การผลิตผงโลหะทองแดงด้วยกระบวนการพ่นละอองน้ำโลหะด้วยก๊าซ

Production of Copper Metal Powder Using Gas Atomization Process

ธีรยุทธ กาญจนแสงทอง[1], สุรัตน์ วรรณศรี[2] และ วิโรจน์ ฉัตรเกษ[3]*

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

[2]สถาบันสหสรรพศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

[3]สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม อ.เมือง จ.นครพนม 48000

Teerayut Kanchanasangtong[1], Surat Wannasri[2] and Wirot Chudget[3]*

[1]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Krungthep, Sathorn, Bangkok 10120

[2]Institute of Interdisciplinary Studies, Rajamangala University of Technology Isan,

Nakhon Ratchasima, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

[3]Department of Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology,

Nakhonphanom University, Muang, Nakhonphanom 30000

*Corresponding author E-mail: Wirot_ch@npu.ac.th

(Received: May 29, 2026 / Revised: June 25, 2026 / Accepted: June 27, 2026)

บทคัดย่อ

การผลิตชิ้นงานแบบเติมเนื้อที่มีความหนาแน่นสูงต้องใช้อนุภาคผงโลหะที่มีความกลมและคุณภาพ มีความจำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตชิ้นงาน เนื่องจากความกลมและรูปร่างมีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคผงโลหะ ซึ่งเป็นความท้าท้ายอย่างยิ่งในการผลิตผงโลหะทองแดงด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ เพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตและควบคุมคุณภาพของผงโลหะ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตผงโลหะทองแดงด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ โดยทดลองผลิตผงด้วยเครื่อง Gas atomizer ภายใต้ค่าพารามิเตอร์หลัก คือ อุณหภูมิน้ำโลหะ (1,085 1,110 และ 1,135 °C) รูเทน้ำโลหะ (2, 3 และ 4 mm) และก๊าซไนโตรเจน ในการตรวจสอบปริมาณการผลิตและวัดค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผงทองแดงขนาด ≤ 100 µm คือ อุณหภูมิน้ำโลหะ 1085°C เส้นผ่านศูนย์กลางรูเทน้ำโลหะ 4 mm และอัตราการไหลของก๊าซ 960 l/min ซึ่งให้ผลผลิตสูงสุด 540.7 g หรือ 54.07% ของโลหะที่ใช้ นอกจากนี้ เมื่ออุณหภูมิน้ำโลหะสูงกว่าจุดหลอมละลายค่าอนุภาคของความกลมและรูปร่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ขนาดรูเทน้ำโลหะ, ความกลม, ผงโลหะทองแดง

Abstract

The production of additive manufactured parts requires metal powder particles that are perfectly spherical and of high quality. It is essential in the workpiece manufacturing process. Because roundness and shape affect the mobility of metal powder particles, this presents a significant challenge in the production of metal powders using the gas atomization process. To enhance production capabilities and ensure the quality of metal powders. This research aims to study the production of copper metal powder using the gas atomization process. The powder was produced experimentally using a gas atomizer, the parameters are the molten metal temperature (1,085 1,110 and 1,135 °C), the pouring hole (2, 3 and 4 mm), and nitrogen gas. Monitoring production quantities and measuring the roundness of metal powder particles. The results show the optimal conditions for producing copper powder with a particle size of ≤100 µm. This means the molten metal temperature is 1085°C, the diameter of the pouring hole is 4 mm, and the gas flow rate is 960 l/min. Which give a maximum of 540.7 g, or 54.07% of the metal used. In addition, when the temperature of the metal is higher than the melting point, the particle roundness tends to increase.

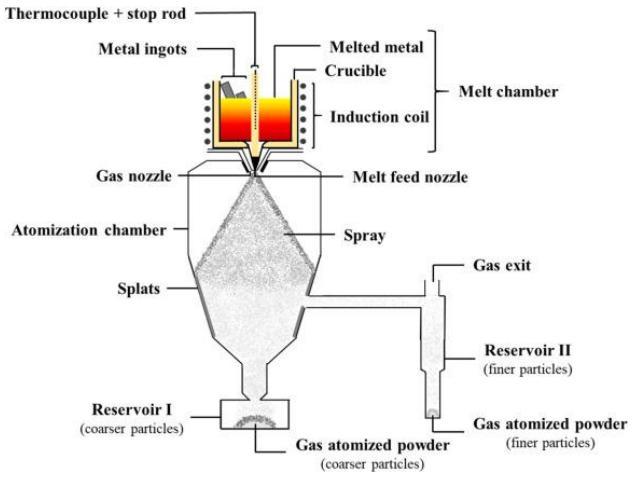
Keywords: Pouring Nozzle Diameter, Roundness, Copper metal powder

