บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเรื่องการออกแบบและสร้างเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์สำหรับผลิตผงโลหะ มีวัตถุประสงค์ที่จะออกแบบและสร้างเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์ที่สามารถใช้ผลิตผงโลหะกลุ่มทองแดง ทองแดงผสมบางชนิด เช่น ทองเหลือง อะลูมิเนียมผสม และดีบุก เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุมที่มีผลต่อขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการผลิตด้วยวิธีแก๊สอะตอมไมเซชัน ซึ่งในการวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุมที่สำคัญ 3 ตัวแปร คือ

- แรงดันของแก๊ส (Gas pressure)
- อุณหภูมิเกินจุดหลอมของโลหะ (Superheat of molten metal)
- อัตราการไหลของโลหะหลอม (Molten metal flow rate)

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทนี้แบ่งเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

(1) กลไกการแตกเป็นละอองของโลหะเหลว (Mechanism of atomization)

(2) ประเภทของหัวพ่นแก๊ส (Type of nozzle)

(3) การหลอมโลหะเพื่อใช้ในการผลิตผงโลหะ

(4) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

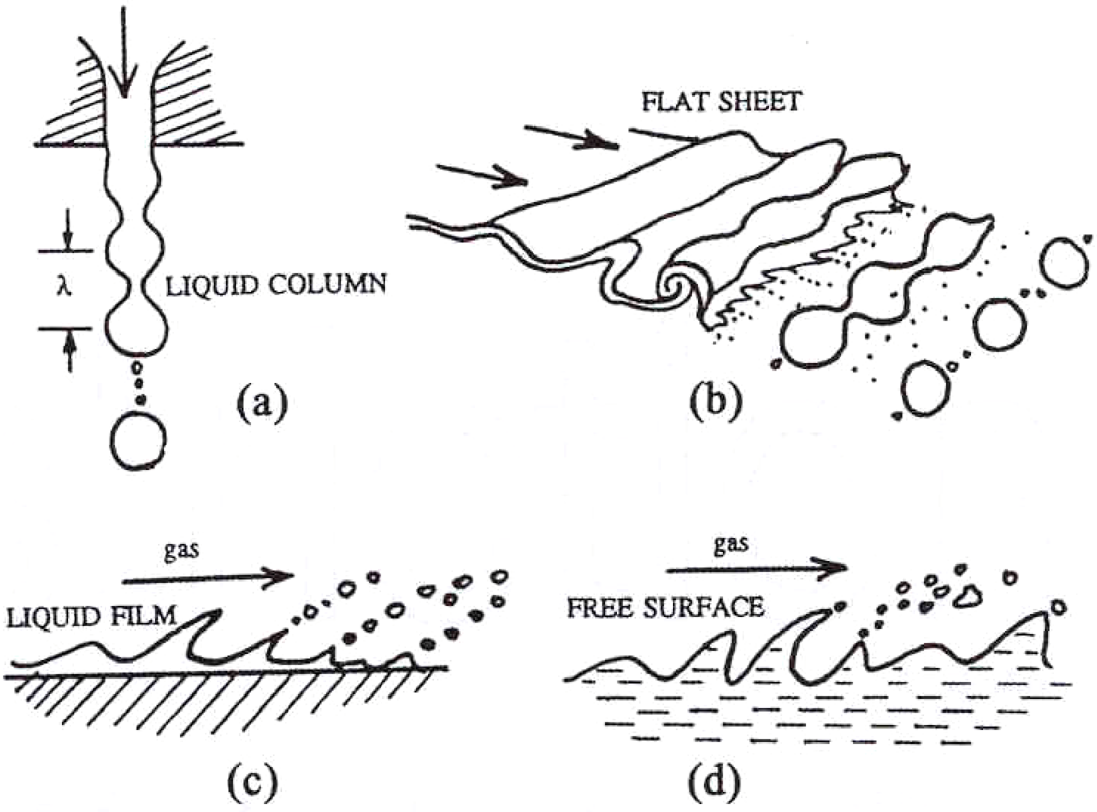
1. กลไกการแตกตัวเป็นละอองของโลหะเหลว (Mechanism of atomization)

การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน ใช้หลักการทำให้โลหะเหลว (Molten Metal) แตกตัวเป็นหยดหรือละอองที่มีขนาดละเอียดมากๆ แล้วทำให้เย็นตัวจนละอองโลหะเหลวแข็งตัวกลายเป็นเม็ดผงโลหะที่มีขนาดต่าง ๆกัน การทำให้โลหะเหลวเป็นละอองนั้นต้องมีแรงมากระทำต่อโลหะเหลว ในการผลิตผงโลหะในระดับห้องทดลองและในระดับอุตสาหกรรม แรงที่กระทำต่อโลหะเหลวสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

- แรงกระแทกจากของไหล เช่น แก๊ส หรือของเหลวที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง(พลังงานจลน์สูง)
- แรงจากการหมุนเหวี่ยงโลหะเหลว
- แรงที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างความดันของโลหะเหลวกับบริเวณที่โลหะเหลวเกิดการแตกตัว

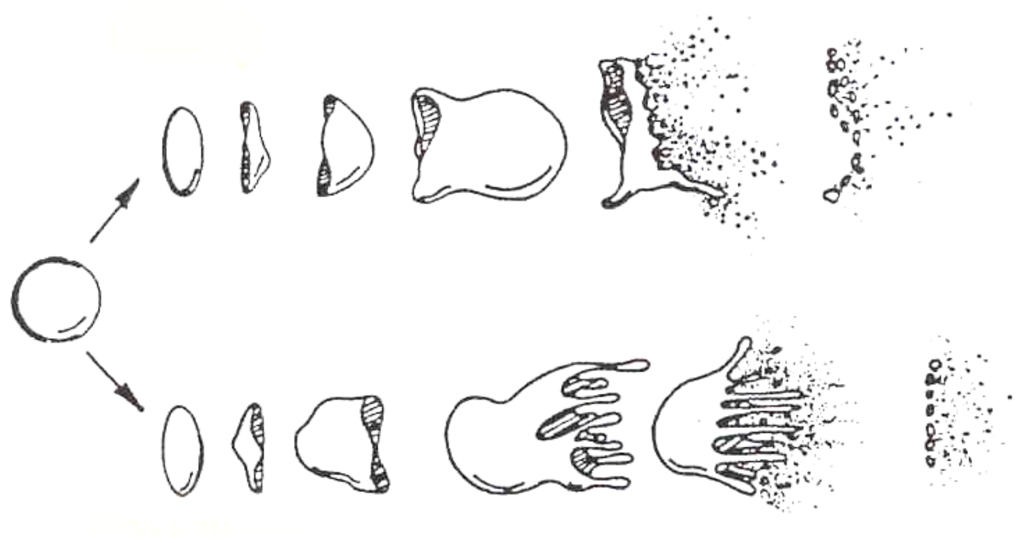
ในที่นี้จะขอกล่าวถึงแต่เฉพาะแรงกระแทกจากของไหลเพียงอย่างเดียว การแตกตัวของโลหะเหลวด้วยแรงกระแทกจากของไหลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงโดยทั้งโลหะเหลวและของไหลที่ใช้เป็นตัวกลางในการทำให้เกิดการแตกตัวต่างเป็นของไหลทั้งคู่ แรงกระแทกจากของไหลจะมีผลทำให้ลำโลหะเหลว (Melt stream) ไม่เสถียรและเกิดการแตกด้วยกลไกต่าง ๆ หลายอย่างผสมผสานกัน(การแตกตัวของโลหะเหลวไม่ได้เกิดด้วยกลไกเดียว) กลไกเหล่านี้ ได้แก่

