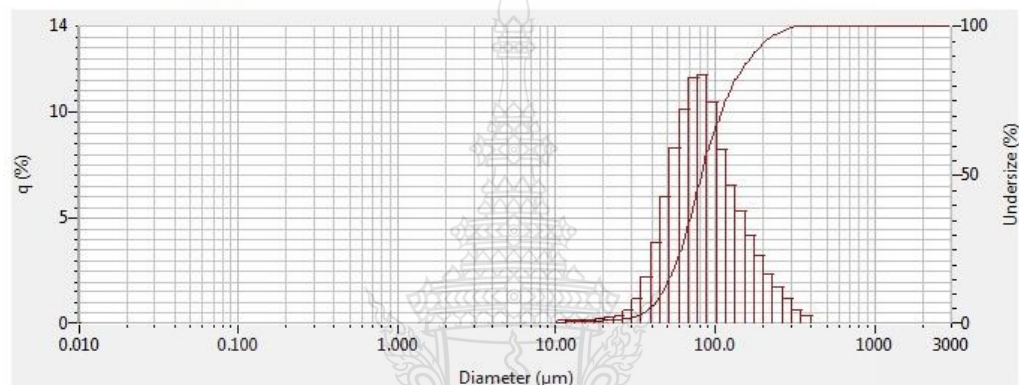


No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	76	300.516	1.082	99.066
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.565	0.102	0.102	77	344.206	0.601	99.666
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.246	0.104	0.206	78	394.244	0.334	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.110	0.316	79	451.566	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.123	0.439	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.151	0.589	81	592.387	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	57	22.797	0.209	0.799	82	678.504	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.333	1.132	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.597	1.729	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.256	1.144	2.873	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.316	0.000	0.000	61	39.234	2.151	5.024	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.938	3.501	8.525	87	1337.481	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	5.938	14.463	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.963	8.219	22.682	89	1754.613	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.523	10.059	32.741	90	2009.587	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	11.544	44.285	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	67	88.553	11.659	55.944	92	2636.457	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.460	10.380	66.324	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.906	0.000	0.000	69	116.210	8.203	74.527				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	6.527	81.054				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	5.253	86.307				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.818	4.152	90.459				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	3.175	93.634				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.075	2.327	95.961				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	75	262.376	1.615	97.576				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบรูปปล่อยก๊าซรูเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำ
 โลหะ อลูมิเนียม น้ำโลหะ 1160 อัตราการไหลของก๊าซ 500

HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample name : Powder C1
 ID# : 202205110428031
 Data name : NS5642_65 Powder C1 Rep2
 Transmittance (R) : 84.4 (%)
 Transmittance (B) : 85.6 (%)
 Circulation speed : 5
 Agitation speed : 8
 Ultrasound : 02:00 (7)
 Iteration mode : Auto
 Distribution base : Volume
 Refractive index (R) : Silver
 Refractive index (B) : Silver
 Material :
 Source :
 Lot number :
 Median size : 82.29995 (μm)
 Mean size : 97.12998 (μm)
 St. Dev. : 55.0735 (μm)
 Geo. mean size : 84.8454 (μm)
 Geo. St. Dev. : 1.6740 (μm)
 Mode size : 82.2133 (μm)
 Span : Off
 Diameter on cumulative % : (2)10.00 (%) - 46.1302 (μm)
 : (9)90.00 (%) - 169.7684 (μm)



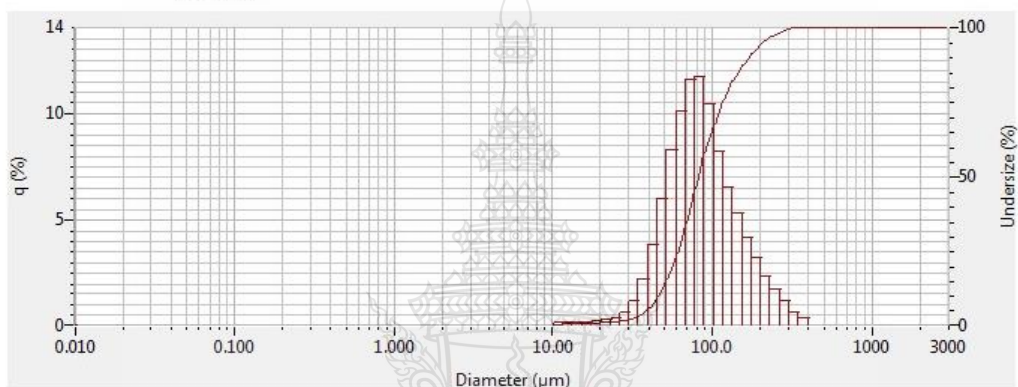
No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	76	300.518	1.082	99.065
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.565	0.102	0.102	77	344.206	0.801	99.866
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.246	0.104	0.206	78	394.244	0.334	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.110	0.316	79	451.556	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.123	0.439	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.151	0.589	81	592.387	0.000	100.000
7	0.025	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	57	22.797	0.209	0.799	82	678.904	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.333	1.132	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.597	1.729	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.255	1.144	2.873	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	61	39.234	2.181	5.054	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.938	3.801	8.855	87	1337.481	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	5.935	14.790	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.953	8.219	23.010	89	1754.613	0.000	100.000
15	0.078	0.000	0.000	40	2.289	0.000	0.000	65	67.523	10.089	33.098	90	2009.587	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	11.544	44.642	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.975	0.000	0.000	67	88.583	11.699	56.341	92	2636.467	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.450	10.380	66.720	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	5.203	74.924				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	6.527	81.450				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	5.255	86.709				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.516	4.152	90.861				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	3.175	94.039				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.075	2.327	96.366				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	75	262.376	1.615	97.983				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบรูปปล่อยก๊าซรูปเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำ
 โลหะ อลูมิเนียม น้ำโลหะ 1160 อัตราการไหลของก๊าซ 600

HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample name : Powder C1
 ID# : 202205110428031
 Data name : NS5642_65 Powder C1 Rep2
 Transmittance (R) : 84.4 (%)
 Transmittance (B) : 85.6 (%)
 Circulation speed : 5
 Agitation speed : 8
 Ultrasound : 02:00 (7)
 Iteration mode : Auto
 Distribution base : Volume
 Refractive index (R) : Silver
 Refractive index (B) : Silver
 Material :
 Source :
 Lot number :

Median size : 82.29995 (μm)
 Mean size : 97.12998 (μm)
 St. Dev. : 55.0735 (μm)
 Geo. mean size : 84.8454 (μm)
 Geo. St. Dev. : 1.6740 (μm)
 Mode size : 82.2133 (μm)
 Span : Off
 Diameter on cumulative % : (2)10.00 (%) - 46.1302 (μm)
 : (9)90.00 (%) - 169.7684 (μm)

