



การออกแบบและสร้างเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซนชันโดย
อาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเพื่อใช้ผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
**Design and Fabrication of a Centrifugal Atomizer for
Lead-free Solder Powder Processing**

สรารุช โจนสร้าง
Sarawut Gonsrang

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษิตตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณทิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Materials Engineering
Prince of Songkla University**

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและสร้างเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันโดย
อาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเพื่อใช้ผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
ผู้เขียน นายสรารุช โคนสร้าง
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย ปลุกผล)

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย ปลุกผล)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริกุล วิสุทธิเมธางกูร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริกุล วิสุทธิเมธางกูร)

.....กรรมการ
(ดร.เรืองเดช ชงศรี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
สำหรับการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและสร้างเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเพื่อใช้ผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
ผู้เขียน	นายสรารุช โคนสร้าง
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเพื่อใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว และศึกษาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของผงโลหะที่ผลิตได้ การออกแบบงานอะตอมไมเซชันใช้วิธีการคำนวณที่เสนอโดย Zhao (2006) ขนาดของถังอะตอมไมเซชันคำนวณโดยใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของละอองน้ำโลหะเดี่ยวและการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีพาความร้อนแบบบังคับ ได้สร้างชุดทดสอบเพื่อใช้ในการผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเบื้องต้น โดยใช้โลหะดีบุกเป็นวัสดุต้นแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลอง และใช้ข้อมูลนี้สำหรับออกแบบเครื่องผลิตผงโลหะขนาดทดลองต่อไป

เครื่องผลิตผงโลหะที่สร้างขึ้นประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 4 ส่วนคือ (1) ชุดหลอมโลหะอุณหภูมิต่ำซึ่งประกอบด้วย เตาเหล็ก ขดลวดความร้อนชนิดความต้านทานกำลัง 1,000 W ท่อส่งน้ำโลหะ วาล์วเข็มสำหรับควบคุมการเทน้ำโลหะ และหัวฉีดที่มีรูเปิดขนาดต่างๆ คือ 0.5, 0.8, 1.0 และ 2.0 mm เพื่อใช้สำหรับแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำโลหะ (2) ชุดอะตอมไมเซชันประกอบด้วย มอเตอร์ชนิดยูนิเวอร์แซลความเร็วสูง และจานอะตอมไมเซชันทรงแบนและทรงถ้วย ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30, 40 และ 50 mm ความเร็วรอบของมอเตอร์ควบคุมโดยการปรับความต่างศักย์ระหว่างขั้วมอเตอร์ และใช้อุปกรณ์ตรวจรู้เพื่อตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ (3) ถังอะตอมไมเซชันและโครงสร้างรองรับประกอบด้วย ฝาด้านบนเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 m และชิ้นส่วนทรงกรวย สูง 1.5 m ผนังกรวยทำมุม 45° กับแนวดิ่ง และ (4) ชุดควบคุมบรรยากาศประกอบด้วยปั๊มสุญญากาศและถังไนโตรเจน

จากการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์และผลการทดลองผลิตผงโลหะดีบุกเบื้องต้นสรุปได้ว่า ถ้าต้องการผลิตผงโลหะที่มีขนาดเล็กน้อยกว่า 72 μm ขนาดของถังอะตอมไมเซชันควรมีรัศมีอย่างน้อย 1.5 m ในการทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 พบว่าก่อน

โลหะแข็งตัวเกาะบนผิวหน้างานอะตอมไมเซอร์เกิดขึ้นมากในช่วงเริ่มเทน้ำโลหะ หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงเมื่อระบบเข้าสู่สมดุลทางความร้อน ปรากฏการณ์นี้สามารถควบคุมให้ลดลงได้โดยการเพิ่มอัตราเทน้ำโลหะ การเพิ่มอุณหภูมิเทน้ำโลหะ และการเพิ่มอุณหภูมิของงานอะตอมไมเซอร์ ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุกและผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 มีขนาดเล็กลง เมื่อลดอัตราเทน้ำโลหะ เพิ่มความเร็วรอบและขนาดงานอะตอมไมเซอร์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเทน้ำโลหะ งานอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วยจะช่วยให้ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 มีขนาดเฉลี่ยเล็กกว่าผงโลหะที่ผลิตจากอะตอมไมเซอร์แบบจานแบนประมาณ 11% ผงโลหะที่ผลิตในบรรยากาศปกติมีรูปร่างแบบหยดน้ำ (Tear drop) ลิกาเมนต์ (Ligament), เกล็ด (Flake) และรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular) ผงโลหะจะมีรูปร่างที่กลมขึ้นและขนาดเฉลี่ยของผงโลหะมีแนวโน้มเล็กลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศขณะผลิตผงโลหะถูกควบคุมให้ลดต่ำลง

Thesis Title	Design and Fabrication of a Centrifugal Atomizer for Lead-free Solder Powder Processing
Author	Mr.Sarawut Gonsrang
Major Program	Materials Engineering
Academic Year	2009

ABSTRACT

The purpose of this research project was aimed at the design and fabrication of a centrifugal atomizer for metal powder production with emphasis on lead-free solder powder for electronic application. The influences of process parameters in metal melt atomization and the characteristics of produced metal powder were investigated. The atomizer disc was designed by using the procedure suggested by Zhao (2006). The trajectory model of a single melt droplet during flight and the concept of forced convection heat transfer of melt droplet were used to estimate the size of atomizer chamber. In this work, a simple centrifugal atomizing test rig was first set up for preliminary study, using tin as a model material. The experimental results were compared with those calculated from a theoretical model. The data gained from the preliminary study was used as guidance for further design of a pilot-scale centrifugal atomizer.

The pilot-scale centrifugal atomizer was designed and fabricated. It consists of 4 main parts: (1) a metal melt supply unit equipped with a steel crucible, a 1000-watt heating element, a melt delivering pipe line, a needle valve, and nozzles with different orifice sizes of 0.5, 0.8, 1.0 and 2.0 mm for varying the melt feed rate; (2) an atomizing unit comprised of a high speed universal motor and atomizers with different diameter sizes of 30, 40 and 50 mm of either flat disc or cup shape. The speed of motor was controlled by a voltage regulator and sensed by a proximity switch; (3) an atomizer chamber composed of a 3-meter cylinder and a conical section with 1.5 m high and 45° cone angle and (4) an atomizing atmosphere control system consisted of a vacuum pump and nitrogen gas supply tanks.

The results from mathematical modeling and preliminary experiments on tin atomization were concluded that the minimum radius of the atomizer chamber should be 1.5

meters for producing powder with mean particle size smaller than 72 μm . In the atomization of SAC305 lead-free solder, the formation of metal skull on the atomizer disc or the premature solidification was usually observed at the beginning of melt feed onto the disc. The rate of skull formation was gradually decreased until the heat transfer of the system was steady. The skull formation phenomenon could be reduced by increasing the melt feed rate, raising the pouring melt temperature, or preheating the atomizer disc. The mean size of both tin and SAC305 powder was decreased with increasing the melt feed rate, the rotating speed, the atomizer size and the pouring melt temperature. Under the same atomizing conditions, the mean size of powder produced from the cup shape atomizer was about 11% smaller than that from the disc one. The shapes of SAC305 solder powder atomized under the ambient air atmosphere were mostly tear drop, ligament, flake and irregular. The shape of powder was become more spherical and the mean size was slightly decreased with reducing the oxygen content in the atomizing atmosphere.