1) การแตกตัวของลำโลหะเหลวที่ไหลออกจากรูเล็กๆ (Orifice) รูปที่ 2.1 (a) การแตกตัวด้วยกลไกนี้เกิดจากปัจจัย 2 อย่าง คือ น้ำหนักของหยดโลหะเหลว และแรงตึงผิว (Surface tension)
2) การแตกตัวของโลหะเหลวที่เป็นแผ่นบาง รูปที่ 2.1 (b) ในกลไกนี้แรงกระแทกจากของไหลซึ่งมีความเร็วสูงจะทำให้โลหะเหลวที่เป็นแผ่นบางเรียบก่อตัวเป็นคลื่นที่ไม่เสถียรจึงแตกตัวต่อไปเป็นรูปคล้ายไส้กรอกซึ่งนิยมเรียกว่า Ligaments เนื่องจากแรงกระแทกมีอยู่ต่อเนื่อง Ligaments จะถูกกระแทกต่อ ทำให้แตกตัวเป็นหยดหรือละอองที่ละเอียดต่อไป
3) การแตกตัวของแผ่นฟิล์มโลหะเหลวบนผิวของแข็ง รูปที่ 2.1 (c) ในกลไกนี้แรงกระทำจากแก๊สที่มีความเร็วสูงจะเฉือนให้แผ่นฟิล์มบนผิวของแข็งฉีกขาดเป็นชิ้นเล็กๆ และก่อตัวเป็นทรงกลมเนื่องจากแรงตึงผิวของโลหะเหลว
4) การแตกตัวของผิวอิสระของโลหะเหลว รูปที่ 2.1 (d) กลไกการแตกตัวแบบนี้จะมีลักษณะที่คล้ายกับแบบที่ 3 และคล้ายกับกรณีของการเกิดละอองน้ำบนผิวน้ำที่ลมพัดด้วยความเร็วที่เพียงพอ



รูปที่ 2.1 กลไกการแตกตัวของโลหะเหลวด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน (Klar, 1972)

หลังจากที่โลหะเหลวแตกตัวเป็นหยดหรือละอองเล็กๆ แล้ว หากแรงกระแทกยังมีอยู่ตลอด โลหะเหลวจะสามารถแตกตัวต่อไปได้อีก เรียกการแตกตัวขั้นนี้ว่า Secondary breakup ซึ่งเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะขึ้นกับค่า Gas phase weber number ($We_g = p_g \Delta U^2 D/\sigma$) ซึ่งค่านี้จะมีความสัมพันธ์ผกผันกับแรงตึงผิวของโลหะเหลว ดังนั้นหากโลหะเหลวมีแรงตึงผิวสูงหยดของเหลวจะถูกแรงกระทำและมีรูปร่างเป็นถุงที่ใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนสุดท้ายถุงทนแรงกระแทกไม่ไหวเกิดการแตกตัวเป็นละอองที่เล็กละเอียดยิ่งขึ้น (รูปที่ 2.2 แถวบน) ในทางตรงกันข้ามหากโลหะเหลวมีแรงตึงผิวต่ำหยดของเหลวเมื่ออยู่ภายใต้แรงกระทำจะฟอร์มตัวเป็นรูปแมงกระพุน ซึ่งสุดท้ายจะแตกตัวเป็นหยดที่เล็กละเอียด (รูปที่ 2.2 แถวล่าง)

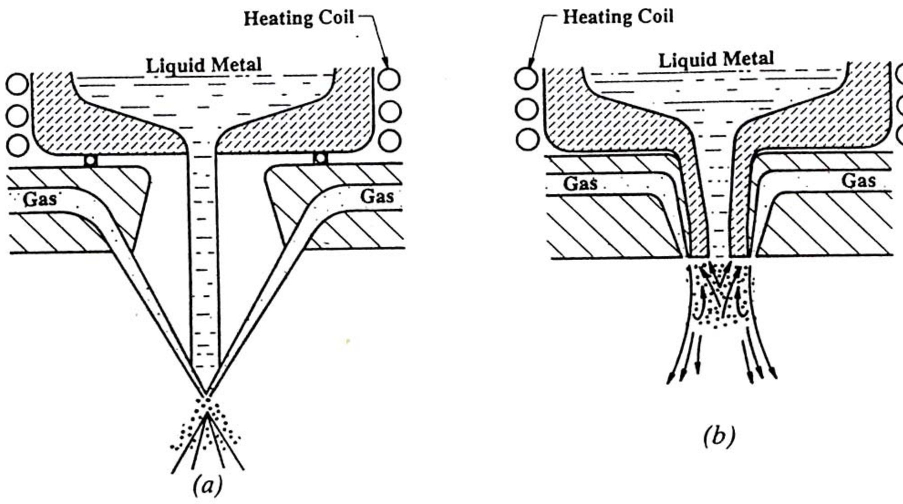


รูปที่ 2.2 Secondary breakup ของหยดโลหะเหลว (Klar, 1972)

2. ประเภทของหัวพ่นแก๊ส (Type of nozzle)

ในกระบวนการผลิตผงโลหะด้วยวิธีแก๊สอะตอมไมเซชัน โลหะหลอมจะถูกพ่นโดยแก๊ส เช่น อากาศ ไนโตรเจน อาร์กอน หรือ ฮีเลียม ด้วยความเร็วสูง โดยมีอัตราการไหลของโลหะหลอมน้อยกว่า 120 กิโลกรัมต่อนาที หัวฉีดแก๊สที่ใช้อาจเป็นชนิด Free – fall หรือแบบ Confined ซึ่งหัวฉีดแต่ละชนิดจะมีกลไกการทำงานแตกต่างกันดังนี้

- Free – fall nozzle system แก๊สที่ออกมาจากหัวพ่นแก๊ส (Gas nozzle) จะพุ่งชนโลหะหลอมตรงบริเวณที่อยู่ห่างจากปลายของอุปกรณ์ลำเลียงโลหะหลอมเป็นระยะทางระยะหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (a)
- Confined nozzle system แก๊สที่ออกมาจากหัวพ่นแก๊สจะพุ่งเข้าชนโลหะหลอมที่บริเวณปลายของอุปกรณ์ลำเลียงโลหะเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (b)



รูปที่ 2.3 ลักษณะหัวฉีดแบบ Free – fall (a) และแบบ Confined (b) (Bridenbaugh, 1986)

โดยทั่วไปอุปกรณ์ลำเลียงโลหะเหลวจะใช้วัสดุที่ทนความร้อนและเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกริยาทางเคมี ระบบหัวฉีดทั้งสองแบบมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของหัวฉีดแบบ External mixing (เรืองเดช 2544)

ชนิด	ข้อดี	ข้อเสีย
Confined (Closed) nozzle	-ลดการสูญเสียพลังงานจลน์และความเร็วของแก๊สที่ใช้ในการทำให้โลหะเหลวแตกตัว -สามารถผลิตโลหะผงที่มีขนาดละเอียดมากๆได้	-แก๊สที่ใช้ทำให้โลหะเหลวแตกตัวจะหล่อเย็นอุปกรณ์ลำเลียงโลหะเหลว (Melt nozzle) ที่ร้อนกว่าทำให้เกิดปัญหา Thermal shock ได้ -การไหลของแก๊สบริเวณปลายเปิดของอุปกรณ์ลำเลียงโลหะเหลวอาจก่อให้เกิด Back pressure หรือ Suction effect อย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่ง Back pressure เป็นอุปสรรคต่อการไหลของโลหะเหลว
Free fall (Open) nozzle	-ไม่มีปัญหาเรื่องการหล่อเย็นและการเกิด Thermal shock กับอุปกรณ์ลำเลียงโลหะเหลว	-สูญเสียพลังงานจลน์และความเร็วของแก๊สก่อนที่จะกระทบโลหะเหลว อันเนื่องมาจากระยะห่างระหว่างช่องแก๊สกับโลหะเหลว ทำให้ผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดหยาบกว่ากรณีที่ใช้ Confined nozzle