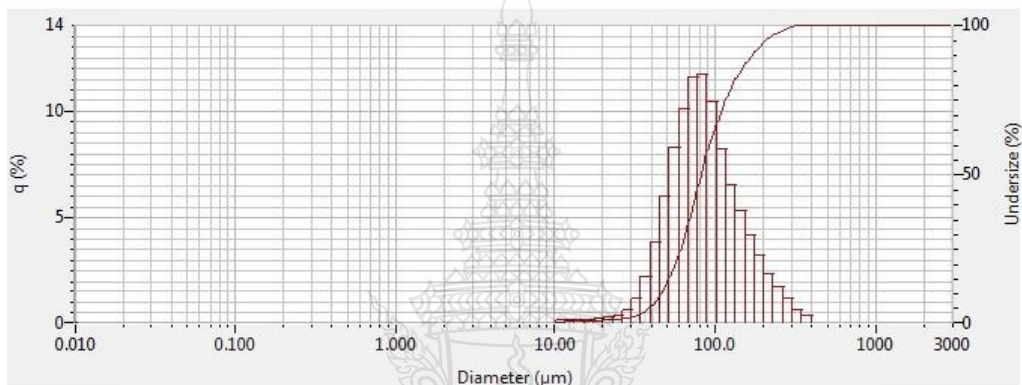


No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	76	300.518	1.082	99.065
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.565	0.102	0.102	77	344.206	0.601	99.666
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.246	0.104	0.206	78	394.244	0.334	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.110	0.316	79	451.556	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.123	0.439	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.151	0.589	81	592.387	0.000	100.000
7	0.025	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	57	22.797	0.209	0.799	82	678.504	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.323	1.132	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.597	1.729	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.255	1.144	2.873	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	61	39.234	2.151	5.054	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.955	3.501	8.555	87	1327.451	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	5.935	14.790	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.953	8.219	23.010	89	1754.513	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.523	10.059	33.095	90	2009.657	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	11.544	44.542	91	2301.241	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	67	88.563	11.699	56.341	92	2535.457	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.480	10.380	66.720	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	115.210	8.203	74.924				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	6.527	81.450				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	5.258	86.709				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.516	4.152	90.861				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	3.175	94.039				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.075	2.327	96.366				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	75	262.375	1.618	97.983				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบรูปปล่อยก๊าซรูเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำ
 โลหะ อลูมิเนียม โลหะ 1260 อัตราการไหลของก๊าซ 400

HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample name : Powder C1
 ID# : 202205110428031
 Data name : NS5642_65 Powder C1 Rep2
 Transmittance (R) : 84.4 (%)
 Transmittance (B) : 85.6 (%)
 Circulation speed : 5
 Agitation speed : 8
 Ultrasound : 02:00 (7)
 Iteration mode : Auto
 Distribution base : Volume
 Refractive index (R) : Silver
 Refractive index (B) : Silver
 Material :
 Source :
 Lot number :
 Median size : 82.29995 (μm)
 Mean size : 97.12998 (μm)
 St. Dev. : 55.0735 (μm)
 Geo. mean size : 84.8454 (μm)
 Geo. St. Dev. : 1.6740 (μm)
 Mode size : 82.2133 (μm)
 Span : Off
 Diameter on cumulative % : (2)10.00 (%) - 46.1302 (μm)
 : (9)90.00 (%) - 169.7684 (μm)



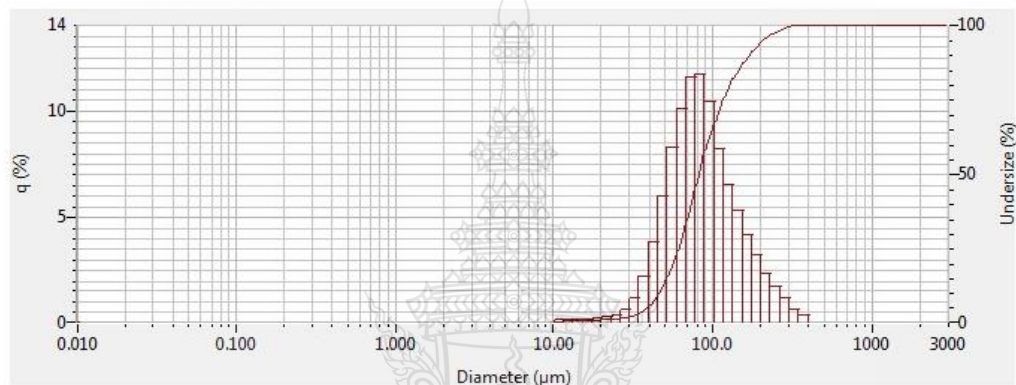
No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Undersize (%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	76	300.518	1.082	99.085
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.585	0.102	0.102	77	344.206	0.801	99.886
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.246	0.104	0.206	78	394.244	0.334	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.110	0.316	79	451.556	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.123	0.439	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.151	0.589	81	592.387	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	57	22.787	0.209	0.799	82	678.804	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.333	1.132	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.006	0.000	0.000	59	29.907	0.597	1.729	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.256	1.144	2.873	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	61	39.234	2.151	5.024	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.956	3.501	8.525	87	1337.481	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	5.935	14.790	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.953	8.219	23.010	89	1754.613	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.823	10.089	33.099	90	2009.687	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.338	11.544	44.642	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	67	88.593	11.699	56.341	92	2636.467	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.480	10.380	66.720	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	8.203	74.924				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	6.827	81.480				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	5.258	86.709				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.816	4.152	90.861				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	3.178	94.039				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.075	2.327	96.366				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	75	262.376	1.618	97.983				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบรูปปล่อยก๊าซรูเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำ
 โลหะ อลูมิเนียม โลหะ 1260 อัตราการไหลของก๊าซ 500

HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample name : Powder C1
 ID# : 202205110428031
 Data name : NS5642_65 Powder C1 Rep2
 Transmittance (R) : 84.4 (%)
 Transmittance (B) : 85.6 (%)
 Circulation speed : 5
 Agitation speed : 8
 Ultrasound : 02:00 (7)
 Iteration mode : Auto
 Distribution base : Volume
 Refractive index (R) : Silver
 [Silver_0.2RI(0.200 - 0.200i),water(1.333)]
 Refractive index (B) : Silver
 [Silver_0.2RI(0.200 - 0.200i),water(1.333)]
 Material :
 Source :
 Lot number :

Median size : 82.29995 (μm)
 Mean size : 97.12998 (μm)
 St. Dev. : 55.0735 (μm)
 Geo. mean size : 84.8454 (μm)
 Geo. St. Dev. : 1.6740 (μm)
 Mode size : 82.2133 (μm)
 Span : Off
 Diameter on cumulative % : (2)10.00 (%) - 46.1302 (μm)
 (9)90.00 (%) - 169.7684 (μm)



No.	Diameter (μm)	q (%)	Underize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Underize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Underize (%)	No.	Diameter (μm)	q (%)	Underize (%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	76	300.518	1.082	99.085
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.585	0.102	0.102	77	344.206	0.601	99.686
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.245	0.104	0.206	78	394.244	0.334	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.110	0.316	79	451.556	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.123	0.439	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.151	0.589	81	592.387	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	57	22.797	0.209	0.799	82	678.504	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.333	1.132	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.597	1.729	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.255	1.144	2.873	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	61	39.234	2.151	5.024	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.938	3.301	8.325	87	1337.481	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	5.938	14.263	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.993	8.219	22.482	89	1754.613	0.000	100.000
15	0.078	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.523	10.029	32.511	90	2009.687	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	11.544	44.055	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	67	88.623	11.699	55.754	92	2636.457	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.480	10.380	66.134	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	8.203	74.337				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	6.527	80.864				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	5.258	86.122				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.618	4.152	90.274				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	3.178	93.452				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.075	2.327	95.779				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	75	262.376	1.618	97.397				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบรูปปล่อยก๊าซรูเดียวต่อเนื่องรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ อลูมิเนียม น้ำโลหะ 1260 อัตราการไหลของก๊าซ 600