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ที่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนใคร่ขอขอบพระคุณ ครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านและคอยให้กำลังใจผู้เขียนเสมอมา ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย ปลุกผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริกุล วิสุทธิเมธางกูร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่อบรม ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆ ที่มีคุณค่า สำหรับการทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตรงตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์ ประธานกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ และ คณะกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย ปลุกผล รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริกุล วิสุทธิเมธางกูร และดร.เรืองเดช ชงศรี ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าอย่างยิ่งในการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์และให้ข้อเสนอแนะจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณ คุณสุชาติ จันทรมณีย์ สำหรับการสนับสนุนทางด้านเทคนิค ขอขอบคุณ คณะครูช่าง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ซึ่งประกอบด้วย คุณณัด ฉิมพลี คุณประยูร ค้างสิริ คุณมนัส จำวาง และคุณนิยม พรหมรัตน์ ที่ช่วยอนุเคราะห์ สร้างเครื่องผลิตผงโลหะ ขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษากลุ่มวิจัยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ภาควิชา วิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยติดตั้งและ ดัดแปลงเครื่องผลิตผงโลหะ ขอขอบคุณ คุณสมใจ จันทร์อุดม ที่ช่วยอนุเคราะห์ทั้งความรู้และ สร้างอุปกรณ์ในการควบคุมเครื่องผลิตผงโลหะ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมือง จันท์บุรีและทีมนักศึกษา กลุ่มวิจัยเทคโนโลยีการเชื่อม ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยอนุเคราะห์ดัดแปลงเครื่องผลิตผงโลหะ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุน ผู้ช่วยวิจัยประจำปีการศึกษา 2551-2552 และสนับสนุนทุนในการเดินทางไปนำเสนอผลงาน วิชาการที่ประเทศอินเดีย ขอขอบคุณศูนย์เครือข่ายความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ ใน การทำวิจัยและทุนบางส่วนสำหรับเดินทางไปนำเสนอผลงานวิชาการที่ประเทศอินเดีย ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยบางส่วน ขอขอบพระคุณ บริษัทไทยแลนด์ สเมลติ้งแอนดรีไฟนิง จำกัด ที่อนุเคราะห์วัสดุสำหรับการทำวิจัย

ท้ายที่สุดผู้เขียนขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และทุกท่านที่นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วที่มีส่วน

ร่วมช่วยเหลือจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จด้วยดี และขอขอบคุณ คุณธเนศ รัตโนชัยกุลที่ช่วย
แนะนำให้รู้จักกับ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ .ดร.วิชชัย ปลูกผล และทุกๆ ท่านที่กล่าวมา

สราวุธ โคนสร้าง

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(9)
รายการตาราง	(13)
รายการภาพประกอบ	(14)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(22)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 ทฤษฎี	2
1.2.1 โลหะผสม	2
1.2.2 ผงโลหะ	3
1.2.3 กระบวนการผลิตผงโลหะ	3
1.2.4 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน	3
1.2.4.1 การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ	5
1.2.4.2 การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ	7
1.2.4.3 การอะตอมไมเซชันโดยอาศัยแรงหมุนเหวี่ยง	7
1.2.4.4 การอะตอมไมเซชันด้วยคลื่นความถี่สูง	11
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
1.4 การสืบค้นฐานข้อมูลสิทธิบัตร	14
1.5 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	17
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	17
1.7 ขอบเขตการวิจัย	18
1.8 สถานที่ทำวิจัย	18
2. วิธีการวิจัย	19
2.1 กล่าวนำ	19
2.2 การออกแบบและสร้างเครื่องผลิตผงโลหะ	19
2.2.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบเครื่องผลิตผงโลหะ	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1.1 กำลังของมอเตอร์	20
2.2.1.2 งานอะตอมไมเซอร์	21
2.2.1.3 ถังอะตอมไมเซอร์	23
2.2.1.4 สรุปผลการออกแบบ	27
2.2.2 ชุดทดลองผลิตผงโลหะเบื้องต้น	29
2.2.2.1 อุปกรณ์หลอมและจ่ายน้ำโลหะ	29
2.2.2.2 ชุดอะตอมไมเซอร์	33
2.2.2.3 โครงสร้างรองรับเครื่อง	34
2.2.3 เครื่องผลิตผงโลหะ	34
2.2.3.1 อุปกรณ์หลอมและจ่ายน้ำโลหะ	35
2.2.3.2 ชุดอะตอมไมเซอร์	38
2.2.3.3 ถังอะตอมไมเซอร์	39
2.2.3.4 อุปกรณ์ควบคุมบรรยากาศ	40
2.3 วิธีการทดลอง	41
2.3.1 วัตถุประสงค์	41
2.3.2 วิธีทดลองผลิตผงโลหะเบื้องต้น	42
2.3.3 วิธีทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305	44
2.3.3.1 การเตรียมสารเคมีสำหรับเคลือบผิวงานอะตอมไมเซอร์	47
2.3.3.2 การเคลือบผิวหน้างานอะตอมไมเซอร์	48
2.3.4 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ขนาดผงโลหะด้วยตะแกรง	48
2.3.5 การวิเคราะห์รูปทรงของผงโลหะ	50
2.3.6 การเตรียมตัวอย่างเพื่อส่งวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนของผงโลหะ	51
3. การอภิปรายผลการทดลอง	52
3.1 กล่าวนำ	52
3.2 ปรากฏการณ์บนผิวงานอะตอมไมเซอร์ขณะทดลอง	52
3.2.1 การเกิดก้อนโลหะแข็งตัวเกาะผิวงานอะตอมไมเซอร์	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 สมบัติการเปียกระหว่างงานอะตอมไมเซอร์และน้ำโลหะ	56
3.2.3 ปฏิกิริยาไฮดรอลิกจัมพ์	57
3.3 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของผงโลหะ	60
3.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากงานอะตอมไมเซอร์กับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะคีนุก	60
3.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทน้ำโลหะกับขนาดเฉลี่ยผงโลหะคีนุก	63
3.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเทน้ำโลหะกับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ	66
3.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางงานอะตอมไมเซอร์กับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ	70
3.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของงานอะตอมไมเซอร์กับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305	73
3.3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศขณะผลิตกับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305	76
3.4 รูปทรงของผงโลหะ	83
3.5 การอภิปรายผลการทดลอง	87
4. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	94
4.1 สรุปผลการทดลอง	94
4.2 ข้อเสนอแนะ	96
บรรณานุกรม	98
ภาคผนวก	101
(ก) แบบชิ้นส่วนเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซอร์ โดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยง	102
(ข) ตัวอย่างการบันทึกผลการทดลอง	131
(ค) ชุดคำสั่งแบบจำลองวิธีการเคลื่อนที่และการถ่ายเทความร้อนของละอองน้ำโลหะสำหรับทำงานบนโปรแกรม SciLab	136

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
(ง) การบันทึกอุณหภูมิด้วยโปรแกรม LabView Signal Express	144
ประวัติผู้วิจัย	150

