



การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมบรรยากาศและคัดขนาดผงโลหะสำหรับ
เครื่องอะตอมไมเซอร์แบบใช้หลักการหมุนเหวี่ยงเพื่อใช้ในการผลิต
ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดละเอียด
และมีออกซิเจนเจือปนในปริมาณต่ำ

Design and Development of Atmospheric Control and Powder
Classification System for Centrifugal Atomizer for Production
of Lead-Free Solder Powder with Fine Spherical Shape
and Low Oxygen Content

นิพนธ์ เต็มหมัด
Nipon Denmud

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Materials Engineering
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมบรรยากาศและคัดขนาดผงโลหะสำหรับ
เครื่องอะตอมไมเซอร์แบบใช้หลักการหมุนเหวี่ยงเพื่อใช้ในการผลิต
ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดละเอียด
และมีออกซิเจนเจือปนในปริมาณต่ำ

Design and Development of Atmospheric Control and Powder
Classification System for Centrifugal Atomizer for Production
of Lead-Free Solder Powder with Fine Spherical Shape
and Low Oxygen Content

นิพนธ์ เต็มหมัด

Nipon Denmud

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Materials Engineering
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมบรรยากาศและคัดขนาดผงโลหะสำหรับเครื่องอะตอมไมเซอร์แบบใช้หลักการหมุนเหวี่ยงเพื่อใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดละเอียดและมีออกซิเจนเจือปนในปริมาณต่ำ
ผู้เขียน	นายนิพนธ์ เต็มหมัด
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (ดร.สมใจ จันทร์อุดม)ประธานกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ จันทร์มณี)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมกรรมการ (ดร.ไพโรจน์ สังข์ไพฑูรย์)
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ปลุกผล)กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)
กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ปลุกผล)
กรรมการ (ดร.สมใจ จันทร์อุดม)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
 สำหรับการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้างู่งสูง)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ดร.สมใจ จันทร์อุดม)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายนิพนธ์ เต็มหมัด)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายนิพนธ์ เต็มหมัด)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมบรรยากาศและคัดขนาดผงโลหะสำหรับเครื่องอะตอมไมเซอร์แบบใช้หลักการหมุนเหวี่ยงเพื่อใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดละเอียดและมีออกซิเจนเจือปนในปริมาณต่ำ
ผู้เขียน	นายนิพนธ์ เต็มหมัด
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองตอน ตอนที่ 1 เป็นการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมบรรยากาศที่ใช้กับเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีการอะตอมไมเซอร์แบบอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยง เพื่อผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 ให้มีลักษณะเป็นเม็ดกลม มีปริมาณออกซิเจนเจือปนต่ำ และตอนที่ 2 เป็นการออกแบบและพัฒนาระบบการคัดขนาดผงโลหะ SAC305 ที่ผลิตได้จากการวิจัยในตอนแรก การวิจัยในตอนที่ 1 ได้ออกแบบและสร้างระบบดูดอากาศออกจากถังของเครื่องอะตอมไมเซอร์และแทนที่ด้วยก๊าซไนโตรเจน เพื่อลดปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์จนสามารถควบคุมให้มีปริมาณ 2, 0.2, 0.05 และ 0.01 vol.% ก่อนทำการผลิตผงโลหะ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 ถูกหลอมและทำให้แตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะขนาดเล็ก เย็นตัวกลายเป็นผงโลหะภายในถังอะตอมไมเซอร์ภายใต้บรรยากาศที่ถูกควบคุมปริมาณออกซิเจน ผงโลหะ SAC305 ที่ผลิตได้ถูกนำไปตรวจวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย การกระจายตัวของอนุภาค ลักษณะรูปร่างของผงโลหะ ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลม วิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนที่เจือปนในผงโลหะ และปริมาณผงโลหะที่ผลิตได้ (Production yield) สำหรับการวิจัยในตอนที่ 2 ได้ออกแบบและสร้างเครื่องคัดขนาดแบบเทอร์โบลัม เพื่อใช้คัดขนาดผงโลหะ SAC305 ซึ่งผลิตได้จากการวิจัยในตอนที่ 1 ให้ได้ผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 25-45 ไมครอน หรือที่เรียกว่า ผงโลหะประเภท 3 ตามมาตรฐานผงโลหะที่ใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยในส่วนที่ 2 นี้ ได้ศึกษาตัวแปรปฏิบัติการของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลัม ได้แก่ ความเร็วรอบของโรเตอร์ อัตราการป้อนผงโลหะ และความเร็วลม ที่มีผลกระทบต่อขนาดตัด (Cut size, d_{50}) และความคมของการคัดขนาด (Sharpness of classification, K) ในการวิจัยได้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k วิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 16 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรปฏิบัติการที่มีผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อค่า d_{50} และค่า K นอกจากนี้แล้วยังได้ศึกษาทดลองเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้จากการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

ผลการศึกษาในตอนที่ 1 พบว่า การลดปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ส่งผลกระทบต่อ ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ การกระจายตัวของผงโลหะ ลักษณะรูปร่างของผงโลหะ ปริมาณ

ออกซิเจนเจือปนในผงโลหะ ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลม และปริมาณผงโลหะที่ผลิตได้ กล่าวคือ เมื่อผลิตผงโลหะภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลง ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของโลหะที่ผลิตได้มีแนวโน้มเล็กลง การกระจายตัวของผงโลหะแคบลง รูปทรงของผงโลหะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมขึ้น ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง (1) ปริมาณออกซิเจนเจือปนผงโลหะมีปริมาณลดลง และปริมาณผงโลหะที่ผลิตได้สูงขึ้น เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทดลองผลิตผงโลหะ SAC305 ให้มีคุณภาพที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้ คือ จะต้องควบคุมปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ให้อยู่ในระดับ 0.01 vol.% ก่อนการอะตอมไมเซอร์ ผงโลหะที่ผลิตได้มีออกซิเจนเจือปนที่ผิวน้อยกว่า 100 ppm ผงโลหะมีลักษณะเป็นเม็ดกลม และมีปริมาณผงโลหะที่ผลิตได้ประมาณ 53 เปอร์เซ็นต์

ผลการศึกษาในตอนที่ 2 การวิเคราะห์เชิงสถิติสำหรับค่าขนาดตัด พบว่า ความเร็วรอบของโรเตอร์และความเร็วลมเป็นตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อค่าขนาดตัด แต่อัตราการป้อนผงโลหะเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าขนาดตัดน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลกระทบของสองตัวแปรแรก การเพิ่มความเร็วนรอบของโรเตอร์และการลดความเร็วลมทำให้ค่าขนาดตัดลดลง แต่การเพิ่มอัตราการป้อนผงโลหะทำให้ค่าขนาดตัดลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วม (Interaction effects) พบว่า ความเร็วรอบของโรเตอร์และความเร็วลมมีผลกระทบต่อค่าขนาดตัดอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของค่าความคมของการตัดขนาด (K) พบว่า อัตราการป้อนผงโลหะเพียงตัวแปรเดียวเท่านั้นที่มีผลกระทบต่อค่า K อย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มอัตราการป้อนผงโลหะทำให้ค่า K ลดลง เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วม พบว่า อัตราการป้อนผงโลหะและความเร็วลม รวมทั้งความเร็วนรอบของโรเตอร์และอัตราการป้อนผงโลหะ มีผลกระทบต่อค่า K อย่างมีนัยสำคัญ เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการตัดขนาดผงโลหะ SAC305 ให้ได้ผงโลหะที่มีขนาด d_{50} เล็กสุด และมีค่า K สูงสุด ขนาดของผงโลหะอยู่ในช่วง 25-45 ไมครอน (Type 3) เมื่อใช้ความเร็วรอบของโรเตอร์ 406 รอบต่อนาที อัตราการป้อนผงโลหะ 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ค่า d_{50} ที่ได้ 27.8 ไมครอน และมีค่า K 0.66 ผลการทดลองเพิ่มเติมจากทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^k พบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า d_{50} สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ แต่การเปลี่ยนแปลงของค่า K ต่างจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงสถิติ

Thesis Title Design and Development of Atmospheric Control and Powder Classification System for Centrifugal Atomizer for Production of Lead-Free Solder Powder with Fine Spherical Shape and Low Oxygen Content

Author Mr. Nipon Denmud

Major Program Materials Engineering

Academic Year 2018

ABSTRACT

This research work consisted of two main parts, namely part 1, and part 2. The part 1 research was the design and fabrication of an atmospheric control system for using with the centrifugal atomizer for production of SAC305 lead-free solder powder containing fine particles, spherical shape and low oxygen content in the powder. The part 2 research was the design and fabrication of a powder classification system used for particle size separation of the atomized SAC305 powder produced from part 1. In the part 1 research, a vacuum and nitrogen gas purging system was designed and built for reducing the oxygen containing in the atomizer chamber to the levels of 2, 0.2, 0.05, and 0.01 vol.% before the atomization was started. The SAC305 alloy was melted and atomized in the atomizer chamber under the controlled oxygen atmosphere. After atomization, the SAC305 powder was sampled for analysis, including median particle size, particle size distribution, powder shape, circular shape factor, oxygen content in the powder, and production yield. In the part 2 research, a turbo air classifier was designed and manufactured for particle size separation of the SAC305 powder produced from part 1 in order to obtain the powder having average size range of 25-45 μm (the so called type 3 powder) and to meet the standard of solder powder used in the electronics packaging industry. In the part 2 research, the effects of operating parameters of turbo air classifier, namely rotor speed, feed rate, and air inlet velocity on the cut size (d_{50}) and the sharpness of classification (K) were studied. The 2^k factorial design was used in the study. The experimental results were statistically analyzed by using the MINITAB 16 software to identify the significant operating parameters affecting the d_{50} and K. Additionally, some experiments extended from the factorial design were performed to verify the results.

The results from part 1 showed that with decreasing oxygen content in the atomizer chamber, it had significant impact on the median particle size, particle size distribution, powder shape, circular shape factor, oxygen content in the powder, and production yield. With decreasing the oxygen content in the atomizer chamber the median particle size decreased, the particle size distribution narrowed, the powder shape become rounder, the circular shape factor reached to about one (1), the oxygen content in the powder decreased and the production yield increased. The optimal operating condition for producing SAC305 powder used for the electronics industry was achieved, when the oxygen content in the atomizer chamber was reduced to 0.01 vol.%. The SAC305 powder with oxygen content less than 100 ppm, nearly spherical shape particles and about 53% production yield was obtained.

The results from part 2, the statistical analysis of the cut size (d_{50}) revealed that the rotor speed and air inlet velocity had strongly significant effects on the cut size, but the feed rate had weaker effect with respect to the rotor speed and air inlet velocity. The cut size decreased with increasing rotor speed and it increased with increasing air inlet velocity. However, with increasing the feed rate, the cut size slightly decreased. Moreover, the interaction effects between rotor speed and air inlet velocity also significantly affected the cut size. The statistical analysis results of the sharpness of classification (K) showed that only the feed rate had significant effect on it. With increasing feed rate, the sharpness of classification was decreased. In addition, the interaction effects between feed rate and air inlet velocity, and rotor speed and feed rate significantly affected on K as well. The optimal operating condition for classification of SAC305 powder with size range 25-40 μm was obtained, when the turbo air classifier was operated at the rotor speed 406 r/min, the feed rate 4 kg/h and the air inlet velocity 5 m/s. The cut size and the sharpness of classification were about 27.8 μm and 0.66, respectively. The results from the additional experiments showed that the trend of cut size was in good agreement with those from the statistical analysis. However, the trend of sharpness of classification K was not consistent with the statistical results.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณปัญญา ต่อเจริญ บริษัทไทยแลนด์สเมลติงแอนด์รีไฟนิงจำกัด (THAISARCO) ที่ให้ความอนุเคราะห์การตรวจวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนในผงโลหะและขอขอบคุณ คุณธเนศ รัตน์ชัยกุล ที่เป็นธุระจัดการการรับส่งตัวอย่างและแจ้งผลวิเคราะห์กลับมายังผู้วิจัย

ขอขอบคุณ คุณอภิรัตน์ โปมาศ ที่ให้คำแนะนำเป็นอย่างดีมาโดยตลอด จนกระทั่งผู้วิจัยสามารถลดปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์จนถึงระดับ 100 ppm

ขอขอบคุณ ดร.ไพโรจน์ สังขพิชญ์ ดร.สราวุธ โภณสร้าง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ จันทร์มณี สำหรับคำแนะนำที่มีประโยชน์สำหรับการปรับปรุงและแก้ไขบางปัญหาที่พบระหว่างการวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่สำหรับการทำวิจัย รวมทั้งวิศวกรของภาควิชา คุณอนุศิษฐ์ ยอดจันทร์ สำหรับคำแนะนำต่าง ๆ การสนับสนุนด้านแรงงานและการสนับสนุนด้านเครื่องมือจนบรรลุเป้าหมาย

ขอขอบคุณ ภรรยา คุณไชเพีย เมฆารัฐ และลูก ๆ ด.ช.บุญญามีน และ ด.ญ.บิลกิส เต็มหมัด ที่คอยเป็นกำลังใจ ในยามที่ต้องการพลังสำหรับการเดินทางเพื่อสู้กับอุปสรรค

ขอบคุณพระเจ้าที่เป็นเจ้า ที่ประทานบททดสอบต่าง ๆ ที่เข้ามาในชีวิต เพราะพระองค์ทรงตรัสว่า “แท้จริงหลังจากความยากลำบาก ย่อมมีความง่ายตาย”

สุดท้ายผู้เขียน ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ปลูกผล และ ดร.สมใจ จันทร์อุดม ที่ได้เสียสละร่างกาย แรงใจ ให้คำแนะนำ สนับสนุนในด้านต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา จนทำให้งานสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย

นายนิพนธ์ เต็มหมัด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
สารบัญตาราง	(14)
สารบัญรูป	(16)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 วัสดุผง	4
2.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว	4
2.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด ดีบุก-เงิน-ทองแดง	6
2.4 ประเภทของผงโลหะบัดกรีแบ่งตามช่วงขนาดอนุภาค ข้อกำหนดตามมาตรฐานและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด	8
2.5 การผลิตผงโลหะ	14
2.5.1 การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ	14
2.5.2 การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ	17
2.5.3 การอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง	18
2.5.4 ข้อจำกัดของการอะตอมไมเซชัน	23
2.6 การคัดขนาดผงโลหะ	25
2.7 เครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม	29
2.8 การหาสมรรถนะของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม	32
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
2.10 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง	43
3. การดำเนินงานวิจัย	50
3.1 กล่าวนำ	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 งานวิจัยตอนที่ 1 การออกแบบและสร้างระบบควบคุมบรรยากาศ ในถังอะตอมไมเซอร์ เพื่อผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305	50
3.3 การออกแบบ สร้างและติดตั้งระบบควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์	50
3.3.1 การติดตั้งระบบควบคุมบรรยากาศในถังอะตอมไมเซอร์	52
3.3.2 การปรับปรุงถังอะตอมไมเซอร์	53
3.3.3 การเก็บตัวอย่างก๊าซจากภายในถังอะตอมไมเซอร์ เพื่อตรวจวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจน	55
3.3.4 การติดตั้งระบบหัวจ่ายก๊าซไนโตรเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์	59
3.3.5 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมและวัดปริมาณก๊าซไนโตรเจน	61
3.4 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	64
3.4.1 วัสดุและอุปกรณ์	64
3.4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	64
3.5 วิธีการทดลอง	65
3.5.1 การเคลือบผิวหน้าของจานอะตอมไมเซอร์	65
3.5.2 ขั้นตอนการทดลองผลิตผงโลหะ	65
3.5.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะ	67
3.5.4 การเตรียมตัวอย่างการวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนที่เจือปนในผงโลหะ	68
3.5.5 การวิเคราะห์รูปทรงของผงโลหะ	68
3.6 งานวิจัยตอนที่ 2 การออกแบบและสร้างระบบคัดขนาด ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305	69
3.7 การออกแบบและสร้างไซโคลนลมเพื่อการทดลองเบื้องต้น	70
3.8 การออกแบบเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม	72
3.9 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ ที่ใช้ในการทดลองคัดขนาดโลหะผง	74
3.10 ขั้นตอนการทดลองคัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม	74
3.10.1 การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม	76
3.11 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล	77
3.12 การตรวจสอบและยืนยันผลการทดลอง	79

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	79
4.1 ผลการวิจัยตอนที่ 1 ผลการทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC 305 ภายใต้บรรยากาศควบคุม	81
4.1.1 ปรากฏการณ์การยกตัวของน้ำโลหะบนผิวงานอะตอมไมเซอร์	81
4.1.2 อิทธิพลของปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ ต่อการกระจายตัวของผงโลหะ	84
4.1.3 อิทธิพลของปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ ต่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะ	85
4.1.4 อิทธิพลของปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ต่อผลผลิตผงโลหะ	86
4.1.5 อิทธิพลของปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ ต่อปริมาณออกซิเจนที่เจือปนอยู่ในผงโลหะ	88
4.1.6 อิทธิพลของปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ ต่อรูปร่างของผงโลหะที่ผลิตได้	89
4.1.7 อิทธิพลของปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์ ต่อค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลม	91
4.2 วิจารณ์ผลการทดลองการผลิตผงโลหะบัดไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ภายใต้การควบคุมบรรยากาศ	92
4.2.1 ปรากฏการณ์การยกตัวของน้ำโลหะบนผิวหน้าของงานอะตอมไมเซอร์	92
4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์ กับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ	93
4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์กับการ กระจายตัวของผงโลหะ	94
4.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ กับผลผลิตผงโลหะ	95
4.2.5 ลักษณะรูปร่างของผงโลหะที่ผลิตได้	95
4.3 ผลการวิจัยตอนที่ 2 ผลการศึกษาการคัดขนาดผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ด้วยไซโคลนลมและผลการศึกษาการคัดขนาดผงโลหะบัดกรี ไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม	96
4.3.1 การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การคัดขนาดผงละเอียดโดยใช้ไซโคลนลม	97

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อขนาดตัด (d_{50}) โดยใช้เครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม	100
4.3.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองด้วยวิธีการทางสถิติ	100
4.3.2.2 การทดสอบการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ	102
4.3.2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรหลัก	102
4.3.2.4 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรร่วม	103
4.3.2.5 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรด้วยกราฟพาเรโต	104
4.3.2.6 แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับค่า d_{50}	105
4.3.3 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าความคมของการคัดขนาด (K) โดยใช้เครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม	106
4.3.3.1 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองด้วยวิธีการทางสถิติสำหรับค่า K	106
4.3.3.2 การทดสอบการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติสำหรับค่า K	108
4.3.3.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรหลักสำหรับค่า K	109
4.3.3.4 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรร่วมสำหรับค่า K	110
4.3.3.5 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรด้วยกราฟพาเรโตสำหรับค่า K	111
4.3.3.6 แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับค่า K	112
4.4 ผลการทดลองการคัดขนาดโดยใช้เครื่องคัดขนาดเทอร์โบลมเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	113
4.5 วิจารณ์ผลการทดลองการคัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม	119
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	121
5.1 สรุปผลการทดลอง	121
5.2 ข้อเสนอแนะ	122
บรรณานุกรม	124
ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	129
ภาคผนวก ข แบบชิ้นส่วนของเครื่องคัดขนาดแบบ Air cyclone และ Turbo air classifier	142
ภาคผนวก ค ประวัติผู้เขียนและผลงานที่ได้จากการวิจัย	154
ประวัติผู้เขียน	155

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วประเภทต่าง ๆ แบ่งตามช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว	6
2.2 ผงโลหะบัดกรีที่ถูกแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ตามขนาดอนุภาคผงโลหะ	8
2.3 การอะตอมไมเซชันแต่ละ แบ่งเป็น การอะตอมไมเซชันที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ การอะตอมไมเซชันที่กำลังวิจัยและพัฒนา และการอะตอมไมเซชันวิธีอื่น ๆ	9
2.4 ข้อกำหนดตามมาตรฐานของผงโลหะบัดกรีแต่ละประเภท ที่ยอมให้ปริมาณออกซิเจนเจือปนในผงโลหะได้	10
2.5 สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของธาตุต่าง ๆ ของโลหะบัดกรี ที่เป็นพลังงานอิสระมาตรฐานของการเกิดออกซิเดชัน	10
2.6 ความหนาของชั้นออกไซด์ ที่ระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้ายของโลหะบัดกรี เมื่อถูกออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว 140 องศาเซลเซียส	11
2.7 เปรียบเทียบการอะตอมไมเซชันประเภทต่าง ๆ พิจารณาจากการกระจายตัวของอนุภาค ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และรูปร่างของผงโลหะ	24
2.8 เปรียบเทียบการอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยงกับการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำและก๊าซ	25
2.9 เครื่องคัดขนาดประเภทต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์	26
2.10 การอะตอมไมเซชันแบบผสมเปรียบเทียบกับการอะตอมไมเซชันแบบใช้น้ำ แบบใช้ก๊าซ และแบบหมุนเหวี่ยง	39
2.11 ตัวแปรที่ใช้ในการผลิตผงทองแดง	44
2.12 ตัวแปรที่ใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีชนิด ตะกั่ว-ดีบุกและผงอะลูมิเนียม	46
2.13 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว	47
2.14 ตัวแปรที่ใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305	49
3.1 เงื่อนไขการทดลองภายใต้บรรยากาศควบคุมปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์	63
3.2 จำนวนครั้งของการสูบลูกอากาศออกและเวลาที่ใช้ในการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ในถัง อะตอมไมเซอร์จนถึงระดับปริมาณออกซิเจน 2 vol.%	63
3.3 ปริมาณก๊าซไนโตรเจนเฉลี่ยที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการปล่อยก๊าซไนโตรเจน เข้าไปเจือจางอากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ สำหรับการควบคุมปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ที่ระดับต่าง ๆ	64
3.4 ตัวแปรและค่าระดับของตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการคัดขนาดผงโลหะ ด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม	78
3.5 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^3 และค่าผลลัพธ์ d_{50} ที่ได้จากการทดลอง	78
3.6 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^3 และค่าผลลัพธ์ K ที่ได้จากการทดลอง	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.7 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกเลือกมาทำการคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม และค่าผลลัพธ์ d_{50} และ K ที่ได้จากการทดลอง	80
4.1 อิทธิพลของความดันลมเสริมที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การแยกผงละเอียด (%Emf)	98
4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า d_{50} จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^3 ด้วยโปรแกรม MINITAB 16	101
4.3 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคัดขนาดผงโลหะ ด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม ที่มีผลต่อค่า d_{50} จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^3 ด้วยโปรแกรม MINITAB 16	101
4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า K จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^3 ด้วยโปรแกรม MINITAB 16	107
4.5 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคัดขนาดผงโลหะ ด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม ที่มีผลต่อค่า K จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^3 ด้วยโปรแกรม MINITAB 16	108
4.6 เปรียบเทียบ ค่า d_{50} ค่า K ที่ได้มาจากการทดลอง กับ ค่า $d_{50-Eq. (4.2)}$ ค่า $K_{Eq. (4.4)}$ ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	114

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปริมาณออกไซด์ของโลหะบัดกรีชนิด 95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu (25-45 ไมครอน) และปริมาณออกไซด์ของโลหะบัดกรีชนิด 63Sn-37Pb อยู่ในช่วงขนาด 20-25 ไมครอน, 20-38 ไมครอน และ 45-75 ไมครอน	13
2.2 ลักษณะหัวฉีดของการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ (a) หัวฉีดแบบคู่ หรือ Twin-jet (b) หัวฉีดชนิดวงแหวน หรือ Annular-ring	15
2.3 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซแบบแนวนอน	16
2.4 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซแบบแนวตั้ง	16
2.5 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ	18
2.6 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีการอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยงสำหรับกระบวนการหมุนขึ้น	19
2.7 การฟอร์มตัวของน้ำโลหะ ที่เกิดขึ้นบริเวณขอบของชิ้นแอนโนด	19
2.8 กลไกการแตกตัวของน้ำโลหะที่เกิดการแตกตัวบนจานอะตอมไมเซชัน	20
2.9 บริเวณขอบเขตของกลไกการแตกตัวรูปแบบต่าง ๆ ของน้ำโลหะสำหรับการอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง	21
2.10 รูปแบบต่าง ๆ ของการอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง (a) จานทรงแบนหมุน (b) จานทรงถ้วยหมุน (c) วงล้อหมุน และ (d) ตะแกรงหมุน	23
2.11 แรงที่กระทำกับอนุภาคผงโลหะ ทำให้เกิดการคัดแยกเป็นผงหยาบและผงละเอียด	26
2.12 เครื่องคัดขนาดผงโลหะประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ลมในการคัดแยก	28
2.13 ส่วนประกอบเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม	29
2.14 โซนคัดแยกของผงโลหะ ที่อยู่ระหว่างใบพัดเหนียวกับใบพัดของโรเตอร์ มีลักษณะเป็นรูปร่างวงทรงกระบอก	31
2.15 อิทธิพลของของตัวแปรปฏิบัติการที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการคัดขนาดผงโลหะ	31
2.16 ผงป้อนที่ถูกคัดขนาดด้วยเครื่องเทอร์โบลม ถูกคัดแยกออกเป็นผงหยาบและผงละเอียด	32
2.17 ผลการตรวจวิเคราะห์การกระจายตัวผงโลหะ ผงป้อน ผงหยาบและผงละเอียด (a) การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตรสะสม และ (b) การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตร	33
2.18 กราฟ Tromp curve การหาค่า d_{50} และ K	35
2.19 การอะตอมไมเซชันแบบผสมระหว่างการใช้ก๊าซและแรงหนีศูนย์กลาง	39
2.20 เครื่องอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง บริเวณรอบถ้วยถูกออกแบบให้เป็นช่องขนาดเล็ก	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 เครื่องอะตอมไมเซอร์แบบอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยง ที่ได้ทำการปรับปรุงตามสิทธิบัตรของประเทศสหรัฐอเมริกา หมายเลข 5,917,113	45
2.22 เครื่องอะตอมไมเซอร์แบบใช้หลักการหมุนเหวี่ยงที่แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ตามสิทธิบัตรของประเทศจีน หมายเลข CN 202,804,188 U	47
2.23 เครื่องอะตอมไมเซอร์แบบต่อเนื่อง	49
3.1 ส่วนประกอบของเครื่องผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่ออกแบบและสร้างขึ้น สำหรับใช้ในงานวิจัย	51
3.2 เครื่องตรวจวัดปริมาณออกซิเจนที่อยู่ภายนอกถังอะตอมไมเซอร์	52
3.3 เครื่องอะตอมไมเซอร์ที่ติดตั้งระบบควบคุมบรรยากาศแล้ว	53
3.4 โครงสร้างของถังอะตอมไมเซอร์ที่ทำการปรับปรุงแล้ว	53
3.5 (ซ้าย) ก่อนเสริมแรงฝาถังอะตอมไมเซอร์เมื่อสูบลูกอากาศออกหัวฉีดน้ำโลหะเคลื่อนที่ต่ำลงจนเกือบสัมผัสผิวน้ำอะตอมไมเซอร์ (ขวา) เภจวัดความดันอากาศที่อยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์	55
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกซิเจนกับจำนวนครั้งการสูบลูกอากาศออกจากถังอะตอมไมเซอร์	56
3.7 ตำแหน่งทางเข้าของก๊าซไนโตรเจน ตำแหน่งที่ 1	57
3.8 ภาพฝาถังอะตอมไมเซอร์ ตำแหน่งที่ 1 ช่องปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ถังอะตอมไมเซอร์ ตำแหน่งที่ 2 ช่องเก็บตัวอย่างก๊าซจากภายในถังอะตอมไมเซอร์ และตำแหน่งที่ 3 ช่องทางที่ก๊าซไหลออกจากถังอะตอมไมเซอร์	57
3.9 ตำแหน่งที่ 2 จุดเก็บตัวอย่างก๊าซจากภายในถังอะตอมไมเซอร์	58
3.10 ตำแหน่งที่ 3 ช่องก๊าซไหลออกจากภายในถังอะตอมไมเซอร์	58
3.11 แบบหัวพ่นก๊าซไนโตรเจน	59
3.12 หัวพ่นก๊าซไนโตรเจน	60
3.13 ตำแหน่งที่ติดตั้งหัวพ่นก๊าซไนโตรเจน บริเวณไดมอเตอร์ที่อยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์	60
3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ กับจำนวนครั้งการสูบลูกอากาศออกและปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ในถังอะตอมไมเซอร์	61
3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์ กับเวลาที่ใช้ในการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในถังอะตอมไมเซอร์	61
3.16 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลและควบคุมปริมาณก๊าซไนโตรเจน	62
3.17 ผิวหน้างานอะตอมไมเซอร์ที่ถูกเคลือบด้วยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 เปรียบเทียบอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 กับดีบุก	67
3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา สำหรับการอุ่นจานอะตอมไมเซออร์ โดยใช้อุปกรณ์เป่าลมร้อน	67
3.20 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลม โดยใช้โปรแกรม Image J	69
3.21 โซโคลนลมที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อการศึกษาในเบื้องต้น	70
3.22 เครื่องคัดขนาดโซโคลนลมต้นแบบที่ปรับปรุงเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ได้	71
3.23 เครื่องคัดขนาดโซโคลนลมต้นแบบที่ติดตั้งระบบลมเสริม	72
3.24 ใบพัดแบบกรงกระรอก (Rotor cage) ของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม	73
3.25 ภาพของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม มองจากด้านบน (1) ตำแหน่งใบพัดเหนี่ยวนำ (Guide blades) (2) ตำแหน่งใบพัดแบบกรงกระรอก (Rotor cage) (3) บริเวณที่เกิดการคัดแยก (Annular region)	73
3.26 เครื่องคัดขนาดเทอร์โบลมที่ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันแล้ว	74
3.27 ระบบเครื่องคัดขนาดผงโลหะด้วยเทอร์โบลมที่ออกแบบและสร้างขึ้น	75
3.28 ผงโลหะที่เตรียมสำหรับส่งตรวจวิเคราะห์ขนาด (ซ้าย) ผงป้อน (กลาง) ผงหยาบ	76
3.29 กราฟ Tromp curve การหาค่า d_{50} และ K	77
4.1 ปฏิกิริยาการแยกตัวของน้ำโลหะ ช่วงเริ่มการอะตอมไมเซชัน ที่ความเร็วรอบ 50,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง	82
4.2 ปฏิกิริยาการแยกตัวของน้ำโลหะแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะขนาดเล็ก เมื่อเข้าสู่สถานะสมดุล ทดลองที่ความเร็วรอบ 50,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง	83
4.3 การเกิดขึ้นฟิล์มเกาะติดบนผิวจานอะตอมไมเซออร์ ภายหลังจากทดลอง ในวงกลมเล็กแสดงตำแหน่ง การยกตัวของน้ำโลหะ จากการทดลองที่ ความเร็วรอบ 50,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จานอะตอมไมเซออร์ชนิดจานแบนขนาด 40 มิลลิเมตร	83
4.4 กราฟการกระจายตัวของผงโลหะที่ผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนภายในถึง อะตอมไมเซออร์ 2, 0.2, 0.05, และ 0.01 vol.% (a) การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตร สละสม และ (b) การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตร	85
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะ กับปริมาณออกซิเจนภายในถึงอะตอมไมเซออร์	86
4.6 การอุดตันของผงโลหะขนาดละเอียดในตะแกรงร้อน	87
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตผงโลหะกับปริมาณออกซิเจนภายในถึงอะตอมไมเซออร์	88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนที่เจือปนอยู่ในผงโลหะที่ผลิตได้กับปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์	89
4.9 ภาพถ่ายผงโลหะจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แสดงผงโลหะผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อน ที่ช่วงขนาด -850+600, -600+75, -45+38, -38+25 และ -25 ไมครอน	90
4.10 ภาพถ่าย SEM ของผงโลหะที่มีขนาดในช่วง -45+25 ไมครอน ที่ผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ต่างกัน (a) 2 vol.%, (b) 0.2 vol.%, (c) 0.05 vol.% และ (d) 0.01 vol.%	91
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมกับปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์	92
4.12 ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ชนิด SAC305 ที่มีการคัดแยกโดยใช้ไซโคลนลม (a) ผงป้อน (b) ผงหยาบ และ (c) ผงละเอียด ที่สภาวะ อัตราการไหลของลม 4 m ³ /min อัตราการป้อนผงโลหะ 1.79 g/s ความยาวของท่อแยก 36.75 mm ความดันสำหรับป้อนผงโลหะ 4 kg/cm ²	99
4.13 การระบุตัวแปรที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ต่อค่า d ₅₀ ด้วยกราฟ Normal probability plot	102
4.14 กราฟแสดงผลกระทบของตัวแปรหลัก	103
4.15 กราฟแสดงผลกระทบของตัวแปรร่วมต่อค่า d ₅₀	104
4.16 การระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่า d ₅₀ ด้วยกราฟพาเรโต	106
4.17 การระบุตัวแปรที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า K ด้วยกราฟ Normal probability plot	109
4.18 กราฟแสดงผลกระทบของตัวแปรหลักสำหรับค่า K	110
4.19 กราฟแสดงผลกระทบของตัวแปรร่วมต่อค่า K	111
4.20 การระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่า K ด้วยกราฟพาเรโต	112
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด (d ₅₀) กับความเร็วรอบของโรเตอร์	115
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด (d ₅₀) กับความเร็วลม	115
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความคมของการคัดขนาด (K) กับความเร็วรอบของโรเตอร์	116
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความคมของการคัดขนาด (K) กับความเร็วลม	117

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตรสะสมของผงละเอียดและผงป้อนที่ถูกคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม ขนาดอนุภาคของผงป้อนและผงละเอียดมีขนาดใกล้เคียงกัน	118
4.26 การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตรสะสม ของผงละเอียดและผงป้อนที่ถูกคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม ขนาดอนุภาคของผงป้อนและผงละเอียดมีขนาดแตกต่างกัน	118

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

ในอดีตโลหะบัดกรีชนิดตะกั่ว-ดีบุก (Tin-lead solders) ถูกใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการเชื่อมประสานในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากตะกั่วมีความเป็นพิษ (Toxicity) ต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์อย่างรุนแรง ทำให้มีการรณรงค์เพิ่มมากขึ้นเกี่ยวกับการใช้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solders) แทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสม [1] หลายประเทศ ได้เริ่มหันมาให้ความสนใจและตระหนักต่อปัญหาผลกระทบของสินค้าต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ความเข้มงวดในด้านการใช้วัสดุพิษและการใช้สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ประเทศคู่ค้าของไทยในกลุ่มประเทศยุโรป (European union, EU) ออกกฎระเบียบว่าด้วยเรื่อง เศษเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Waste electrical and electronic equipment, WEEE) และกฎระเบียบว่าด้วยเรื่อง การจำกัดการใช้สารอันตรายบางชนิดในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (The restriction of the use of certain hazardous substance in electrical and electronic equipment, RoHS) [2-4] โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ถูกนำมาใช้หลายรูปแบบ เช่น โลหะบัดกรีแบบแท่ง (Solder bar) คริมโลหะบัดกรี (Solder paste) ลวดบัดกรี (Solder wire) และลูกบอลโลหะบัดกรี (Solder ball) เป็นต้น สำหรับผงโลหะบัดกรี (Solder powder) ที่ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มีข้อกำหนดที่เคร่งครัดมาก ดังนั้น ผงโลหะจะต้องมีการกระจายตัวแคบและมีรูปร่างเป็นเม็ดกลม ผงโลหะจะต้องไม่เกิดการเกาะกลุ่ม และปริมาณออกซิเจนเจือปนน้อยกว่า 100 ppm [5] ในปัจจุบัน โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วหลายชนิดถูกวิจัยและพัฒนาเพื่อนำมาแทนที่โลหะบัดกรีชนิดตะกั่ว-ดีบุก ยกตัวอย่าง Sn-Cu, Sn-Sb, Sn-Ag-Cu, Sn-Ag-Cu-Bi, Sn-Ag-Bi-In และ Sn-In เป็นต้น โดยเฉพาะชนิด Sn-Ag-Cu หรือ SAC มีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม เนื่องจาก ความแข็งแรงสูง (Strength) ความอ่อนตัวสูง (Ductility) ด้านทานการคืบ (Creep) และการล้า (Fatigue) [6-7]

การอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal atomization) เป็นวิธีการผลิตผงโลหะวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีเมื่อเทียบกับวิธีการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำหรือก๊าซ เพราะว่า ผงโลหะที่ผลิตได้เป็นเม็ดกลม ผงโลหะมีการกระจายตัวแคบ ต้นทุนการผลิตต่ำ ผลผลิตผงโลหะสูง (High production yield) และปริมาณออกซิเจนเจือปนน้อย [8] นอกจากนี้ การอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยงเหมาะกับการผลิตผงโลหะบัดกรีประเภท Type 3 (45-25 μm) และ Type 4 (38-20 μm) หลังการอะตอมไมเซชันผงโลหะบัดกรีจะถูกคัดขนาดด้วยการใช้ตะแกรงร่อนหรือการใช้ไซโคลนลมนัดขนาด เพื่อให้ได้ขนาดของผงโลหะบัดกรีตามที่ต้องการ ขนาดของผงโลหะ

บัตกรีสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท (Type 1-Type 7) โดยใช้ขนาดอนุภาคเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง โดยทั่วไป การคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร้อนถือได้ว่าเป็นเครื่องคัดขนาดที่ใช้งานที่ง่ายที่สุดประเภทหนึ่ง แต่ ว่าเครื่องคัดขนาดประเภทนี้ไม่เหมาะกับการคัดขนาดที่มีปริมาณผงโลหะเป็นจำนวนมากและการคัดขนาดเป็นระบบต่อเนื่องที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม วิธีที่ใช้ส่วนใหญ่สำหรับการคัดขนาดแบบต่อเนื่อง คือการเลือกใช้เครื่องคัดขนาดแบบใช้ลมแยก (Air separator) ที่เหมาะสม งานวิจัยที่ผ่านมาของ Sungkhaphaitoon (2013) [9] ได้ทดลองผลิตผงโลหะบัตกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 โดยวิธีการอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง พบว่า ผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 45 ไมครอน มีผลผลิตผงโลหะสูงถึง ร้อยละ 75 อย่างไรก็ตาม ผงโลหะที่ผลิตได้ส่วนใหญ่มีรูปร่างไม่แน่นอน รูปร่างผงโลหะที่เป็นเม็ดกลมมีปริมาณน้อย และผงโลหะมีปริมาณออกซิเจนเจือปนสูงกว่ามาตรฐาน

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมสำหรับการวิจัยในครั้งนี้ การวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้ ส่วนที่ 1 เป็นการออกแบบและสร้างระบบควบคุมบรรยากาศในถังอะตอมไมเซชัน (Atmospheric control system) เพื่อผลิตผงโลหะบัตกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซชันที่มีผลกระทบต่อสมบัติของผงโลหะ ได้แก่ ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของผงโลหะ รูปร่างของผงโลหะ ปริมาณออกซิเจนที่เจือปนอยู่ในผงโลหะและผลผลิตผงโลหะ หลังจากนั้น ผงโลหะบัตกรีที่ผลิตได้จากส่วนแรกถูกนำมาศึกษาวิจัยในส่วนที่ 2 เพื่อคัดขนาดผงโลหะให้อยู่ในช่วงขนาดที่ต้องการสำหรับงานวิจัยนี้ ผงโลหะที่สนใจเป็นพิเศษ อยู่ในช่วง 45-25 ไมครอน หรือ Type 3 โดยได้ทำการออกแบบระบบคัดขนาด (Powder classification system) เพื่อใช้ในการคัดขนาดผงโลหะชนิด SAC305 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการคัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม ได้แก่ ความเร็วรอบของโรเตอร์ ความเร็วลม และอัตราการป้อนผงโลหะ ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการคัดขนาด ได้แก่ ขนาดตัด (Cut size, d_{50}) และความคมของการคัดขนาด (Sharpness of classification, K)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ออกแบบระบบควบคุมบรรยากาศและระบบคัดขนาดสำหรับผงโลหะบัตกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 เพื่อผลิตผงโลหะบัตกรีไร้สารตะกั่ว ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลม ผงโลหะมีการกระจายตัวแคบ และปริมาณออกซิเจนเจือปนในผงโลหะน้อยกว่า 100 ppm
- 2) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซชัน ที่มีผลกระทบต่อ ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของผงโลหะ รูปร่างของผงโลหะ ปริมาณออกซิเจนที่เจือปนอยู่ในผงโลหะและผลผลิตผงโลหะ
- 3) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการคัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม ได้แก่ ความเร็วรอบของโรเตอร์ ความเร็วลม และอัตราการป้อนผงโลหะที่มีผลกระทบต่อขนาดตัด และความคมของการคัดขนาด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ออกแบบระบบควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ เพื่อผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่สามารถปรับลดระดับปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ได้ตั้งแต่ 21 vol.% - 0.01 vol.% และระบบคัดขนาดสำหรับผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305
- 2) ออกแบบระบบคัดขนาดผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ให้สามารถคัดขนาดผงโลหะได้ในช่วงขนาดที่ต้องการ (45-25 μm หรือ Type 3)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เครื่องอะตอมไมเซอร์ที่มีระบบควบคุมบรรยากาศและระบบคัดขนาดผงโลหะ
- 2) ได้องค์ความรู้ในการออกแบบการสร้างระบบควบคุมบรรยากาศให้มีปริมาณออกซิเจนต่ำ และระบบคัดขนาดผงโลหะ
- 3) นำความรู้ที่ได้ถ่ายทอดให้แก่ภาคอุตสาหกรรมที่มีความสนใจ
- 4) ได้ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ
- 5) ได้อนุสิทธิบัตรสำหรับการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ ประกอบด้วย การนำเสนอหัวข้อต่าง ๆ ที่มีความสำคัญและเกี่ยวข้องกับโลหะบัดกรี การผลิตผงโลหะบัดกรีด้วยวิธีอะตอมไมเซชันแต่ละประเภท และการคัดขนาดผงโลหะบัดกรี ดังนี้ (2.1) วัสดุผง (2.2) โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (2.3) โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด ดีบุก-เงิน-ทองแดง (2.4) ประเภทของผงโลหะบัดกรีแบ่งตามช่วงขนาดอนุภาค ข้อกำหนดตามมาตรฐาน และการเกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด (2.5) การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน (2.6) การคัดขนาดผงโลหะ (2.7) เครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม (2.8) การหาสมรรถนะของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม (2.9) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ (2.10) สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุผง (Powder)

วัสดุผงในทางโลหะกรรมวัสดุผง หมายถึง ของแข็งที่ถูกทำให้มีขนาดเล็กลงโดยที่ขนาดใหญ่สุดมีขนาดน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร โดยทั่วไปเป็นวัสดุพวกโลหะ แต่ก็มีหลายกรณีที่โลหะผสมกับวัสดุอื่น เช่น เซรามิกส์หรือพอลิเมอร์ ลักษณะเฉพาะตัวที่สำคัญของวัสดุผงคืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาตรค่อนข้างสูง วัสดุผงมีพฤติกรรมอยู่ระหว่างของแข็งและของเหลว วัสดุผงจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ภายใต้แรงโน้มถ่วง ดังนั้นด้วยพฤติกรรมลักษณะนี้ ผงโลหะจึงมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว พวกมันสามารถถูกอัดด้วยความดันคล้ายก๊าซได้ แต่ไม่มีการคืนตัวเหมือนกับการเสียรูปอย่างถาวรของโลหะ ด้วยเหตุที่ผงโลหะมีพฤติกรรมไม่คืนตัวหลังกระบวนการผลิต ดังนั้นผงโลหะสามารถขึ้นรูปได้ง่าย

2.2 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder)

หลายทศวรรษที่ผ่านมา โลหะบัดกรีชนิดตะกั่วผสมดีบุก (Sn-Pb solder) ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โลหะบัดกรีชนิดนี้ถูกใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับแผงวงจรพิมพ์ หรือใช้เป็นวัสดุเติม ระหว่างรอยต่อของโลหะพื้น เนื่องจากมีข้อดีคือมีจุดหลอมเหลวต่ำและมีการเปียกผิวที่ดี อย่างไรก็ตาม การรับรู้ที่เพิ่มมากขึ้นของผู้บริโภคเกี่ยวกับอันตรายของตะกั่วที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของสิ่งมีชีวิต ทำให้เป็นแรงขับเคลื่อนสำหรับการค้นคว้าวิจัยเพื่อหาโลหะบัดกรีชนิดใหม่ เพื่อทดแทนโลหะบัดกรีชนิดตะกั่วผสมดีบุก เมื่อไม่นานมานี้ กระแสความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ที่เรียกว่า Green products ถือได้ว่าเป็นหนึ่งแรงขับเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นมา ปัจจุบันโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ใช้แทนโลหะบัดกรีชนิดตะกั่ว-ดีบุก ได้แก่ Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Zn-Bi, Sn-Bi-Ag และ Sn-Ag-Cu เป็นต้น

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแต่ละชนิดจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ดังนั้นในการตัดสินใจเลือกเพื่อให้ใช้งานได้ตามเป้าหมาย ผู้ผลิตจะต้องคำนึงถึงสมบัติที่แตกต่างกันของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด ซึ่งปัจจัยที่ใช้พิจารณาสามารถสรุปได้ ดังนี้ [10]

- สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว แรงตึงผิว การนำไฟฟ้า การนำความร้อน ความจุความร้อน คุณลักษณะการขยายตัว และการหดตัว เป็นต้น
- กระบวนการผลิต ได้แก่ ความสามารถในการเปียก อัตราการหลอม การทำปฏิกิริยากับฟลักซ์ อายุการเก็บรักษา การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เป็นต้น
- สมบัติเชิงกล ได้แก่ การต้านทานแรงดึง ความเหนียว การทนต่อการคืบ การต้านทานแรงเฉือน และการทนต่อความล้า เป็นต้น
- ปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งาน ได้แก่ การทนต่อการกัดกร่อน การแตกแบบเปราะและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เป็นต้น
- ปัจจัยในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ ราคาของวัสดุ ความง่ายในการผลิตในรูปของผงโลหะหรือเส้นลวด เวลาที่ใช้ในการพัฒนาและค่าลิขสิทธิ์ เป็นต้น
- ความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ความสามารถในการรีไซเคิลและโอกาสที่จะเกิดมลพิษต่ำ เป็นต้น

ถึงแม้ว่าจะมีหลายปัจจัยให้เลือกเมื่อต้องการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว แต่การพิจารณาถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการประกอบเชื่อมต่อกับชิ้นส่วนอื่นๆ ถือได้ว่าเป็นความสำคัญเป็นลำดับแรก อุณหภูมิสูงสุดในขั้นตอนเหล่านี้ถูกกำหนดจากสมบัติทางความร้อนของอุปกรณ์ที่อยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed circuit board) ในขณะที่อุณหภูมิต่ำสุดหมายถึงพฤติกรรมการหลอมของโลหะบัดกรีที่เกิดการยึดเกาะกันได้ดีกับแผ่นบอร์ด ดังนั้นเมื่อพิจารณาอุณหภูมิการหลอมเหลว สามารถแบ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตามอุณหภูมิการหลอมเหลวได้ 4 ประเภท ดังแสดงใน ตารางที่ 2.1 ได้แก่ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีอุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีอุณหภูมิการหลอมอยู่ในช่วง 180-200 องศาเซลเซียส โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีอุณหภูมิการหลอมอยู่ในช่วง 200-230 องศาเซลเซียส และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีอุณหภูมิการหลอมสูงกว่า 230 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.1 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วประเภทต่าง ๆ แบ่งตามช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว [11]

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส		
ชนิด	องค์ประกอบทางเคมี (wt.%)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Bi	Sn-58Bi	138
Sn-In	Sn-52In	118
	Sn-50In	118-125
โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีอุณหภูมิการหลอมอยู่ในช่วง 180 - 200 องศาเซลเซียส		
ชนิด	องค์ประกอบทางเคมี (wt.%)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Zn	Sn-9Zn	198.5
Sn-Bi-Zn	Sn-8Zn-3Bi	189-199
Sn-Bi-In	Sn-20Bi-10In	143-193
โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีอุณหภูมิการหลอมอยู่ในช่วง 200 - 230 องศาเซลเซียส		
ชนิด	องค์ประกอบทางเคมี (wt.%)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Ag	Sn-3.5Ag	221
	Sn-2Ag	221-226
Sn-Cu	Sn-0.7Cu	227
Sn-Ag-Bi	Sn-3.5Ag-3Bi	206-213
	Sn-7.5Bi-2Ag	207-212
Sn-Ag-Cu	Sn-3.8Ag-0.7Cu	217
Sn-Ag-Cu-Sb	Sn-2Ag-0.8Cu-0.5Sb	216-222
โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีอุณหภูมิการหลอมสูงกว่า 230 องศาเซลเซียส		
ชนิด	องค์ประกอบทางเคมี (wt.%)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Sb	Sn-5Sb	232
Sn-Au	Sn-80Au	280
Sn-Ag-Sb	Sn-25Ag-10Sb	233

2.3 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด ดีบุก-เงิน-ทองแดง (Sn-Ag-Cu solder)

ในกลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว โลหะบัดกรีชนิด Sn-Ag-Cu ถือว่าเป็นตัวเลือกที่โดดเด่นที่สุดในการนำมาใช้แทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม ก่อนที่จะมาเป็นโลหะบัดกรีชนิด Sn-Ag-Cu เริ่มแรก มีการใช้งานโลหะบัดกรีชนิด Sn-Ag มาก่อน ข้อดีของโลหะบัดกรีชนิด Sn-Ag คือมีสมบัติต้านทานการล้าที่ดี เหมาะกับการนำไปใช้งานบางอย่างที่เฉพาะเจาะจง รวมทั้งมีการใช้งานที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีตะกั่วผสมดีบุก โลหะบัดกรีชนิด Sn-Ag มีส่วนผสมของเงินประมาณ 3.5

wt.% มีจุดหลอมเหลวประมาณ 221 องศาเซลเซียส ต่อมา มีการค้นพบว่าถ้าเติมทองแดงปริมาณเล็กน้อยเข้าไปในโลหะผสมชนิดนี้จะช่วยปรับปรุงสมบัติได้ ดังนี้ [10]

- ทำให้จุดหลอมเหลวลดลง เนื่องจากการเกิดเทอร์นารียูเทคติก (Ternary eutectic)
- ทำให้ความสามารถในการเปียกเพิ่มขึ้น
- ทำให้ประสิทธิภาพเชิงกลทางความร้อนเพิ่มขึ้น
- ทำให้การเกิดดิสโลเคชันของทองแดงที่มาจากแผ่นรอง (Substrates) ลดลง

นอกจากนี้ ในระบบโลหะบัดกรีชนิด Sn-Ag ไม่มีการเติมธาตุบิสมัท (Bi) ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการปนเปื้อนของตะกั่ว ด้วยเหตุนี้นำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Ag-Cu ขึ้นในหลายประเทศทั่วโลก เช่น ญี่ปุ่น ยุโรปและอเมริกา

เป็นที่ทราบกันดีว่าถ้าสามารถตรวจวิเคราะห์และหาส่วนประกอบโดยน้ำหนักที่อยู่ในระบบเทอร์นารียูเทคติกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Ag-Cu จะทำให้มั่นใจได้ว่าจะได้อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำสุดและสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุมีขนาดละเอียดและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลต่อความมีเสถียรภาพของสมบัติเชิงกลและการทนต่อความล้าดีขึ้น โดยทั่วไปส่วนประกอบโดยน้ำหนักของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Ag-Cu สามารถแสดงอยู่ในรูปของ Sn-vX-yZ โดยที่ X และ Z คือธาตุที่ผสมลงไปในตัว สำหรับ v และ y คือ เปอร์เซ็นต์ของส่วนประกอบโดยน้ำหนักของธาตุ X และ Z ตามลำดับ ที่เหลือก็จะจะเป็นเปอร์เซ็นต์ของตัวถูก ยกตัวอย่าง โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-3.0Ag-0.5Cu หมายความว่า โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดนี้มีส่วนประกอบโดยน้ำหนักของตัวถูก 96.5 wt.% เงิน 3 wt.% และทองแดง 0.5 wt.% สำหรับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Ag-Cu มีอยู่สามสูตรที่ถูกเลือกนำมาแทนที่โลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb ได้แก่ Sn-3.0Ag-0.5Cu (ญี่ปุ่น) Sn-3.5Ag-0.9 (ยุโรป) และ Sn-3.9Ag-0.6Cu (อเมริกา) อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาของการพัฒนาโลหะบัดกรีกลุ่ม SAC ก็มี SAC บางตัวถูกจำหน่ายในตลาดไปแล้ว ได้แก่ Sn-3.5Ag-0.7Cu ซึ่งจำหน่ายในประเทศญี่ปุ่น Sn-3.8Ag-0.7Cu และ Sn-4Ag-0.5Cu ซึ่งจำหน่ายในทวีปอเมริกาเหนือและยุโรป ปัจจุบันโลหะบัดกรีในกลุ่ม SAC พัฒนาอย่างก้าวกระโดด เนื่องจากหลายบริษัทที่ผลิตโลหะบัดกรีในกลุ่มนี้มีการอนุญาตให้ใช้สิทธิ์ไขว้กันได้ (Cross licensing) หรือกล่าวได้ว่ามีการแลกเปลี่ยนจุดแข็งทางเทคโนโลยีร่วมกันของแต่ละบริษัท และอีกเหตุผลหนึ่งก็คือเมื่อพิจารณาโดยภาพรวม สำหรับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่ม SAC ถึงแม้ว่าในแต่ละงานวิจัยจะแนะนำให้เติมเปอร์เซ็นต์เงินและทองแดงในปริมาณที่แตกต่างกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วก็ถือว่าแตกต่างกันน้อยมาก โลหะบัดกรีกลุ่มนี้ นอกจากจะมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ใกล้เคียงกัน ประมาณ 217 องศาเซลเซียส ยังมีลักษณะการเปียก สมบัติเชิงกลและพฤติกรรมกรรมการหลอมที่คล้ายคลึงกันอีกด้วย เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจะส่งผลต่อความน่าเชื่อถือสูง

2.4 ประเภทของผงโลหะบัดกรีแบ่งตามช่วงขนาดอนุภาค ข้อกำหนดตามมาตรฐาน และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะบัดกรีแต่ละชนิด

ผงโลหะบัดกรีทั้งชนิดที่มีตะกั่วผสมและไม่มีตะกั่วผสมจะใช้เทคโนโลยีการผลิตเหมือนกัน ส่วนใหญ่ผงโลหะบัดกรีจะผลิตด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน หลังจากการอะตอมไมเซชัน ผงโลหะบัดกรีจะถูกคัดขนาดด้วยการใช้ตะแกรงร่อน (Sieving process) หรือการใช้ไซโคลนลมคัดขนาด (Air classification process) เพื่อให้ได้ขนาดของผงโลหะบัดกรีตามที่ต้องการ ขนาดของผงโลหะบัดกรีสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท โดยใช้ขนาดเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง ดังแสดงใน ตารางที่ 2.2 โดยทั่วไป การผลิตผงโลหะบัดกรีที่ได้คุณภาพสูง ผงโลหะผลิตมาจากการอะตอมไมเซชันประเภทต่าง ๆ ที่ใช้เทคนิคการผลิตแตกต่างกัน การอะตอมไมเซชันในแต่ละประเภท แสดงดังตารางที่ 2.3 การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ อะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง และอะตอมไมเซชันแบบใช้คลื่นเสียง เป็นประเภทที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับผลิตผงโลหะบัดกรี ประเภท Type 3 และ Type 4 ในขณะที่การอะตอมไมเซชันแบบใช้น้ำมันเหมาะกับการผลิตผงโลหะบัดกรีประเภท Type 5 และ Type 6 ในปัจจุบัน ผงโลหะบัดกรีที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า ประเภท Type 6 ถูกนำไปใช้งานมากขึ้น เพื่อทำเป็นลูกบอลบัดกรี หรือ Solder bumping ที่เรียกว่าเทคโนโลยีการผลิตแบบ Flip chip และ BGA (Ball grid array) ทำให้ได้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก บาง และมีน้ำหนักเบา

ตารางที่ 2.2 ผงโลหะบัดกรีที่ถูกแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ตามขนาดอนุภาคผงโลหะ [12]

ประเภท	ผงโลหะขนาดใหญ่ไม่เกิน	ผงโลหะขนาดใหญ่กว่าไม่เกิน 1%	ผงโลหะมีขนาดอยู่ในช่วง ต่ำสุด 80%	ผงโลหะขนาดเล็กกว่าไม่เกิน 10%
Type 1	160 μm	150 μm	150-75 μm	20 μm
Type 2	80 μm	75 μm	75-45 μm	20 μm
Type 3	50 μm	45 μm	45-25 μm	20 μm
Type 4	40 μm	38 μm	38-20 μm	20 μm
Type 5	30 μm	25 μm	25-15 μm	15 μm
Type 6	20 μm	15 μm	15-5 μm	5 μm

ตารางที่ 2.3 การอะตอมไมเซชันประเภทต่าง ๆ แบ่งเป็น การอะตอมไมเซชันที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ การอะตอมไมเซชันที่กำลังวิจัยและพัฒนา และการอะตอมไมเซชันวิธีอื่นๆ [13]

วิธีที่ใช้ในเชิงพาณิชย์	วิธีที่กำลังวิจัยและพัฒนา	วิธีอื่นๆ
การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ	การอะตอมไมเซชันใช้คลื่นเสียง	การอะตอมไมเซชันแบบหมุนถ้วย
การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำมัน	อะตอมไมเซชันแบบหมุนจาน	การอะตอมไมเซชันแบบสั่นอิเล็กโทรด
การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ	อะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง ใช้วิธีการหลอมอิเล็กโทรดด้วยลำอิเล็กตรอน	อะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง ใช้วิธีการหลอมอิเล็กโทรดด้วยเลเซอร์
การอะตอมไมเซชันแบบสูญญากาศ	การอะตอมไมเซชันแบบหมุนลูกกลิ้ง	
การอะตอมไมเซชันแบบหมุนขั้ว		

ลักษณะสำคัญของผงโลหะบัดกรีที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานเพื่อบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มีข้อกำหนดหลายประการ เช่น ผงโลหะมีรูปร่างเป็นเม็ดกลม ปริมาณออกซิเจนเจือปนที่ผิวน้อย (< 100 ppm) และการกระจายตัวของผงโลหะอยู่ในช่วงที่กำหนด ผงโลหะบัดกรีที่มีระดับความกลมสูงเมื่อผสมกับสารเคมีที่เรียกว่า ฟลักซ์ (Flux) จะมีสมบัติการไหลตัวที่ดีขณะพิมพ์ลงบนแผ่นบอร์ด โดยทั่วไปผงโลหะบัดกรี เมื่อผสมกับฟลักซ์จะอยู่ในสภาวะกึ่งของแข็งของเหลวซึ่งมีลักษณะคล้ายกับยาสีฟัน เรียกว่าครีมโลหะบัดกรี (Solder paste) นอกจากผงโลหะบัดกรีจะต้องมีรูปร่างทรงกลมแล้ว การมีผิวที่ราบเรียบยังสะท้อนให้เห็นว่าผงโลหะมีปริมาณออกซิเจนเจือปนน้อยในระหว่างการอะตอมไมเซชัน การเกิดออกไซด์ที่ผิวของละอองน้ำโลหะปริมาณน้อย ส่งผลให้แรงตึงผิวของละอองน้ำโลหะทำหน้าที่เป็นแรงขับเคลื่อนหลักในการเปลี่ยนละอองน้ำโลหะบัดกรี (Solder droplets) กลายเป็นเม็ดกลมได้อย่างอิสระ ตามมาตรฐาน J-STD-006 (Joint Industrial Standard) ผงโลหะบัดกรีแต่ละประเภทมีข้อกำหนดปริมาณออกซิเจนที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4 โลหะบัดกรีที่มีปริมาณออกซิเจนเจือปนน้อยมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อประสิทธิภาพการบัดกรีให้ได้คุณภาพตามที่ต้องการ ดังนั้น การทำความเข้าใจและการควบคุมการเกิดออกซิเดชันกับละอองน้ำโลหะจึงมีความสำคัญต่อกระบวนการการผลิตครีมโลหะบัดกรี

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดตามมาตรฐานของผงโลหะบัดกรีแต่ละประเภท ที่ยอมให้ปริมาณออกซิเจนเจือปนในผงโลหะได้ [14]

ผงโลหะบัดกรี ประเภท	ปริมาณออกซิเจนเจือปนในผงโลหะ
Type 2	ต่ำกว่า 100 ppm
Type 2A	ต่ำกว่า 110 ppm
Type 3	ต่ำกว่า 120 ppm
Type 4	ต่ำกว่า 150 ppm
Type 5	ต่ำกว่า 200 ppm
Type 6	ต่ำกว่า 200 ppm

สำหรับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด Sn-Ag-Cu, Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Ag-Bi-In และ Sn-Ag-Bi อัตราการเกิดออกซิเดชันและการเกิดชั้นฟิล์มออกไซด์แตกต่างจากโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb แสดงในตารางที่ 2.5 พบว่าค่าพลังงานอิสระ (Free energy) ของการเกิดออกไซด์สำหรับธาตุต่าง ๆ ที่ถูกนำมาใช้ในโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ ธาตุทุกตัวยกเว้นเงินและทองแดงโดยทั่วไปมีแนวโน้มที่จะเกิดออกไซด์มากกว่าตะกั่ว

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของธาตุต่าง ๆ ของโลหะบัดกรี ที่เป็นพลังงานอิสระมาตรฐานของการเกิดออกซิเดชัน [13]

ออกไซด์ (Oxide) ของโลหะบัดกรี	พลังงานอิสระ $\Delta_f G^\circ$ (kJ/mol)
Ag ₂ O	-11.2
Bi ₂ O ₃	-493.7
Cu ₂ O	-146
CuO	-157.3
In ₂ O ₃	-830.7
SnO	-251.9 (ระบบผลึกแบบเตตราโกนัล)
SnO ₂	-515.8 (ระบบผลึกแบบเตตราโกนัล)
PbO	-187.9 (สีเหลือง) -188.9 (สีแดง)
PbO ₂	-217.3
Sb ₂ O ₄	-796.3
Sb ₂ O ₅	-829.8
ZnO	-320.5

เมื่อพิจารณาทางด้านจลนศาสตร์ อัตราการเกิดออกซิเดชันของโลหะ หมายถึง ปริมาณออกไซด์ของโลหะที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยที่อัตราการเกิดออกซิเดชันขึ้นกับชนิดของวัสดุ สามารถแสดงดังสมการ 2.1

$$\frac{\Delta m}{A} = k\sqrt{t} \quad (2.1)$$

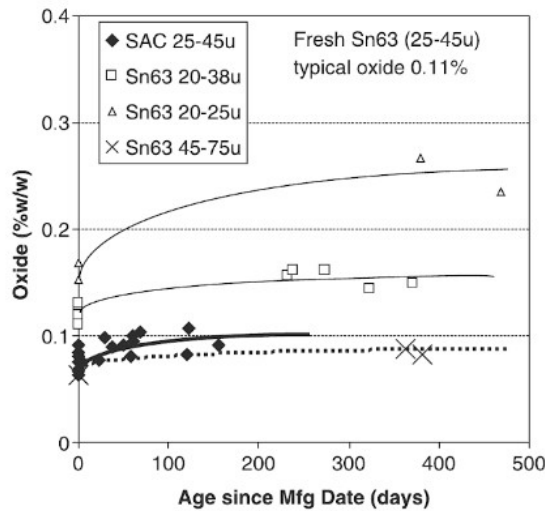
เมื่อ Δm คือ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (kg), A คือพื้นที่ผิว (m^2), t คือ เวลา (s) และ k สัมประสิทธิ์การเติบโต เท่ากับ $k_0 \exp(-B/T)$ เมื่อ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ โดยที่ k_0 และ B คือ ค่าคงที่