1. บทนำ

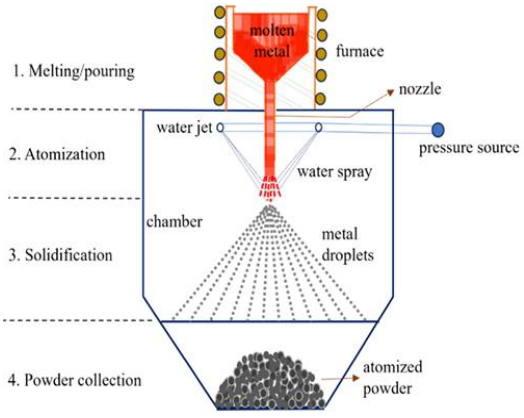
การผลิตแบบเติมเนื้อ (Additive manufacturing; AM) เป็นเทคโนโลยีการผลิตสมัยใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนในรูปแบบชั้นๆ ได้ดีเยี่ยม โดยใช้การหลอมละลายผงโลหะด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser powder bed fusion (L-PBF) ลำแสงเลเซอร์จะทำหน้าที่หลอมผงโลหะทีละชั้น เพื่อสร้างชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูงและไม่มีข้อบกพร่อง [1-3] อย่างไรก็ตาม กระบวนการ L-PBF มีความจำเป็นต้องเลือกใช้ผงโลหะที่มีความเป็นทรงกลมสูง (≥ 0.85) และขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 10 – 60 μm คุณสมบัติเหล่านี้ช่วยให้ผงไหลได้ดีเยี่ยม ซึ่งสำคัญต่อการกระจายผงอย่างสม่ำเสมอในแต่ละชั้น ส่งผลให้กระบวนการ L-PBF สามารถสร้างชิ้นงานคุณภาพสูงได้อย่างง่ายและมีความแม่นยำสูง [1-5]

ในกระบวนการอะตอมไมซ์เซอร์เป็นวิธีการผลิตผงโลหะที่ได้รับความนิยม โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ (Gas atomization) ดังแสดงในรูปที่ 1 และการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ (Water atomization) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งทั้งสองกระบวนการนี้จะใช้ก๊าซและแรงดันน้ำ เพื่อทำให้น้ำโลหะที่หลอมเหลวเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยหรืออนุภาคผงขนาดเล็ก [6-7] ซึ่งในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซโลหะจะถูกหลอมให้กลายเป็นน้ำโลหะ (Liquid metal) เพื่อให้เกิดการหยดตัวของน้ำโลหะ (Droplets) และไหลผ่านหัวพ่น (Nozzle) โดยใช้แรงดันของก๊าซเฉื่อยเป็นตัวช่วยเร่งให้เกิดการแตกกระจายเป็นละอองฝอยและแข็งตัวกลายเป็นผงโลหะ (Metal Powder) ภายในถังแบบปิด [8]

ขนาดของรูเทน้ำโลหะมีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลและขนาดของลำน้ำโลหะขณะไหลผ่านหัวฉีด ซึ่งอาจส่งผลให้หยดน้ำโลหะเกิดการแตกกระจายตัวไม่เป็นละอองฝอย แต่อาจจะเป็นเม็ดโลหะขนาดใหญ่และไม่เป็นทรงกลม ซึ่งข้อบกพร่องนี้มีผลกระทบต่อคุณสมบัติลักษณะเฉพาะของวัสดุผงและประสิทธิภาพในการผลิตผง เมื่อต้องการผงที่มีความละเอียดสูง นอกจากนี้ ยังอาจจะเกิดปัญหาการอุดตัน (Clogging) ของหัวพ่นได้ง่าย [6]



รูปที่ 1 กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ [6]



รูปที่ 2 กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ [7]