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ น้ำ และแรงหมุนเหวี่ยง	9
2.1 เงื่อนไขในการทดลองผลิตผงโลหะตีบุกเบื้องต้น	44
2.2 เงื่อนไขในการทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 โดยที่ในแต่ละชุดการทดลองจะทำซ้ำรวม 2 ครั้ง	46
2.3 ขนาครูปเปิดของตะแกรงมาตรฐาน ASTM E11 ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ในหน่วยไมครอนเทียบกับเบอร์เมช	50
ผข.1 ตัวอย่างการบันทึกน้ำหนักผงโลหะที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานแต่ละเบอร์จากการทดลองที่ CA068SAC น้ำหนักรวมผงโลหะ 260.06 g	133
ผข.2 ข้อมูลน้ำหนักผงโลหะสำหรับนำไปพล็อตกราฟการกระจายขนาดของผงโลหะจากการทดลองที่ CA068SAC	134

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซในแนวนอน	5
1.2 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซในแนวตั้ง	6
1.3 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ	6
1.4 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของกระบวนการหมุนหัว	7
1.5 รูปแบบการฟอร์มตัวของน้ำโลหะที่หัวแอโนด	8
1.6 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซอร์ด้วยจานอะตอมไมเซอร์	9
1.7 เครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันแบบอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงของ Klaphaak และ Barnes ตามสิทธิบัตร U.S.Pat.3,720,737	15
1.8 เครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันแบบอาศัยแรงหมุนเหวี่ยงตามสิทธิบัตร U.S.Pat.5917113	15
1.9 เครื่องผลิตผงโลหะตามสิทธิบัตร U.S.Pat.6808677 B2	16
2.1 ภาพถ่ายอิสระแสดงการเคลื่อนที่ของละอองน้ำโลหะและแรงกระทำ	25
2.2 ผลการคำนวณ (ก) เส้นทางการเดินทางและ (ข) ความร้อนแฝงของการแข็งตัวของละอองน้ำโลหะดิบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70.4 μm และ 105.6 μm หลังจากหลุดจากขอบจานอะตอมไมเซอร์ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 20,000 rpm	28
2.3 ส่วนประกอบของชุดทดลองผลิตผงโลหะด้วยวิธีโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเบื้องต้น	30
2.4 ชุดทดลองผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเบื้องต้น	30
2.5 หัวฉีดน้ำโลหะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูเปิด (Orifice) 0.5, 0.8, 1.0, และ 2.0 mm จากขวาไปซ้าย	31
2.6 ฉากรับผงโลหะที่ติดตั้งที่บริเวณหน้าชุดทดลองผลิตผงโลหะดิบด้วยวิธีอะตอมไมเซชันเบื้องต้น	32
2.7 มอเตอร์ความเร็วสูงติดตั้งจานอะตอมไมเซอร์ทรงแบน	33
2.8 อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าเพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์	33
2.9 จานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนและทรงถ้วยขนาด 30, 40, 50, 70 และ 100 mm	34

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.10	เครื่องผลิตผงโลหะด้วยที่สร้างขึ้นสำหรับการวิจัยครั้งนี้	35
2.11	แผนผังควบคุมการทำงานของเครื่องผลิตผงโลหะที่สร้างขึ้น	37
2.12	งานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนและทรงถ้วย ขนาด 30, 40 และ 50 mm ทั้งหมดผ่าน การเคลือบผิวหน้าด้วยโลหะบัดกรีชนิด SAC305	38
2.13	อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์และอุปกรณ์แสดงค่าความเร็วรอบของ มอเตอร์	39
2.14	อุปกรณ์ตรวจรู้ปริมาณออกซิเจนพร้อมมิเตอร์แสดงผล	41
2.15	วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองผลิตผงโลหะ (ก) แท่งโลหะดีบุกความบริสุทธิ์ 99.95 wt% และ (ข) แท่งโลหะบัดกรีชนิด SAC305	42
2.16	แสดงบริเวณที่เก็บตัวอย่างผงโลหะเพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ย ของผงโลหะกับระยะห่างจากงานอะตอมไมเซอร์	43
2.17	ระบบท่อควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์	45
2.18	(ก) ผิวหน้าของงานอะตอมไมเซอร์ที่ขัดด้วยกระดาษทราย และ (ข) ผิวหน้างาน อะตอมไมเซอร์ที่เคลือบด้วยโลหะบัดกรีชนิด SAC305	48
2.19	(ก) ชุดตะแกรงมาตรฐาน ASTM E11 เบอร์ต่างๆ วางเรียงซ้อนบนถาดรอง และ (ข) เครื่องสั่นตะแกรง	49
3.1	ผิวหน้าของงานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนซึ่งมีก้อนโลหะดีบุกเกาะ	53
3.2	ก้อนโลหะดีบุกที่แข็งตัวบนผิวหน้างานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนขนาด 50 mm ซึ่ง ถูกเหวี่ยงออกจากงานอะตอมไมเซอร์	53
3.3	ก้อนโลหะดีบุกขนาดใหญ่ที่แข็งตัวบนผิวหน้างานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนขนาด 50 mm เนื่องจากอัตราเทน้ำโลหะที่ต่ำมากๆ	54
3.4	แผ่นโลหะบัดกรีชนิด SAC305 เกาะที่ผนังกรวยเครื่องผลิตผงโลหะ	55
3.5	ก้อนโลหะที่อยู่รอบๆ งานอะตอมไมเซอร์เนื่องจากไม่เกิดการอะตอมไมเซอร์	55
3.6	ผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305 ผลิตด้วยเครื่องผลิตผงโลหะที่สร้างขึ้นภายหลังจาก ปรับปรุงสมบัติการเปียกแล้ว	55

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 แสดงเหตุการณ์ที่น้ำโลหะไหลและแตกตัวบนจานอะตอมไมเซอร์ที่กำลังหมุนด้วยความเร็ว 30,000 rpm เมื่ออัตราเทน้ำโลหะ $32 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ (ก) ช่วงแรกก่อนระบบเข้าสู่สมดุล และ (ข) เมื่อระบบเข้าสู่สมดุล	56
3.8 แสดงเหตุการณ์ที่น้ำโลหะไหลและแตกตัวบนจานอะตอมไมเซอร์ที่กำลังหมุนด้วยความเร็ว 30,000 rpm เมื่ออัตราเทน้ำโลหะ $134 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ (ก) ช่วงแรกก่อนระบบเข้าสู่สมดุล และ (ข) เมื่อระบบเข้าสู่สมดุล	57
3.9 การกระจายขนาดของผงโลหะดีบุกที่ระยะห่างจากจานอะตอมไมเซอร์ต่างกัน เมื่อใช้จานอะตอมไมเซอร์ขนาด 50 mm (ก) ทรงแบน และ (ข) ทรงถ้วย ความเร็วรอบ 20,000 rpm อัตราเทน้ำโลหะ $150 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิเท 282°C	58
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากจุดศูนย์กลางจานอะตอมไมเซอร์กับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุก เมื่อใช้ (ก) อะตอมไมเซอร์ทรงแบนขนาด 50 mm และ (ข) จานอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วยขนาด 50 mm ความเร็วรอบ 20,000 rpm อัตราเทน้ำโลหะ $159 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิเท 282°C , 332°C และ 382°C	59
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในแนวตั้งกับระยะทางในแนวระนาบของละอองน้ำโลหะดีบุกซึ่งมีขนาด (ก) 58 (ข) 72 (ค) 97 (ง) 131 และ (จ) $175 \mu\text{m}$	61
3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในแนวตั้งของละอองน้ำโลหะดีบุกขนาด (ก) 58 (ข) 72 (ค) 97 (ง) 131 และ (จ) $175 \mu\text{m}$ ณ เวลาต่างๆ	62
3.13 กราฟแสดงค่าความร้อนที่ละอองน้ำโลหะดีบุกขนาด (ก) 58 (ข) 72 (ค) 97 (ง) 131 และ (จ) $175 \mu\text{m}$ ถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งกับระยะทางในแนวระนาบ	63
3.14 การกระจายขนาดของผงโลหะดีบุกที่ผลิตด้วยจานอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วยและทรงแบนขนาด 50 mm ความเร็วรอบ 20,000 rpm อัตราเทน้ำโลหะ $150 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$	64