อุปกรณ์ลำเลียงโลหะเหลวที่นิยมใช้ในระบบหัวฉีดคือ ท่อเซรามิก ดังนั้นช่องแก๊สจึงเป็นช่องเปิดรูปวงกลม (Circular opening) ล้อมรอบท่อเซรามิก แก๊สที่พุ่งออกมาชนโลหะเหลวจึงเป็นรูปกรวยโดยมียอดของกรวยอยู่ตรงบริเวณที่โลหะเหลวเกิดการแตกตัว นอกจากนั้นยังมีการออกแบบหัวฉีดในลักษณะอื่น ๆอีกหลายลักษณะ ซึ่งแต่ละลักษณะจะมีความเหมาะสมสำหรับการพ่นโลหะแต่ละชนิดและให้ผลที่แตกต่างกันไป หัวฉีดแต่ละลักษณะจะดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.4

รูปที่ 2.4 (a) Mannesmann process design (Naeser, 1948)

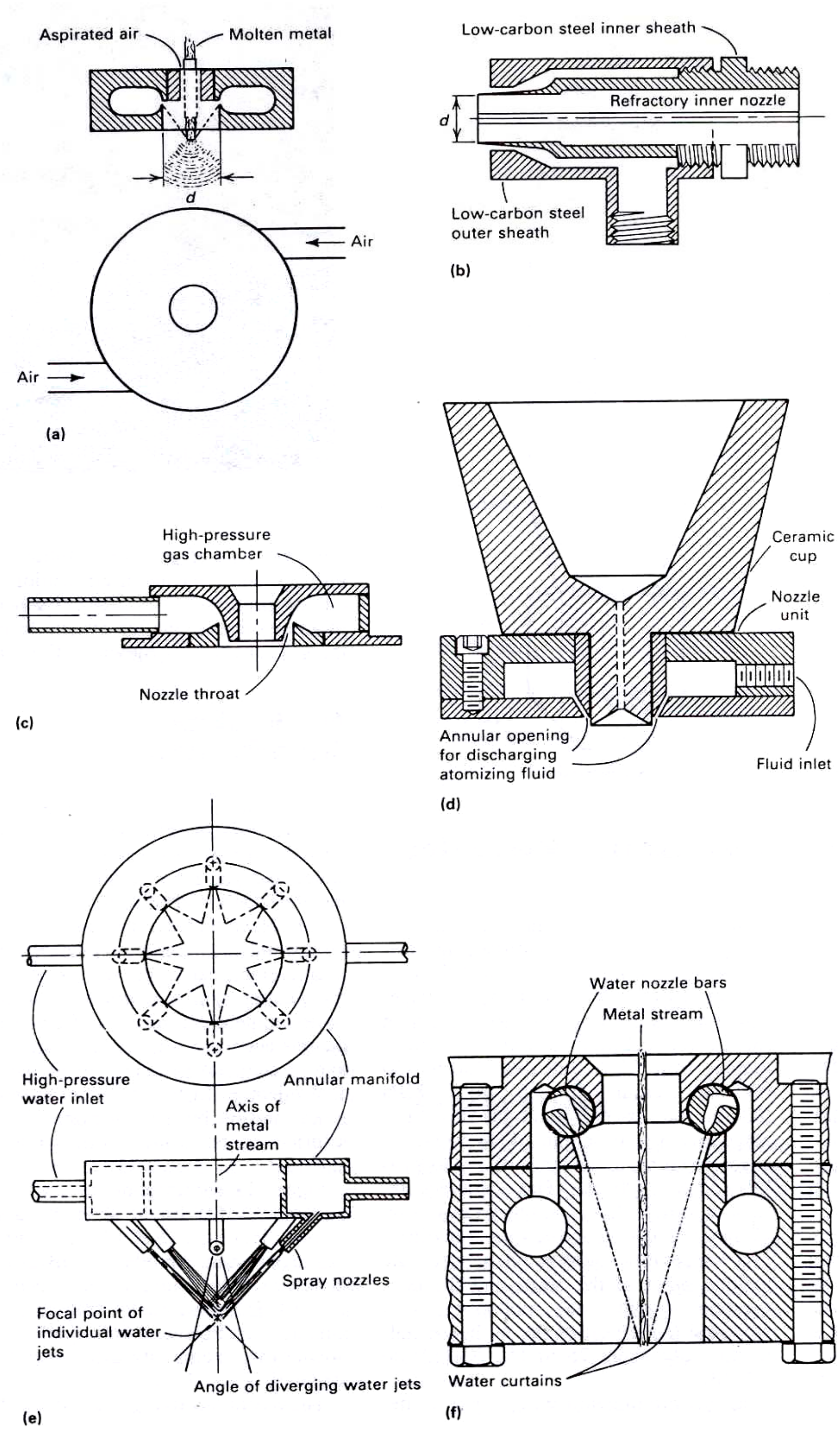
รูปที่ 2.4 (b) Thompson design ใช้ในการผลิตผงโลหะอลูมิเนียม (Thompson, 1948)

รูปที่ 2.4 (c) Naeser design (German, 1954)

รูปที่ 2.4 (d) Probst design (Probst, 1964)

รูปที่ 2.4 (e) Water atomization

รูปที่ 2.4 (f) Batten design (U.S. Patent, 1960)



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างลักษณะต่าง ๆของหัวฉีดที่มีการออกแบบไว้
(ASM, 1984)

จากลักษณะการแตกตัวของโลหะเหลวในแบบต่าง ๆซึ่งเป็นการยากที่จะระบุได้ว่ามีผลมาจากกระบวนการใดมากที่สุด ในการออกแบบหัวฉีด(Nozzle designs) จึงมีหลักการที่สำคัญว่าทำอย่างจึงจะควบคุมลักษณะการไหลของแก๊สและรูปแบบการพุ่งชนหรือการเข้ากระแทกโลหะเหลวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพื่อให้โลหะเหลวเกิดการแตกตัวได้ตามที่ต้องการ ซึ่งลักษณะต่าง ๆของหัวฉีดสำหรับใช้ในการพ่นโลหะเหลวแต่ละชนิดจะมีการออกแบบที่มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันไปดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 7 หัวฉีดทุกลักษณะจะต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณและแรงดันของของไหลที่ใช้ฉีดพ่นโลหะเหลวซึ่งต้องสัมพันธ์กับปริมาณหรืออัตราการไหลของโลหะเหลว นอกจากนั้นยังมีตัวแปรอื่นอีกหลายตัวแปรที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการออกแบบหัวฉีดเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับการผลิตโลหะผงแต่ละชนิด ซึ่งค่าตัวแปรต่าง ๆโดยทั่วไปที่ใช้สำหรับการผลิตโลหะผงโดยวิธีอะตอมไมเซชันมีค่าต่าง ๆดังนี้

1) อัตราการไหลของโลหะเหลว (Metal flow rate) 4.5 – 90 kg/min (10 – 200 lb/min)
2) กรณีใช้น้ำเป็นสารฉีดพ่นจะใช้อัตราการไหลของน้ำ 110 – 380 L/min (30 – 100 gal/min) ที่ความเร็วในช่วง 70 – 230 m/s (230 – 750 ft/s) และใช้แรงดันของน้ำ 5.5 – 21 MPa (800 – 3,000 psi)
3) กรณีใช้แก๊สเป็นสารฉีดพ่นจะใช้อัตราการไหลของแก๊ส 1 – 14 m^3/min (40 – 500 cfm) ที่ค่าแรงดันของแก๊สช่วง 350 – 8,400 kPa (50 – 1,200 psi) โดยความเร็วของแก๊สที่พุ่งออกไปอาจจะมีความเร็วตั้งแต่ 20 m/s (66 ft/min) จนถึงระดับความเร็วเหนือเสียง (Supersonic velocities) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบลักษณะของหัวฉีด
4) อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลวของโลหะขณะเท (Superheat of molten metal) ที่ใช้ในกระบวนการอะตอมไมเซชันอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 75 – 150°C
5) ชนิดของแก๊สที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการแก๊สอะตอมไมเซชันโดยส่วนใหญ่จะใช้แก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน หรือ ฮีเลียม ซึ่งจะทำให้ไม่มีปัญหาในเรื่องการเกิดออกซิเดชั่น แต่เนื่องจากแก๊สดังกล่าวมีราคาที่ค่อนข้างสูง ซึ่งจะมีผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูงมาก จึงมักมีการออกแบบห้องพ่นโลหะเหลว (Atomizing chamber) ให้เป็นระบบที่สามารถนำแก๊สเฉื่อยที่พ่นออกไปแล้ววนกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งในระบบนี้จะต้องมีอุปกรณ์พิเศษหลายอย่างที่ใช้ในการปรับสภาพของแก๊สซึ่งเป็นระบบที่มีราคาแพงมาก