จากการศึกษาความหนาของชั้นออกไซด์ของโลหะบัดกรีหลายชนิด ในการทดลองโลหะบัดกรีทำให้เกิดการออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว 140 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2.6 พบว่า อัตราการเกิดออกไซด์ของโลหะบัดกรีเมื่ออยู่ในสภาวะหลอมเหลวเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น โลหะบัดกรีชนิด 63Sn-37Pb อัตราการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจาก 10 นาที ในขณะที่โลหะบัดกรีชนิด 99.3Sn-0.7Cu, 96.5Sn-3.5Ag และ 91Sn-9Zn อัตราการเกิดออกซิเดชันลดลงหลังจาก 10 นาที ถึงแม้ว่าโลหะบัดกรีบางชนิดจะมีอัตราการเกิดออกซิเดชันสอดคล้องกับค่าพลังงานอิสระ เช่น โลหะบัดกรีที่มีธาตุ Bi, Sb, In และ Zn ผสมอยู่ โดยที่ความหนาชั้นออกไซด์สูงกว่าโลหะบัดกรีที่มีธาตุ Pb ผสม ที่เวลา 10 นาที แต่ก็มีโลหะบัดกรีบางตัวที่ผลการทดลองตรงกันข้าม เช่น Sn-Cu และ Sn-Ag เมื่อเปรียบเทียบกับ 63Sn-37Pb นอกเหนือจากอัตราการแพร่ของอะตอมในโลหะบัดกรีแล้วสภาพการแน่นตัวของออกไซด์อาจจะมีผลกระทบอย่างมากต่ออัตราการซึมผ่านของออกซิเจน ดังนั้นจึงมีผลต่อความหนาของออกไซด์ที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 2.6 ความหนาของชั้นออกไซด์ ที่ระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้ายของโลหะบัดกรีเมื่อถูกออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว 140 องศาเซลเซียส [13]

โลหะผสม	อุณหภูมิเกิดออกซิเดชัน (°C)	ความหนาของชั้นออกไซด์ (Angstroms)			ประเภทออกไซด์
		เริ่มต้น	หลังจาก 10 นาที	หลังจาก 50 นาที	
Sn99.3-Cu0.7	367	20	50	50	Sn oxide
Sn96.5-Ag3.5	361	30	50	50	Sn oxide
Sn63-Pb37	323	30	50	500	Sn oxide
Bi58-Sn42	278	N/A	350	800	Sn oxide
Sn95-Sb5	380	20	875	1425	Sn oxide
Sn91-Zn9	339	70	200	325	Zn oxide
52In-48Sn	257	2	175	600	In oxide

นอกเหนือจากการเกิดออกซิเดชันกับโลหะบัดกรีที่อยู่ในสภาวะของเหลวแล้ว ผงโลหะบัดกรีที่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิห้องก็สามารถเกิดออกซิเดชันได้ด้วยเช่นกัน จากการศึกษาอัตราการเกิดออกซิเดชันกับผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด 95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu ที่เป็นประเภท Type 3 โดยการคำนวณหาหน้าหนักออกไซด์จากความแตกต่างของน้ำหนักผงโลหะก่อนและหลังผสมกับฟลักซ์ พบว่าหลังจากผสมกับฟลักซ์น้ำหนักผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วลดลง เนื่องจากออกไซด์ถูกกำจัดออกไป สันนิษฐานว่าออกไซด์ทำปฏิกิริยากับฟลักซ์ เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์สำหรับผงโลหะบัดกรีที่เพิ่งผ่านการผลิต (Fresh powders) และทำการตรวจวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ผงโลหะที่ระยะเวลาต่าง ๆ โดยที่ผงโลหะบัดกรีจะถูกเก็บในถุงอะลูมิเนียมที่บรรจุแบบสุญญากาศอย่างดี เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาณออกไซด์ที่วัดได้ของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC ประเภท Type 3 (25-45 ไมครอน) จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผงโลหะบัดกรีชนิด 63Sn-37Pb ที่ช่วงขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ได้แก่ 20-25 ไมครอน 20-38 ไมครอน และ 45-75 ไมครอน แสดงในรูปที่ 2.1 พบว่าปริมาณออกไซด์ของโลหะบัดกรีชนิด SAC ประเภท Type 3 และโลหะบัดกรีชนิด 63Sn-37Pb ที่ช่วงขนาดอนุภาคแตกต่างกันขึ้นกับเวลาในการบ่ม (Aging) ปริมาณออกไซด์ของ SAC หลังการผ่านการผลิตจะอยู่ในช่วง 0.06%-0.09% (w/w) ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณออกไซด์ของโลหะบัดกรีชนิด 63Sn-37Pb โดยที่โลหะบัดกรีชนิด 63Sn-37Pb หลังการผ่านการผลิต ผงโลหะจะมีปริมาณออกไซด์ 0.11% (Type 3) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผงโลหะบัดกรีชนิด 63Sn-37Pb พบว่ายิ่งผงโลหะมีขนาดเล็กลง ปริมาณออกไซด์ที่เจือปนยิ่งเพิ่มขึ้น ผงโลหะบัดกรีทั้งสองชนิดดูเหมือนว่าจะมีพฤติกรรมเกิดการเกิดออกซิเดชันที่คล้ายกันคือ อัตราการเกิดออกไซด์ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นชี้ให้เห็นว่าอัตราการเกิดออกไซด์เป็นไปตามสมการที่ 2.1 ผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่ามีอัตราการเกิดออกซิเดชันสูงกว่าผงโลหะที่มีขนาดใหญ่ สำหรับผงโลหะบัดกรีชนิด SAC ประเภท Type 3 โดยทั่วไปปริมาณออกซิเจนที่สูงกว่า 0.10% มีแนวโน้มที่จะส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพของผงโลหะสำหรับใช้เป็นลูกบอลบัดกรี (Solder ball) ดังนั้นการเก็บผงโลหะไว้ในที่ ที่มีอุณหภูมิต่ำจะช่วยลดอัตราการเกิดออกซิเดชันได้



รูปที่ 2.1 ปริมาณออกไซด์ของผงโลหะบัดกรีชนิด 95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu (SAC) ประเภท Type 3 (25-45 ไมครอน) และปริมาณออกไซด์ของโลหะบัดกรีชนิด 63Sn-37Pb ที่อยู่ในช่วงขนาด 20-25 ไมครอน, 20-38 ไมครอน และ 45-75 ไมครอน โดยที่ผงโลหะบัดกรีถูกเก็บไว้อย่างดีในถุงอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้อง [13]

จากการศึกษาของ de Kluienaar [15] พบว่าชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกิดกับผงโลหะบัดกรีชนิด 60Sn-40Pb เกิดการผสมกันระหว่างออกไซด์ของดีบุกและออกไซด์ของตะกั่ว โดยที่มีออกไซด์ของดีบุกเป็นส่วนประกอบหลักที่เห็นได้ชัดเจน เมื่อนำผงโลหะบัดกรีไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Auger electron spectroscopy (AES) พบว่า ชั้นฟิล์มออกไซด์สามารถแบ่งออกได้เป็นสามชั้น ชั้นนอกสุดคือฟิล์มออกไซด์ของ SnO_2 หนาประมาณ 2 นาโนเมตร ถัดจากชั้นฟิล์มชั้นนอกคือชั้นฟิล์มออกไซด์ของ SnO หนา 6 นาโนเมตร ในฟิล์มชั้นนี้มีตะกั่วกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ ฟิล์มชั้นสุดท้ายคือฟิล์มออกไซด์ของ SnO หนา 6 นาโนเมตร ซึ่งมีดีบุกและตะกั่วกระจายตัวอยู่ อย่างไรก็ตาม การเกิดชั้นออกไซด์ที่มีส่วนประกอบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนในขั้นตอนการผลิตผงโลหะบัดกรี ที่ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนสูงทำให้อัตราการเกิดออกซิเดชันสูง โลหะดีบุกสามารถเกิดออกซิเดชันได้รวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับตะกั่ว ในทางตรงกันข้าม ที่ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำทำให้อัตราการเกิดออกซิเดชันช้ากว่าอัตราการแพร่ของดีบุก ดีบุกจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและตะกั่วจะยังคงอยู่ในสถานะของโลหะ ด้วยเหตุนี้จึงพบเฉพาะชั้นออกไซด์ของดีบุกที่ผิวเท่านั้น

Hillman และ Chumbley [16] ศึกษาการเกิดออกซิเดชันของแผ่นพอลิที่ทำจากดีบุกบริสุทธิ์โดยใช้การวิเคราะห์การเกิดปฏิกิริยารีดักชันทางเคมีไฟฟ้า (Sequential electrochemical reduction analysis, SERA) พบว่า ชั้นออกไซด์ของ SnO เกิดขึ้นเป็นลำดับแรก ต่อมาออกไซด์ของชั้น SnO_2 เกิดตามมาที่บริเวณผิวนอกสุด นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จาก SERA ชี้ให้เห็นว่า การเติบโตของผลึก SnO อาจจะมีเกิดมาจากหลายบริเวณ ในขณะที่ผลึก SnO เติบโตอย่างต่อเนื่องและปกคลุมพื้นที่

ผิวของดีบุกมากขึ้น ในขณะที่เดียวกัน ผลึก SnO₂ ก็ยังคงเติบโตอยู่บนชั้นของ SnO การเติบโตของชั้น SnO₂ อาจจะมีมากจนปกคลุมทั้งหมดของชั้น SnO เมื่อนำแผ่นพอลิเอทิลีนที่วางไว้ในบรรยากาศปกติเป็นเวลา 2 ปี ความหนาชั้นออกไซด์ที่ตรวจวิเคราะห์ได้จาก SERA เท่ากับ 58.6 อังสตรอม ในกรณีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว การเกิดออกซิเดชันมีความซับซ้อนมากกว่าโลหะดีบุกบริสุทธิ์ การเกิดออกซิเดชันของโลหะบัดกรีหลายชนิดอาจจะแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง แม้จะพิจารณาจากข้อมูลของพลังงานอิสระ

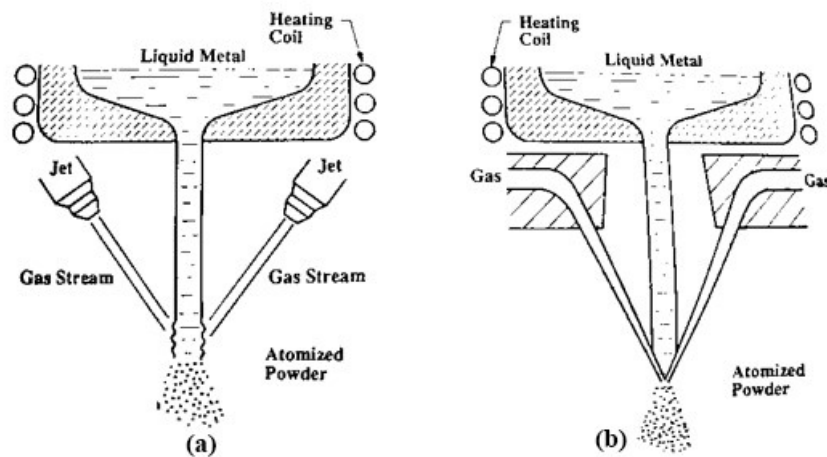
2.5 การผลิตผงโลหะ (Powder fabrication)

การรู้ว่าผงโลหะถูกผลิตด้วยวิธีการอย่างไรจะช่วยให้สามารถประเมินและเข้าใจถึงลักษณะเฉพาะตัวของผงโลหะที่ต้องการใช้งานได้ โดยทั่วไป วัสดุเกือบจะทุกชนิดสามารถทำเป็นผงโลหะได้ อย่างไรก็ตาม วิธีการผลิตผงโลหะที่ถูกเลือกมาใช้ขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะของโลหะแต่ละประเภท การผลิตผงโลหะสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ วิธีการบดเชิงกล (Mechanical comminution) วิธีการทางเคมี (Chemical reaction) วิธีการทางไฟฟ้า (Electrolysis process) และวิธีอะตอมไมเซชัน (Liquid metal atomization) เนื่องจากวิธีอะตอมไมเซชันได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับผลิตผงโลหะบัดกรีเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น เพราะว่าวิธีอะตอมไมเซชันสามารถควบคุมขนาดผงโลหะให้อยู่ในช่วงขนาดที่ต้องการ ผงที่ได้เป็นทรงกลมและมีปริมาณออกซิเจนเจือปนน้อย โดยทั่วไปแล้วผงโลหะบัดกรีที่ผลิตด้วยวิธีนี้ โดยเฉพาะผงโลหะบัดกรีที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง Type 3 และ Type 4 จะถูกใช้ในการผลิตแบบ SMT (Surface-mount technology) นอกจากนี้ ผงโลหะบัดกรีที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า ได้แก่ Type 5 และ Type 6 เหมาะสำหรับใช้เป็นลูกบอลบัดกรีหรือ Solder bumping ในความเป็นจริงการผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันมีอยู่หลายประเภทซึ่งใช้เทคนิคการผลิตที่แตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีอะตอมไมเซชันที่มีลักษณะเด่นบางประเภทเท่านั้น ได้แก่ การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ (Gas atomization) การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ (Water atomization) การอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal atomization) เป็นต้น การอะตอมไมเซชันเกี่ยวข้องกับการผลิตผงโลหะจากโลหะที่อยู่ในสภาพหลอมเหลว โดยที่น้ำโลหะถูกทำให้แตกออกเป็นละอองขนาดเล็ก แนวคิดพื้นฐานของวิธีอะตอมไมเซชันโดยทั่วไป คือ การส่งพลังงานไปยังน้ำโลหะโดยวิธีการพ่นด้วยของไหล เช่น น้ำ ก๊าซ หรือน้ำมัน เป็นต้น วิธีนี้สามารถผลิตได้ทั้งผงโลหะบริสุทธิ์และผงโลหะผสม จุดเด่นคือสามารถใช้กับโลหะได้หลายชนิด ขั้นตอนในการผลิตไม่ซับซ้อน สามารถควบคุมความบริสุทธิ์ของน้ำโลหะและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมได้

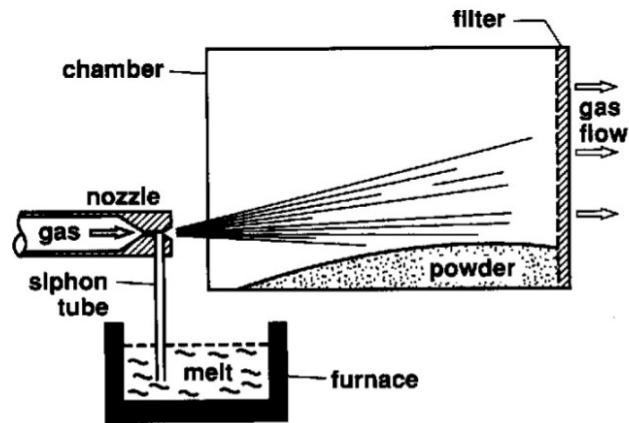
2.5.1 การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ (Gas atomization)

การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ คือ การใช้ของไหล เช่น อากาศ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซฮีเลียม หรือ ก๊าซอาร์กอน ก๊าซที่ไหลออกมาจากหัวพ่นก๊าซจะขยายตัวอย่างรวดเร็วและมีความเร็วสูงพ่นลงน้ำ

โลหะ ทำให้น้ำโลหะแตกตัวออกเป็นละอองขนาดเล็ก หัวฉีดและกลไกการป้อนน้ำโลหะสำหรับการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ อาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการออกแบบ ลำของก๊าซที่พุ่งชนน้ำโลหะสามารถควบคุมผ่านหัวฉีดแต่ละตัวที่อยู่ล้อมรอบลำน้ำโลหะ หรือควบคุมลำของก๊าซผ่านรูเปิดที่ออกแบบให้มีลักษณะเป็นวงแหวน ดังแสดง ในรูปที่ 2.2 ข้อแตกต่างอย่างหนึ่งของวิธีการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ คือ สามารถทำให้น้ำโลหะแตกตัวได้ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง แต่ส่วนใหญ่แล้วจะนิยมแบบแนวตั้งมากกว่า การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซแบบแนวนอนจะนิยมใช้กับโลหะบริสุทธิ์หรือโลหะผสมที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ เครื่องอะตอมไมเซชันแบบแนวนอน ดังรูปที่ 2.3 น้ำโลหะถูกดูดไปตามท่อดูดไหลจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์กาลักน้ำ (Siphon) เมื่อก๊าซที่มีความเร็วสูงไหลผ่านหัวฉีด ก๊าซที่มีความเร็วสูงจะพุ่งกระทบกับน้ำโลหะทำให้น้ำโลหะแตกออกเป็นละอองขนาดเล็ก ละอองขนาดเล็กของน้ำโลหะจะสูญเสียความร้อนและเกิดการเย็นตัวขณะที่ลอยเข้าไปสู่ถังเก็บผงโลหะ

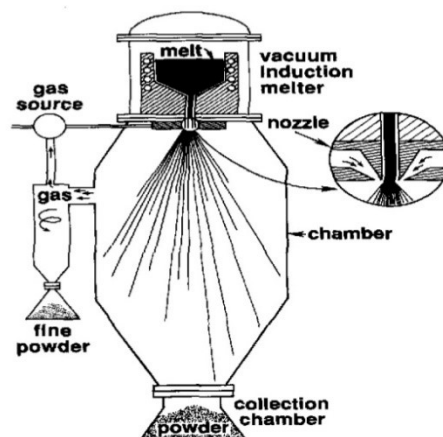


รูปที่ 2.2 ลักษณะรูปร่างหัวฉีดของการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ (a) หัวฉีดแบบคู่ หรือ Twin-jet (b) หัวฉีดชนิดวงแหวน หรือ Annular-ring [17]



รูปที่ 2.3 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซแบบแนวอน [18]

สำหรับโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวสูง เครื่องอะตอมไมเซชันจะถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นแนวตั้ง ออกแบบให้เป็นระบบปิด มีการใช้ก๊าซเฉื่อยเติมเข้าไปภายในถังอะตอมไมเซชันเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เริ่มจากน้ำโลหะถูกหลอมด้วยเตาเหนี่ยวนำ น้ำโลหะถูกเทไหลผ่านหัวฉีดโดยที่บริเวณปลายหัวฉีดสามารถที่จะออกแบบให้มีหัวพ่นก๊าซล้อมรอบ เมื่อน้ำโลหะไหลผ่านหัวฉีด ก๊าซที่มีความเร็วสูงจะพุ่งกระแทกทันทีทำให้น้ำโลหะแตกเป็นละอองขนาดเล็ก ในการอะตอมไมเซชันแบบแนวตั้งปริมาณก๊าซที่สะสมภายในถังอะตอมไมเซชันจะระบายออกเพื่อป้องกันการเกิดแรงดันย้อนกลับ (Back pressure) ดังนั้นการอะตอมไมเซชันแบบแนวตั้งมักจะติดตั้งไซโคลนลมเพื่อทำหน้าที่ระบายอากาศภายในถังอะตอมไมเซชันและอาจจะนำก๊าซที่ได้มาหมุนเวียนใช้ซ้ำ ในขณะที่เดียวกันไซโคลนลมมีประสิทธิภาพในการคัดขนาดผงโลหะที่มีขนาดละเอียดมาก ๆ ที่ปนอยู่ในอากาศได้ด้วย สำหรับขนาดของถังอะตอมไมเซชัน ควรออกแบบให้มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะทำให้อัตราอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดเย็นตัวได้อย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะชนกับผนังของถังอะตอมไมเซชัน



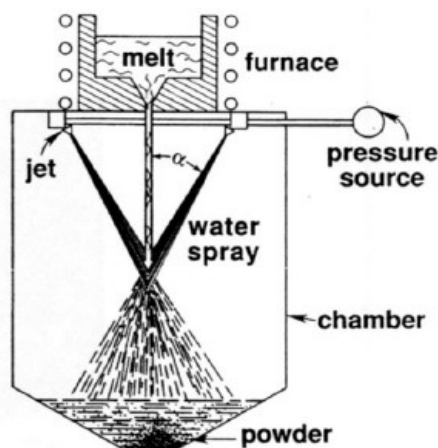
รูปที่ 2.4 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซแบบแนวตั้ง [18]

เนื่องจากการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซสามารถทำได้ภายใต้สภาวะก๊าซเฉื่อย ดังนั้นผงโลหะตั้งต้น (Feedstocks) ที่ได้จึงมีคุณภาพดี รูปร่างเป็นเม็ดกลม แต่การกระจายตัวค่อนข้างกว้าง การอะตอมไมเซชันมีหลายตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพของผงโลหะ ได้แก่ ชนิดของก๊าซที่ใช้ บรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ อุณหภูมิน้ำโลหะ ความหนืดของน้ำโลหะที่ไหลเข้าสู่หัวฉีด ชนิดของโลหะที่นำมาหลอม อัตราการป้อนน้ำโลหะ แรงดันก๊าซ อัตราการป้อนก๊าซ ความเร็วของก๊าซ รูปร่างลักษณะของหัวพ่นและอุณหภูมิของก๊าซ เป็นต้น ตัวแปรเหล่านี้สามารถที่จะถูกปรับเปลี่ยนเพื่อให้ได้ลักษณะผงโลหะที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานที่หลากหลาย จุดเด่นของกระบวนการนี้คือผงโลหะที่ได้มีความสม่ำเสมอและมีสมบัติการบรรจุ (Packing properties) ที่ดีเนื่องจากผงโลหะมีลักษณะเป็นเม็ดกลม

2.5.2 การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ (Water atomization)

กระบวนการผลิตผงโลหะโดยการใช้ น้ำ เพื่อทำให้น้ำโลหะเกิดการแตกเป็นละอองขนาดเล็ก เรียกว่า การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ เป็นประเภทหนึ่งที่ใช้ผลิตผงโลหะที่เฉื่อยต่อการเกิดออกไซด์ และผลิตผงโลหะผสม นิยมใช้กับวัสดุที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 1600 องศาเซลเซียส การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ สามารถแสดงดังรูปที่ 2.5 เครื่องอะตอมไมเซชันประกอบด้วย หัวฉีดน้ำความดันสูงทำหน้าที่ส่งลำน้ำ (Water jet) ปะทะกับน้ำโลหะเพื่อทำให้น้ำโลหะแตกเป็นละอองขนาดเล็ก ในขณะเดียวกันยังทำให้ละอองขนาดเล็กของน้ำโลหะเย็นตัวเร็วขึ้น ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการนี้คือ อุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของน้ำโลหะ (Melt superheat) และความดันน้ำ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ควบคุมความเร็วของน้ำ น้ำที่มีความดันสูงผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดเล็กลง ตัวแปรอื่นๆ ที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อขนาดของผงโลหะ เช่น ขนาดของลำน้ำโลหะ อัตราการไหลของน้ำโลหะและมุมการปะทะระหว่างน้ำที่มีความดันสูงกับน้ำโลหะ German [18] รายงานว่า ผงเหล็กที่ได้จากการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำความดัน 1.7 MPa มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 117 ไมครอน แต่เมื่อเพิ่มความดันน้ำเป็น 13.8 MPa ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ได้มีขนาดเล็กลง เป็น 42 ไมครอน สำหรับการออกแบบและติดตั้งหัวฉีดน้ำความดันสูงสามารถทำได้เหมือนกับการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ โดยทั่วไป การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำจะเหมือนกับการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ แต่การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำมีอัตราการเย็นตัวของผงโลหะสูงกว่า รวมทั้งของไหลที่ใช้ก็มีสมบัติแตกต่างกัน ทำให้ผงโลหะที่ผลิตได้มีรูปร่างไม่แน่นอนและมีผิวขรุขระเนื่องจากมีเวลาน้อยจะมีจะฟอร์มรูปร่างเป็นเม็ดกลมเมื่อเทียบกับการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ จำเป็นที่จะต้องเพิ่มอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทให้สูงขึ้นเพื่อควบคุมรูปร่างของผงโลหะ โดยธรรมชาติของผงโลหะที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีออกซิเจนเจือปนที่บริเวณผิวของผงโลหะ อย่างไรก็ตาม ออกซิเจนที่เจือปนสามารถทำให้ลดลงได้ด้วยการใช้ก๊าซไฮโดรเจนสำหรับบางขั้นตอน นอกจากนี้ การเลือกใช้น้ำมันสังเคราะห์หรือของไหลอื่นที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะเพื่อแทนที่น้ำจะช่วยปรับปรุงรูปร่างผงโลหะและช่วยลดการเกิดออกไซด์ได้ ข้อดีของการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำคือ ผงโลหะมีสมบัติการอัดตัวดีเยี่ยม แต่ความหนาแน่นปรากฏต่ำเมื่อเทียบกับการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ

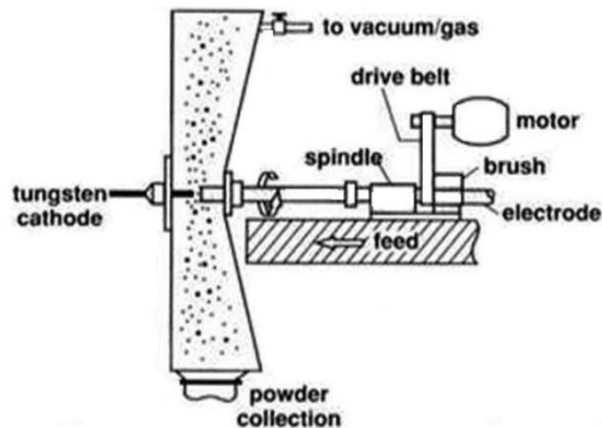
เนื่องจากการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำมีอัตราการเย็นตัวสูง อยู่ในช่วง 10^3 - 10^5 K/s ทำให้มีข้อดีอีกอย่างคือ ผงโลหะเกิดการแยกตัวขององค์ประกอบทางเคมี (Segregation) น้อยมาก



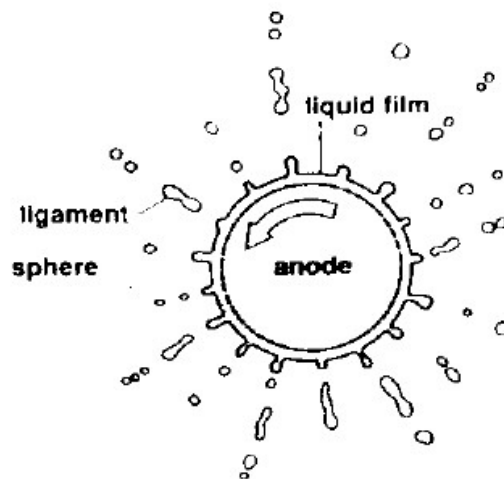
รูปที่ 2.5 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ [18]

2.5.3 การอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal atomization)

เนื่องจากโลหะที่ไวต่อการเกิดออกซิเดชัน การควบคุมขนาดอนุภาคและการผลิตผงทำได้ยาก จึงนำไปสู่การวิจัยและพัฒนาวิธีใหม่ นั่นคือ การอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง การอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง คือ กระบวนการที่ใช้แรงเหวี่ยงเพื่อทำให้น้ำโลหะแตกออกเป็นละอองขนาดเล็ก ละอองน้ำโลหะขนาดเล็กเหล่านี้ ต่อมาเย็นตัวกลายเป็นผงโลหะ หนึ่งในกระบวนการอะตอมไมเซชันประเภทนี้คือ กระบวนการหมุนขั้ว (Rotating electrode process) ใช้สำหรับผลิตผงโลหะที่เกิดออกไซด์ได้ง่าย เช่น เซอร์โคเนียม ไทเทเนียม และนิกเกิลซูเปอร์อัลลอย แนวคิดของกระบวนการนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 2.6 เครื่องอะตอมไมเซอร์ ประกอบด้วย แท่งอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วแอโนด โดยที่แท่งอิเล็กโทรดขึ้นรูปเป็นแท่งทรงกระบอกจากวัสดุที่ต้องการนำมาทำเป็นผงโลหะ แท่งอิเล็กโทรดจะเคลื่อนอย่างช้า ๆ เข้าไปในถังอะตอมไมเซอร์พร้อมกับหมุนด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อวินาที การลำเลียงแท่งอิเล็กโทรดเกิดจากอุปกรณ์ส่งกำลังที่อยู่ภายนอก แท่งอิเล็กโทรดถูกหลอมที่ปลายด้านหนึ่งโดยการอาร์คด้วยพลาสมาหรืออาร์คด้วยขั้วทั้งสแตน เมื่อแท่งอิเล็กโทรดเริ่มหลอม



รูปที่ 2.6 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีการอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยงสำหรับกระบวนการหมุนขึ้น
[18]



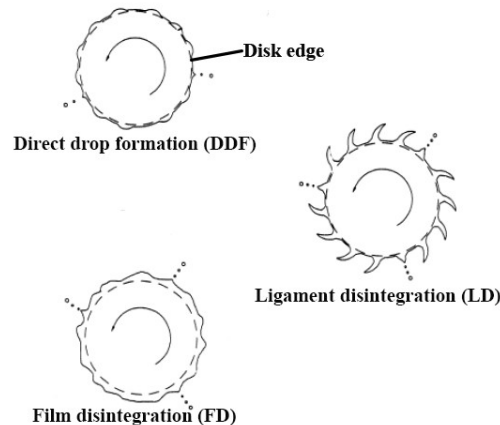
รูปที่ 2.7 การฟอร์มตัวของน้ำโลหะ ที่เกิดขึ้นบริเวณขอบของขั้วแอโนด [18]

เนื่องจากอิทธิพลของแรงเหวี่ยงทำให้น้ำโลหะที่บริเวณปลายแท่งอิเล็กโทรดแตกตัวออกเป็นละอองขนาดเล็ก โดยทั่วไปเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ กระบวนการนี้จึงผลิตผงโลหะภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย ปรัชญาการเกิดละอองน้ำโลหะบนแท่งอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วแอโนด แสดงในรูปที่ 2.7 น้ำโลหะฟอร์มรูปร่างเป็นแผ่นฟิล์มบางแผ่กระจายต่อเนื่องจนเลยขอบของแท่งอิเล็กโทรด เนื่องจากแรงเฉือนและแรงตึงผิวทำให้ฟิล์มบางฟอร์มรูปร่างลักษณะเป็นติ่ง (Protuberances) และเส้นเรียวยาว (Ligaments) ยื่นออกจากขอบของฟิล์มบาง ในกรณีที่ ความเร็วรอบของการหมุนแท่งอิเล็กโทรดต่ำและอัตราการหลอมน้อย จะทำให้เกิดละอองน้ำโลหะได้โดยตรงที่บริเวณขอบของขั้วแอโนด แต่ที่อัตราการหลอมสูง ชั้นฟิล์มบางของน้ำโลหะจะฟอร์มรูปร่างเป็นเส้นเรียวยาว ต่อมาเกิดการแตกตัวเปลี่ยนรูปร่างเป็นละอองน้ำโลหะที่มีลักษณะเป็นทรงกลม สมมติให้แรงหนีศูนย์กลางสมดุลกับแรงตึงผิวของละอองน้ำโลหะ เกิดขึ้นที่บริเวณขอบของแท่งอิเล็กโทรด ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคผงโลหะที่คาดคะเนกับตัวแปรของกระบวนการ ดังสมการที่ 2.2

$$D = \left(\frac{A}{\omega} \right) \sqrt{\frac{\gamma}{\rho_m R}} \quad (2.2)$$

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ ที่ขึ้นกับกระบวนการ ω คือ ความเร็วเชิงมุม γ คือ แรงตึงผิวของน้ำโลหะ ρ_m คือ ความหนาแน่นของน้ำโลหะ และ R คือ รัศมีของแท่งอิเล็กโทรด จากสมการที่ 2.2 พบว่าขนาดอนุภาคผงโลหะแปรผกผันกับอัตราเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรด นั่นคือ เมื่อความเร็วรอบและขนาดของแท่งอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น รวมทั้งแรงตึงผิวของน้ำโลหะลดลง ส่งผลให้ขนาดอนุภาคยิ่งเล็กลง โดยทั่วไปวิธีนี้ใช้อัตราการหลอมน้ำโลหะประมาณ $10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$ ความเร็วรอบในการหมุนแท่งอิเล็กโทรดอยู่ในช่วง 1,000-50,000 รอบต่อนาที และแท่งแอโนดมีขนาด 2-5 เซนติเมตร [17-18]

การแตกตัวของละอองน้ำโลหะ (Droplets) ในระหว่างการเกิดอะตอมไมเซอร์ แบ่งออกได้เป็น 3 กลไก แสดงในรูปที่ 2.8 กลไกที่ 1 ละอองน้ำโลหะสามารถเกิดได้โดยตรงจากฟิล์มบาง (Direct droplet formation, DDF) กลไกที่ 2 ละอองน้ำโลหะสามารถเกิดได้จากการแตกตัวของลิแกเมนต์ ที่มีลักษณะเป็นเส้นเรียวยาว (Ligament disintegration, LD) และกลไกที่ 3 ละอองน้ำโลหะสามารถเกิดได้จากการแตกตัวของฟิล์มบาง (Film disintegration, FD)

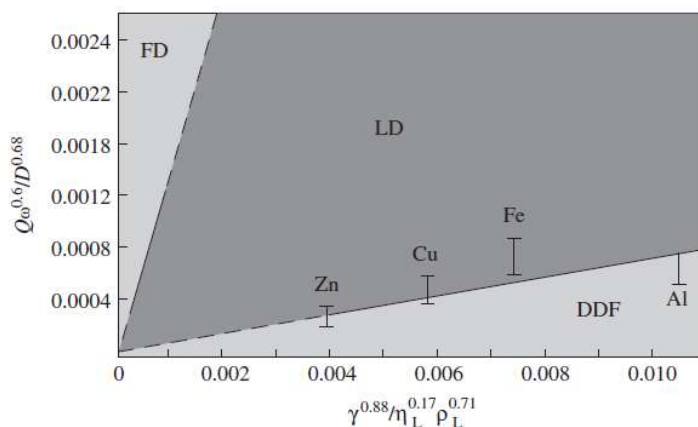


รูปที่ 2.8 กลไกการแตกตัวของน้ำโลหะที่เกิดการแตกตัวบนจานอะตอมไมเซอร์ [19]

การทดลองของ Champagne และ Angers [20] ได้แบ่งตัวแปรที่ควบคุมการเกิดกลไกเป็นสองกลุ่ม ได้แก่ ตัวแปรที่มาจากวัสดุและตัวแปรที่มาจากกระบวนการ ตัวแปรที่มาจากกระบวนการ ได้แก่ ความเร็วเชิงมุมของแท่งอิเล็กโทรด (ω) ขนาดของแท่งอิเล็กโทรด (D) และอัตราการหลอมของแท่งอิเล็กโทรด (Q) สำหรับตัวแปรที่มาจากวัสดุ ได้แก่ ความหนาแน่นของน้ำโลหะ (ρ_L) แรงตึงผิวของน้ำโลหะ (γ) และความหนืดของน้ำโลหะ (η) จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของตัวแปรที่มาจากกระบวนการต่อตัวแปรที่มาจากวัสดุเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงจากกลไกหนึ่งไปสู่อีกกลไกหนึ่ง ดังสมการที่ 2.3

$$M = \frac{Q\omega^{0.6} / D^{0.68}}{\gamma^{0.88} / \eta^{0.17} \rho_L^{0.71}} \quad (2.3)$$

จากอัตราส่วน การเปลี่ยนกลไกจาก DDF เป็น LD เกิดขึ้นที่อัตราส่วน เท่ากับ 0.07 และการเปลี่ยนกลไกจาก LD เป็น FD เกิดขึ้นที่อัตราส่วน เท่ากับ 1.33 จากอัตราส่วนเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อความเร็วเชิงมุมและอัตราการป้อนน้ำโลหะเพิ่มขึ้น รวมทั้งขนาดของแท่งอิเล็กโทรดลดลง จะมีแนวโน้มทำให้เกิดการเปลี่ยนกลไกจาก DDF เป็น LD และจาก LD เป็น FD แบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้กับโลหะได้หลายชนิด เมื่อสร้างเป็นแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของกระบวนการกับตัวแปรที่มาจากวัสดุเพื่อทำนายขอบเขตการเกิดกลไกทั้งสามแบบ (ดังรูปที่ 2.9) โดยให้แกน X เป็นตัวส่วนซึ่งค่าที่ได้มาจากตัวแปรของวัสดุ และแกน Y เป็นตัวเลขซึ่งค่าที่ได้มาจากตัวแปรของกระบวนการ แผนภาพที่ได้จะแสดงขอบเขตที่เกิดกลไกแต่ละแบบแตกต่างกันอย่างชัดเจนซึ่งช่วยให้ผู้ผลิตสามารถกำหนดกลไกการแตกตัวของน้ำโลหะโดยการปรับเปลี่ยนเฉพาะตัวแปรของกระบวนการเท่านั้น



รูปที่ 2.9 บริเวณขอบเขตของกลไกการแตกตัวรูปแบบต่าง ๆ ของน้ำโลหะสำหรับการอะตอมไม่เซชันแบบหมุนเหวี่ยง [20]

ลักษณะรูปร่าง ขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของผงโลหะยังได้รับอิทธิพลมาจากกลไกการแตกตัวของน้ำโลหะด้วยเช่นกัน กล่าวคือ กลไกการเกิด DDF เกิดจากอัตราการป้อนน้ำโลหะไปสู่บริเวณขอบของอิเล็กโทรดมีอัตราการป้อนต่ำ ส่งผลให้ตั้งนูน (Protuberance) ที่เกิดบริเวณขอบของน้ำโลหะมีน้อย และละอองน้ำโลหะที่หลุดออกมาจากตั้งนูนถูกควบคุมด้วยแรงหนีศูนย์กลางและพลังงานพื้นผิว เมื่อน้ำโลหะมีกลไกการแตกตัวแบบ DDF ผงโลหะที่ผลิตได้จะมีขนาดอนุภาคแยกเป็นสองกลุ่มที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่เป็นผงหยาบ เกิดจากละอองน้ำโลหะที่หลุดมาจากตั้งนูนเป็นลำดับแรก และผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคเล็กซึ่งเป็นผงละเอียดเกิดจากละอองน้ำโลหะที่หลุดมาจากตั้งนูนเป็นลำดับที่สอง นอกจากนี้ พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนน้ำโลหะ

ขนาดของดิ่งนูนยื่นตอกเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการแตกตัวแบบลิแกเมนต์ ผงโลหะที่ได้มีรูปร่างเป็นหยดน้ำตาเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้น

Halada และคณะ [21] ศึกษากลไกการแตกตัวทั้งในเชิงทฤษฎีและการทดลอง ได้สร้างแผนภาพที่แสดงสภาพการอะตอมไมเซชันของคุณสมบัติน้ำโลหะและเงื่อนไขในการอะตอมไมเซชัน โดยที่แผนภาพได้มาจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนน้ำโลหะ (Q) ตัวแปรอัตราการไหลไร้มิติ ตัวเลขเวเบอร์ (W) และตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) การหาค่าตัวเลขเวเบอร์และเรย์โนลด์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.5

$$W = \rho \omega^2 R^3 / \gamma \quad (2.4)$$

$$Re = R^2 \omega \rho / \eta \quad (2.5)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำโลหะ (kg/m^3), ω คือ ความเร็วเชิงมุมของจานหมุน (rad/s), γ คือแรงตึงผิวของน้ำโลหะ (N/m), η คือ ความหนืดของน้ำโลหะ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) และ R คือ รัศมีของจานหมุน (m)

เมื่อทดลอง พบว่า โดยทั่วไปน้ำโลหะเกิดกลไกการแตกตัวแบบ DDF เมื่อคำนวณหาขนาดอนุภาคเฉลี่ย (dp) ขนาดอนุภาคของผงโลหะที่เกิดจากกลไกการแตกตัวแบบ DDF มีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.6

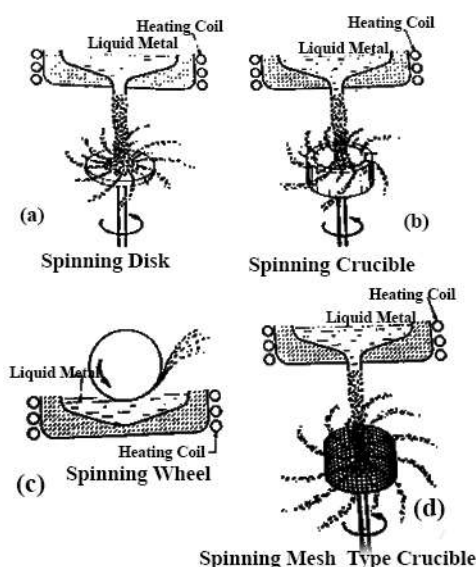
$$dp = 3.2 R W^{-1/2} \quad (2.6)$$

เมื่อ R คือ รัศมีของจานหมุน และ W คือ ตัวเลขเวเบอร์ จากสมการ 2.6 สามารถทำนายได้ว่าเมื่อความเร็วรอบของจานหมุนเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคของผงโลหะที่ได้จะมีขนาดเล็กลง และจากสมการพบว่าอัตราการป้อนน้ำโลหะไม่มีผลต่อขนาดอนุภาคของผงโลหะ

การอะตอมไมเซชันแบบหมุนขั้วมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ข้อดี คือ ผงโลหะที่ผลิตได้มีความสะอาด รูปร่างเป็นเม็ดกลม การกระจายตัวของอนุภาคแคบเพราะอัตราการเย็นตัวต่ำและอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทถูกจำกัด ขนาดอนุภาคมีความสม่ำเสมอ และการปนเปื้อนของวัสดุที่มาจากเข้าหลอมน้อย ส่วนข้อเสีย ได้แก่ อัตราการผลิตต่ำ อุปกรณ์ เครื่องมือ การดำเนินการมีราคาสูง และผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดอนุภาคใหญ่เมื่อเทียบกับการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 150-250 ไมครอน นอกจากนี้ ถ้าใช้ทั้งสแตนเป็นขั้วแคโทด จะทำให้เกิดการปนเปื้อนทั้งสแตนเจือปนในผงโลหะเพื่อหลีกเลี่ยงการเจือปนของทั้งสแตน จึงนิยมอาร์คด้วยพลาสมาแทน

การอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยงมีหลายรูปแบบขึ้นกับการหลอมโลหะจากภายนอก ในกรณีนี้ น้ำโลหะจะถูกปล่อยลงบนอุปกรณ์ที่กำลังหมุนด้วยความเร็วสูง หรือเรียกว่าจานอะตอมไมเซอร์ ซึ่งอุปกรณ์นี้มีรูปร่างแตกต่างกัน ได้แก่ จานอะตอมไมเซอร์ทรงแบน จานอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วย จานอะตอมไมเซอร์ รูปร่างคล้ายตะแกรงทรงกระบอก จานอะตอมไมเซอร์แบบล้อหมุน หรือจานอะตอม

ไมเซอร์ที่เป็นเป้าหลอมถูกออกแบบให้หมุนได้ แสดงในรูปที่ 2.10 แรงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการหมุนของจานอะตอมไมเซอร์จะทำหน้าที่เหวี่ยงน้ำโลหะให้แผ่ออกไปเป็นฟิล์มบาง ความเร็วรอบของการหมุนของจานอะตอมไมเซอร์อยู่ในช่วง 400-20,000 รอบต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานอะตอมไมเซอร์ที่ใช้อยู่ในช่วง 2-20 เซนติเมตร ผงโลหะที่ผลิตได้ด้วยวิธีนี้มักจะมีแนวโน้มการกระจายตัวแคบ จุดเด่นอีกอย่างหนึ่งของการอะตอมไมเซอร์แบบหมุนเหวี่ยง คือ สามารถผลิตผงโลหะให้มีโครงสร้างเป็นอะมอร์ฟัส โดยการใช้ก๊าซฮีเลียมแรงให้ละอองน้ำโลหะเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ การอะตอมไมเซอร์แบบหมุนเหวี่ยงยังมีอีกประเภทหนึ่ง คือ การทำให้โลหะหลอมแข็งตัวอย่างรวดเร็ว เรียกว่า Melt extraction ด้วยวิธีการหมุนล้อ เพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นแถบยาว หรือเกล็ดโลหะที่มีขนาดใหญ่



รูปที่ 2.10 รูปแบบต่าง ๆ ของการอะตอมไมเซอร์แบบหมุนเหวี่ยง (a) จานทรงแบนหมุน (b) จานทรงถ้วยหมุน (c) วงล้อหมุน และ (d) ตะแกรงหมุน [17]

2.5.4 ข้อจำกัดของการอะตอมไมเซอร์ (Atomization limitations)

ตารางที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบการอะตอมไมเซอร์ประเภทต่าง ๆ โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของอนุภาค ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และรูปร่างของผงโลหะ การอะตอมไมเซอร์ทุกประเภทมีข้อจำกัด คือความเร็วในการกระเทบน้ำโลหะต่ำกว่าความเร็วเสียง ความเร็วในการกระเทบน้ำโลหะเป็นตัวกำหนดการคายความร้อน ขนาดอนุภาคและประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน การทำให้ขนาดอนุภาคมีขนาดเล็ก นอกจากการเพิ่มความดันแล้ว การทำให้ตัวเลขเวเบอร์อยู่ในช่วง 10^3 - 10^4 ซึ่งจะต้องใช้ก๊าซที่มีความหนาแน่นและความเร็วสูงนั้นหมายความว่า เป็นไปได้ที่จะต้องใช้เทคโนโลยีหัวพ่นแบบจรวด สำหรับการควบคุมองค์ประกอบทางเคมีถือเป็นความต้องการอย่างหนึ่งของการอะตอมไมเซอร์เช่นกัน การคัดขนาดตัวขององค์ประกอบทางเคมีเกิดขึ้นในขณะที่น้ำโลหะเกิดการเย็นตัว การ

อะตอมไมเซชันด้วยน้ำทำให้โครงสร้างจุลภาคสม่ำเสมอเมื่อเทียบการอะตอมไมเซชันประเภทอื่นๆ อย่างไรก็ตาม การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำทำให้ปริมาณออกไซด์ที่ผิวของผงโลหะเพิ่มขึ้น ผงโลหะมีรูปร่างไม่แน่นอน การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซเฉื่อยช่วยทำให้ปริมาณออกไซด์ที่ผิวลดลง

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบอะตอมไมเซชันประเภทต่าง ๆ พิจารณาจากการกระจายตัวของอนุภาคขนาดอนุภาคเฉลี่ย และรูปร่างของผงโลหะ [18]

ประเภทของการอะตอมไมเซชัน	ช่วงขนาดอนุภาคของผงโลหะ (μm)	รูปร่างผงโลหะ	การกระจายตัวของผงโลหะ
การอะตอมไมเซชันแบบหมุนช้า	200-600	ทรงกลม	สองโหมด
การอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง (จาน)	50-300	ทรงกลม	ปานกลาง
การอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง (เข้าหลอม)	200-1000	ลิกาเมนต์	แคบ
อะตอมไมเซชันด้วยน้ำ	5-800	ไม่แน่นอน ก้อนกลม	กว้าง
อะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ	15-300	ก้อนกลม ทรงกลม	ปานกลาง

จากการศึกษาของ Dunkley และคณะ [8] พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การกระจายตัวของผงโลหะที่ผลิตจากการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำและก๊าซ การอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง สามารถผลิตผงโลหะที่มีการกระจายตัวของอนุภาคแคบกว่า เมื่อพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Geometric standard deviation, σ_g) พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มีค่าน้อยลง และผลผลิตผงโลหะที่ได้จากการอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง ที่อยู่ในช่วงขนาด $-150+50$ ไมครอน มีปริมาณสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำและก๊าซ ดังแสดงใน ตารางที่ 2.8

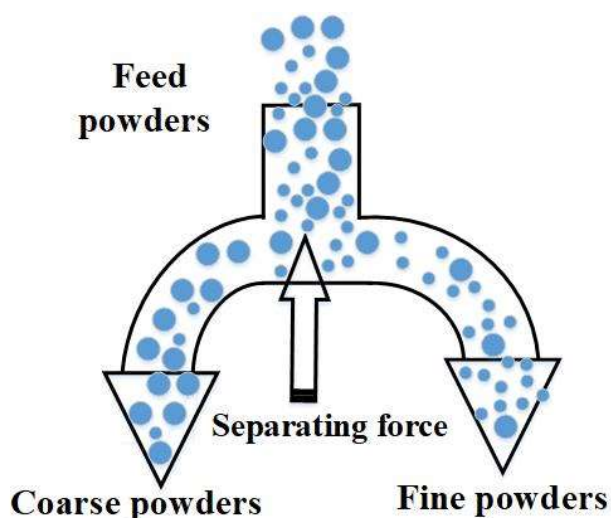
ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยงกับการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำและก๊าซ [8]

ประเภทอะตอมไมเซชัน	การอะตอมไมเซชัน ด้วยก๊าซ	การอะตอมไมเซชัน ด้วยน้ำ	อะตอมไมเซชัน แบบหมุนเหวี่ยง
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ_g)	1.8-2.3	1.8-2.3	1.3-1.5
ผลผลิตผงโลหะ (%)	50-55	50-55	85-90
ความบริสุทธิ์ของผงโลหะ	ปานกลาง	น้อย	มาก
รูปร่างของผงโลหะ	ทรงกลม ลิกาเมนต์	ไม่แน่นอน	ทรงกลม ลิกาเมนต์
การบริโภคพลังงาน (kW)	500	50-100	5
ของไหลที่ใช้	อากาศ/ก๊าซเฉื่อย	น้ำ/น้ำมัน	ไม่ใช่

2.6 การคัดขนาดผงโลหะ (Powder classification)

การคัดขนาด คือ กระบวนการที่ใช้คัดแยกผงโลหะตามขนาดของอนุภาค หลังการคัดขนาดผงโลหะที่ได้สามารถแบ่งออกเป็นหลายขนาดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เครื่องมือที่ใช้คัดขนาดผงโลหะเรียกว่าเครื่องคัดขนาด (Separators หรือ Classifiers) งานวิจัยนี้เมื่อผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้แล้ว จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องนำผงโลหะมาคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ช่วงขนาดผงโลหะตามที่ต้องการ ดังนั้นการเข้าใจในหลักการและทฤษฎีของเครื่องคัดขนาดจึงเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับงานวิจัยนี้

การคัดขนาดผงโลหะให้อยู่ในช่วงขนาดที่ต้องการนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้แรงบางประเภทกระทำกับผงโลหะนั้น ดังแสดงใน รูปที่ 2.11 ผงที่ป้อนเข้าเครื่องคัดขนาด ประกอบไปด้วย ผงหยาบและผงละเอียดปะปนกัน เมื่อมีแรงมากระทำกับผงเหล่านี้ ส่งผลให้ผงโลหะถูกแบ่งออกเป็นผงหยาบและผงละเอียด โดยทั่วไปการคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนถือได้ว่าเป็นเครื่องคัดขนาดที่ใช้ง่ายที่สุดประเภทหนึ่ง แต่ว่าเครื่องคัดขนาดประเภทนี้ไม่เหมาะกับการคัดขนาดที่มีปริมาณผงโลหะเป็นจำนวนมากและการคัดขนาดเป็นระบบต่อเนื่องที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม วิธีที่ใช้ส่วนใหญ่สำหรับการคัดขนาดแบบต่อเนื่องคือการใช้เครื่องคัดขนาดแบบใช้ลมแยก (Air separator) โดยที่ผงโลหะจะถูกทำให้ลอยตัวและฟุ้งกระจายในอากาศ ในขณะที่ผงโลหะกำลังถูกคัดขนาด แรงทางกายภาพที่กระทำกับอนุภาคผงโลหะขณะเกิดการคัดขนาดประกอบด้วย 4 แรง ได้แก่ แรงโน้มถ่วง (Gravity force) แรงฉุด (Aerodynamic drag) แรงหนีศูนย์กลางหรือแรงเหวี่ยง (Centrifugal force) และแรงในการชน (Collision force)



รูปที่ 2.11 แรงที่กระทำกับอนุภาคผงโลหะ ทำให้เกิดการคัดแยกเป็นผงหยาบและผงละเอียด

การเคลื่อนที่ของอนุภาคในโซนคัดแยก (Separation zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่แรงทางกายภาพกระทำกับอนุภาคถือเป็นบริเวณที่สำคัญของการคัดขนาดแบบใช้ลม ผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน มีผลต่อประเภทของแรงที่มากกระทำต่างกันด้วย โดยทั่วไปเครื่องคัดขนาดแบบใช้ลมแยกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เครื่องคัดขนาดที่มีอุปกรณ์บางอย่างหมุนหรือเคลื่อนที่ได้ (Dynamic separator) และเครื่องคัดขนาดที่ไม่มีอุปกรณ์ใดหมุนหรือเคลื่อนที่ (Static separator) เครื่องคัดขนาดที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 เครื่องคัดขนาดประเภทต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์ [22]

ชนิดเครื่องคัดขนาด	ประเภท	แรงที่ใช้ในการคัดขนาด
ไซโคลนลม	ไม่มีอุปกรณ์หมุนหรือเคลื่อนที่	แรงจุด / แรงโน้มถ่วง
เครื่องคัดขนาดแบบสถิต (Static separator)	ไม่มีอุปกรณ์หมุนหรือเคลื่อนที่	แรงจุด / แรงโน้มถ่วง / แรงหนีศูนย์กลาง
เครื่องคัดขนาดแบบตัววี (V-separator)	ไม่มีอุปกรณ์หมุนหรือเคลื่อนที่	แรงจุด / แรงโน้มถ่วง / แรงในการชน
เครื่องคัดขนาดแบบโรเตอร์ (Rotor separator)	มีอุปกรณ์บางอย่างหมุน	แรงจุด / แรงโน้มถ่วง / แรงหนีศูนย์กลาง / แรงในการชน

ถ้าไม่พิจารณาประเภทของเครื่องคัดขนาดผงโลหะแล้ว โดยทั่วไปการคัดขนาดจะมีขั้นตอนหลัก ดังต่อไปนี้ เริ่มจากวัสดุหรือผงโลหะที่ต้องการคัดขนาดจะถูกป้อนเข้าสู่โซนคัดแยกผ่านทางช่องป้อนหรือลำเลียงด้วยกระแสลม เนื่องจากการคัดขนาดจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อผงโลหะต้องอยู่ในสภาพลอยตัวและฟุ้งกระจาย ดังนั้นอากาศจะต้องถูกลำเลียงเข้าไปยังโซนคัดแยกด้วยเช่นกัน ต่อมาการคัด

ขนาดเกิดขึ้นในโซนคัดแยกเนื่องมาจากแรงที่มากกระทำกับอนุภาคผงโลหะ เช่น แรงจุด แรงโน้มถ่วง แรงหนีศูนย์กลาง และแรงในการชน สุดท้าย ผงโลหะจะถูกคัดขนาดออกมาเป็นสองกลุ่มคือผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เรียกว่า ผงละเอียด กับผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ เรียกว่า ผงหยาบ โดยที่ผงละเอียดจะถูกคัดแยกออกมาพร้อมกับอากาศที่ไหลออก ส่วนผงหยาบจะตกลงไปในถังเก็บผงด้วยแรงโน้มถ่วง เครื่องคัดขนาดแบบใช้ลมมีอยู่หลายประเภท แต่ที่พบว่าเป็นที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ ไซโคลนลม เครื่องคัดขนาดแบบสถิต เครื่องคัดขนาดแบบตัววี และเครื่องคัดขนาดแบบโรเตอร์

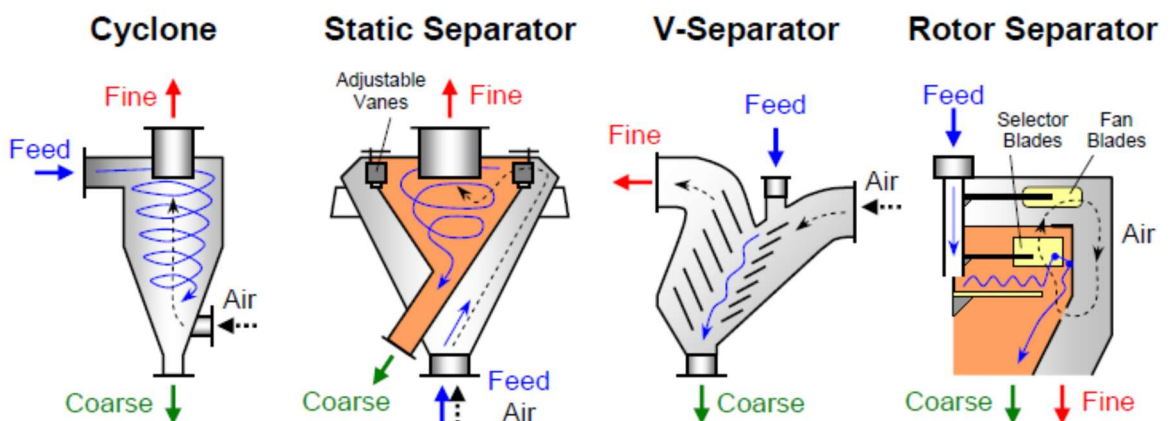
ไซโคลนลม (Air cyclone) ดังแสดงใน รูปที่ 2.12 คือ เครื่องคัดขนาดผงโลหะประเภทพื้นฐานที่สุด หลักการทำงานเริ่มจากผงโลหะถูกป้อนเข้าสู่ตัวไซโคลนผ่านท่อทางเข้า (Inlet) โดยที่ท่อทางเข้าสามารถออกแบบให้อากาศไหลเข้าตามแนวสัมผัสหรือไหลเข้าตามแนวแกนก็ได้ อากาศที่ไหลเข้าไปในไซโคลนจะเกิดกระแสวน (Vortex) แรงที่มากกระทำกับอนุภาคคือแรงโน้มถ่วงและแรงจุด ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็ก แรงโน้มถ่วงซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับมวลจะมีผลน้อยกว่าแรงจุดซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัดของอนุภาค หมายความว่า ในการคัดขนาดนั้น ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา อนุภาคจะถูกคัดแยกออกมาพร้อมกับกระแสลมเป็นผงละเอียด ในทางกลับกันถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก อนุภาคจะตกลงไปในถังเก็บด้วยแรงโน้มถ่วง ตัวแปรที่มีผลต่อความละเอียดในการคัดขนาด (Fineness) คือลำตัวของไซโคลนลมที่มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกระบอก และความเร็วลมซึ่งถูกออกแบบให้เหมาะสมกับขนาดตัด (Cut size) ค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นไซโคลนจึงไม่เหมาะสำหรับการควบคุมความละเอียดในการคัดขนาดเนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนได้เฉพาะความเร็วลมอย่างเดียว

เครื่องคัดขนาดแบบสถิต (Static separator) ดังรูปที่ 2.12 เครื่องคัดขนาดประเภทนี้ถูกออกแบบและพัฒนาให้สามารถควบคุมมุมของใบพัดที่อยู่ภายในเครื่องคัดขนาดได้ เพื่อควบคุมความละเอียดในการคัดขนาด ชุดใบพัดจะถูกติดตั้งอยู่กับที่ไม่สามารถหมุนได้แต่สามารถปรับมุมใบพัดได้ หลักการทำงานเริ่มจากผงโลหะถูกป้อนจากตำแหน่งด้านล่างเข้าสู่ตัวเครื่องคัดขนาด ด้วยกระแสลมผ่านท่อป้อน ต่อมากระแสลมที่เข้าไปสู่บริเวณถังรูปทรงกรวยที่อยู่ชั้นในจะผ่านชุดใบพัดทำให้เกิดการหมุนวนของอนุภาค การปรับมุมใบพัดจะส่งผลต่อการเพิ่มหรือลดแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นภายในถังกรวย ผงโลหะที่มีขนาดใหญ่จะตกลงสู่กรวยชั้นในด้วยแรงโน้มถ่วง ส่วนผงโลหะที่มีขนาดเล็กจะถูกกระแสลมพัดผ่านท่อที่อยู่ตรงกลางและกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดอนุภาคละเอียด ขนาดตัดของเครื่องคัดขนาดประเภทนี้ถูกควบคุมด้วยมุมของใบพัดและความเร็วลม ถึงแม้ว่าการเพิ่มมุมใบพัดจะช่วยให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางเพิ่มเพิ่ม ขนาดอนุภาคที่ได้ละเอียดขึ้น แต่จะทำให้เกิดความดันลมเพิ่มขึ้นภายในเครื่องคัดขนาด นอกจากนี้การปรับมุมใบพัดสามารถทำได้ก็ต่อเมื่ออยู่ในช่วงของการตรวจปรับปรุงเครื่องจักรเท่านั้น

เครื่องคัดขนาดแบบตัววี (V-separator) ดังแสดงใน รูปที่ 2.12 เครื่องคัดขนาดประเภทนี้ถูกพัฒนาให้ใช้งานร่วมกับขั้นตอนการบดอัดแบบใช้ลูกกลิ้ง หลักการทำงานเริ่มจากผงโลหะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องคัดขนาดผ่านท่อป้อนที่อยู่ด้านบน ผงโลหะที่ถูกป้อนจะตกผ่านชุดของแผ่นบางที่ถูกทำให้เอียง (

Inclined plates) อากาศจะถูกป้อนเข้าไปยังตัวเครื่องและตัดขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กออกมาในขณะที่ผงโลหะหล่นมาจากแต่ละชั้นของแผ่นเอียง โชนคัตแยกคือพื้นที่ระหว่างแผ่นบางเอียงและชุดแผ่นกัน ผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะถูกพาด้วยแรงดูดของกระแสลม สำหรับผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคใหญ่จะถูกเหวี่ยงออกด้วยแรงโน้มถ่วงออกจากชุดแผ่นกันกลายเป็นผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ความละเอียดในการคัดถูกควบคุมด้วยความเร็วลมเท่านั้น ดังนั้นเครื่องคัดขนาดประเภทนี้เหมาะกับผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ โดยทั่วไปผงโลหะที่ผ่านการคัดแยกด้วยเครื่องคัดขนาดนี้ก็จะม่เครื่องคัดขนาดเครื่องอื่นเพิ่มเข้ามาเพื่อคัดขนาดอนุภาคต่อไปอีก

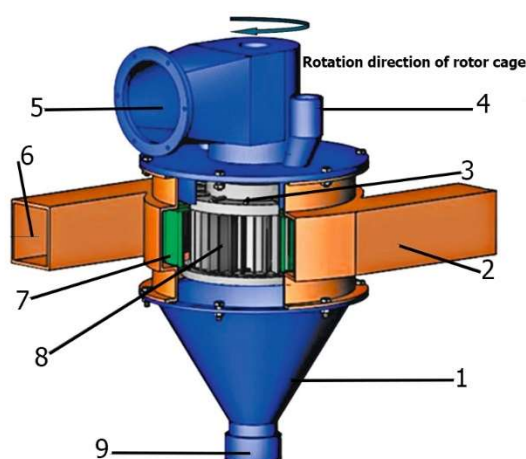
เครื่องคัดขนาดแบบโรเตอร์ (Rotor separation) ปัจจุบันเป็นเครื่องคัดขนาดมาตรฐานที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเครื่องคัดขนาดประเภทนี้ถูกออกแบบให้มีแรงทางกายภาพที่กระทำกับอนุภาคมากถึงสี่แรง ทำให้มั่นใจได้ว่าจะได้ ผงโลหะที่คัดแยกได้นั้น มีขนาดตัดที่เล็กลงและประสิทธิภาพของการคัดขนาดเพิ่มขึ้น แรงโน้มถ่วงและแรงดูดที่กระทำกับอนุภาคในเครื่องคัดขนาดแบบโรเตอร์เหมือนกับเครื่องคัดขนาดอื่น ๆ ที่กล่าวมาแล้ว แต่แรงหนีศูนย์กลางของเครื่องคัดขนาดประเภทนี้เกิดจากการหมุนของโรเตอร์ แรงหนีศูนย์กลางนี้ยังส่งผลกระทบทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาค ข้อดีอย่างหนึ่งที่เราเห็นได้ชัด คือ สามารถควบคุมความเร็วรอบของโรเตอร์ได้ขณะกำลังปฏิบัติงาน ถึงแม้ว่าเครื่องคัดขนาดประเภทนี้ในปัจจุบันจะพัฒนาไปมาก แต่เครื่องคัดขนาดที่เป็นแบบดั้งเดิมนั้นประกอบด้วยใบพัดสองชุดเชื่อมติดกับเพลารวมอันเดียวกันที่ตำแหน่งบนและล่าง ดังแสดงรูปที่ 2.12 ใบพัดชุดแรกที่อยู่ข้างบนทำหน้าที่สร้างแรงยกของอากาศที่หมุนวนภายในถังพร้อมด้วยคัตแยกและพาอนุภาคขนาดเล็กออกมา ในขณะที่อนุภาคขนาดใหญ่จะถูกเหวี่ยงไปชนกับผนังด้านในของถังด้วยแรงโน้มถ่วงที่เกิดจากใบพัดที่อยู่ด้านล่าง ข้อเสียของเครื่องคัดขนาดประเภทนี้คือการควบคุมแรงหนีศูนย์กลางให้แยกเป็นอิสระกับความเร็วลมทำได้ยาก เพราะว่าใบพัดทั้งสองชุดเชื่อมติดกับแกนหมุนเดียวกัน



รูปที่ 2.12 เครื่องคัดขนาดผงโลหะประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ลมในการคัดแยก [22]