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.15	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุกกับอุณหภูมิเหนือน้ำโลหะเมื่อรูปทรงของจานอะตอมไมเซอร์เป็นทรงแบนและทรงถ้วยขนาด 50 mm ความเร็วรอบ 20,000 rpm อัตราเหนือน้ำโลหะ $159 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$	65
3.16	การกระจายขนาดของผงโลหะดีบุกเมื่ออัตราเหนือน้ำโลหะ 15.6 และ $144 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ จานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนขนาด 50 mm ความเร็วรอบ 20,000 rpm อุณหภูมิเท 282°C	65
3.17	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเหนือน้ำโลหะกับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุก เมื่อใช้จานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนขนาด 50 mm ความเร็วรอบ 20,000 rpm อุณหภูมิเท 282°C	66
3.18	การกระจายขนาดของผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305 เมื่ออัตราเหนือน้ำโลหะเท่ากับ $17.3 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ และ $131.63 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ จานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนขนาด 50 mm ความเร็วรอบ 20,000 rpm อุณหภูมิเท 318°C	67
3.19	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเหนือน้ำโลหะกับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305 เมื่อใช้จานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนขนาด 50 mm ความเร็วรอบ 20,000 rpm อุณหภูมิเท 318°C	67
3.20	ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305 กับอัตราเร็วในการเหนือน้ำโลหะ เมื่อใช้จานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนขนาด 50 mm ความเร็วรอบ 20,000 rpm อุณหภูมิเท 318°C	69
3.21	การกระจายขนาดของผงโลหะดีบุกที่ผลิตจากจานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนขนาด 30 และ 50 mm ความเร็วรอบ 20,000 rpm อัตราเหนือน้ำโลหะ $15.4 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิเท 282°C	69
3.22	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจานอะตอมไมเซอร์กับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุก เมื่อความเร็วรอบ 20,000 rpm อัตราเหนือน้ำโลหะ $15.4 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิเท 282°C	70

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23 การกระจายขนาดของผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305 เมื่อ ใช้งานอะตอมไมเซอร์ ทรงแบนขนาด 30 และ 50 mm และทรงถ้วยขนาด 30 และ 50 mm ความเร็วรอบ 20,000 rpm อัตราเร็วในการเทน้ำโลหะ $63.3 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิเท 318°C	71
3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและรูปทรงของจานอะตอมไมเซอร์กับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305 เปรียบเทียบกับผลจากสมการที่ 1.1 ความเร็วรอบ 20,000 rpm อัตราเร็วในการเทน้ำโลหะ $63.3 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิเท 318°C	71
3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305 กับชนิดและขนาดจานอะตอมไมเซอร์ ความเร็วรอบ 20,000 rpm อัตราการเทน้ำโลหะ $63.3 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิเท 318°C	72
3.26 กระจายขนาดของผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305 เมื่อใช้งานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนขนาด 50 mm หมุนด้วยความเร็วรอบ 10,000 และ 30,000 rpm อัตราเทน้ำโลหะ $32 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิเท 318°C	73
3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์กับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305 เปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณด้วยสมการที่ 1.1 เมื่อใช้งานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนขนาด 50 mm อัตราเทน้ำโลหะ $32 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิเท 318°C	74
3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตผงบัดกรี SAC305 โลหะกับความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนขนาด 50 mm อัตราเทน้ำโลหะ $32 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิเท 282°C	75
3.29 กระจายขนาดของผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305 เมื่อ ใช้งานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนขนาด 50 mm ความเร็วรอบ 30,000 rpm อัตราเทน้ำโลหะ $32 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิเท 282°C โดยผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนต่างกัน	75

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศขณะผลิตผงโลหะกับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 เมื่อใช้งานอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วยขนาด 40 mm ความเร็วรอบ 30,000 rpm อัตราเทน้ำโลหะ $32 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิเท 318°C	76
3.31 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305 กับปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศขณะผลิตผงโลหะที่ต่างกัน เมื่อใช้งานอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วยขนาด 40 mm ความเร็วรอบ 30,000 rpm อัตราเทน้ำโลหะ $32 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิเท 318°C	77
3.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 กับปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศขณะผลิตผงโลหะ เมื่อใช้งานอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วยขนาด 40 mm ความเร็วรอบ 30,000 rpm อัตราเทน้ำโลหะ $32 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิเท 318°C	78
3.33 ผงออกไซด์ละเอียดที่เหลือจากการนำผงโลหะที่ผลิตได้กลับมาหลอมใหม่	78
3.34 ผงโลหะดีบุกช่วงขนาด -45+38 μm มีรูปทรงแบบหยดน้ำ, ลิกาเมนต์ และ รูปทรงไม่แน่นอน ปะปนกัน	79
3.35 ผงโลหะดีบุกช่วงขนาด -38+25 μm มีรูปทรงแบบหยดน้ำ, ลิกาเมนต์ และ รูปทรงไม่แน่นอน ปะปนกัน	79
3.36 ผงโลหะดีบุกช่วงขนาด -25 μm มีรูปทรงแบบหยดน้ำ, ลิกาเมนต์, และ รูปทรงไม่แน่นอน ปะปนกัน	80
3.37 ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ช่วงขนาด -45+38 μm มีรูปทรงแบบหยดน้ำ, ลิกาเมนต์ และ เกล็ด ปะปนกัน	80
3.38 ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ช่วงขนาด -38+25 μm มีรูปทรงแบบหยดน้ำ และ ลิกาเมนต์ ปะปนกัน	80
3.39 ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ช่วงขนาด -25 μm มีรูปทรงแบบหยดน้ำ และ ลิกาเมนต์ ปะปนกัน	81