(ASM, 1984)

3. การหลอมโลหะเพื่อใช้ในการผลิตผงโลหะ

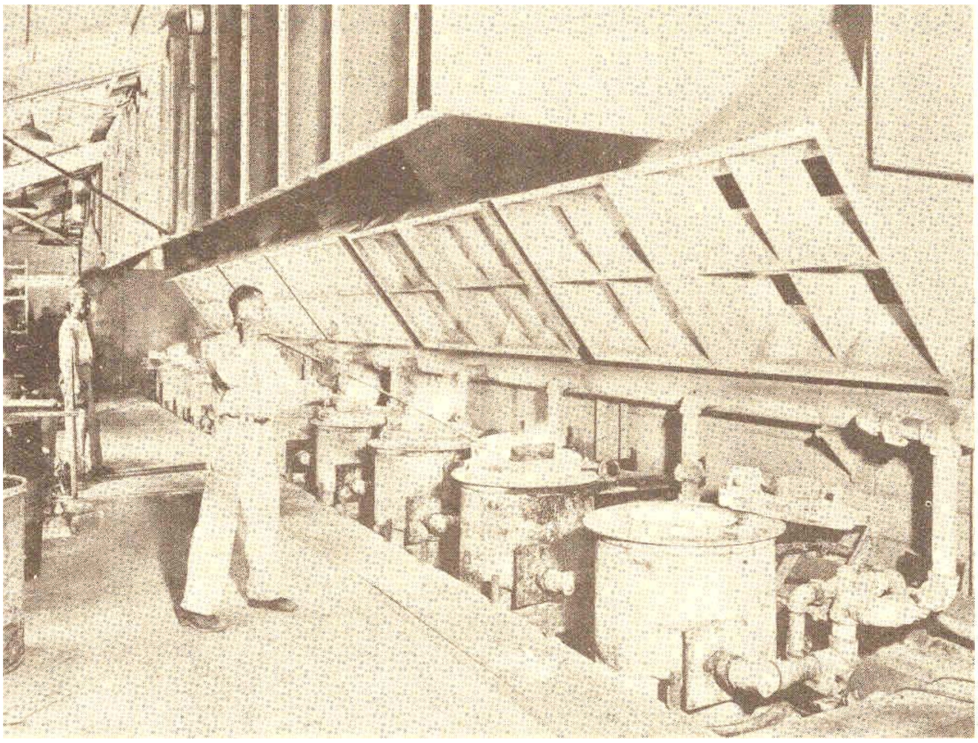
การเลือกเตาหลอมสำหรับการหลอมโลหะที่ไม่ใช่เหล็กจะมีความแตกต่างไปจากการเลือกเตาหลอมเหล็กเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากการหลอมโลหะที่ไม่ใช่เหล็กจะนิยมคัดเลือกโลหะ(วัตถุดิบ) ที่จะทำการหลอมให้มีส่วนผสมทางเคมีตามที่ต้องการโดยตรง ซึ่งจะทำให้การหลอมมีการทำความสะอาด (Refining) น้ำโลหะน้อยมาก ดังนั้นหากแท่งโลหะที่นำมาหลอม (Ingot) และเศษโลหะ (Return scraps)ที่นำมาหลอมมีส่วนผสมทางเคมีถูกต้องตามที่ต้องการแล้ว ปัญหาในการหลอมจะเป็นเพียงปัญหาเกี่ยวกับแก๊สที่ละลายปนในน้ำโลหะในขณะทำการหลอมเท่านั้น

เตาหลอมโลหะที่นิยมใช้สำหรับการหลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็กในทางอุตสาหกรรมคือ

1) เตาไฟฟ้า แบบเตาเหนี่ยวนำ (Induction furnace) ดังรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.5 เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ (AFS, 1993)

2) เตาเบ้า (Crucible furnace) มีทั้งแบบที่ใช้ทั้งน้ำมัน ถ่านโค้ก และแก๊สเป็นเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เตาหลอมโลหะแบบเตาเบ้า (AFS, 1993)

เตาหลอมโลหะชนิดต่าง ๆข้างต้นต่างก็มีทั้งข้อดี-ข้อเสียแตกต่างกันไป และข้อกำหนดในด้านของขนาดซึ่งหมายถึงปริมาณในการหลอมโลหะแต่ละครั้งต้องมากพอ ซึ่งโดยทั่วไปในเชิงอุตสาหกรรมจะมีขนาดการหลอมโลหะครั้งละ 100 กิโลกรัมขึ้นไป สำหรับเตาเบ้าในหัวข้อที่ 2 เป็นเตาที่สามารถทำการย่อ-ขยายขนาดได้ค่อนข้างมาก การหลอมโลหะที่มีความหนาแน่นต่ำ เช่น อะลูมิเนียมผสมในทางปฏิบัติจะนิยมใช้เตาเบ้า ทำหน้าที่เป็นเตาหลอมหลักทั้งนี้เนื่องจากสามารถทำการหลอมโลหะผสมอื่น ๆได้หลายชนิดเพียงแค่ทำการเปลี่ยนเบ้าหลอม การทำความสะอาด จะจำกัดเฉพาะเพียงการใช้ฟลั๊กทั้งชนิดที่เป็นก้อนและแก๊ส

การหลอมโลหะทองแดง ทองแดงผสม อะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมผสมมีหลักเกณฑ์ที่สำคัญคือการให้ความร้อนแก่โลหะที่ต้องการหลอมเพื่อให้ได้มาซึ่งน้ำโลหะที่มีคุณภาพดี และมีอุณหภูมิที่เหมาะสมกับความต้องการ โดยมีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด เนื่องจากในทางปฏิบัติมีความต้องการน้ำโลหะที่มีส่วนผสมต่าง ๆหลายส่วนผสม ทำให้ไม่สามารถชี้หรือระบุให้ชัดเจนได้ว่าเตาหลอมชนิดใดดีและเหมาะสมที่สุดสำหรับการหลอมโลหะข้างต้น การหลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่ปฏิบัติในทาง

อุตสาหกรรมจะทำการหลอมก้อนโลหะที่ผ่านการปรุงแต่งส่วนผสมมาแล้วโดยจะไม่นิยมที่จะทำการปรุงแต่งหรือปรับส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะในระหว่างการหลอม ซึ่งจะมีความแตกต่างจากการหลอมโลหะกลุ่มเหล็กโดยสิ้นเชิง ทั้งนี้เนื่องจากโลหะนอกกลุ่มเหล็กโดยเฉพาะทองแดง อะลูมิเนียม และแมกนีเซียมจะรวมตัวกับแก๊สไฮโดรเจนได้เร็วมาก