ภาคผนวก ข1

ปริมาณ ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะหัวพ่นแบบที่ 2



การ ทดลองที่	อุณหภูมิ น้ำ โลหะ (°C)	อัตรา การไหล ของก๊าซ (l/min)	ปริมาณเฉลี่ยผงโลหะที่ผลิตได้				ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะ ที่มีขนาด > 100 µm				ปริมาณเฉลี่ย อนุภาคผงโลหะที่มีขนาด 76 -100 µm (ผ่านตะแกรง 100)				ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะที่มีขนาด 51 - 75 µm (ผ่านตะแกรง 75)				ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะที่มีขนาด £ 50 µm (ผ่านตะแกรง 50)			
			(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%
1	1060	400	999.86	999.69	0.15	99.97	398.33	398.33	0.13	39.83	280.81	280.33	0.60	28.03	204.02	204.35	0.57	20.43	112.09	112.36	0.28	11.24
2			999.66				398.21				279.65				205				112.64			
3			999.56				398.46				280.52				204.02				112.36			
4		500	999.29	999.47	0.25	99.95	392.67	392.09	0.56	39.21	267.43	267.15	0.27	26.72	203.81	203.68	0.20	20.37	116.42	116.53	0.27	11.65
5			999.76				392.04				266.9				203.79				116.34			
6			999.37				391.56				267.12				203.45				116.84			
7		600	999.94	999.89	0.04	99.99	393.9	393.90	1.11	39.39	279.53	274.74	6.43	27.47	203.54	204.35	0.71	20.43	112.36	112.36	0.36	11.24
8			999.87				392.79				267.43				204.65				112			
9			999.87				395				277.26				204.85				112.71			
10	1160	400	990.25	990.05	0.24	99.01	366.95	367.65	1.04	36.77	266.09	264.43	1.54	26.44	207.14	206.37	0.77	20.64	151.89	151.59	1.49	15.16
11			989.79				368.85				264.17				205.61				152.91			
12			990.12				367.15				263.04				206.35				149.98			
13		500	999.72	999.38	0.66	99.94	349.15	347.82	1.53	34.78	269	269.22	0.29	26.92	210.34	210.74	0.35	21.07	171.07	171.14	0.12	17.11
14			999.81				346.15				269.55				211				171.28			
15			998.62				348.15				269.1				210.89				171.07			
16		600	999.6	999.60	0.29	99.96	349.67	348.73	0.86	34.87	267.33	267.09	0.23	26.71	205.09	205.61	0.97	20.56	178.27	178.17	0.10	17.82
17			999.89				347.98				266.87				205				178.07			
18			999.32				348.53				267.07				206.73				178.17			

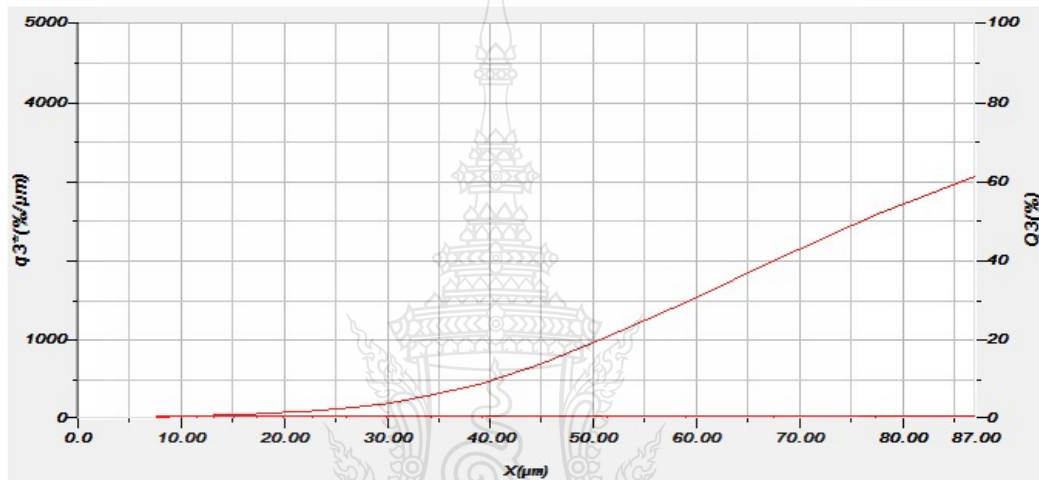
การทดลองที่	อุณหภูมิ น้ำโลหะ (°C)	อัตรา การไหล ของก๊าซ (l/min)	ปริมาณเฉลี่ยผงโลหะที่ผลิตได้				ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะ ที่มีขนาด > 100 µm				ปริมาณเฉลี่ย อนุภาคผงโลหะที่มีขนาด 76 -100 µm (ผ่านตะแกรง 100)				ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะที่มีขนาด 51 -75 µm (ผ่านตะแกรง 75)				ปริมาณเฉลี่ยอนุภาคผงโลหะที่มีขนาด £ 50 µm (ผ่านตะแกรง 50)			
			(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%	(g)	Aver.	SD	%
19	1260	400	989.43	989.76	0.32	98.98	300	300.04	0.08	30.00	234.33	233.97	0.33	23.40	203	203.02	0.02	20.30	253.67	252.74	1.07	25.27
20			989.79				299.99				233.87				202.34				252.99			
21			990.06				300.13				233.7				203.03				251.57			
22		500	988.74	989.77	0.95	98.98	304.67	305.15	0.57	30.52	227.33	227.30	0.42	22.73	203	203.02	0.02	20.30	254.36	254.30	0.47	30.26
23			989.97				305.78				226.87				202.34				253.12			
24			990.6				305				227.7				203.03				255.43			
25		600	998.89	999.25	0.54	99.93	280.33	281.00	0.58	28.10	222.67	221.61	0.92	22.16	194.01	194.03	0.95	19.40	302.54	302.62	1.16	25.43
26			998.99				281.33				221.09				193.09				302.19			
27			999.87				281.33				221.07				194.98				303.12			



Suranaree University of Technology
HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name : Powder N2C1
Data Name : NS6977_65 N2C1 rep1
Transmittance(R) : 89.9(%)
Transmittance(B) : 90.5(%)
Circulation Speed : 5
Agitation Speed : 14
Ultra Sonic : 08:00 (7)
Form of Distribution : Manual
Refractive Index (B) : Silver[Silver(0.200 - 0.200i),Water(1.333i)]
Source :
Lot Number :
Test or Assay. Number : NS6977/66

Median Size : 76.16737(๓m)
Mean Size : 88.85675(๓m)
Std.Dev. : 50.9852(๓m)
Geo.Mean Size : 76.9893(๓m)
Geo.Std.Dev. : 1.7137(๓m)
Mode Size : 72.6808(๓m)
Span : 1.5127
D(v,0.1) : 40.72517(๓m)
D(v,0.5) : 76.16737(๓m)
D(v,0.9) : 155.94142(๓m)