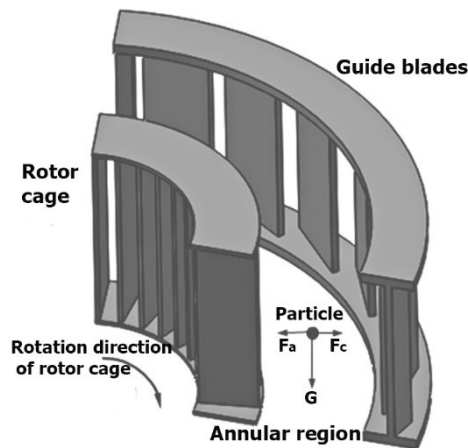
2.7 เครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม (Turbo air separator หรือ Turbo air classifier)

เนื่องจากการศึกษานี้ทำการศึกษาคัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม ซึ่งเป็นเครื่องคัดขนาดที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมาเองเพื่อใช้สำหรับงานวิจัยนี้โดยเฉพาะ ดังนั้นผู้วิจัยจึงขออธิบายมุ่งเน้นไปที่โครงสร้างของเครื่องคัดขนาดและหลักการทำงานทำงานเป็นหลัก เครื่องคัดขนาดเทอร์โบลมถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับเครื่องคัดขนาดแบบโรเตอร์ โดยทั่วไปเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลมจะประกอบด้วยโรเตอร์ที่ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกรวยกระบอกโดยมีใบพัด (Rotor blades) ติดตั้งล้อมรอบทรงกรวยกระบอกในแนวรัศมี ดังรูปที่ 2.13 โรเตอร์ลักษณะพิเศษนี้สามารถขับเคลื่อนได้อย่างอิสระด้วยเพลลาของตัวเอง บริเวณรอบโรเตอร์จะมีใบพัดเหนี่ยวนำ (Guide blades) เป็นใบพัดที่อยู่กับที่ ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้แต่ถูกออกแบบมาเพื่อทำให้เกิดการหมุนของกระแสมวลรอบตัวโรเตอร์ โชนคัดแยกจะอยู่บริเวณระหว่างใบพัดของโรเตอร์และใบพัดเหนี่ยวนำ อากาศจะไหลเข้าสู่เครื่องคัดขนาดด้วยการใช้พัดลมดูดอากาศ (Blower) จากภายนอก ขึ้นอยู่กับการออกแบบตัวเครื่องคัดขนาด อากาศสามารถไหลเข้าได้ทั้งช่องทางเข้าเดี่ยวหรือสองทาง อากาศที่ไหลเข้าสู่ตัวเครื่องคัดขนาดจะถูกทำให้หมุนด้วยใบพัดเหนี่ยวนำในทิศทางเดียวกันกับทิศการหมุนของโรเตอร์ เพื่อใช้ได้กระแสมวลที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในเครื่องคัดขนาดจะต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมากกับการออกแบบช่องทางเข้าและใบพัดเหนี่ยวนำ ตัวโรเตอร์มีหน้าที่ทำให้ความเร็วลมเพิ่มขึ้น เพราะว่าความเร็วบริเวณขอบนอกทรงกรวยกระบอกของโรเตอร์สูงกว่าความเร็วในแนวสัมผัสของอากาศที่ออกจากใบพัดเหนี่ยวนำ อากาศที่เคลื่อนที่ผ่านโชนคัดแยกจะพาอนุภาคที่มีขนาดเล็กเข้าสู่บริเวณศูนย์กลางของโรเตอร์ออกทางช่องทางออก ขึ้นอยู่กับการออกแบบช่องทางออกของอนุภาคขนาดเล็กสามารถออกแบบให้ออกทางด้านบนหรือด้านล่างก็ได้ ส่วนอนุภาคขนาดใหญ่จะถูกเหวี่ยงไปชนใบพัดเหนี่ยวนำและตกลงสู่กันถังด้วยแรงโน้มถ่วง

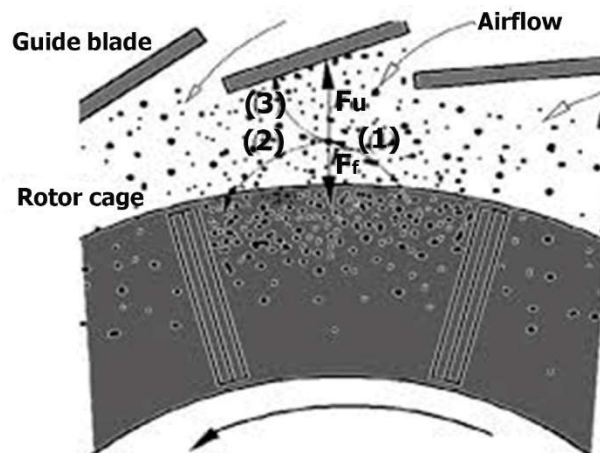


รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม (1) ท่อทรงกรวยของเทอร์โบลม (2) ส่วนลำตัวของเทอร์โบลมที่มีรูปร่างเหมือนกันหอย (3) แผ่นเพลทสำหรับช่วยกระจายผงโลหะ (4) ช่องป้อนผงโลหะ (5) ช่องทางออกผงละเอียด (6) ทางเข้าอากาศ (7) ใบพัดเหนี่ยวนำ (8) ใบพัดของโรเตอร์ (9) ช่องทางออกผงหยาบ [23]

หลักการการทำงานของเครื่องตัดขนาดเทอร์โบลม เริ่มจากผงโลหะจะถูกป้อนเข้าสู่ตัวเครื่องตัดขนาดผ่านท่อป้อนที่อยู่ด้านบน ผงโลหะที่ผ่านท่อป้อนจะตกลงบนแผ่นกระจายผงโลหะ (Distribution plate) ต่อมาผงโลหะจะถูกเหวี่ยงออก พร้อมทั้งเคลื่อนที่แบบเกลียวเนื่องจากความเร็วของแผ่นกระจายอนุภาคและการหมุนวนของอากาศที่มีความเร็วสูงที่ออกมาจากใบพัดเหนี่ยวนำ ผงโลหะเคลื่อนที่เข้าสู่ช่องว่างที่มีลักษณะเป็นรูวงแหวน (Annular gap หรือ Annular region) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยที่ช่องว่างนี้จะอยู่ระหว่างขอบด้านในของใบพัดเหนี่ยวนำและขอบด้านนอกของโรเตอร์ที่มีจุดศูนย์กลางอันเดียวกัน อนุภาคที่เคลื่อนที่ในช่องว่างนี้ไม่ได้เคลื่อนที่แบบหมุนอย่างเดียว แต่จะเคลื่อนที่แบบเส้นตรงเนื่องจากแรงเฉื่อยด้วย ภายใต้แรงต่าง ๆ ที่มากระทำกับอนุภาคผงโลหะ อนุภาคขนาดเล็กที่มีแรงเฉื่อยน้อยจะถูกคัดแยกออกทางท่อด้านบน ในขณะที่อนุภาคขนาดใหญ่แรงเฉื่อยสูงไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ช่องว่างระหว่างใบพัดของโรเตอร์ได้ จึงเคลื่อนที่ออกจากโซนคัดแยกตกลงสู่กันถึงเป็นผงหยาบ เมื่อพิจารณาแรงที่มากระทำกับอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในโซนคัดแยก ดังรูปที่ 2.15 ผงโลหะที่ถูกเหวี่ยงออกจากแผ่นกระจายอนุภาค จะเคลื่อนที่ตามแนวโคจรหมายเลข (1) เข้าสู่โซนคัดแยก ถ้าไม่พิจารณาแรงโน้มถ่วง (F_g) อนุภาคที่อยู่ภายในโซนคัดแยกจะถูกกระทำด้วยแรงหนีศูนย์กลาง (F_u) และแรงจุด (F_f) ถ้า $F_u > F_f$ อนุภาคจะเคลื่อนที่ตามแนวโคจรหมายเลข (3) ชนกับใบพัดเหนี่ยวนำตกลงสู่กันถึงเป็นผงหยาบ ในทางตรงกันข้ามถ้า $F_u < F_f$ อนุภาคจะถูกพาเข้าสู่ศูนย์กลางของโรเตอร์ด้วยกระแสลมตามแนวโคจรหมายเลข (2) และไหลออกทางท่อออกกลายเป็นผงละเอียด การเพิ่มความเร็วรอบของโรเตอร์ทำให้ F_u ที่กระทำกับอนุภาคเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อนุภาคที่มีขนาดโตกว่าที่ป้อนอยู่ในผงละเอียดถูกคัดแยกออกมาเป็นผงหยาบ ทำให้ขนาดตัดลดลงและผลผลิตผงโลหะที่มีปริมาณขนาดผงละเอียดลดลง ในทางกลับกัน การลดความเร็วรอบของโรเตอร์ทำให้ F_u ที่กระทำกับอนุภาคลดลง ส่งผลให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าที่ป้อนอยู่ในผงหยาบถูกนำเข้าสู่โรเตอร์และถูกคัดแยกรวมกันกับผงละเอียด ทำให้ขนาดตัดเพิ่มขึ้น การเพิ่มความเร็วลมคือการทำให้ F_f และแรงหนีศูนย์กลางที่กระทำกับอนุภาคเพิ่มขึ้น ทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าที่ป้อนอยู่กับผงหยาบถูกนำเข้าสู่โรเตอร์และถูกคัดแยกออกเป็นผงละเอียด ทำให้ขนาดตัดเพิ่มขึ้น แต่การลดความเร็วลมทำให้ F_f และแรงหนีศูนย์กลางที่กระทำกับอนุภาคลดลงและทำให้ F_u เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ F_f ทำให้ขนาดตัดและผลผลิตผงโลหะที่มีอนุภาคขนาดเล็กลดลง [23]



รูปที่ 2.14 โชนคัตแยก (Annular region หรือ Annular gab) ของผงโลหะ เป็นช่องว่างที่อยู่ระหว่างใบพัดเหนียวกับใบพัดของโรเตอร์ มีลักษณะเป็นรูวงแหวนทรงกระบอก [23]



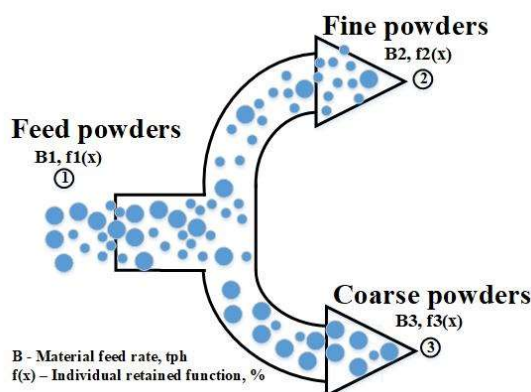
รูปที่ 2.15 อิทธิพลของของตัวแปรปฏิบัติการที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการคัตขนาดผงโลหะ [23]

เนื่องจากเครื่องคัตขนาดเทอร์โบลอมมีจุดเด่นที่แรงขับเคลื่อนโรเตอร์มาจากเพลลาที่แยกอิสระและความเร็วลมที่เข้าสู่เครื่องคัตขนาดมาจากพัดลมที่ติดตั้งภายนอก ทำให้มีอิสระในการควบคุมแรงที่มากกระทำกับอนุภาค ยิ่งไปกว่านั้นทิศทางของแรงดูดไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกันกับแรงโน้มถ่วง ในความเป็นจริงทั้งแรงดูดและแรงหนีศูนย์กลางกระทำกับอนุภาคในระนาบตั้งฉากกับทิศทางของแรงโน้มถ่วง ดังนั้นทั้งแรงหนีศูนย์กลางและแรงดูดที่ส่งผลกระทบต่อเครื่องคัตขนาดสามารถควบคุมได้อย่างอิสระต่างจากเครื่องคัตขนาดที่เคยกล่าวมา โดยที่ เครื่องคัตขนาดเหล่านั้นใช้แรงโน้มถ่วงในการคัตแยกผงหยาบซึ่งยากในการควบคุม ดังนั้นจากข้อดีที่กล่าวมาการใช้เครื่องคัตขนาดเทอร์โบลอมจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของการคัตขนาดได้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าเครื่องคัตขนาดประเภทนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการคัตขนาดให้ได้ผงละเอียดมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในขั้นตอนการคัตขนาด มีผงขนาดเล็กบางส่วนถูกคัตแยกออกมาปนอยู่กับผงหยาบ อาจเกิดมาจากหลายสาเหตุ เช่น อนุภาคเกิดการ

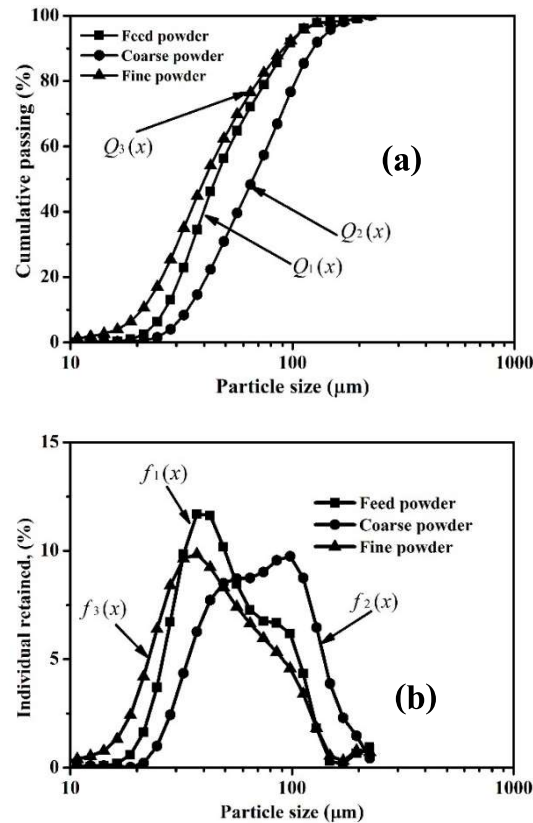
ชนกัน หรืออนุภาคมีการเกาะกลุ่มในระหว่างการคัดขนาด ทำให้ประสิทธิภาพในการคัดขนาดลดลง และเป็นสาเหตุของการเกิด ที่เรียกว่าบายพาส (Bypass) ของผงโลหะซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวอย่างหนึ่งของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม

2.8 การหาสมรรถนะของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม (Turbo air separator performance)

การหาสมรรถนะของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม คือ การหาประสิทธิภาพในการคัดขนาดอนุภาคผงโลหะ โดยทั่วไปแสดงอยู่ในรูปของเส้นโค้งประสิทธิภาพ เช่น Partition curve, Tromp curve หรือ Partial classification efficiency curve ซึ่งเป็นการหาร้อยละของอนุภาคในแต่ละช่วงขนาดที่อยู่ในผงหยาบ การคำนวณหาเส้น โค้งประสิทธิภาพมีหลักการดังต่อไปนี้ เริ่มจากผงโลหะ (Feed material) ที่ป้อนเข้าสู่เครื่องคัดขนาดเมื่อผงป้อนถูกแรงกระทำและถูกคัดแยกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ผงหยาบ (Coarse particles) และผงละเอียด (Fine particles) (ดังแสดงใน รูปที่ 2.16) ผงป้อน ผงละเอียด และผงหยาบ ที่ผ่านการคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดแล้ว จะถูกสุ่มเก็บตัวอย่างผงโลหะไปบางส่วน เพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyser) ผงตัวอย่างทั้งหมด (ผงป้อน ผงละเอียด และผงหยาบ) จะถูกวิเคราะห์หาอัตราการไหลเชิงมวล (B) และการกระจายตัว $f(x)$ ของผงโลหะในแต่ละตัวอย่าง ลักษณะข้อมูลการกระจายตัวของผงโลหะจากตัวอย่างทั้งหมด ที่ได้จากการวิเคราะห์ แสดงใน รูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 ผงป้อนที่ถูกคัดขนาดด้วยเครื่องเทอร์โบลม ถูกคัดแยกออกเป็นผงหยาบและผงละเอียด



รูปที่ 2.17 ผลการตรวจวิเคราะห์การกระจายตัวของผงโลหะ สำหรับ ผงป้อน ผงหยาบ และผงละเอียด (a) การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตรสะสม และ (b) การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตร

เส้นโค้งประสิทธิภาพ หรือ Tromp curve [22] สามารถคำนวณได้จากหลักการของการสมดุลมวล นั่นคือ ปริมาณผงโลหะที่ป้อนเข้าเครื่องคัดขนาดเท่ากับปริมาณผงโลหะที่ออกจากเครื่องคัดขนาด ในสถานะคงที่ อัตราการไหลเชิงมวลของผงป้อนที่ป้อนเข้าเครื่องคัดขนาดจะเท่ากับผลรวมของอัตราการไหลเชิงมวลของผงละเอียดและผงหยาบ ดังสมการที่ 2.7

$$B_1 = B_2 + B_3 \quad (2.7)$$

เมื่อ B_1 คือ อัตราการไหลเชิงมวลของผงโลหะที่ใช้ป้อนมีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อเวลา

B_2 คือ อัตราการไหลเชิงมวลของผงหยาบมีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อเวลา

B_3 คือ อัตราการไหลเชิงมวลของผงละเอียดมีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อเวลา

ทราบใดที่ผงโลหะที่ป้อนเข้าสู่เครื่องคัดขนาดไม่เกิดการแตกหัก ปริมาณผงโลหะที่ป้อนก็เท่ากับผงโลหะที่ถูกคัดแยกออกมา ดังสมการ 2.8

$$B1f1i = B2f2i + B3f3i \quad (2.8)$$

เมื่อ $f1i$ คือ ความถี่การกระจายตัวในแต่ละช่วงขนาดของผงป้อน

$f2i$ คือ ความถี่การกระจายตัวในแต่ละช่วงขนาดของผงหยาบ

$f3i$ คือ ความถี่การกระจายตัวในแต่ละช่วงขนาดของผงละเอียด

การคำนวณเพื่อหาค่าเส้นโค้งประสิทธิภาพ หรือ Tromp value สำหรับสัดส่วนที่ i หมายถึงความน่าจะเป็นของอนุภาคที่มาจากผงป้อนป้อนอยู่ในผงหยาบ และเท่ากับอัตราส่วนที่ได้จากมวลในสัดส่วนของผงหยาบต่อมวลในสัดส่วนของผงป้อน ดังสมการที่ 2.9

$$Tromp_i = \frac{B2 \cdot f2i}{B1 \cdot f1i} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.7 ถึง 2.9 พบว่า การคำนวณหาค่า Tromp value ต้องใช้หลายตัวแปร ดังนั้น เพื่อให้ง่ายและใช้เฉพาะข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค (PSD data) ที่ได้จาก ผงป้อน ผงหยาบ และผงละเอียด เราสามารถกำจัดตัวแปรที่ไม่ต้องการออก โดยการนำตัวแปร $f3i$ คูณกับสมการที่ 2.7 จัดรูปแบบสมการใหม่ จะได้ ดังสมการที่ 2.10

$$B3f3i = B1f3i - B2f3i \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.8 ทำการจัดรูปสมการใหม่ เพื่อกำจัดตัวแปร $B3f3i$ จัดรูปแบบใหม่ ดังสมการที่ 2.11

$$B3f3i = B1f1i - B2f2i \quad (2.11)$$

นำสมการที่ 2.10 ลบด้วยสมการที่ 2.11 และจัดรูปสมการใหม่ได้สมการที่ 2.12

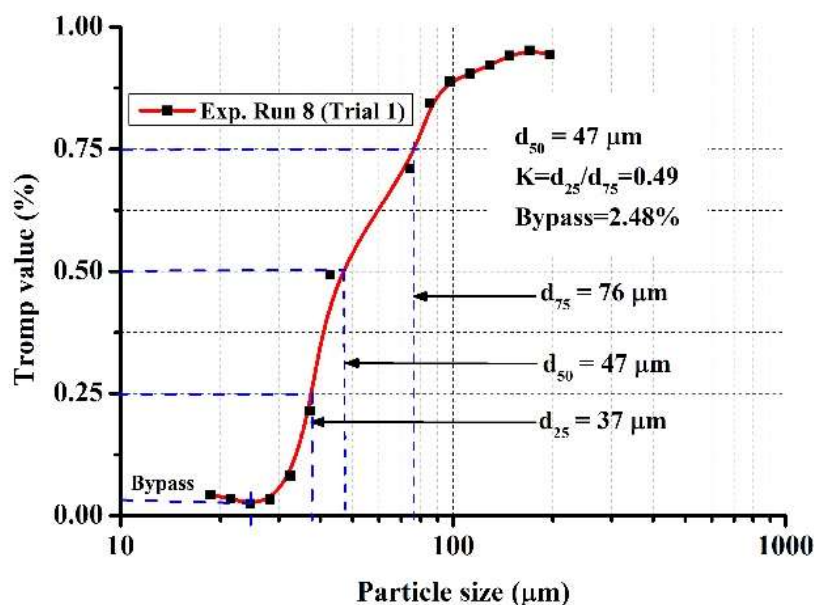
$$\frac{B2}{B1} = \frac{f1i - f3i}{f2i - f3i} \quad (2.12)$$

แทนค่าสมการที่ 2.12 ในสมการที่ 2.9 จะได้สมการของ Tromp curve ดังสมการที่ 2.13

$$Tromp Curve = \left(\frac{f2i}{f1i} \right) \times \left(\frac{f1i - f3i}{f2i - f3i} \right) \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.13 พบว่า การสร้างเส้นโค้ง Tromp curve สามารถทำได้ง่ายขึ้น เพียงใช้ข้อมูลจากค่าการกระจายตัวของอนุภาคของผงป้อน ผงหยาบ และผงละเอียด ที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเท่านั้น โดยทั่วไปเส้นโค้ง Tromp curve จะมีลักษณะคล้ายตัวเอส ดังแสดงใน รูปที่ 2.18 เส้นโค้ง Tromp curve จะบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการคัดขนาดของเครื่องคัดขนาด โดยพิจารณาจากค่าที่แสดงอยู่บนเส้น Tromp curve ดังนี้

- ขนาดตัด (Cut size หรือ Cut diameter)
- ความคมของการคัดขนาด (Sharpness of separation)
- บายพาส (Bypass value)



รูปที่ 2.18 กราฟ Tromp curve การหาค่า d_{50} และ K

ค่าขนาดตัด หมายถึง ขนาดอนุภาคที่มีโอกาสเท่า ๆ กันที่จะถูกตัดแยกโดยเครื่องตัดขนาดเป็นผงหยาบหรือผงละเอียด โดยที่ขนาดตัดพิจารณาจากค่า Tromp value ที่ 50% สัญลักษณ์ที่ใช้ขนาดตัดอาจเป็น d_{50} หรือ χ_{50} ขนาดตัดยิ่งเล็กลง ผลิตภัณฑ์หรือผงโลหะที่ตัดได้ก็ยิ่งมีขนาดเล็กลงตามไปด้วย

ค่าความคมของการตัดขนาด หมายถึง ค่าดัชนีความแม่นยำของการตัดขนาดในช่วงขนาดอนุภาคที่อยู่ตรงกลาง ค่านี้จะบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการตัดขนาดที่ขนาดตัด หาได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนขนาดอนุภาคที่ d_{25} และ d_{75} ($K = d_{25}/d_{75}$) โดยที่ d_{25} และ d_{75} คือขนาดอนุภาคที่ค่า Tromp value ที่ 25% และ 75% ตามลำดับ โดยทั่วไปจะใช้สัญลักษณ์ K ภายใต้สภาวะการตัดแยกที่เป็นแบบอุดมคติ คือ ผงหยาบและผงละเอียดถูกตัดแยกได้อย่างสมบูรณ์ ค่า $K=1$ ถ้าในกรณีเส้นโค้ง Tromp curve มีความชันเพิ่มขึ้น หมายความว่า ค่า K ที่ได้ กำลังเข้าใกล้ค่า $K=1$

ค่าบายพาสเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงปริมาณผงโลหะบางส่วนที่ไม่ถูกตัดแยกเมื่อป้อนเข้าสู่เครื่องตัดขนาด กล่าวคืออนุภาคขนาดเล็กบางส่วนเข้าไปป้อนอยู่ในผงหยาบเนื่องจากการเกาะกลุ่มของอนุภาคขนาดเล็ก ค่าบายพาสยิ่งน้อย ประสิทธิภาพในการตัดก็ยิ่งเพิ่มขึ้น

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

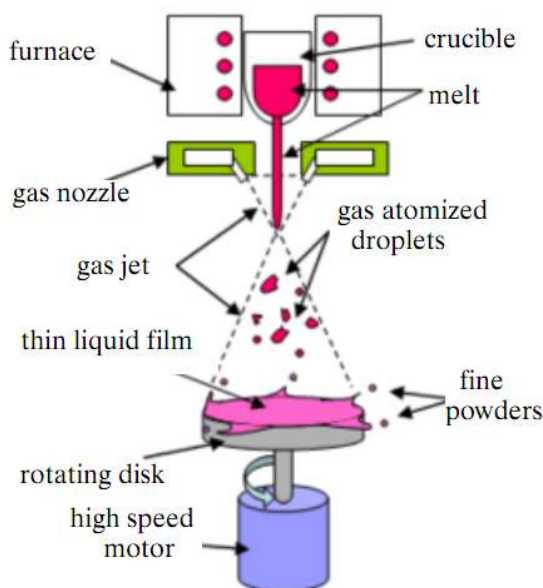
งานวิจัยของ Xie และคณะ (2004) [24] ศึกษาตัวแปรของกระบวนการ (Processing conditions) ที่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคและรูปร่างของผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยงเพื่อผลิตผงดีบุก งานวิจัยนี้ทดลองกับงานอะตอมไมเซชันที่มีรูปร่างแตกต่างกันภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ เช่น อัตราการป้อนน้ำโลหะ และความเร็วรอบของงานอะตอมไมเซชัน เป็นต้น จากการทดลอง พบว่า

ผงดีบุกที่ผลิตได้ในบรรยากาศปกติมีรูปร่างไม่แน่นอนเพราะว่าเกิดการออกซิเดชันในระหว่างอะตอมไม่เซชัน ผงดีบุกที่ผลิตได้ด้วยวิธีนี้มีการกระจายตัวแบบลึกลับ โดยที่ขนาดอนุภาคผงโลหะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของจานอะตอมไม่เซชันและอัตราการป้อนน้ำโลหะ ขนาดอนุภาคผงโลหะเพิ่มขึ้นเมื่อลดความเร็วรอบจานอะตอมไม่เซชันและเพิ่มอัตราการป้อนน้ำโลหะ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเทียบกับจานอะตอมไม่เซชันทรงแบน การใช้จานแบบทรงถ้วยที่มีขอบชันจะทำให้ขนาดอนุภาคผงโลหะลดลง 25%

เป็นที่รับรู้กันดีกว่าคริมโลหะบัดกรีที่ใช้เชื่อมประสานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ถือว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุด สามารถพูดได้ว่าเป็นปัจจัยที่ควบคุมให้ขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลง ด้วยเหตุนี้คริมโลหะบัดกรีจึงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามการบัดกรีที่ใช้ลูกบอลบัดกรี (Solder balling) มักจะเกิดข้อบกพร่องในระหว่างการบัดกรีเนื่องจากฟิล์มออกไซด์ที่เคลือบบนผิวผงโลหะ ข้อบกพร่องเหล่านี้จะปรากฏเด่นชัดมากขึ้นเมื่อนำผงโลหะไปใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการพิมพ์ลงบนแผ่นบอร์ด Reddy และคณะ (2007) [25] ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดฟิล์มออกซิเจนที่ผิวผงโลหะบัดกรี Sn-37%Pb ที่ผลิตด้วยวิธีการอะตอมไม่เซชันด้วยก๊าซ พบว่าออกซิเจนที่ปนเปื้อนมาจากหลายขั้นตอน เริ่มตั้งแต่การหลอม การอะตอมไม่เซชันด้วยก๊าซเฉื่อยและการบรรจุภัณฑ์ การใช้กระบวนการทางความร้อน (Annealing) โดยใช้ก๊าซไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กับผงโลหะที่ผ่านการอะตอมไม่เซชันมาแล้ว จะช่วยให้ปริมาณความชื้นและออกไซด์ลดลง นอกจากนี้ การ Annealing ยังช่วยลดความเค้นภายในผงโลหะอีกด้วย ในปีเดียวกัน Li และคณะ (2007) [26] ใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์การแตกตัวของฟิล์มน้ำโลหะขณะเกิดการอะตอมไม่เซชันแบบหมุนเหวี่ยงโดยใช้ทฤษฎีคลื่น (Wave theory) พบว่า เวลาที่ฟิล์มใช้ในการแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็ก (Break-up time) ไม่มีผลต่อขนาดอนุภาค แต่พบว่าระยะทางของฟิล์มที่จุดแตกตัวและขนาดอนุภาคขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของจานหมุน อนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็กลงสามารถผลิตได้ด้วยการเพิ่มความเร็วรอบของจานหมุนให้สูงขึ้น จากที่กล่าวมาแม้ว่าโลหะเกือบทุกชนิดสามารถทำเป็นผงได้ แต่วิธีการอะตอมไม่เซชันด้วยก๊าซไม่เหมาะกับการผลิตผงอะลูมิเนียมเนื่องจากมีความเสี่ยงสูงที่จะทำให้เกิดการระเบิด ถึงแม้ว่าวิธีนี้สามารถที่จะใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน เพื่อลดความเสี่ยงได้ แต่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ต่อมา Sheikhaliev และคณะ (2008) [27] ได้พัฒนาการผลิตผงอะลูมิเนียมด้วยวิธีอะตอมไม่เซชันแบบหมุนเหวี่ยงซึ่งเป็นวิธีที่มีความปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณออกซิเจนที่อยู่ภายในถังอะตอมไม่เซชันที่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของผงอะลูมิเนียม พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยขึ้นอยู่กับความเร็วของจานหมุน ผงอะลูมิเนียมที่ผลิตได้มีการกระจายตัวแคบและมีปริมาณออกซิเจนปนเปื้อนน้อย เมื่อปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไม่เซชันลดลง ผงอะลูมิเนียมที่ได้จะมีรูปร่างเป็นเม็ดกลมมากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นประจุเพิ่มขึ้นจาก 20% เป็น 50% งานวิจัยของ Shemyakina และคณะ (2010) [28] ศึกษาการผลิตผงโลหะบัดกรี (61%Sn-39%Pb) ด้วยวิธีการอะตอมไม่เซชันแบบหมุนเหวี่ยง งานวิจัยนี้เน้นไปที่การหาตัวแปรที่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคและความสม่ำเสมอของผงโลหะ พบว่าอิทธิพลของความเร็วรอบจานอะตอมไม่เซชันส่งผลต่อขนาดอนุภาคและความสม่ำเสมอของผงโลหะ

บัดกรี เมื่อความเร็วรอบของงานเพิ่มขึ้น ทำให้ขนาดอนุภาคลดลงแต่ผงโลหะที่ได้มีความสม่ำเสมอต่ำ ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ผงโลหะที่ได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) 36 ไมครอน และผลผลิต ผงโลหะที่อยู่ในช่วง 20-40 ไมครอน มีประมาณ 37% เมื่อพิจารณาระยะความสูงลำน้ำโลหะที่ตกบน งานขนาด 50 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง น้ำ โลหะแตกตัวได้ขนาดอนุภาคเล็กสุด คือ ระยะ 15 มิลลิเมตร ต่อมาเมื่อพิจารณาอิทธิพลของออกซิเจน ที่อยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์ต่อการเกิดออกซิเดชัน การไหลของผงโลหะและความหนาแน่นปรากฏ พบว่าผงโลหะที่ทำการอะตอมไมเซชันภายใต้บรรยากาศออกซิเจน 0.03% จะไหลตัวได้ดีที่สุด เนื่องจากผงมีรูปร่างเป็นเม็ดกลม อย่างไรก็ตามถ้ามีปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์เพิ่ม มากขึ้นจะส่งผลให้อนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงรี ทำให้การไหลของผงโลหะลดลง จากการทดลองยังพบว่า เมื่อระดับของการเกิดออกซิเดชันเพิ่ม ความหนาแน่นปรากฏจะลดลง ยกตัวอย่าง ที่ปริมาณออกซิเจน 0.2 wt.% ความหนาแน่นปรากฏเท่ากับ 4.2 g/cm^3 แต่เมื่อปริมาณออกซิเจนลดลงไปถึง 0.01 wt.% ค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นเป็น 4.98 g/cm^3 งานวิจัยเมื่อปี 2011 รายงานโดย Plookpol และ คณะ (2011) [29] สร้างเครื่องอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยงเพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรปฏิบัติการ (Operating parameters) ที่ส่งผลต่อลักษณะของผง SAC305 จากการทดลองพบว่า ขนาดเฉลี่ยของ อนุภาคลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบงานหมุน ลดอัตราการป้อนน้ำโลหะ และใช้งานที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน งานทรงถ้วยให้ขนาดอนุภาคละเอียดกว่าทรงแบนประมาณ 11% การลดปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ส่งผลให้ขนาดอนุภาคลดลง รูปร่างผงโลหะที่ ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ภายใต้ปริมาณออกซิเจนที่แตกต่างกัน พบรูปร่างหลายแบบ ได้แก่ เส้นยาว (Ligament) หยดน้ำตา (Teardrop) เกล็ด (Flake) และรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular) งานวิจัยนี้ พบว่า ผงโลหะมีแนวโน้มกลมขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลง การใช้ก๊าซไนโตรเจนปล่อยเข้าไปภายในถังอะตอมไมเซอร์ช่วยให้ปริมาณออกไซด์ที่ผิวผงโลหะต่ำกว่า 100 ppm นอกจากนี้ยังพบว่าผลผลิตผงโลหะ (Production yield) ที่ได้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ ของงาน ลดอัตราการป้อนน้ำโลหะและใช้งานที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อไม่นานมานี้ Furusawa และคณะ (2017) [30] ผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วด้วยวิธีการอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยงที่ใช้ความเร็ว รอบมากกว่า 100,000 รอบต่อนาที งานวิจัยนี้ต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงหนีศูนย์กลางกับ ขนาดงานหมุนและความเร็วรอบของงานหมุน รวมทั้งได้แสดงสูตรการคำนวณหาขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) ที่ได้มาจากการทดลอง จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้ (1) เมื่อผลิตผงโลหะโดยใช้งานขนาด 20 มิลลิเมตร ถึง 40 มิลลิเมตร พบว่า การเพิ่มขนาดงานจะทำให้ค่า d_{50} ลดลง สำหรับงานขนาด 40 มิลลิเมตร ให้ค่า d_{50} เทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณแตกต่างกันไม่เกิน 2% สำหรับงานขนาด 20 มิลลิเมตร ผงโลหะมีการกระจายตัวของอนุภาคกว้าง ไม่สามารถควบคุมให้อยู่ในช่วงแคบได้ จึงไม่ เหมาะสำหรับการผลิตผงโลหะในเชิงพาณิชย์ (2) เมื่อทำการอะตอมไมเซชันกับ Sn-13%Sb (Sn-13Sb) ที่ 115,000 รอบต่อนาที ผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 12.8 ไมครอน ผงโลหะที่มี ขนาดอนุภาคที่ต่ำกว่า 25 ไมครอน มีมากถึง 96.5% ถึงแม้ว่าผงโลหะที่ผลิตได้มีรูปร่างเป็นเม็ดกลม

แต่นำขนาดอนุภาคที่ละเอียดมาก ๆ จะทำให้ปริมาณออกซิเจนเจอบนสูงตามไปด้วย ดังนั้นการจัดการหลังการผลิตควรจะต้องใส่ใจเป็นพิเศษ ในปีเดียวกัน Zhang และคณะ (2017) [31] ศึกษาอิทธิพลของรูปทรงจานอะตอมไมเซอร์และพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของผงดีบุกที่ผลิตด้วยวิธีอะตอมไมเซอร์แบบหมุนเหวี่ยง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของผงดีบุกเป็นไปตามการกระจายตัวแบบล็อกปกติ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยผงโลหะที่ผลิตกับจานอะตอมไมเซอร์ทุกแบบลดลง เมื่อความเร็วรอบของจานเพิ่มขึ้น และเมื่อลดอัตราการป้อนน้ำโลหะ เพราะความหนาของชั้นฟิล์มก่อนการแตกตัวลดลง จานอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วยที่มีมุมชัน 67.5° ผลิตผงได้ละเอียดที่สุด เนื่องจากความสามารถในการเปียกกระหว่างน้ำโลหะกับจานเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของผงโลหะทุกการทดลองมีลักษณะเหมือนกันคือแบบล็อกปกติ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Geometric standard deviation) อยู่ระหว่าง 1.6-2.5 การควบคุมให้ผงโลหะมีการกระจายตัวแคบสามารถทำได้โดยการลดความเร็วรอบจานอะตอมไมเซอร์และลดอัตราการป้อนน้ำโลหะ ปัจจุบันนักวิจัยกำลังพัฒนาวิธีการใหม่ๆ ที่ใช้งานในสะดวกและราคาถูกรวมทั้งกำลังมองหาโลหะบัดกรีตัวใหม่ที่นำมาใช้แทนตะกั่ว หนึ่งในวิธีดังกล่าวคือ วิธีการอะตอมไมเซอร์แบบผสม (Hybrid atomization) ดังรูปที่ 2.19 เป็นวิธีการที่ใช้เทคนิคการผลิตอย่างน้อยสองขั้นตอนสำหรับการอะตอมไมเซอร์น้ำโลหะ โดยทั่วไปการอะตอมไมเซอร์แบบผสมขั้นตอนแรกน้ำโลหะจะถูกทำให้แตกตัวด้วยก๊าซ ต่อมาละอองน้ำที่แตกตัวในขั้นแรกจะถูกทำให้แตกตัวในขั้นที่สองด้วยจานหมุนโดยใช้แรงเหวี่ยง งานวิจัยของ Minagawa และคณะ (2003) [32] ผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-9%Zn ด้วยวิธีการอะตอมไมเซอร์แบบผสม จากการวิจัยพบว่าวิธีนี้สามารถผลิตผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก ๆ ขนาดเฉลี่ยประมาณหรือต่ำกว่า 10 ไมครอน ผงโลหะที่ผลิตได้มีความสม่ำเสมอ รูปร่างเป็นเม็ดกลม การกระจายตัวแคบ ผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคเล็กและอยู่บนเม็ดใหญ่ (Saterlites) น้อยมาก และปริมาณออกซิเจนเจอบนต่ำ พารามิเตอร์ของกระบวนการที่ส่งผลต่อผลการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท ระยะการพ่นก๊าซและความเร็วรอบจานอะตอมไมเซอร์ ต่อมา Minagawa และคณะ (2005) [33] ทำการการอะตอมไมเซอร์แบบผสมเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการอะตอมไมเซอร์แบบใช้น้ำ แบบใช้ก๊าซ และแบบหมุนเหวี่ยง ดังแสดงในตารางที่ 2.10 พบว่าการอะตอมไมเซอร์แบบผสมสามารถผลิตผงโลหะให้มีขนาดเล็กลง ผลผลิตผงโลหะเพิ่มขึ้นและการกระจายตัวแคบกว่า เมื่อเทียบกับอะตอมไมเซอร์ด้วยก๊าซ จากงานวิจัยนี้พบว่าการอะตอมไมเซอร์แบบผสมให้ผลผลิตผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 26 ไมครอนมากถึง 82%-90% แต่การอะตอมไมเซอร์ด้วยก๊าซให้ผลผลิตผงโลหะเพียง 10% ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน ถ้าทดลองโดยใช้เพียงอะตอมไมเซอร์ด้วยก๊าซอย่างเดียว ผงโลหะที่ได้เฉลี่ย 64 ไมครอน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ (σ_g) 2.0 ในทำนองเดียวกันถ้าใช้การอะตอมไมเซอร์แบบหมุนเหวี่ยงอย่างเดียว ผงโลหะที่ได้มีขนาดเฉลี่ย 80-140 ไมครอน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.3-1.5 เมื่อใช้การอะตอมไมเซอร์แบบผสม ผงโลหะที่ได้มีขนาดเล็กลง อยู่ที่ 10-15 ไมครอน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.3-1.7



รูปที่ 2.19 การอะตอมไมเซชันแบบผสมระหว่างการใช้ก๊าซและแรงหนีศูนย์กลาง [32]

ตารางที่ 2.10 การอะตอมไมเซชันแบบผสมเปรียบเทียบกับ การอะตอมไมเซชันแบบใช้น้ำ แบบใช้ ก๊าซ และแบบหมุนเหวี่ยง [33]

ประเภทของอะตอมไมเซชัน	ขนาดอนุภาค (μm)	ลักษณะการกระจายตัวและ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ_g)	รูปร่างผงโลหะ
อะตอมไมเซชันด้วยน้ำ	5-150	กว้าง (σ_g): 1.7 ± 2.4	ไม่แน่นอน
อะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ	20-100	ลึกลับ (σ_g): 2.0 ± 0.3	กลมมาก
อะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง	25-85	แคบ (σ_g): 1.3 ± 1.5	กลม
อะตอมไมเซชันแบบผสม	10-15	แคบ (σ_g): 1.3 ± 1.7	กลม

ต่อมา Yun-zhang และคณะ (2007) [34] ศึกษาพฤติกรรมการเกิดฟิล์มและการแตกตัวของน้ำ โลหะในระหว่างการอะตอมไมเซชันแบบผสม โดยใช้วัสดุ Sn-9%Zn และ Sn-40%Pb พบว่า การใช้ ความดันก๊าซต่ำ ๆ (0.5-0.7 MPa) พุ่งปะทะลำน้ำโลหะจะช่วยให้เกิดฟิล์มบางที่มีความเสถียรแตกตัว ออกมาในขั้นตอนแรก ถือได้ว่าเป็นการเตรียมพร้อมที่ดี ก่อนที่ฟิล์มเหล่านี้จะถูกทำให้แตกตัวอีกครั้ง ด้วยจานหมุน นอกเหนือจากความสามารถของจานอะตอมไมเซอร์ที่ทำให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัวแล้ว ลักษณะเฉพาะตัวของฟิล์มที่เกิดขึ้นบนจานยังส่งผลต่อกลไกการแตกตัวและผลการทดลองอย่าง ชัดเจน ส่วนใหญ่รูปแบบการแตกตัวของน้ำโลหะขึ้นอยู่กับความสามารถในการไม่มีเสถียรภาพของฟิล์มและ ความสามารถที่ทำให้เกิดการแตกตัวของจานอะตอมไมเซอร์ อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีความ เกี่ยวข้องกับความหนาของฟิล์ม การกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะขึ้นอยู่กับรูปแบบการแตกตัวและ ความเสถียรภาพของฟิล์ม รวมทั้งชนิดของการไหลบนจาน งานวิจัยนี้ยังพบว่า สำหรับวัสดุ Sn-

9%Zn มีกลไกการแตกตัวตัวแบบ DDF ส่วนวัสดุ Sn-40%Pb แตกตัวแบบ LF การแตกตัวแบบ LF ทำให้ผงโลหะที่ได้มีความสม่ำเสมอมากกว่าเมื่อเทียบกับ DDF

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องตัดขนาดเทอร์โบลมจะมุ่งเน้นที่การหาสมรรถนะการตัดแยกของเครื่องตัดขนาด ได้แก่ ขนาดตัด ความคมของการตัดขนาด และประสิทธิภาพการตัดแยก ที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะของเครื่องตัดขนาด สมบัติของผงโลหะและตัวแปรของกระบวนการ ในกรณีที่เครื่องตัดขนาดได้ถูกออกแบบมาเป็นอย่างดีและใช้ผงโลหะตัวเดิมในการตัดแยก สมรรถนะการตัดแยกจะขึ้นอยู่กับตัวแปรของกระบวนการเพียงอย่างเดียว ได้แก่ ความเร็วรอบของโรเตอร์ ความเร็วลม อัตราการป้อนผงโลหะ เป็นต้น Guo และคณะ (2007) [35] ได้ทำการวัดความเร็วลมที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างที่เรียกว่า Annular region ซึ่งเป็นช่องว่างรูปทรงกระบอกอยู่ระหว่างขอบชั้นในของใบพัดเหนี่ยวเข้ากับขอบชั้นนอกของตัวโรเตอร์ และทำการตรวจวิเคราะห์ลักษณะสนามการไหลที่เกิดขึ้นภายใน Annular region โดยทดลองใช้โรเตอร์ที่ออกแบบให้แตกต่างกัน โรเตอร์ประเภท A ออกแบบให้บริเวณด้านล่างเป็นทรงกระบอกกลวง ส่วนโรเตอร์ประเภท B ออกแบบให้มีบริเวณด้านล่างเป็นทรงโค้งเข้าด้านใน การวัดความเร็วลมใช้เทคนิคแบบ Laser doppler velocimeter (LDV) จากการทดลอง พบว่า การออกแบบให้บริเวณด้านล่างของโรเตอร์แตกต่างกันส่งผลให้การกระจายตัวของความเร็วแนวแกนและความเร็วแนวสัมผัสที่เกิดขึ้นใน Annular region แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม โครงสร้างที่แตกต่างกันไม่ได้มีผลต่อความเร็วในแนวรัศมี การวัดสนามการไหลจะใช้ผงซีเมนต์และผงแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัสดุทดสอบ พบว่า โรเตอร์ประเภท B สามารถตัดขนาดได้ดีกว่าประเภท A เนื่องจากผงโลหะมีการกระจายตัวของอนุภาคแคบกว่า นอกจากนี้ผลการทดลองยังสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดลักษณะการไหลภายใน Annular region งานวิจัยของ Feng และคณะ (2008) [36] ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการปฏิบัติการ (Operating parameter) ได้แก่ ความเร็วลมที่เข้าสู่เครื่องตัดขนาดและความเร็วรอบของโรเตอร์ ที่ส่งผลกระทบต่อสนามการไหลที่เกิดขึ้นภายในเครื่องตัดขนาดเทอร์โบลม การทดลองนี้ใช้เทคนิค Laser Doppler velocimeter (LDV) วัดความเร็วที่เกิดขึ้นภายในเครื่องตัดขนาด ผลการทดลอง พบว่าการใช้ความเร็วลมและความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต่างกัน ส่งผลต่อการกระจายตัวของความเร็วที่เกิดขึ้นภายในบริเวณระหว่างใบพัดของโรเตอร์ซึ่งเป็นความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวรัศมีแตกต่างกัน อิทธิพลของความเร็วลมและความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต่างกันส่งผลต่อการกระจายตัวของความเร็วในแนวรัศมีมากกว่าความเร็วในแนวสัมผัส เมื่อพิจารณา 2D vectorgraphs สำหรับความเร็วในแนวสัมผัสและในแนวรัศมี พบว่า ความหนาแน่น ตำแหน่ง และทิศทางของการหมุนของกระแสวน (Vortex) ที่เกิดขึ้นแตกต่างกันภายใต้ตัวแปรการปฏิบัติการที่ต่างกัน ที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที ความเร็วรอบของโรเตอร์ 600 รอบต่อวินาที ทำให้เกิดความหนาแน่นของกระแสวนต่ำสุด เมื่อเพิ่มความเร็วลมเป็น 18 เมตรต่อวินาที ความหนาแน่นของกระแสวนต่ำสุดอยู่ที่ 1200 รอบต่อวินาที ดัชนีความคมของการตัดขนาด ได้ค่าสูงสุดเมื่อใช้ค่าความเร็วลมวิกฤติ Gao และคณะ (2013) [37] ศึกษาเกี่ยวกับขนาดตัดของเครื่องตัดขนาดเทอร์โบลม โดยใช้วิธี FLUENT discrete phase model (DPM) ร่วมกับการทดสอบด้วยวัสดุจริง ผลที่ได้จากการจำลอง

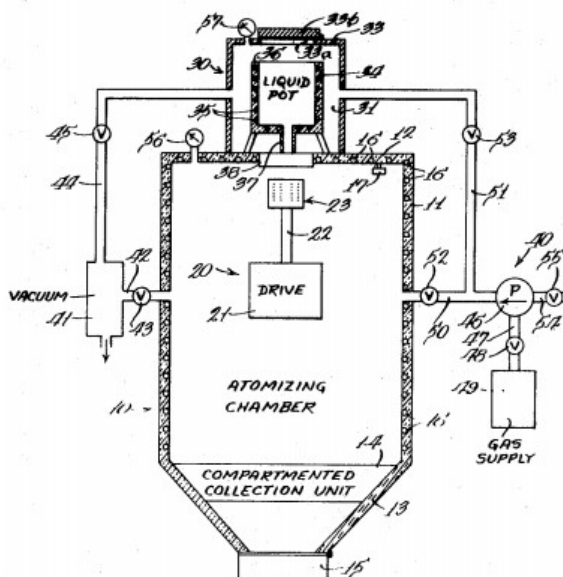
พบว่าตำแหน่งการป้อนยิ่งใกล้ขอบด้านในของ Annular region ทำให้เวลาที่อนุภาควิ่งเข้าสู่ช่องว่างระหว่างใบพัดของโรเตอร์ยิ่งน้อยลง การคำนวณด้วย FLUENT เมื่อความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที ความเร็วรอบของโรเตอร์ 800 รอบต่อนาที สำหรับทลคัม ค่าขนาดตัดที่คำนวณได้ 30-40 ไมครอน และเมื่อใช้ผงทราย ค่าขนาดตัดที่คำนวณได้ เท่ากับ 40-50 ไมครอน เมื่อใช้ความเร็วรอบโรเตอร์เพิ่มขึ้น 1200 รอบต่อนาที ค่าขนาดตัดที่คำนวณได้ของทลคัม 20-30 ไมครอน และของผงทราย 30-40 ไมครอน นอกจากนี้เมื่อทดลองเปรียบเทียบกับ การัดขนาดด้วยวัสดุจริง พบว่า สอดคล้องกับ ผลการคำนวณด้วย FLUENT งานวิจัยของ Yu และคณะ (2013) [38] ศึกษากระบวนการการัดขนาดแบบสองขั้นตอน (Two stages) ซึ่งเป็นการัดขนาดโดยใช้เครื่องัดขนาดเทอร์โบลม 2 เครื่อง ติดตั้งแบบอนุกรมเพื่อัดขนาดอนุภาคที่เล็กมาก ๆ ใช้วัสดุทดสอบเป็นผงอลูมิเนียมออกไซด์ จากการทดลอง พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วโรเตอร์ตัวแรกจาก 2300 รอบต่อนาที เป็น 2500 รอบต่อนาที โดยให้ความเร็วรอบโรเตอร์ตัวที่สองคงที่ ค่าความคมของการัดขนาด (Sharpness, K) เพิ่มขึ้นจาก 0.64 เป็น 0.67 อย่างไรก็ตามในกรณีนี้ ผลผลิตผงโลหะ (Powder yield) ที่ได้ลดลงจาก 79% เป็น 74% หมายถึง ค่าความคมของการัดขนาดและผลผลิตผงโลหะสามารถควบคุมผ่านการควบคุมความเร็วของโรเตอร์ตัวแรก เมื่อปรับความเร็วรอบของโรเตอร์ตัวที่สองเพิ่มจาก 2500 รอบต่อนาที เป็น 3100 รอบต่อนาที โดยให้ความเร็วรอบโรเตอร์ตัวแรกคงที่ ค่าขนาดตัดลดลงจาก 13.16 ไมครอน เป็น 8.76 ไมครอน หมายถึง ค่าความคมของการัดขนาด และผลผลิตผงโลหะสามารถควบคุมผ่านการควบคุมความเร็วของโรเตอร์ตัวที่สอง เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนผงจาก 35 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เป็น 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ได้ค่า Fish hook มากขึ้น ส่งผลให้ได้ผลผลิตผงโลหะที่เป็นผงละเอียดลดลง การลดค่า Fish hook สามารถทำได้โดยปรับความเร็วลมของทั้งสองตอนให้เท่ากันหรือถ้าให้ตอนแรกมีความเร็วลมสูง ตอนที่สองก็ควรปรับให้ความเร็วลมต่ำ งานวิจัยของ Yu และคณะ (2014) [39] นำเสนอโมเดลเพื่อทำนายขนาดตัดสำหรับเครื่องแยกเทอร์โบลมเนื่องจากขนาดตัดขึ้นตรงกับอัตราการป้อน ความเร็วรอบโรเตอร์และความเร็วลม วิธีนี้ถูกพัฒนามาจากสมการไร้มิติ วัสดุที่ใช้ฝึกฝนและทดสอบเป็นผงแคลเซียมคาร์บอเนตและผงทลคัม โมเดลการทำนายใช้วิธีการคำนวณแบบ Multiple-variable nonlinear regression ผลการทดลองกับผงแคลเซียมคาร์บอเนตและผงทลคัม พบว่าค่าขนาดตัดที่ได้จากการคำนวณจากโมเดล มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าค่าที่ได้จากสูตรคำนวณทางทฤษฎี อิทธิพลของแต่ละตัวแปรต่อขนาดตัดถูกคำนวณจากโมเดลนี้เพื่อหาว่าตัวแปรใดส่งผลกระทบต่อที่สุด พบว่าขนาดตัดลดลงเมื่อความเร็วรอบโรเตอร์เพิ่มขึ้นและขนาดตัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วลมเข้าสู่เครื่องัดขนาด ที่อัตราการป้อนสูง ความเป็นไปได้ที่อนุภาคขนาดเล็กเกิดการเกาะกลุ่มมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของอัตราการป้อน ส่งผลให้ขนาดตัดลดลง จากค่าดัชนีที่ส่งผลต่อขนาดตัดที่ได้จากโมเดล พบว่าความเร็วลมและความเร็วรอบโรเตอร์มีผลเด่นชัดต่อขนาดตัด ในทางตรงข้ามอัตราการป้อนมีผลน้อยมาก โดยทั่วไปเครื่องัดขนาดเทอร์โบลมจะมีความเร็วตามแนวแกนที่เกิดบริเวณ Annular region เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดผลเสียต่อความมีเสถียรภาพของสนามการไหลและยังส่งผลเสียต่อการกระจายตัวของผงโลหะที่ป้อนเข้าสู่เครื่องัดขนาด ทำให้ความคมของการัดขนาดใน

การคัดแยกกลดลง Liu และคณะ (2015) [40] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเอียงใบพัดเหนี่ยวนำ (Guide blades) เพื่อลดความเร็วตามแนวแกนสำหรับเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม จากหลักการของใบพัดเหนี่ยวนำ เมื่อทำการเอียงใบพัดจะทำให้ทิศทางการไหลของอากาศตามแนวแกนเปลี่ยนไป งานวิจัยนี้ได้ออกแบบใบพัดเหนี่ยวนำให้มีมุมเอียงแตกต่างกันสี่โมเดล ได้แก่ T-0, T-2.5, T-5 และ T-7.5 ซึ่งตัวเลขหมายถึงมุมที่เอียงจากเส้นอ้างอิงที่อยู่ในแนวตั้ง เมื่อใช้โปรแกรม FLUENT วิเคราะห์สนามการไหลภายใน Annular region ของแต่ละโมเดล พบว่า การเอียงใบพัดเหนี่ยวนำช่วยให้ความเร็วลมตามแนวแกนลดลง โดยเฉพาะกับโมเดล T-2.5 นอกจากความเร็วลมตามแนวแกนลดลง ยังทำให้ความเร็วแนวสัมผัสเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะเดียวกันสนามของแรงที่ช่วยในการคัดขนาดถูกทำให้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การกระจายตัวของผงมีมากขึ้น ผลจากการวิเคราะห์แบบ DPM พบว่า เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ใน Annular region สั้นกว่าเมื่อเทียบกับแบบ T-0 ทำให้โอกาสในการชนกันระหว่างอนุภาคและเกิดการสูญเสียพลังน้อยลง ประสิทธิภาพการคัดแยกของโมเดลแบบ T-2.5 สูงกว่าแบบ T-0 และขนาดตัดของ T-2.5 เล็กกว่าแบบ T-0 รวมทั้งค่าความคมของการคัดขนาด T-2.5 ได้ 90.7% ส่วน T-0 ได้ 88.5% เมื่อทำการทดลองคัดขนาดเปรียบเทียบระหว่าง T-2.5 กับ T-0 โดยใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่า ขนาดตัดของ T-2.5 ลดลง 0.97-8.42 ไมครอน และค่าความคมของการคัดขนาดเพิ่มขึ้น 6%-9% งานวิจัยของ Yu และคณะ (2015) [23] ทำการวิเคราะห์หาตัวแปรของกระบวนการที่ดีที่สุดที่ส่งผลต่อดัชนีสมรรถนะการคัดขนาดของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Orthogonal experiment method วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือผงทรายและผงแคลเซียมคาร์บอเนต จากการทดลอง พบว่าความเร็วลมที่เข้าสู่เครื่องคัดขนาดและความเร็วรอบของโรเตอร์มีความสำคัญต่อดัชนีสมรรถนะการคัดแยกของเครื่อง อย่างไรก็ตามอัตราการป้อนมีความสำคัญน้อยต่อดัชนีสมรรถนะการคัดแยก สภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการคัดขนาดผงทราย คือความเร็วลม 20 เมตรต่อวินาที ความเร็วรอบของโรเตอร์ 900 รอบต่อนาที และอัตราการป้อน 56.69 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพ และความคมของการคัดขนาดที่ได้ 73% และ 0.66 ตามลำดับ สำหรับสภาวะที่ดีที่สุดของการคัดขนาดผงแคลเซียมคาร์บอเนต คือ ความเร็วลม 14 เมตรต่อวินาที ความเร็วรอบของโรเตอร์ 1200 รอบต่อนาที และอัตราการป้อน 120 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพ และความคมของการคัดขนาดที่ได้ 75% และ 0.64 ตามลำดับ Sun และคณะ (2017) [41] ศึกษาการจำลองแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) และทำการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization) ของสนามการไหลสำหรับเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลมที่ใช้โรเตอร์แบบแนวนอน งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลภายในเครื่องคัดขนาด โดยที่ศึกษาอิทธิพลของทิศทางการไหลเข้าสู่เครื่องคัดขนาดต่อสมรรถนะการคัดแยกโดยใช้ผงคะตะลิสต์ (Catalysts) และเถ้าลอย (Fly ash) จากการวิเคราะห์ด้วย FLUENT-ANSYS 14.0. พบว่ากระแสวน (Vortex) ที่เกิดขึ้นในแนวตั้งภายในส่วนของเครื่องคัดขนาดที่มีลักษณะเป็นทรงกรวยมีความสำคัญอย่างมากและทำให้เกิดกระแสวนในแนวนอนบริเวณเครื่องคัดขนาดส่วนบนซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการคัดแยก ลักษณะของความเร็วในแนวสัมผัสที่เกิดขึ้นภายในโรเตอร์คล้ายกับ Rankine vortex ความ

หนาแน่นของกระแสวนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วลมทางเข้า ในขณะที่ความเร็วรอบโรเตอร์จำกัดผลของการควบคุมเส้นทางเดินของลมในบริเวณที่เกิดการคัดขนาด เมื่อทดสอบการคัดขนาดด้วยผงคะตะลิสต์และถ่านลอย พบว่า ขนาดตัดของแต่ละวัสดุลดลงจากเดิมเฉลี่ย 5 ไมครอน และ 2.2 ไมครอน ตามลำดับ รวมทั้งค่าความคมของการคัดขนาดที่ได้เพิ่มขึ้นจากเดิม 7.5% เป็น 10.3%

2.10 ลิธิบัตร์ที่เกี่ยวข้อง

ลิธิบัตร์อเมริกาหมายเลข 3720737 รายงานโดย Klaphaak และ Barnes (1973) [42] จดกระบวนการอะตอมไมเซชันแบบใช้หลักการหมุนเหวี่ยง ลิธิบัตร์เปิดเผยเทคนิคที่ทำให้น้ำโลหะที่ตกลงมาบนถ้วยที่ออกแบบให้เป็นช่องขนาดเล็กบริเวณรอบถ้วย เมื่อถ้วยหมุนด้วยความเร็วสูงน้ำโลหะจะเกิดการแตกตัวผ่านรูที่มีขนาดเล็ก น้ำโลหะที่ผ่านรูจะเย็นตัวอย่างรวดเร็ว กลายเป็นผงโลหะ เนื่องจากภายในถังอะตอมไมเซอร์บรรจุก๊าซที่ทำหน้าที่ดึงความร้อนออกจากผงโลหะ (ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) แสดงใน รูปที่ 2.20 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเย็นตัวของผงโลหะคือการควบคุมสัดส่วนระหว่างความหนาแน่นต่อความหนืดของก๊าซภายในถังอะตอมไมเซอร์ให้มีความน้อยกว่าอากาศที่ความดันบรรยากาศ โดยปกติก๊าซที่ใช้เป็นตัวดึงความร้อนภายในถังอะตอมไมเซอร์จะมีความดันมากกว่าความดันบรรยากาศ ขนาดผงโลหะที่ได้ขึ้นกับความเร็วที่น้ำโลหะแตกตัวบริเวณขอบถ้วยและชนิดของก๊าซที่บรรจุภายในถังอะตอมไมเซอร์ ในทางกลับกัน ความหนาแน่นของก๊าซมีผลโดยตรงกับความหนืด ตัวอย่างเช่น ในกรณีก๊าซมีความหนืดต่ำผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดเล็กลง ในทำนองเดียวกัน ความหนาแน่นของก๊าซที่เพิ่มขึ้นผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดเล็กลง เมื่อเทียบอัตราส่วนความหนืดต่อความหนาแน่นจะได้ค่าต่ำสุด โดยทั่วไปแล้วความหนืดของก๊าซจะเพิ่มเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นในทางปฏิบัติควรเลือกอุณหภูมิต่ำสุดในการอะตอมไมเซชัน ดังแสดงในการทดลอง ตารางที่ 2.11 ทองแดง หลอมที่อุณหภูมิ 1982 °F ขนาดถ้วย 4 นิ้ว ขนาดรู 0.05 นิ้ว ภายในถังอะตอมไมเซอร์บรรจุอากาศ ธรรมดา อุณหภูมิ 70 °F ความดัน 1 บรรยากาศ ขนาดเฉลี่ยผงโลหะ 270 ไมครอน ความเร็วการแตกตัวที่ขอบถ้วย 100 ฟุตต่อวินาที (6,000 รอบต่อนาที) เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเป็น 300 ฟุตต่อวินาที (18,000 รอบต่อนาที) ขนาดเฉลี่ยผงโลหะลดลง เป็น 100 ไมครอน เมื่อเปลี่ยนก๊าซเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ ขนาดเฉลี่ยผงโลหะลดลง เป็น 80 ไมครอน ที่ความเร็วการแตกตัวเดียวกัน



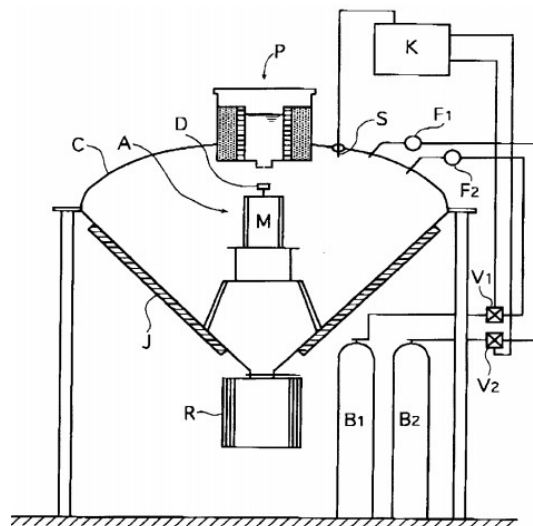
รูปที่ 2.20 เครื่องอะตอมไมเซชันแบบหมุนเหวี่ยง บริเวณรอบถ้วยถูกออกแบบให้เป็นช่องขนาดเล็ก [42]

ตารางที่ 2.11 ตัวแปรที่ใช้ในการผลิตผงทองแดง [42]

ก๊าซภายในถังอะตอมไมเซชัน	อุณหภูมิก๊าซ (°F)	ความดันก๊าซ (atm)	ความหนืด (Centipoise)	ความเร็ว (ฟุต/วินาที)	ขนาดผงโดยเฉลี่ย (μm)
อากาศ	70	1	0.018	100	270
อากาศ	70	1	0.018	200	150
อากาศ	70	1	0.018	300	100
อากาศ	70	2	0.018	100	160
อากาศ	70	3	0.018	100	120
ก๊าซ CO ₂	70	1	0.015	100	80
ก๊าซ CO ₂	290	1	0.023	100	320
ก๊าซ CO ₂	290	2	0.023	100	190
ก๊าซ CO ₂	290	3	0.023	100	140

ปัญหาการเย็นตัวของน้ำโลหะที่แตกตัวบนจานอะตอมไมเซชัน ทำให้ผงโลหะที่ยังไม่เย็นตัวเคลื่อนที่ไปชนผนังด้านในของถังอะตอมไมเซชัน ทำให้ผงโลหะเกาะกลุ่มเป็นก้อนแข็ง ผงโลหะเกิดการเสียรูป และผงโลหะมีรูปร่างไม่แน่นอน การแก้ปัญหาคือต้องออกแบบให้ถังอะตอมไมเซชันมีความกว้างเพิ่มขึ้นเพื่อให้ผงโลหะมีเวลาในการเย็นตัวอย่างสมบูรณ์ ในทางกลับกัน ถ้าผงโลหะสามารถเย็นตัวได้ในระยะเวลาสั้นจะทำให้ลดความกว้างของถังอะตอมไมเซชันได้ การใช้ก๊าซฮีเลียม (He) สามารถ