การควบคุมส่วนผสมในโลหะทองแดงผสม

การควบคุมส่วนผสมในโลหะทองแดงผสมจะมีปัญหาในทางปฏิบัติน้อยกว่าโลหะผสมกลุ่มนิกเกิลเนื่องจากแท่งโลหะที่หลอม (Ingot) ที่ใช้งานทั่วไปหาซื้อได้ง่าย โดยมักจะถูกปรับส่วนผสมทางเคมีไว้ตามปริมาณที่ต้องการเสมอ นอกจากนี้ปริมาณการหลอมมักมีขนาดไม่มากนักเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้เตาหลอมแบบเตาเบ้าได้อย่างเหมาะสม จึงทำให้การหลอมโลหะทองแดงผสมจึงมีการใช้ธาตุผสมเติมบ้างในปริมาณเพียงเล็กน้อยเพื่อชดเชยการสูญเพลิงเท่านั้น เป็นผลทำให้ไม่จำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมีที่มีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อเทียบกับปริมาณการหลอมที่น้อยในแต่ละครั้ง แต่ในการหลอมเศษโลหะของโรงถลุงทองแดงเพื่อทำเป็นแท่งโลหะทองแดงผสม จะใช้เตานอน (Reverberatory furnace) ซึ่งสามารถหลอมโลหะได้ครั้งละมากๆ ซึ่งจำเป็นต้องมีการผสมเติมธาตุต่าง ๆ เพื่อเทน้ำโลหะเป็นแท่งIngot ให้มีส่วนผสมต่าง ๆ ตามที่จะใช้งาน

ลักษณะของปัญหาที่เกิดขึ้นกับการควบคุมส่วนผสมทางเคมีของโลหะทองแดงผสมจะเกิดขึ้นทั้งจากเนื้อโลหะหลักและแก๊สที่ละลายปนในน้ำโลหะ ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนี้ทำให้สามารถจัดกลุ่มโลหะทองแดงผสมได้เป็นสามกลุ่มคือ

1. กลุ่มทองแดงหล่อที่มีธาตุผสมเติมน้อยมากเพื่อใช้งานในลักษณะที่ต้องการสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติด้านการนำความร้อน
2. กลุ่มโลหะทองแดงที่ประกอบด้วย Cu-Sn-Pb-Zn และ Cu-Zn (ที่มีปริมาณธาตุผสมเติมมากถึง 10%Sn, 10%Pb, 40%Zn)
3. โลหะผสม Cu-Al, โลหะผสม Cu-Si, โลหะผสม Cu-Be และโลหะผสม Cu-Ni

การควบคุมส่วนผสมทางเคมีโลหะทองแดงผสมกลุ่มที่ 1 กุญแจสำคัญในการควบคุมส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมกลุ่มนี้คือจะต้องมีปริมาณธาตุผสมที่น้อยที่สุดพร้อมกับต้องมีการกำจัดออกซิเจนออกจากน้ำโลหะเพื่อทำให้เนื้อโลหะที่ได้มีสมบัติในการนำไฟฟ้าสูงสุด เทคนิคที่นำมาใช้มีขั้นตอนดังนี้

- เศษโลหะที่นำมาหลอมต้องสะอาดมากๆหลอมพร้อมกับทองแดงบริสุทธิ์ในบรรยากาศเติมออกซิเจนที่ปราศจาก SO_2

- กำจัดออกซิเจนออกจากน้ำโลหะโดยใช้ฟอสฟอรัส และจะต้องให้มีปริมาณฟอสฟอรัสตกค้างในปริมาณที่น้อยที่สุดทั้งนี้เพื่อให้เนื้อโลหะที่ได้มีสมบัติการนำไฟฟ้าและความร้อนดีที่สุด
- เบ้ารับน้ำโลหะหรือ Tundish ต้องแห้งหรือไม่มีความชื้นตกค้าง เพื่อป้องกันการละลายปนของไฮโดรเจนจากการแตกตัวของความชื้น ในการกำจัดออกซิเจนสามารถใช้โลหะลิเธียมหรือแคลเซียมบอไรด์ แทนฟอสฟอรัสบางส่วนหรือใช้แทนทั้งหมดได้

การควบคุมส่วนผสมทางเคมีของโลหะทองแดงผสมกลุ่มที่ 2 โลหะผสม Cu-Sn-Pb-Zn เป็นกลุ่มโลหะที่ไฮโดรเจนจะละลายปนในน้ำโลหะได้น้อยกว่าโลหะทองแดงผสมกลุ่มที่ 1 เนื่องจากในระหว่างการหลอมจะมีไอของสังกะสีระเหยขึ้นจากน้ำโลหะและชักนำให้ไฮโดรเจนแพร่ออกจากน้ำโลหะ เนื่องจากโลหะกลุ่มนี้ไม่ต้องการความสามารถในการนำความร้อนและไฟฟ้าดังกลุ่มที่ 1 นอกจากนี้ปริมาณออกซิเจนที่จะละลายปนในน้ำโลหะยังมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการหลอมโลหะในกลุ่มที่ 1 ธาตุผสมเติมที่สูญเสีย (Melt loss) ไปในระหว่างการหลอมจะมีเพียงธาตุเดียวคือ Zn ปริมาณ Zn ที่สูญเสียไปเนื่องมาจากการเกิดออกซิเดชันจะอยู่ที่ประมาณ 0.5 % Zn ปริมาณ Zn ที่สูญเพลิงไปนี้ควรจะถูกผสมเติมชดเชยก่อนการกำจัดออกซิเจน การกำจัดออกซิเจนจะกระทำโดยใช้ 0.02 % P ที่ได้จากโลหะผสม Cu-15%P ในทางปฏิบัติการคัดเลือกเศษโลหะเป็นสิ่งสำคัญมากเพื่อป้องกันวัสดุแปลกปลอมซึ่งเป็นอันตรายและมีผลต่อสมบัติของเนื้อโลหะ และควรแยกเบ้าหลอมต่างหากไม่ควรใช้เบ้าหลอมปะปนกับการหลอมโลหะกลุ่มอื่น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณ Al Si และ Fe มีปริมาณปนเปื้อนมากพอแล้วจะทำให้เกิดความยุ่งยากในการกำจัดหรือลดปริมาณของธาตุผสมเติมเหล่านี้ลง

ในกรณีที่มีปริมาณตะกั่วผสมปนอยู่ในน้ำโลหะมากกว่า 10% ในทางปฏิบัติควรเพิ่มระดับอุณหภูมิของน้ำโลหะให้สูงมากกว่า 1,200°C เพื่อให้ตะกั่วทั้งหมดละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำโลหะหลัก โดยไม่มีตะกั่วส่วนใดส่วนหนึ่งเหลือค้างในสภาวะที่เป็นน้ำโลหะชนิดที่สองแยกตัวเป็นชั้น ๆนอนอยู่ก้นเบ้าหลอม

การควบคุมส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมทองแดงกลุ่ม 3 โลหะผสมกลุ่มนี้เป็นโลหะผสมที่เรียกว่าบรอนซ์ หรือสำริด ที่มีอะลูมิเนียมบรอนซ์ ซิลิคอนบรอนซ์ เบอร์ริเลียมบรอนซ์ และนิกเกิลบรอนซ์ เป็นหลัก การควบคุมส่วนผสมของโลหะกลุ่มนี้ทำได้ค่อนข้างยากมากเนื่องจากโลหะแต่ละชนิดมีความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง การที่จะทำให้เนื้อโลหะมีความสม่ำเสมอเข้ากันได้ดีนั้นจะทำได้โดยการเลือกใช้แท่งโลหะ ที่มีการปรับส่วนผสมทางเคมีตามที่ต้องการมาแล้วเท่านั้น หรือโดยการใช้ Master alloy ในสัดส่วนตามที่ต้องการ นำโลหะมาทำการหลอม การคัดเลือกเศษโลหะที่จะนำมาหลอมมีความสำคัญมากเพื่อป้องกันสิ่งเจือปนแปลกปลอม ทั้งนี้เนื่องจากการที่มีธาตุผสมเติมแปลกปลอมปนเปื้อนไปกับเศษโลหะที่นำมา