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า Vitor E. Pinotti และคณะ [6] ได้ทดลองกระบวนการอะตอมไมเซชั่นด้วยก๊าซ เพื่อประเมินอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดป้อนโลหะหลอมเหลว (d_0) อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว (ΔT) และแรงดันในการสร้างอะตอมไมเซชั่น (P_G) ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของผงโลหะผสมอลูมิเนียม AA2017 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์มีผลกระทบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เพียงเล็กน้อย พบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสำหรับ (d_0 = 1.5 mm, ΔT=150 °C, P_G= 20 Bar) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความลื่นไหลและความหนาแน่นปรากฏที่เหมาะสมเนื่องจากการกระจายขนาดอนุภาคและลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เหมาะสม ในขณะที่ มนตรี ขาวสุข และคณะ [11] ได้ศึกษาลักษณะรูปแบบหัวพ่นอะตอมไมซ์ในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ พบว่าหัวพ่นอะตอมไมซ์แบบ Close-Coupled เป็นหัวพ่นที่ให้ประสิทธิภาพการผลิตสูงสุดขนาดของอนุภาคที่ผลิตได้มีขนาดเล็กสุดและมีรูปร่างเป็นเม็ดอนุภาคทรงกลม และ Somjit Mandal และ Chi-Chuan Wang [12] เสนอแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics; CFD) เพื่อศึกษาการปรับความละเอียดของผงโลหะให้เหมาะสมที่สุด ในขณะที่ทำงานในช่วงพารามิเตอร์กระบวนการที่กำหนดในระบบการสร้างอะตอมไมเซชั่นด้วยแรงดันสูง (High-Pressure Gas Atomization; HPGA) พบว่าแรงดันและอุณหภูมิของแก๊สขาเข้าที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการพ่นละอองและผลิตผงที่ละเอียดขึ้น โดยแรงดันมีผลมากกว่าอุณหภูมิ นอกจากนี้ Soares Barreto และคณะ[13] ศึกษาการสร้างอะตอมไมเซชั่นด้วยก๊าซผ่านหัวฉีดแบบโครสคัปเปิล (Close-Coupled Gas Atomization; CCA) เพื่อสังเคราะห์โลหะผสมไบนารีที่สามารถขึ้นรูปเป็นแก้วได้ Ni62Nb38 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าผงทรงกลมที่ไม่มีโครงสร้างผลึกอย่างสมบูรณ์ที่มีผลผลิตสูงในช่วงขนาด 20–63 μm และระดับออกซิเจนต่ำกว่า 900 wppm

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่มีต่อกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเทน้ำโลหะ อุณหภูมิน้ำโลหะ แรงดันก๊าซ และชนิดของก๊าซ รวมถึงลักษณะของหัวฉีดและการประยุกต์ใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตผงโลหะและแก้ไขปัญหาการไหลย้อนกลับของก๊าซ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการผลิตผงโลหะทองแดงด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ โดยทดลองผลิตผงด้วยเครื่อง Gas atomizer ต้นแบบที่ถูกสร้างและพัฒนาขึ้นเอง ภายใต้การควบคุมพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเทน้ำโลหะ (Pouring Nozzle Diameter) อุณหภูมิน้ำโลหะ (Melting Temperature; T_m) ความดันก๊าซที่พ่น (P_G) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) เพื่อทำการตรวจสอบปริมาณการผลิตและวัดค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการทดลอง

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 การทดลอง

การทดลองผลิตผงโลหะทองแดงด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการดำเนินงาน ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมีพารามิเตอร์หลักที่ควบคุมได้ ประกอบด้วย อุณหภูมิน้ำโลหะ T_m+25 °C (1,085 °C), T_m+50 °C (1,110 °C) และ T_m+75 °C (1,135 °C) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเทน้ำโลหะ (ø 2, 3 และ 4 mm) ก๊าซไนโตรเจน (ความดันก๊าซที่พ่น 10 bar หรือ 960 l/min) และมุมหัวพ่นก๊าซ 15 องศา ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนได้ดังนี้

2.1.1 จัดเตรียมวัสดุสิ้นเปลืองและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย เม็ดทองแดง เบ้าหลอมแกรไฟต์ (Graphite Crucibles) แท่งแกรไฟต์อุดเบ้า (Stopper) และก๊าซไนโตรเจน