การควบคุมเวลาตั้งแต่ขั้นตอนการแตกตัวของน้ำโลหะบนจานอะตอมไมเซอร์จนถึงการเย็นตัวอย่างสมบูรณ์ในเวลาสั้นได้ เนื่องจากก๊าซฮีเลียม มีสมบัติการถ่ายโอนความร้อนได้ดี แต่การใช้ก๊าซฮีเลียมในปริมาณสูงทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงไม่เหมาะในการผลิตในระดับอุตสาหกรรม สิทธิบัตรอเมริกาหมายเลข 5917113 ยื่นจดโดย Suzuki (1999) [43] จดการปรับปรุงการอะตอมไมเซอร์แบบใช้หลักการหมุนเหวี่ยงด้วยการควบคุมปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์พบว่า ระดับการเย็นตัวไม่ได้ขึ้นอยู่กับการใช้ก๊าซอย่างเดียวแต่ขึ้นกับปัจจัยของผิวสัมผัสของผงโลหะในเวลานั้นด้วย (Surface condition) ปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์อยู่ในช่วง 3-600 ppm ช่วยให้ผงโลหะเกิดการสร้างขึ้นฟิล์มแข็งบางๆที่ผิว ช่วยลดปัญหาการเกาะกันของผงโลหะ และช่วยให้ผงโลหะไม่เสียรูปเมื่อเกิดการชนกันเองหรือชนผนังด้านในของถังอะตอมไมเซอร์ แม้ว่าผงโลหะจะเย็นตัวไม่สมบูรณ์ก็ตาม รูปที่ 2.21 แสดง เครื่องอะตอมไมเซอร์แบบใช้หลักการหมุนเหวี่ยงที่ได้ทำการปรับปรุง ตารางที่ 2.12 ตัวแปรที่ใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีตะกั่ว-ดีบุก และผงอะลูมิเนียม ปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ถูกควบคุมให้อยู่ในระดับ 50 ppm และ 20 ppm สำหรับการผลิตผงโลหะบัดกรีชนิด ตะกั่ว-ดีบุกและผงอะลูมิเนียม สำหรับเป็นตัวเติมในสีและน้ำมันขัดเงา ในกรณีที่มีปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์น้อยกว่า 3 ppm ผงโลหะไม่สามารถสร้างขึ้นฟิล์มแข็งขึ้นมาได้ ทำให้การควบคุมรูปร่างผงโลหะให้เป็นเม็ดกลมทำได้ยาก แต่ถ้าปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์มากกว่า 600 ppm จะเกิดชั้นออกไซด์ที่ผิวทำให้สมบัติทางกลด้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จะดีกว่าถ้าควบคุมปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ให้อยู่ในช่วง 10-500 ppm และจะดีที่สุดเมื่อปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์อยู่ในช่วง 20-300 ppm แต่ถ้าปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์อยู่ในช่วง 3-20 ppm ผงโลหะที่ได้จะมีแนวโน้มเป็นรูปทรงรี



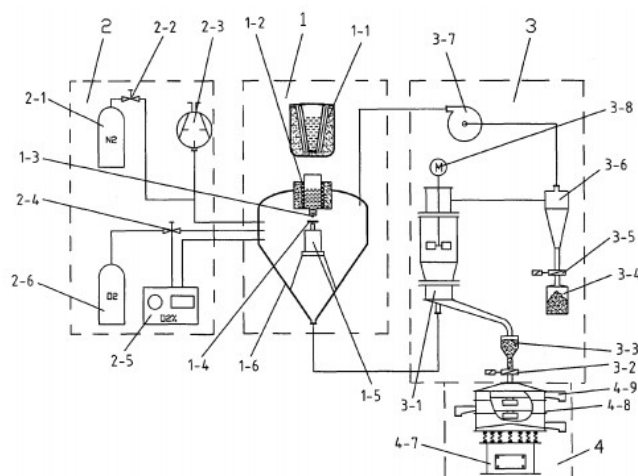
รูปที่ 2.21 เครื่องอะตอมไมเซอร์แบบอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยง ที่ได้ทำการปรับปรุงตามสิทธิบัตรของประเทศสหรัฐอเมริกา หมายเลข 5,917,113 [43]

ตารางที่ 2.12 ตัวแปรที่ใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีชนิด ตะกั่ว-ดีบุกและผงอะลูมิเนียม [43]

ประเภทของตัวแปร	ผงโลหะบัดกรีชนิด ตะกั่ว-ดีบุก	ผงอะลูมิเนียม
อุณหภูมิในเตา	250 °C	750 °C
ความเร็วรอบจานหมุน	35,000 rpm	50,000 rpm
ก๊าซ	N ₂	N ₂
อัตราการป้อน	80 kg/h	60 kg/h
ออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์	50 ppm (0.005 vol.%)	20 ppm (0.002 vol.%)
ขนาดผงโลหะ	45 μm	38 μm
ผลผลิตผงโลหะ	80%	60%

สิทธิบัตรจีนหมายเลข CN 202,804,188 U [44] จดเครื่องผลิตผงดีบุกโดยใช้หลักการอะตอมไมเซอร์แบบหมุนเหวี่ยง ผงดีบุกที่ผลิตได้มีรูปร่างเป็นเม็ดกลม การกระจายตัวแคบ ผิวเรียบ ปริมาณออกซิเจนเจือปนต่ำ ผลผลิตผงโลหะสูง และค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ เครื่องผลิตผงโลหะ ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ (1) ชุดอุปกรณ์การหลอมและควบคุมการแตกตัวของน้ำโลหะ (2) ชุดอุปกรณ์ควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ (3) ชุดอุปกรณ์ควบคุมการคัดขนาดผงโลหะด้วยระบบลม (4) ชุดอุปกรณ์การคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อน ดังแสดงใน รูปที่ 2.22 เริ่มจาก ชุดอุปกรณ์ควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ ป้อนสุญญากาศหมายเลข 2-3 ดูดอากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์จนถึงระดับ 15 Pa จากนั้นเปิดวาล์วหมายเลข 2-2 เพื่อเติมก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 99.999 ภายในถังอะตอมไมเซอร์หมายเลข 1-6 ให้มีความดันจนถึง 2 kPa เปิดอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นปริมาณออกซิเจนหมายเลข 2-5 ตั้งค่าต่ำสุดไว้ที่ 40-60 ppm ถ้าปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าค่าที่กำหนดอุปกรณ์จะส่งสัญญาณเพื่อเปิดวาล์วหมายเลข 2-4 และ 2-6 ถ้าภายในถังอะตอมไมเซอร์มีปริมาณออกซิเจนสูงกว่าค่าที่กำหนดอุปกรณ์จะส่งสัญญาณเพื่อปิดวาล์วหมายเลข 2-4 และ 2-6 ต่อมา ชุดอุปกรณ์การหลอมและควบคุมการแตกตัวของตัวน้ำโลหะ แท่งโลหะถูกหลอมในเตาหมายเลข 1-1 น้ำโลหะถูกปล่อยและพักไว้ในเตาหมายเลข 1-2 อุณหภูมิ น้ำโลหะสูงกว่าอุณหภูมิหลอมจุดหลอมเหลว 50-100 องศาเซลเซียส รูเทน้ำโลหะหมายเลข 1-3 มีขนาด 1.8 มิลลิเมตร ปล่อยน้ำโลหะลงบนถ้วยหมุนหมายเลข 1-4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ผนังถ้วยมีมุมชัน 16.5 ° มอเตอร์หมายเลข 1-5 หมุนด้วยความเร็วรอบ 50,000 รอบต่อนาที ถัดมา ชุดอุปกรณ์ควบคุมการคัดขนาดผงโลหะด้วยระบบลม อุปกรณ์หมายเลข 3-1 คัดขนาดผงโลหะโดยใช้แรงหนีศูนย์กลาง 750 รอบต่อนาที ขนาดผงที่คัดแยกได้เล็กกว่า 20 ไมครอน โดยผ่านเครื่องคัดขนาดแบบตะแกรงร่อนหมายเลข 4-9 ซึ่งตะแกรงถูกเรียงซ้อนกัน 3 ชั้น ชั้นบนสุดขนาดรูตะแกรง 75 ไมครอน ตรงกลางขนาดรูตะแกรง 45 ไมครอน ชั้นล่างสุดขนาดรูตะแกรง 25 ไมครอน ตามลำดับ ตะแกรงวางอยู่บนเครื่องอัลตราโซนิคส์สัน

ด้วยความถี่ 36 kHz ตัวอย่างผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตโดยใช้ตัวแปรต่าง ๆ ดังแสดงใน ตารางที่ 2.13



รูปที่ 2.22 เครื่องอะตอมไมเซเซอร์แบบใช้หลักการหมุนเหวี่ยงที่แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ตามสิทธิบัตรของประเทศจีน หมายเลข CN 202,804,188 U [44]

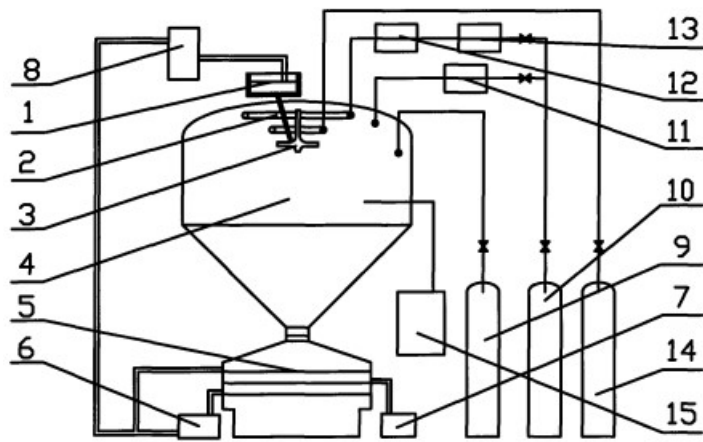
ตารางที่ 2.13 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว [44]

ประเภทของตัวแปร	ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
อุณหภูมิน้ำโลหะ	มากกว่าจุดหลอมเหลว 50-100 °C
ความเร็วรอบจานหมุน	50,000 rpm
ขนาดของจานทรงถั่ว	70 mm
ก๊าซ	N ₂ (99.999%)
อัตราการป้อนน้ำโลหะ	120 kg/h
ออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซเซอร์	40-60 ppm (0.004-0.006 vol.%)
ขนาดผงโลหะ	< 20 μm

สิทธิบัตรจีนหมายเลข CN 101,362,206 B [45] จดวิธีการผลิตผงโลหะบัดกรีคุณภาพสูงแบบต่อเนื่อง โดยพัฒนาต่อยอดจากสิทธิบัตรหมายเลข 5917113 เนื่องจากถังอะตอมไมเซเซอร์และกระบวนการผลิตผงโลหะแบบดั้งเดิม เมื่อผงโลหะเย็นตัวจะตกลงมากองอยู่ที่ก้นถังอะตอมไมเซเซอร์ ผงโลหะเหล่านี้จะคายความร้อนเกิดความร้อนสะสมภายในถังอะตอมไมเซเซอร์ ภายในถังอะตอมไมเซเซอร์จะเต็มไปด้วยหมอกควันฟุ้งกระจาย ต้องใช้เวลาอย่างน้อย 3-6 ชั่วโมง จึงเก็บผงโลหะได้ ซึ่งเป็นข้อเสียของการใช้ก๊าซเพื่อให้ผงโลหะเย็นตัว เนื่องจากโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมีจุดหลอมเหลวต่ำอยู่ในช่วง 217-224 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายในถังอะตอมไมเซเซอร์ 0.3 เท่าของจุด

หลอมเหลว ($0.3T_{mp} \sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ทำให้ผงโลหะเริ่มเสียรูป ถ้าอุณหภูมิภายในถังอะตอมไมเซอร์สูงถึง 0.7 เท่าของจุดหลอมเหลว ($0.7T_{mp} \sim 152 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ทำให้ผงโลหะเริ่มเกิดการอบผนึก โดยทั่วไปผงโลหะภายในถังอะตอมไมเซอร์ถ้าเก็บที่มีอุณหภูมิถึง 0.5 เท่าของจุดหลอมเหลว ($0.5T_{mp} \sim 108 \text{ }^{\circ}\text{C}$) จะมีประสิทธิภาพไม่คงที่ ดังนั้นวิธีผลิตผงโลหะบดกรีคุณภาพสูงแบบต่อเนื่องสามารถที่จะแก้ปัญหานี้ได้ ดังแสดงขั้นตอนใน รูปที่ 2.23 ระบบสุญญากาศหมายเลข 15 จะดูดอากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์หมายเลข 4 เติมก๊าซไนโตรเจนหมายเลข 10 เติมก๊าซไฮโดรเจนหมายเลข 14 ประมาณร้อยละ 5 เพื่อเพิ่มอัตราการการเย็นตัว ความดันภายในถังอะตอมไมเซอร์อยู่ในช่วง $1.0\text{-}1.1 \text{ atm}$ ปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์อยู่ในช่วง $20\text{-}1000 \text{ ppm}$ หลอมโลหะด้วยเตาหลอมหมายเลข 1 อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง $150\text{-}600$ องศาเซลเซียส ปล่อยน้ำโลหะผ่านท่อหมายเลข 2 น้ำโลหะจะถูกทำให้เกิดการแตกตัวด้วยหัวฉีดหมายเลข 3 หรือจานอะตอมไมเซอร์สำหรับการอะตอมไมเซอร์แบบใช้หลักการหมุนเหวี่ยง เมื่อผงโลหะเย็นตัวจะตกมาที่ถังเก็บหมายเลข 5 ประกอบด้วย ขนาดตะแกรงเบอร์ต่าง ๆ ผงโลหะที่ไม่ได้มาตรฐานจะถูกคัดขนาดออกมาเก็บในถังเก็บย่อยหมายเลข 7 ผงโลหะที่ไม่ได้มาตรฐานจะถูกดูดกลับโดยใช้ระบบลมหมายเลข 6 ในท้ายที่สุด ผงโลหะที่ไม่ได้มาตรฐานถูกลำเลียงกลับไปหลอมใหม่ด้วยสายพาน หมายเลข 8 เข้าสู่เตาหลอมหมายเลข 1

ตัวอย่าง แสดงการผลิตผงโลหะบดกรีไร้สารตะกั่ว $96.5\%\text{Sn}\text{-}3.0\%\text{Ag}\text{-}0.5\%\text{Cu}$ (SAC305) โดยใช้วิธีการอะตอมไมเซอร์แบบใช้หลักการหมุนเหวี่ยง เริ่มจาก บี้มดูดอากาศออกจากถังอะตอมไมเซอร์ด้วยอัตรา $30 \text{ m}^3/\text{h}$ จากนั้นเติมก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ เพื่อปรับปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ให้อยู่ในระดับ 80 ppm ($0.008 \text{ vol.}\%$) หลอมแท่งโลหะ SAC305 ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการป้อนน้ำโลหะ 130 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วรอบจานอะตอมไมเซอร์ $60,000$ รอบต่อนาที อุณหภูมิบริเวณใกล้จานต่ำกว่า 45 องศาเซลเซียส ผงโลหะเมื่อเย็นตัวถูกคัดขนาดด้วยตะแกรงร้อนเบอร์ 400 และเบอร์ 625 ตามลำดับ ผงโลหะขนาดมาตรฐาน ($\text{-}400\text{+}625 \text{ mesh}$) เครื่องสามารถผลิตได้ 51 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ผงที่ไม่ได้มาตรฐานถูกนำกลับไปหลอมใหม่ หลังการทดสอบผงโลหะประเภท Type 4 ที่ผลิตได้เป็นเม็ดกลม ได้ผลผลิตผงโลหะร้อยละ 98.6 มีออกซิเจนเจือปนในผงโลหะ 65 ppm และออกไซด์เจือปน $0.07 \text{ wt.}\%$ ดังแสดงในตารางที่ 2.14



รูปที่ 2.23 เครื่องอะตอมไมเซชันแบบต่อเนื่อง [45]

ตารางที่ 2.14 ตัวแปรที่ใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 [45]

ประเภทของตัวแปร	ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305
อุณหภูมิน้ำโลหะ	270 °C
ความเร็วรอบจานหมุน ก๊าซ	60,000 rpm N ₂ , H ₂ และ O ₂
อัตราการป้อนน้ำโลหะ	130 kg/h
ออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์	80 ppm (0.008 vol.%)
ออกซิเจนเจือปนในผงโลหะ	65 ppm (0.0065 wt.%)
ขนาดผงโลหะ	Type 4 (38-20 μm)
ผลผลิตผงโลหะ	98.6%

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการดำเนินงานวิจัย แบ่งเป็น 2 ตอนหลักคือ งานวิจัยตอนที่ 1 เป็นการออกแบบและสร้างระบบควบคุมบรรยากาศในถังอะตอมไมเซอร์ (Atmospheric control system) เพื่อผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ที่มีผลกระทบต่อสมบัติของผงโลหะ ได้แก่ ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของผงโลหะ รูปร่างของผงโลหะ ปริมาณออกซิเจนที่เจือปนอยู่ในผงโลหะและผลผลิตผงโลหะ และงานวิจัยตอนที่ 2 เป็นการออกแบบระบบคัดขนาดผงโลหะชนิด SAC305 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการคัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องคัดขนาดแบบเทอร์โบลัม ได้แก่ ความเร็วรอบของโรเตอร์ ความเร็วลมทางเข้า และอัตราการป้อนผงโลหะ ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการคัดขนาดของเครื่องคัดขนาดแบบเทอร์โบลัม โดยพิจารณาประสิทธิภาพของเครื่องจากขนาดตัด (Cut size, d_{50}) ซึ่งเป็นขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่เครื่องสามารถคัดแยกได้ และความคมของการคัดขนาด (Sharpness of classification, K)

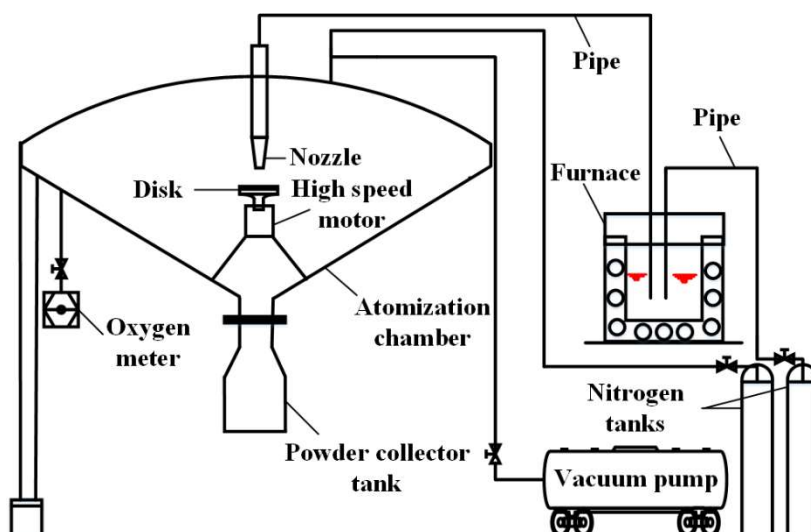
3.2 งานวิจัยตอนที่ 1 การออกแบบและสร้างระบบควบคุมบรรยากาศในถังอะตอมไมเซอร์ เพื่อผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305

งานวิจัยในตอนต้นที่ 1 ประกอบด้วย ออกแบบ สร้าง ติดตั้งระบบควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ และการทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 การศึกษาทดลองแปรเปลี่ยนปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ก่อนทำการผลิตผงโลหะที่ระดับออกซิเจนแตกต่างกัน ในช่วง 100 ppm (0.01 vol.%) – 2,000 ppm (2 vol.%) การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผงโลหะชนิด SAC305 ที่ผลิตได้ ได้แก่ การวิเคราะห์ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของผงโลหะ การตรวจลักษณะรูปร่างของผงโลหะและการวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนที่เจือปนในผงโลหะ

3.3 การออกแบบ สร้าง และติดตั้งระบบควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์

โดยทั่วไปเครื่องอะตอมไมเซอร์ที่ใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ประกอบด้วยระบบที่สำคัญ ได้แก่ (1) ระบบจ่ายน้ำโลหะ (2) ระบบควบคุมการหมุนของมอเตอร์สำหรับขับงานอะตอมไมเซอร์ (3) ระบบควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ และ (4) ระบบหล่อเย็น ซึ่งในแต่ละระบบจะมีอุปกรณ์ที่สำคัญแตกต่างกันไป เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยที่ต่อยอดมาจาก

โครงการวิจัยเรื่องการออกแบบและพัฒนาเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีการอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเพื่อใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ซึ่งได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2554-2555 ซึ่งผลการวิจัยจากโครงการดังกล่าว สามารถสร้างเครื่องและผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้ แต่คุณภาพผงโลหะยังไม่ตรงตามมาตรฐานโลหะผงที่ใช้ในการผลิตครีมีโลหะบัดกรี กล่าวคือผงโลหะจะต้องมีขนาดเล็กกว่า $45\ \mu\text{m}$ รูปร่างของผงโลหะต้องมีรูปร่างเป็นทรงกลมและปริมาณออกซิเจนเจืออยู่ในผงโลหะในปริมาณน้อยกว่า 100 ppm จากการสืบค้นข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมาและข้อมูลสิทธิบัตร พบว่า การที่จะสามารถผลิตผงโลหะให้มีรูปร่างเป็นเม็ดกลมและมีออกซิเจนเจือปนต่ำนั้น จำเป็นที่จะต้องมึระบบควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอ์ให้มีปริมาณออกซิเจนเหลืออยู่ในถัง $< 500\ \text{ppm}$ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงเป็นการปรับปรุงเครื่องอะตอมไมเซอ์ที่มีอยู่เดิมแล้ว ให้สามารถทำการผลิตผงโลหะภายใต้บรรยากาศควบคุมที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำ ๆ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบ สร้างระบบควบคุมบรรยากาศและติดตั้งเข้ากับเครื่องอะตอมไมเซอ์เครื่องเดิมที่มีอยู่แล้ว ระบบควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอ์ที่ออกแบบสร้างขึ้นใหม่ ดังแสดงใน รูปที่ 3.1 ประกอบด้วย ป้อนสุญญากาศ ระบบจ่ายก๊าซไนโตรเจน จากถังไนโตรเจนเหลว ระบบเก็บตัวอย่างก๊าซและวัดปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ภายในถังอะตอมไมเซอ์ สำหรับถังอะตอมไมเซอ์ของเดิมได้ทำการปรับปรุง เสริมแรงโครงสร้างของถังให้สามารถทนต่อภาวะสุญญากาศได้ในขณะที่ทำการสูบอากาศภายในถังออก และเติมก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่เพื่อเจือจางปริมาณออกซิเจนที่ยังเหลืออยู่ ทำให้ระดับปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอ์ลดลง



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเครื่องผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่ออกแบบและสร้างขึ้น สำหรับใช้ในงานวิจัย

3.3.1 การติดตั้งระบบควบคุมบรรยากาศในถังอะตอมไมเซอร์

ระบบควบคุมบรรยากาศในถังอะตอมไมเซอร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น ประกอบด้วย ส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

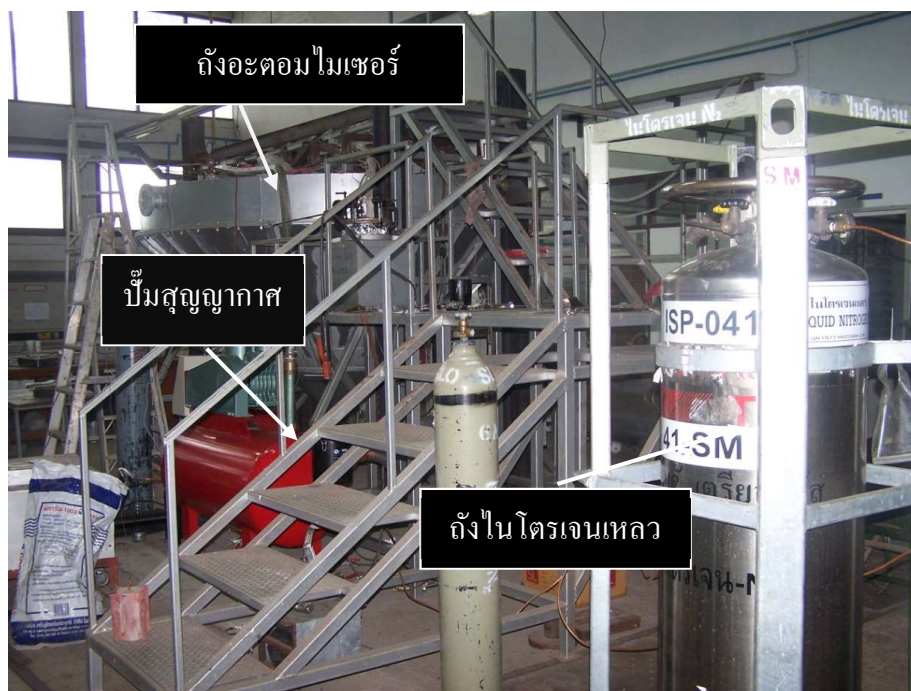
1) อุปกรณ์สูบลมอากาศออกจากถังอะตอมไมเซอร์ ได้แก่ ปัมป์สุญญากาศ ยี่ห้อ SHIKO SEIKI รุ่น SR-500 อัตราสูบ 550 ลิตรต่อนาที เชื่อมต่อกับสายยางสูบลมอากาศขนาด 2 นิ้ว ยาว 5 เมตร มีฟิวเตอร์เป็นตัวกรองอากาศเพื่อป้องกันฝุ่นอะอองจากภายในถังไหลเข้าสู่ตัวปัมป์สุญญากาศ

2) อุปกรณ์จ่ายก๊าซหรือป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ถังอะตอมไมเซอร์ ได้แก่ ถังบรรจุไนโตรเจนเหลว (Portable Cryogenic Container หรือถัง PCC) ขนาดบรรจุ 180 ลิตร เป็นถังทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.68 เมตร สูง 1.80 เมตร สามารถผลิตก๊าซไนโตรเจนได้ 9 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ต่อกับท่อทองแดงขนาด 2/8 นิ้ว และ ขนาด 3/8 นิ้ว มีเรกกูเรเตอร์ สำหรับควบคุมความดันก๊าซ

3) เครื่องมือตรวจวัดตัวอย่างก๊าซภายในถังอะตอมไมเซอร์ ได้แก่ อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณออกซิเจน (Oxygen analyzer) ยี่ห้อ Daiichi Nekken รุ่น TB-WI ช่วงการวัด 0-9,999 ppm O₂ (0-99.99 % O₂) ดังแสดงใน รูปที่ 3.2 ต่อเข้ากับท่อทองแดงขนาด 2/8 นิ้ว ซึ่งถูกออกแบบให้ติดอยู่บริเวณฝาด้านบนของถังอะตอมไมเซอร์ เมื่อประกอบระบบต่าง ๆ แล้ว ดังแสดงใน รูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 เครื่องตรวจวัดปริมาณออกซิเจนที่อยู่ภายนอกถังอะตอมไมเซอร์



รูปที่ 3.3 เครื่องอะตอมไมเซอร์ที่ติดตั้งระบบควบคุมบรรยากาศแล้ว

3.3.2 การปรับปรุงถังอะตอมไมเซอร์

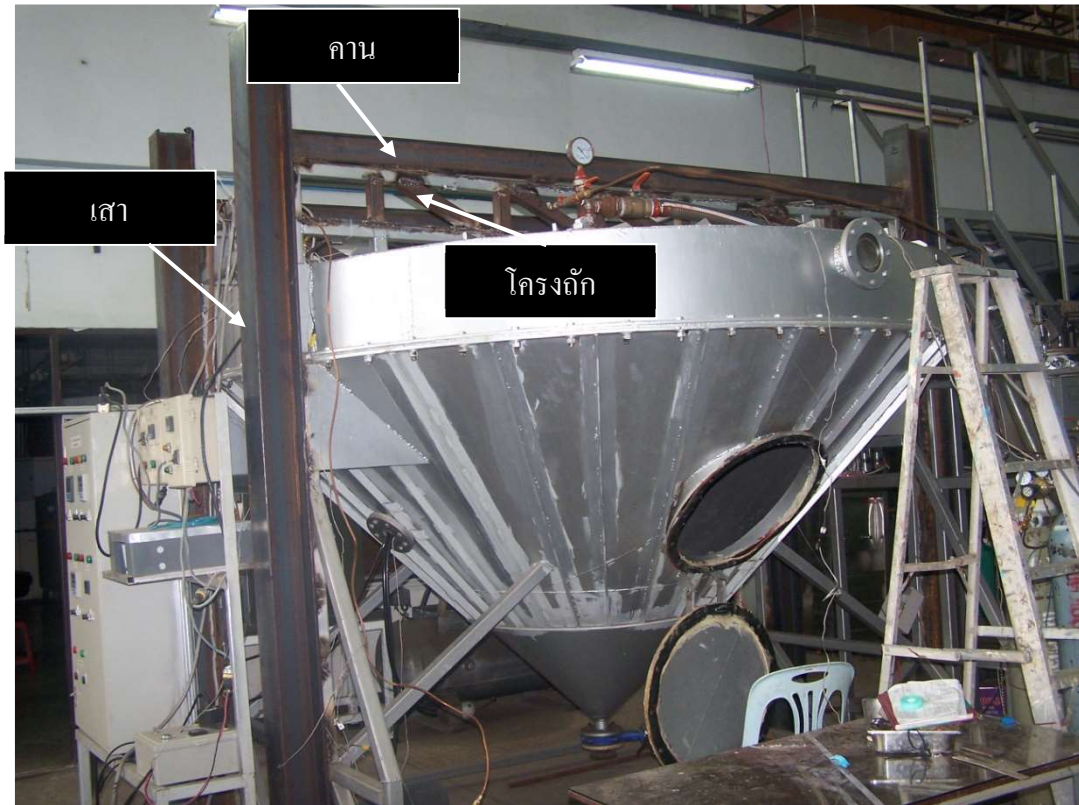
ในเบื้องต้นได้ทำการทดสอบการสูบลมอากาศออกจากถังอะตอมไมเซอร์ พบว่าฝาด้านบนยุบลงมา ฝาดังและหัวฉีดน้ำโลหะ (Nozzle) ถูกออกแบบให้ยึดติดอยู่ด้วยกัน เมื่อฝาดังยุบตัวลงมาทำให้หัวฉีดน้ำโลหะเคลื่อนที่ต่ำลง ที่ความดัน 15 cm Hg หัวฉีดน้ำโลหะเคลื่อนที่ลงมาเกือบชนกับจานอะตอมไมเซอร์ (Rotating disk) จากปัญหาที่พบ ผู้วิจัยต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างด้านบนโดยการเสริมคานรับน้ำหนักฝาดัง และเสายึดถังอะตอมไมเซอร์ เพื่อไม่ให้ฝาดังเกิดการยุบตัวในขณะที่ทำการสูบลมอากาศออกจากและทนความดันได้มากกว่า 15 cm Hg รายละเอียดการปรับปรุงโครงสร้างของถังอะตอมไมเซอร์ แบ่งเป็น 2 ส่วน ดังแสดงใน รูปที่ 3.4 คือ

(1) เสารับน้ำหนักถังอะตอมไมเซอร์ ใช้เหล็กรูปตัวเอช (H beam) ขนาด 6 นิ้ว x 6 นิ้ว ยาว 6 เมตร 2 เส้น ตัดแบ่งครึ่งได้ 4 เส้น เชื่อมประกบกับเสาเดิมที่เป็นเหล็กกล่องหน้าตัด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ที่ฐานล่างของเสาองด้วยเหล็กแผ่นหนา 2/8 นิ้ว กว้าง 8 นิ้ว ยาว 8 นิ้ว

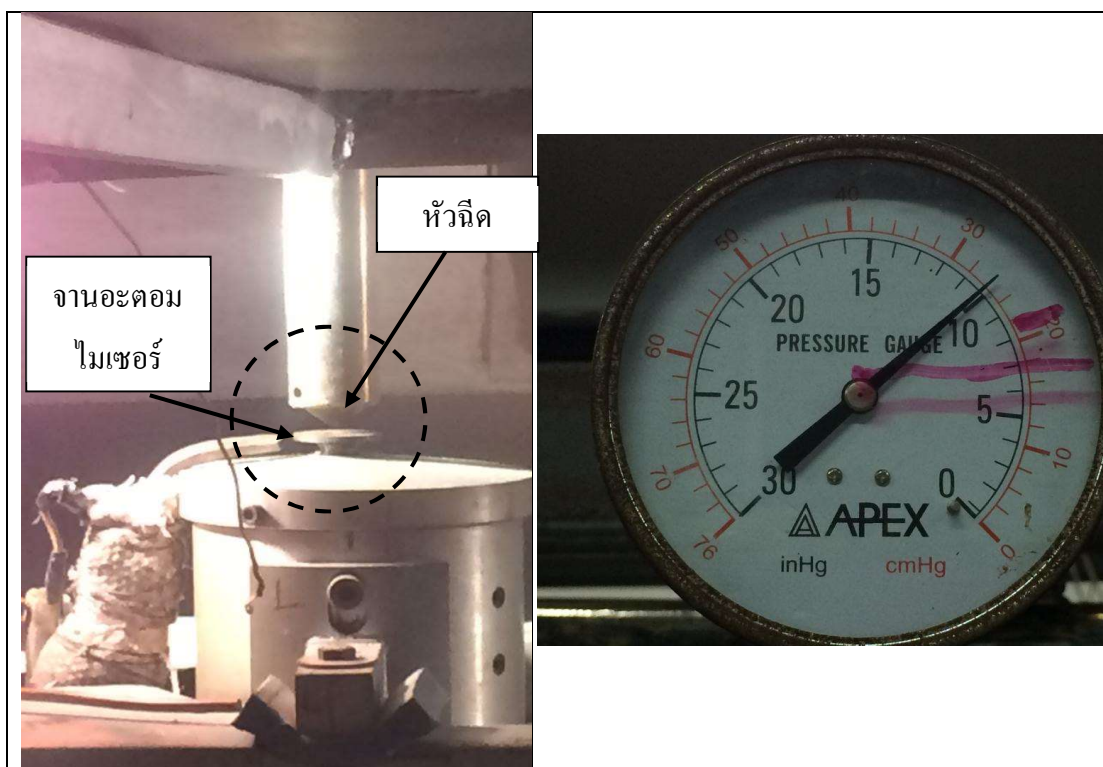
(2) คานรับน้ำหนักฝาดังอะตอมไมเซอร์ และโครงถักกระจายแรง ใช้เหล็กโวด์แฟรงค์ ขนาด 4 นิ้ว x 2 นิ้ว ยาว 6 เมตร 1 ท่อน ตัดแบ่งครึ่งได้ 2 ท่อน เชื่อมประกบกับคานเดิมทั้งสองด้าน ด้านหัวท้ายเชื่อมประกบติดกับเสา นอกจากนี้ยังได้เสริมเหล็กกล่องขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ข้างละ 6 ท่อน และเพิ่มเหล็กเฉียงบนฝาของถังทั้งสองด้าน ด้านละ 5 ท่อน เพื่อให้คานได้กระจายแรงและรั้งฝาดังอะตอมไมเซอร์ไม่ให้ยุบตัว

เมื่อทำการปรับปรุงโครงสร้างถังอะตอมไมเซอร์เสร็จแล้ว สามารถสูบลมอากาศออกได้มากที่สุดที่ความดัน 26 cm Hg (รูปที่ 3.5) ฝาดังอะตอมไมเซอร์ยุบตัวเพียงเล็กน้อย ทำให้การสูบลมอากาศออก

ได้มากกว่าเดิมจาก 15 cm Hg เป็น 26 cm Hg ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการทดลอง จึงทำการสูบอากาศออกที่ความดันไม่เกิน 25 cm Hg



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของถังอะตอมไมเซอร์ที่ทำการปรับปรุงแล้ว



รูปที่ 3.5 (ซ้าย) ก่อนการเสริมแรงฟลาถึงอะตอมไมเซอร์เมื่อสูบอากาศออกหัวฉีดน้ำโลหะเคลื่อนที่ต่ำลงจนเกือบสัมผัสจานอะตอมไมเซอร์ (ขวา) เกจวัดความดันอากาศที่อยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์

3.3.3 การเก็บตัวอย่างก๊าซจากภายในถังอะตอมไมเซอร์เพื่อตรวจวิเคราะห์

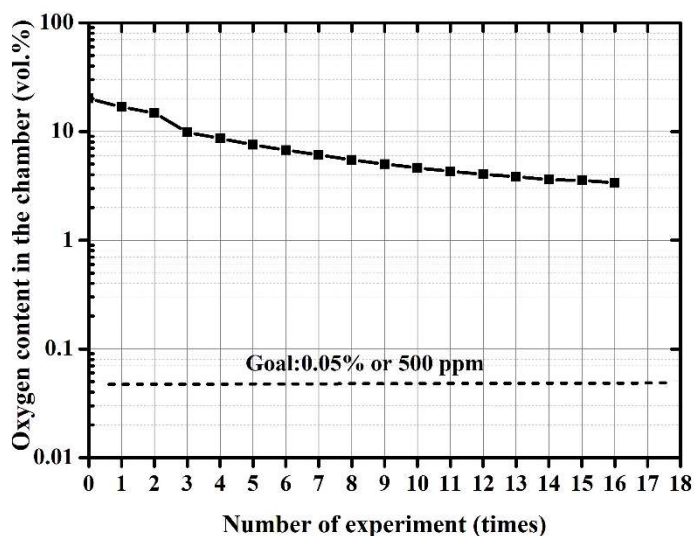
ปริมาณออกซิเจน

ในทางปฏิบัติ การสูบอากาศออกจากถังอะตอมไมเซอร์ต้องสูบอากาศออกให้ได้มากที่สุด เพื่อให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์เหลือน้อยที่สุด ก่อนที่จะปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ในถังอะตอมไมเซอร์ เพื่อปรับบรรยากาศภายในถังให้มีปริมาณออกซิเจนตามที่ต้องการ แต่เนื่องจากถังอะตอมไมเซอร์เดิมที่สร้างขึ้น เป็นถังแบบผนังบางไม่สามารถทนการสูบอากาศที่ความดันสูงมากได้ ดังนั้น จึงต้องสูบอากาศออกและปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่หลายครั้ง จนปริมาณออกซิเจนลดลงถึงระดับตามที่ต้องการ ในช่วงแรกของการทดลอง ตั้งเป้าการลดปริมาณออกซิเจนภายในถังไว้ที่ระดับ 0.05 vol.% หรือ 500 ppm จากการทดสอบระบบพบว่า ปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์ลดลงจาก 21 vol.% ถึง 3 vol.% ต้องทำการสูบอากาศออกและปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ถึง 16 ครั้ง ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 3.6 เมื่อวิเคราะห์ผลการลดปริมาณออกซิเจนจากกราฟ พบว่าการลดลงของออกซิเจนแต่ละครั้งน้อยมาก ปริมาณออกซิเจนมีแนวโน้มคงที่ ที่ 3 vol.% เมื่อทำการทดสอบซ้ำก็ยังคงได้ผลการทดลองเช่นเดิม ผลการวิเคราะห์สาเหตุสรุปว่า

(1) ถังอะตอมไมเซอร์มีการรั่วซึมของอากาศจากภายนอกเข้าสู่ภายใน ทำให้ไม่สามารถลดปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ให้ถึงระดับ 500 ppm ตามที่ต้องการได้

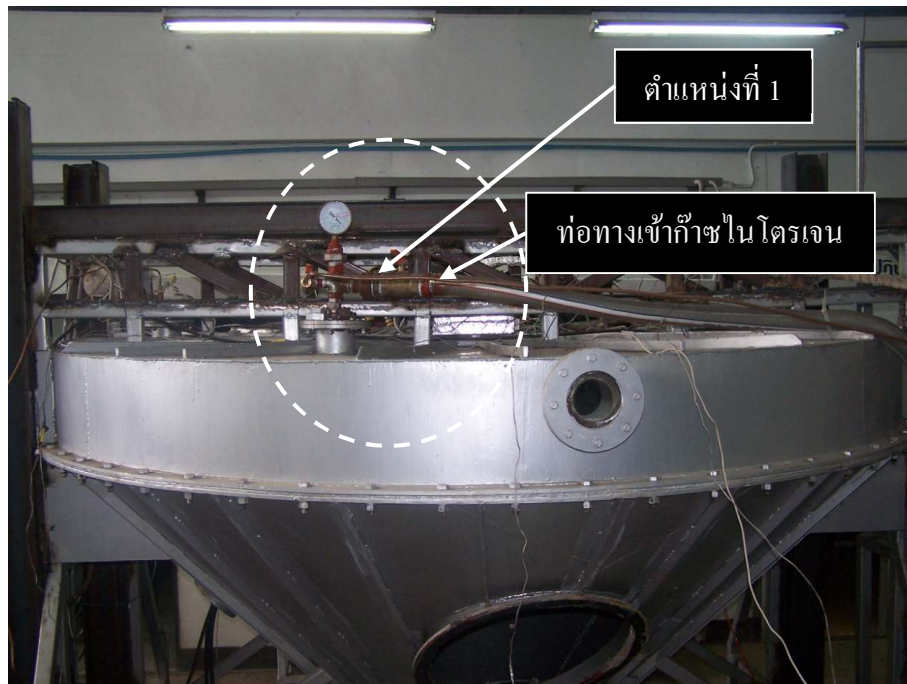
(2) ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างก๊าซจากภายในถังอะตอมไมเซอร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าปริมาณออกซิเจน อยู่ตรงตำแหน่งที่ 1 (รูปที่ 3.7) ใกล้กับท่อทางเข้าของก๊าซไนโตรเจน ซึ่งอาจจะมีส่วนต่อการวัดปริมาณออกซิเจนได้

(3) ควรเพิ่มท่อทางออกของก๊าซที่ไหลออกจากถัง เพื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่เข้าไปเจือก๊าซออกซิเจนที่อยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์

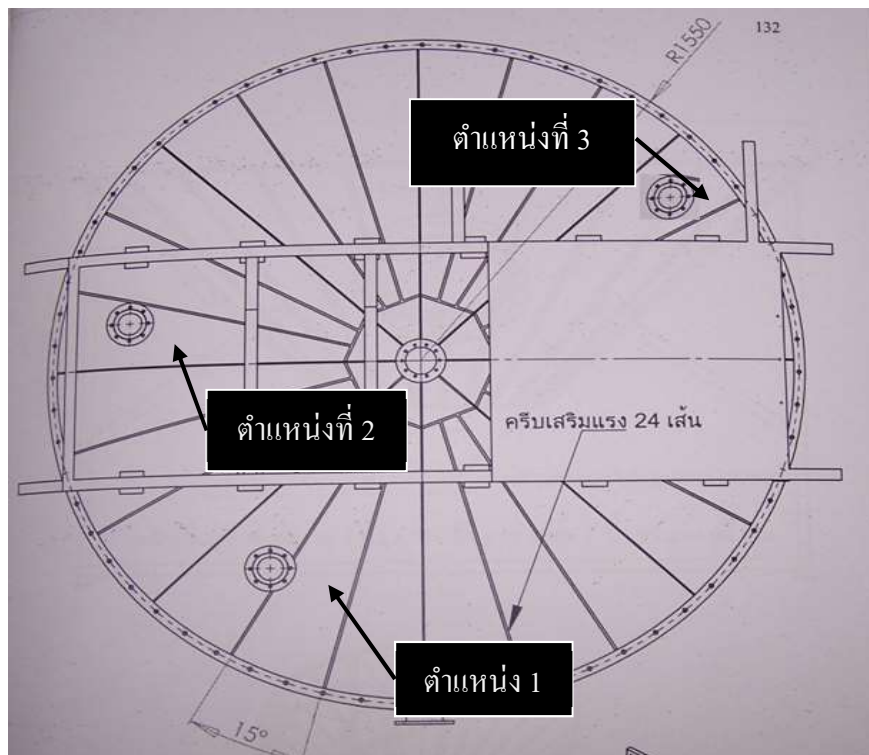


รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณออกซิเจนกับจำนวนครั้งการสูบอากาศออกจากถังอะตอมไมเซอร์

เมื่อพบสาเหตุของปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยได้ทำการเปลี่ยนตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างก๊าซที่มีอยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์ จากตำแหน่งที่ 1 ไปยังตำแหน่งที่ 2 (รูปที่ 3.8 และ รูปที่ 3.9) และเพิ่มทางออกของก๊าซไนโตรเจน จากถังอะตอมไมเซอร์ ณ ตำแหน่งที่ 3 รูปที่ 3.10 สำหรับการแก้ปัญหาถังอะตอมไมเซอร์ที่มีการรั่วซึมของอากาศภายนอกเข้าสู่ภายในถัง เมื่อระดับออกซิเจนลดลงถึงประมาณ 3 vol.% จึงทำการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปเจือจางก๊าซออกซิเจนภายในถังอย่างต่อเนื่อง เมื่อปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์เริ่มมีแนวโน้มคงที่ เริ่มทำการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนภายในถังเทียบกับเวลา



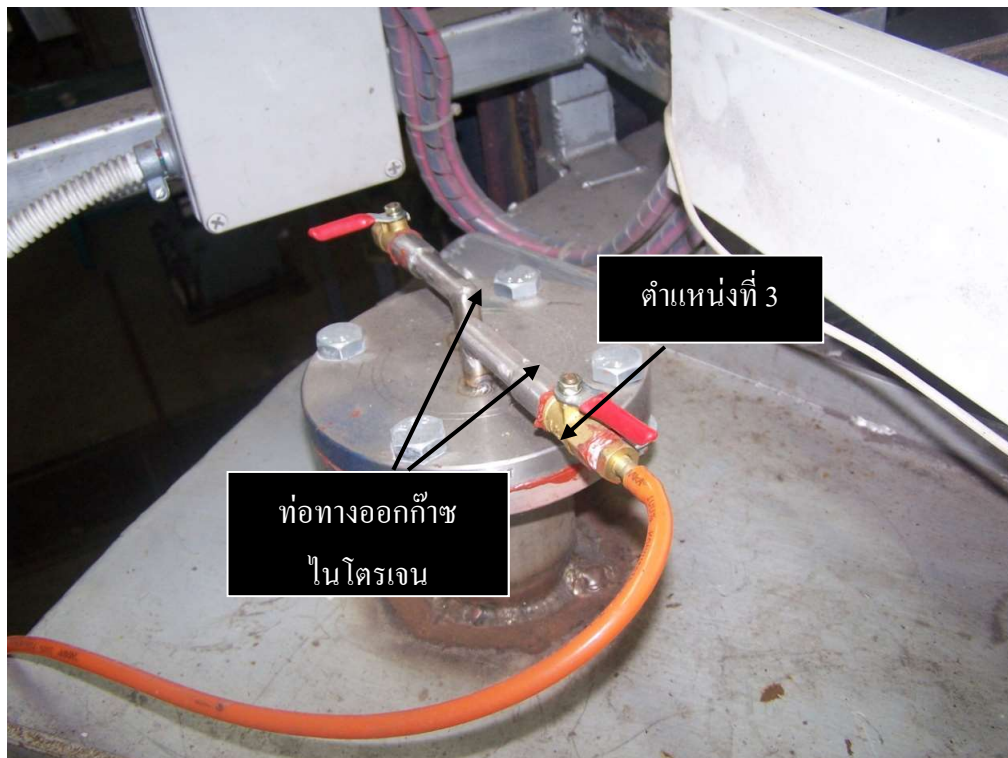
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งทางเข้าของก๊าซไนโตรเจน ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 3.8 ภาพฝาดังอะตอมไมเซอร์มองจากด้านบน ตำแหน่งที่ 1 ช่องปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ถังอะตอมไมเซอร์ ตำแหน่งที่ 2 ช่องเก็บตัวอย่างก๊าซจากภายในถังอะตอมไมเซอร์ และตำแหน่งที่ 3 ช่องทางที่ก๊าซไหลออกจากถังอะตอมไมเซอร์



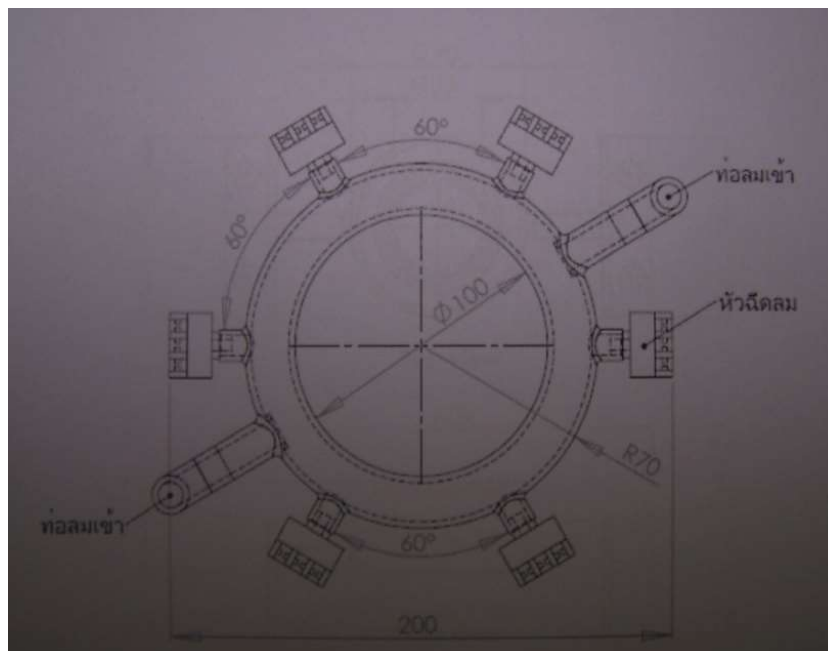
รูปที่ 3.9 ตำแหน่งที่ 2 จุดเก็บตัวอย่างก๊าซจากภายในถังอะตอมไมเซอร์



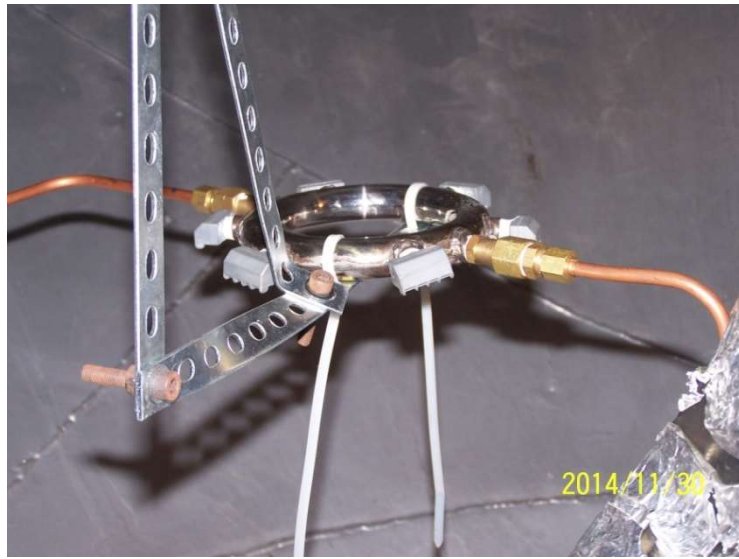
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งที่ 3 ช่องทางที่ก๊าซไหลออกจากภายในถังอะตอมไมเซอร์ ภายหลังจากถูกเจือจางด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.3.4 การติดตั้งระบบหัวจ่ายก๊าซไนโตรเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์

ถ้าหากการไหลเวียนของก๊าซไนโตรเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ไหลเวียนไม่ดีพอ จะทำให้การเก็บตัวอย่างก๊าซจากภายในถังอะตอมไมเซอร์ในแต่ละครั้งเพื่อวิเคราะห์ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ยังคงเหลือภายในถังอาจเกิดการคาดเคลื่อนได้ ดังนั้น เพื่อให้มั่นใจว่าก๊าซไนโตรเจนที่ปล่อยเข้าสู่ถังอะตอมไมเซอร์ไปผสมกับก๊าซภายในถังได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ไม่ว่าจะเก็บตัวอย่างจากจุดใดของถังก็จะได้ค่าเท่ากันทุกจุด ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงระบบปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ถังอะตอมไมเซอร์ โดยการทำให้ก๊าซไนโตรเจนถูกพ่นกระจายออกทุกทิศทางจากหัวพ่นก๊าซ โดยทำการติดตั้งหัวพ่นก๊าซไว้ตรงตำแหน่งด้านล่างของถัง เพื่อให้ก๊าซไหลเวียนขึ้นสู่ด้านบน เมื่อก๊าซไนโตรเจนเข้าไปผสมกับก๊าซที่เหลืออยู่ภายในถังแล้ว จะถูกปล่อยให้ไหลออกจากถังอะตอมไมเซอร์ตรงช่องทางออก ตำแหน่งที่ 3 (รูปที่ 3.8) ลักษณะหัวพ่นก๊าซ ดังแสดงใน รูปที่ 3.11 การติดตั้งหัวพ่นก๊าซไนโตรเจนไว้ตรงบริเวณใต้มอเตอร์ขับเคลื่อนอะตอมไมเซอร์ ดังแสดงใน รูปที่ 3.12 และ 3.13



รูปที่ 3.11 แบบหัวพ่นก๊าซไนโตรเจน



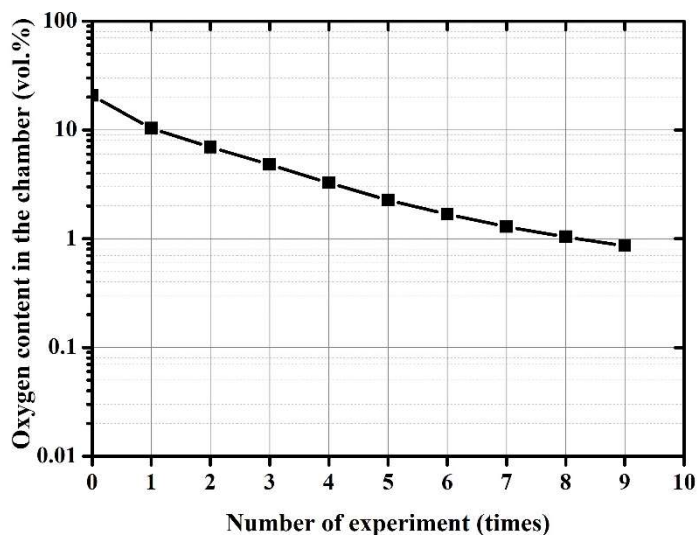
รูปที่ 3.12 หัวฟันท้าชไนโตรเจน



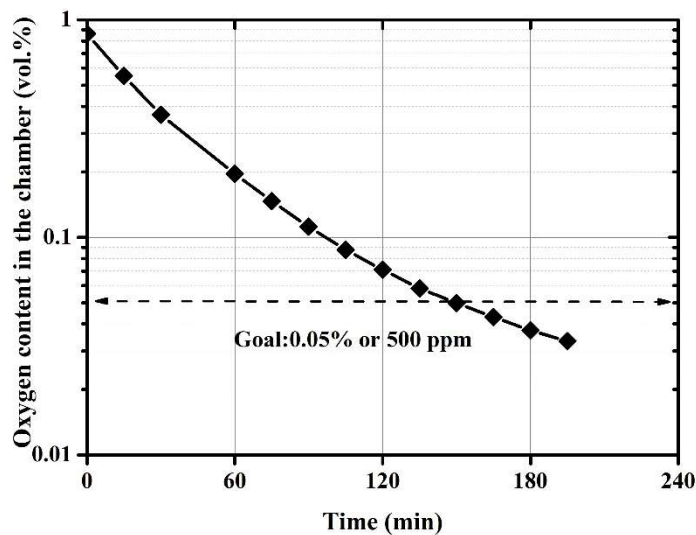
รูปที่ 3.13 ตำแหน่งที่ติดตั้งหัวฟันท้าชไนโตรเจน บริเวณใต้มอเตอร์ที่อยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์

เมื่อทำการปรับปรุงระบบจ่ายก๊าซไนโตรเจนแล้ว ได้ทำการทดสอบระบบควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ โดยการสูบลมออกจากถังอะตอมไมเซอร์ จนถึงระดับความดัน 25 cm Hg แล้วจึงปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในถังอะตอมไมเซอร์ และทำซ้ำจนบรรยากาศภายในถังมีค่าปริมาณออกซิเจนลดลงเหลือประมาณ 1 vol.% ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 3.14 และพบว่าจะต้องทำซ้ำถึง 9 ครั้ง จึงจะทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลงถึงระดับ 0.86 vol.% จากนั้นจึงปล่อยก๊าซไนโตรเจนให้ไหลเข้าไปในถังอะตอมไมเซอร์อย่างต่อเนื่องจนได้ค่าออกซิเจนตามที่ต้องการ ได้ทำการบันทึกค่าปริมาณออกซิเจนเทียบกับเวลาที่ปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในถังอะตอมไมเซอร์ ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 3.15 พบว่าระดับปริมาณออกซิเจนที่เหลืออยู่ในถังอะตอมไมเซอร์ลดลงเรื่อย ๆ และเมื่อเวลาผ่านไป 150

นาที่ ค่าปริมาณออกซิเจนที่วัดเท่ากับ 0.05 vol.% หรือ 500 ppm และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เวลาในการปล่อยก๊าซไนโตรเจนนานขึ้น



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกซิเจนที่เหลืออยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์กับจำนวนครั้งที่ใช้ในการสูบอากาศออกและปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ในถังอะตอมไมเซอร์



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณออกซิเจนที่เหลืออยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์กับเวลาที่ใช้ในการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในถังอะตอมไมเซอร์

3.3.5 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมและวัดปริมาณก๊าซไนโตรเจน

สิ่งที่ผู้วิจัยอยากทราบเพิ่มเติมคือ ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ในแต่ละครั้งของการทดลอง มีปริมาณแตกต่างกันเท่าใด เพื่อนำมาวางแผนการใช้ก๊าซให้มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการทดลองในแต่ละครั้ง เนื่องจากค่าใช้จ่ายสำหรับการเติมไนโตรเจนเหลวแต่ละครั้งค่อนข้าง

สูงมาก การติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณการไหลของก๊าซ (Gas flow meter) จะช่วยทำให้สามารถวางแผนการใช้ก๊าซไนโตรเจนได้อย่างเหมาะสม อุปกรณ์วัดปริมาณการไหลของก๊าซ ดังแสดงใน รูปที่ 3.16 การทดสอบหาปริมาณก๊าซไนโตรเจน จะอ้างอิงตามเงื่อนไขการทดลองใน ตารางที่ 3.1 เริ่มต้นจากการสูบอากาศออกจากถังอะตอมไมเซอร์และปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ ในแต่ละครั้งของการสูบอากาศออกและปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ ทำการวัดปริมาณออกซิเจนที่เหลืออยู่ในถังอะตอมไมเซอร์ ข้อมูลการทดลอง ดังแสดงใน ตารางที่ 3.2 ภายหลังจากทำการสูบอากาศและปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่รวม 6 ครั้ง ปริมาณออกซิเจนลดลงถึงระดับที่ต้องการ สำหรับทำการทดลองผลิตผงโลหะที่ 0.2 vol.% โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนคงที่ 5 ลิตร/นาที จากการคำนวณปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ทั้งหมดประมาณ 5,413 ลิตร และสำหรับการทดลองที่ปริมาณออกซิเจนอื่น ๆ ได้ใช้วิธีการดังที่กล่าวมาข้างต้นเหมือนกันทุกครั้ง แต่ที่ระดับออกซิเจนน้อยมาก จะต้องใช้ก๊าซไนโตรเจนเข้าไปเจือจางอากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ในปริมาณค่อนข้างสูงมาก และต้องใช้เวลาปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่นานขึ้น ผลการทดลองการควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการปล่อยก๊าซไนโตรเจนดังแสดงใน ตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.16 อุปกรณ์สำหรับวัดอัตราการไหลและควบคุมปริมาณก๊าซไนโตรเจน

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดลองภายใต้บรรยากาศควบคุมปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์

Experiment No.	O ₂ content in the chamber (vol.%)	O ₂ content in the chamber (ppm)
1	2	20,000
2	0.2	2,000
3	0.05	500
4	0.01	100

ตารางที่ 3.2 จำนวนครั้งของการสูบอากาศออกและเวลาที่ใช้ในการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ในถังอะตอมไมเซอร์จนถึงระดับปริมาณออกซิเจน 2 vol.%

No. of experiment (times)	O ₂ content in the chamber (vol. %)	Pressure of N ₂ tank (psi)	Purging time (min.)	N ₂ flow rate (liter/min.)
0	20.36	180	-	-
1	8.60	180	7.42	120
2	5.80	140	9.49	100
3	4.09	120	10.37	80
4	2.98	100	11.43	80
5	2.20	100	11.41	80
6	1.73	100	11.46	80

ตารางที่ 3.3 ปริมาณก๊าซไนโตรเจนเฉลี่ยที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปเจือจางอากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ สำหรับการควบคุมปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ที่ระดับแตกต่างกัน

Oxygen level in the atomizer chamber	Average amount of N ₂ gas used (liters)	Time for flowing N ₂ gas (Hours)
2 vol. %	5,413	0
0.2 vol. %	15,925	1.20
0.05 vol. %	20,905	1.57
0.01 vol. %	34,280	4.22

หมายเหตุ เวลาคิดจากขั้นตอนเริ่มการปล่อยก๊าซไนโตรเจนให้ไหลอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าระดับปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ที่ต้องการ

3.4 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.4.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ซื้อจาก บริษัท ไทยแลนด์สเมตติ้งแอนด์รีไฟนิง จำกัด (THAISACO, Phuket)
2. ก๊าซไนโตรเจนและไนโตรเจนเหลว ซื้อจาก บริษัท ลินด์ ประเทศไทย จำกัด
3. อุปกรณ์กันความร้อน เช่น หน้ากาก ถุงมือ เป็นต้น

3.4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. มอเตอร์ความเร็วรอบสูง ยี่ห้อ Jager รุ่น Z62-M260. 01 S2
2. บั๊มสุญญากาศ ยี่ห้อ SHIKO SEIKI รุ่น SR-500 อัตราการดูด 550 ลิตรต่อนาที
3. เครื่องวัดปริมาณออกซิเจน (Oxygen analyser) ยี่ห้อ Daiichi Nekken รุ่น TB-WI ช่วงในการวัด 0-9999 ppm O₂ (0-99.99 % O₂)
4. เครื่องเป่าลมร้อนยี่ห้อ Bak-AG CA6056
5. เครื่องปั๊มลม ยี่ห้อ Fushang รุ่น VA100-245/380
6. อุปกรณ์เก็บบันทึกอุณหภูมิ ยี่ห้อ National Instruments รุ่น NI USB-9162
7. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ยี่ห้อ Olympus รุ่น BH2-UMA
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-5800 LV
9. ตะแกรงคัดขนาดมาตรฐาน ASTM E11 ยี่ห้อ Endecotts
10. เครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาค ยี่ห้อ Malvern รุ่น Hydro 2000 MV
11. เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนที่เจือปนในผงโลหะ ยี่ห้อ Leco รุ่น RO-400

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การเคลือบผิวหน้าของงานอะตอมไมเซอร์

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเป็ยกระหว่างน้ำโลหะและงานอะตอมไมเซอร์ การทดลองในแต่ละครั้งงานอะตอมไมเซอร์จะถูกนำมาเคลือบผิวด้วยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ดังแสดงใน รูปที่ 3.17 วิธีการเคลือบผิวงานอะตอมไมเซอร์ อ้างอิงจากรายงานวิทยานิพนธ์ของ Gonsrang (2010) [46]



รูปที่ 3.17 ผิวหน้างานอะตอมไมเซอร์ที่ถูกเคลือบด้วยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305

3.5.2 ขั้นตอนการทดลองผลิตผงโลหะ

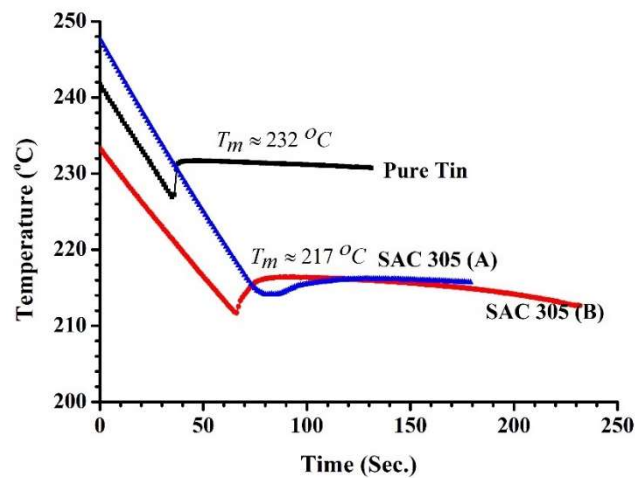
ในการทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ใช้สภาวะและตัวแปร (Operating parameters) ซึ่งเป็นสภาวะที่ดีที่สุด รายงานโดย Sungkaphaitoon (2013) [9] คือ อุณหภูมิน้ำโลหะ 290 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำโลหะ 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (ใช้ขนาดหัวฉีดน้ำโลหะขนาด 0.5 มิลลิเมตร) งานอะตอมไมเซอร์ชนิดงานแบน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตรและความเร็วรอบมอเตอร์ขับงานอะตอมไมเซอร์ 50,000 รอบต่อนาที ต่อมา ทางผู้วิจัยควบคุมเงื่อนไขเหล่านี้ให้คงที่และทำการศึกษาต่อที่ระดับปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ ในช่วง 2 vol.% - 0.01 vol.% รายละเอียดขั้นตอนการทดลองมี ดังนี้