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.40 ภาพอิเล็กตรอนไมโครกราฟของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ก่อนตัดขนาดด้วยตะแกรง อนุภาคที่พบส่วนใหญ่มีรูปร่างแบบหยดน้ำ และ ลิกาเมนต์ปะปนกัน (ก) กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) 250 เท่า	81
3.41 ภาพอิเล็กตรอนไมโครกราฟของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ช่วงขนาด -45+38 μm มีรูปร่างแบบหยดน้ำ และ ลิกาเมนต์ปะปนกัน (ก) กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) 250 เท่า	82
3.42 ภาพอิเล็กตรอนไมโครกราฟของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ช่วงขนาด -38+25 μm มีรูปร่างแบบหยดน้ำ และ ลิกาเมนต์ปะปนกัน (ก) กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) 250 เท่า	82
3.43 ภาพอิเล็กตรอนไมโครกราฟของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ช่วงขนาด -25 μm มีรูปร่างแบบหยดน้ำ และ ลิกาเมนต์ปะปนกัน (ก) กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) 250 เท่า	83
3.44 ภาพถ่ายอิเล็กตรอนไมโครกราฟที่กำลังขยาย 100 และ 250 เท่าของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่มีขนาดในช่วง -38+25 μm หรือ Type IV ที่ผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนต่างกันคือ (ก) และ (ข) 21%, (ค) และ (ง) 10%, (จ) และ (ฉ) 5% และ (ช) และ (ซ) 2% โดยปริมาตร	85
3.45 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศการอะตอมไมเซชันกับตัวประกอบความเป็นทรงกลมของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 เมื่อใช้จานอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วยขนาด 40 mm ความเร็วรอบ 30,000 rpm อัตราเทน้ำโลหะ 32 $\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิ 318°C	85
3.46 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมชั้นของขอบจานอะตอมไมเซอร์กับค่ามุมเปียกวิกฤติของน้ำโลหะดิบกับผิวจานอะตอมไมเซอร์ เมื่อรัศมีจานอะตอมไมเซอร์เท่ากับ 30 mm อัตราเทน้ำโลหะ $1 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ และความเร็วรอบ 15,000 rpm	90
ผข.1 ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่คัดขนาดด้วยชุดตะแกรงมาตรฐาน ASTM E11 แล้ว	133

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ผข.2 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลจากการทดลองที่ CA068SAC ลงบนกระดาษกราฟแบบ ถือปกกติ และการหาค่าขนาดเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	135
ผค.1 หน้าต่าง Console ของโปรแกรม SciLab	140
ผค.2 หน้าต่าง Scilab text editor ที่พิมพ์ชุดคำสั่งเรียบร้อยแล้ว	141
ผค.3 แสดงหน้าต่างแสดงผลของชุดคำสั่งแบบวิธีการเคลื่อนที่และการถ่ายเทความร้อน ของละอองน้ำโลหะ (ก) วิธีการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ (ข) ความเร็วเฉลี่ยของ อนุภาคโลหะ ณ เวลาต่างๆ กัน และ (ค) ค่าความร้อนที่ถ่ายเทจากอนุภาคโลหะ ณ เวลาต่างๆกัน	143
ผง.1 หน้าต่าง New Project ของโปรแกรม LabView Signal Express	145
ผง.2 กด่อง Add Step สำหรับการตั้งค่า New project โดยการกำหนดลักษณะสัญญาณขา เข้า และกำหนดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าสัญญาณขาเข้า	146
ผง.3 กด่อง Add Channels To Task สำหรับเลือกช่องสัญญาณขาเข้าที่รับมาจากอุปกรณ์ Hi speed USB carrier	146
ผง.4 หน้าต่าง New Project ของโปรแกรม LabView Signal Express โดยเริ่มบันทึกค่าที่ Configuration ก่อนเพื่อปรับแต่งค่าการแสดงผลของโปรแกรม	147
ผง.5 กด่อง Logging Signals Selection ซึ่งจะปรากฏก่อนที่โปรแกรมจะเริ่มบันทึกค่า เพื่อถ้ามถึงช่องสัญญาณที่ต้องการบันทึก	148
ผง.6 หน้าต่างโปรแกรมขณะกำลังแสดงผลค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆขณะทดลอง	149

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	คือ พื้นที่ภาพถ่ายของวัตถุ (m^2)
D_a	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วแอโนด หรือเส้นผ่านศูนย์กลางของจานอะตอมไมเซอร์ (m)
C_d	คือสัมประสิทธิ์แรงจุดที่กระทำต่อละอองน้ำโลหะขนาดที่เคลื่อนที่ในอากาศ
d	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผงโลหะ (m)
d_{50}	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผงโลหะที่ 50% โดยน้ำหนักสะสม หรือขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ (m)
d_{84}	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผงโลหะที่ 84% โดยน้ำหนักสะสม (m)
f_d	คือ แรงจุดที่กระทำกับวัตถุที่ขวางการไหลของของเหลวที่มีความหนืด (N)
g	คือ ค่าความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ $9.81 \frac{m^2}{s}$
h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัสดุ ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$)
k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ($\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$)
L	คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว ($\frac{kJ}{kg}$)
m_d	คือ มวลของละอองน้ำโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d (kg)
Nu	คือ เลข Nusselt
P	คือ เส้นรอบรูปของอนุภาค (m)
P_a	คือ ค่ากำลังงานที่ใช้ในการผลิตผงโลหะ (W)
Pr	คือ เลข Prandtl
Q	คือ อัตราเร็วในการเทน้ำโลหะเชิงปริมาตร ($\frac{m^3}{s}$)
\dot{Q}_{ave}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของน้ำโลหะ ($\frac{kJ}{s}$)
Q_L	คือ ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง (J)

r	คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางงานอะตอมไมเซอร์ถึงตำแหน่งที่สนใจ (m)
R	คือ รัศมีของหัวแอโนดหรือของงานอะตอมไมเซอร์ (m)
\underline{R}	คือ เวกเตอร์แสดงตำแหน่งของน้ำโลหะบนงานอะตอมไมเซอร์ (m)
R_c	คือ รัศมีวิกฤติที่เกิดปรากฏการไหลอย่างไม่ต่อเนื่อง หรือ Hydraulic jump (m)
Re	คือ เลขเรย์โนลด์ส์สำหรับการไหลของของเหลว
S	คือ อัตราการเกิดพื้นที่ผลิตของอนุภาคที่มีรูปทรงกลม ($\frac{m^2}{s}$)
$SD_{\log-normal}$	คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายแบบ log-normal
SF	คือ ค่าความปลอดภัย
T	คือ อุณหภูมิใดๆ ($^{\circ}C$)
T_f	คือ ค่าอุณหภูมิขอบเขตเสมือนของการพาความร้อนจากวัตถุสู่ สิ่งแวดล้อม ($^{\circ}C$)
T_m	คือ ค่าอุณหภูมิน้ำโลหะ ณ เวลาใดๆ ($^{\circ}C$)
T_a	คือ ค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมหรืออุณหภูมิภายในถังอะตอมไม เซอร์ ($^{\circ}C$)
V_a	คือ ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุที่ขวางการไหล ($\frac{m}{s}$)
\underline{U}	เวกเตอร์ความเร็วของน้ำโลหะ ($\frac{m}{s}$)
\underline{U}_T	เวกเตอร์ความเร็วของน้ำโลหะในแนวเส้นสัมผัส ($\frac{m}{s}$)
\underline{U}_R	เวกเตอร์ความเร็วของน้ำโลหะในแนวรัศมี ($\frac{m}{s}$)
γ_a	น้ำหนักจำเพาะของอากาศ ($\frac{N}{m^3}$)
γ	คือ ความตึงผิว ($\frac{N}{m}$)
γ_m	คือ ความตึงผิวของน้ำโลหะ ($\frac{N}{m}$)
γ_{Sn}	คือ ความตึงผิวของน้ำโลหะดีบุก ($\frac{N}{m}$)
η	คือ ตัวประกอบประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการ อะตอมไมเซชัน มีค่าเท่ากับ 0.005 [Zhao, 2006]