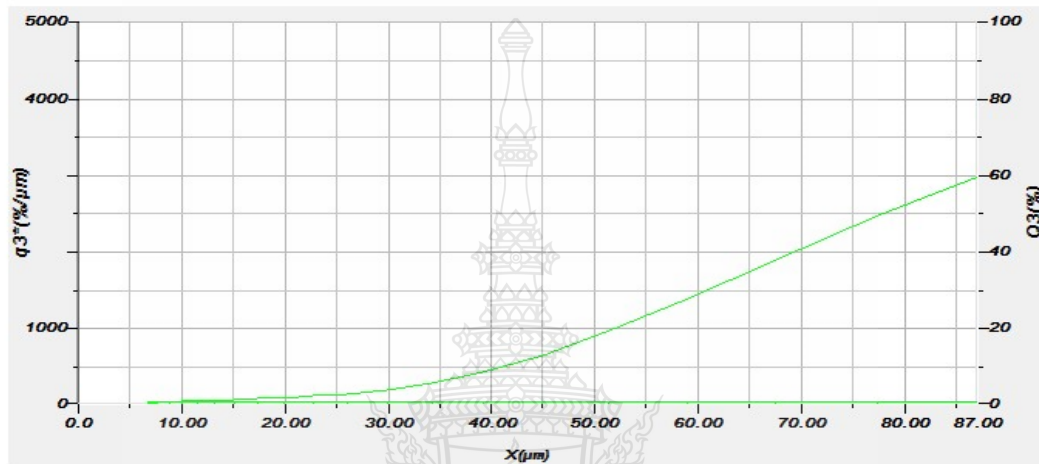


No.	X(μm)	q3(%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	q3(%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	q3(%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	q3(%/μm)	Q3(%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.001	0.224	76	300.518	0.000	99.548
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.568	0.001	0.367	77	344.206	0.000	100.000
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.246	0.001	0.511	78	394.244	0.000	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.001	0.694	79	451.658	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.001	0.923	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.001	1.229	81	592.387	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.768	0.000	0.000	57	22.797	0.002	1.673	82	678.804	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.002	2.369	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.003	3.522	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.266	0.004	5.487	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	61	39.234	0.006	8.660	86	1167.728	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.938	0.009	13.533	87	1337.481	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	0.011	20.431	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.953	0.012	29.337	89	1754.613	0.000	100.000
15	0.078	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.523	0.012	39.768	90	2009.837	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	0.012	51.297	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	67	88.583	0.010	62.702	92	2636.467	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.460	0.008	72.470	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	0.008	79.735				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	0.003	85.243				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	0.002	89.453				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.616	0.001	92.735				
23	0.228	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	0.001	95.301				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.076	0.001	97.270				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.001	0.105	75	262.376	0.000	98.734				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำ
โลหะอุณหภูมิน้ำโลหะ 1060 อัตราการไหลของก๊าซ 400

Suranaree University of Technology
HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	: Powder N2C1	Median Size	: 78.00594(๓m)
Data Name	: NS6977_65 N2C1 rep2	Mean Size	: 90.58949(๓m)
Transmittance(R)	: 90.7(%)	Std.Dev.	: 51.2575(๓m)
Transmittance(B)	: 91.5(%)	Geo.Mean Size	: 78.5079(๓m)
Circulation Speed	: 5	Geo.Std.Dev.	: 1.7226(๓m)
Agitation Speed	: 14	Mode Size	: 82.0563(๓m)
Ultra Sonic	: 08:00 (7)	Span	: 1.5047
Form of Distribution	: Manual	D(v,0.1)	: 41.69567(๓m)
Refractive Index (B)	: Silver[Silver(0.200 - 0.200i),Water(1.333)]	D(v,0.5)	: 78.00594(๓m)
Source	:	D(v,0.9)	: 159.06923(๓m)
Lot Number	:		
Test or Assay. Number	: NS6977/66		

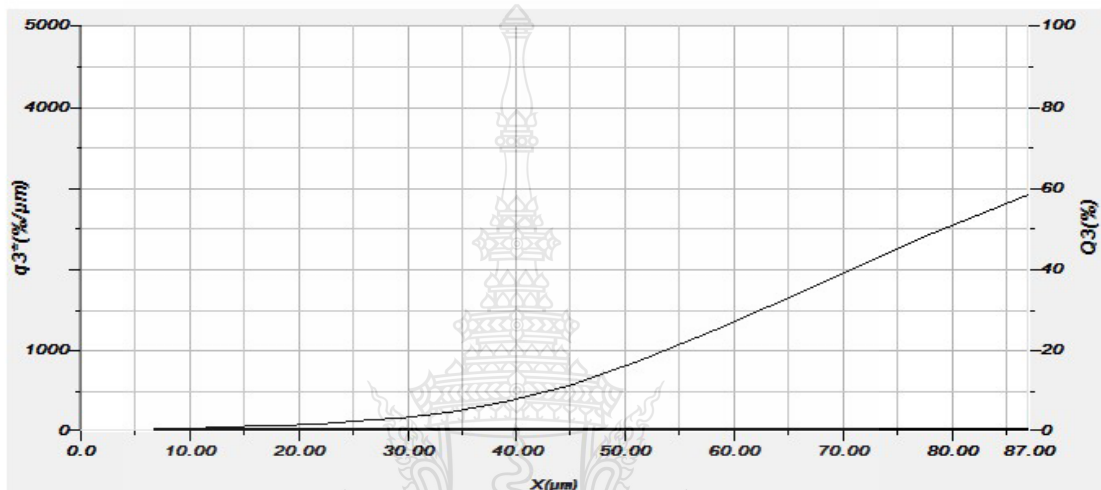


No.	X(μm)	q3*(%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	q3*(%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	q3*(%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	q3*(%/μm)	Q3(%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.001	0.369	76	300.519	0.000	99.544
2	0.013	0.000	0.000	27	0.369	0.000	0.000	52	11.566	0.001	0.519	77	344.206	0.000	100.000
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.246	0.001	0.697	78	394.244	0.000	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.001	0.980	79	451.556	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.594	0.000	0.000	55	17.377	0.001	1.112	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.668	0.000	0.000	56	19.904	0.001	1.409	81	592.387	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	57	22.797	0.001	1.823	82	678.604	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.002	2.450	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.003	3.468	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.255	0.004	5.176	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.319	0.000	0.000	61	39.234	0.006	8.012	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.938	0.008	12.447	87	1337.481	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	0.010	18.035	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.953	0.011	27.429	89	1754.613	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.823	0.012	37.678	90	2009.687	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	0.012	49.263	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	67	88.693	0.010	60.920	92	2636.467	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.480	0.008	71.020	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	0.005	78.648				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	0.003	84.403				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	0.002	88.695				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.616	0.002	92.425				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	0.001	95.178				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.001	0.110	74	229.075	0.001	97.247				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.001	0.233	75	262.376	0.000	98.724				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำ
โลหะอุณหภูมิน้ำโลหะ 1060 อัตราการไหลของก๊าซ 500

Suranaree University of Technology
HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	: Powder N2C1	Median Size	: 79.40942(๓m)
Data Name	: NS6977_65 N2C1 rep3	Mean Size	: 91.02024(๓m)
Transmittance(R)	: 90.5(%)	Std.Dev.	: 49.8311(๓m)
Transmittance(B)	: 91.8(%)	Geo.Mean Size	: 79.5516(๓m)
Circulation Speed	: 5	Geo.Std.Dev.	: 1.6970(๓m)
Agitation Speed	: 14	Mode Size	: 82.2644(๓m)
Ultra Sonic	: 08:00 (7)	Span	: 1.4204
Form of Distribution	: Manual	D(v,0.1)	: 43.18018(๓m)
Refractive Index (B)	: Silver[Silver(0.200 - 0.200i),Water(1.333)]	D(v,0.5)	: 79.40942(๓m)
Source	:	D(v,0.9)	: 155.97614(๓m)
Lot Number	:		
Test or Assay. Number	: NS6977/66		



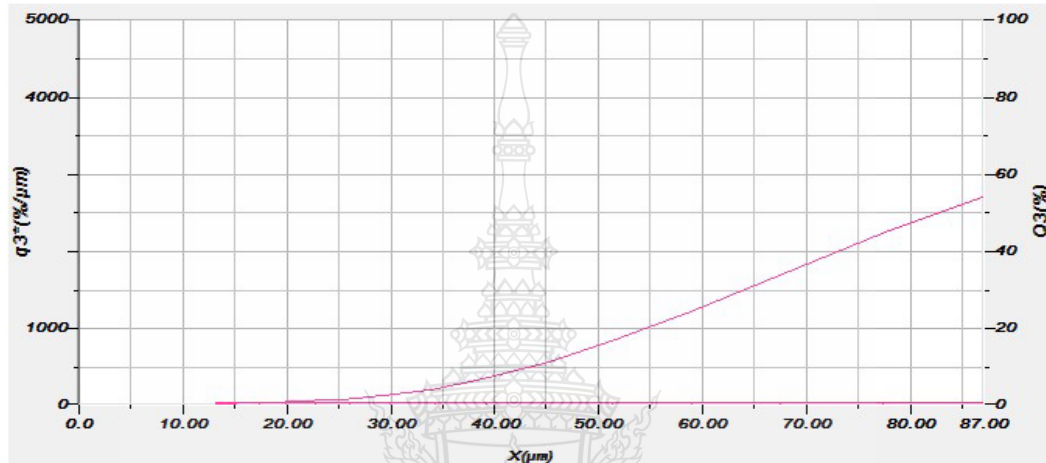
No.	X(μm)	q3* (%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	q3* (%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	q3* (%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	q3* (%/μm)	Q3(%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.087	0.001	0.359	76	300.518	0.000	99.577
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.555	0.001	0.504	77	344.208	0.000	100.000
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.246	0.001	0.664	78	394.244	0.000	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.001	0.846	79	451.558	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.001	1.061	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.001	1.333	81	592.337	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	57	22.797	0.001	1.706	82	678.504	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.002	2.263	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.002	3.158	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.255	0.003	4.856	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	61	39.234	0.005	7.164	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.938	0.007	11.151	87	1357.481	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	0.009	17.192	88	1521.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.953	0.011	25.442	89	1754.613	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.523	0.012	35.659	90	2009.687	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	0.012	47.599	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	67	88.583	0.011	59.939	92	2636.457	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.460	0.008	70.784	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	0.006	78.886				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	0.004	84.876				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.463	0.002	89.417				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.616	0.002	92.879				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	0.001	95.505				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.001	0.103	74	229.075	0.001	97.442				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.001	0.227	75	262.376	0.000	98.514				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ
อุณหภูมิน้ำโลหะ 1060 อัตราการไหลของก๊าซ 600