- 1) หลอมแท่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ครั้งละ 3 กิโลกรัม ควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะคงที่ 290 องศาเซลเซียส
- 2) ระหว่างทำการหลอมแท่งโลหะ ทำการสูบอากาศออกจากถังอะตอมไมเซอร์และปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ เพื่อเจือจางออกซิเจนที่เหลืออยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์ ทำซ้ำจนปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลงถึงระดับที่ต้องการ (2 vol.%)
- 3) ในกรณีที่ต้องการลดปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ที่อยู่ในช่วง 0.2 vol.% -

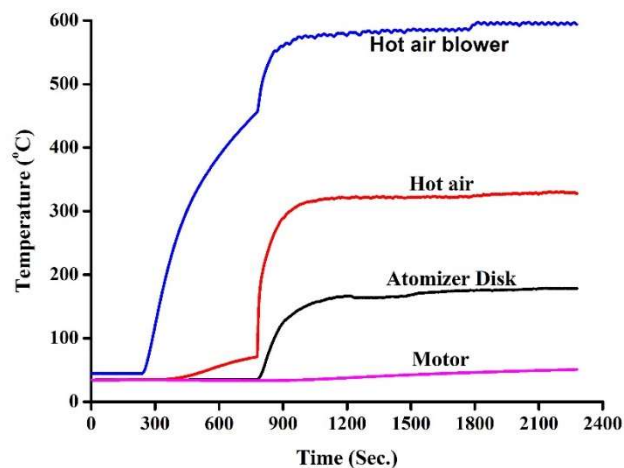
0.01 vol.% เมื่อทำซ้ำขั้นตอนการสูบลอากาศออกและปล่อยก๊าซไนโตรเจนจนปริมาณ ออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลงถึงระดับ 1 vol.% หลังจากนั้นจะต้องทำการปล่อยก๊าซไนโตรเจนให้ไหลอย่างต่อเนื่อง และรอกจนปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลงถึงระดับที่ต้องการ

- 4) อุ่นจานอะตอมไมเซอร์ อุ่นหัวฉีดน้ำโลหะ และท่อส่งน้ำโลหะ ที่อุณหภูมิ 290 องศาเซลเซียส
- 5) เปิดระบบหล่อเย็นมอเตอร์ และปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ 50,000 รอบต่อนาที
- 6) ปรับความดันก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ผลักดันน้ำโลหะไปยังหัวฉีดน้ำโลหะ ที่ 2 บาร์ เปิดวาล์วเพื่อขับดันน้ำโลหะที่อยู่ในเตาหลอมให้ไหลผ่านท่อส่งน้ำโลหะเข้าสู่หัวฉีด น้ำโลหะไหลผ่านหัวฉีด ตกบนจานอะตอมไมซ์ที่กำลังหมุนอยู่ เมื่อน้ำโลหะเริ่มไหลตกกระทบลงบนจานอะตอมไมเซอร์เริ่มบันทึกเวลา และรอให้น้ำโลหะไหลตกกระทบลงบนจานอะตอมไมเซอร์จนหมดจึงหยุดการบันทึกเวลา
- 7) หลังจากอุณหภูมิลดลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องแล้ว เก็บตัวอย่างผงโลหะที่ผลิตได้ ซึ่งน้ำหนักผงโลหะทั้งหมด คำนวณหาอัตราการป้อนน้ำโลหะ
- 8) สุ่มเก็บตัวอย่างผงโลหะประมาณ 200 กรัม นำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผงโลหะ

สำหรับอุณหภูมิในการอุ่นจานอะตอมไมเซอร์ ควรมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมเหลวของน้ำโลหะ จากการทดสอบโดยวิธีหลอมแท่งโลหะแล้วปล่อยให้ น้ำโลหะเย็นตัว เมื่อพิจารณากราฟการเย็นตัว (Cooling curve) ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 3.18 พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 อยู่ที่ 217 องศาเซลเซียส ดังนั้นถ้าสามารถอุ่นจานอะตอมไมเซอร์ให้ได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมเหลว ก็สามารถลดการเกิดก้อนโลหะแข็งที่พอกบนจานอะตอมไมเซอร์ที่อาจจะส่งผลเสียต่อมอเตอร์ และช่วยลดปริมาณโลหะที่มีลักษณะเป็นเกล็ดลงได้ นอกจากนี้ยังช่วยให้ระบบเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น ในงานวิจัยนี้ อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถอุ่นจานอะตอมไมเซอร์ก่อนการอะตอมไมเซชัน ประมาณ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอุ่นจานอะตอมไมเซอร์ประมาณ 20 นาที ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 3.19 โดยใช้อุปกรณ์เป่าลมร้อน (Hot air blower) ถึงแม้ว่าอุปกรณ์นี้จะสามารถสร้างลมร้อนได้เกือบ 300 องศาเซลเซียส แต่จะมีการสูญเสียความร้อนภายในถังอะตอมไมเซอร์ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวจานอะตอมไมเซอร์ลดลง



รูปที่ 3.18 เปรียบเทียบอุณหภูมิลอมเหลวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 กับ ดีบุก



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ที่ใช้สำหรับการอุ่นจานอะตอมไมเซอร์ โดยใช้ อุปกรณ์เป่าลมร้อน

3.5.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะ

ผงโลหะที่ผลิตได้มีทั้งผงขนาดหยาบและผงละเอียดปนกัน เพื่อลดค่าความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด ผงโลหะจะถูกนำมาคัดแยกก่อนเบื้องต้นเพื่อเอาผงที่เป็นแผ่นบางหรือเป็นเกล็ดออก โดยใช้ตะแกรง เบอร์ 100 ที่มีขนาดรูตะแกรง 150 ไมครอน นั้นหมายความว่าผงโลหะที่ใช้วัดค่าการกระจายตัวและค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ย มาจากผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า -150 ไมครอน แต่ว่าค่าผลผลิตที่ต้องการศึกษาในงานวิจัยนี้ จะเน้นเฉพาะผงโลหะที่อยู่ในช่วงขนาดอนุภาคต่ำกว่า -45+25 ไมครอน (Type 3) เท่านั้น ในเบื้องต้นเมื่อทดลองคัดขนาดด้วยตะแกรง (Seive) เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัว ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) และ ผลผลิต (Production yield) พบว่าผงที่มีขนาดเล็กมาก ๆ เข้าไปอุดตันระหว่างช่องว่างของตะแกรง ทำให้ขนาดอนุภาคที่ต่ำกว่า -45+25 ไมครอน ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงไปได้ อย่างไรก็ตามมีบางส่วนที่สามารถลอดผ่านไปได้ แต่มีสัดส่วนน้อยมาก ส่งผลให้

ค่าผลผลิตที่ต้องการ มีปริมาณน้อยมาก จากปัญหาดังกล่าวทางผู้วิจัยจึงเปลี่ยนการวิเคราะห์การกระจายตัว การหาขนาดอนุภาคเฉลี่ย โดยการใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyser) แทนตะแกรงและใช้ข้อมูลการกระจายตัวคำนวณหาค่าผลผลิตของขนาดอนุภาคที่อยู่ในช่วง -45+25 ไมครอน

3.5.4 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนที่เจือปนในผงโลหะ

- 1) นำผงโลหะที่ผลิตได้คัดขนาดด้วยตะแกรง นำผงโลหะที่มีขนาดอยู่ในช่วง -45+25 ไมครอน บรรจุในซองอลูมิเนียม ซีลปิดปากซองป้องกันอากาศให้สนิท เพื่อนำส่งตรวจวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนที่เจือปนในผงโลหะต่อไป
- 2) ทำการวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนที่เจือปนในผงโลหะ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจน ยี่ห้อ Leco รุ่น RO-400 ใช้วิธีการวัดค่าแบบ Inert gas fusion อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1409 และ E1937

3.5.5 การวิเคราะห์รูปร่างของผงโลหะ

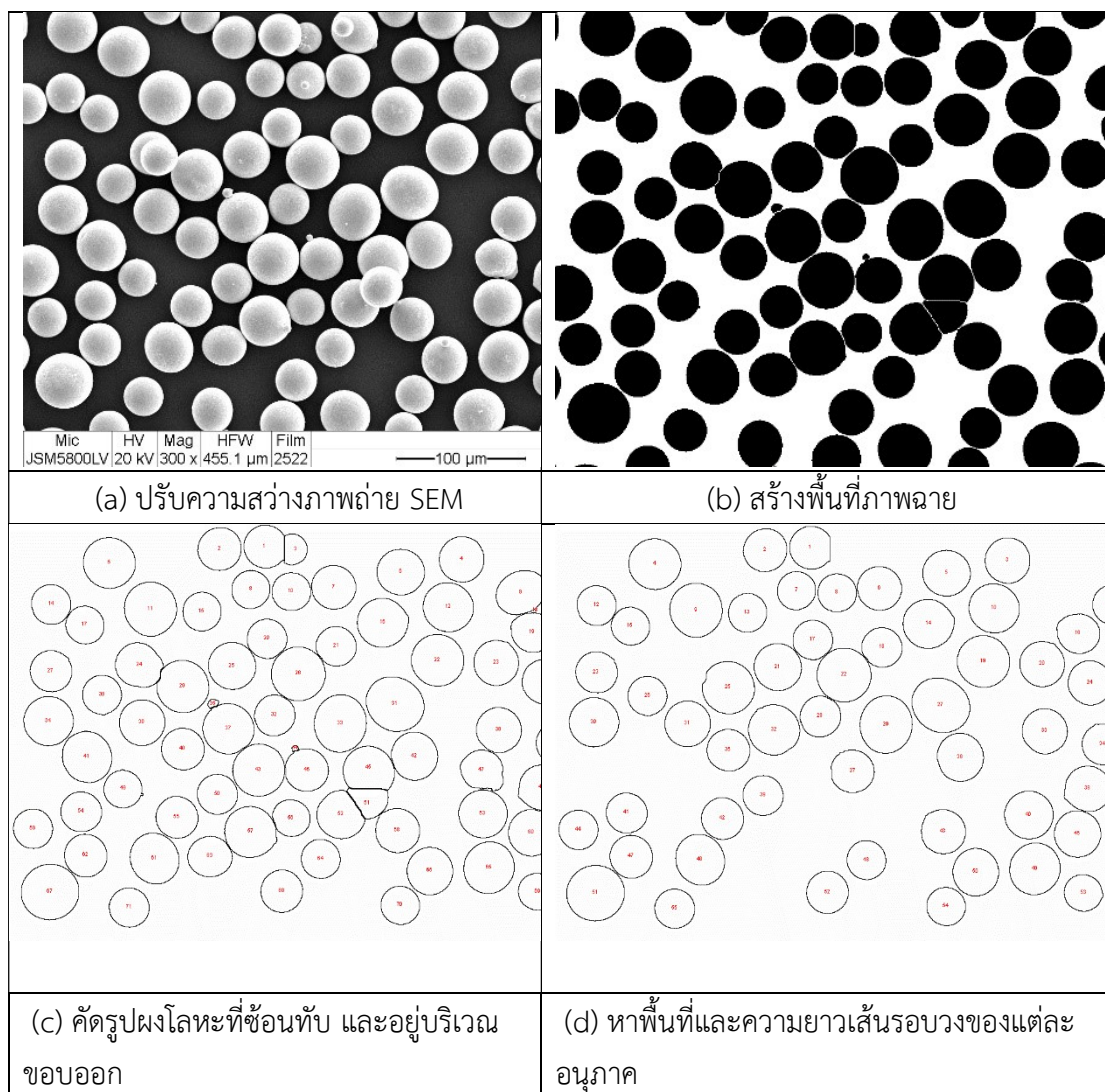
- 1) คัดขนาดผงโลหะด้วยตะแกรง นำผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน วางบนแผ่นกระจกใส ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ยี่ห้อ Olympus รุ่น BH2-UMA เพื่อตรวจดูรูปร่างของผงโลหะ
- 2) คัดขนาดผงโลหะด้วยตะแกรง นำผงโลหะที่มีขนาดในช่วง -45+25 ไมครอน ตรวจสอบลักษณะรูปร่างของผงโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-5800 LV
- 3) นำภาพที่ถ่ายจากกล้อง SEM มาทำการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลม (Circularity shape factor, ϕ) โดยใช้โปรแกรม Image J วิธีการวัดค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมสามารถหาได้จากสมการที่ 3.1 [47]

$$\phi = \frac{P^2}{4\pi A} \quad (3.1)$$

เมื่อ P คือความยาวเส้นรอบวงของอนุภาค และ A คือ พื้นที่ภาพฉายของอนุภาค สำหรับการหาค่าตัวแปร P และ A สามารถหาได้จากขั้นตอน ดังต่อไปนี้

- 1) เริ่มจาก นำรูปภาพที่ถ่ายจากกล้อง SEM มาปรับความคมชัด ดังแสดงใน รูปที่ 3.20 (a) โดยใช้โปรแกรม Image J
- 2) ใช้คำสั่งสร้างพื้นที่ภาพฉาย ดังแสดงใน รูปที่ 3.20 (b)
- 3) ทำการคัดเลือกภาพที่อยู่บริเวณขอบออกซึ่งเป็นภาพที่ไม่สมบูรณ์ หรือภาพที่เกิดการ

ซ้อนทับ ดังแสดงใน รูปที่ 3.20 (c) และใช้คำสั่งให้โปรแกรมคำนวณค่าพื้นที่และความยาวเส้นรอบวงของแต่ละอนุภาค ดังแสดงใน รูปที่ 3.20 (d) นำค่าที่ได้แทนค่าในสมการที่ 3.1 ต่อไป



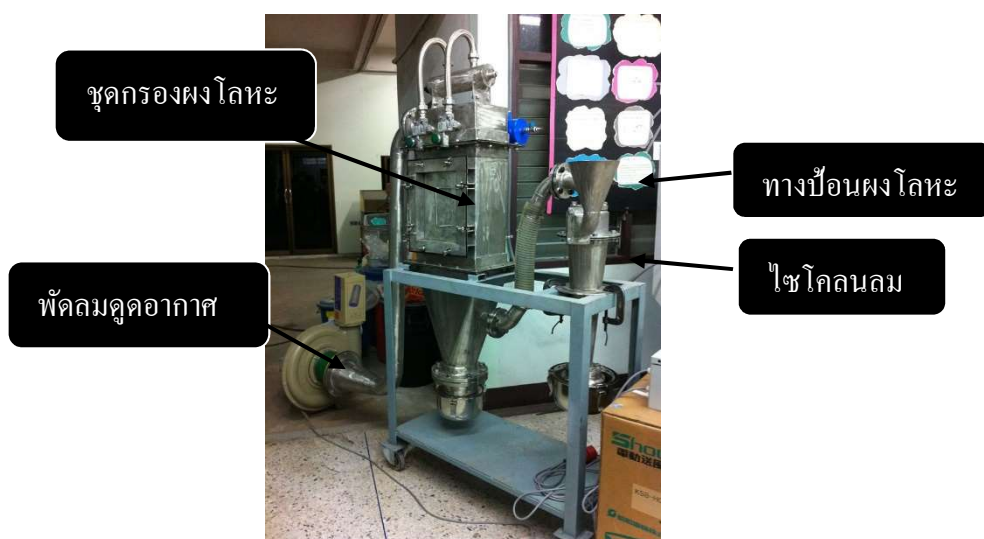
รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมของผงโลหะ โดยใช้โปรแกรม Image J

3.6 งานวิจัยตอนที่ 2 การออกแบบและสร้างระบบคัดขนาดผงโลหะบดกรีไรรัสเตอร์แก้ว SAC305

เนื่อหางานวิจัยตอนที่ 2 การออกแบบและสร้างระบบคัดขนาดผงโลหะโดยใช้ไซโคลนลม (Air cyclone) และเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม (Turbo air classifier หรือ Turbo air separator) การทดลองการคัดขนาดผงโลหะบดกรีไรรัสเตอร์แก้วชนิด SAC305 ที่ผลิตได้ ด้วยเครื่องคัดขนาดที่สร้างขึ้น ศึกษาตัวแปรปฏิบัติการ (Operating parameters) เช่น ความเร็วรอบของโรเตอร์ ความเร็วลมทางเข้า และอัตราการป้อนผงโลหะ ที่ส่งผลกระทบต่อขนาดตัด (Cut size, d_{50}) และความคมของการคัดขนาด (Sharpness of classification)

3.7 การออกแบบและสร้างไซโคลนลมเพื่อการทดลองเบื้องต้น

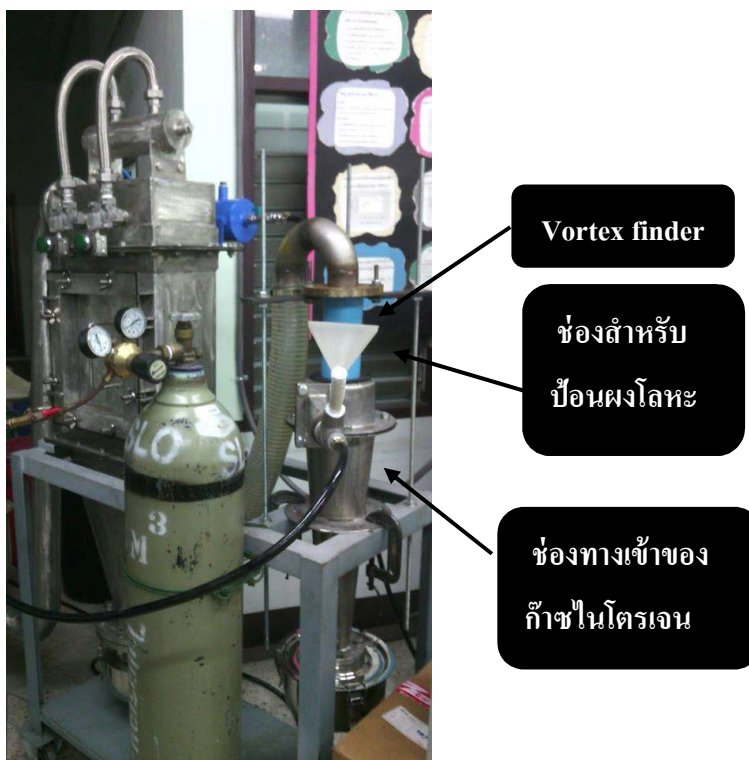
เนื่องจากที่ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุมีชุดไซโคลนลมอยู่แล้ว ซึ่งเป็นชิ้นส่วนหนึ่งของเครื่องบดละเอียดเจ็ดมิลล์ ในเบื้องต้นผู้วิจัยได้นำผงโลหะ SAC305 ที่ผลิตภายใต้เงื่อนไขที่ปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ 0.01 vol.% มาทำการทดลองคัดขนาดด้วยไซโคลนลมเครื่องนี้ พบว่าไม่เกิดการคัดแยกขนาด ได้พยายามทดลองปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ เท่าที่สามารถปรับได้ก่อน ตัวแปรบางตัวแปรที่ต้องการศึกษาจำเป็นต้องดัดแปลงชุดไซโคลนลมของภาควิชาฯ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเปลี่ยนแนวคิด ถ้าออกแบบและสร้างไซโคลนลมต้นแบบขึ้นมาเองก็จะสามารถทดสอบปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้ตามที่ต้องการ จึงได้สร้างไซโคลนลมต้นแบบสำหรับทดลองการคัดขนาดผงโลหะขึ้น ระบบคัดขนาดผงโลหะต้นแบบที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ชุดไซโคลนลม ชุดกรองผงละเอียด (Air filter) และพัดลมดูดอากาศ (Air blower) ดังแสดงใน รูปที่ 3.21 ส่วนแบบแปลนแสดงรายละเอียดของชิ้นส่วนต่าง ๆ ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.21 ไซโคลนลมที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อการศึกษาในเบื้องต้น

การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการคัดขนาดผงโลหะด้วยไซโคลนลมต้นแบบ ได้แก่ อัตราการไหลของลม ความดันลม อัตราการป้อนผงโลหะ และความยาวของท่อ Vortex finder รูปที่ 3.22 เมื่อทดลองเพิ่มความเร็วม โดยการปล่อยก๊าซไนโตรเจนที่มีความดันแตกต่างกัน และปรับระยะท่อ Vortex finder พบว่า แม้จะเพิ่มความเร็วมหรือปรับระยะท่อ Vortex finder ก็ยังไม่เกิดการคัดขนาดของผงโลหะ ผงโลหะเกือบทั้งหมดถูกแยกออกทางส่วนล่างของไซโคลนลม จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ถ้าผงโลหะมีความหนาแน่นสูง การใช้ลมเสริม (Secondary air) จะช่วยเพิ่มโอกาสในการคัดแยกขนาดของผงโลหะมากขึ้น ดังนั้น จึงได้ทดลองดัดแปลงไซโคลนตัวเดิมโดยเพิ่มทางเข้าลมเสริมที่ตัวไซโคลน (Cyclone body) ดังแสดงใน รูปที่ 3.23 เมื่อติดตั้งระบบลมเสริม จึงได้ทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรได้แก่ อัตราการป้อนผงโลหะ ความดันก๊าซไนโตรเจน ความดันลมเสริม

ระยะท่อ Vortex finder พบว่า เกิดการแยกขนาดระหว่างผงหยาบกับผงละเอียด เมื่อนำผงโลหะที่คัดแยกขนาดได้ ตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ผงโลหะที่คัดแยกขนาดได้ ในส่วนของผงหยาบ (Coarse powders) ยังมีการปนของผงละเอียดอยู่และในส่วนผงละเอียด (Fine powders) ก็ยังมีการปนของผงหยาบอยู่ด้วยเช่นกัน จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองเบื้องต้น ทำให้ผู้วิจัยได้แนวคิดที่สามารถนำไปใช้ปรับปรุงไซโคลนลมให้มีประสิทธิภาพการคัดขนาดให้ดีขึ้น จากการทบทวนวรรณกรรมที่รายงานโดย Shapiro and Galperin (2005) [48] พบว่าเครื่องคัดขนาดแบบใช้แรงเหวี่ยง (Centrifugal air classifiers) มีความน่าสนใจที่จะนำแนวคิดมาพัฒนาต่อ โดยเฉพาะเครื่องคัดขนาดชนิดใช้ใบพัด (Rotor classifiers) จุดเด่นของเครื่องคัดขนาดกลุ่มนี้ คือมีโรเตอร์หรือใบพัดซึ่งทำหน้าที่สร้างการหมุนของอากาศขึ้นภายในตัวเครื่องคัดขนาด ขนาดตัดสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับความเร็วรอบของโรเตอร์ เครื่องคัดขนาดประเภทนี้นิยมใช้คัดขนาด ทรายละเอียด ซีเมนต์ และหินปูน เป็นต้น ขนาดตัดหรือค่า d_{50} อยู่ในช่วง 20-100 ไมครอน อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบข้อมูลที่มีผู้ศึกษามาแล้ว พบว่าเครื่องคัดขนาดในกลุ่มนี้ ยังไม่เคยมีการนำไปใช้คัดขนาดผงโลหะที่มีความหนาแน่นสูง ส่วนใหญ่จะใช้กับวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 3,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 3.22 เครื่องคัดขนาดไซโคลนลมต้นแบบที่ปรับปรุงเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ได้



ช่องทางเข้าของลมเสริม

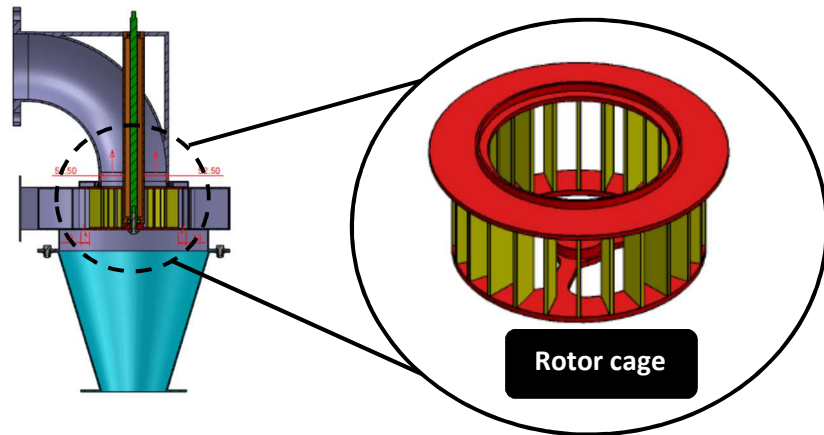
Secondary air inlet

รูปที่ 3.23 เครื่องคัดขนาดไซโคลนลมต้นแบบที่ติดตั้งระบบลมเสริม

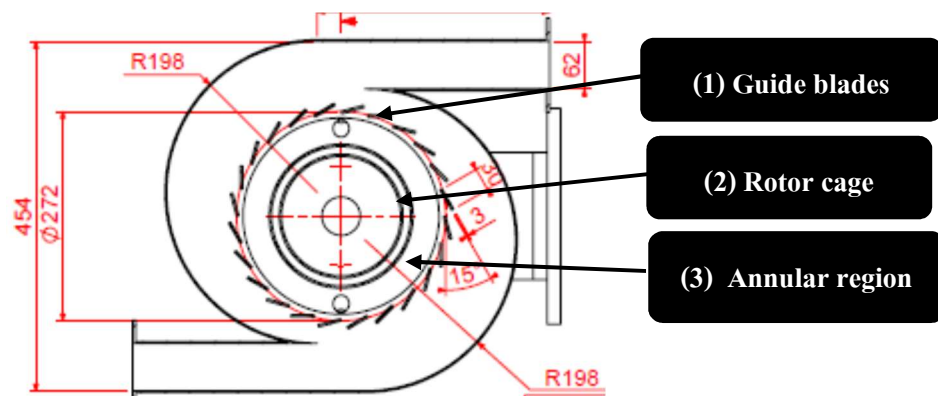
3.8 การออกแบบเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม (Turbo air classifier หรือ Turbo air separator)

เครื่องคัดขนาดวัสดุผงชนิดใช้ลมหมุน (Centrifugal air classifier) สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ตามอุปกรณ์ที่สร้างการหมุนของลมให้เกิดขึ้นภายในตัวเครื่อง ประเภทแรกลมหมุนเกิดจากใบพัดหรือโรเตอร์ที่ถูกติดตั้งอยู่กับที่ที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และประเภทที่สองลมหมุนถูกสร้างจากใบพัดที่เคลื่อนที่ภายในเครื่อง จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า เครื่องคัดขนาดประเภทโรเตอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบ และควบคุมความเร็วลมแยกจากกันได้อย่างอิสระ มีประสิทธิภาพในการคัดขนาดสูงกว่าเมื่อเทียบกับแบบอื่น ๆ ที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ประสิทธิภาพของเครื่องคัดขนาดพิจารณาจาก ขนาดตัด (d_{50}) และความแม่นยำในการคัดขนาด (K) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกการออกแบบและสร้างเครื่องคัดขนาดวัสดุผงชนิดเทอร์โบลม (Turbo air classifier) ซึ่งภายในตัวเครื่องได้ออกแบบโรเตอร์ให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกโดยมีใบพัด (Rotor blades) ถูกติดตั้งล้อมรอบทรงกระบอกในแนวรัศมี ดังแสดงใน รูปที่ 3.24 บริเวณรอบโรเตอร์ทรงกระบอกจะมีใบพัดเหนี่ยวนำ (Guide blades) ที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้แต่ถูกออกแบบมาเพื่อทำให้เกิดการหมุนของกระแสลมรอบตัวโรเตอร์ บริเวณโซนคัตแยก (Annular region หรือ Annular gab) จะอยู่บริเวณระหว่างขอบนอกของใบพัดโรเตอร์และขอบในของใบพัดเหนี่ยวนำ ดังแสดงรูปที่ 3.25 สำหรับแบบแปลนชิ้นส่วนอื่น ๆ ของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม ได้รวบรวมแสดงไว้ในภาคผนวก ข เมื่อนำเครื่องคัดขนาดเทอร์

โบลม ประกอบกับชุดกรองผงโลหะขนาดเล็กละเอียด (Fine powder filter) และพัดลมดูดอากาศ (Air blower) ระบบเครื่องคัดขนาดวัสดุผงมีลักษณะดังแสดงใน รูปที่ 3.26



รูปที่ 3.24 ใบพัดแบบกรงกระรอก (Rotor cage) ของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม



รูปที่ 3.25 ภาพของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม มองจากด้านบน (1) ตำแหน่งใบพัดเหนี่ยวนำ (Guide blades) (2) ตำแหน่งใบพัดแบบกรงกระรอก (Rotor cage) (3) บริเวณที่เกิดการคัดแยก (Annular region)



รูปที่ 3.26 เครื่องคัดขนาดเทอร์โบลมที่ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันแล้ว

3.9 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ ที่ใช้ในการทดลองคัดขนาดโลหะผง

- 1) ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่ผลิตได้จากงานวิจัยในตอนต้นที่ 1
- 2) เครื่องป้อนผงแบบสั่น ยี่ห้อ HI-VI Vibratory equipment รุ่น 15A ชนิด 26 Serial No. NN10 8590
- 3) พัดลมดูดอากาศ แรงดันสูง ยี่ห้อ Showa Denki รุ่น KSB-HO7B-M124 ชนิด HE2-07XT-B43
- 4) ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (Inverter motor control)
- 5) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-5800 LV
- 6) เครื่องวัดความเร็วลมแบบใช้ลวดนำความร้อน (Hot wire anemometer) ยี่ห้อ Digicon รุ่น DA-47
- 7) เครื่องวัดความเร็วรอบแบบใช้แสงและสัมผัส (Tachometer) ยี่ห้อ Digicon รุ่น DT-250TP
- 8) เครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาค ยี่ห้อ Malvern รุ่น Hydro 2000 MV

3.10 ขั้นตอนการทดลองคัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม

ขั้นตอนการทดลองตามแผนผัง รูปที่ 3.27 มี ดังนี้

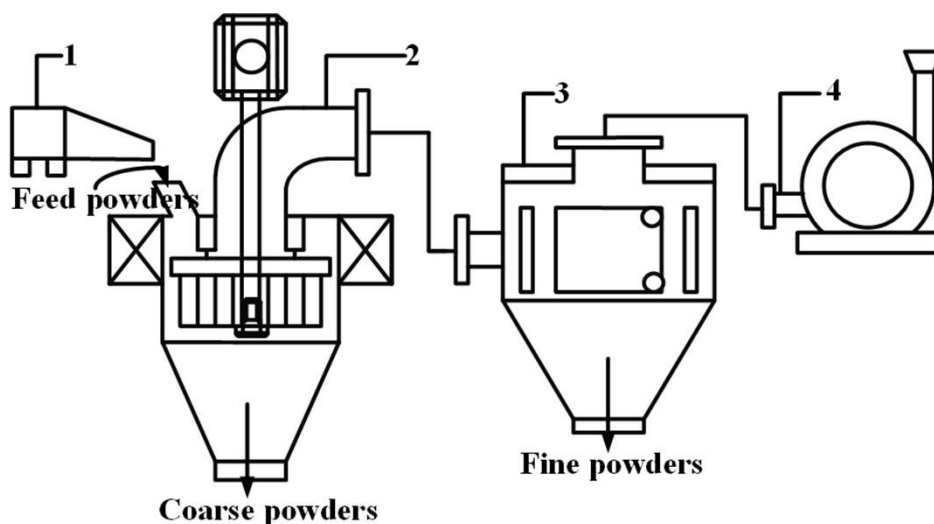
- 1) การเตรียมผงป้อน (Feed powders) เพื่อใช้ในการทดลองคัดขนาด เริ่มจากนำผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่ผลิตจากการทดลองผลิตผงโลหะในงานวิจัยตอนที่ 1 ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นำผงโลหะไปคัดแยกด้วยตะแกรงเบอร์ 100 ผงโลหะที่ลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เรียกว่า ผงป้อน มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน ซึ่งจะใช้ในการทดลองด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม ส่วนผงโลหะที่ค้างตะแกรงเบอร์ 100 เป็นผงโลหะหยาบที่มีลักษณะเป็นเกล็ด (Flake) หรือเป็นเส้นใย (Fibrous ligament) ในการทดลองการคัดขนาดด้วยเครื่องเทอร์โบลมแต่ละครั้งจะใช้ผงป้อนประมาณ 200 กรัม

2) เปิดสวิตช์ควบคุมมอเตอร์ กำหนดความเร็วรอบของใบพัดโรเตอร์ หมายเลข 2 ตามที่ต้องการหลังจากนั้นเปิดสวิตช์ควบคุมพัดลมดูดอากาศ หมายเลข 4 เพื่อปรับอัตราการไหลของลมหรือความเร็วลมที่ดูดเข้าสู่ทางช่องลมของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม

3) ตั้งค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ ความเร็วลมทางเข้า ใส่ผงป้อนลงไปเครื่องป้อนผงโลหะ ปรับระดับการสั่นเพื่อควบคุมอัตราการป้อน เปิดสวิตช์เครื่องป้อนผงโลหะ หมายเลข 1 เริ่มจับเวลาเมื่อผงโลหะไหลตกเข้าไปในเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม หมายเลข 2 และหยุดเมื่อผงโลหะถูกป้อนจนหมด บันทึกเวลาที่ใช้ในการป้อน เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าอัตราการป้อนผงโลหะ

4) เมื่อผงโลหะเข้าไปในเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม หมายเลข 2 แล้ว ผงโลหะจะเกิดการคัดแยกด้วยอิทธิพลของแรงเหวี่ยงและแรงจุดที่กระทำต่ออนุภาคของผงโลหะภายในเครื่องคัดขนาด ผงโลหะที่มีขนาดหยาบจะถูกคัดแยกตกลงสู่ ถังเก็บผงโลหะหยาบ หมายเลข 2 เรียกผงโลหะส่วนนี้ว่า ผงหยาบ (Coarse powders) ส่วนผงขนาดละเอียดจะถูกดูดเข้าไปสู่เครื่องกรองผงโลหะ หมายเลข 3 โลหะผงที่ถูกกรองและเก็บที่เครื่องกรองเป็นผงโลหะขนาดละเอียด เรียกผงโลหะส่วนนี้ว่า ผงละเอียด (Fine powders)

5) ผงป้อน ผงหยาบ และผงละเอียด ที่ได้จากการคัดขนาด จะถูกนำไปตรวจวิเคราะห์ ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค ผงตัวอย่างก่อนนำไปตรวจวิเคราะห์ขนาด ดังแสดงใน รูปที่ 3.28



รูปที่ 3.27 ระบบเครื่องคัดขนาดผงโลหะด้วยเทอร์โบลมที่ออกแบบและสร้างขึ้น (1) เครื่องป้อนผงโลหะ (2) เครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม (3) ชุดกรองผงโลหะ (4) พัดลมดูดอากาศ



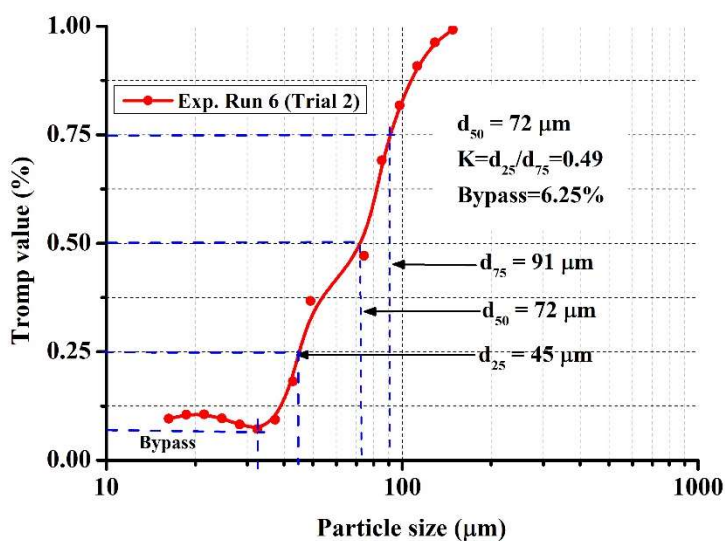
รูปที่ 3.28 ผงโลหะที่เตรียมสำหรับส่งตรวจวิเคราะห์ขนาด (ซ้าย) ผงป้อน (กลาง) ผงหยาบ และ (ขวา) และผงละเอียด

3.10.1 การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม

ดัชนีที่ใช้คำนวณหาประสิทธิภาพการคัดขนาดของเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลมในงานวิจัยนี้คือ ขนาดตัด (Cut size) และความคมของการคัดขนาด (Sharpness of classification) สำหรับขนาดตัด หรือขนาดอนุภาคที่เครื่องสามารถคัดแยกได้ หมายถึงขนาดอนุภาคที่มีโอกาสที่จะถูกคัดแยกเป็นผงหยาบหรือผงละเอียดร้อยละ 50 โดยทั่วไปนิยมเขียนขนาดตัดแทนด้วยสัญลักษณ์ d_{50} หรือ χ_{50} วิธีการหาค่า d_{50} จะต้องสร้างเส้นสมรรถนะที่เรียกว่า Tromp curve หรือ Partial classification efficiency ขึ้นมาก่อน สำหรับงานวิจัยนี้สมการที่ใช้หา Tromp curve อ้างอิงจากงานวิจัยของ Mejeoumov (2007) [22] คือ เมื่อได้ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของผงโลหะที่ได้จากการทดลอง ได้แก่ ผงป้อน ผงหยาบ และผงละเอียด นำข้อมูลปริมาณร้อยละของปริมาตร (vol.%) ในแต่ละช่วงขนาดของผงป้อน ผงหยาบ และผงละเอียด แทนค่าในสมการ 3.2 เพื่อคำนวณเป็นค่า Tromp value นำค่า Tromp value ที่คำนวณได้ในแต่ละช่วงขนาดของผงโลหะพล็อตเป็นกราฟ Tromp curve ดังแสดงใน รูปที่ 3.29 เมื่อพิจารณาที่ค่า 50% จากกราฟ Tromp curve ลากเส้นตามแนวตั้งไปตัดกับแกน X ค่าจุดตัดแกน X คือค่า d_{50} หรือ χ_{50}

$$\text{Tromp value} = \left(\frac{f_{2i}}{f_{1i}} \right) \times \left(\frac{f_{1i} - f_{3i}}{f_{2i} - f_{3i}} \right) \quad (3.2)$$

เมื่อ f_{1i} - ความถี่การกระจายตัวในแต่ละช่วงขนาดของผงป้อน
 f_{2i} - ความถี่การกระจายตัวในแต่ละช่วงขนาดของผงหยาบ
 f_{3i} - ความถี่การกระจายตัวในแต่ละช่วงขนาดของผงละเอียด



รูปที่ 3.29 กราฟ Tromp curve การหาค่า d_{50} และ K

สำหรับความคมของการคัดขนาด หมายถึง ค่าดัชนีความแม่นยำของการคัดขนาดในช่วงขนาดอนุภาคที่อยู่ตรงกลาง เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการคัดขนาดที่ขนาดตัด นิยมเขียนค่าดัชนีความคมของการคัดขนาดแทนด้วยสัญลักษณ์ K ค่านี้คำนวณได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของขนาดอนุภาคที่ d_{25} และ ขนาดอนุภาคที่ d_{75} ($K = d_{25}/d_{75}$) โดยที่ d_{25} และ d_{75} คือขนาดอนุภาคที่ค่า Tromp value ที่ 25% และ 75% ตามลำดับ ภายใต้สภาวะการคัดแยกที่เป็นแบบอุดมคติ คือ $K=1$ หมายถึง ผงหยาบและผงละเอียดถูกคัดแยกได้อย่างสมบูรณ์แบบ กรณีเส้นโค้ง Tromp curve มีความชันเพิ่มขึ้น คือ ค่า K ที่ได้มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง เครื่องคัดขนาดมีประสิทธิภาพในการคัดแยกผงโลหะเพิ่มขึ้น

3.11 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial design)

เนื่องจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานวิจัย สามารถศึกษาอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main effect) และอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) ที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ (Response หรือ yield) ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยหรือตัวแปรในกระบวนการคัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลัม ที่ส่งผลกระทบต่อค่า d_{50} และ K ซึ่งตัวแปรอิสระที่ใช้ศึกษาได้แก่ (A) ความเร็วรอบของโรเตอร์ (B) อัตราการป้อนผงโลหะ และ (C) ความเร็วลม แต่ละตัวแปรจะถูกกำหนดค่าเป็น 2 ระดับ คือ ค่าสูง และ ค่าต่ำ โดยที่ค่าสูงกำหนดให้สัญลักษณ์เป็น (+1) และค่าต่ำกำหนดให้มีสัญลักษณ์เป็น (-1) ดังแสดงในตารางที่ 3.4 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^k เมื่อ k คือ จำนวนตัวแปรของกระบวนการ และ 2 คือ ค่าระดับของตัวแปรจำนวนสองระดับ เมื่อมีตัวแปรในการทดลองสามตัว ($k=3$) ดังนั้นการทดลองทั้งหมดที่ต้องทำ คือ $2^3 = 8$ การทดลอง ในการวิจัย

นี้ได้ทำการทดลองซ้ำสองครั้ง (Repeat หรือ Duplicate) ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง ตารางการออกแบบการทดลองคัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม (ตารางที่ 3.5 และ 3.6) ค่าผลลัพธ์ (Response) คือ ค่า d_{50} และ K ถูกนำไปวิเคราะห์เชิงสถิติ ด้วยโปรแกรม MINITAB 16 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับค่า d_{50} และ K

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรและค่าระดับของตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการคัดขนาดผงโลหะ

ตัวแปร	ชื่อตัวแปร	ระดับ	
		Low (-1)	High (+1)
A	ความเร็วรอบของโรเตอร์ (min^{-1})	194	406
B	อัตราการป้อน ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	4	27
C	ความเร็วลม ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5	8.5

ตารางที่ 3.5 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^3 และค่าผลลัพธ์ d_{50} ที่ได้จากการทดลอง

การทดลองที่	ตัวแปร			d_{50} (μm)		d_{50} (μm) Average
	A	B	C	Trial 1	Trial2	
1	-1	-1	-1	68.7	66.7	67.7
2	+1	-1	-1	24.7	30.8	27.8
3	-1	+1	-1	55.5	57	56.3
4	+1	+1	-1	39.4	31.7	35.5
5	-1	-1	+1	111.2	112.1	111.7
6	+1	-1	+1	63.8	72.2	68
7	-1	+1	+1	117.9	121.1	119.5
8	+1	+1	+1	46.9	46.6	46.8

ตารางที่ 3.6 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^3 และค่าผลลัพธ์ K ที่ได้จากการทดลอง

การทดลองที่	ตัวแปร			K = d_{25}/d_{75}		K
	A	B	C	Trial 1	Trial2	Average
1	-1	-1	-1	0.61	0.48	0.55
2	+1	-1	-1	0.70	0.62	0.66
3	-1	+1	-1	0.49	0.40	0.45
4	+1	+1	-1	0.36	0.30	0.33
5	-1	-1	+1	0.55	0.50	0.53
6	+1	-1	+1	0.47	0.49	0.48
7	-1	+1	+1	0.60	0.52	0.56
8	+1	+1	+1	0.49	0.40	0.45

3.12 การตรวจสอบและยืนยันผลการทดลอง (Experimental verification)

เนื่องจากวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล ตัวแปรในกระบวนการการคัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม จะถูกกำหนดค่าเป็น 2 ระดับ คือ ค่าสูง และ ค่าต่ำ ดังนั้นผู้วิจัยต้องการทราบว่า ถ้าทดลองโดยใช้ตัวแปรเดิม แต่เปลี่ยนค่าตัวแปรให้ลดลงหรือเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าตัวแปรเดิม เพื่อดูว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง (d_{50} และ K) จะมีแนวโน้มเป็นไปตามการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม MINITAB 16 หรือไม่ สำหรับการตรวจสอบและยืนยันผลการทดลอง ได้เลือกทำการทดลองคัดขนาดผงโลหะโดยใช้ความเร็วรอบของโรเตอร์อยู่ในช่วง 326 rpm - 619 rpm อัตราการป้อนผงโลหะ 4 kg/h และ 27 kg/h และความเร็วลมทางเข้า 5 m/s, 6.5 m/s และ 8.5 m/s ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกเลือกมาทำการคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม และผลลัพธ์ที่ได้เพื่อการตรวจสอบและยืนยันผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MINITAB 16 ดังแสดงใน ตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกเลือกมาทำการคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม และค่าผลลัพธ์ d_{50} และ K ที่ได้จากการทดลอง

การทดลองที่	ตัวแปร			ประสิทธิภาพการคัดแยก	
	A	B	C	d_{50}	K
1	326	8.5	4	120	0.39
2	533	8.5	4	80	0.77
3	619	8.5	4	41	0.61
4	619	5	4	N/A	N/A
5	619	6.5	4	N/A	N/A
6	619	8.5	27	28	0.44

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการวิจัยตอนที่ 1 ผลการทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC 305 ภายใต้บรรยากาศควบคุม

เนื้อหาผลการวิจัยตอนที่ 1 กล่าวถึง ปรากฏการณ์การยกตัวของน้ำโลหะ (Hydraulic jump) ที่เกิดขึ้นบนผิวของงานอะตอมไมเซอร์ ในระหว่างการทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ด้วยเครื่องผลิตผงโลหะแบบอาศัยแรงหมุนเหวี่ยง ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล จากการทดลองผลิตผงโลหะชนิด SAC305 ภายใต้บรรยากาศควบคุมปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ ในช่วง 0.01 vol.% - 2.0 vol.% (100 ppm – 20,000 ppm) ซึ่งประกอบด้วย การกระจายตัวของผงโลหะ (Particle size distribution) ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ (Mean size) รูปร่างของผงโลหะ (Particle shape) ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมของผงโลหะ (Circular shape factor) ปริมาณออกซิเจนที่เจือปนในผงโลหะ (Oxygen content in the atomised powders) ผลผลิตผงโลหะ (Production yield)

4.1.1 ปรากฏการณ์การยกตัวของน้ำโลหะบนผิวงานอะตอมไมเซอร์ (Hydraulic jump)

ในการทดลองผลิตผงโลหะด้วยเครื่องผลิตผงโลหะแบบอาศัยแรงหมุนเหวี่ยง พบว่า ในขณะทำการอะตอมไมเซอร์ งานอะตอมไมเซอร์ที่หมุนด้วยความเร็วสูง เกิดการยกตัวของน้ำโลหะขึ้นบนผิวของงานอะตอมไมเซอร์ เนื่องจากอัตราการป้อนน้ำโลหะกับความเร็วของฟิล์มน้ำโลหะที่แผ่ออกจากจุดศูนย์กลางของงานไปยังขอบงาน (Jet boundary layer region) เกิดไม่สมดุลและไม่ต่อเนื่อง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การยกตัวของน้ำโลหะ (Hydraulic jump) ในงานวิจัยนี้ใช้อัตราการป้อนน้ำโลหะเฉลี่ย 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พบว่าน้ำโลหะที่ผ่านหัวฉีดขนาด 0.5 มิลลิเมตร ตกลงบนงานอะตอมไมเซอร์ชนิดงานทรงแบน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร หมุนด้วยความเร็ว 50,000 รอบต่อนาที ในช่วงเริ่มต้นของการอะตอมไมเซอร์ น้ำโลหะที่ตกลงบนงานอะตอมไมเซอร์จะเกิดการยกตัวมีลักษณะเป็นแนววิถีโค้ง ดังแสดงใน รูปที่ 4.1 จากรูปแสดงให้เห็นว่า ในช่วงเริ่มต้นอัตราการป้อนยังไม่สมดุลกับความเร็วการแผ่ของฟิล์มน้ำโลหะ เมื่อน้ำโลหะตกตรงตำแหน่งจุดศูนย์กลางของงาน น้ำโลหะจะยกตัวออกจากตำแหน่งศูนย์กลางของงานทันที แต่เมื่อการอะตอมไมเซอร์ผ่านไปได้สักระยะหนึ่ง น้ำโลหะสามารถแผ่ไปบนงานได้มากขึ้น และตามระยะทางที่ห่างจากจุดศูนย์กลางของงาน ค่ามุมเปียกจลน์ของน้ำโลหะจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่ามุมเปียกวิกฤติ รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการยกตัวของน้ำโลหะลดลง การแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะมีแนวขนานไปกับระนาบของผิวงาน จากการสังเกตการณ์แตกตัวของละอองน้ำโลหะเป็นละอองน้ำโลหะขนาดเล็ก

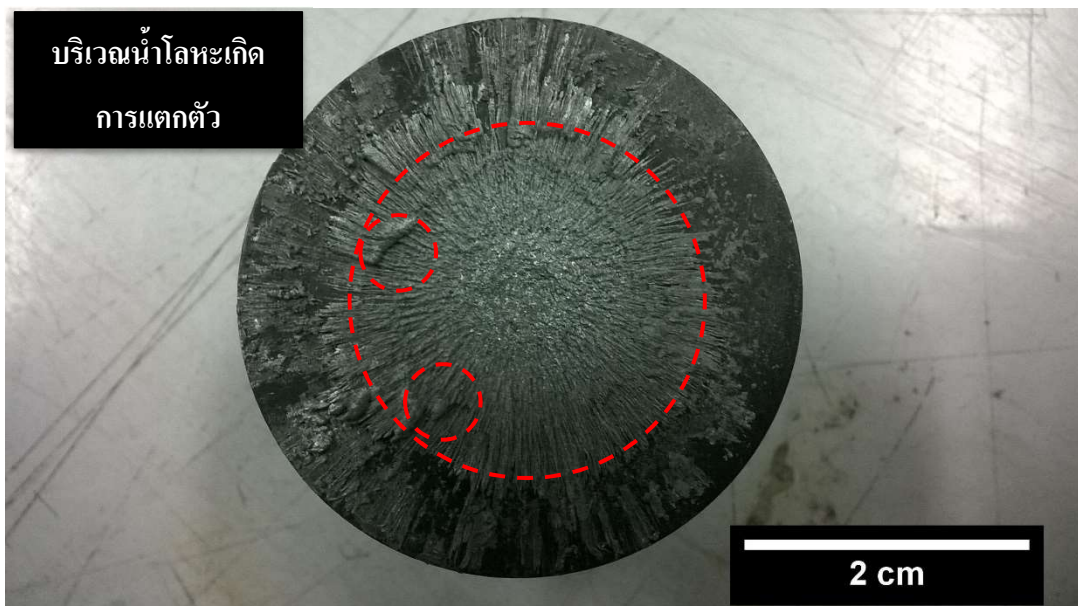
ขณะที่อัตราการป้อนและความเร็วการแผ่ของน้ำโลหะเกิดสมดุล มีลักษณะเหมือนกลุ่มหมอกควันฟุ้งกระจายอยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาชั้นเคลือบหรือชั้นฟิล์มน้ำโลหะที่เกาะอยู่บนผิวงานหลังจากเสร็จการทดลอง รูปที่ 4.3 ซึ่งให้เห็นว่า มีบางตำแหน่งที่น้ำโลหะเกิดการยกตัว บริเวณที่มีการยกตัวของน้ำโลหะบ่งชี้ว่าความเร็วของน้ำโลหะที่แผ่บนงานอะตอมไมเซอร์ไม่ได้สม่ำเสมอทั่วทั้งผิวหน้างาน ตำแหน่งที่ไหลแผ่ช้ากว่า ชั้นฟิล์มน้ำโลหะมีแนวโน้มหนาขึ้น และพบว่าผิวหน้าของงานอะตอมไมเซอร์มีลักษณะนูนขึ้นคล้ายคลื่น ซึ่งเกิดจากการพอกของโลหะบนผิวของงาน



รูปที่ 4.1 ปรัชการณยกตัวของน้ำโลหะ ในช่วงเริ่มการอะตอมไมเซชัน จากการทดลองที่ความเร็วรอบ 50,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง



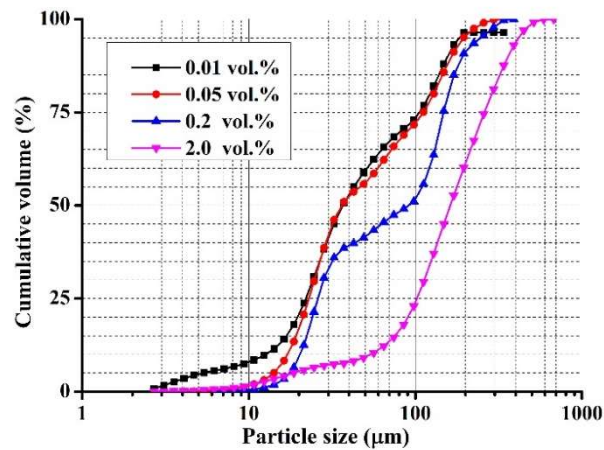
รูปที่ 4.2 ปรากฏการณ์น้ำโลหะแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะขนาดเล็ก เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล จากการทดลองที่ความเร็วรอบ 50,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง



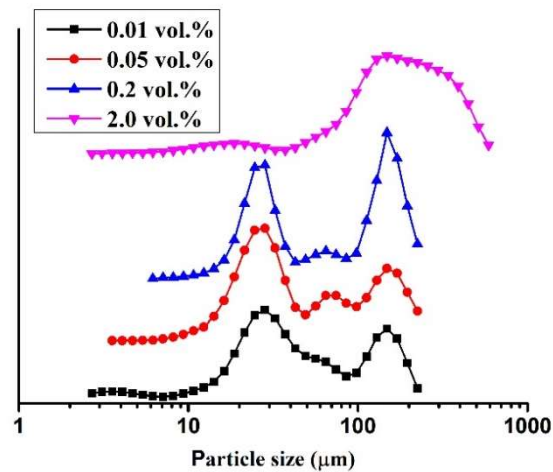
รูปที่ 4.3 การเกิดชั้นฟิล์มเกาะติดบนผิวงานอะตอมไมเซอร์ ภายหลังจากทดลอง ในวงกลมเล็กแสดงตำแหน่งการยกตัวของน้ำโลหะ จากการทดลองที่ความเร็วรอบ 50,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง งานอะตอมไมเซอร์ชนิดงานแบนขนาด 40 มิลลิเมตร

4.1.2 อิทธิพลของปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ต่อการกระจายตัวของผงโลหะ

ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของผงโลหะที่ผลิตด้วยจานอะตอมไมเซอร์ชนิดจานแบน ขนาด 40 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 50,000 รอบต่อนาที อุณหภูมิน้ำโลหะ 290 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนเฉลี่ย 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แสดงใน รูปที่ 4.4 กราฟการกระจายตัวของผงโลหะที่ผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์ 2, 0.2, 0.05, และ 0.01 vol.% (ก) การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตรสะสม และ (ข) การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตร พบว่าปริมาณออกซิเจนภายในถังที่ระดับต่าง ๆ กัน มีผลกระทบต่อ การกระจายตัวของผงโลหะที่ผลิตได้ต่างกัน กล่าวคือ ที่ปริมาณออกซิเจน 2 vol.% ผงโลหะส่วนใหญ่มีแนวโน้มเป็นผงหยาบ อยู่ในช่วงขนาด -600+50 ไมครอน ปริมาณผงโลหะละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน มีปริมาณน้อยคิดเป็นปริมาตรสะสมร้อยละ 10 เมื่อพิจารณาที่ปริมาณออกซิเจน 0.2 vol.% การกระจายตัวผงโลหะแบ่งเป็น 2 กลุ่มอย่างชัดเจน คือ ผงโลหะหยาบและผงโลหะละเอียด ผงหยาบมีขนาดอยู่ในช่วง -150+50 ไมครอน และผงละเอียดอยู่ในช่วง -50+10 ไมครอน คิดเป็นปริมาตรสะสมร้อยละ 60 และ 40 ตามลำดับ ที่ระดับออกซิเจน 0.05 vol.% ผงขนาดหยาบมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อพิจารณาจากความสูงของยอดกราฟ (Peak) มีแนวโน้มลดลง ผงขนาดหยาบแสดงลักษณะกราฟเป็นสองยอดอยู่ติดกัน ผงหยาบมีขนาดอยู่ในช่วง -150+50 ไมครอน และผงละเอียดขนาดเล็กกว่า 50 ไมครอนลงมา ในทำนองเดียวกันที่ระดับออกซิเจน 0.01 vol.% ช่วงการกระจายตัวของผงโลหะกว้างขึ้น ผงละเอียดมีการกระจายตัวกว้างขึ้นอยู่ในช่วงขนาด -80+10 ไมครอน และยังคงมีผงหยาบขนาดใหญ่กว่า 80 ไมครอน รวมอยู่ด้วย ผงโลหะที่ผลิตภายใต้บรรยากาศทั้งที่ระดับออกซิเจน 0.05 vol.% และ 0.01 vol.% ประกอบด้วยผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน ในปริมาณใกล้เคียงกันร้อยละ



(a)



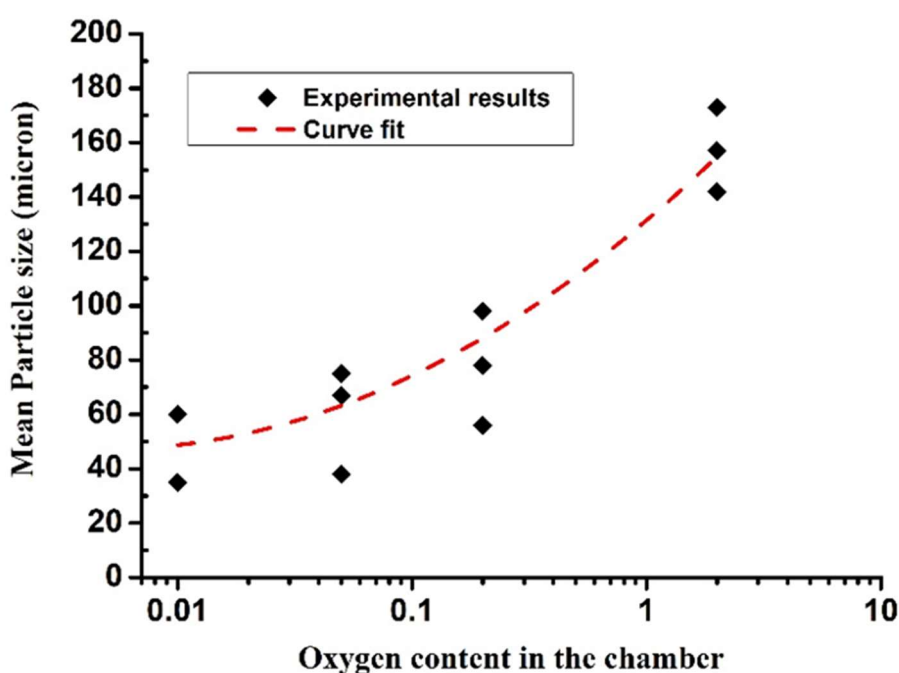
(b)

รูปที่ 4.4 กราฟการกระจายตัวของผงโลหะที่ผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ 2, 0.2, 0.05, และ 0.01 vol.% (a) การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตรสะสม และ (b) การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตร

4.1.3 อิทธิพลของปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ต่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะ

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะกับปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลง ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่ากราฟแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลงจาก 2.0 vol.% ถึง 0.05 vol.% และช่วงที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงเพียงเล็กน้อย ช่วงตามเส้นแนวโน้มสามารถอธิบายได้เป็น 2 ช่วงตามลักษณะเส้นแนวโน้มคือ ช่วงที่ขนาดเฉลี่ยลดลงอย่างรวดเร็วจาก

ปริมาณออกซิเจน 2 vol.% จนถึง 0.05 vol.% และช่วงที่ขนาดเฉลี่ยลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลงจาก 0.05 vol.% ถึง 0.01 vol.% เมื่อปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลงจาก 2.0 vol.% ถึง 0.05 vol.% ขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดจากขนาดเฉลี่ย 160 ไมครอน ไปเป็น 60 ไมครอน หรือลดลงคิดเป็นร้อยละ 62.5 แต่เมื่อปริมาณออกซิเจนลดลงถึงระดับ 0.01 vol.% ขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าประมาณ 50 ไมครอน ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนที่ลดลงเพียงร้อยละ 16.7



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะกับปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์

4.1.4 อิทธิพลของปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ต่อผลผลิตผงโลหะ

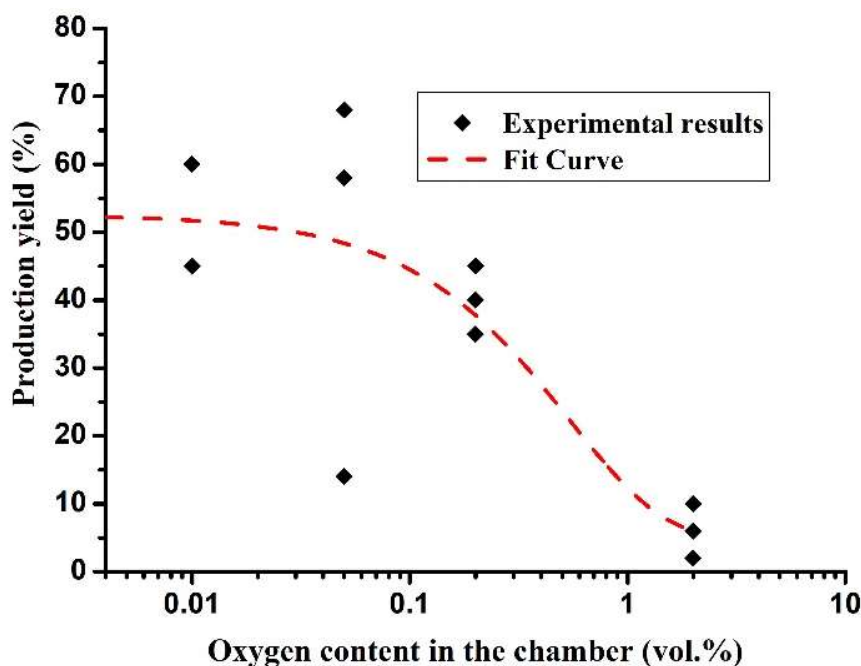
(Production yield)

ผลผลิตผงโลหะ (Production yield, %) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คำนวณได้จากการกระจายตัวของผงโลหะที่ผลิตได้ภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ระดับต่าง ๆ กัน ซึ่งสนใจเฉพาะผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน เท่านั้น ค่าผลผลิตผงโลหะ คำนวณจากการเทียบสัดส่วนระหว่างน้ำหนักผงโลหะที่อยู่ในช่วงขนาดที่ต้องการต่อน้ำหนักผงโลหะที่ผลิตได้ทั้งหมดในแต่ละการทดลอง ในเบื้องต้นการคำนวณค่าผลผลิตผงโลหะจากข้อมูลการกระจายตัวของผงโลหะที่ทำการวิเคราะห์ด้วยตะแกรงร่อน พบว่าเกิดการอุดตันของตะแกรงร่อนเนื่องจากผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดอนุภาคเล็ก ๆ เป็นจำนวนมาก รูปที่ 4.6 เมื่อทดลองนำผงโลหะที่ผลิตได้ใส่ลงในตะแกรงร่อนและนำเข้าเครื่องสั่นตะแกรง (Sieve shaker) ผงโลหะเริ่มเกาะกลุ่มกันแน่น โดยเฉพาะที่ขนาดตะแกรงเบอร์ 270 เมช ซึ่งมีขนาดรูตะแกรง 53 ไมครอน การอุดตันในรูตะแกรงทำให้ผงโลหะ