2.1.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นทองแดงจากภาคอุตสาหกรรม โดยทำการเตรียมเม็ดทองแดงด้วยกระบวนการเทเม็ดโลหะด้วยเครื่องผลิตเม็ดโลหะแบบสุญญากาศของ Indutherm รุ่น GU 500 D

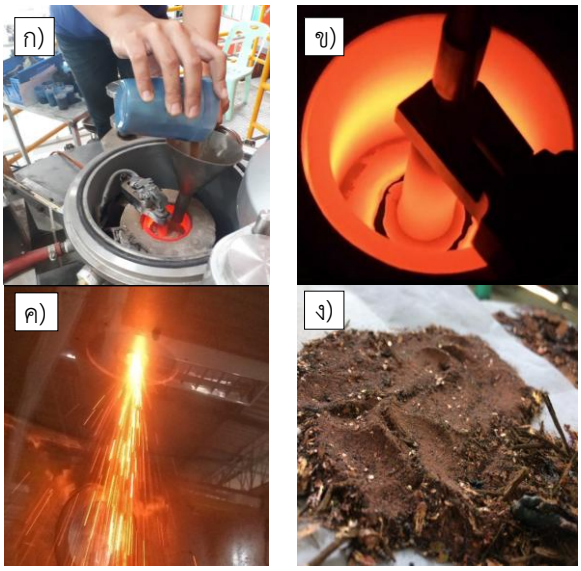
2.1.3 เตรียมเครื่อง Gas atomizer และวางเบ้าหลอมโลหะลงในช่องว่างของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนของเครื่องอินดักชัน (Induction heater)

2.1.4 ติดตั้งแท่ง Stopper และเทอร์โมคัปเปิล Type R (ช่วงวัดอุณหภูมิ 0°C ถึง 1,600°C) ภายในรูแท่ง Stopper เพื่ออุดก้นเบ้าหลอมและวัดอุณหภูมิน้ำโลหะ พร้อมประกอบหัวพ่นเพื่อใช้ในการพ่นละอองฝอย

2.1.5 เปิดเครื่องอินดักชัน ปรับระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมละลาย จากนั้น เมื่ออุณหภูมิ 600 °C เทเม็ดทองแดงลงเบ้า 1 kg. ดังแสดงในรูปที่ 3 ก)

2.1.6 เมื่ออุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลวเม็ดทองแดงจะกลายสถานะเป็นของเหลวใสคล้ายแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 3 ข)

2.1.7 ยกแท่ง Stopper ขึ้น พร้อมเปิดวาล์วก๊าซไนโตรเจน (N_2) เพื่อฉีดพ่นน้ำโลหะเป็นละอองฝอย ปล่อยให้อนุภาคผงลอยในถัง Chamber ก่อนร่วงลงในถ้วยเก็บผง (Cup) แล้วนำผงไปคัดแยกและตรวจสอบสมบัติพื้นฐานของผงโลหะได้ ดังแสดงในรูปที่ 3 ค) – ง)



รูปที่ 3 การทดลองผลิตผงด้วยเครื่อง Gas atomizer

2.2 การวิเคราะห์ตรวจสอบ

2.2.1) การตรวจสอบหาปริมาณอนุภาคผงโลหะ

นำผงโลหะทองแดงที่ได้มาชั่งน้ำหนักเพื่อตรวจสอบปริมาณที่ผลิตได้และปริมาณโลหะที่ตกค้างในเบ้าหลอม ท่อลำเลียง และภาชนะรองรับ จากนั้นร่อนคัดแยกอนุภาคผงโลหะด้วยตะแกรงขนาด 100 µm เป็นเวลา 5 นาที ด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อนแยก ของ HAVER & BOECKER รุ่น HAVER EML DIGITAL PLUS โดยอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 µm ไม่เหมาะสำหรับกระบวนการผลิตแบบเติมเนื้อ (AM) ด้วยวิธี Selective Laser Melting (SLM)

2.2.2) การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง

การตรวจสอบและวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) ของ Olympus รุ่น BX60M โดยเทผงลงบนแผ่นรองตัวอย่าง ปรับหาตำแหน่งที่ต้องการวิเคราะห์ จากนั้นทำการบันทึกรูปภาพ