Suranaree University of Technology
HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name : Powder N2C2
Data Name : NS6978_65 N2C2 rep1
Transmittance(R) : 90.3(%)
Transmittance(B) : 93.1(%)
Circulation Speed : 5
Agitation Speed : 14
Ultra Sonic : 06:00 (7)
Form of Distribution : Manual
Refractive Index (B) : Silver[Silver(0.200 - 0.200i),Water(1.333)]
Source :
Lot Number :
Test or Assay. Number : NS6978/66

Median Size : 82.68232(๓m)
Mean Size : 101.33608(๓m)
Std.Dev. : 62.6337(๓m)
Geo.Mean Size : 86.3002(๓m)
Geo.Std.Dev. : 1.7495(๓m)
Mode Size : 82.1754(๓m)
Span : 1.7684
D(v,0.1) : 44.01045(๓m)
D(v,0.5) : 82.68232(๓m)
D(v,0.9) : 190.22929(๓m)

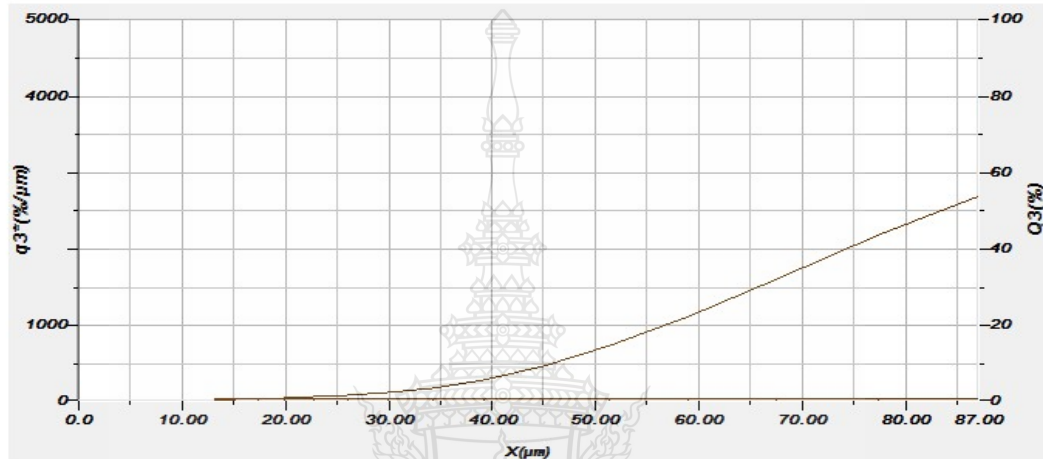


No	X(μm)	Q3(%/μm)	Q3(%)	No	X(μm)	Q3(%/μm)	Q3(%)	No	X(μm)	Q3(%/μm)	Q3(%)	No	X(μm)	Q3(%/μm)	Q3(%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	76	300.518	0.000	98.476
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.868	0.000	0.000	77	344.206	0.000	99.486
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.246	0.000	0.000	78	394.244	0.000	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.001	0.106	79	451.586	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.001	0.258	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.001	0.477	81	592.387	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	57	22.797	0.001	0.826	82	678.504	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.002	1.297	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.003	2.363	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.258	0.004	3.980	85	1019.519	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.316	0.000	0.000	61	39.234	0.005	6.595	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.938	0.007	10.618	87	1337.451	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	0.009	16.435	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.953	0.010	24.219	89	1754.513	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.823	0.011	33.693	90	2009.687	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.239	0.011	44.583	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	67	88.583	0.010	55.621	92	2636.467	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.480	0.008	68.304	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	0.006	72.718				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	0.003	78.653				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	0.003	83.470				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.616	0.002	87.706				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	0.001	91.342				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.075	0.001	94.384				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	75	262.376	0.001	96.713				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ
อุณหภูมิน้ำโลหะ 1160 อัตราการไหลของก๊าซ 400

Suranaree University of Technology
HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	: Powder N2C2	Median Size	: 83.35682(๓m)
Data Name	: NS6978_65 N2C2 rep2	Mean Size	: 100.40158(๓m)
Transmittance(R)	: 92.4(%)	Std.Dev.	: 59.3364(๓m)
Transmittance(B)	: 94.2(%)	Geo.Mean Size	: 86.8228(๓m)
Circulation Speed	: 5	Geo.Std.Dev.	: 1.7007(๓m)
Agitation Speed	: 14	Mode Size	: 82.2423(๓m)
Ultra Sonic	: 06:00 (7)	Span	: 1.6339
Form of Distribution	: Manual	D(v,0.1)	: 46.20948(๓m)
Refractive Index (B)	: Silver[Silver(0.200 - 0.200i),Water(1.333)]	D(v,0.5)	: 83.35682(๓m)
Source	:	D(v,0.9)	: 182.40445(๓m)
Lot Number	:		
Test or Assay. Number	: NS6978/66		