ขนาดที่เล็กกว่า 53 ไมครอน ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงลงไปได้ หรือลอดผ่านไปได้แต่มีปริมาณน้อยกว่าความเป็นจริง ทำให้ค่าการกระจายตัวของผงโลหะไม่แม่นยำ และส่งผลทำให้ค่าผลผลิตผงโลหะที่คำนวณได้ไม่ถูกต้องตามไปด้วย ดังนั้นการคำนวณค่าผลผลิตผงโลหะ จึงใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์การกระจายตัวของผงโลหะ ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์จากการใช้เครื่องวัดอนุภาคแบบใช้ลำแสงเลเซอร์ แทนการใช้ตะแกรงร่อน ผลผลิตผงโลหะที่ได้จากการผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ในช่วง 0.01 vol.% - 2 vol.% ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 4.7 พบว่าผลผลิตผงโลหะแปรผกผันกับปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ เมื่อปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลงจาก 2 vol.% ถึง 0.2 vol.% ค่าผลผลิตผงโลหะเพิ่มสูงขึ้นประมาณร้อยละ 34 เมื่อลดปริมาณออกซิเจนต่อไปอีกจนถึงระดับ 0.05 vol.% พบว่าผลผลิตผงโลหะยังคงสูงขึ้น แต่เพิ่มขึ้นในสัดส่วนร้อยละ 7 เมื่อลดปริมาณออกซิเจนลงไปอีกที่ระดับ 0.01 vol.% พบว่าค่าผลผลิตผงโลหะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 6 ในงานวิจัยนี้ผลผลิตผงโลหะสูงสุดประมาณร้อยละ 55 เมื่อผลิตผงโลหะที่ปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ 0.01 vol.% อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากเส้นแนวโน้มที่ระดับออกซิเจน 0.05 vol.% และ 0.01 vol.% พบว่าผลผลิตผงโลหะมีค่าใกล้เคียงกัน



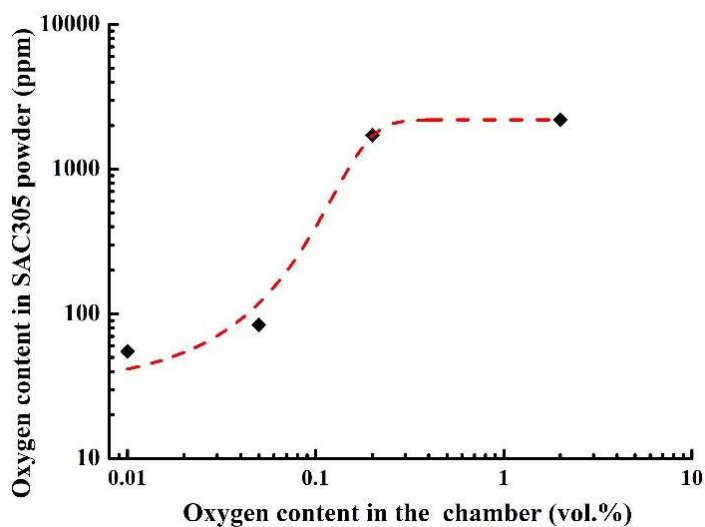
รูปที่ 4.6 การร่อนผงโลหะขนาดละเอียดในตะแกรงร่อน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตผงโลหะกับปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์

4.1.5 อิทธิพลของปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ต่อปริมาณออกซิเจนที่เจือปนอยู่ในผงโลหะ

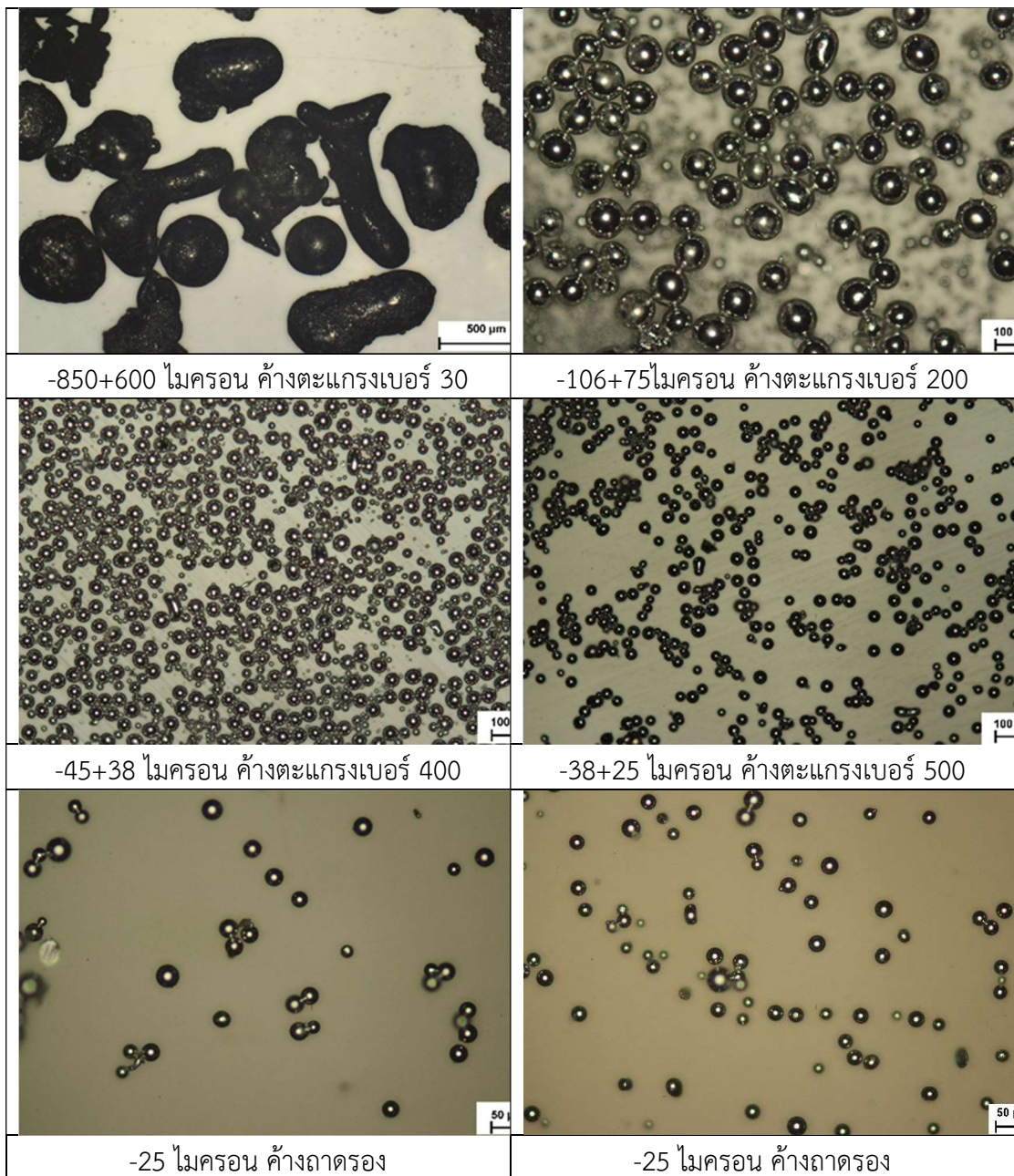
ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มีข้อกำหนดที่เคร่งครัดหลายประการ เช่น ผงโลหะที่ผลิตได้ต้องมีรูปร่างเป็นทรงกลม การกระจายตัวของผงโลหะแคบ และมีปริมาณออกซิเจนเจือปนในผงโลหะน้อยกว่า 100 ppm ผงโลหะที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปนิยมใช้โลหะบัดกรีกลุ่มที่ 3 (Type 3) ซึ่งมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง -45+25 ไมครอน ผงจะถูกนำไปผสมกับฟลักซ์ (flux) ซึ่งเป็นสารเคมี เพื่อทำเป็นโลหะบัดกรีชนิดครีม (Solder paste) จากการทดลองผลิตผงโลหะภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ในช่วง 0.01 vol.% - 2 vol.% พบว่าปริมาณออกซิเจนที่เจือปนอยู่ในผงโลหะที่ผลิตได้มีแนวโน้มลดต่ำลง เมื่อปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลง ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 4.8 เมื่อทดลองผลิตโลหะที่มีปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ 2.0 vol.% ผงโลหะที่ผลิตได้มีปริมาณออกซิเจนเจือปน 2,000 ppm และพบว่าที่ปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ 0.05 vol.% และ 0.01 vol.% ผงโลหะที่ผลิตได้มีปริมาณออกซิเจนเจือปนอยู่ที่ประมาณ 80 ppm และ 60 ppm ตามลำดับ ซึ่งเป็นผงโลหะที่มีคุณภาพสูง ตรงตามมาตรฐานผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนที่เจือปนอยู่ในผงโลหะที่ผลิตได้กับปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์

4.1.6 อิทธิพลของปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ต่อรูปร่างของผงโลหะที่ผลิตได้

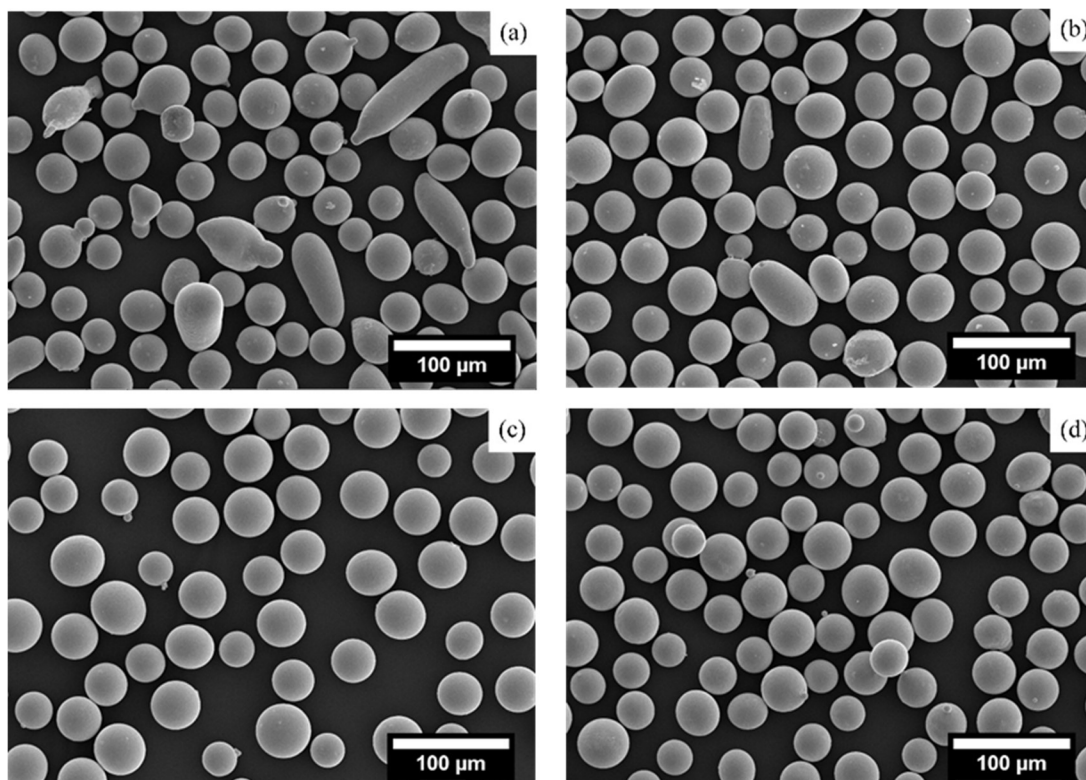
ผงโลหะที่ผลิตได้ถูกนำไปตรวจวิเคราะห์รูปร่าง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) แสดงใน รูปที่ 4.9 เป็นภาพผงโลหะจากกล้อง OM เป็นผงที่มีขนาดอยู่ในช่วง -850+600 ไมครอน จนถึงขนาดที่เล็กกว่า 28 ไมครอน พบว่าผงโลหะขนาดหยาบที่อยู่ในช่วง -850+600 ไมครอน มีลักษณะรูปร่างเป็นเส้น (Ligament) และมีผงลักษณะคล้ายหยดน้ำตา (Tear drop หรือ pear shape) ปะปนกัน ผงโลหะที่มีขนาดเล็กอยู่ในช่วง -106+75 ไมครอน ผงที่มีรูปร่างลักษณะเป็นเส้นมีความยาวลดลง ผงลักษณะเป็นทรงหยดน้ำตามากขึ้น ผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอนลงมาพบว่าส่วนใหญ่เป็นผงที่มีรูปร่างทรงกลม



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายผงโลหะจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แสดงผงโลหะผ่านการคัดขนาดด้วย ตะแกรงร่อน ที่ช่วงขนาด -850+600, -600+75, -45+38, -38+25 และ -25 ไมครอน

นอกจากตรวจวิเคราะห์รูปร่างของผงโลหะด้วยกล้อง OM แล้ว ผงโลหะบางช่วงขนาดถูกนำไปตรวจวิเคราะห์รูปร่างเพิ่มเติม ที่กำลังขยายที่สูงขึ้นด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (SEM) แสดงใน รูปที่ 4.10 การตรวจวิเคราะห์รูปร่างของผงโลหะด้วย SEM มุ่งเน้นไปที่ผง โลหะในช่วงขนาด -45+25 ไมครอน ซึ่งเป็นผงโลหะที่มีขนาดจัดอยู่ในกลุ่ม 3 จากภาพถ่าย SEM ของ ผงโลหะที่ผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ต่าง ๆ ที่ระดับ ออกซิเจน 0.2 vol.% ผงโลหะมีรูปร่างหลายแบบปะปนกัน ได้แก่ ทรงกลม แบบเส้น และแบบหยด

น้ำตา ที่ระดับออกซิเจน 0.2 vol.% ผงโลหะที่มีรูปร่างเป็นแบบเส้นมีความยาวสั้นลง ส่วนใหญ่เป็นผงมีรูปทรงรี แต่ไม่พบผงรูปทรงหยดน้ำตา ที่ปริมาณออกซิเจน 0.05 vol.% และ 0.01 vol.% รูปร่างผงโลหะมีแนวโน้มคล้ายกันคือ มีรูปร่างเป็นทรงกลมค่อนข้างสมบูรณ์



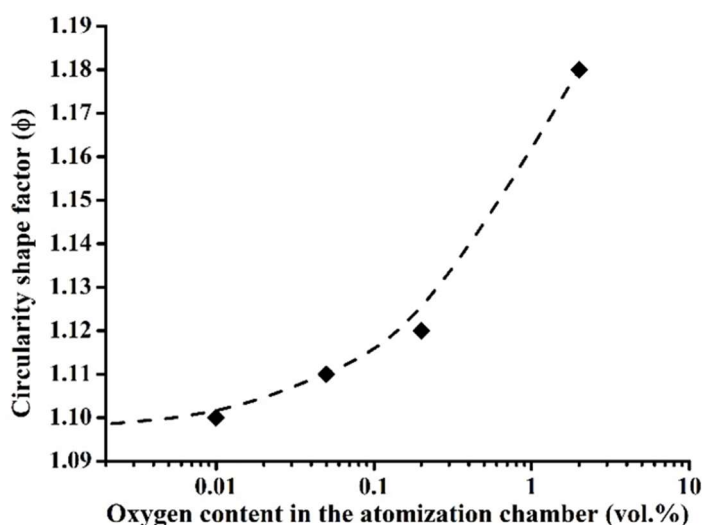
รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM ของผงโลหะที่มีขนาดในช่วง $-45+25$ ไมครอน ที่ผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ต่างกัน (a) 2 vol.%, (b) 0.2 vol.%, (c) 0.05 vol.% และ (d) 0.01 vol.%

4.1.7 อิทธิพลของปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์ต่อค่าตัวประกอบความเป็นทรง

กลม

ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (4.1) ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ค่านี้เป็นตัวชี้วัดที่ใช้เป็นเกณฑ์สำหรับบอกว่า รูปร่างของอนุภาคผงโลหะมีลักษณะเป็นทรงกลมมากน้อยเพียงใด ในกรณีที่ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมมีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าผงโลหะที่ผลิตได้มีลักษณะความกลมที่สมบูรณ์ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมกับปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์ แสดงใน รูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลงจากระดับ 2.0 vol.% ถึง 0.2 vol.% คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 5 แต่ว่าเมื่อลดปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ต่อไปจนถึงระดับ 0.01 vol.% ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมที่ได้เริ่ม

เปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ เมื่อเทียบกับที่ระดับ 0.2 vol.% ผงโลหะมีความกลมมากขึ้นเพียงร้อยละ 1.8 เส้นแนวโน้มนั้นมีความชันน้อยลงและค่อนข้างคงที่เมื่อลดระดับปริมาณออกซิเจนจาก 0.05 vol.% ถึง 0.01 vol.% หรืออาจกล่าวได้ว่าที่ระดับปริมาณออกซิเจนในช่วง 0.2 vol.% - 0.05 vol.% และช่วง 0.05 vol.% - 0.01 vol.% ผงโลหะมีค่าความกลมเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมเฉลี่ยต่ำสุดมีค่าประมาณ 1.10 ที่ระดับปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ 0.01 vol.%



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมของผงโลหะกับปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์

4.2 วิจารณ์ผลการทดลองการผลิตผงโลหะบัดไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ภายใต้การควบคุมบรรยากาศ

4.2.1 ปรากฏการณ์การยกตัวของน้ำโลหะบนผิวหน้าของจานอะตอมไมเซอร์

โดยทั่วไปเมื่อน้ำโลหะไหลผ่านหัวฉีด น้ำโลหะตกลงบนจานอะตอมไมเซอร์ที่กำลังหมุนด้วยความเร็วรอบสูง น้ำโลหะถูกแรงเหวี่ยงทำให้เกิดเป็นฟิล์มของน้ำโลหะไหลแผ่จากจุดศูนย์กลางของจานอะตอมไมเซอร์และเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ขอบจาน ชั้นฟิล์มน้ำโลหะจะถูกเร่งให้มีความเร็วเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความเร็วสูงสุดตรงบริเวณขอบจาน เมื่อชั้นฟิล์มน้ำโลหะเคลื่อนที่ถึงบริเวณขอบจานจะเกิดการแตกตัวเป็นละอองหยดน้ำโลหะขนาดเล็ก ๆ หลุดออกจากขอบจาน ละอองน้ำโลหะจะเคลื่อนที่ลอยอยู่ในอากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ ในขณะเดียวกันละอองน้ำโลหะจะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่อยู่รอบ ๆ และเย็นตัวกลายเป็นเม็ดผงโลหะตกลงสู่ถังอะตอมไมเซอร์ การอะตอมไมเซอร์ที่สมบูรณ์ ผิวของจานอะตอมไมเซอร์จะไม่มีชั้นฟิล์มโลหะหนาพอกเกาะติดบนผิวหน้าของจานภายหลังการใช้งาน อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้พบว่า หลังการทดลองเกิดชั้นฟิล์มโลหะพอกอยู่บนผิวของจานในบางตำแหน่ง ซึ่งบ่งชี้ว่าชั้นฟิล์มโลหะที่พอกอยู่บนผิวจานเกิดจากการ

ยกตัวของน้ำโลหะขณะทำการอะตอมไมเซชัน แม้ว่าได้ทำการควบคุมอัตราการป้อนน้ำโลหะและความเร็วรอบให้คงที่ แต่ในสภาพความเป็นจริงแล้วความเร็วของชั้นฟิล์มน้ำโลหะจะไหลแผ่ออกไปที่ขอบจาน ไม่ได้มีความเร็วสม่ำเสมอทุก ๆ จุด ทำให้บางตำแหน่งที่ความเร็วของน้ำโลหะไม่สมดุลกับอัตราการป้อนน้ำโลหะก็จะเกิดการยกตัวของน้ำโลหะ น้ำโลหะที่ยกตัวขึ้นจะเกิดการแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะก่อนที่จะไหลไปถึงตำแหน่งขอบจาน จากงานวิจัยของ Ho และ Zhao (2004) [49] ได้ทดลองใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายการเกิดปรากฏการณ์เกิดชั้นฟิล์มโลหะแข็งตัวพอกอยู่บนผิวของจานอะตอมไมเซอร์ และมีการศึกษาการเกิดชั้นฟิล์มหนาบนผิวของจานในการอะตอมไมเซชันโลหะตีบุก โดย Xie และคณะ (2004) [24] นอกจากนี้แล้ว Zhao (2004 A) [50] ได้รายงานผลการอะตอมไมเซชัน ที่ความเร็วรอบสูงเมื่อใช้จานอะตอมไมเซอร์เปรียบเทียบกับจานทรงถ้วย พบว่าจานทรงแบนมีค่ามุมสัมผัสวิกฤติน้อยกว่า ทำให้สภาพการเปียกของน้ำโลหะมีค่าน้อยลง จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัวก่อนที่จะไหลไปถึงขอบจาน ความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์นี้สามารถทำให้การควบคุมการอะตอมไมเซชันมีประสิทธิภาพขึ้น สำหรับในงานวิจัยนี้พบปรากฏการณ์การยกตัวของน้ำโลหะและการแตกตัวของฟิล์มน้ำโลหะก่อนที่จะไหลไปถึงขอบจานเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ ตอนเริ่มต้นการอะตอมไมเซชัน ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดผงโลหะขนาดหยาบมาก ลักษณะเป็นเกล็ดปะปนอยู่ในผงโลหะขนาดละเอียด ดังนั้นในการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของผงโลหะที่ผลิตได้ จะทำการคัดแยกผงโลหะหยาบด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 100 เมช ออกก่อน แล้วจึงนำผงโลหะที่ผ่านตะแกรงไปตรวจวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของผงโลหะด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดแบบใช้ลำแสงเลเซอร์

4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์กับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ

จากการศึกษาพบว่าปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ส่งผลกระทบต่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ซึ่งผลการศึกษาที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sheikhaliev และคณะ (2008) [27] ซึ่งได้ทำการทดลองผลิตผงอลูมิเนียมด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน โดยลดปริมาณออกซิเจนที่อยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์จาก 21 vol.% ไปจนถึง 0.5 vol.% ทำให้ได้ผลโลหะที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงจาก 450 ไมครอน เป็น 250 ไมครอน การลดปริมาณออกซิเจนจากสภาวะบรรยากาศปกติจนถึงระดับ 0.5 vol.% (5,000 ppm) ทำให้ผงโลหะมีขนาดเล็กลงร้อยละ 44 เนื่องจากปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลง ทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนกับผิวของละอองน้ำโลหะมีความรุนแรงลดลงตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ถ้าทำการทดลองภายใต้บรรยากาศปกติที่มีปริมาณออกซิเจน 21 vol.% ขณะที่น้ำโลหะเริ่มแตกตัวเนื่องจากแรงหนีศูนย์กลางบริเวณขอบจานอะตอมไมเซอร์ ละอองน้ำโลหะที่แตกตัวในขั้นแรกจะมีลักษณะเป็นเส้นเรียวยาว (Ligament) เพราะละอองน้ำโลหะจะเย็นตัวทันทีเมื่อสัมผัสกับบรรยากาศ ผงโลหะที่ได้มีแนวโน้มเป็นผงหยาบ ในทางตรงกันข้ามถ้าบรรยากาศในถังอะตอมไมเซอร์มีปริมาณ

ออกซิเจนน้อยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนกับละอองน้ำโลหะจะมีความรุนแรงน้อยลง ลิกาเมนต์ที่เกิดจากการแตกตัวจากฟิล์มน้ำโลหะในตอนแรกจะเกิดการแตกตัวรอบที่สอง และก่อตัวเป็นผงโลหะที่มีรูปร่างคล้ายหยดน้ำตาหรือกลายเป็นรูปร่างทรงกลมต่อไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์ การลดปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์ทำให้ชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกิดบนผิวหน้าโลหะบางลง และมีผลกระทบต่อค่าความตึงผิวของน้ำโลหะ (Surface tension) น้อยลง ยังผลให้หยดน้ำโลหะสามารถฟอร์มตัวเป็นรูปร่างทรงกลมได้ง่ายขึ้น Sheikhaliev และคณะ (2008) [27] รายงานว่าค่าแรงตึงผิวของน้ำโลหะอุณหภูมิเยือกดลงร้อยละ 25 เมื่อวัดในบรรยากาศไนโตรเจนเทียบกับบรรยากาศปกติ เมื่อพิจารณาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยกับสมบัติของน้ำโลหะและตัวแปรในการอะตอมไมเซชันแบบแรงเหวี่ยง ที่นำเสนอโดย Sheikhaliev และคณะ (2008) [27] พบว่าขนาดเฉลี่ยของผงโลหะแปรผันโดยตรงกับรากที่สอง ของค่าความตึงผิว ซึ่งหมายความว่าภายใต้เงื่อนไขความเร็วรอบเท่ากันและใช้จานอะตอมไมเซอร์แบบเดียวกัน เมื่อชั้นฟิล์มออกไซด์บนโลหะเหลวบางลงย่อมส่งผลให้ความตึงผิวลดลง เมื่อความตึงผิวลดลงทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้มีแนวโน้มเล็กลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยไม่ได้วัดค่าความตึงผิวโดยตรง เมื่อลดปริมาณออกซิเจนภายในถัง เนื่องจากความตึงผิวและความหนาแน่นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำโลหะ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงคำนวณค่าความตึงผิวและความหนาแน่นของน้ำโลหะ จากโปรแกรม SURDAT โดยคำนวณที่อุณหภูมิน้ำโลหะ 282 และ 332 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมินี้ทั้งสองนี้ ค่าความตึงผิวและความหนาแน่นที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น จึงทำให้ทราบว่า การที่ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะมีขนาดเล็กลงเป็นอิทธิพลจากการลดปริมาณออกซิเจนมากกว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำโลหะ อย่างไรก็ตามจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ายังไม่มีรายงานการศึกษาสมบัติความตึงผิวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณออกซิเจน

4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์กับการกระจายตัวของผงโลหะ

การกระจายตัวของผงโลหะที่ได้จากการทดลองนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ ผงโลหะขนาดหยาบ และผงโลหะขนาดละเอียด ถ้าพิจารณาตามปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ที่ลดลง พบว่าที่ปริมาณออกซิเจนสูงสุด 2 vol.% ผงโลหะมีขนาดใหญ่ มีการกระจายตัวของผงโลหะกว้าง เนื่องจากเมื่อฟิล์มน้ำโลหะเกิดการแตกตัวครั้งแรกแล้วเย็นตัวทันที โอกาสในการแตกตัวครั้งที่สองจึงมีน้อยลง จะเห็นได้จากรูปร่างผงโลหะมีลักษณะทรงยาวเรียวยาวและทรงหยดน้ำตาลักษณะรูปร่างของผงโลหะดังกล่าว ทำให้การกระจายตัวของผงโลหะกว้าง เนื่องจากมีทั้งผงหยาบและผงละเอียดปะปนกัน เมื่อทดลองลดปริมาณออกซิเจนลง ปริมาณออกซิเจนที่น้อยลงจะทำให้ความไวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนและหยดน้ำโลหะเหลวลดลง โอกาสเกิดการแตกตัวของหยดน้ำโลหะเหลวครั้งที่สองจึงมีมากขึ้น ละอองน้ำโลหะสามารถเปลี่ยนรูปร่างจาก

ลักษณะทรงยาวเรียวยาวและหยดน้ำตา กลายเป็นทรงกลมได้ง่ายขึ้น ดังนั้น การลดปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ทำให้ปริมาณของผงหยาดลดลง และส่งผลให้การกระจายตัวของผงโลหะแคบลง ในทางปฏิบัติการผลิตผงโลหะให้มีการกระจายตัวแคบและมีกลุ่มเดียว กราฟการกระจายตัวของผงโลหะมีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำและมีฐานแคบ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับตัวแปรปริมาณออกซิเจนเพียงอย่างเดียว ลักษณะรูปทรงของจานอะตอมไมเซอร์ก็มีผลด้วยเช่นกัน Zhao (2004 B) [51] รายงานว่า จานอะตอมไมเซอร์ที่ขอบจานมีมุมชันขึ้นจะช่วยเพิ่มค่ามุมเปียกวิกฤติของน้ำโลหะกับผิวของจานให้สูงขึ้น ส่งผลทำให้น้ำโลหะสามารถแผ่ราบติดกับผิวของจานได้ดี และทำให้เกิดการแตกตัวของฟิล์มน้ำโลหะตรงบริเวณขอบจาน แต่ในงานวิจัยนี้ใช้จานอะตอมไมเซอร์ทรงแบน การเปียกที่ความเร็วสูง ๆ น้อยลง เพราะมุมเปียกวิกฤติของจานทรงแบนเมื่อเทียบกับจานทรงถ้วยมีค่าน้อยกว่าที่ความเร็วเดียวกัน ซึ่งอาจทำให้ฟิล์มน้ำโลหะบางส่วนเกิดการแตกตัวก่อนที่จะเคลื่อนที่ไปถึงขอบจาน ยังผลทำให้ผงโลหะที่ผลิตได้มีการกระจายตัวแยกเป็นสองกลุ่มที่เห็นได้อย่างชัดเจน

4.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์กับผลผลิตผง

โลหะ

จากงานวิจัยนี้ผลผลิตผงโลหะที่ได้ สูงสุดประมาณร้อยละ 50 ซึ่งค่อนข้างต่ำกว่าที่มีการรายงานโดยนักวิจัยกลุ่มอื่น โดยทั่วไปผลผลิตผงโลหะที่ได้จากการอะตอมไมเซอร์แบบหมุนเหวี่ยงจะอยู่ในช่วงร้อยละ 85-90 [8] อาจเป็นไปได้ที่งานวิจัยนี้มุ่งเน้นผลผลิตผงโลหะเฉพาะผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน เท่านั้น นอกจากนี้จานอะตอมไมเซอร์ที่ใช้เป็นแบบจานทรงแบน งานวิจัยของ Angers และคณะ (1997) [52] รายงานว่า จานทรงถ้วยสามารถผลิตผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่ารวมทั้งเพิ่มผลผลิตผงโลหะสูงกว่า เนื่องจากมีมุมเปียกวิกฤติสูงกว่า

4.2.5 ลักษณะรูปร่างของผงโลหะที่ผลิตได้

ในการทดลองแม้ว่าจะสามารถควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ให้ปริมาณออกซิเจนลดลงถึงระดับ 0.01 vol.% แต่ผงโลหะที่ผลิตได้ ยังไม่เป็นรูปร่างเป็นทรงกลมทั้งหมด เช่น เมื่อนำผงโลหะที่ผลิตที่ระดับออกซิเจน 0.01 vol.% ส่งตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้อง OM พบว่า ผงโลหะในช่วง -850+600 มีรูปร่างแบบแท่งเรียวยาว หรือแบบลิกาเมนต์ และรูปทรงหยดน้ำตา ผงโลหะที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน ลักษณะรูปร่างของผงโลหะส่วนใหญ่มีแนวโน้มเป็นทรงกลมมากขึ้น และผลการตรวจวิเคราะห์ผงโลหะในช่วง -45+25 ไมครอน ด้วย SEM พบ ผงโลหะรูปร่างลิกาเมนต์และหยดน้ำตามีปริมาณน้อย และพบว่าที่ปริมาณออกซิเจน 2 vol.% ผงโลหะรูปร่างลิกาเมนต์และหยดน้ำตาปะปนอยู่กับผงทรงกลม แต่เมื่อลดปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์เหลือเพียง 0.2 vol.% ผงโลหะที่มีรูปร่างลิกาเมนต์มีความยาวสั้นลงและเป็นผงรูปร่างกลมมากขึ้น เมื่อลดปริมาณออกซิเจนลงที่ระดับ 0.05 vol.% และ 0.01 vol.% ผงโลหะมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมเกือบทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Xie และคณะ (2004) [24] และ Sheikhaliev

และคณะ (2008) [27] และเมื่อวิเคราะห์ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมของผงโลหะ พบว่าปริมาณออกซิเจนที่ลดลงทำให้ผงโลหะมีแนวโน้มกลมขึ้น ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมที่คำนวณได้มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง ซึ่งเป็นค่าของทรงกลมสมบูรณ์

จากการตรวจวิเคราะห์ผงโลหะในช่วงขนาด $-45+25$ ไมครอน จากภาพถ่าย SEM พบด้วยว่ามีผงโลหะขนาดเล็กมากเกาะติดอยู่กับผงโลหะขนาดใหญ่ ทางด้านโลหะวิทยาโลหะผง เรียกลักษณะเช่นนี้ว่า Satellite (ดูรูป ที่ 4.10 c และ 3.10 d) กลไกการเกิด Satellite เนื่องจากละอองน้ำโลหะขนาดเล็กจะเย็นตัวกลายเป็นผงโลหะก่อนและใช้เวลาในการตกลงสู่กันถึงอะตอมไมเซอร์ ในขณะที่ผงโลหะขนาดเล็กลอยอยู่ในอากาศ ละอองน้ำโลหะที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งเย็นตัวช้ากว่า พุ่งชนกับผงโลหะขนาดเล็ก ทำให้ผงโลหะทั้งสองขนาดเกาะติดกัน [18] การเกิด Satellite มีผลทำให้การวัดขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากเครื่องตรวจวิเคราะห์ขนาดจะวัด Satellite เป็นผงขนาดใหญ่ การลดปัญหาที่เกิดจาก Satellite ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ จะต้องทำการกระจายผงโลหะในสารละลาย เช่น เมธิลแอลกอฮอล์ และสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิคส์ เพื่อกระจายให้เม็ดผงโลหะที่เกาะติดกันหลุดแยกออกจากกัน

4.3 ผลการวิจัยตอนที่ 2 ผลการศึกษาการคัดขนาดผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ด้วยไซโคลนลมและผลการศึกษาการคัดขนาดผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม

เนื้อหาผลการวิจัยตอนที่ 2 แบ่งการศึกษาออกเป็นสองหัวข้อย่อย ตอนที่หนึ่งเป็นการเสนอผลการทดลองการคัดขนาดผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ด้วยไซโคลนลมที่ทำการศึกษาในเบื้องต้น (Preliminary study) โดยทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การคัดขนาดผง โดยพิจารณาเฉพาะค่าเปอร์เซ็นต์การคัดขนาดผงละเอียด ($\%E_{mf}$) เท่านั้น ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลของลม อัตราการป้อนผงโลหะ ความยาวของท่อแยก (Vortex finder) ความดันขณะป้อนผงโลหะและความดันลมป้อนเสริม (Secondary air pressure) สำหรับหัวข้อย่อยที่สองนำเสนอผลการทดลองการคัดขนาดผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม (Turbo air classifier) โดยทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อขนาดตัด (Cut size, d_{50}) และความคมของการคัดขนาด (Sharpness of classification, K) ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเร็วรอบของโรเตอร์ อัตราการป้อนผงโลหะและความเร็วลมที่ไหลเข้าสู่เครื่องคัดขนาด การทดลองในส่วนนี้ ได้ทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (2^k factorial design) สามตัวแปร แต่ละตัวแปรแบ่งเป็นสองระดับ ผลที่ได้จากการทดลอง ได้แก่ ค่า d_{50} และ ค่า K จะถูกนำไปวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม MINITAB 16 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า d_{50} และ ค่า K พิจารณาในช่วงความเชื่อมั่น 95% ที่มีระดับนัยสำคัญ 5% ($\alpha=0.05$) หลังจากนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ d_{50} และ K ถ้าตัวแปรเหล่านี้มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า d_{50} และ K

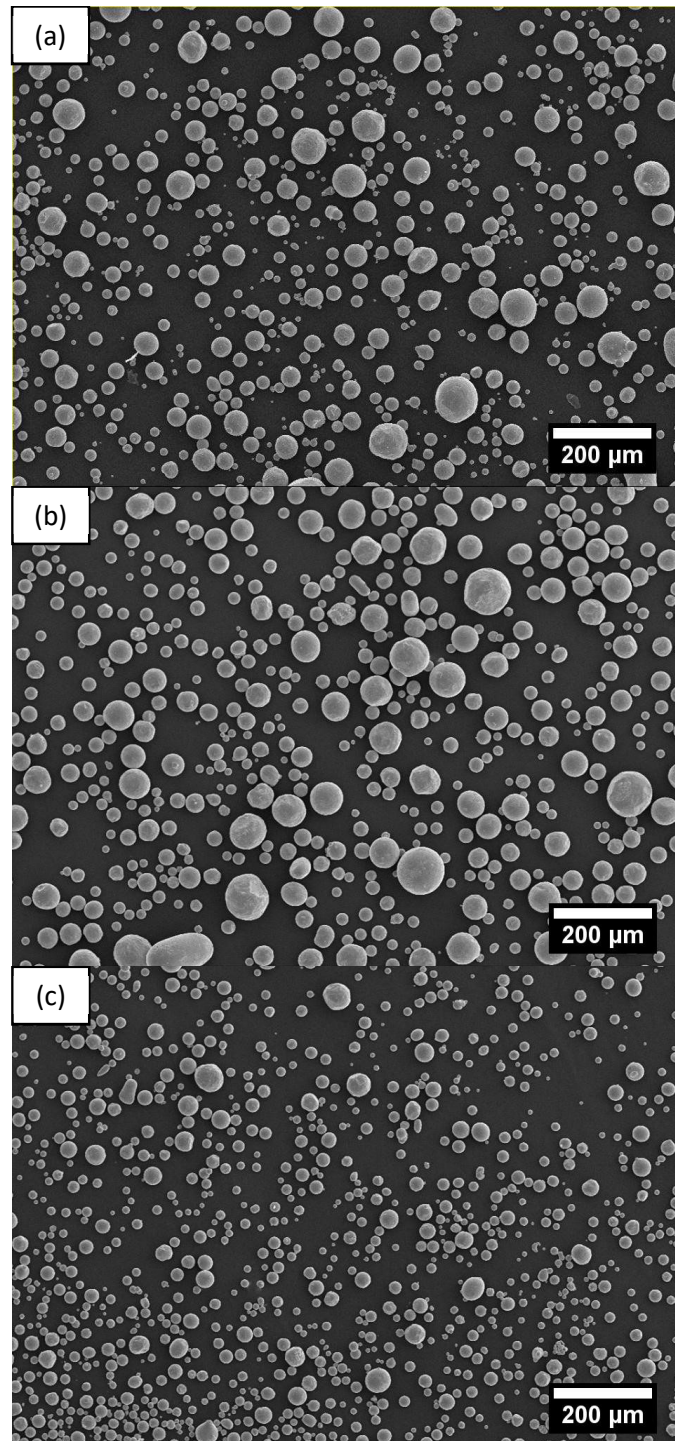
4.3.1 การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การคัดขนาดผงละเอียดโดยใช้ไซโคลนลม

จากการศึกษาเมื่อทำการการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรต่าง ๆ ของไซโคลนลม ได้แก่ อัตราการไหลของลม อัตราการป้อนผงโลหะ ความยาวของท่อแยก ความดันขณะป้อนผงโลหะ พบว่าเปอร์เซ็นต์การคัดขนาดผงละเอียดที่ได้ (%E_{mf}) น้อยกว่า 3% หมายความว่า การปรับค่าตัวแปรที่ทดลองกับไซโคลนลมมีการคัดขนาดผงโลหะเกิดขึ้นน้อยมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าไซโคลนลมที่นำมาทดลองถูกออกแบบมาสำหรับเก็บผงที่ละเอียดมาก ๆ เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทดลองเพิ่มความดันลมเสริม (Secondary air pressure) กับไซโคลนลม ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าเปอร์เซ็นต์การแยกผงละเอียดหรือค่าเปอร์เซ็นต์ %E_{mf} เพิ่มขึ้นตามความดันลมเสริม เมื่อทำการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ให้คงที่ ได้แก่ อัตราการไหลของลม 4 m³/min อัตราการป้อนผงโลหะ 1.79 g/s ความยาวของท่อแยก 36.75 mm ความดันสำหรับป้อนผงโลหะ 4 kg/cm² อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าค่า %E_{mf} จะเพิ่มสูงขึ้น ในความเป็นจริงค่า %E_{mf} บอแค่สัดส่วนปริมาณผงโลหะที่ถูกเก็บเป็นผงละเอียด (fine product) เท่านั้น ค่าดัชนีที่สามารถบ่งบอกสมรรถนะในการคัดแยกของไซโคลน ได้แก่ ค่าขนาดตัด (Cut size) และค่าความคมของการคัด (Sharpness of classification) ซึ่งในการทดลองโดยใช้ไซโคลนในงานวิจัยนี้ ไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจากเมื่อทำการสุ่มเก็บตัวอย่างผงโลหะที่ได้จากการคัดขนาดด้วยไซโคลนลม ที่สภาวะความดันลมเสริมที่ 2 kg/cm² เพื่อวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคเฉลี่ยโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyser) พบว่า ผงป้อน (Feed powder) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใกล้เคียงกับผงหยาบ (Coarse product) นั่นคือ 38 ไมครอน และ 39 ไมครอน ตามลำดับ สำหรับผงละเอียด (Fine product) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 27 ไมครอน จากค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่วัดได้ ทำให้ทราบว่าแม้ผงโลหะจะมีเกิดการแยก เนื่องจากค่า %E_{mf} เพิ่มขึ้น แต่สมรรถนะในการคัดแยกของไซโคลนลมที่สามารถคัดแยกได้ดี่ำ ในการทดลองคัดขนาดด้วยไซโคลนลม งานวิจัยนี้ไม่สามารถสร้างเส้นโค้งประสิทธิภาพ (Tromp curve) ของไซโคลนลมได้ ทำให้ไม่สามารถประเมินค่า d₅₀ และ ค่า K ได้ ต่อมาเมื่อนำผงที่คัดแยกได้ คือ ผงหยาบและผงละเอียด ไปวิเคราะห์ดูลักษณะผงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ดังรูปที่ 4.12 พบว่าผงหยาบที่คัดแยกได้มีการปนของผงละเอียดอยู่เป็นจำนวนมาก และเช่นเดียวกันในผงละเอียดที่คัดแยกได้ก็มีการปนของผงหยาบอยู่ด้วย ส่งผลให้ค่าขนาดเฉลี่ยของผงป้อนและผงหยาบที่แยกได้ไม่ชัดเจน รวมทั้งผงละเอียดที่มีผงหยาบปนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.1 อิทธิพลของความดันลมเสริมที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การแยกผงละเอียด (%E_{mf})

Secondary air pressure (kg/cm ²)	% Separation of fine powder (% E _{mf})				
	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Average	SD
2	15.51	14.40	13.03	14.31	1.24
4	39.62	37.73	35.25	37.53	2.19
4.5	45.91	48.39	48.91	47.74	1.60
5	57.21	73.98	56.59	62.59	9.87
5.5	98.04	98.51	98.21	98.25	0.24
6	97.63	97.62	96.86	97.37	0.44

หมายเหตุ: ขนาดของไซโคลน (Body cyclone diameter, D = 147 mm), สูตรคำนวณเปอร์เซ็นต์การคัดขนาดผงละเอียด $\%E_{mf} = (M_{mf} / M) \times 100$, M=น้ำหนักผงป้อน (g), M_{mf}=น้ำหนักผงละเอียดที่คัดแยกได้โดยใช้ไซโคลนลม (g)



รูปที่ 4.12 ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ชนิด SAC305 ที่มีการตัดแยกโดยใช้ไซโคลนลม (a) ผงป้อน (b) ผงหยาบ และ (c) ผงละเอียด ที่สภาวะ อัตราการไหลของลม $4 \text{ m}^3/\text{min}$ อัตราการป้อนผงโลหะ 1.79 g/s ความยาวของท่อแยก 36.75 mm ความดันสำหรับป้อนผงโลหะ 4 kg/cm^2

4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อขนาดตัด (d_{50}) โดยใช้เครื่องตัดขนาดเทอร์โบลม

4.3.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองด้วยวิธีการทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการเชิงสถิติ จากการศึกษาคัดขนาดของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการตัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องตัดขนาดเทอร์โบลม ดังแสดงใน ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ถูกใช้เพื่อทดสอบสมมติฐานหลัก (H_0) สมมุติให้ผลกระทบของตัวแปรหลัก (Main effects) และผลกระทบของตัวแปรร่วม (Interaction effects) มีค่าเท่ากับศูนย์ และผลรวมกำลังสอง (Sum of squares) ถูกใช้สำหรับประเมินอิทธิพลของแต่ละตัวแปรและค่า F (F-ratio) เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.2 พบว่า ทั้งผลกระทบจากตัวแปรหลักและผลกระทบจากตัวแปรร่วม มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ตัวแปรที่เลือกมาทดสอบ ได้แก่ ความเร็วรอบของโรเตอร์ อัตราการป้อนผงโลหะ และความเร็วลม มีผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมต่อค่า d_{50} อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปร ความเร็วรอบของโรเตอร์ (A) อัตราการป้อนผงโลหะ (B) และความเร็วลม (C) ที่มีผลต่อค่า d_{50} จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^3 ด้วยโปรแกรม MINITAB 16 ดังแสดงใน ตารางที่ 4.3 ผลกระทบ (Effects) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่อยู่ระหว่างระดับสูงและระดับต่ำ ถ้าผลกระทบของตัวแปรใดมีค่าเป็นบวก หมายความว่า ค่า d_{50} จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรนั้นจากระดับต่ำไประดับสูง ตัวอย่าง เช่น ผลกระทบของความเร็วลม (C) มีค่า +39.66 หมายความว่า เมื่อเพิ่มความเร็วลมจากระดับต่ำไประดับสูง จะส่งผลต่อ d_{50} เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าผลกระทบของตัวแปรใดมีค่าเป็นลบ เมื่อตัวแปรนั้นถูกปรับจากระดับต่ำเป็นระดับสูง จะส่งผลให้ค่า d_{50} ลดลง เช่น ความเร็วรอบของโรเตอร์ (A) มีค่าผลกระทบเท่ากับ -44.29 หมายความว่า การเปลี่ยนระดับความเร็วรอบของโรเตอร์จากระดับต่ำไปเป็นระดับสูง ส่งผลให้ค่า d_{50} ลดลง ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า P ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) ดังนั้น ตัวแปรใดที่มีค่า P น้อยกว่า 0.05 ถือว่ามีผลกระทบต่อค่า d_{50} อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปร จากตารางที่ 4.3 พบว่า อิทธิพลของตัวแปร มีค่า P มากกว่า 0.05 แสดงว่าอิทธิพลของตัวแปรร่วมนั้นไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า d_{50} เช่น ความเร็วรอบของโรเตอร์ร่วมกับอัตราการป้อนผงโลหะ (AB) และอัตราการป้อนผงโลหะร่วมกับความเร็วลม (BC) นอกเหนือจากนั้นพบว่าอิทธิพลต่อค่า d_{50} ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า d_{50} และพบว่าผลกระทบของตัวแปรหลักทั้งสามตัวแปร คือ ความเร็วรอบของโรเตอร์ (A) อัตราการป้อนผงโลหะ (B) และความเร็วลม (C) ทุกตัวแปรมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า d_{50} และยังพบว่าตัวแปร A และ C มีผลกระทบต่อค่า d_{50} สูงกว่าตัวแปร B เนื่องจากค่า P ของตัวแปร A และ C มีค่าต่ำกว่าค่า P ของตัวแปร B

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า d_{50} จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^3 ด้วยโปรแกรม MINITAB 16

Source	Degree of freedom	Sum of squares	Adj. Sum of squares	Adj. Mean Squares	F-ratio	P-value
Main Effects	3	14,213.5	14,213.5	4,737.83	407.43	0.000
2-Way Interactions	3	825.4	825.4	275.12	23.66	0.000
3-Way Interactions	1	581.9	581.9	581.90	50.04	0.000
Residual Error	8	93.0	93.0	11.63		
Pure Error	8	93.0	93.0	11.63		
Total	15	15,713.8				

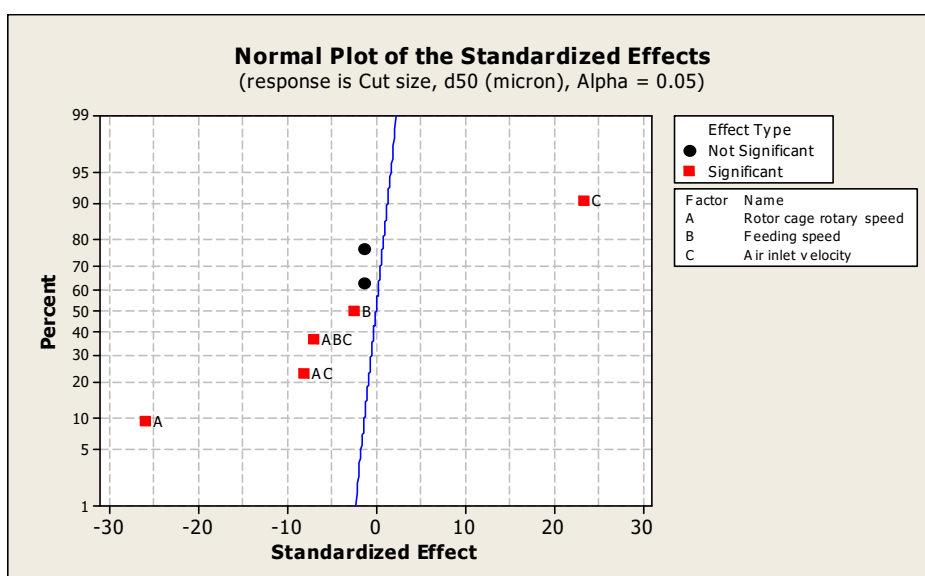
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม ที่มีผลต่อค่า d_{50} จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^3 ด้วยโปรแกรม MINITAB 16

Terms	Effects	Coefficients	Standard error	T-value	P-value
Constant		66.66	0.8525	78.19	0.000
A	-44.29	-22.15	0.8525	-25.98	0.000
B	-4.27	-2.13	0.8525	-2.50	0.037
C	39.66	19.83	0.8525	23.26	0.000
AB	-2.46	-1.24	0.8525	-1.45	0.184
AC	-13.94	-6.97	0.8525	-8.18	0.000
BC	-2.42	-1.21	0.8525	-1.42	0.194
ABC	-12.06	-6.03	0.8525	-7.07	0.000
S	3.41008				
R-Sq	0.9941				
R-Sq (adj)	0.9889				

หมายเหตุ: ตัวแปร A = ความเร็วรอบของโรเตอร์, B = อัตราการป้อนผงโลหะ, C = ความเร็วลม

4.3.2.2 การทดสอบการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal probability plot)

กราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (ดังรูปที่ 4.13) ที่มีผลกระทบต่อค่า d_{50} โดยการคำนวณค่าผลกระทบของแต่ละตัวแปรที่มีผลต่อค่า d_{50} ค่าที่คำนวณได้จะถูกนำมาพล็อตเทียบกับเส้นตรงซึ่งเป็นตัวแทนของการแจกแจงแบบปกติ เนื่องจากผลกระทบของตัวแปร A, B และ C รวมทั้งผลกระทบของตัวแปรร่วม AC และ ABC ไม่ได้ถูกพล็อตอยู่ในแนวเดียวกับเส้นตรง ดังนั้น ผลกระทบของตัวแปรหลักและตัวแปรร่วมเหล่านี้ มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า d_{50} ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ผลกระทบของตัวแปร A (ความเร็วรอบของโรเตอร์) และตัวแปร C (ความเร็วลม) อยู่ห่างจากเส้นตรงไกลที่สุด ดังนั้น A และ C จึงมีผลกระทบสูงสุดต่อค่า d_{50}

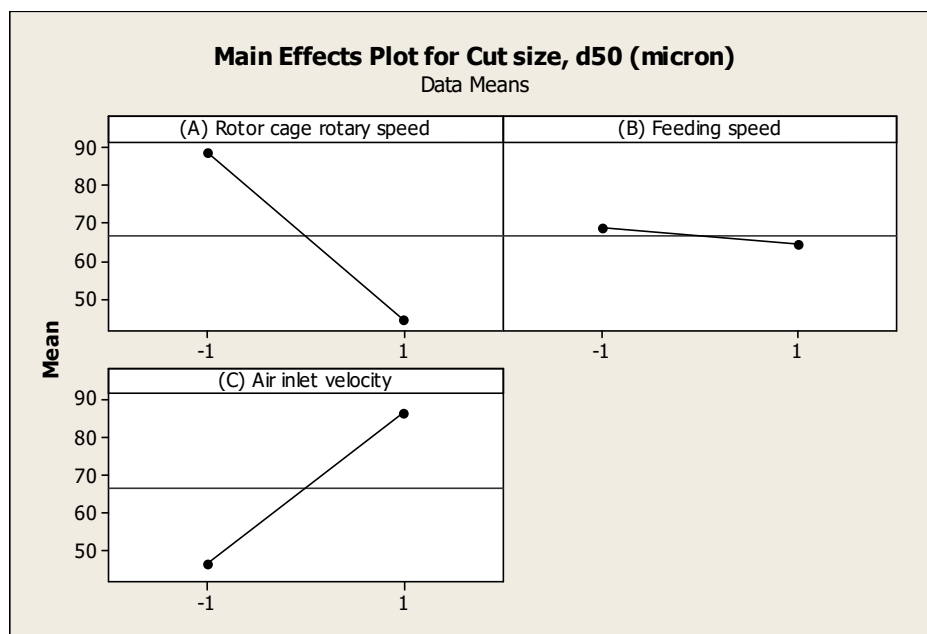


รูปที่ 4.13 การระบุตัวแปรที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า d_{50} ด้วยกราฟ Normal probability plot

4.3.2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรหลัก (Main effects)

กราฟแสดงผลการกระทบของตัวแปรหลัก (Main effects plot) ต่อค่า d_{50} แสดงใน รูปที่ 4.14 ตัวแปรหลักได้แก่ ความเร็วรอบของโรเตอร์ (A) อัตราการป้อนผงโลหะ (B) และความเร็วลม (C) เมื่อพิจารณาตัวแปร A เมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบของโรเตอร์จากระดับต่ำ (-1) เป็นระดับสูง (+1) ส่งผลกระทบทำให้ค่า d_{50} ลดลง ในการทดลองได้ปรับความเร็วรอบของโรเตอร์จาก 194 รอบต่อนาที ไปเป็น 406 รอบต่อนาที ทำให้ค่า d_{50} ลดลงประมาณ 44 ไมครอน ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มระดับของตัวแปร C ส่งผลให้ค่า d_{50} เพิ่มขึ้น ในกรณีนี้ เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจาก 5 เมตรต่อวินาที เป็น 8.5 เมตรต่อวินาที ทำให้ค่า d_{50} เพิ่มขึ้น 40 ไมครอน สำหรับตัวแปร B อัตราการป้อนผง

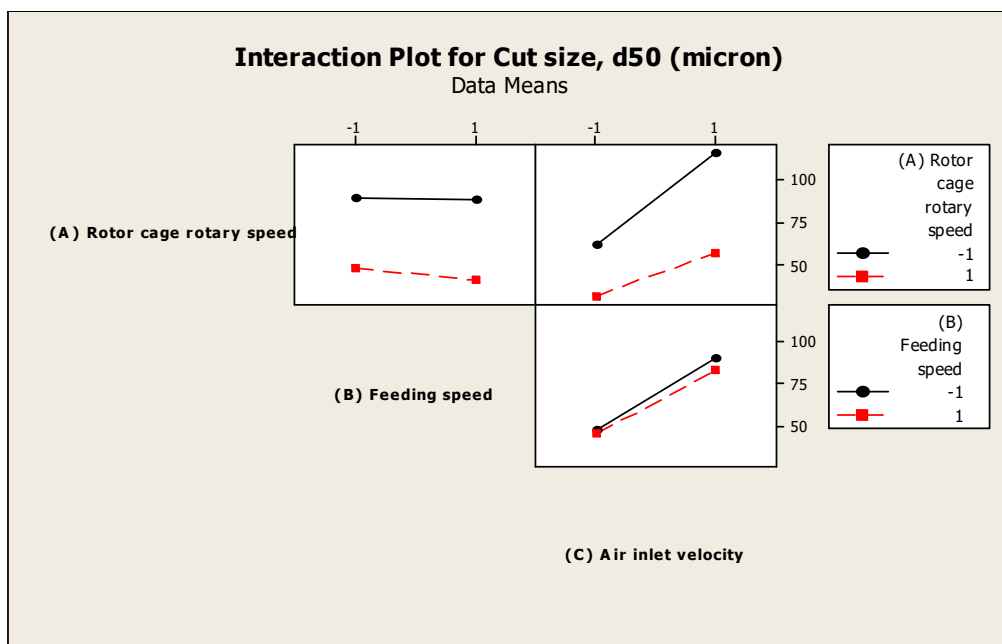
โลหะมีผลกระทบต่อค่า d_{50} น้อยมาก สืบเนื่องจากความชันของกราฟ ในการทดลองเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนผงโลหะจาก 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เป็น 27 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ทำให้ค่า d_{50} ลดลงเพียง 4 ไมครอน



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลกระทบของตัวแปรหลัก (Main effect plot)

4.3.2.4 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรร่วม (Interaction effects)

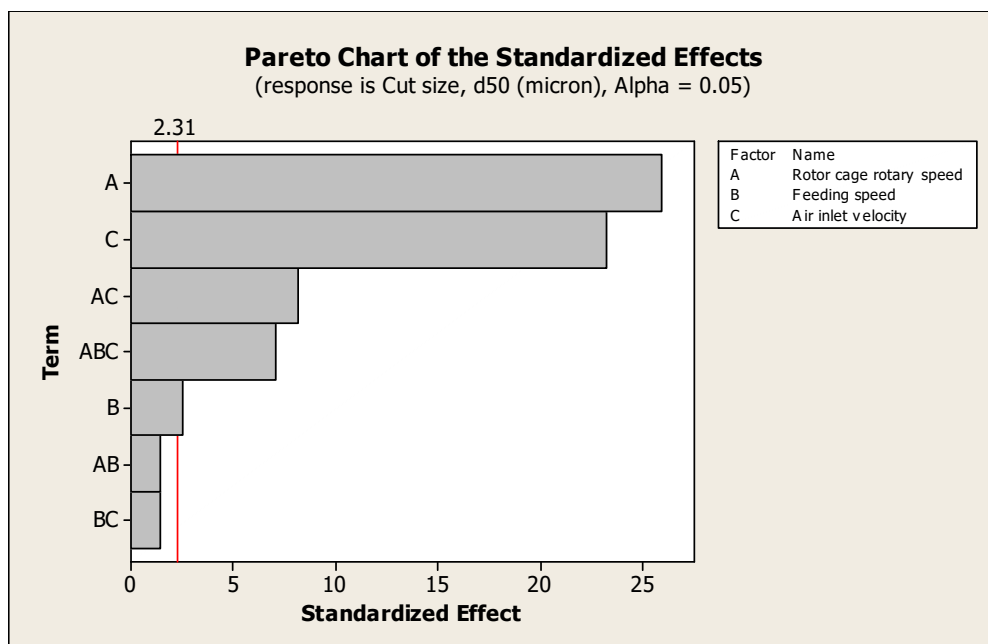
ผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากตัวแปรร่วมที่มีต่อค่า d_{50} แสดงในกราฟ รูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นผลกระทบจากการเปลี่ยนค่าตัวแปรสองตัวพร้อมกัน ที่มีต่อค่า d_{50} เมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่า ผลกระทบจากตัวแปรร่วม AC มีผลทำให้ค่า d_{50} ลดลง ข้อมูลจากผลการทดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของโรเตอร์จาก 194 รอบต่อนาที เป็น 406 รอบต่อนาที ทำให้ค่า d_{50} ลดลงจาก 62 ไมครอน เป็น 31 ไมครอน ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มความเร็วลมจาก 5 เมตรต่อวินาที เป็น 8.5 เมตรต่อวินาที ทำให้ค่า d_{50} ลดลงจาก 115.6 ไมครอน เป็น 57.4 ไมครอน ส่วนตัวแปรร่วม AB และ BC มีผลทำให้ค่า d_{50} ลดลงเช่นกัน เมื่อพิจารณาจากค่าผลกระทบ (Effects) และค่า P ในตารางที่ 4.3 พบว่า ตัวแปรร่วม AC, AB และ BC มีค่าผลกระทบเท่ากับ -13.94, -2.46 และ -2.42 และมีค่า P เท่ากับ 0.000, 0.184 และ 0.194 ตามลำดับ แสดงว่าตัวแปร AC, AB และ BC มีผลกระทบทำให้ค่า d_{50} ลดลง มีเฉพาะตัวแปรร่วม AC เท่านั้น ที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แต่สำหรับตัวแปรร่วม AB และ AC มีผลกระทบต่อค่า d_{50} อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก $P > 0.05$



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลกระทบของตัวแปรร่วมต่อค่า d_{50}

4.3.2.5 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรด้วยกราฟพาเรโต (Pareto chart)

การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรหลักและตัวแปรร่วมที่ส่งผลต่อค่า d_{50} สามารถแสดงด้วยกราฟพาเรโต รูปที่ 4.16 กราฟพาเรโตเป็นกราฟแท่งแสดงค่าผลกระทบเปรียบเทียบของตัวแปรทุกตัว ทั้งตัวแปรหลักและตัวแปรร่วม โดยเริ่มจากตัวแปรที่มีผลกระทบสูงสุดอยู่ด้านบนสุด และเรียงค่าผลกระทบลดลงตามลำดับ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่าผลกระทบอ้างอิง (Reference line) มีค่าเท่ากับ 2.31 ผลกระทบของตัวแปรใดที่มีค่าสูงกว่าค่าเส้นอ้างอิง ถือว่าเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่า d_{50} อย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลอง พบว่าผลกระทบของความเร็วรอบของโรเตอร์ (A) มีผลต่อค่า d_{50} มากที่สุด รองลงมาคือ ความเร็วลม (C) ตัวแปรร่วมความเร็วรอบของโรเตอร์และความเร็วลม (AC) ตัวแปรร่วมสามตัวแปร (ABC) และอัตราการป้อนผงโลหะ (B) มีผลกระทบต่อค่า d_{50} น้อยที่สุด ส่วนตัวแปร AB และ BC มีผลกระทบต่อค่า d_{50} อย่างไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.16 การระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่า d_{50} ด้วยกราฟพาเรโต

4.3.2.6 แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับค่า d_{50}

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ ค่า d_{50} ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการศึกษา มีหลายตัวแปรอิสระที่มีผลกระทบต่อค่านี้ ดังนั้นตัวแบบหรือโมเดลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ที่ใช้ จึงเป็นสมการความสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple regression model) ที่อยู่ในรูปดังต่อไปนี้

$$d_{50} = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{23} BC + \beta_{123} ABC \quad (4.1)$$

เมื่อ d_{50} คือ ตัวแปรตอบสนอง

$A, B,$ และ C คือ ตัวแปรอิสระ

β_0 คือ ค่าคงที่หรือค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์

$\beta_1, \beta_2, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{123}$ คือ สัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระ

เมื่อกำหนด ค่า d_{50} เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าตัวแปรอิสระ คือ ความเร็วรอบของโรเตอร์ (A) อัตราการป้อนผงโลหะ (B) และความเร็วลม (C) สามารถเขียนสมการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่า d_{50} โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรของสมการเชิงเส้น ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) ด้วยโปรแกรม MINITAB 16 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร d_{50} แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น มีค่า $R^2 = 0.9941$ และค่า R^2 (adj) = 0.9889 และสามารถเขียนสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ d_{50} ได้ดังนี้

$$d_{50} = 66.66 - 22.15A - 2.13B + 19.83C - 6.97AC - 6.03ABC \quad (4.2)$$

เมื่อ d_{50} คือ ขนาดตัด หรือ Cut size (ไมครอน)

A คือ ความเร็วรอบของโรเตอร์ (รอบต่อนาที)

B คือ อัตราการป้อนผงโลหะ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

C คือ ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

4.3.3 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าความคมของการตัดขนาด (K) โดยใช้เครื่องตัดขนาดเทอร์โบลม

4.3.3.1 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองด้วยวิธีการทางสถิติสำหรับค่า K

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการเชิงสถิติ จากการศึกษาค่าอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการตัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องตัดขนาดเทอร์โบลม ดังแสดงใน ตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.4 พบว่า ทั้งผลกระทบจากตัวแปรหลักและผลกระทบจากตัวแปรร่วมแบบสองตัวแปร (2-way interactions) เท่านั้น ที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P น้อยกว่า 0.05

ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปร ความเร็วรอบของโรเตอร์ (A) อัตราการป้อนผงโลหะ (B) และความเร็วม (C) ที่มีผลต่อค่า K จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^3 ด้วยโปรแกรม MINITAB 16 ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ผลกระทบ (Effects) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่อยู่ระหว่างระดับและระดับต่ำ ถ้าผลกระทบของตัวแปรใดมีค่าเป็นบวก หมายความว่า ค่า K จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรนั้นจากระดับต่ำไประดับสูง ตัวอย่างเช่น ผลกระทบของความเร็วม (C) มีค่า +0.01 หมายความว่า เมื่อเพิ่มความเร็วมจากระดับต่ำไประดับสูง จะส่งผลต่อ K เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าผลกระทบของตัวแปรใดมีค่าเป็นลบ เมื่อตัวแปรนั้นถูกปรับจากระดับต่ำไประดับสูง จะส่งผลให้ค่า K ลดลง เช่น ความเร็วรอบของโรเตอร์ (A) มีค่าผลกระทบเท่ากับ -0.04 หมายความว่า การเปลี่ยนระดับความเร็วรอบของโรเตอร์จากระดับต่ำไปเป็นระดับสูง ส่งผลให้ค่า K ลดลง ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า P ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) ดังนั้น ตัวแปรใดที่มีค่า P น้อยกว่า 0.05 ถือว่ามีผลกระทบต่อค่า K อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปร จากตารางที่ 4.5 พบว่า อิทธิพลของตัวแปรหลักและตัวแปรร่วมบางตัว ที่มีค่า P มากกว่า 0.05 แสดงว่าอิทธิพลของตัวแปรหลักและตัวแปรร่วมนั้นไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า K เช่น ความเร็วรอบของโรเตอร์ (A) ความเร็วม (C) ความเร็วรอบของโรเตอร์ร่วมกับความเร็วม (AC) และอิทธิพลของตัวแปรร่วมสามตัวแปร (ABC) ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า K และพบว่าผลกระทบของตัวแปรหลักและตัวแปรร่วมบางตัว คือ อัตราการป้อนผงโลหะ (B) อัตราการป้อนผงโลหะร่วมกับความเร็วม (BC) และความเร็วมของโรเตอร์ร่วมกับอัตราการป้อนผงโลหะ (AB) มีผลกระทบอย่าง

มีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า K และยังพบว่าตัวแปรหลัก B และตัวแปรร่วม BC มีผลกระทบต่อค่า K สูงกว่าตัวแปรร่วม AB เนื่องจากค่า P ของตัวแปรหลัก B และตัวแปรร่วม BC มีค่าต่ำกว่าค่า P ของตัวแปรร่วม AB

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า K จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^3 ด้วยโปรแกรม MINITAB 16

Source	Degree of freedom	Sum of squares	Adj. Sum of squares	Adj. Mean Squares	F-ratio	P-value
Main Effects	3	0.0528	0.0528	0.0176	5.38	0.025
2-Way Interactions	3	0.0751	0.0751	0.0250	7.65	0.010
3-Way Interactions	1	0.0064	0.0064	0.0064	1.95	0.200
Residual Error	8	0.0262	0.0262	0.0033		
Pure Error	8	0.0262	0.0262	0.0033		
Total	15	0.1605				

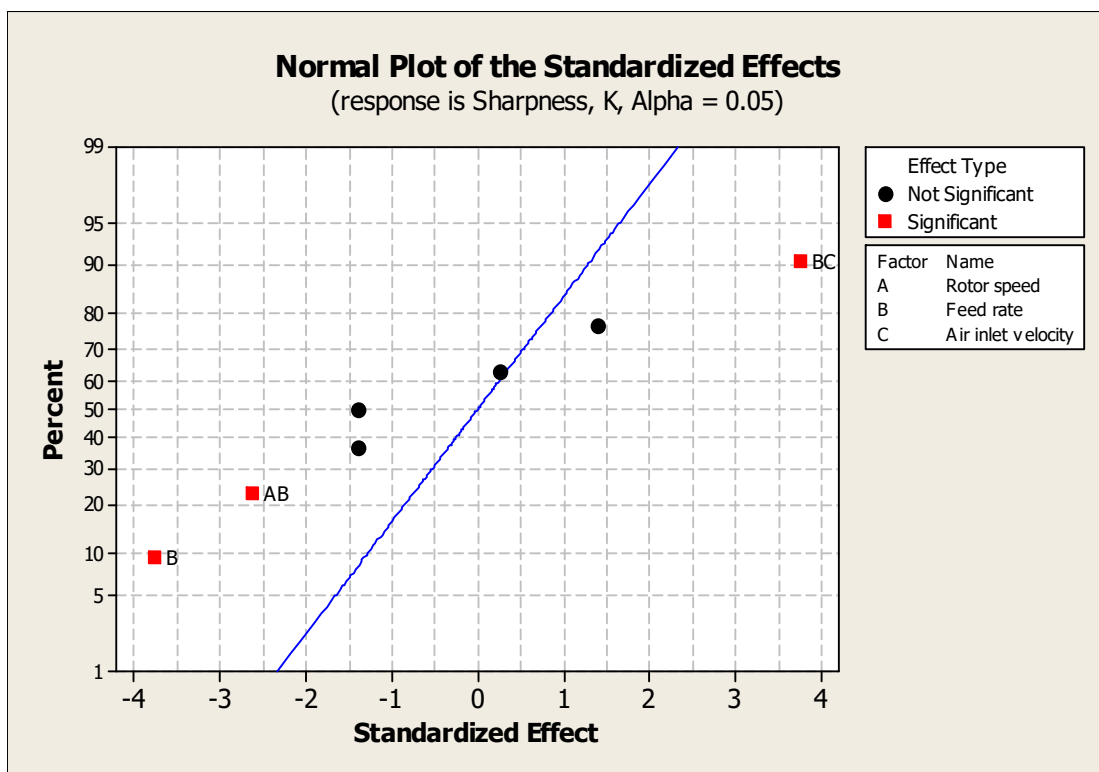
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการตัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องตัดขนาดเทอร์โบลม ที่มีผลต่อค่า K จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2^3 ด้วยโปรแกรม MINITAB 16

Terms	Effects	Coefficients	Standard error	T-value	P-value
Constant		0.50	0.014	34.86	0.000
A	-0.04	-0.02	0.014	-1.40	0.200
B	-0.11	-0.05	0.014	-3.76	0.006
C	0.01	0.004	0.014	0.26	0.800
AB	-0.07	-0.04	0.014	-2.62	0.031
AC	-0.04	-0.02	0.014	-1.40	0.2
BC	0.11	0.05	0.014	3.76	0.006
ABC	0.04	0.02	0.014	1.40	0.200
S	0.06				
R-Sq	0.8368				
R-Sq (adj)	0.6941				

หมายเหตุ: ตัวแปร A = ความเร็วรอบของโรเตอร์, B = อัตราการป้อนผงโลหะ, C = ความเร็วลม

4.3.3.2 การทดสอบการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal probability plot) สำหรับค่า K

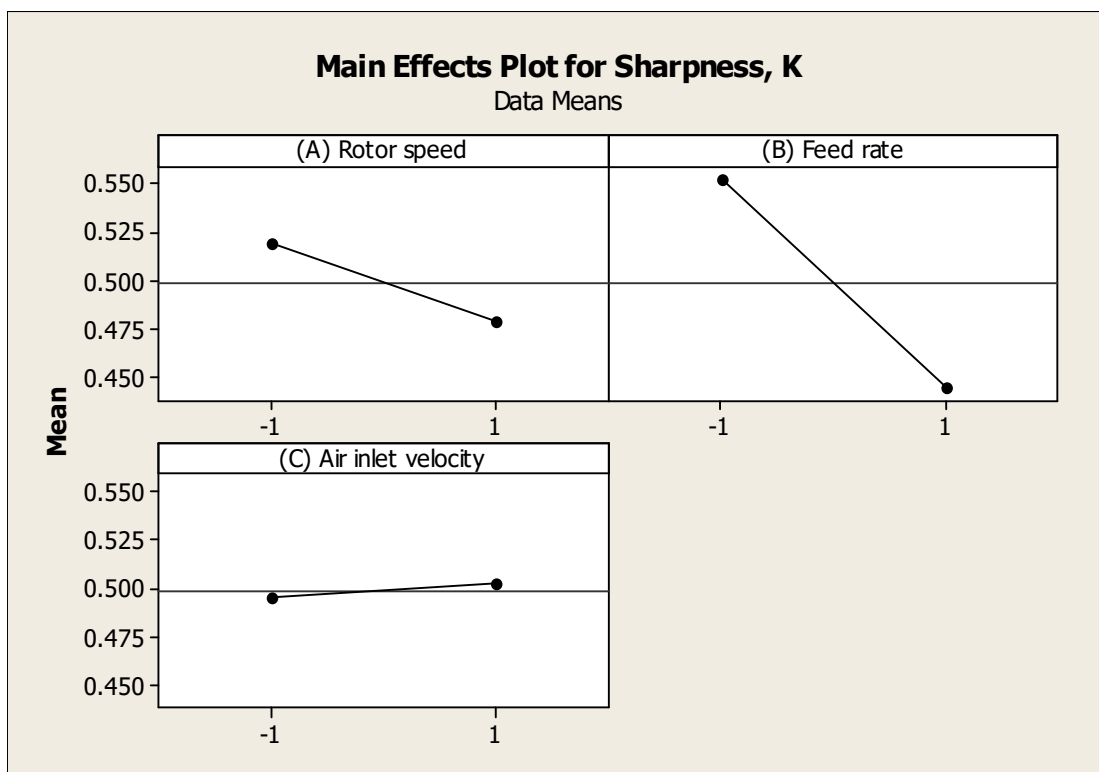
กราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (ดังรูปที่ 4.17) ที่มีผลกระทบต่อค่า K เนื่องจากผลกระทบของตัวแปรหลัก B รวมทั้งผลกระทบของตัวแปรร่วม BC และ AB ไม่ได้ถูกพล็อตอยู่ในแนวเดียวกับเส้นตรง ดังนั้น ผลกระทบของตัวแปรหลักและตัวแปรร่วมเหล่านี้ มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า K ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ผลกระทบของตัวแปรหลัก B (อัตราการป้อนผงโลหะ) และผลกระทบของตัวแปรร่วม BC (อัตราการป้อนผงโลหะร่วมกับความเร็วลม) อยู่ห่างจากเส้นตรงไกลที่สุด ดังนั้น B และ BC จึงมีผลกระทบสูงสุดต่อค่า K



รูปที่ 4.17 การระบุตัวแปรที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า K ด้วยกราฟ Normal probability plot

4.3.3.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรหลัก (Main effects) สำหรับค่า K

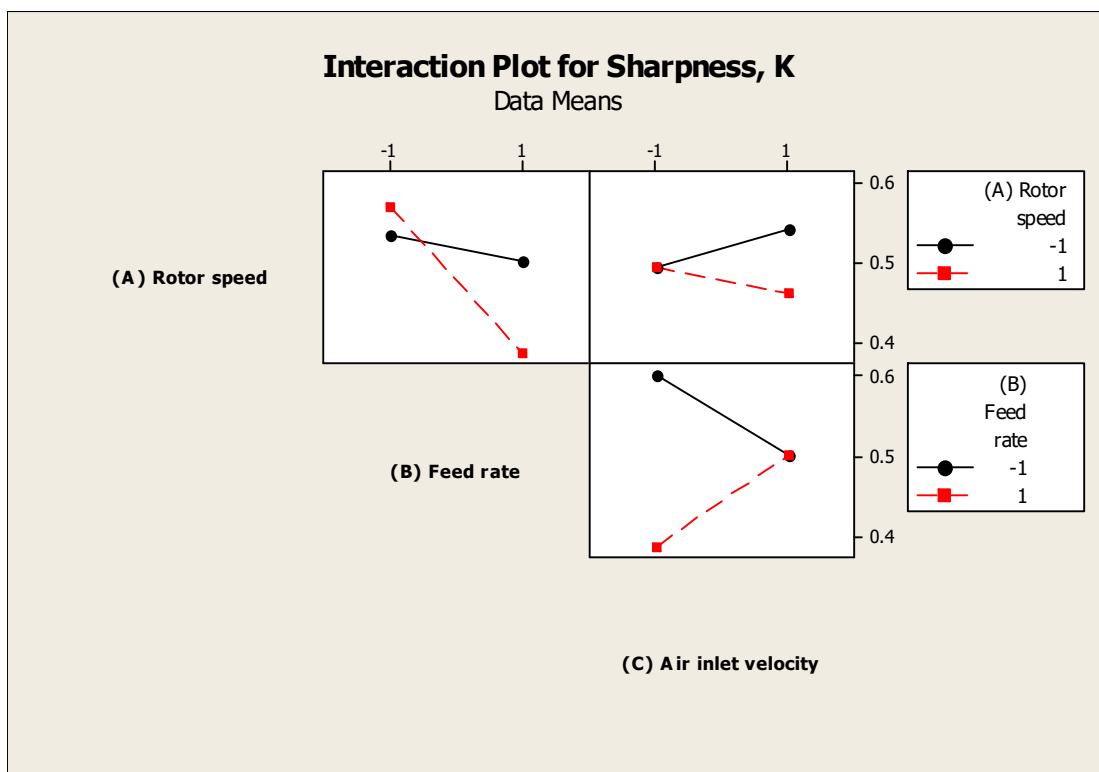
กราฟแสดงผลการกระทบของตัวแปรหลัก (Main effects plot) ต่อค่า K แสดงใน รูปที่ 4.18 ตัวแปรหลักได้แก่ ความเร็วรอบของโรเตอร์ (A) อัตราการป้อนผงโลหะ (B) และ ความเร็วลม (C) เมื่อพิจารณาตัวแปร B เมื่อเปลี่ยนอัตราการป้อนผงโลหะจากระดับต่ำ (-1) เป็น ระดับสูง (+1) ส่งกระทบทำให้ค่า K ลดลง ในการทดลองได้ปรับอัตราการป้อนผงโลหะจาก 4 กิโลกรัม ต่อชั่วโมง ไปเป็น 27 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ทำให้ค่า K ลดลงประมาณ 0.1 สำหรับตัวแปร A และ C ไม่มีผลกระทบต่อค่า K สังเกตจากความชันของกราฟ ในการทดลองเมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบของโรเตอร์ และความเร็วลม จากระดับต่ำ เป็นระดับสูง ทำให้ค่า K ลดลงเพียง 0.04 และเพิ่มขึ้น 0.01 ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลกระทบของตัวแปรหลักสำหรับค่า K (Main effect plot)

4.3.3.4 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรร่วม (Interaction effects) สำหรับค่า K

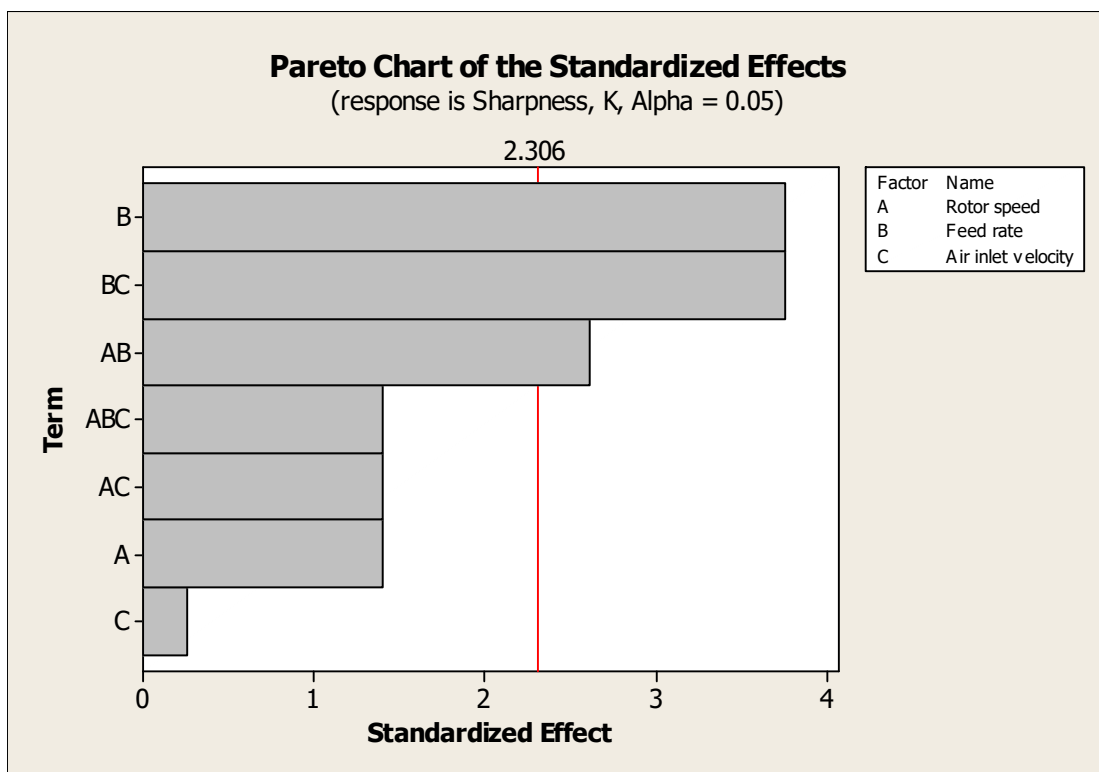
ผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากตัวแปรร่วมที่มีต่อค่า K แสดงในกราฟ รูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นผลกระทบจากการเปลี่ยนค่าตัวแปรสองตัวพร้อมกัน ที่มีต่อค่า K เมื่อพิจารณาจากกราฟ พบว่า ผลกระทบจากตัวแปรร่วม BC มีผลทำให้ค่า K เพิ่มขึ้น ข้อมูลจากผลการทดลอง เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนผงโลหะ จาก 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เป็น 27 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ค่า K ลดลงจาก 0.552 เป็น 0.445 ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มความเร็วลมจาก 5 เมตรต่อวินาที เป็น 8.5 เมตรต่อวินาที ทำให้ค่า K เพิ่มขึ้น จาก 0.495 เป็น 0.502 ในขณะที่ตัวแปรร่วม AB มีผลทำให้ค่า K ลดลง เมื่อพิจารณาจากค่าผลกระทบ (Effects) และค่า P ในตารางที่ 4.4 พบว่า ตัวแปรร่วม AB และ BC มีค่าผลกระทบเท่ากับ -0.07 และ 0.11 และมีค่า P เท่ากับ 0.031 และ 0.006 ตามลำดับ ดังนั้นตัวแปรร่วม AB และ BC มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แต่สำหรับตัวแปรร่วม AC และ ABC มีผลกระทบต่อค่า K อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก $P > 0.05$



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลกระทบของตัวแปรร่วมต่อค่า K

4.3.3.5 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรด้วยกราฟพาเรโต (Pareto chart) สำหรับค่า K

รูปที่ 4.20 กราฟพาเรโตเป็นกราฟแท่งแสดงค่าผลกระทบเปรียบเทียบของตัวแปรทุกตัว ทั้งตัวแปรหลักและตัวแปรร่วม โดยเริ่มจากตัวแปรที่มีผลกระทบสูงสุดอยู่ด้านบนสุด และเรียงค่าผลกระทบลดลงตามลำดับ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่าผลกระทบอ้างอิง (Reference line) มีค่าเท่ากับ 2.306 ผลกระทบของตัวแปรใดที่มีค่าสูงกว่าค่าเส้นอ้างอิง ถือว่าเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่า K อย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลอง พบว่าผลกระทบของอัตราการป้อนของผงโลหะ (B) มีผลต่อค่า K เท่ากับ ตัวแปรร่วมระหว่างอัตราการป้อนผงโลหะและความเร็วลม (BC) รองลงมาคือ ตัวแปรร่วมระหว่างความเร็วรอบของโรเตอร์และอัตราการป้อนผงโลหะ (AB) มีผลกระทบต่อค่า K น้อยที่สุด ส่วนตัวแปร A, C, AC และ ABC มีผลกระทบต่อค่า K อย่างไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.20 การระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่า K ด้วยกราฟพาเรโต

4.3.3.6 แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับค่า K

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ ค่า K ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการศึกษา มีหลายตัวแปรอิสระที่มีผลกระทบต่อค่านี้ ดังนั้นตัวแบบหรือโมเดลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ที่ใช้ จึงเป็นสมการความสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple regression model) ที่อยู่ในรูปดังต่อไปนี้

$$K = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{23} BC + \beta_{123} ABC \quad (4.3)$$

เมื่อ K คือ ตัวแปรตอบสนอง

A, B, และ C คือ ตัวแปรอิสระ

β_0 คือ ค่าคงที่หรือค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์

$\beta_1, \beta_2, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{123}$ คือ สัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระ

เมื่อกำหนด ค่า K เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง คือ ความเร็วรอบของโรเตอร์ (A) อัตราการป้อนผงโลหะ (B) และความเร็วลม (C) เราสามารถเขียนสมการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่า K โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรของสมการเชิงเส้น ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) ด้วยโปรแกรม MINITAB 16 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร K แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น มีค่า $R^2 = 0.8368$ และค่า $R^2 (\text{adj}) = 0.6941$ และสามารถเขียนสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ K ได้ดังต่อไปนี้

$$K = 0.50 - 0.05B - 0.04AB + 0.05BC \quad (4.4)$$

เมื่อ K คือ ความคมของการตัดขนาด (ไม่มีหน่วย)

A คือ ความเร็วรอบของโรเตอร์ (รอบต่อนาที)

B คือ อัตราการป้อนผงโลหะ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

C คือ ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

4.4 ผลการทดลองการตัดขนาดโดยใช้เครื่องตัดขนาดเทอร์โบลม เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื่องจากตัวแปรอิสระที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ มีการแบ่งระดับเป็นระดับสูงและระดับต่ำ ทำให้ค่าตัวแปรที่อยู่นอกเหนือจากช่วงดังกล่าว อาจส่งผลกระทบบหรือไม่ส่งผลกระทบท่อค่าผลลัพธ์ (Response) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงทำการทดลองเพิ่มสำหรับบางตัวแปรที่อยู่กึ่งกลางและอยู่นอกช่วงที่ทดลองใน DOE เป้าหมายในการทดลองเพิ่ม เป็นการทดลองเพื่อคุณลักษณะแนวโน้มของค่าผลลัพธ์ (d_{50} และ K) รวมทั้งเป็นการตรวจสอบและยืนยันผลการทดลอง (Experimental verification) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MINITAB 16 เนื่องจากการทดลองในส่วนนี้ได้ทำการทดสอบกับตัวแปรบางค่าเท่านั้น ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องนำค่าผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่อยู่ในช่วง DOE สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จะถูกพล็อตเทียบกับค่าตัวแปรเดิมเพื่อคุณลักษณะแนวโน้ม รวมทั้งนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย

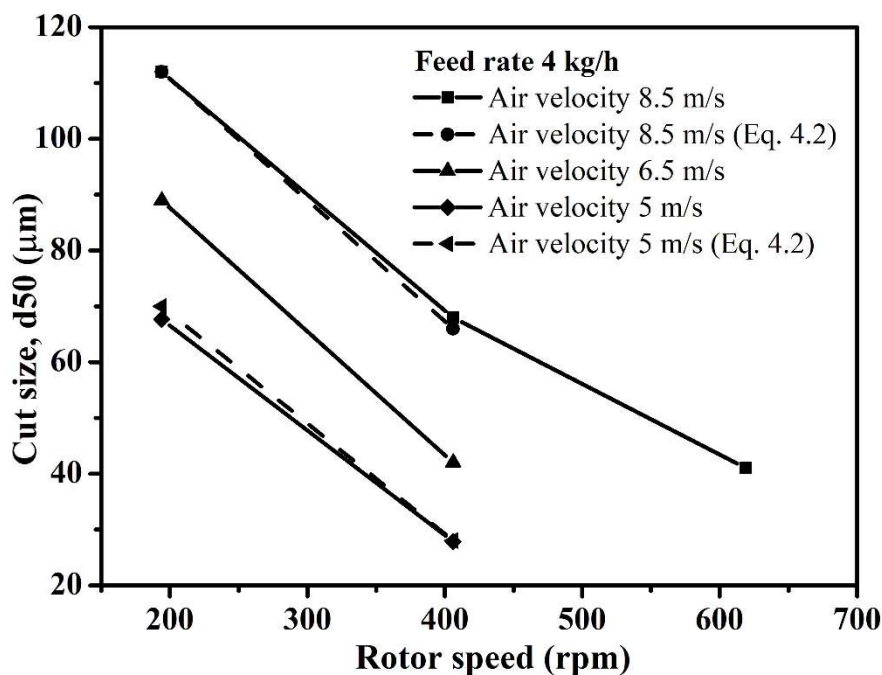
พิจารณาตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบ ค่า d_{50} ค่า K ที่มาจากการทดลองกับค่า $d_{50-Eq. (4.2)}$ ค่า $K_{Eq. (4.4)}$ ที่มาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับค่า d_{50} หรือ ค่า K ได้ รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า d_{50} กับความเร็วรอบของโรเตอร์ เมื่อทดลองตัดขนาดผงโลหะโดยใช้อัตราการป้อนผงโลหะคงที่ 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แปรเปลี่ยนความเร็วรอบของโรเตอร์ พบว่า แนวโน้มของค่า d_{50} ลดลง เมื่อความเร็วรอบของโรเตอร์เพิ่มขึ้น ทุกเงื่อนไขการทดลอง ค่า d_{50} ที่ได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด คือ ประมาณ 28 ไมครอน ตรงกับเงื่อนไขการทดลองที่ความเร็วรอบของโรเตอร์ 406 รอบต่อนาที อัตราการป้อนผงโลหะ 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่สามารถคำนวณค่า d_{50} เมื่อใช้ความเร็วรอบของโรเตอร์ 619 รอบต่อนาที ที่ความเร็วลม 5 และ 6.5 เมตรต่อวินาที ในทำนองเดียวกัน พิจารณารูปที่ 4.22 เมื่อปรับความเร็วลมแตกต่างกัน ได้แก่ 5, 6.5 และ 8.5 เมตรต่อวินาที ความเร็วรอบของโรเตอร์คงที่ แปรเปลี่ยนเฉพาะค่าความเร็วลม พบว่า แนวโน้มของค่า d_{50} เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่าง เมื่อทำการตัดขนาดผงโลหะที่ความเร็วรอบของโรเตอร์ 406 รอบต่อนาที ความเร็วลมเพิ่มขึ้นจาก 5 เมตรต่อวินาที เป็น 8.5 เมตรต่อวินาที ส่งผลให้ค่า d_{50} ที่ได้เพิ่มขึ้นจาก 27.8 ไมครอน เป็น 63 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า d_{50} ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ $d_{50-Eq. (4.2)}$

พบว่า แนวโน้มที่ได้สอดคล้องกัน ค่าที่มาจากการทดลองกับมาจากแบบจำลองใกล้เคียงกัน แบบจำลองที่ใช้มีค่า R^2 เท่ากับ 98.89%

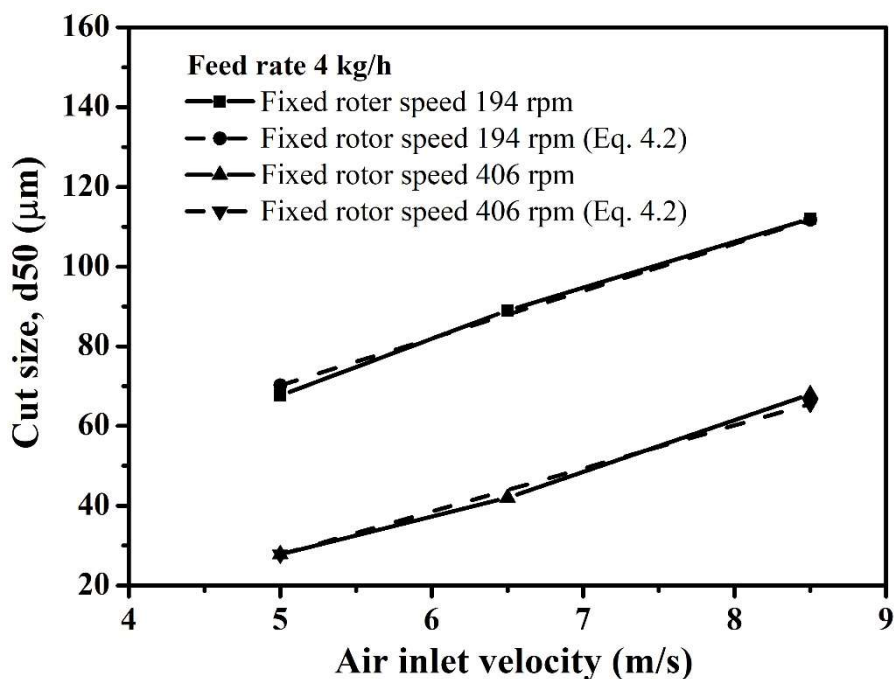
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบ ค่า d_{50} ค่า K ที่ได้มาจากการทดลองกับค่า $d_{50-Eq. (4.2)}$ ค่า $K_{Eq. (4.4)}$ ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

Std Order	Run Order	(A) Rotor speed (RPM)	(B) Feed Rate (kg/h)	(C) Air inlet velocity (m/s)	d_{50} (μm)	$d_{50-Eq. (4.2)}$ (μm)	K	$K_{Eq. (4.4)}$
13	1	-1	-1	1	112.1	111.71	0.50	0.46
8	2	1	1	1	46.9	49.21	0.49	0.46
11	3	-1	1	-1	57.0	53.85	0.40	0.44
9	4	-1	-1	-1	66.7	70.17	0.48	0.56
4	5	1	1	-1	39.4	35.55	0.36	0.36
6	6	1	-1	1	63.8	65.53	0.47	0.54
12	7	1	1	-1	31.7	35.55	0.30	0.36
10	8	1	-1	-1	30.8	27.75	0.62	0.64
5	9	-1	-1	1	111.2	111.71	0.55	0.46
16	10	1	1	1	46.6	49.21	0.40	0.46
3	11	-1	1	-1	55.5	53.85	0.49	0.44
7	12	-1	1	1	117.9	119.51	0.60	0.54
1	13	-1	-1	-1	68.7	70.17	0.61	0.56
14	14	1	-1	1	72.2	65.53	0.49	0.54
15	15	-1	1	1	121.1	119.51	0.52	0.54
2	16	1	-1	-1	24.7	27.75	0.70	0.64
ตัวแปรที่ทดลองเพิ่มจาก DOE								
	17	619	4	8.5	41	22	0.61	0.50
	18	619	4	6.5	N/A	N/A	N/A	N/A
	19	619	4	5	N/A	N/A	N/A	N/A
	20	406	4	6.5	42	N/A	0.57	N/A
	21	194	4	6.5	89	N/A	0.53	N/A

N/A หมายถึง ไม่สามารถคำนวณค่า d_{50} และ K ได้



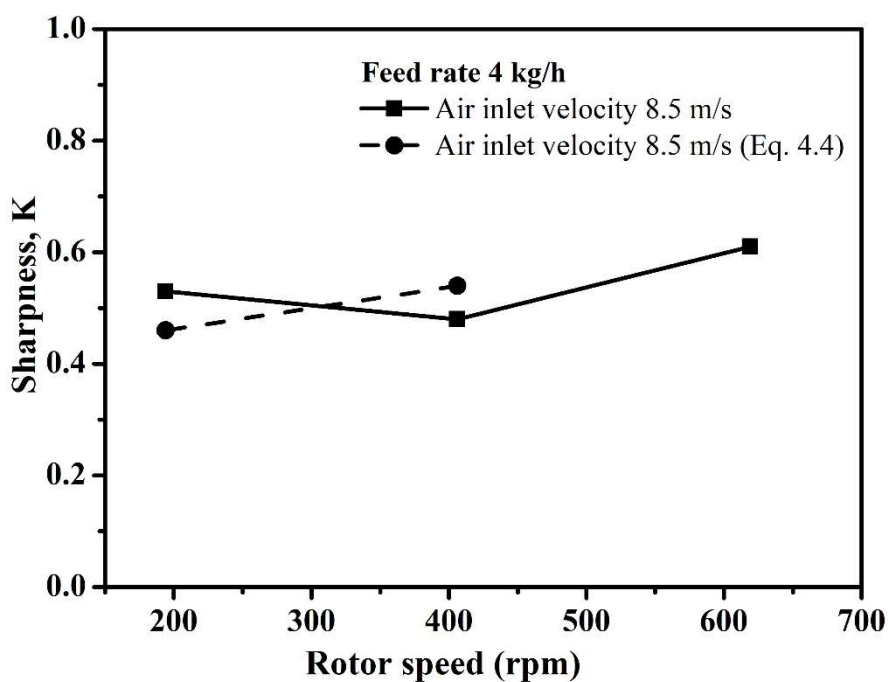
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด (d_{50}) กับความเร็วรอบของโรเตอร์



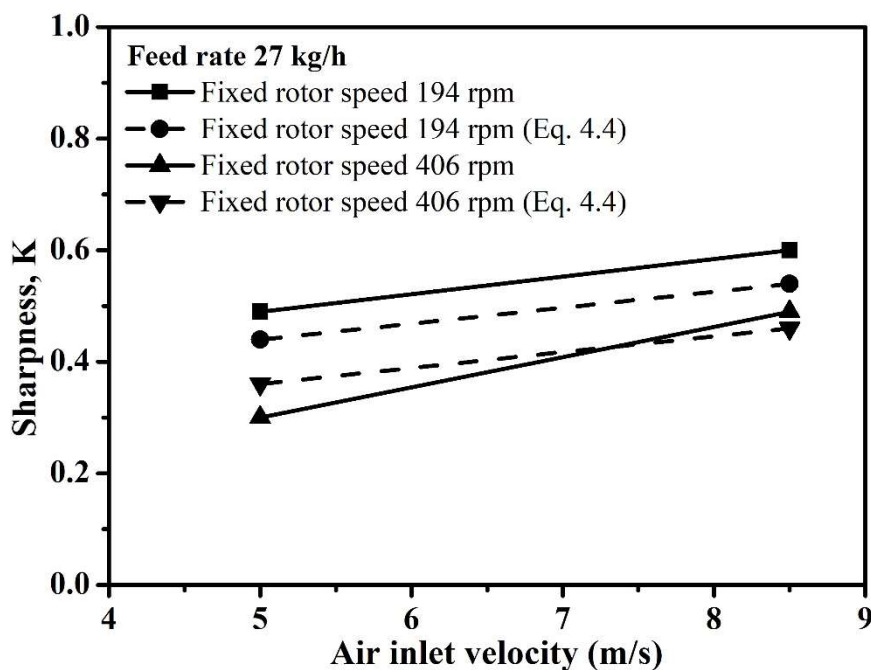
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด (d_{50}) กับความเร็วลม

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความเร็วรอบของโรเตอร์ ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงดังกราฟใน รูปที่ 4.23 พบว่า แนวโน้มของค่า K ลดลงเมื่อความเร็วรอบของโรเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 194 รอบต่อนาที เป็น 406 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นช่วงที่ศึกษาด้วย DOE แต่ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ

ของโรเตอร์เป็น 619 รอบต่อนาที ค่า K ที่ได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับแบบจำลองที่สถานะเดียวกัน พบว่า แนวโน้มของค่า K เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของโรเตอร์ ในงานวิจัยนี้ แบบจำลองที่ใช้ทำนายค่า K มีค่า R^2 (adj) 0.6941 ถือได้ว่ามีความแม่นยำในการทำนายไม่สูงมาก เมื่อพิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับ ความเร็วลม ดังรูปที่ 4.24 ที่ความเร็วรอบของโรเตอร์คงที่ 194 รอบต่อนาที และ 406 รอบต่อนาที แปรเปลี่ยนเฉพาะค่าความเร็วลม พบว่า แนวโน้มของค่า K เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่าง ถ้าทำการคัดขนาดผงโลหะที่ความเร็วรอบของโรเตอร์ 406 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 27 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยปรับความเร็วลมเพิ่มจาก 5 เมตรต่อวินาที เป็น 8.5 เมตรต่อวินาที ค่า K ที่ได้จะลดลง จาก 0.30 เป็น 0.49 ตามลำดับ ค่า K ที่ได้จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันและไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ เมื่อทดลองคัดขนาดผงโลหะที่ความเร็วรอบของโรเตอร์ 619 รอบต่อนาที ที่ความเร็วลม 5 และ 6.5 เมตรต่อวินาที ไม่สามารถคำนวณค่า K ได้

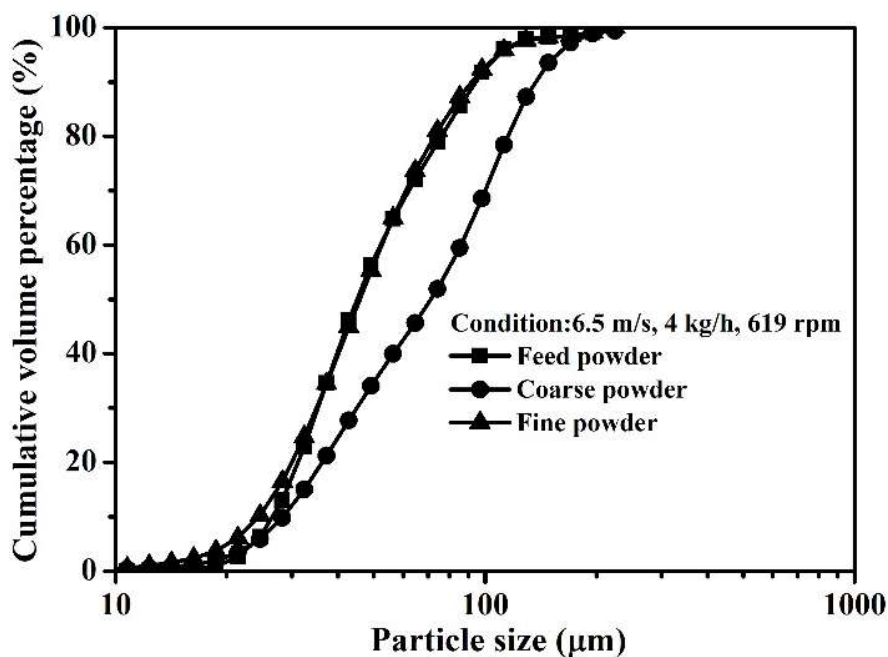


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความคมของการคัดขนาด (K) กับความเร็วรอบของโรเตอร์และความเร็วลม

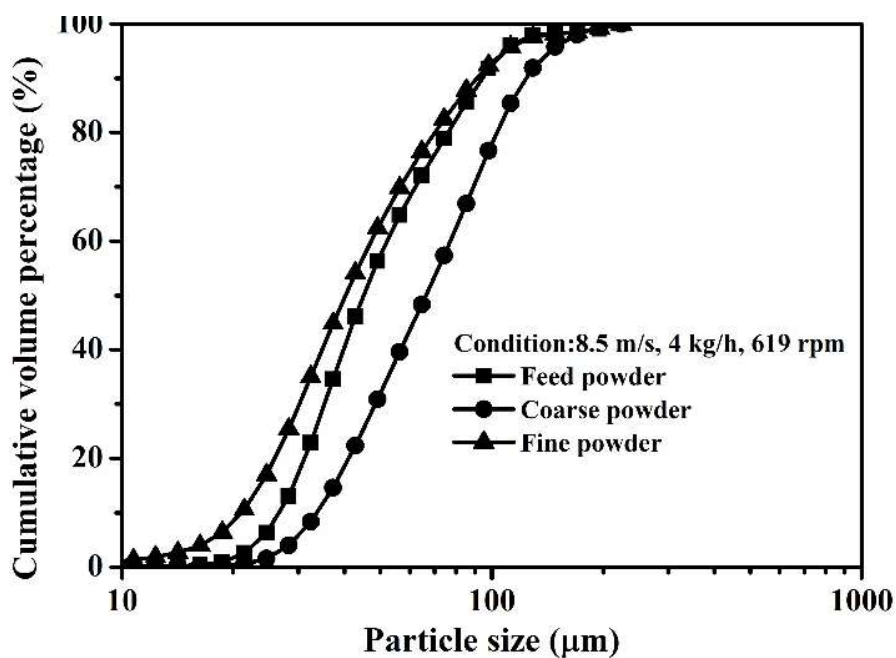


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความคมของการคัตขนาด (K) กับความเร็วลม

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตรสะสม ที่ได้จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของ ผงป้อน ผงหยาบ และผงละเอียด เมื่อทดลองคัตขนาดผงโลหะที่ความเร็วลมแตกต่างกัน ที่ 5 เมตรต่อวินาที และ 8.5 เมตรต่อวินาที โดยใช้ความเร็วรอบของโรเตอร์ 619 รอบต่อนาที อัตราการป้อนผงโลหะ 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (ดังรูปที่ 4.25) พบว่า ที่ความเร็วลม 6.5 เมตรต่อวินาที ผงละเอียดที่เครื่องคัตขนาดสามารถคัตได้นั้น มีขนาดอนุภาคเท่ากับผงป้อน เมื่อพิจารณาจากการกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตรสะสม ที่ได้จาก ผงป้อน ผงหยาบ และผงละเอียด จากข้อมูลการกระจายตัวแบบความถี่เชิงสะสม พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงป้อนและผงละเอียด ที่ 50% มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากัน (45 ไมครอน) เส้นกราฟเกิดการซ้อนทับกัน ทำให้ไม่สามารถคำนวณเส้นโค้งประสิทธิภาพหรือ Tromp curve จากสมการ ที่ 3.2 ได้ ส่งผลให้ไม่สามารถประเมินค่า d_{50} และ K ได้ ในทางกลับกัน เมื่อเพิ่มความเร็วลมเป็น 8.5 เมตรต่อวินาที (ดังรูปที่ 4.26) พบว่า ผงละเอียดที่เครื่องคัตขนาดสามารถคัตได้นั้น มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับผงป้อน ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตรสะสมของผงละเอียดและผงป้อน พบว่าเส้นกราฟแยกออกจากกันชัดเจน จึงเป็นเหตุผลที่สามารถสร้างเส้นโค้ง Tromp curve และสามารถคำนวณค่า d_{50} และ K ได้ จากเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด สถานะการทดลองที่ดีที่สุด คือมีค่า d_{50} เล็กสุด ค่า K มีค่าสูงสุด ได้มาจากการทดลองที่ ความเร็วรอบของโรเตอร์ 406 รอบต่อนาที อัตราการป้อนผงโลหะ 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ค่า d_{50} และ K เท่ากับ 27.8 ไมครอน และ 0.66 ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตรสะสม ของผงละเอียดและผงป้อนที่ถูกคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม ขนาดอนุภาคของผงป้อนและผงละเอียดที่คัดแยกได้มีขนาดใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.26 การกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตรสะสม ของผงละเอียดและผงป้อนที่ถูกคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม ขนาดอนุภาคของผงป้อนและผงละเอียดที่คัดแยกได้มีขนาดแตกต่างกัน

4.5 วิจัยการผลการทดลองการคัดขนาดผงโลหะด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม

ผลวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองด้วยวิธีการเชิงสถิติ โดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่า d_{50} อย่างมีนัยสำคัญสูงสุดคือ ความเร็วรอบของโรเตอร์ รองลงมาคือ ความเร็วลม และอัตราการป้อนผงโลหะมีผลกระทบต่อค่า d_{50} น้อยที่สุด ส่วนตัวแปรร่วม ความเร็วรอบโรเตอร์กับความเร็วมมีผลกระทบต่อค่า d_{50} ด้วยเช่นกัน จากรายงานของ Wang และคณะ (2001) [53] และ Kolacz (2002) [54] กล่าวว่าค่า d_{50} จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเครื่องคัดขนาดสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นผงป้อนและตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการ (Process parameters) ในกรณีที่เครื่องคัดขนาดถูกออกแบบสร้างขึ้นและวัสดุถูกกำหนดแล้ว ค่า d_{50} จะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการเพียงอย่างเดียว ได้แก่ ความเร็วลม ความเร็วรอบโรเตอร์ และอัตราการป้อนผงโลหะ ผลจากการทดลอง พบว่า ค่า d_{50} สอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานโดย Yu และคณะ (2014) [39] ที่ได้สร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า d_{50} กับค่าตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการ โดยใช้เครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม จากแบบจำลอง Yu และคณะ พบว่า ค่า d_{50} ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของโรเตอร์ แต่ค่า d_{50} เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วลม อัตราการป้อนผงโลหะเพิ่มขึ้นทำให้ค่า d_{50} ลดลง ในความเป็นจริงการเพิ่มอัตราการป้อนผงโลหะจะส่งผลต่อการเพิ่มความหนาแน่นของผงโลหะที่อยู่ภายในโซนแยก เมื่อความหนาแน่นภายในโซนแยกเพิ่มมากขึ้น ความเป็นไปได้ของอนุภาคที่จะเกิดการชนกันก็จะยิ่งสูงขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ค่า d_{50} ลดลง เมื่อพิจารณาค่าดัชนีจากแบบจำลองของ Yu พบว่า ความเร็วลมและความเร็วรอบโรเตอร์มีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อค่า d_{50} แต่สำหรับอัตราการป้อนผงโลหะ ค่าดัชนีบ่งชี้ว่ามีผลกระทบต่อค่า d_{50} น้อยมาก

เมื่อพิจารณาค่า K ผลวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองด้วยวิธีการเชิงสถิติ โดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรหลักเฉพาะอัตราการป้อนผงโลหะ (B) เท่านั้น ที่มีผลกระทบต่อค่า K และพบว่าตัวแปรร่วมอัตราการป้อนผงโลหะกับความเร็วม (BC) มีผลกระทบต่อค่า K สูงสุดเท่ากับตัวแปร B รองลงมา คือ ตัวแปรร่วมความเร็วรอบของโรเตอร์กับอัตราการป้อนผงโลหะ (AC) อย่างไรก็ตาม จากรายงานการวิจัยของ Yu และคณะ (2005) [55] ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลกระทบกับค่า K โดยใช้ผงทัลก์ (Talc powder) โดยใช้เครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม พบว่าการเพิ่มความเร็วนรอบของโรเตอร์และความเร็วม ช่วยให้การกระจายตัวของผงโลหะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า K ที่ได้เพิ่มขึ้น แต่ถ้าความเร็วนรอบของโรเตอร์และความเร็วมสูงเกินไป ส่งผลให้ค่า K ลดลงเนื่องจากเกิดการต้านการหมุนวน (Anti-swirl) และเกิดการปั่นป่วนภายในบริเวณโซนแยก (Annular region)

เมื่อทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบและยืนยันผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม MINITAB 16 โดยการใช้ค่าตัวแปรที่อยู่นอกช่วงที่ทำการศึกษาดูด้วย DOE พบว่า ภายใต้เงื่อนไขการทดลอง อัตราการป้อนผงโลหะ 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วรอบของโรเตอร์ 619 รอบต่อวินาที และแปรเปลี่ยนความเร็วลม 5, 6.5 และ 8.5 เมตรต่อวินาที พบว่า ที่ความเร็วลม 5 และ 6.5 เมตรต่อวินาที ไม่สามารถสร้างเส้นโค้งประสิทธิภาพหรือ Tromp curve ส่งผลให้ไม่สามารถคำนวณหา

d_{50} และ K ในทางทฤษฎี เมื่ออนุภาคใด ๆ ตกลงไปอยู่ในบริเวณโซนแยก จะมีแรงสองแรงที่มากระทำกับอนุภาคซึ่งแรงสองแรงนี้จะส่งผลกระทบต่อการศึกษาโดยตรง คือ แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) และแรงฉุด (Drag force) ในกรณีที่เพิ่มความเร็วยรอบของโรเตอร์ เป็นการเพิ่มแรงหนีศูนย์กลางที่กระทำกับอนุภาคเพิ่มมากขึ้น ทำให้อนุภาคที่มีขนาดโตกว่าที่ปนอยู่ในผงละเอียด ถูกคัดแยกออกมาเป็นผงหยาบ ค่า d_{50} และผลผลิตที่ได้มีปริมาณผงขนาดละเอียดลดลง ในทางกลับกัน การลดความเร็วรอบของโรเตอร์ทำให้แรงหนีศูนย์กลาง ที่กระทำกับอนุภาคลดลง ส่งผลให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าที่ปนอยู่ในผงหยาบถูกนำเข้าสู่โรเตอร์และถูกคัดแยกพร้อมกับผงละเอียด ค่า d_{50} และผลผลิตที่ได้เพิ่มขึ้น ในกรณีที่เพิ่มความเร็วลม การเพิ่มความเร็วลม ทำให้แรงฉุด ที่กระทำกับอนุภาคเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าที่ปนอยู่กับผงหยาบถูกนำเข้าสู่โรเตอร์และถูกคัดแยกออกเป็นผงละเอียด ค่า d_{50} และผลผลิตที่ได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การลดความเร็วลมทำให้แรงฉุดที่กระทำกับอนุภาคลดลง แรงหนีศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแรงฉุด ดังนั้น ค่า d_{50} ที่ได้จึงมีขนาดเล็กและผลผลิตมีปริมาณน้อยลงเช่นกัน จากการทดลอง ที่ความเร็วลม 5 และ 6.5 เมตรต่อวินาที โดยให้ความเร็วรอบของโรเตอร์ครั้งที่ 619 รอบต่อนาที พบว่า แรงฉุดที่กระทำกับอนุภาคน้อยเกินไป เมื่อเทียบกับแรงหนีศูนย์กลาง เนื่องจากแรงหนีศูนย์กลางเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดอนุภาค ดังนั้นผงโลหะที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขนี้ จากการทดลอง พบว่า ส่วนใหญ่ผงโลหะถูกคัดเก็บเป็นผงหยาบ ผงป้อนที่ถูกคัดแยกไปเป็นผงละเอียดมีปริมาณน้อยมาก เมื่อนำผงละเอียด ผงป้อน และผงหยาบ ไปตรวจวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค และใช้ข้อมูลการกระจายตัวของผงโลหะทั้งสามตัวอย่างเพื่อสร้างเส้นกราฟการกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตรสะสม พบว่า ผงละเอียดและผงป้อนที่ได้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันมาก เมื่อพิจารณาจากกราฟการกระจายตัวแบบความถี่เชิงปริมาตรสะสมของผงละเอียดและผงป้อนเปรียบเทียบกัน พบว่า เส้นกราฟของผงละเอียดและผงป้อนซ้อนทับกัน จึงเป็นเหตุผลที่ไม่สามารถสร้างเส้นโค้ง Tromp curve และหาค่า d_{50} และ K ได้ ดังนั้น ในกรณีที่ต้องการผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่มีค่า d_{50} น้อยกว่า 30 ไมครอน ขนาดอนุภาคอยู่ในผงประเภท 3 (25-45 ไมครอน, Type 3) และผงประเภท 4 (20-38 ไมครอน, Type 4) พร้อมทั้งได้ค่า K สูง การควบคุมเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลมจะต้องลดความเร็วรอบของโรเตอร์ให้อยู่ในช่วง 500 - 550 รอบต่อนาที ในขณะที่เดียวกันลดความเร็วลมให้อยู่ในช่วง 6.5 - 8.5 เมตรต่อวินาที

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1) ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่ผลิตได้มีขนาดเล็กลง เมื่อปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลง ผงโลหะที่ผลิตได้ มีปริมาณออกซิเจนเจือปนในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์ตอนเริ่มต้นการอะตอมไมเซชัน หากต้องการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่มีปริมาณออกซิเจนเจือปนน้อยกว่า 100 ppm จะต้องควบคุมปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ให้มีปริมาณน้อยกว่า 0.05 vol.% (500 ppm)

2) ผลผลิตผงโลหะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อลดปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลงที่ระดับ 0.01 vol.% ค่าผลผลิตผงโลหะสูงสุดเฉลี่ย 53% การลดปริมาณออกซิเจนจาก 0.05 vol.% ถึง 0.01 vol.% ทำให้ผลผลิตผงโลหะเพิ่มขึ้นเพียง 4%

3) รูปร่างของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ในช่วงขนาด -45+25 ไมครอน จะขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ ที่ระดับออกซิเจน 0.2 vol.% ถึงระดับ 2 vol.% ผงโลหะมีรูปร่างแบบลิกาเมนต์และหยดน้ำตาปะปนกัน เมื่อปริมาณออกซิเจนลดลงจาก 0.02 vol.% ถึง 0.05 vol.% ผงโลหะรูปร่างลิกาเมนต์และหยดน้ำตาจะเปลี่ยนรูป มีขนาดสั้นลง และส่วนใหญ่มีรูปร่างทรงรี การลดปริมาณออกซิเจนในช่วง 2.0 vol.% และ 0.2 vol.% ทำให้ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมของผงโลหะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ในช่วง 0.2 vol.% ถึง 0.05 vol.% ค่าความเป็นทรงกลมลดลงค่อนข้างน้อย และในช่วง 0.05 vol.% ถึง 0.1 vol.% ค่าความเป็นทรงกลมค่อนข้างคงที่ที่ปริมาณออกซิเจน 0.01 vol.% ผงโลหะส่วนใหญ่มีรูปร่างทรงกลม และมีค่าความเป็นทรงกลมเท่ากับ 1.10

4) เมื่อนำผงโลหะที่ผลิตได้ภายใต้เงื่อนไขที่ระดับออกซิเจน 0.01 vol.% มาคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลัมที่ออกแบบสร้างขึ้น ผลวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองด้วยวิธีการเชิงสถิติ โดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 พบว่า อิทธิพลของความเร็วยรอบของโรเตอร์และความเร็วลมมีผลกระทบต่อขนาดตัด (Cut size, d_{50}) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติมากกว่าเมื่อเทียบกับอัตราการป้อนผงโลหะ เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบของโรเตอร์ให้สูงขึ้น ขนาดตัดที่ได้เล็กลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มความเร็วมให้สูงขึ้น ขนาดตัดที่ได้จะโตขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการป้อนทำให้ขนาดตัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น

5) สำหรับความคมของการคัดขนาด (Sharpness of classification, K) ผลวิเคราะห์ข้อมูล การทดลองด้วยวิธีการเชิงสถิติ พบว่า เฉพาะอัตราการป้อนผงโลหะเท่านั้น ที่มีผลกระทบต่อค่า K อย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มอัตราการป้อนส่งผลให้ค่า K ลดลง

6) ผลการทดลองการคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม โดยการใช้ค่าตัวแปรที่อยู่นอก ช่วงจากการศึกษาโดยใช้ DOE พบว่า ค่า d_{50} สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงสถิติ อย่างไรก็ตามสำหรับค่า K การเพิ่มความเร็วรอบของโรเตอร์สูงกว่าช่วงการศึกษาด้วย DOE ค่า K มีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ถังอะตอมไมเซอร์ควรออกแบบและสร้างให้ทนต่อสภาพสุญญากาศในระดับต่ำมากได้ จะทำให้สามารถสูบอากาศออกจากถังอะตอมไมเซอร์ได้ในปริมาณมาก รวดเร็ว และลดปริมาณการใช้ ก๊าซไนโตรเจน

2) ระบบท่อลำเลียงน้ำโลหะควรออกแบบให้มีระยะทางสั้น ผู้วิจัยพบว่าท่อลำเลียงน้ำโลหะ มีระยะทางยาวเกินไป รวมทั้งมีตำแหน่งการเปลี่ยนโค้ง ทำให้การติดตั้งระบบอุณหภูมิลำเลียงน้ำโลหะ ทำได้ยาก บางครั้งน้ำโลหะเกิดการอุดตันบริเวณดังกล่าว ยิ่งไปกว่านั้นท่อที่ยาวและโค้งทำให้อัตราการป้อนน้ำโลหะในแต่ละครั้งไม่คงที่ แม้ว่าจะใช้แรงดันก๊าซที่เท่ากัน อัตราการป้อนน้ำโลหะที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อ การเกิดขึ้นฟิล์มของน้ำโลหะบนจานอะตอมไมเซอร์ที่ต่างกัน อัตราการป้อนที่เหมาะสม น้ำโลหะไหลต่อเนื่อง จะทำให้ได้ผงโลหะที่ได้มีขนาดเล็กกลง การกระจายตัวแคบ ถ้าหากน้ำโลหะไหลไม่ต่อเนื่อง ผงโลหะที่ได้จะมีขนาดใหญ่ การกระจายตัวกว้างและผลผลิตผงโลหะ ลดลง

3) การออกแบบระบบคัดขนาดผงโลหะที่มีความหนาแน่นสูง ควรใช้พัดลมดูดอากาศชนิด ความดันสูง (High pressure blower) เพื่อให้มีความเร็วลมพอสำหรับการพองผงโลหะให้มีเวลาพอ สำหรับการคัดขนาด ถ้าพิจารณาแรงที่กระทำต่อผงโลหะ ที่สภาวะสมดุลแรงหนีศูนย์กลางจะเท่ากับ แรงจุด แรงจุดเกิดจากกระแสลมที่ถูกสร้างมาจากพัดลมดูดอากาศ ถ้าไม่มีแรงจุดเพียงพอผงโลหะจะไม่เกิดการคัดขนาด ผงโลหะที่ป้อนเข้าสู่เครื่องคัดขนาดจะถูกเหวี่ยงไปชนกับขอบใบพัดเหนี่ยวนำ (Guide blades) ตกกลงสู่กันถังทันที เนื่องจากอิทธิพลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการหมุนของโรเตอร์

4) ในกรณีทีระบบการคัดขนาดต้องการติดตั้งไซโคลนลมเพิ่มเติมในอนาคต โดยทั่วไปแล้ว ไซโคลนที่ติดตั้งเพิ่มจะอยู่ระหว่างเครื่องคัดขนาดเทอร์โบลมกับถังกรองผงโลหะ ปัญหาที่พบคือ ความเร็วลมไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการคัดขนาด ดังนั้น พัดลมดูดอากาศที่เหมาะสม ควรมี รายละเอียด ดังนี้ ควรใช้พัดลมดูดอากาศชนิดแรงดันสูง กำลังมอเตอร์อย่างน้อย 2.2 กิโลวัตต์ อัตราการไหลสูงสุด 43 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ความดันคงที่สูงสุด 3.55 กิโลปาสคาล

5) การออกแบบระบบการคัดขนาด ควรคำนึงถึงความดันลด (Pressure drop) ที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานในระบบ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยไม่ได้วัดค่าความดันลด ในช่วงเริ่มต้นของการทดลองพบว่าพัดลมดูดอากาศที่ใช้มีความเร็วลมไม่เพียงพอ จึงทำการปรับปรุงระบบท่อให้เชื่อมต่อกันเป็นแนวตรง ลดการใช้ข้องอหรือวาล์ว และลดระยะท่อให้สั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

บรรณานุกรม

- [1] IXYS Corporation. (2006). Lead Free Solder Reflow for Semiconductor Powder Devices. Available online:
<http://www.ixys.com/Documents/DesignResource/LEADFEE.pdf> (accessed on 15 July 2019)
- [2] Lead-free soldering guide from AIM Solder Inc. (2003). Available online:
http://www.psma.com/ul_files/forums/leadfree/aim_lead_free_guide.pdf (accessed on 15 July 2019)
- [3] European Union (EU) Electrical and Electronic Products Directives. Available online:
<http://www.informinc.org/weeover.pdf> (accessed on 15 July 2019)
- [4] Abtew, M., and Selvaduray, G. (2000). “Lead-free Solder in Microelectronics”. *Materials Science and Engineering*, 27, 95-141.
- [5] Minagawa, K., Liu, Y., Kakisawa, H., Osawa, Y., Takamori, S., and Halada, K. (2003). “Hybrid Atomization Process Applied to Fine Lead-Free Solder Powder Production”. *Materials Transactions*, 44 (7), 1316-1319.
- [6] Siewert, T., Liu, S., Smith, D. R., and Madini, J. C. (2002). “Database for Solder Properties with Emphasis on New Lead-free”. National Institute of Standards and Technology and Colorado School of Mines, Release 4.0. Available online:
https://www.msed.nist.gov/solder/NIST_LeadfreeSolder_v4.pdf (accessed on 15 July 2019)
- [7] Chuang, T., Yen, S., and Wu, H. (2006). “Intermetallic Formation Journal in Sn3Ag0.5Cu and Sn3Ag0.5Cu0.06Ni0.01Ge Solder BGA Packages with Immersion Ag Surface Finish”. *Journal of Electronic Materials*, 35 (2), 310-318.
- [8] Dunkley, J. J., and Aderhold, D. (2007). “Centrifugal Atomisation of Metal Powders”. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, 26-31.
- [9] Sungkhaphaitoon, P., in Dissertation: Design and Development of Centrifugal Atomizer for Lead-Free Solder Powder Production, Prince of Songkla University, 2013.
- [10] Nimmo, K., in: Lead-Free Soldering in Electronics: Science, Technology, and Environmental Impact, edited by Suganuma, K., Alloy Selections, chapter, 3, Marcel Dekker, Inc., NY, (2004).

- [11] CALCE Electronic Products and Systems Center. (2004). Global Transition to Pb-free/ Green Electronics, University of Maryland. Available online: https://web.calce.umd.edu/lead-free/calcePbfree_AIA.pdf (accessed on 15 July 2019)
- [12] J-STD-006, General Requirements and Test Method for Electronic Grade Solder Alloys and Fluxed and Non-Fluxed Solid Solders for Electronics Soldering Applications, 1994.
- [13] Lee, N. C., in: Lead-Free Electronics, INEMI Projects Lead to Successful Manufacturing, edited by Bradley, E., Handwerker, C. A., Bath, J., Parker, R.D., and Genney, P. W., Lead-Free Solder Past Technology, chapter, 3, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, (2007).
- [14] Advanced Metals Technology Inc. (1978). Powder Distribution: Available online: <https://www.hlkassoc.com/amtechproduct.pdf> (accessed on 15 July 2019)
- [15] de Kluizenaar, E. E. (1983). "Surface Oxidation of Molten Soft Solder: An Auger Study". *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1 (3), 1480-1485.
- [16] Hillman, D. D., and Chumbley, L. S. (2006). "Characterization of Tin Oxidation Products Using Sequential Electrochemical Reduction Analysis (SERA)". *Soldering & Surface Mount Technology*, 18 (3), 31-41.
- [17] Bose, A. *Advances in Particular Materials*, Butterworth-Heinemann, Newton, (1995).
- [18] German, R. M. *Powder Metallurgy Science* 2nd edition. Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, (1994).
- [19] Tian, L., Anderson, I., Riedemann, T., and Russell, A. (2017). "Production of Fine Calcium Powders by Centrifugal Atomization with Rotating Quench Bath". *Powder Technology*, 308, 84-93.
- [20] Neikov, O. D., in: *Handbook of None-Ferrous metal Powders: Technologies and Applications*, edited by Neikov, O. D., Naboychenko, S. S., Dowson, G., Atomization and Granulation, chapter, 5, Elsevier, Oxford, (2009).
- [21] Halada, K., Suga, H., Muramatsu, Y. Atomizing Parameters for Centrifugal Atomization of metal, in: *PM into the 1990's*, Proceedings of International Conference on Powder Metallurgy, vol.1, The Institute of Metals, London, 1990, pp. 193-199
- [22] Mejeoumov, G.G., in *Dissertation: Improved Cement Quality and Grinding Efficiency by Means of Closed Mill Circuit Modelling*, the Texas A&M University, 2007.

- [23] Yu, Y., Ren, W., Gao, L., and Liu, J. (2015). "Analysis and Optimization of Process Parameters Affecting Classification Performance Indices of the Turbo Air Classifier". *Materials Science & Engineering Technology*, 46 (9), 970-977.
- [24] Xie, J. W., Zhao, Y. Y., and Dunkley, J. J. (2004). "Effect of Processing Condition on Powder Particle Size and Morphology in Centrifugal Atomization of Tin". *Powder Metallurgy*, 47 (2), 168-172.
- [25] Readdy, R. C., kiran, B. S., Sethi, V. C., and Prakash, T. L. (2007). "Study on Oxygen Contamination during Atomization of Solder Powders for Microelectronics". *Powder Metallurgy*, 50 (3), 228-231.
- [26] Li, H., and Deng, X. (2007). Prediction of Powder Particle Size during Centrifugal Atomization Using A Rotating Disk". *Science and Technology of Advanced Materials*, 8, 264-270.
- [27] Sheikhaliev, M.S., Sheikhaliva, Z.I., and Dunkley, J.J. (2008). "Spin Atomization Makes Tighter Safer Aluminium". *Metal Powder Report*, 63, 28-30.
- [28] Shemyakina, O. A., Sheikhalieva, Z. I., and Sheikhaliev, Sh. M. (2010). "Obtaining Solder Powders by Centrifugal Atomization of Melt, *Russian Journal of Non-ferrous Metals*, 51(3), 250-254.
- [29] Plookphol, T., Wisutmethangoon, S., and Gonsrang, S. (2011). "Influence of Process Parameters on SAC305 Lead-free Solder Powder Produce by Centrifugal Atomization, *Powder Technology*, 214, 506-512.
- [30] Furusawa, A., Akiyama, S., Sakai, K., Hayashi, Y., and Takizawa, H. (2017). "Synthesis of Lead-Free Solders Particles Using High-Speed Centrifugal Atomization". *Materials Transaction*, 58 (10), 1458-1462.
- [31] Zhang, L. P., and Zhao, Y. Y. (2017). Particle Size Distribution of Tin Powder Produced by Centrifugal atomization Using Rotating Cups". *Powder Technology*, 318, 62-67.
- [32] Minagawa, K., Liu, Y., Kakisawa, H., Osawa, Y., Takamori, S., and Halada, K. (2003). "Hybrid Atomization Process Applied to Fine Lead-Free Solder Powder Production". *Materials Transactions*, 44 (7), 1316-1319.
- [33] Minakawa, K., Kakisawa, H., Osawa, Y., Takamori, S., and Halada, K. (2005). "Production of Fine Spherical Lead-Free Solder powders by Hybrid Atomization". *Science and Technology of Advanced Materials*, 6, 325-329.
- [34] Yun-zhong, L., Minagawa, K., Kakisawa, H., and Halada, K. (2007). "Melt Film Formation and Disintegration during Novel Atomization Process". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17, 1276-1281.