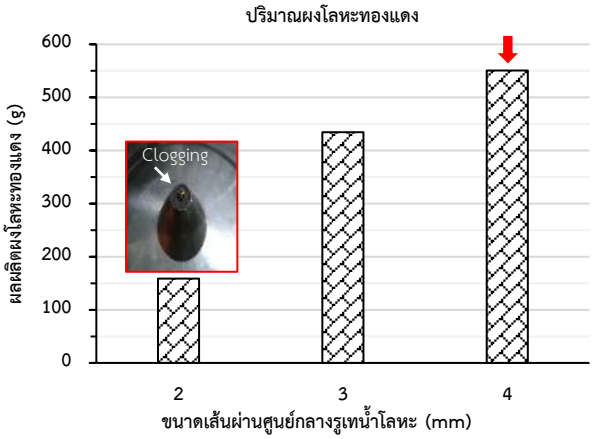
2.2.3) การวัดความกลม

การวัดค่าความกลมของอนุภาคทำโดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (OM) และวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม ImageJ Version 2019 โดยพิจารณาจากการเปรียบเทียบความยาวเส้นรอบวงของวงกลมที่สมบูรณ์กับเส้นรอบวงของภาพฉายอนุภาค ค่าพารามิเตอร์รูปร่างที่ใช้แสดงผล คือ High Sensitivity Circularity (HSC) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ใช้บ่งบอกระดับความใกล้เคียงของรูปร่างอนุภาคกับวงกลม ดังแสดงในสมการที่ 1 [9] โดยที่ *Area* และ *Perimeter* คือพื้นที่และเส้นรอบวงของอนุภาคที่วิเคราะห์ ตามลำดับ

$$HS\ Circularrity = \frac{4\pi Area}{Perimeter^2} \quad (1)$$

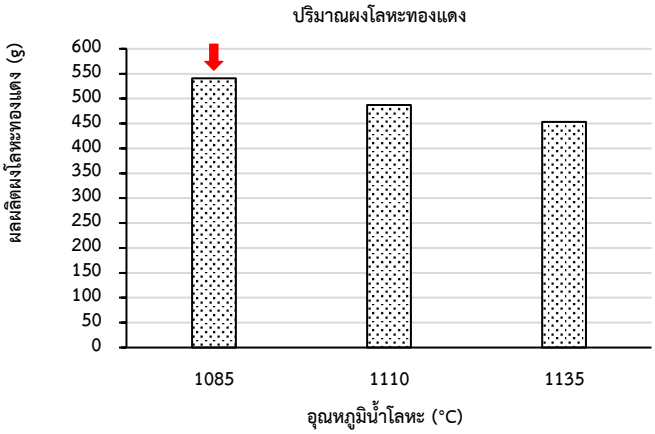
3. ผลทดลองและอภิปรายผล

จากการวิเคราะห์อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเทน้ำโลหะต่อปริมาณผงโลหะทองแดง พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเทน้ำโลหะมีผลโดยตรงต่อปริมาณการผลิตผงโลหะทองแดง เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณผงโลหะทองแดงที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าขนาดรูเทน้ำโลหะลดลงทำให้อัตราการไหลของน้ำโลหะลดลง อาจเกิดการอุดตันของหัวพ่นที่ทางออก ดังแสดงในรูปที่ 4 นอกจากนี้ ยังมีการแข็งตัวของหยดน้ำโลหะที่ก่อตัวขัดขวางการไหลของน้ำโลหะหลอมเหลวจากด้านบน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Junfeng Wang และคณะ [10]



รูปที่ 4 ปริมาณผงโลหะที่ผลิตได้ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเทน้ำโลหะต่างๆ ที่มุมหัวพ่นก๊าซ 15 องศา