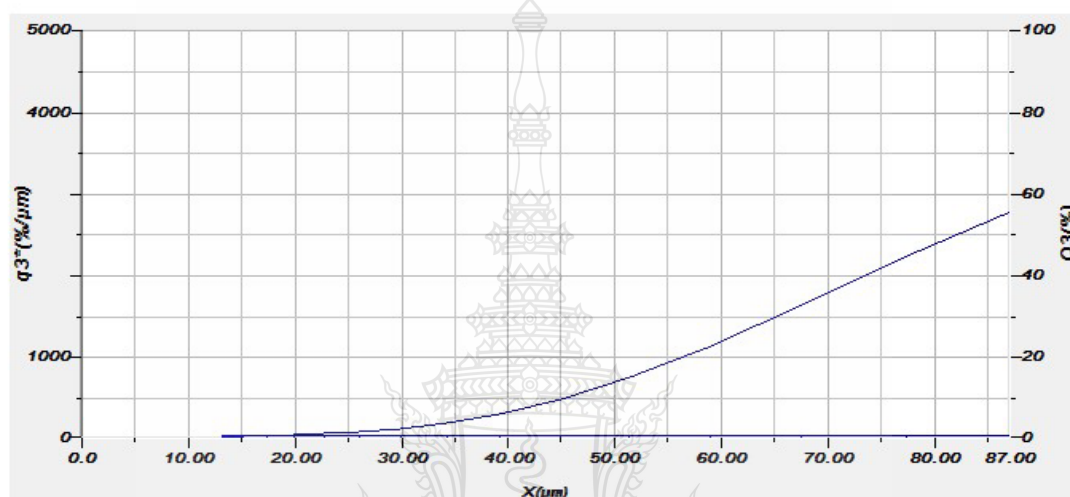


No.	X(μm)	d3* (%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	d3* (%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	d3* (%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	d3* (%/μm)	Q3(%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	76	300.518	0.000	98.718
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.586	0.000	0.000	77	344.206	0.000	99.542
3	0.015	0.000	0.000	28	0.446	0.000	0.000	53	13.246	0.000	0.000	78	394.244	0.000	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.001	0.104	79	451.556	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.001	0.243	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.001	0.437	81	592.387	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	57	22.797	0.001	0.725	82	678.504	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.001	1.181	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.006	0.000	0.000	59	29.907	0.002	1.927	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.255	0.003	3.212	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	61	39.234	0.004	5.363	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.938	0.006	8.384	87	1337.481	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	0.008	14.514	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.953	0.010	21.999	89	1754.613	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.523	0.011	31.762	90	2009.697	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	0.012	43.362	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	67	88.583	0.011	55.387	92	2636.467	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.460	0.008	65.353	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	0.005	73.701				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	0.004	79.730				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	0.003	94.699				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.616	0.002	108.879				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	0.001	122.365				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.075	0.001	136.149				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	75	262.378	0.001	151.236				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ
อุณหภูมิน้ำโลหะ 1160 อัตราการไหลของก๊าซ 500

Suranaree University of Technology
HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	: Powder N2C2	Median Size	: 82.24287(๓m)
Data Name	: NS6978_65 N2C2 rep3	Mean Size	: 96.79528(๓m)
Transmittance(R)	: 93.6(%)	Std.Dev.	: 55.4633(๓m)
Transmittance(B)	: 94.8(%)	Geo.Mean Size	: 84.5164(๓m)
Circulation Speed	: 5	Geo.Std.Dev.	: 1.6717(๓m)
Agitation Speed	: 14	Mode Size	: 82.3719(๓m)
Ultra Sonic	: 06:00 (7)	Span	: 1.5032
Form of Distribution	: Manual	D(v,0.1)	: 45.88789(๓m)
Refractive Index (B)	: Silver[Silver(0.200 - 0.200i),Water(1.333)]	D(v,0.5)	: 82.24287(๓m)
Source	:	D(v,0.9)	: 169.51660(๓m)
Lot Number	:		
Test or Assay. Number	: NS6978/66		

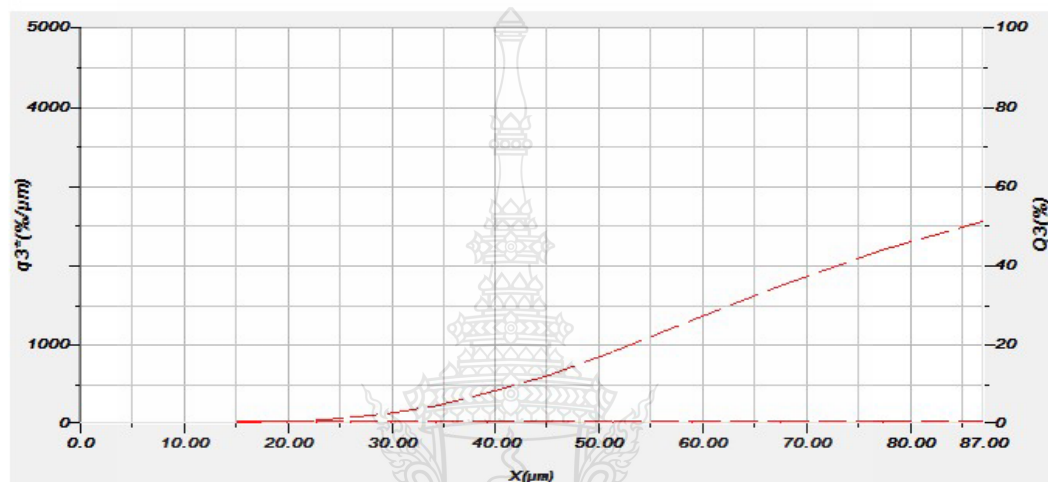


No.	X(μm)	Q3(%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	Q3(%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	Q3(%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	Q3(%/μm)	Q3(%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	76	300.518	0.000	96.988
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.568	0.000	0.000	77	344.206	0.000	99.639
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.246	0.000	0.000	78	394.244	0.000	100.000
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.001	0.112	79	451.556	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.001	0.275	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.001	0.495	81	592.387	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	57	22.797	0.001	0.813	82	678.504	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.002	1.317	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.002	2.119	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.255	0.003	3.437	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	61	39.234	0.004	5.612	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.935	0.005	9.159	87	1337.451	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	0.008	14.916	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.961	0.000	0.000	64	58.953	0.010	22.378	89	1754.513	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.523	0.012	32.313	90	2009.887	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	0.012	44.289	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	67	88.583	0.011	58.399	92	2636.467	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.460	0.009	67.978	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	0.008	78.214				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	0.004	82.307				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	0.002	87.054				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.616	0.002	90.823				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	0.001	93.818				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.075	0.001	96.129				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	75	262.376	0.001	97.818				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ
อุณหภูมิน้ำโลหะ 1160 อัตราการไหลของก๊าซ 600

Suranaree University of Technology
HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	: Powder N2C3	Median Size	: 85.29739(๓m)
Data Name	: NS6979_65 N2C2 rep4	Mean Size	: 116.30088(๓m)
Transmittance(R)	: 88.9(%)	Std.Dev.	: 84.2816(๓m)
Transmittance(B)	: 92.0(%)	Geo.Mean Size	: 93.3369(๓m)
Circulation Speed	: 5	Geo.Std.Dev.	: 1.9179(๓m)
Agitation Speed	: 14	Mode Size	: 72.2649(๓m)
Ultra Sonic	: 08:00 (7)	Span	: 2.3206
Form of Distribution	: Manual	D(v,0.1)	: 42.55709(๓m)
Refractive Index (B)	: Silver(Silver(0.200 - 0.200i),water(1.333j))	D(v,0.5)	: 85.29739(๓m)
Source	:	D(v,0.9)	: 240.49855(๓m)
Lot Number	:		
Test or Assay. Number	: NS6979/66		