หลอมแม้เพียงเล็กน้อย จะเป็นสาเหตุทำให้เนื้อโลหะหลังการแข็งตัวแล้วมีจุดแข็งเป็นจุด ๆ (Hard spot) ที่เกิดจากองค์ประกอบของโครงสร้างจุลภาคที่ไม่ต้องการในเนื้อโลหะ

การควบคุมส่วนผสมทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมผสม

การควบคุมส่วนผสมทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมผสมจะมีปัญหาหลักเพียงปัญหาที่เกิดจากไฮโดรเจนซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกจากน้ำโลหะก่อนการเทลงแบบหล่อหรือก่อนการพ่นด้วยเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์ การที่มีเหล็กปนเปื้อนในโลหะอะลูมิเนียมชนิด Al-7%Si alloy ซึ่งเป็นโลหะผสมที่มีความแข็งสูงมากเป็นสิ่งที่ต้องพึงระมัดระวัง เนื่องจากเหล็กจะทำให้เกิดสารประกอบ Al_3Fe ซึ่งเป็นสารประกอบโลหะที่แข็งเปราะและทำให้ความแข็งลดลง การหลอมโลหะอะลูมิเนียมผสมควรคัดเลือกแท่งโลหะ จากแหล่งที่ไว้ใจได้ แม้ในบางครั้งจำเป็นจะต้องทำการปรับส่วนผสมทางเคมีบ้างก็ตาม ในกรณีที่ต้องการผสมเติม Cu หรือ Si การหลอมจะต้องมั่นใจได้ว่าธาตุผสมเติมทั้งสองชนิดนี้ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำโลหะอย่างทั่วถึง ส่วนการผสมเติมธาตุอื่น ๆควรเลือกใช้โลหะผสมเติมในรูปของ Master alloy

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Dunkley (1990) ได้ศึกษาตัวแปรควบคุมที่มีผลต่อ d_{50} (ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้) พบว่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของมวลโลหะหลอม ต่อ มวลของแก๊ส มีความสำคัญกล่าวคือ d_{50} จะลดลงเมื่ออัตราส่วนนี้ลดลง ตัวอย่างเช่น ปริมาณการใช้แก๊สจำเพาะ (ปริมาตรของแก๊สที่ใช้ต่อน้ำหนักของวัสดุผงที่ผลิต)ที่เพิ่มขึ้น จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ทำให้ d_{50} (หรือ d_{av}) มีค่าลดลงตามสมการ

$$d_{av} = KF^{-1/2} \qquad \text{..................(2.1)}$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่

F คือ ปริมาณการใช้แก๊สจำเพาะ (m^3/ kg)

การกระจายตัวของอนุภาคที่ได้มักเป็นความสัมพันธ์แบบล็อกการิซึม ในการวิเคราะห์เชิงมิติและการวัดขนาดของผงอนุภาคที่ผลิต ทำให้ได้ความสัมพันธ์ ที่จะทำนายค่า d_{50} ได้ ตัวอย่างหนึ่งที่เสนอโดย Lubanska (1970) ดังนี้

$$d_{av} = KD\left[\frac{\nu_m}{\nu_g w}\left(1+\frac{M}{A}\right)\right]^{1/2} \qquad ....(2.2)$$

เมื่อ d_{av} คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (μ m)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำโลหะหลอม (μ m)

ν_g คือ ความหนืดของแก๊ส (N.s / m^2)

ν_m คือ ความหนืดของโลหะหลอม (N.s / m^2)

W คือ Weber number ของ อะตอมไมซิ่งแก๊ส

M / A คือ อัตราการไหลของโลหะหลอม ต่อ แก๊ส (แต่ละค่าวัดในหน่วย kg / min)

K คือ ค่าคงที่

ซึ่งเป็นสมการที่สอดคล้องสำหรับ อะลูมิเนียม ทองแดง เหล็ก เหล็กกล้า ดีบุก ดีบุกผสม และขี้ผึ้ง

Coombs et al (1990) ได้ทำการศึกษาถึงตัวแปรควบคุมที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยของผงโลหะในอีกลักษณะหนึ่งโดยได้พัฒนามาจากสูตรที่สอง ซึ่งเป็นเรื่องที่ยากในการหาค่าความเร็วของแก๊สตรงตำแหน่งที่พุ่งกระแทกโลหะหลอมโดยได้ดัดแปลงวิธีการหาค่า d_{50} ดังนี้

$$d_{av} = K_1 \frac{D^{1/2}\left(1+M/A\right)^{1/2}}{\left(P+1\right)} \qquad ....(2.3)$$

เมื่อ d_{av} คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะ (μ m)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจ่ายโลหะหลอม (mm)

M คือ อัตราการไหลของโลหะหลอม (kg / min)

A คือ อัตราการไหลของแก๊สหรืออากาศ (kg / min)

P คือ แรงดันของแก๊ส (bar)

K_1 คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะทั้งของแก๊สและโลหะ

Tornberg (1992) ได้ศึกษาในกรณีที่คำนึงถึงแรง และงานจากการกระแทกในอะตอมไมซิ่งด้วยแก๊สเฉื่อย ได้สรุปความสัมพันธ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคดังนี้

$$d_{av} = \sqrt{\frac{A.\sigma}{\rho_m V_g (1 - B\eta D) \frac{M_g}{M_m}}} \qquad \text{..................(2.4)}$$

เมื่อ d_{av} คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะ (μ m)

σ คือ ความตึงผิวของโลหะหลอม (N / m)

ρ_m คือ ความหนาแน่นของโลหะหลอม (kg / m^3)

η คือ ความหนืดในการไหลของโลหะหลอม (N.s / m^2)

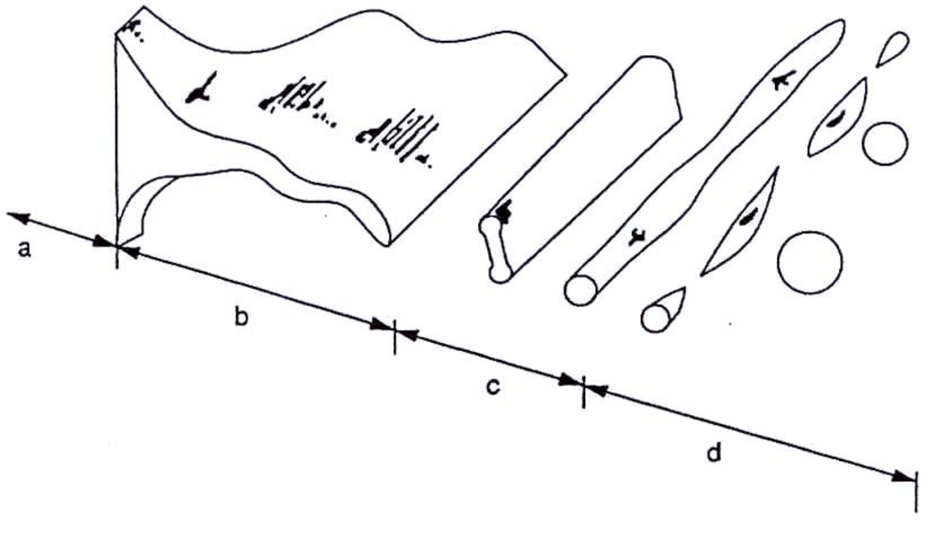
ν_g คือ ความเร็วของแก๊สที่พุ่งจากหัวฉีด (m / s)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลำโลหะหลอม (m)

A และ B คือ ค่าคงที่เฉพาะของอะตอมไมเซอร์

M_g และ M_m คือ อัตราการไหลของแก๊ส และโลหะหลอมตามลำดับ (m^3 / s)

Bradley (1973) ได้เสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์ในการทำนายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคโดยได้ใช้กลไกตามรูปที่ 2.7 มาคำนวณค่า Wave number (k_{max}) ในขั้นตอนที่หนึ่ง สำหรับขั้นตอนที่สอง เขาได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นดังนี้