ρ_a	คือ ความหนาแน่นของอากาศ ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)
ρ_{ato}	คือ ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปเป็นงานอะตอมไมเซอร์ ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)
ρ_m	คือ ความหนาแน่นของน้ำโลหะ ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)
ρ_{Sn}	คือ ความหนาแน่นของน้ำโลหะดีบุก ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)
μ	คือ ความหนืดของน้ำโลหะ (Pa·s หรือ $\frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}$)
σ_r	คือ ความเค้นดึงในแนวรัศมี (Pa)
σ_y	คือ ความเค้นครากของวัสดุ (Pa)
σ_0	คือ ความเค้นดึงในแนวเส้นสัมผัสวงกลม ($\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ หรือ Pa)
v_a	คือ ความหนืดของอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ ($\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$)
v_r	คือ ความหนืดของอากาศบริเวณรอบขอบเขตสมมติของการพาความร้อน จากวัสดุสู่บรรยากาศโดยรอบ ($\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$)
ω	คือ อัตราเร็วเชิงมุมของอิเล็กโทรดหรือของจานหรือถ้วยหมุน ($\frac{\text{rad}}{\text{s}}$)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าของไทยกำลังตื่นตัวในการใช้โลหะบัดกรีสูตรใหม่ที่ปราศจากสารตะกั่วมากขึ้น เนื่องจากประเทศคู่ค้าที่สำคัญของไทยหลายประเทศตระหนักถึงอันตรายของสารตะกั่วดังกล่าว ดังเช่น ประเทศสหรัฐอเมริกาและกลุ่มสหภาพยุโรปได้ออกกฎหมายเพื่อควบคุมการปนเปื้อนของสารเคมีอันตรายในสิ่งแวดล้อม 2 ข้อ คือ WEEE (Waste from Electrical and Electronics Equipment) และ RoHS (Restriction on Hazardous Substances) เป็นต้น [Abtew, 2000] ซึ่งอาจจะกระทบต่อการส่งออกของประเทศไทยอย่างมาก เนื่องจากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศ โดยในปี พ.ศ. 2550 มีมูลค่าการส่งออกสูงถึง 26,534 ล้านดอลลาร์สหรัฐ แยกเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ประกอบ มูลค่า 17,299.49 ล้านดอลลาร์สหรัฐ คิดเป็นสัดส่วน 11.37% ของมูลค่าสินค้าทั้งหมดและมีอัตราการขยายตัวเฉลี่ย 20.75% ต่อปี [กระทรวงพาณิชย์, 2553] เพื่อรักษาตลาดของผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้ไว้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนวัสดุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตทั้งหมดเพื่อให้สามารถผ่านข้อกำหนดดังกล่าว สาเหตุที่ต้องควบคุมการใช้โลหะบัดกรีในสินค้าอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้า เนื่องจากสินค้าเหล่านี้เมื่อเสื่อมสภาพแล้ว หากกำจัดอย่างไม่เหมาะสมเช่น ฝังกลบ หรือทิ้งลงแหล่งน้ำ มีโอกาสที่โลหะหนักจำพวกตะกั่วจะปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตเนื่องจากตะกั่วมีพิษต่อระบบประสาท ระบบต่อมไร้ท่อ ไต และระบบเลือด [Centers for Disease Control and Prevention, 2009]

สำหรับโลหะผสมสูตรใหม่ที่มีการวิจัยกันนั้นมีเป้าหมายเพื่อปรับปรุงสมบัติให้ใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีที่มีตะกั่วเป็นธาตุผสมสามารถนำไปใช้งานแทนกันได้ โลหะผสมระบบที่ได้รับความนิยมใช้มากระบบหนึ่งคือ Sn-Ag-Cu หรือ SAC เนื่องจากมีข้อได้เปรียบทางด้านสมบัติทางกลรวมถึงความสามารถในการบัดกรีที่ดี โดยสูตรที่นิยมใช้ ได้แก่ Sn-3.0Ag-0.5Cu หรือ SAC 305 เป็นต้น ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ศึกษาวิจัยโลหะผสมระบบดังกล่าวด้วยเช่นกัน โดยเป้าหมายของการวิจัยคือ การพัฒนาวัสดุผสมระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่มดังกล่าวกับท่อนาโนคาร์บอน (Carbon

nanotube-lead-free solder composite) และแปรรูปให้เป็นผงละเอียดด้วยวิธีอะตอมไมเซชันเพื่อให้สะดวกต่อการนำไปผลิตเป็นครีมบัดกรี เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของอุตสาหกรรมแผงวงจรไฟฟ้า ซึ่งปัจจุบันแผงวงจรไฟฟ้า และชิปต่างๆ มีขนาดเล็กลงมากจึงต้องการโลหะบัดกรีที่มีสมรรถนะสูง การเลือกใช้วิธีอะตอมไมเซชัน โดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงมาเป็นกระบวนการสำหรับแปรรูปวัสดุผสมดังกล่าวเพราะเป็นกระบวนการที่สามารถผลิตผงโลหะที่มีรูปทรงกลมสามารถควบคุมการปนเปื้อนและขนาดเฉลี่ยของผงโลหะได้โดยไม่ต้องใช้ก๊าซตัวกลางในการทำให้น้ำโลหะแตกเป็นละอองขนาดเล็ก (Droplets) รวมถึงให้ผลผลิต (Yield) สูง และมีการกระจายขนาดในช่วงที่แคบกว่าการอะตอมไมเซชันแบบอื่นๆ และค่าใช้จ่ายในการผลิตไม่สูงมากนัก [Dunkley and Aderhold, 2007] ดังนั้น การวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบเครื่องผลิตโลหะผงต้นแบบขึ้น เพื่อศึกษากระบวนการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วด้วยวิธีอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยง

1.2 ทฤษฎี

1.2.1 โลหะผสม

โลหะผสม หรือ อัลลอย (Alloy) คือ วัสดุที่เกิดจากการรวมกันของโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยโลหะผสมที่ได้จะมีสมบัติแตกต่างจากเดิม โลหะผสมมีองค์ประกอบดังนี้

- 1) โลหะพื้นฐาน (Base metal or matrix) คือ ธาตุที่มีปริมาณมากที่สุด มีหน้าที่เป็นตัวทำละลาย
- 2) ธาตุผสม (Alloying elements) คือ ธาตุที่เติมเข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของโลหะพื้นฐาน อาจจะเป็นโลหะหรือโลหะก็ได้
- 3) สิ่งเจือปน (Impurities) คือ ธาตุที่เจือปนอยู่ในโลหะพื้นฐานเนื่องจากไม่สามารถขจัดได้โดยขบวนการถลุง หรืออาจเป็นสารเติมเพื่อเพิ่มความสามารถในการไหล

โลหะผสมถ้าเกิดจากธาตุ 2 ชนิด เรียกว่า ไบนารีอัลลอย (Binary alloy) 3 ชนิด เรียกว่า เทอร์นารีอัลลอย (Ternary alloy) 4 ชนิด เรียกว่า ควอเทอร์นารีอัลลอย (Quaternary alloy) โดยการรวมกันของโลหะผสมจะแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้

- 1) ละลายเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ทั้งในสถานะของเหลวและของแข็ง เช่น ทองแดง-นิกเกิล เป็นต้น
- 2) ละลายเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์เฉพาะสถานะของเหลว และสามารถละลายได้บางส่วนเมื่อสถานะเป็นของแข็ง เช่น ดีบุก-ตะกั่ว และทองแดง-สังกะสี เป็นต้น

3) ละลายเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์เมื่ออยู่สถานะของเหลวเท่านั้น และละลายเข้ากันไม่ได้ถ้าอยู่ในสถานะของแข็ง เช่น อลูมิเนียม-ไทเทเนียม และเหล็ก-กำมะถัน เป็นต้น