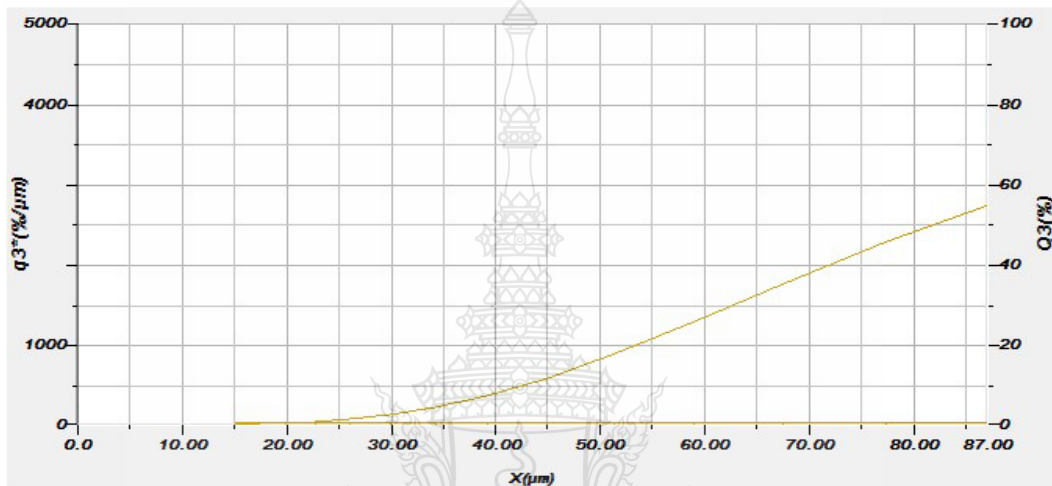


No.	X(μm)	q3 (%/μm)	Q3 (%)	No.	X(μm)	q3 (%/μm)	Q3 (%)	No.	X(μm)	q3 (%/μm)	Q3 (%)	No.	X(μm)	q3 (%/μm)	Q3 (%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	76	300.518	0.001	95.177
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.565	0.000	0.000	77	344.208	0.001	97.546
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.245	0.000	0.000	78	394.244	0.000	98.862
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.000	0.000	79	451.556	0.000	99.594
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.001	0.124	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.001	0.317	81	592.387	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	57	22.797	0.001	0.642	82	678.504	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.002	1.225	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.003	2.292	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.255	0.004	4.175	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	61	39.234	0.006	7.286	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.938	0.009	11.838	87	1337.481	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	0.010	19.074	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.953	0.010	25.804	89	1754.613	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.523	0.010	34.526	90	2009.667	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	0.009	43.707	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	67	88.583	0.008	55.428	92	2636.467	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.406	0.000	0.000	68	101.460	0.006	69.873	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	0.004	86.744				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	0.003	107.809				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	0.002	135.593				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.616	0.002	169.220				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	0.002	208.657				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.075	0.001	254.734				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	75	262.376	0.001	308.284				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ
อุณหภูมิน้ำโลหะ 1260 อัตราการไหลของก๊าซ 400

Suranaree University of Technology
HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	: Powder N2C3	Median Size	: 81.84913(๓m)
Data Name	: NS6979_65 N2C2 rep2	Mean Size	: 102.51631(๓m)
Transmittance(R)	: 86.2(%)	Std.Dev.	: 66.7274(๓m)
Transmittance(B)	: 91.3(%)	Geo.Mean Size	: 86.2684(๓m)
Circulation Speed	: 5	Geo.Std.Dev.	: 1.7777(๓m)
Agitation Speed	: 14	Mode Size	: 72.7478(๓m)
Ultra Sonic	: 06:00 (7)	Span	: 1.8670
Form of Distribution	: Manual	D(v,0.1)	: 43.05346(๓m)
Refractive Index (B)	: Silver[Silver(0.200 - 0.200i),Water(1.333)]	D(v,0.5)	: 81.84914(๓m)
Source	:	D(v,0.9)	: 195.86653(๓m)
Lot Number	:		
Test or Assay. Number	: NS6979/66		

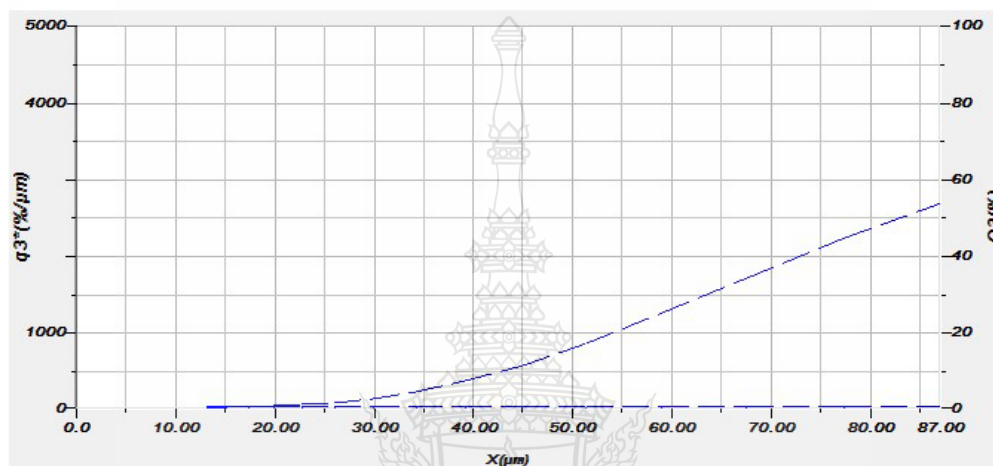


No.	X(μm)	q3* (%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	q3* (%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	q3* (%/μm)	Q3(%)	No.	X(μm)	q3* (%/μm)	Q3(%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	76	300.518	0.001	98.008
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.888	0.000	0.000	77	344.206	0.000	99.079
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.246	0.000	0.000	78	394.244	0.000	99.670
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.000	0.000	79	451.656	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.001	0.140	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.001	0.356	81	592.367	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	57	22.797	0.001	0.708	82	678.904	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.002	1.311	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.003	2.363	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.255	0.004	4.138	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.316	0.000	0.000	61	39.234	0.006	7.017	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.938	0.009	11.376	87	1337.481	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	0.009	17.532	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.953	0.011	25.538	89	1754.613	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.523	0.011	36.033	90	2009.687	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	0.011	49.602	91	2301.841	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.975	0.000	0.000	67	88.563	0.009	66.134	92	2636.467	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.460	0.007	85.272	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	0.005	112.333				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	0.003	137.964				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.483	0.002	182.758				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.616	0.002	246.932				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.000	0.001	330.558				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.075	0.001	439.614				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	75	262.376	0.001	576.079				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ
อุณหภูมิน้ำโลหะ 1260 อัตราการไหลของก๊าซ 500

Suranaree University of Technology
HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	: Powder N2C3	Median Size	: 83.01373(๓m)
Data Name	: NS6979_65 N2C2 rep3	Mean Size	: 103.84921(๓m)
Transmittance(R)	: 89.7(%)	Std.Dev.	: 67.2791(๓m)
Transmittance(B)	: 93.2(%)	Geo.Mean Size	: 87.2982(๓m)
Circulation Speed	: 5	Geo.Std.Dev.	: 1.7857(๓m)
Agitation Speed	: 14	Mode Size	: 82.1119(๓m)
Ultra Sonic	: 06:00 (7)	Span	: 1.8674
Form of Distribution	: Manual	D(v,0.1)	: 43.37812(๓m)
Refractive Index (B)	: Silver[Silver(0.200 - 0.200i),Water(1.333)]	D(v,0.5)	: 83.01373(๓m)
Source	:	D(v,0.9)	: 198.39816(๓m)
Lot Number	:		
Test or Assay, Number	: NS6979/66		



No.	X(μm)	q3 (%/μm)	Q3 (%)	No.	X(μm)	q3 (%/μm)	Q3 (%)	No.	X(μm)	q3 (%/μm)	Q3 (%)	No.	X(μm)	q3 (%/μm)	Q3 (%)
1	0.011	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000	76	300.518	0.001	97.980
2	0.013	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	52	11.565	0.000	0.000	77	344.208	0.000	99.056
3	0.015	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	53	13.246	0.000	0.000	78	394.244	0.000	99.882
4	0.017	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	54	15.172	0.001	0.104	79	451.556	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	55	17.377	0.001	0.252	80	517.200	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	56	19.904	0.001	0.477	81	592.387	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	32	0.768	0.000	0.000	57	22.797	0.001	0.836	82	678.504	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	58	26.111	0.002	1.437	83	777.141	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	59	29.907	0.003	2.482	84	890.116	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	60	34.255	0.004	4.173	85	1019.515	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	61	39.234	0.006	6.908	86	1167.725	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	62	44.933	0.007	11.082	87	1337.431	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	63	51.471	0.009	16.952	88	1531.914	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	64	58.953	0.010	24.728	89	1754.513	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	65	67.523	0.011	34.018	90	2009.687	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	66	77.339	0.011	44.492	91	2301.541	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	67	88.583	0.009	56.052	92	2639.467	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	68	101.450	0.007	64.234	93	3000.000	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	69	116.210	0.005	71.432				
20	0.150	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	70	133.103	0.003	77.165				
21	0.172	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	71	152.453	0.003	82.100				
22	0.197	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	72	174.516	0.002	86.435				
23	0.226	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	73	200.600	0.001	90.229				
24	0.259	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000	74	229.075	0.001	93.428				
25	0.296	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000	75	262.376	0.001	95.991				