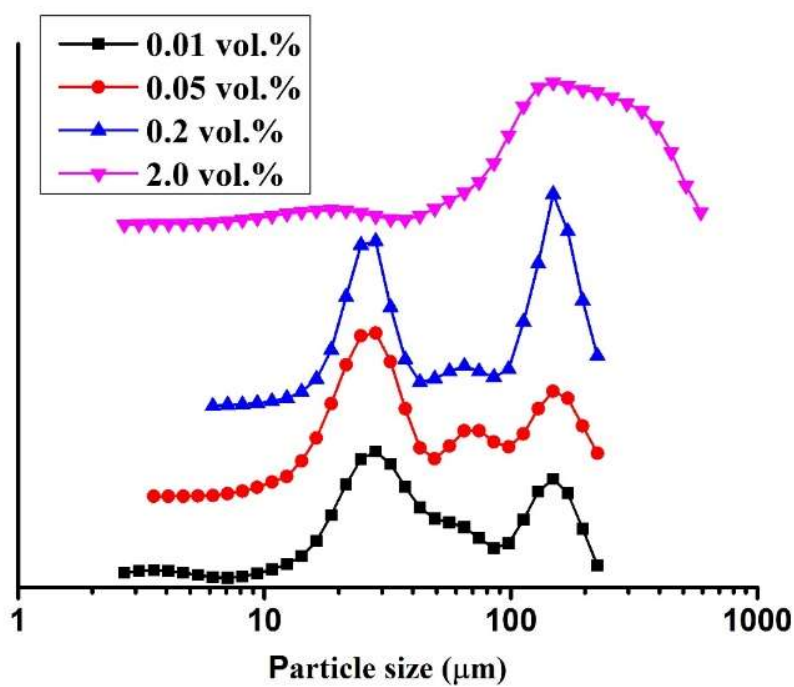
- [35] Guo, L., Liu, J., Liu, S., and Wang, J. (2007). "Velocity measurements and flow field characteristic analyses in a turbo air classifier". *Powder Technology*, 178 (1), 10-16.
- [36] Feng, Y., Liu, J., and Liu, S. (2008). "Effects of Operating parameters on Flow Field in a Turbo Air Classifier". *Minerals Engineering*, 21, 598-604.
- [37] Gao, L., Yu, Y., and Liu, J. (2013). "Study on The Cut Size of a Turbo Air Classifier". *Powder Technology*, 237, 520-528.
- [38] Yuan, Y., Jiayang, L., and Gang, L. (2013). Empirical Study of Classification Process for Two-Stage Turbo Air Classifier in Series". *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 26 (3), 526-531.
- [39] Yu, Y., Liu, J., and Zhang, K. (2014). "Establishment of a Prediction Model for the Cut Size of Turbo Air Classifiers, *Powder Technology*, 254, 274-280.
- [40] Liu, R., Liu, J., and Yu, Y. (2015). "Effects of Axial Inclined Guide Vanes on a Turbo Air Classifier". *Powder Technology*, 280, 1-9.
- [41] Sun, Z., Sun, G., Liu, J., and Yang, X. (2017). "CFD Simulation and Optimization of the Flow Field in Horizontal Turbo Air Classifier". *Advanced Powder Technology*, 28, 1474-1485.
- [42] Klaphaak, D. J., and Barnes, L. G. (1973). "Method of Centrifugal Atomization". U.S. Pat. No. 3,720,737.
- [43] Suzuki, G. (1999). "Process for Producing Spherical Metal Particles". U.S. Pat. No. 5,917,113.
- [44] Jun, L. (2013). "Device Utilizing Centrifugal Atomization Method to Prepare Spherical Tin Alloy Powder". CN. Pat. No. 202,804,188 U.
- [45] Xinguo, C. (2011). "Preparation Method of Continuous High-Quality Soldering Powder". CN. Pat. No. 101,362,206 B.
- [46] Gonsrang, S., in Dissertation: Design and Fabrication of a Centrifugal Atomizer for Lead-Free Solder Powder Processing, Prince of Songkla University, 2010.
- [47] Yule, A. J., and Dunkley, J. J. Atomization of Melts for Powder Production and Spray Deposition, Clarendon Press Oxford, (1994), p.76.
- [48] Shapiro, M., and Galperin, V. (2005). "Air Classification of Solid Particle: A Review". *Chemical Engineering and Processing*, 44 (2), 279-285.
- [49] Ho, K.H., and Zhao, Y.Y. (2004). "Modelling Thermal Development of Liquid Metal Flow on Rotating Disc in Centrifugal Atomization". *Materials Science and Engineering A*, 365 (1), 336-340.

- [50] Zhao, Y.Y. (2004A). "Analysis of Flow Development in Centrifugal Atomization: Part I. Film Thickness of a Fully Spreading Melt". *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 12, 959-971.
- [51] Zhao, Y.Y. (2004B). "Analysis of Flow Development in Centrifugal Atomization: Part II. Disintegration of Non-Fully Spreading Melt". *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 12, 973-983.
- [52] Angers, R., Tremblay, R., and Dube, D. (1997). "Formation of Irregular Particles During Centrifugal Atomization of AZ91 Alloy". *Materials Letters*, 33, 13-18.
- [53] Wang, Q., Melaaen, M.C., and Silva, S.R.D. (2001). "Investigation and Simulation of a Cross-flow Air Classifier". *Powder Technology*, 120 (3), 273-280.
- [54] Kolacz, J. (2002). "Investigating Flow Conditions in Dynamic Air Classification". *Mineral Engineering*, 15 (3), 131-138.
- [55] Yu, Y., Liu, J., and Gao, L. (2012). "Experiment Study and Process Parameters Analysis on Turbo Air Classifier for Talc Powder". *Advanced Materials Research*, 446-449, 522-527.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

1. ข้อมูลจากการทดลองผลิตโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 ภายใต้การควบคุมปริมาณออกซิเจน

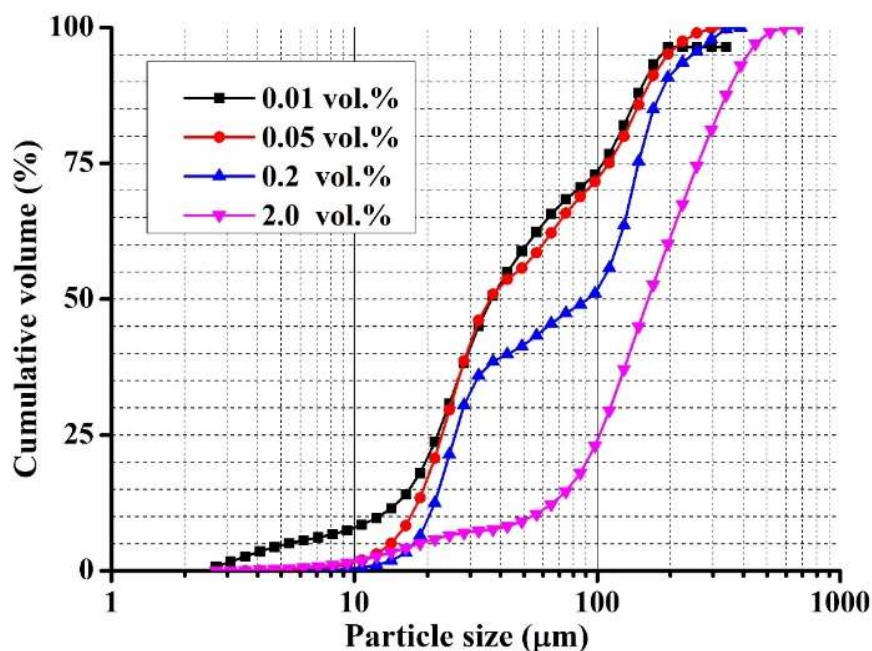


รูปที่ ก1 กราฟการกระจายตัวของผงโลหะ SAC305 แบบปกติ (Normal distribution) ที่ผลิตในสภาวะปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์แตกต่างกัน อยู่ในช่วง 0.01 vol.% - 2 vol.% ภายใต้ความเร็วรอบของงานอะตอมไมเซอร์ 50,000 รอบต่อนาที งานทรงแบนขนาด 40 มิลลิเมตร อุณหภูมิน้ำโลหะ 290 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำโลหะเฉลี่ย 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ตารางที่ ก1 ค่าการกระจายตัวของผงโลหะ SAC305 แบบร้อยละของปริมาตรสะสม (% Cumulative passing) ที่ผลิตในสภาวะปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์แตกต่างกัน อยู่ในช่วง 0.01 vol.% - 2 vol.% ภายใต้ความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์ 50,000 รอบต่อนาที จานทรงแบนขนาด 40 มิลลิเมตร อุณหภูมิน้ำโลหะ 290 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำโลหะเฉลี่ย 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

Ave. Size	0.01 vol.% Cum. Passing (%)	0.05 vol.% Cum. Passing (%)	0.2 vol.% Cum. Passing (%)	2 vol.% Cum. Passing (%)
2.70	0.81			0.03
3.10	1.71			0.09
3.56	2.65	0.02		0.17
4.08	3.56	0.05		0.25
4.69	4.37	0.08		0.34
5.38	5.05	0.12		0.45
6.18	5.61	0.19	0.01	0.59
7.10	6.13	0.35	0.08	0.79
8.15	6.72	0.66	0.18	1.07
9.36	7.48	1.18	0.34	1.46
10.74	8.47	1.99	0.6	1.98
12.33	9.74	3.11	1.04	2.62
14.16	11.46	5.08	1.83	3.37
16.26	14.02	8.32	3.33	4.19
18.67	18	13.45	6.44	5.04
21.43	23.69	20.72	12.48	5.85
24.61	30.77	29.6	21.38	6.53
28.25	38.27	38.65	30.49	7.02
32.44	45.08	46.11	35.94	7.35
37.24	50.62	50.96	38.52	7.66
42.76	55.02	53.66	39.85	8.18
49.10	58.8	55.75	41.37	9.1
56.37	62.38	58.55	43.29	10.46
64.72	65.69	62.19	45.5	12.25
74.31	68.4	65.84	47.41	14.63
85.32	70.56	68.87	49.02	18.06
97.96	73	71.61	51.07	23.01

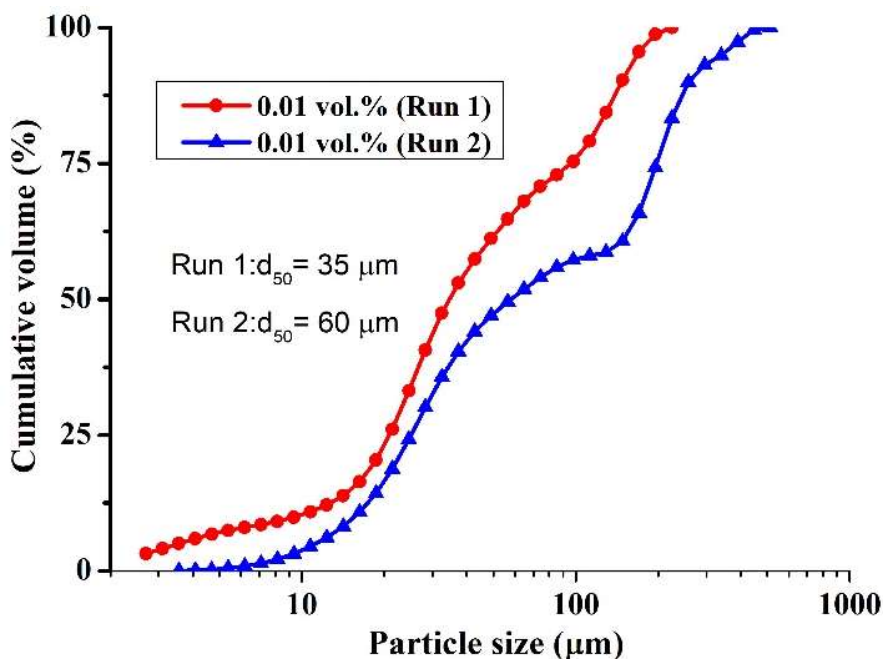
112.47	76.73	75.08	55.73	29.56
129.13	82.01	79.94	63.61	37.15
148.26	88	85.76	75.32	45.02
170.23	93.19	91.19	84.98	52.7
195.45	96.41	95.09	90.8	60.17
224.41	96.41	97.49	93.57	67.5
257.65	96.41	98.98	95.57	74.55
295.83	96.41	99.84	97.8	81.26
339.65	96.41	99.88	99.71	87.56



รูปที่ ก2 กราฟการกระจายตัวของผงโลหะ SAC305 แบบร้อยละของปริมาตรสะสม (% Cumulative passing) ที่ผลิตในสภาวะปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์แตกต่างกัน อยู่ในช่วง 0.01 vol.% - 2 vol.% ภายใต้ความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์ 50,000 รอบต่อนาที จานทรงแบนขนาด 40 มิลลิเมตร อุณหภูมิน้ำโลหะ 290 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำโลหะเฉลี่ย 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ตารางที่ ก2 แสดงค่าขนาดเฉลี่ยผงโลหะที่ผลิตในสภาวะปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์แตกต่างกัน อยู่ในช่วง 0.01 vol.% - 2 vol.% ภายใต้ความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์ 50,000 รอบต่อนาที จานทรงแบนขนาด 40 มิลลิเมตร อุณหภูมิน้ำโลหะ 290 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำโลหะเฉลี่ย 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

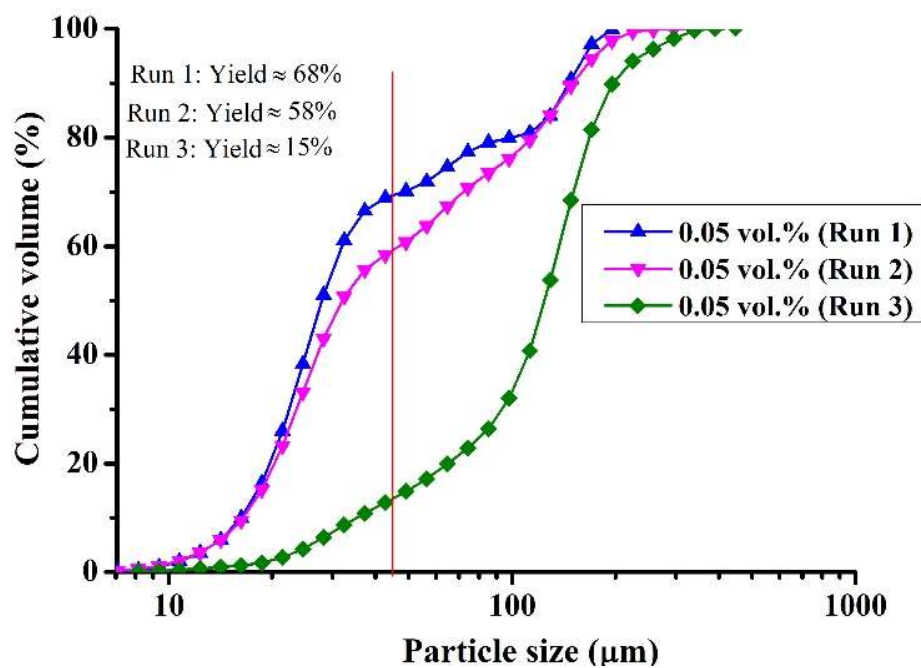
Conditions	Mean particle size (μm)			Ave. Mean size (μm)
	Run 1	Run 2	Run 3	
0.01 vol.%	35	60	N/A	48
0.05 vol.%	38	67	75	60
0.2 vol.%	98	56	78	77
2 vol.%	173	142	157	157



รูปที่ 33 กราฟแสดงค่าขนาดผงโลหะเฉลี่ยเมื่อทดลองที่ปริมาณออกซิเจน 0.01 vol.% ภายใต้ความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์ 50,000 รอบต่อนาที จานทรงแบนขนาด 40 มิลลิเมตร อุณหภูมิน้ำโลหะ 290 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำโลหะเฉลี่ย 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ตารางที่ 33 แสดงค่าผลผลิต (Production yield) ของผงโลหะที่มีขนาดละเอียดต่ำกว่า -45 ไมครอน ที่ผลิตในสภาวะปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์แตกต่างกัน อยู่ในช่วง 0.01 vol.% - 2 vol.% ภายใต้ความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์ 50,000 รอบต่อนาที จานทรงแบนขนาด 40 มิลลิเมตร อุณหภูมิน้ำโลหะ 290 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำโลหะเฉลี่ย 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

Conditions	Production yield (%)			Ave. Yield (%)
	Run 1	Run 2	Run 3	
0.01 vol.%	45	--	60	53
0.05 vol.%	15	58	68	47
0.2 vol.%	45	40	35	40
2 vol.%	10	6	2	6

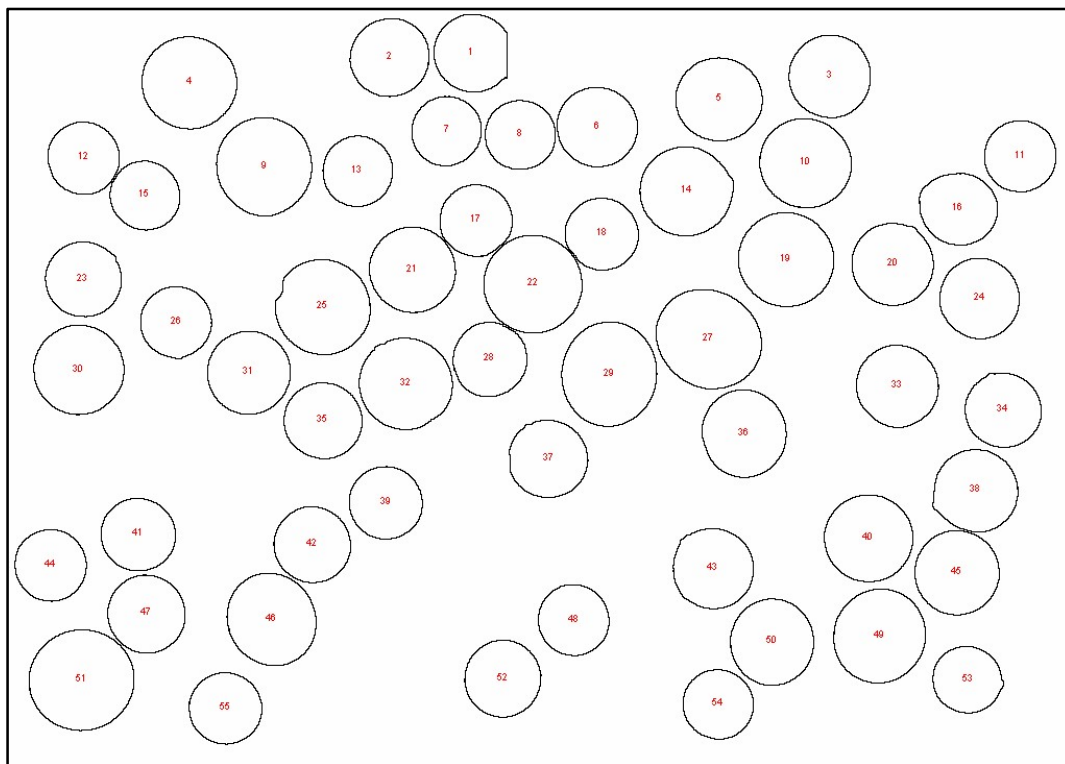


รูปที่ ก4 กราฟแสดงค่าผลผลิตผงขนาดละเอียดที่ต่ำกว่า -45 ไมครอน เมื่อทดลองที่ปริมาณออกซิเจน 0.05 vol.% ภายใต้ความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์ 50,000 รอบต่อนาที จานทรงแบนขนาด 40 มิลลิเมตร อุณหภูมิน้ำโลหะ 290 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำโลหะเฉลี่ย 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ตารางที่ ก4 แสดงตัวอย่างค่าต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J เพื่อใช้หาค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลม (Circular shape factor, ϕ) เมื่อทดลองที่ปริมาณออกซิเจน 0.01 vol.% ภายใต้ความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์ 50,000 รอบต่อนาที จานทรงแบนขนาด 40 มิลลิเมตร อุณหภูมิน้ำโลหะ 290 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำโลหะเฉลี่ย 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

Powder No.	Area (micron) ²	Perimeter (micron)	$4\pi A$	P^2	$\phi = P^2/4\pi A$
1	847.737	108.742	10647.577	11824.823	1.111
2	880.822	110.802	11063.124	12277.083	1.110
3	964.823	115.514	12118.177	13343.484	1.101
4	1248.723	131.817	15683.961	17375.721	1.108
5	1026.636	119.29	12894.548	14230.104	1.104
6	913.511	111.953	11473.698	12533.474	1.092
7	687.858	97.646	8639.496	9534.741	1.104
8	696.575	97.799	8748.982	9564.644	1.093
9	1335.498	136.115	16773.855	18527.293	1.105
10	1167.100	127.626	14658.776	16288.396	1.111
11	732.830	100.209	9204.345	10041.844	1.091
12	739.764	100.838	9291.436	10168.302	1.094
13	703.905	98.797	8841.047	9760.847	1.104
14	1171.854	127.995	14718.486	16382.720	1.113
15	685.282	97.646	8607.142	9534.741	1.108
16	804.350	106.243	10102.636	11287.575	1.117
17	737.981	101.054	9269.041	10211.911	1.102
18	747.292	101.054	9385.988	10211.911	1.088
19	1281.610	133.228	16097.022	17749.700	1.103
20	959.672	114.992	12053.480	13223.160	1.097
21	1050.013	121.179	13188.163	14684.350	1.113
22	1371.357	137.266	17224.244	18841.955	1.094
23	814.454	106.396	10229.542	11320.109	1.107
24	912.125	111.953	11456.290	12533.474	1.094
25	1282.007	133.966	16102.008	17946.889	1.115
26	719.358	100.164	9035.136	10032.827	1.110
27	1484.679	143.713	18647.568	20653.426	1.108
28	782.557	104.354	9828.916	10889.757	1.108
29	1421.282	140.674	17851.302	19789.174	1.109

Powder No.	Area (micron) ²	Perimeter (micron)	$4\pi A$	P^2	$\phi = P^2/4\pi A$
30	1149.467	126.475	14437.306	15995.926	1.108
31	984.041	116.143	12359.555	13489.196	1.091
32	1214.647	130.297	15255.966	16977.308	1.113
33	955.512	115.469	12001.231	13333.090	1.111
34	809.501	105.874	10167.333	11209.304	1.102
35	846.945	108.284	10637.629	11725.425	1.102
36	1051.202	121.071	13203.097	14658.187	1.110
37	874.483	110.325	10983.506	12171.606	1.108
38	995.333	118.4	12501.382	14018.560	1.121
39	758.189	102.205	9522.854	10445.862	1.097
40	1097.957	122.959	13790.340	15118.916	1.096
41	771.463	102.466	9689.575	10499.281	1.084
42	827.926	107.502	10398.751	11556.680	1.111
43	932.134	114.515	11707.603	13113.685	1.120
44	731.245	100.686	9184.437	10137.671	1.104
45	1016.928	118.661	12772.616	14080.433	1.102
46	1174.826	128.148	14755.815	16421.910	1.113
47	861.011	109.282	10814.298	11942.556	1.104
48	716.386	99.166	8997.808	9833.896	1.093
49	1234.657	130.926	15507.292	17141.617	1.105
50	1028.419	119.659	12916.943	14318.276	1.108
51	1510.830	144.972	18976.025	21016.881	1.108
52	833.077	108.131	10463.447	11692.313	1.117
53	657.942	95.866	8263.752	9190.290	1.112
54	697.763	98.168	8763.903	9636.956	1.100
55	739.566	101.684	9288.949	10339.636	1.113
				Ave.	1.105
				SD.	0.0084



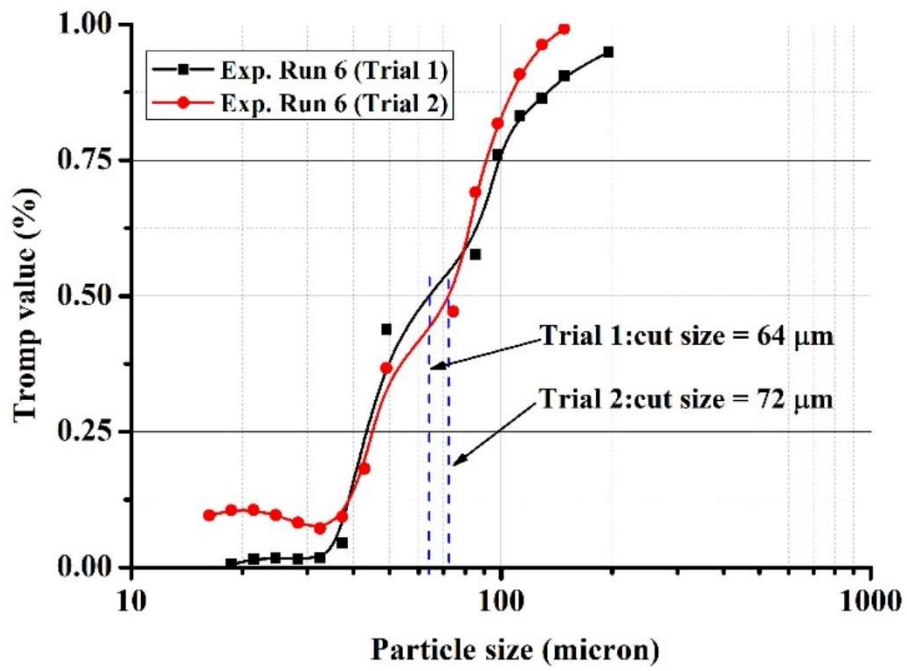
รูปที่ ก5 แสดงจำนวนผงโลหะ 55 อนุภาค ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J เพื่อใช้หาค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลม (Circular shape factor, ϕ) เมื่อทดลองที่ปริมาณออกซิเจน 0.01 vol.% ภายใต้ความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์ 50,000 รอบต่อนาที งานทรงแบนขนาด 40 มิลลิเมตร อุณหภูมิน้ำโลหะ 290 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำโลหะเฉลี่ย 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

2. ข้อมูลการทดลอง ผงโลหะบัดกรี SAC305 ที่ผลิตได้จากการอะตอมไมเซชัน นำมาคัดขนาด โดยใช้เครื่องคัดขนาดเทอร์โบลม ผงโลหะที่ได้หลังการคัดขนาด ได้แก่ ผงป้อน ผงหยาบ และผงละเอียด ถูกนำไปวิเคราะห์หาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (PSD)

ตารางที่ ก5 แสดงค่าความถี่ของการกระจายตัวในแต่ละช่วงขนาดของผงโลหะ ที่ได้มาจากการทดลอง คัดด้วยเครื่องคัดแบบ Turbo air classifier ได้แก่ ผงป้อน (Feed powders) ผงหยาบ (Coarse powders) และผงละเอียด (Fine powders) โดยนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Laser particle analyzer) ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LPA จะถูกนำไปคำนวณหาค่า Cut size (d50) ตามสมการที่ 2.2 ซึ่งกล่าวไปแล้วในบทที่ 2 ข้อมูลที่นำมาแสดงนี้ได้มาจากการทดลองคัดขนาดผงโลหะ ภายใต้สภาวะความเร็วรอบโรเตอร์ 406 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที ซึ่งตรงกับการทดลองที่ 6 (Experimental run No.6)

Ave. Size (μm)	Trial 1			Trial 2			Trial 1	Trial 2
	Feed	Coarse	Fine	Feed	Coarse	Fine	Cut size	Cut size
6.18				0.02	0.04	0.07		3.33
7.10				0.09	0.08	0.14		0.74
8.15				0.15	0.1	0.2		0.33
9.36	0.41	0.08	0.22	0.23	0.14	0.25	-0.26	0.11
10.74	0.62	0.11	0.34	0.33	0.16	0.33	-0.22	0.00
12.33	0.87	0.12	0.52	0.45	0.15	0.51	-0.12	0.06
14.16	1.23	0.12	0.88	0.65	0.15	0.93	-0.04	0.08
16.26	1.75	0.14	1.57	0.99	0.21	1.63	-0.01	0.10
18.67	2.52	0.2	2.71	1.54	0.35	2.57	0.01	0.11
21.43	3.5	0.29	4.22	2.26	0.54	3.63	0.02	0.11
24.61	4.58	0.34	5.87	3.03	0.68	4.8	0.02	0.10

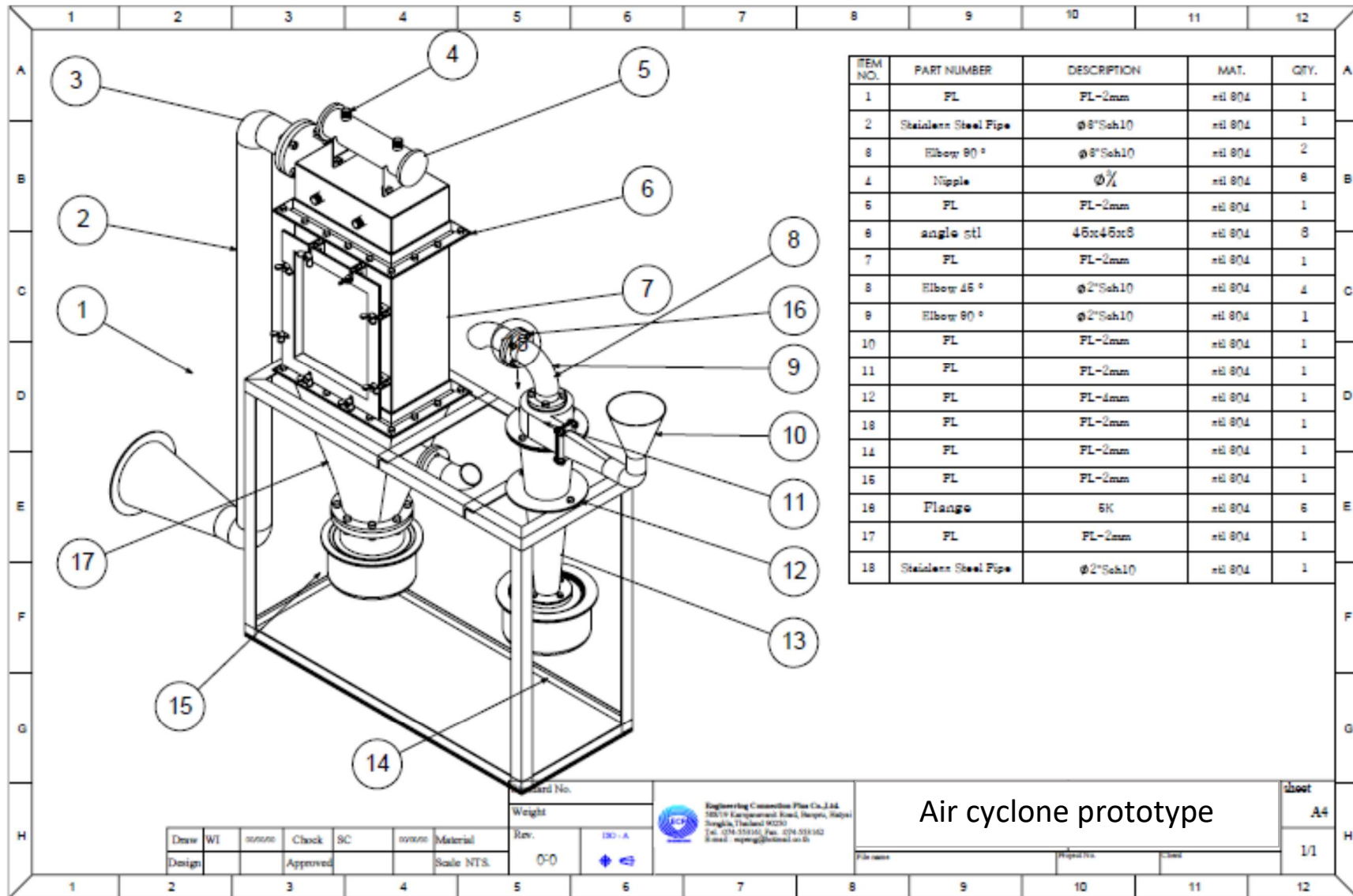
28.25	5.51	0.33	7.35	3.75	0.69	6.22	0.02	0.08
32.44	6.1	0.37	8.54	4.42	0.65	8.05	0.02	0.07
37.24	6.3	0.78	9.47	5.1	0.88	10.0 9	0.05	0.09
42.76	6.27	0.19	10.2	5.83	1.8	11.6 2	0.01	0.18
49.10	6.21	4.08	10.5	6.5	3.67	11.7 5	0.44	0.37
56.37	6.17	6.84	9.91	6.94	6.29	10.2 3	1.35	0.76
64.72	6.14	9.69	8.23	7.19	9.16	7.85	-2.26	-0.64
74.31	6.28	12.14	5.97	7.59	11.74	5.77	0.10	0.47
85.32	6.8	13.94	4.01	8.44	13.67	4.55	0.58	0.69
97.96	7.51	14.72	2.94	9.4	14.5	3.65	0.76	0.82
112.47	7.64	13.67	2.41	9.49	13.48	2.42	0.83	0.91
129.13	6.48	10.82	1.83	7.92	10.75	1.01	0.86	0.96
148.26	4.2	5.97	1.09	5.02	6.19	0.2	0.91	0.99
170.23	1.92	2.82	0.55	2.22	3.16	0.22	0.89	0.97
195.45	0.45	0.46	0.32	0.47	0.69	0.5	0.95	



รูปที่ ก6 กราฟแสดงเส้น Tromp curve ที่ได้จากข้อมูลในตารางที่ ก6 เมื่อพิจารณาที่ค่า 50% ของเส้นกราฟ (Tromp value) ในแนวแกน Y จุดพิกัดในแกน X ของคู่ลำดับนี้คือค่า Cut size (d_{50})

ภาคผนวก ข

แบบขึ้นส่วนของเครื่องคัดขนาดแบบ Air cyclone และ Turbo air classifier

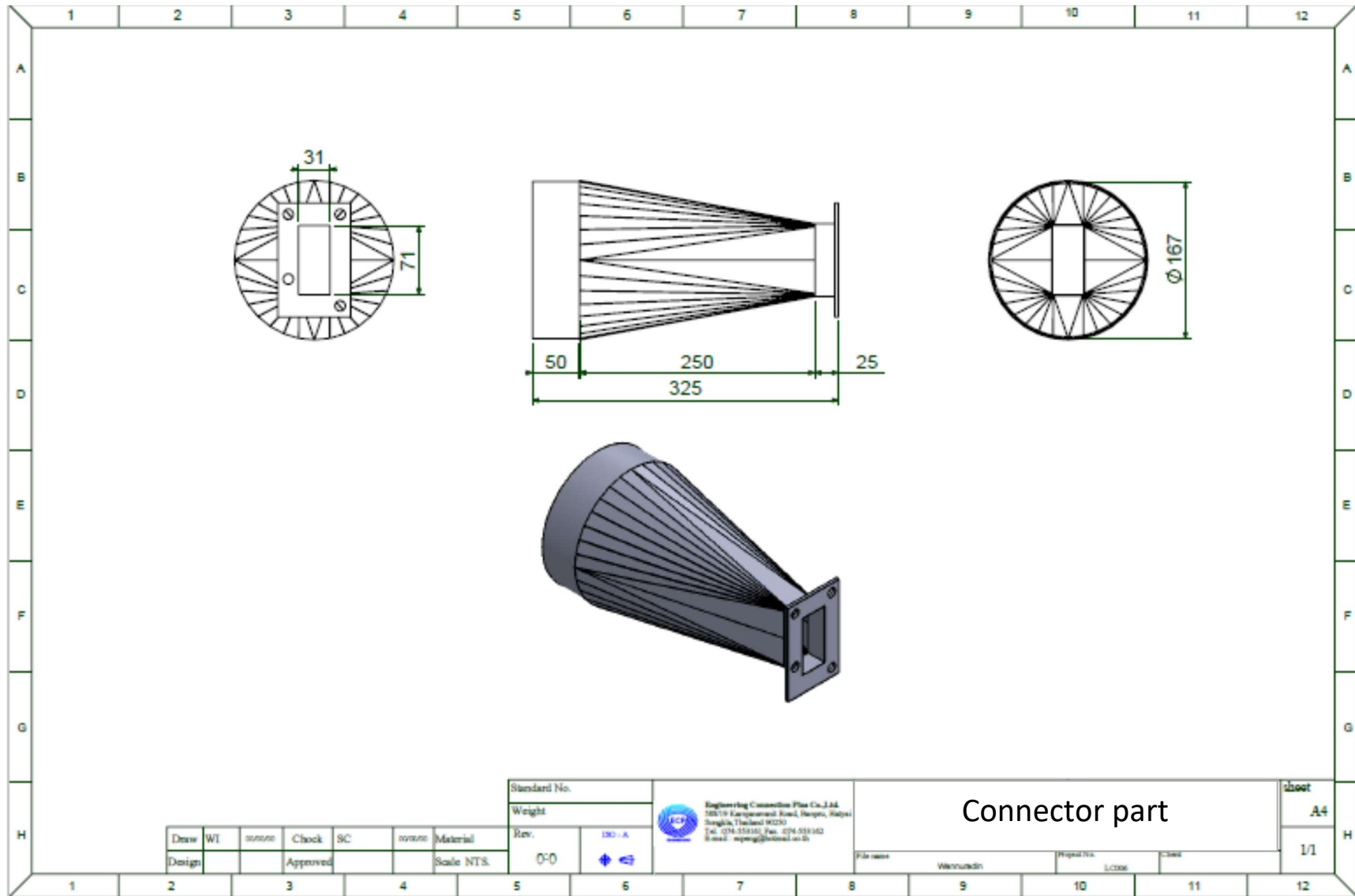


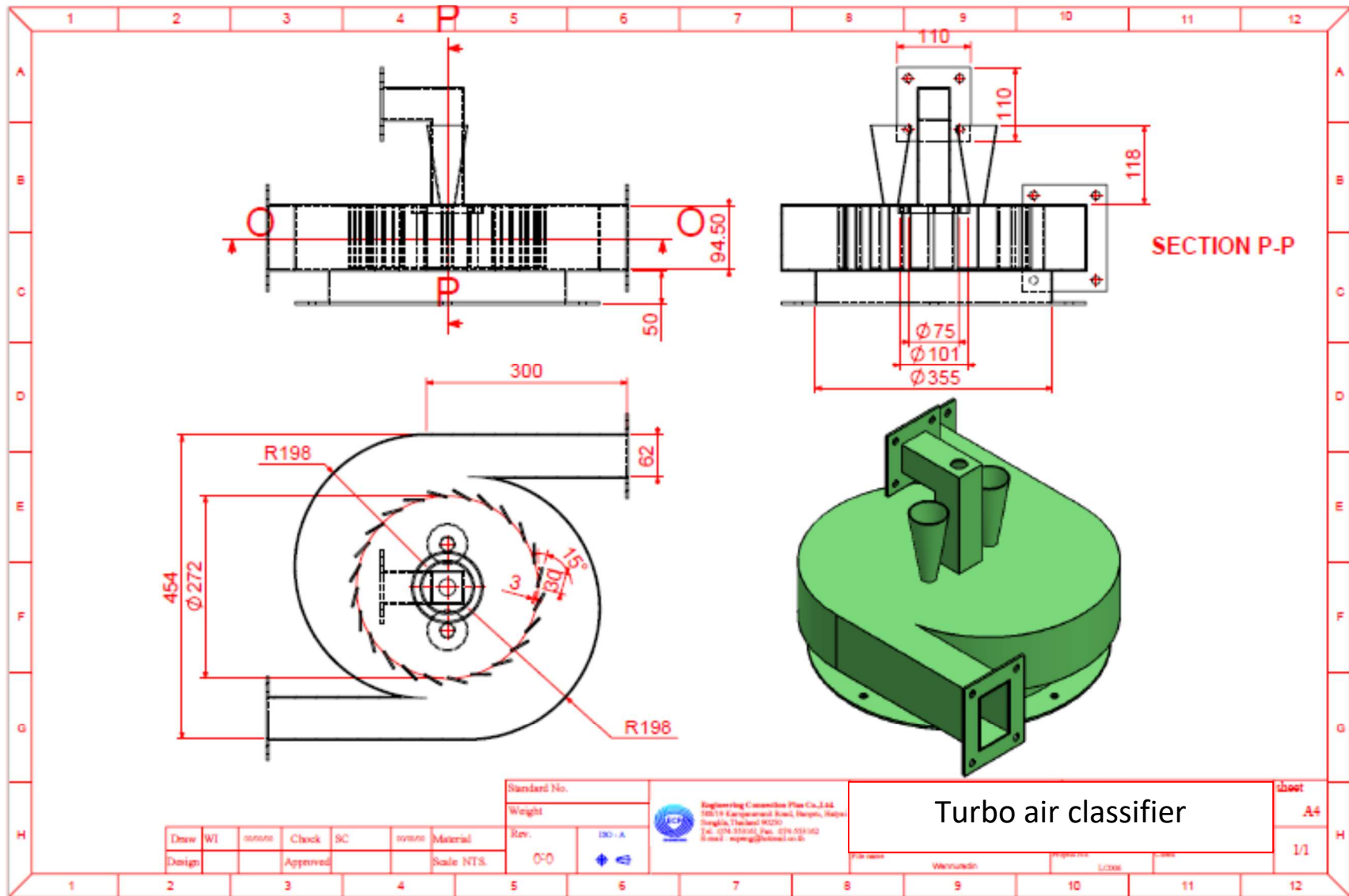
Air cyclone prototype

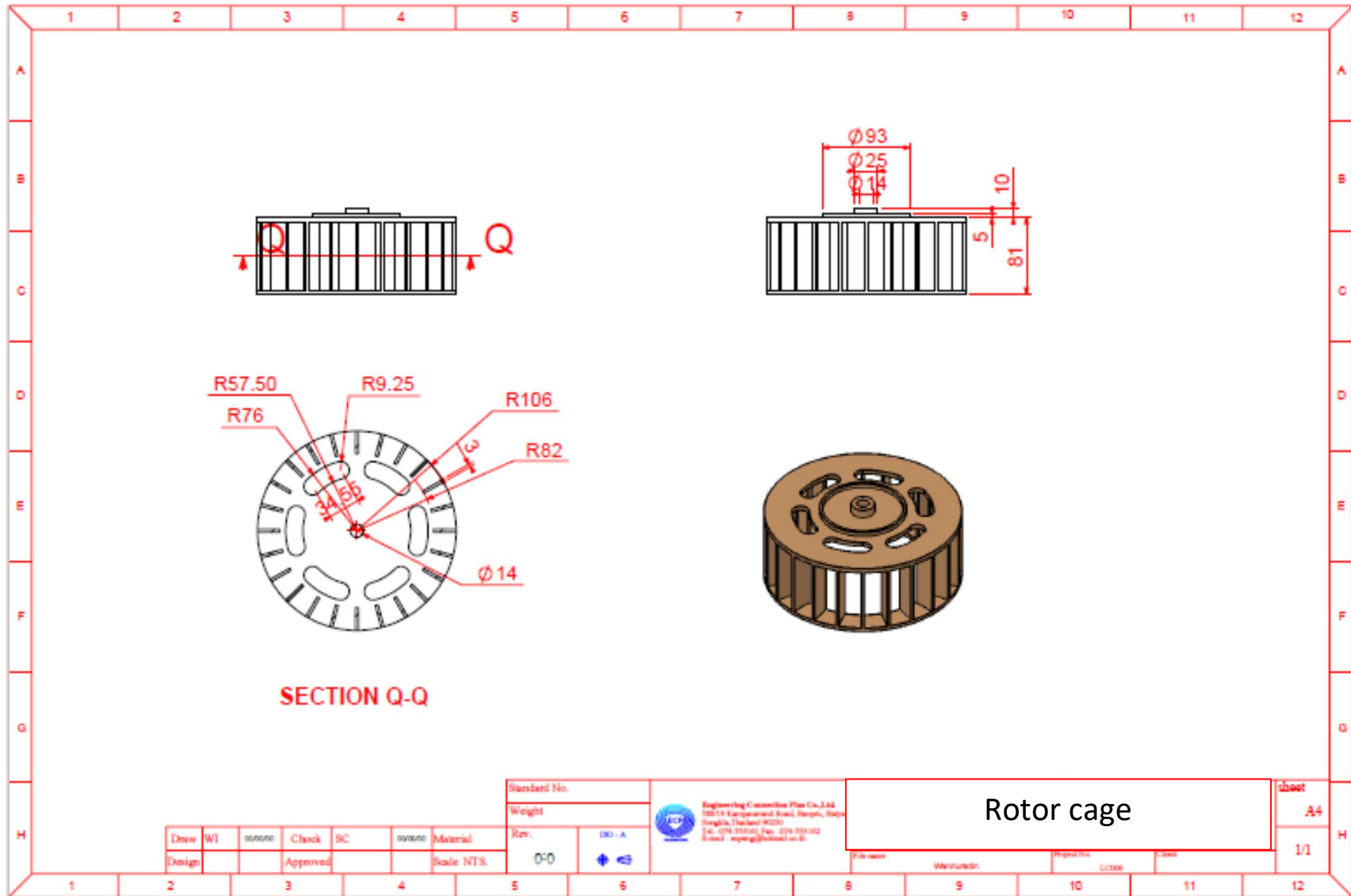
Draw	WI	none	Check	SC	none	Material	Rev.	ISO-A
Design			Approved			Scale NTS	0-0	↕

Weight
 Engineering Consultant Plus Co., Ltd.
 183/19 Karamveit Road, Bangna, Bangkok, Thailand 10260
 Tel: 024-533345, Fax: 024-533342
 Email: nsp@pcpl.com.th

Sheet No.	Project No.	Date	Sheet
			A4
			1/1



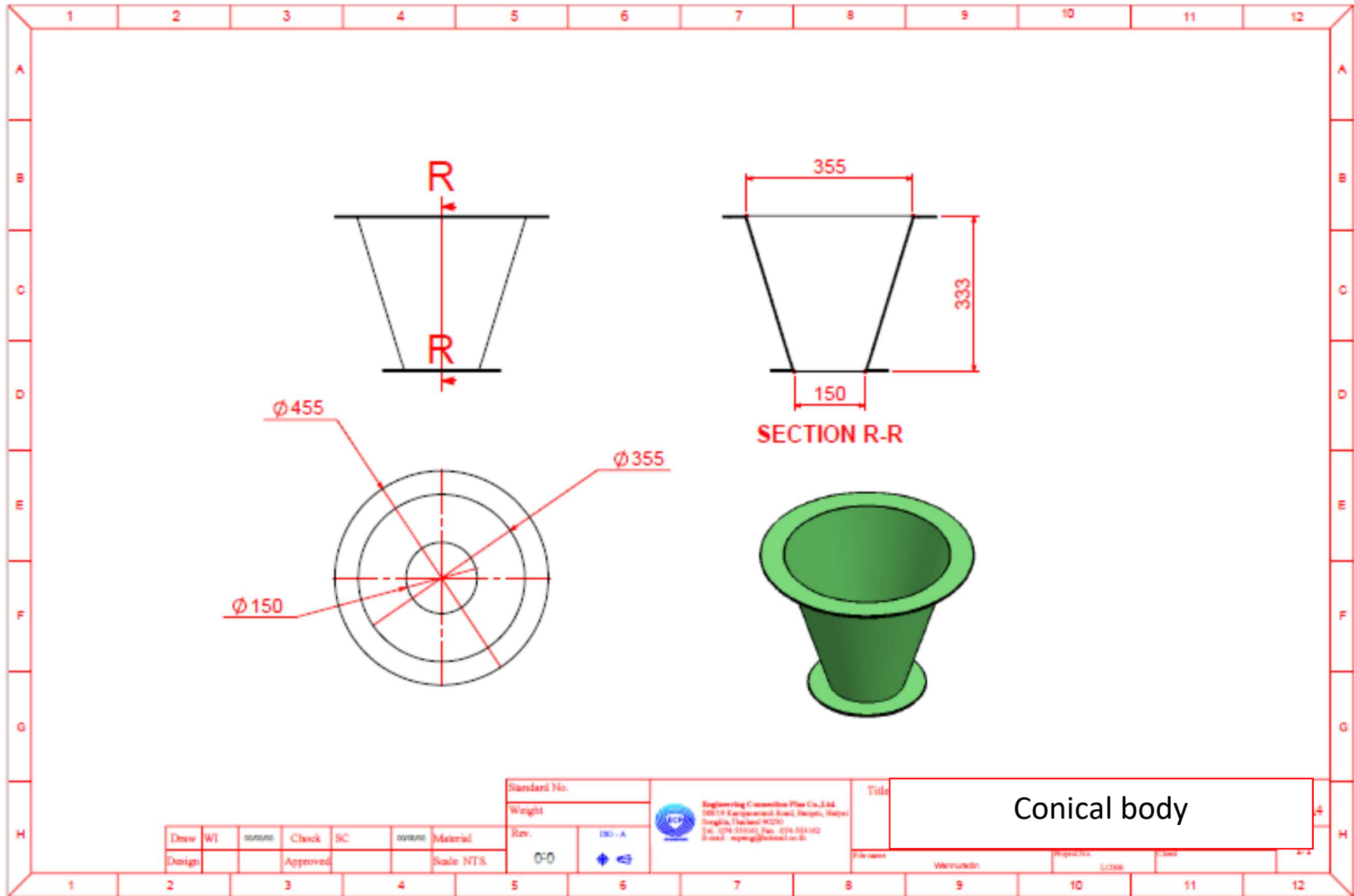


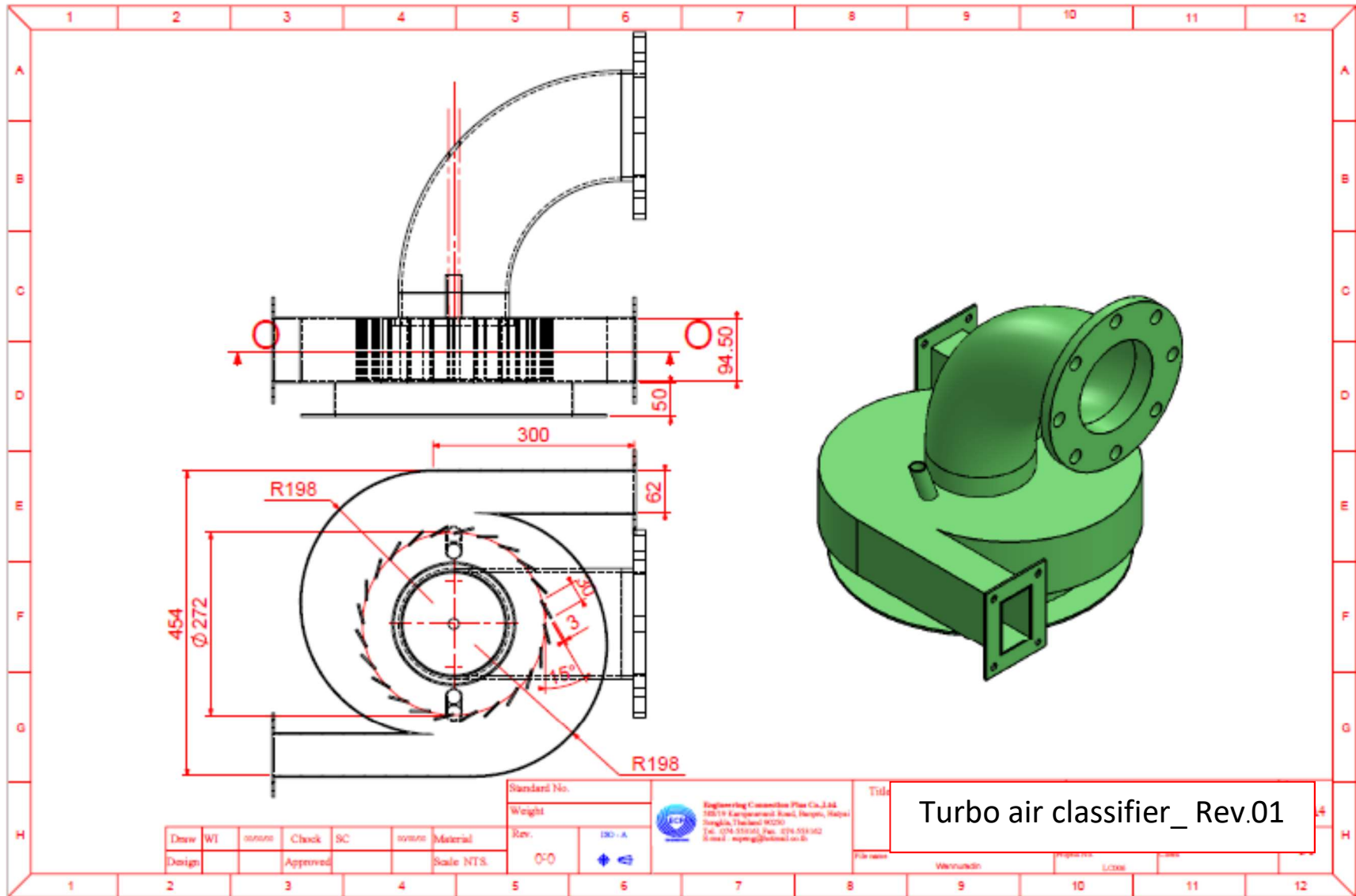


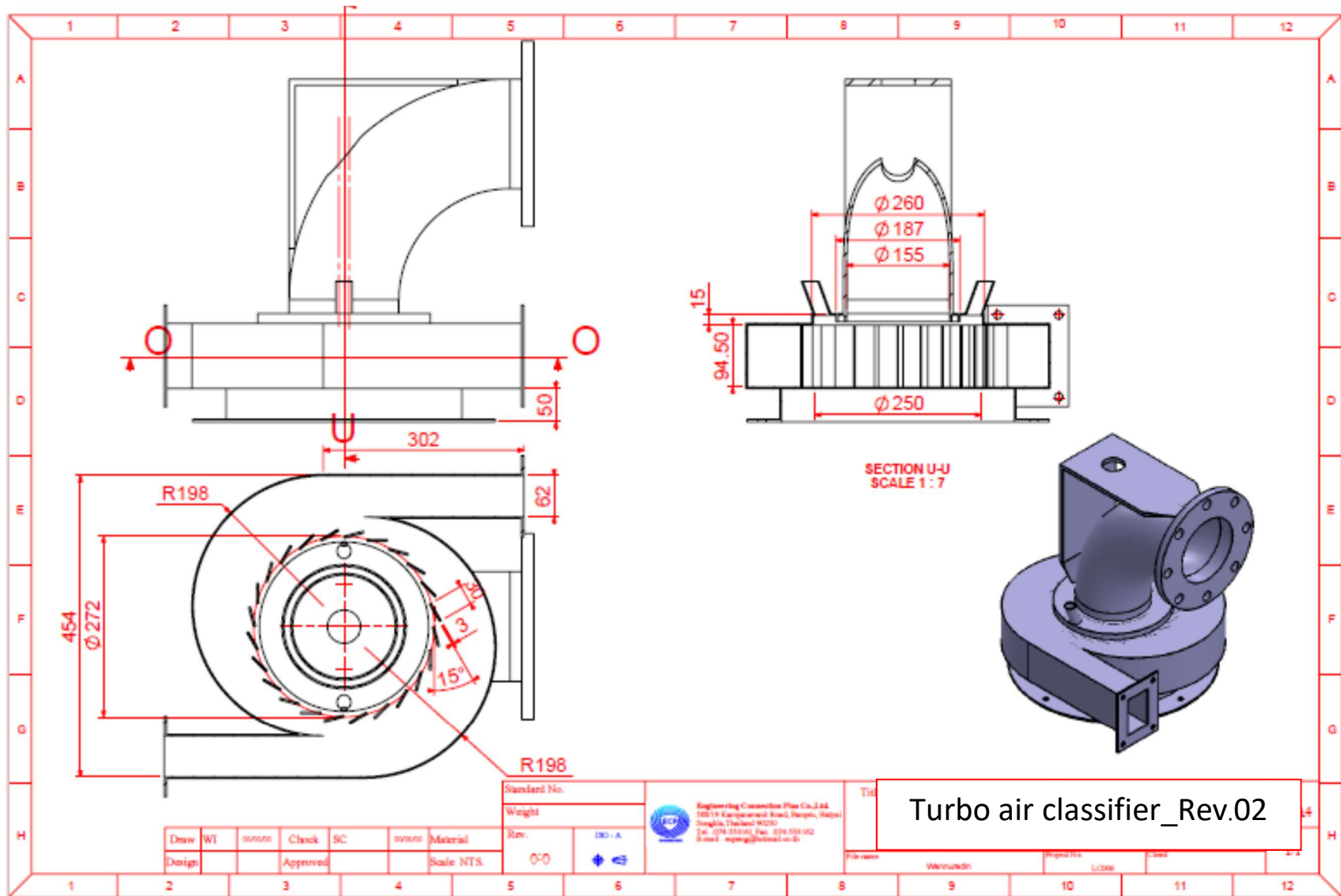
SECTION Q-Q

Rotor cage

Draw		WI	00000	Check	SC	00000	Material	Rev.	00 - A	 Engineering Committee Plus Co., Ltd. 38/19 Karpasorn Road, Bangna, Nonthaburi Bangkok, Thailand 10260 Tel: +66 25515451 Fax: +66 25515452 Email: export@etplus.co.th	sheet A4 1/1
Design			Approved			Scale NTS	0:0	 ISO - A			







Turbo air classifier_Rev.02

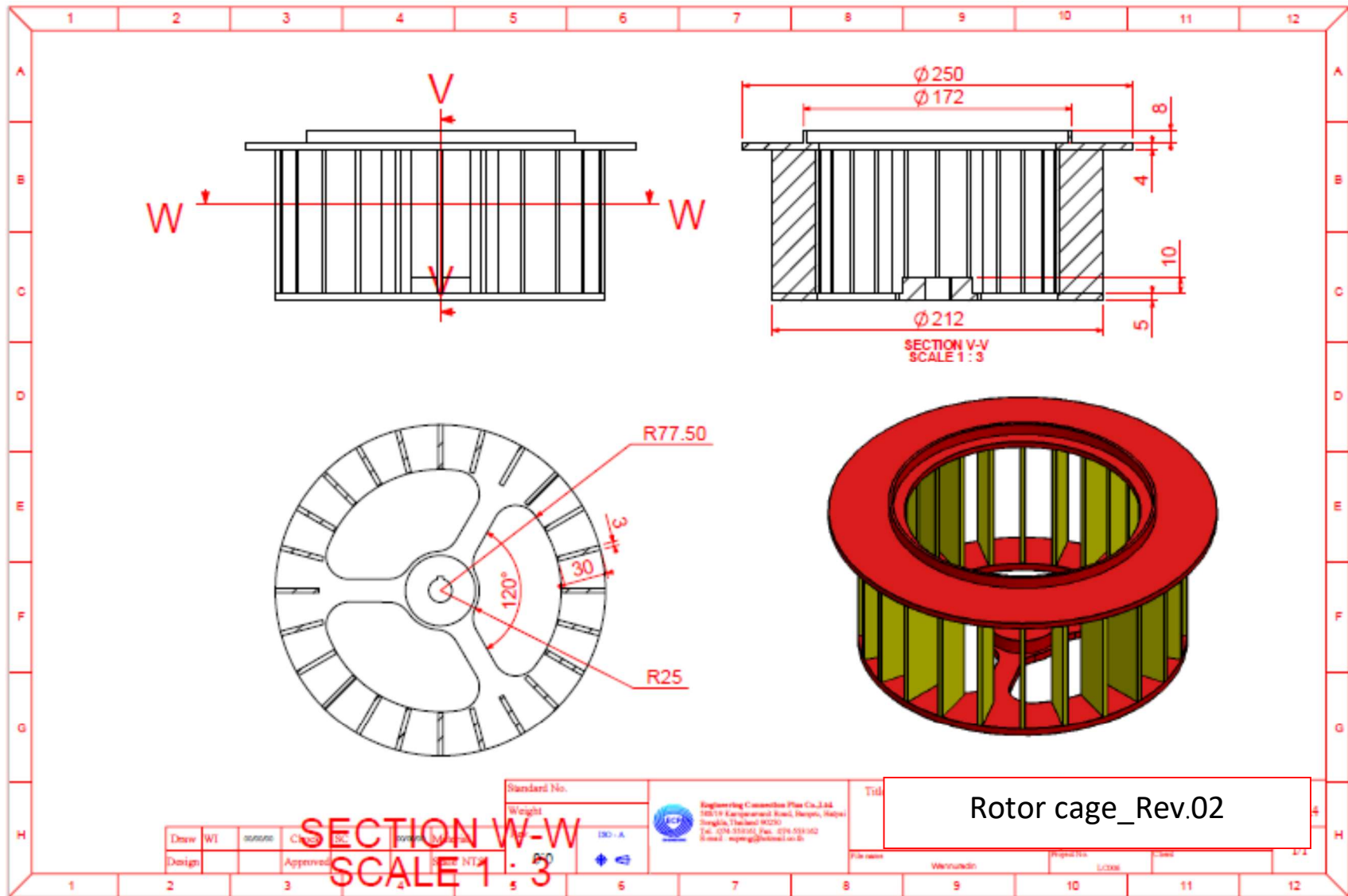
Draw	WI	mmmm	Check	SC	mmmm	Material
Design			Approved			Scale NTS

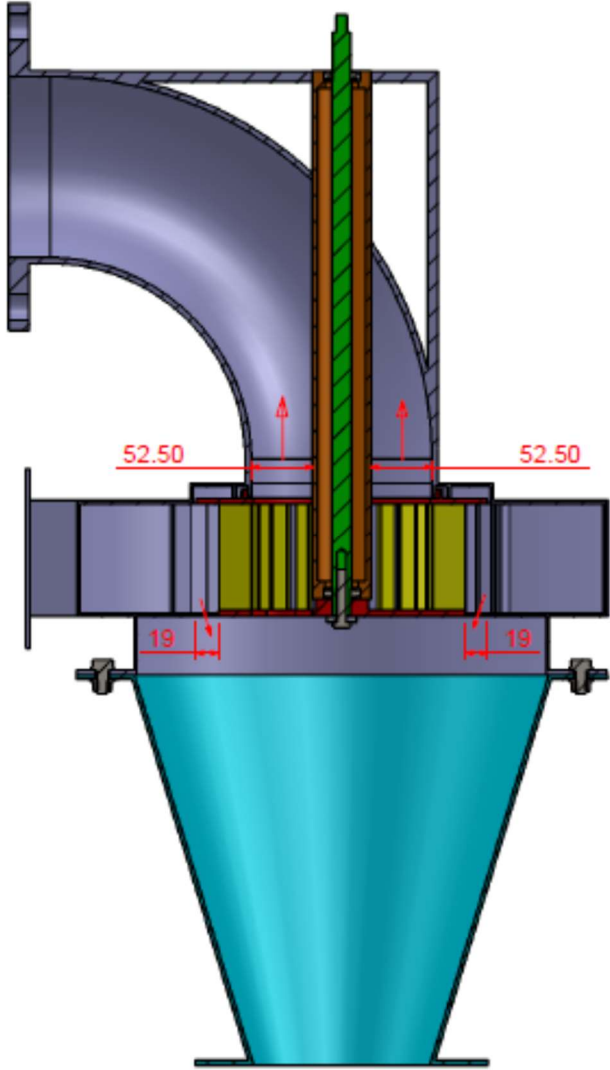
Standard No.	
Weight	
Rev.	0-0



Engineering Committee Plus Co., Ltd.
 38/19 Krasorn Road, Bangna, Bangkok, Thailand 10700
 Tel: 02-5515001 Fax: 02-5515102
 Email: ecp@ecplus.com

File name	Winnuwin	Project No.	LC08	Scale	1:1
-----------	----------	-------------	------	-------	-----





Turbo air classifier assembly

ภาคผนวก ค

ประวัติผู้เขียนและผลงานที่ได้จากการวิจัย

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายนิพนธ์ เต็มหมัด	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5610130011	
วุฒิการศึกษา		
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน
	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
		ปีที่สำเร็จการศึกษา
		2548
	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
		2551

ทุนการศึกษา

1. ทุนบัณฑิตศึกษาสงขลานครินทร์ ปีงบประมาณ 2556
2. ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ปีงบประมาณ 2557
3. ทุนงบประมาณแผ่นดิน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2557-2558

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- Denmud, N., Baite, K., Plookphol, T., and Janudom, S. (2019). "Effects of Operating Parameters on the Cut Size of Turbo Air Classifier for Particle Size Classification of SAC305 Lead-Free Solder Powder". *Processes*, Vol. 7 (7), pp. 427.
- Denmud, N., and Plookphol, T. (2018). "Characteristic of SAC305 lead-free powder prepared by centrifugal atomization". *Key Engineering Materials*, Vol. 777, pp. 322-326.
- Plookphol, T., and Denmud N. (2017). "Production of Lead-Free Solder Powder (Sn-Ag-Cu families) by Centrifugal Atomization". Thailand Petty Patent No. 1603000447.
- Denmud, N., and Plookphol. T. "Influences of oxygen content in an atomizer chamber on characteristics of SAC305 lead-free solder powders produced by centrifugal atomization". (Manuscript).