สมบัติอย่างหนึ่งของโลหะผสมที่ต่างจากโลหะบริสุทธิ์คือ โลหะผสมหลายชนิดมีช่วงหลอมเหลวแทนที่จะมีจุดหลอมเหลวเพียงจุดเดียว โดยจะเป็นเฟสของของผสมระหว่างเฟสของแข็งและของเหลว อุณหภูมิที่โลหะผสมเริ่มหลอมเหลวเรียกว่า โซลิดัส (Solidus) และอุณหภูมิที่โลหะผสมหลอมเหลวหมดเรียกว่า ลิกวิดัส (Liquidus) แต่ก็สามารถผสมโลหะผสมเพื่อให้มีจุดหลอมเหลวเพียงจุดเดียวได้ ซึ่งเรียกโลหะผสมนี้ว่า ยูเทคติกมิกซ์เจอร์ (Eutectic mixture)

1.2.2 ผงโลหะ

วัสดุผง (Powder) คือ ของแข็งที่ผ่านกระบวนการแปรรูปเพื่อให้มีขนาดเล็กลง โดยต้องเล็กกว่าหรือเท่ากับ 1 mm วัสดุผงมีทั้งที่เป็นโลหะ โลหะผสม เซรามิก และพอลิเมอร์ ลักษณะเฉพาะของวัสดุผงคือ มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง และมีพฤติกรรมก้ำกึ่งระหว่างของแข็งกับของเหลว กล่าวคือสามารถไหลเข้าสู่ถังเก็บหรือช่องว่างภายในแบบหล่อได้ภายใต้อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงคล้ายกับของเหลว สามารถอัดได้เหมือนก๊าซแต่เมื่ออัดแล้วจะไม่สามารถคืนตัวได้ คล้ายกับการเสีรูปร่างถาวรของโลหะ ดังนั้นผงโลหะจึงง่ายต่อการขึ้นรูปโดยการอัด

1.2.3 กระบวนการผลิตผงโลหะ

กระบวนการผลิตผงโลหะสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทตามหลักการพื้นฐานการผลิตดังนี้

- กระบวนการการบดเชิงกล (Mechanical comminution)
- กระบวนการทางเคมี (Chemical reaction)
- กระบวนการทางไฟฟ้า (Electrolysis process)
- กระบวนการอะตอมไมเซชัน (Liquid metal atomization)

สำหรับงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการอะตอมไมเซชันเท่านั้น

1.2.4 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน

กระบวนการอะตอมไมเซชัน คือ การทำให้วัสดุคืบซึ่งอยู่ในรูปของเหลวแตกเป็นฝอยหรือละอองขนาดเล็ก (Droplets) วิธีนี้นิยมนำมาประยุกต์ใช้เพื่อผลิตผงโลหะ เนื่องจากสามารถ

ใช้ได้กับทั้งโลหะพื้นฐานและโลหะผสม สามารถควบคุมความบริสุทธิ์หรือองค์ประกอบโลหะของโลหะผสมได้ รูปทรงของผงโลหะค่อนข้างกลม และขนาดสม่ำเสมอหรือมีช่วงการกระจายขนาดแคบ ทำให้มีสมบัติในการอัดตัวที่ดี และสามารถประยุกต์ใช้กับกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน และการเคลือบผิวชิ้นงาน สำหรับดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันมีดังต่อไปนี้ [Dunkley, *et al.*, 2003]

1) สมรรถนะของเครื่องผลิตผงโลหะ

ส่วนใหญ่แล้วคุณภาพของผงโลหะมักถูกกำหนดโดยผู้ใช้ โดยผู้ผลิตมักให้ความสำคัญกับค่าใช้จ่ายและผลผลิต ซึ่งทั้ง 2 อย่างนี้จำเป็นต้องนำมาพิจารณาเพื่อเลือกใช้เครื่องจักร อุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงกรรมวิธีในการผลิตที่มีประสิทธิภาพสูง ความต้องการเหล่านี้ทำให้เกิดข้อกำหนดขึ้นหลายประการเพื่อเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของผงโลหะเช่น ปริมาณออกซิเจนที่ปนเปื้อน ขนาดและรูปทรง เป็นต้น และคุณภาพของการผลิต เช่น ความสิ้นเปลืองพลังงาน กำลังการผลิต และค่าใช้จ่ายในการผลิต ดังนั้นในการผลิตผงโลหะจึงต้องให้ความสำคัญกับพารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพก่อนเพื่อให้ได้ผลผลิตคุ้มกับค่าใช้จ่ายที่ลงทุนไป

2) การกระจายขนาดของผงโลหะ

โดยทั่วไปจะใช้กราฟการกระจายแบบล็อกปกติ (Log-normal) ถ้าใช้ข้อมูลแบบสะสมจะได้กราฟเป็นเส้นตรง หากมีการเบี่ยงเบนของเส้นกราฟจะบ่งบอกถึงข้อบกพร่องบางประการของกระบวนการผลิตผงโลหะนั้นได้ อย่างไรก็ตามการชักตัวอย่างต้องได้ตัวอย่างที่สามารถเป็นตัวแทนของผงโลหะทั้งหมดได้และต้องไม่มีการสูญเสียผงโลหะบางส่วนระหว่างกระบวนการเช่นผงขนาดเล็กมากมักติดจุดตันที่ตะแกรง หรือผงที่มีขนาดใหญ่ติดอยู่ในเครื่องผลิตผงโลหะ เป็นต้น ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผงโลหะ ($SD_{\log-normal}$) สามารถแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างขนาดของผงโลหะที่น้ำหนักสะสมร้อยละ 84 ต่อ ขนาดของผงโลหะที่น้ำหนักสะสมร้อยละ 50

3) รูปทรงของอนุภาค

สำหรับอนุภาคที่เป็นทรงกลมสามารถแยกแยะอย่างง่ายได้โดยเทียบอัตราส่วนระหว่างความยาวของอนุภาคและเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าไม่เกิน 1.1 ให้ถือว่าเป็นอนุภาคที่เป็นทรงกลม ในทางปฏิบัติมักใช้สมบัติของการบรรจุแน่น (Packing) ความหนาแน่น และการไหล เป็นดัชนีอ้างอิงมากกว่า

4) ความบริสุทธิ์

สาเหตุส่วนใหญ่ที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนมักมาจากออกซิเจนที่ละลายในเนื้อโลหะ

หรือเกิดออกไซด์ที่ผิวของผงโลหะ

5) สมบัติของโลหะ

สมบัติของโลหะ เช่น สี สมบัติแม่เหล็ก โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) เป็นต้น

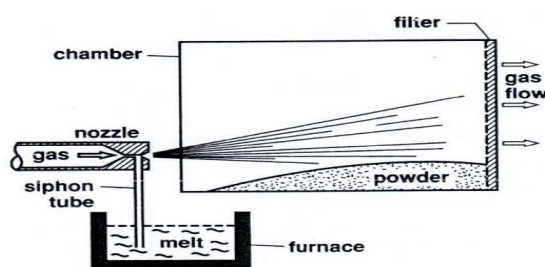
6) ผลผลิต (Yield)

ผลผลิต คืออัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักของผงโลหะซึ่งมีขนาดตรงกับความต้องการเทียบกับน้ำหนักของโลหะที่ใส่ในเตาหลอม