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหัวพ่นก๊าซแบบหลายรูปล่อยก๊าซรอบปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะ
อุณหภูมิน้ำโลหะ 1260 อัตราการไหลของก๊าซ 600

ภาคผนวก ค

วารสารทางวิชาการและบทความการประชุมวิชาการ



บทความการประชุมวิชาการและวารสารทางวิชาการ

วารสารระดับชาติ

- (1) Kawsuk, M., Wannasri, S., and Torsakul, S. (2021) Characteristics of Atomizer Nozzle in Gas Atomization, RMUTP Research Journal Sciences and Technology, 15(2), pp. 180–193, July – December. DOI: <https://doi.org/10.14456/jrmutp.2021.31>
(TCI, กลุ่ม 1, Accepted: 7 June 2021, Published: Volume 15, No. 2, 2021.
<https://doi.org/10.14456/jrmutp.2021.31>

วารสารระดับนานาชาติ

- (1) Kawsuk, M., Wannasri, S., and Torsakul, S. (2024). 925 Silver Alloy for Jewelry Manufacturing by Using Additive Manufacturing Part 1: Oxide on Metal Powder Surface. Journal of Southwest Jiaotong University, 59(1), pp.153-160, February.
<https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.59.1.13>
(Scopus, Q2, Accepted 9 February 2024, Published Volume 59, Issue 1, 2024.
<https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.59.1.13>
- (2) Kawsuk, M., Wannasri, S., and Torsakul, S. (2024). Morphology of 925 Silver Powder Particles Produced from Gas Atomization. Journal of Applied Engineering and Technological Science, 5(2), pp.966-976. <https://doi.org/10.37385/jaets.v5i2.4891>, June.
(Scopus, Q4, Accepted: 1 June 2024, Published: Volume 5, Issue 2, 2024.
<https://doi.org/10.37385/jaets.v5i2.4891>

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Characteristics of Atomizer Nozzle in Gas Atomization

Montri Kawsuk^{1*} Surat Wannasri² and Sirichai Torsakul³

^{1,3}Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi Patumtani

² Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan

^{1,3}39 Moo. 1, Rangsit-Nakhon Nayok Road, Klong6, Khlong Luang Pathum Thani 12000

²744 Suranarai Road, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

Received 20 December 2020; Revised 14 May 2021; Accepted 7 June 2021

Abstract

This research article aims to study of the atomizer nozzle pattern in the gas atomization process. The production of metal powder by using a gas atomization process. It is the most popular process. This process is used in various industry and engineering application. However, there is lack of information on the production of various precious metal powders in the jewelry manufacturing industry both in the country and abroad. For this reasons, the research team is interested in applying this process for the Thai jewelry manufacturing industry. Currently, the jewelry industry is in a transitional period of manufacturing technology with an increased focus on powder metallurgy technology. The production of metal powder by using a gas atomization process consisting of the following 3 steps: melting, making of atomized molten metal, cooling and solidifying for solid particles under a controlled gas atmosphere. Factors affecting particle shape, particle size, and particle size distribution are consisting of inert gas type, molten metal temperature, and the configuration or pattern of the nozzle that are different characteristics. The results can be concluded that Close-Coupled Nozzle is the most suitable nozzle for production due to the highest productivity providing the smallest particle size and spherical granular shape. The information from this study will be useful for the Thai jewelry manufacturing industry.

Keywords : Atomization Processes; Atomization Processes with Gases; Atomizer Nozzle

* Corresponding Author. Tel.: +668 5709 7884, E-mail Address: montri.k@mail.rmutt.ac.th



Open Access Article

<https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.59.1.13>

Research article

Engineering

925 SILVER ALLOY FOR JEWELRY MANUFACTURING USING ADDITIVE MANUFACTURING, PART 1: OXIDE ON METAL POWDER SURFACE

采用增材制造技术制造珠宝的925银合金，第1部分：金属粉末表面
的氧化物

Montri Kawsuk ^{a,*}, Surat Wannasri ^b, Sirichai Torsakul ^a

^a Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Patumtani, Khlong Luang Pathum Thani, Thailand, montri_k@mail.rmUTT.ac.th

^b Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan
Nakhon Ratchasima, Thailand, surat.wn@rmUTI.ac.th

* Corresponding author: montri_k@mail.rmUTT.ac.th

Received: December 16, 2023 • Reviewed: January 11, 2024

• Accepted: February 9, 2024 • Published: February 29, 2024

Abstract

The purpose of the article is to investigate the oxides formed during gas atomization using 925 silver powder generated by gas atomization using a closed-coupled nozzle, influenced by a number of process parameters and the effect of process parameters on the characteristics of 925 sterling silver powder produced by various superheated gas atomization of the alloy melted at superheat temperatures of 1060, 1160, and 1260°C. The melt gas flow rate varied between 400, 500, and 600 l/min. The alloy powder size analysis was performed using X-ray fluorescence (XRF) particle characterization, and the powder morphology was analyzed using scanning electron microscope. The results of the experiment showed XRF containing 95.11% silver and 4.89% copper. Microscopic examination results nitrogen gas flow rates of 400, 500, and 600 L/min and temperatures used in parameters 1060, 1160, and 1260 °C under the experimental conditions, the temperature of 925 silver is the temperature used in parameters 1,060 °C nitrogen gas flow rates 600 l/min on the oxide surface during gas atomization and after production at different gas pressures and temperatures there are minimal complex shapes on the surface of the alloy powder.

Keywords: gas atomization, X-ray fluorescence, 925 silver alloy, surface oxide, scanning electron microscopy



© 2024 by the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

MORPHOLOGY OF 925 SILVER POWDER PARTICLES PRODUCED FROM GAS ATOMIZATION

Montri Kawsuk¹, Surat Wannasrib², Sirichai Torsakula^{3*}

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi Patumtani, Khlong Luang Pathum Thani, Thailand¹³

Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand²

sirichai.to@en.rmutt.ac.th

Received : 24 April 2024, Revised: 12 May 2024, Accepted : 01 June 2024

**Corresponding Author*

ABSTRACT

In order to examine the impact of metal water temperature and gas flow rate on the production of 925 silver alloy powder via closed-coupled nozzle and gas atomization process with nitrogen gas as the production medium, and since the morphology of the powder particles could not account for the influence of these variables, the aim was to comprehend and propose a new approach for a general framework for studying the influence of such factors. As a consequence, an investigation was conducted into the impact of these two variables on the morphology, which was characterized by roundness values. Particle size and distribution information can be conveyed to facilitate interpretation. According to the results of the experiment, the gas flow rate and metal water temperature influence the particle morphology in terms of particle size and distribution with respect to roundness. The particle size distribution of metal powders is more restricted and the particle roundness increases. This is due to the fact that the particle morphology plays a critical role in determining which metal powder particles are suitable for forming metal powder workpieces via various production methods. The gas flow rate and metal water temperature influence the particle size distribution, roundness value, and significant size of 925 silver alloy powder.

Keywords: Gas Atomization, Close Coupling, 925 Silver, Particle Morphology, SEM

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – ชื่อสกุล	นายมนตรี ขาวสุข
วัน เดือน ปี เกิด	16 มกราคม 2521
ที่อยู่ปัจจุบัน	29 หมู่ที่ 20 ตำบลประสุข อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดนครราชสีมา 30270
การศึกษา	ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิศวกรรมการผลิต (วศ.ม) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรประจำภาควิชาวิศวกรรมเกษตรเพื่ออุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี พ.ศ. 2547 – จนถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	085-7097884
อีเมล	montri_k@mail.rmutt.ac.th, montri.k@itm.kmutnb.ac.th,