รูปที่ 2.7 ลักษณะของขั้นตอนการแตกกระจายของแผ่นโลหะหลอม

(a) ช่วงเริ่มต้นขณะที่โลหะหลอมยังเป็นแผ่นที่สมบูรณ์

(b) แผ่นโลหะหลอมเกิดการขยายกว้าง และมีลักษณะเป็นคลื่น

(c) โลหะหลอมเริ่มขาดเป็นแนวตามรอนคลื่น และหดตัวเป็นลำที่เล็กลง

(d) ลำโลหะหลอมในขั้นตอน (c) แตกกระจายเป็นอนุภาคที่ละเอียด

(Bradley, 1973)

$$d = 11.86\,\varepsilon / k_{max} \qquad \text{..................(2.5)}$$

เมื่อ d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำนาย (μ m)

ε คือ พารามิเตอร์ที่หามาจากการทำอะตอมไมเซชันด้วยอากาศ หรืออาจหาจากโมเดล

Nichiporenko and Naida (1968) ได้ศึกษาถึงสภาวะการเกิดรูปร่างของอนุภาคโลหะหลอมในระหว่างกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง พบว่าอนุภาคผงโลหะจะมีรูปร่างเป็นทรงกลมได้เมื่ออนุภาคโลหะหลอมเกิดกระบวนการแข็งตัวภายในเวลาที่สั้นมาก และในทางกลับกันหากว่าอนุภาคโลหะหลอมเกิดกระบวนการแข็งตัวในเวลาที่ยาวขึ้นก็จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ซึ่งเขาได้ให้ความสัมพันธ์ของเวลาในการฟอร์มรูปร่างเป็นทรงกลม (τ_{sph}) และเวลาในการแข็งตัวของอนุภาคโลหะหลอมจากระดับซูเปอร์ฮีท (τ_{sol}) ดังนี้

$$\tau_{sph} = \frac{3\pi^2\mu}{4V\sigma}(r_1^4 - r_2^4) \qquad \text{..................(2.6)}$$

เมื่อ r_1 คือ ขนาดรัศมีของอนุภาคหลังการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นทรงกลม (m)

r_2 คือ ขนาดรัศมีของอนุภาคก่อนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นทรงกลม (m) ($r_1 / r_2 \approx 10$)

μ คือ ค่าความหนืดของโลหะหลอม (N.s / m^2)

σ คือ ค่าความตึงผิวของโลหะหลอม (N / m)

V คือ ปริมาตรของอนุภาค (m^3)

$$\tau_{sol} = \frac{d\rho_m}{\sigma h_c}(C_p)_m \ln\frac{T_i - T_g}{T_m - T_g} + \frac{\Delta H_m}{T_m - T_g} \quad \text{..................(2.7)}$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (μm)

h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (J / s.mol.$^\circ$C^2)

$(C_p)_m$ คือ ค่าความจุความร้อนของโลหะ (J mol^{-1} $^\circ$C^{-1})

T_i คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของอนุภาค ($^\circ$C)

T_g คือ อุณหภูมิของแก๊ส ($^\circ$C)

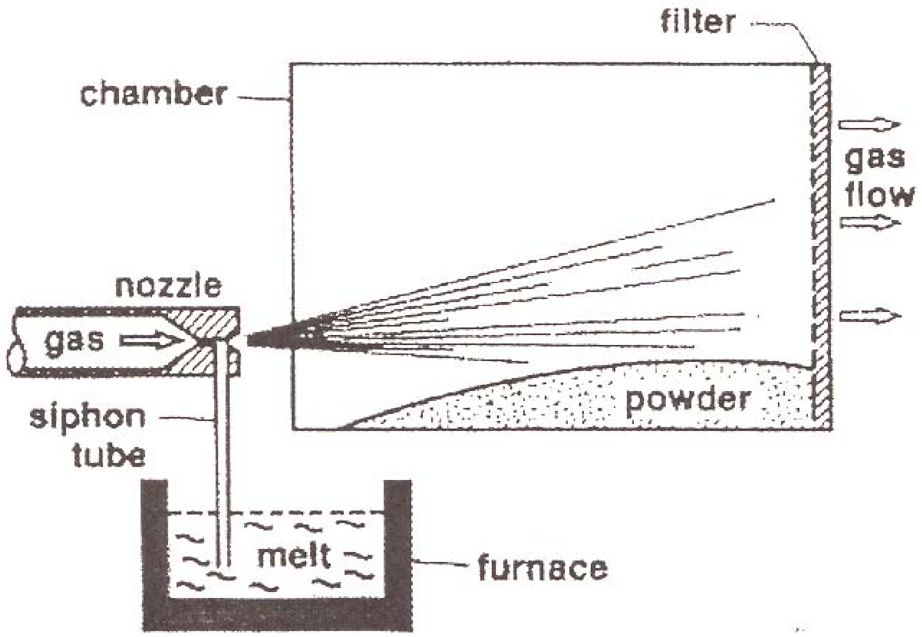
T_m คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะ ($^\circ$C)

และ ΔH_m คือ ค่าความร้อนแฝงในการหลอมของโลหะ (kJ / kg)

การผลิตผงโลหะด้วยวิธีแก๊สอะตอมไมเซชันโดยทั่วไปจะมีการออกแบบห้องพ่นโลหะเหลว (Atomizing chamber) ในสองลักษณะ คือ แบบแนวตั้ง และแบบแนวนอน ซึ่งลักษณะการวางในแต่ละแบบจะมีความเหมาะสมในการผลิตโลหะแต่ละประเภท ดังนี้

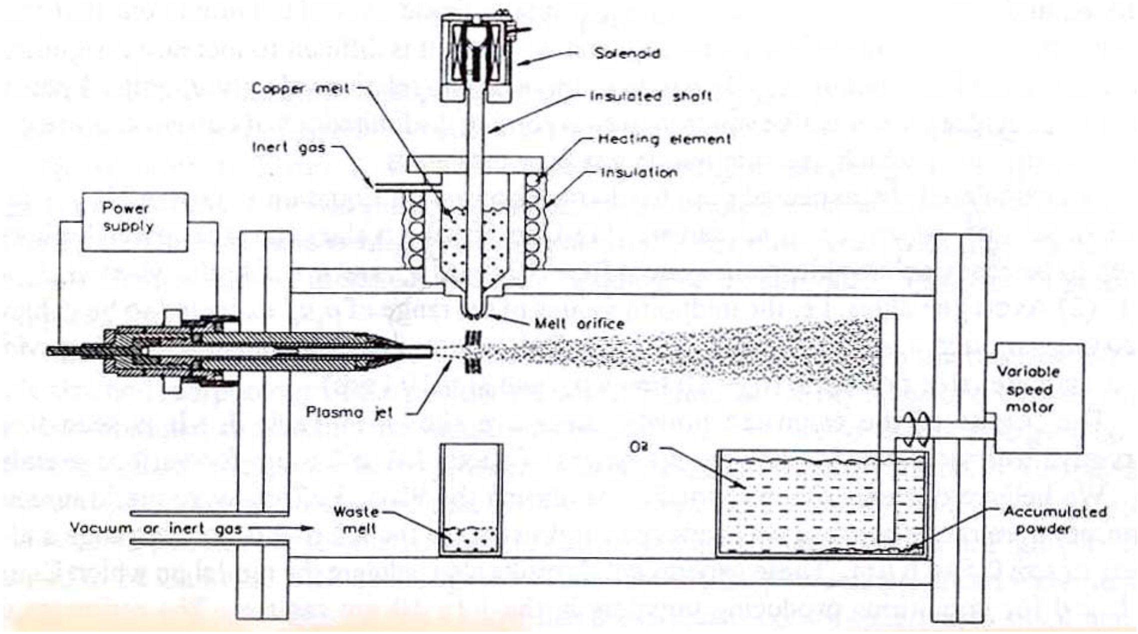
- ห้องพ่นโลหะเหลวแบบแนวนอนจะใช้กับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเป็นส่วนใหญ่ ลักษณะการจ่ายโลหะเหลวไปยังหัวพ่นแก๊สจะสามารถกระทำได้ 2 ลักษณะ คือ