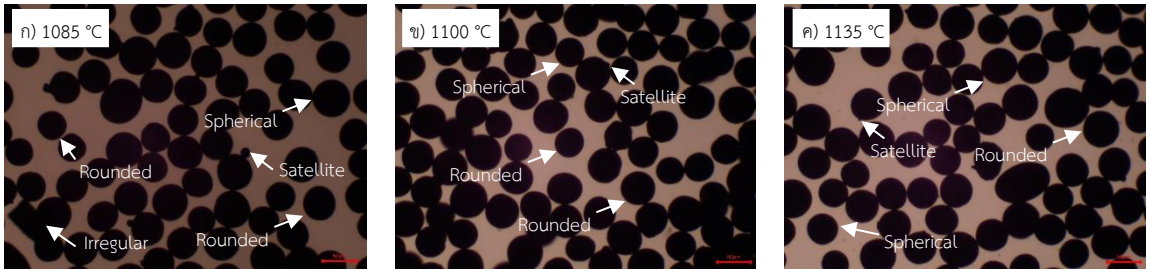
นอกจากนี้ ได้การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิน้ำโลหะต่อปริมาณผงโลหะทองแดงพบว่า อุณหภูมิน้ำโลหะที่ต่างกันไม่มีผลต่อปริมาณผงโลหะที่ผลิตได้ เนื่องจากทุกอุณหภูมิน้ำโลหะสามารถผลิตผงโลหะทองแดงได้มีปริมาณค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากอุณหภูมิความร้อน 1,085 °C ถึง 1,135 °C ที่ใช้ในการหลอมเหลวเม็ดทองแดงจากสถานะของแข็งกลายเป็นของเหลว ซึ่งทำให้น้ำโลหะสามารถไหลผ่านหัวพ่นละอองฝอยขณะฉีดได้อย่างต่อเนื่อง



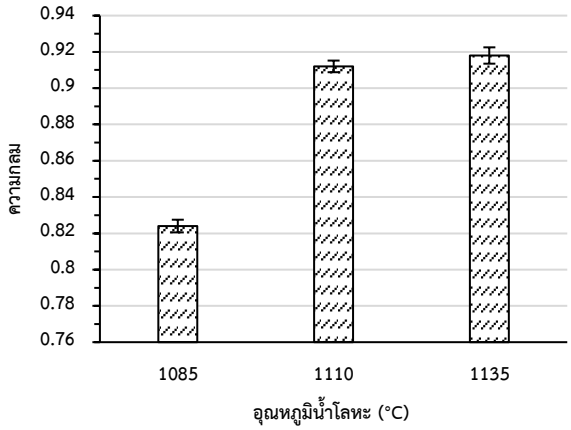
รูปที่ 5 ปริมาณผงโลหะเฉลี่ยที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิน้ำโลหะต่างๆ ที่มุมหัวพ่นก๊าซ 15 องศา

จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายอนุภาคของผงโลหะทองแดงที่ผ่านกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ในช่วงขนาด ≤ 50 µm พบว่าอนุภาคผงโลหะทองแดงส่วนใหญ่มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม (Spherical) และกลมมน (Rounded) นอกจากนี้ ยังพบอนุภาคผงโลหะที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular) และมีการเกาะติดของเม็ดบริวาร (Satellite Particles) ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Marian Grigoras และคณะ [14]

จากการวัดค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะ พบว่าอุณหภูมิน้ำโลหะที่สูงขึ้นมีผลต่อค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 1,085 °C มีค่าความกลมอยู่ที่ 0.824 เมื่ออุณหภูมิน้ำโลหะเพิ่มขึ้นเป็น 1,110 °C และอุณหภูมิน้ำโลหะ 1,135 °C พบว่าอนุภาคผงโลหะมีค่าความกลมอยู่ที่ 0.912 และ 0.918 ตามลำดับ ซึ่งค่าความกลมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับอุณหภูมิน้ำโลหะ ดังกราฟเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 7 อย่างไรก็ตาม หากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเทน้ำโลหะลดลงและอุณหภูมิน้ำโลหะต่ำ อาจเกิดการอุดตันของลำน้ำโลหะภายในท่อลำเลียงของหัวฉีดได้ง่าย



รูปที่ 6 ลักษณะรูปร่างของผงโลหะทองแดงที่สภาวะแตกต่างกัน ก) 1085°C ข) 1100°C และ ค) 1135°C



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าความกลมของอนุภาคที่สภาวะแตกต่างกัน

4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของรูเทน้ำโลหะต่อปริมาณและความกลมของอนุภาคผงโลหะทองแดงที่ผ่านกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผงโลหะทองแดงที่มีขนาดอนุภาค ≤ 100 µm คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเทน้ำโลหะ 4 mm. อุณหภูมิน้ำโลหะ 1085°C, และอัตราการไหลของก๊าซ 960 l/min โดยสามารถผลิตผงโลหะทองแดงได้สูงสุด 540.7 g หรือคิดเป็น 54.07% ของเนื้อโลหะทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง

2) อุณหภูมิน้ำโลหะที่สูงกว่าจุดหลอมละลายมีผลทำให้ค่าความกลมของอนุภาคผงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิน้ำโลหะ

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตผงโลหะและควบคุมคุณภาพของอนุภาคผงโลหะถือเป็นความท้าท้ายอย่างยิ่ง สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจมุ่งเน้นศึกษาผลของแรงดันก๊าซต่อขนาดและลักษณะรูปร่างของผงโลหะ นอกจากนี้ ยังสามารถต่อยอดงานวิจัยทางด้านการประยุกต์ใช้ผงโลหะทองแดงด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติหรือการผลิตแบบเติมเนื้อ (Additive Manufacturing; AM)

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำวิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และอุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] A. A. Zerwas, F. C. Da Silva, R. Guardani, L. Achelis, and U. Fritsching, “Impact of the gas atomizer nozzle configuration on metal powder production for additive manufacturing,” Powder Technology, vol. 443, Jul. 2024, p. 119974

[2] T. DebRoy et al., “Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties,” Progress in Materials Science, vol. 92, Mar. 2018, pp. 112–224.

[3] B. Dutta, S. Babu, and B. Jared, “Metal additive manufacturing,” in Science, Technology and Applications of Metals in Additive Manufacturing, Elsevier, 2019, pp. 1–10.

[4] A. Zocca, G. Franchin, P. Colombo, and J. Günster, “Additive Manufacturing,” in Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses, Elsevier, 2021, pp. 203–221.

[5] J. Ting, J. Connor, and S. Ridder, “High-speed cinematography of gas-metal atomization,” Materials Science and Engineering: A, vol. 390, no. 1–2, Jan. 2005, pp. 452–460

[6] V. E. Pinotti, A. F. Andreoli, and P. Gargarella, “Gas atomization of AA2017 aluminum alloy: Effect of process parameters in the physical properties of powders for additive manufacturing,” Journal of Materials Research and Technology, vol. 30, May 2024, pp. 3650–3662

[7] E.-H. Go, R. Vasudevan, J.-W. Ha, S.-J. Jo, G. Baek, and S.-J. Hong, “Revealing the improved thermoelectric performances of (BiSb)2Te3 alloy through rapid solidification of cold-water assisted water atomization approach,” Journal of Alloys and Compounds, vol. 1010, Jan. 2025, p. 177548

[8] Niraj Kumar, Supriya Sarkar, T.N.C. Anand, and Shamit Bakshi “Estimating metal mass flow rate in gas-atomization for metal powder production”, Powder Technology, Volume 448, 1 Dec 24,

[9] Christophe D’Angelo, Anne-Charlotte Robisson and Christelle Duguay, “Flow properties of uranium dioxide control-shaped powders: Link with the particle morphology and size of asperities” Powder Technology Volume 459, June 2025, 120824

[10] Junfeng Wang, Min Xia, Jialun Wu and Changchun Ge, “Nozzle Clogging in Vacuum Induction Melting Gas Atomization: Influence of the Delivery-Tube and Nozzle Coupling” Arch. Metall. Mater. 67 (2022), 4, pp. 1359-1370

[11] M. Kawsuk, S. Wannasri, and S. Torsakul, “Characteristics of Atomizer Nozzle in Gas Atomization”, RMUTP Sci J, vol. 15, no. 2, pp. 180–193, Dec. 2021.

[12] Mandal, S. and Wang, C.-C. “Numerical Investigations and Optimization for the Supersonic Gas Atomization System for Manufacturing Metal Powder” Processes 2025, 13, 2075

[13] Erika Soares Barreto, Maximilian Frey, Lucas Matthias Ruschel, Jan Wegner, Stefan Kleszczynski, Ralf Busch and Nils Ellendt “Gas atomization of fully-amorphous $Ni_{62}Nb_{38}$ powder” Materials Letters vol. 357, 15 February 2024, 135798

[14] Marian Grigoras, Mihaela Lostun, George Stoian, Gabriel Ababei, Marieta Porcescu and Nicoleta Lupu, “The Influence of Preparation Parameters on the Morphology and Magnetic Properties of Fe-N Powders Obtained by the Gas Atomization Method” Appl. Sci. 2023, 13, 11529.