ลักษณะที่ 1 โดยอาศัยหลักการของกาลักน้ำ (Siphon) ดังรูปที่ 2.8 โลหะหลอมจะถูกดึงขึ้นจากเตาหลอมซึ่งอยู่ด้านล่างขึ้นมาตามท่อในแนวดิ่งซึ่งเกิดจากการไหลผ่านของแก๊สความเร็วสูงไปสู่บริเวณที่มีการขยายตัวของแก๊ส แก๊สความเร็วสูงจะช่วยในการทำให้โลหะเหลวเกิดการแตกตัวเป็นหยดหรือละอองที่ละเอียด ผงโลหะที่มีการถ่ายเทความร้อนไปกับแก๊สจะเกิดการแข็งตัวเป็นเม็ดผงโลหะ ซึ่งวิธีการนี้ไม่เหมาะกับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง และควรเป็นโลหะที่มีความหนาแน่นต่ำ เช่น อะลูมิเนียม (German, 1994)



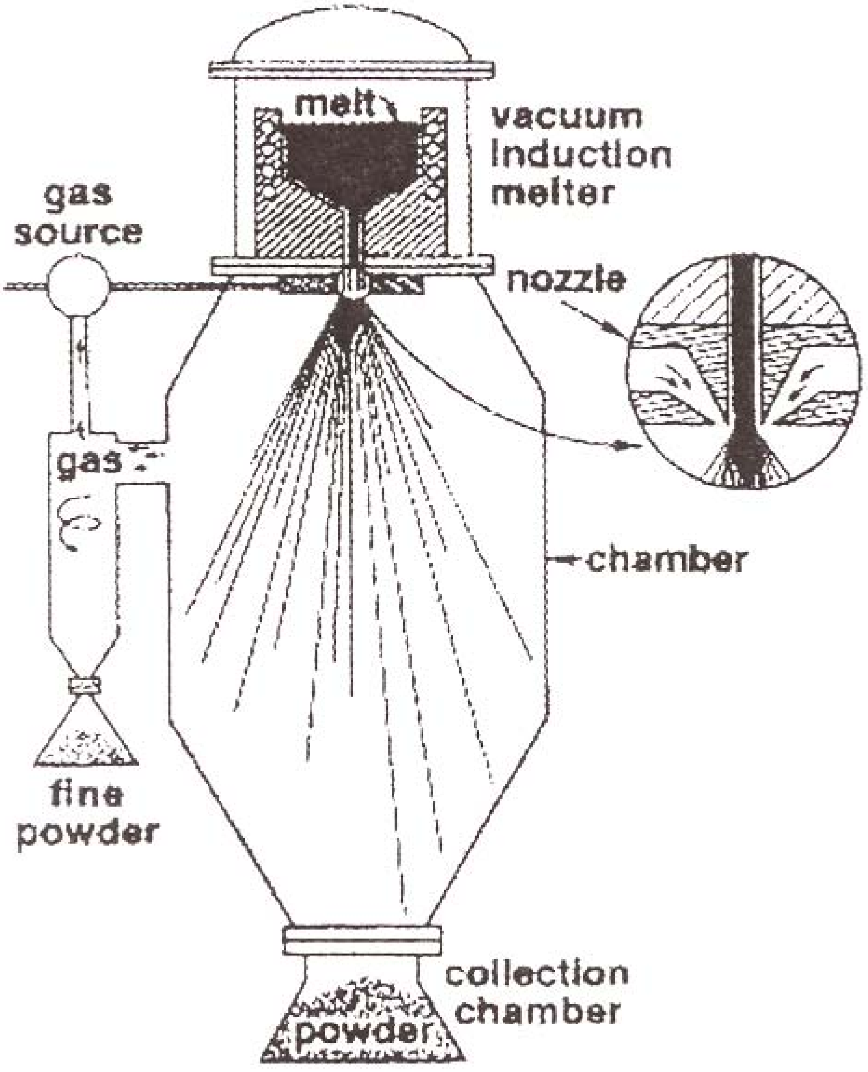
รูปที่ 2.8 เครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอน เหมาะสำหรับการผลิตผงโลหะจุดหลอมเหลวต่ำดึงโลหะเหลวขึ้นจากด้านล่าง (German, 1994)

ลักษณะที่ 2 โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity) ดังรูปที่ 2.9 โลหะเหลวจะถูกปล่อยจากเตาหลอมหรือเบ้าจ่ายโลหะเหลว (Tundish) ผ่านท่อลงด้านล่างโดยมีหัวพ่นแก๊สแรงดันสูงพ่นแก๊สกระแทกลำโลหะเหลวในแนวราบ แก๊สความเร็วสูง (1-10 km/s) จะช่วยในการทำให้โลหะเหลวเกิดการแตกตัวเป็นหยดหรือละอองที่ละเอียด วิธีการนี้จัดเป็นเทคนิคการผลิตผงโลหะที่ค่อนข้างใหม่ (Khershed, 2000)



รูปที่ 2.9 เครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวนอนชนิดปล่อยโลหะเหลวลงจากด้านบน (Khershed, 2000)

- ห้องพ่นโลหะเหลวแบบแนวตั้งเหมาะสำหรับการผลิตผงโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง ถังเก็บควรมีการออกแบบให้อยู่ในระบบปิดภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย ซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชั่นของเม็ดโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ระบบนี้ต้องอาศัยไซโคลนในการดูดแก๊สทิ้ง ในขณะเดียวกันเม็ดผงโลหะที่มีขนาดเล็กมากจะถูกเก็บไว้ด้านล่างของไซโคลน ขนาดของห้องพ่น (Chamber) ต้องมีขนาดที่ใหญ่เพียงพอที่จะทำให้ละอองโลหะเหลวแข็งตัวก่อนที่จะพุ่งชนผนังหรือตกลงถึงพื้นด้านล่าง



รูปที่ 2.10 เครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์แนวตั้ง (German, 1994)

จากลักษณะการจัดวางห้องพ่นโลหะเหลวในลักษณะต่าง ๆ พอจะแยกข้อดี ข้อเสียได้ดังแสดงในตารางที่ 2..2

ตารางที่ 2.2 ข้อดี ข้อเสียของลักษณะการจัดวางห้องพ่นโลหะเหลว

ลักษณะการวาง	ข้อดี	ข้อเสีย
- แนวตั้ง	1. เหมาะกับการผลิตผงโลหะหลายชนิดทั้งที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและสูง 2. สามารถปรับปรุงและพัฒนาลักษณะของหัวพ่นแก๊ส (Atomizer nozzle)ได้หลากหลายรูปแบบ 3. การจัดเก็บและลำเลียงผลผลิตออกจากเครื่องกระทำได้สะดวก	1. ค่าลงทุนสูงมาก 2. ใช้พื้นที่ในการปฏิบัติงานมาก 3. การปฏิบัติงานมีความซับซ้อนเนื่องจากอุปกรณ์และส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจัดวางในแนวสูง
- แนวนอน	1. ค่าลงทุนต่ำกว่า 2. ประหยัดพื้นที่ในการปฏิบัติงาน 3. การปฏิบัติงานค่อนข้างสะดวกเนื่องจากตัวเครื่องและอุปกรณ์ต่าง ๆจัดวางในแนวราบ	1. มีข้อจำกัดต่อชนิดของโลหะที่จะผลิต(ไม่เหมาะสำหรับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง) 2. การจัดเก็บและลำเลียงผลผลิตออกจากห้องพ่นไม่สะดวก