สมบัติเหล่านี้คือดัชนีชี้วัดคุณภาพของผงโลหะ และประสิทธิภาพของการอะตอมไมเซชัน ซึ่งยังมีดัชนีอื่นๆ ที่ใช้พิจารณาได้อีกเช่น กำลังการผลิต ความยืดหยุ่นของกระบวนการ และความทนทานของเครื่องจักรที่ใช้ผลิต

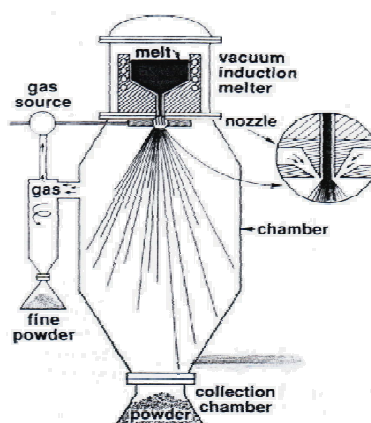
1.2.4.1 การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ

การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซคือ การใช้อากาศ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซฮีเลียม หรือก๊าซอาร์กอนเป็นตัวกลาง (Medium fluids) ทำให้น้ำโลหะแตกเป็นละอองละเอียด ตัวอย่างเครื่องก๊าซอะตอมไมเซชันอุณหภูมิต่ำแบบแวนอนแสดงในรูปที่ 1.1 มีหลักการทำงานโดยพ่นก๊าซออกทางหัวฉีดซึ่งต่ออยู่กับท่อที่จุ่มอยู่ในอ่างน้ำโลหะ ก๊าซที่มีความเร็วสูงจะมีความดันต่ำทำให้เกิดปรากฏการณ์กาลักน้ำ (Siphon) คุคน้ำโลหะขึ้นมาที่หัวฉีด จากนั้นน้ำโลหะถูกก๊าซความเร็วสูงพ่นใส่แตกเป็นละออง และแข็งตัวเป็นผงโลหะ สำหรับเครื่องก๊าซอะตอมไมเซชันแนวตั้งดังรูปที่ 1.2 น้ำโลหะจะถูกเทจากเตาแล้วใช้ก๊าซความเร็วสูงพ่นใส่ การอะตอมไมเซชันแบบนี้จำเป็นต้องมีแอร์ไชโคลนเพื่อแยกก๊าซออกไปใช้ใหม่ ขนาดของถังเก็บต้องใหญ่เพียงพอให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่สุดเย็นตัวก่อนจะกระทบผนังเพื่อป้องกันโลหะพอกที่ผนัง

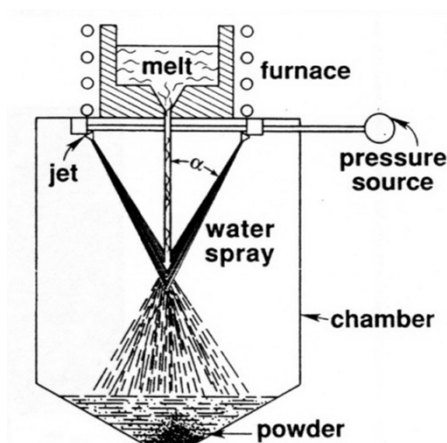


รูปที่ 1.1 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซในแวนอน
[German, 1994]

การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซหากใช้ก๊าซเฉื่อยจะช่วยป้องกันการปนเปื้อนได้เป็นอย่างดี รูปทรงของอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมและขนาดของผงโลหะมีการกระจายในช่วงที่แคบลง ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการนี้คือ ชนิดของก๊าซที่ใช้ อุณหภูมิหลอมเหลว และระดับของความหนืดของของไหลที่เข้าสู่หัวฉีด ชนิดของโลหะผสม อัตราเร็วในการเทน้ำโลหะ ความดันก๊าซ อัตราเร็วในการพ่นก๊าซ ลักษณะหัวฉีด และอุณหภูมิของก๊าซ



รูปที่ 1.2 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซในแนวตั้ง [German, 1994]



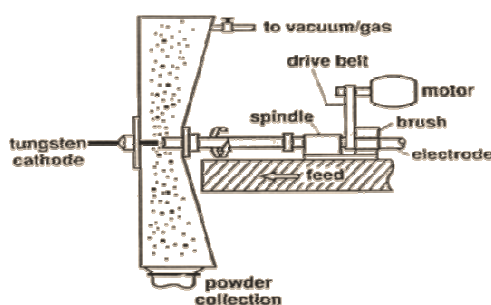
รูปที่ 1.3 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ [German, 1994]

1.2.4.2 การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ

กระบวนการผลิตผงโลหะด้วยวิธีนี้นิยมใช้กับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า 1,600°C โดยพ่นน้ำด้วยความเร็วสูงใส่ถ้าน้ำโลหะให้แตกเป็นละอองดังแสดงในรูปที่ 1.3 ละอองน้ำโลหะจะแข็งตัวอย่างรวดเร็วโดยถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ หลักการทำงานเหมือนกับการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ แตกต่างกันตรงที่การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำมีอัตราการเย็นตัวของผงโลหะสูงกว่าทำให้รูปทรงของอนุภาคที่ได้เป็นแบบไม่แน่นอน (Irregular) ผิวหยาบเพราะเกิดฟิล์มออกไซด์ที่ผิวของผงโลหะ แต่มีข้อดีคือมีโอกาสเกิดการแยกตัวขององค์ประกอบทางเคมีน้อย กระบวนการผลิตผงโลหะด้วยวิธีนี้หากใช้น้ำมันสังเคราะห์แทนน้ำจะช่วยลดปฏิกิริยาออกซิเดชันและช่วยควบคุมรูปร่างของผงโลหะได้อีกด้วย

1.2.4.3 การอะตอมไมเซชันโดยอาศัยแรงเหวี่ยง

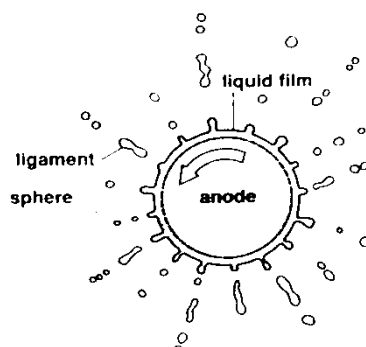
การอะตอมไมเซชันโดยอาศัยแรงเหวี่ยง คือการใช้แรงเหวี่ยงทำให้น้ำโลหะแตกเป็นละออง ละอองน้ำโลหะจะถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศจนแข็งตัวเป็นผงโลหะ ตัวอย่างเช่น กระบวนการหมุนขั้ว (Rotating electrode process) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 โดยนำแท่งโลหะที่ต้องการทำเป็นผงมาขึ้นรูปเป็นขั้วแอโนดและต่อกับต้นกำลังที่หมุนด้วยความเร็วสูง จากนั้นอาร์คด้วยพลาสมาหรือด้วยขั้วทั้งสแตน เพื่อให้ขั้วแอโนดหลอมละลาย แรงเหวี่ยงจะทำให้น้ำโลหะแตกเป็นละอองขนาดเล็ก จากนั้นแข็งตัวเป็นผงโลหะ



รูปที่ 1.4 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของกระบวนการหมุนขั้ว [German, 1994]

จากรูปที่ 1.5 น้ำโลหะถูกเหวี่ยงออกจากขั้วแอโนดที่หมุนด้วยความเร็วรอบสูง เมื่อพ้นออกจากขอบของขั้วแอโนดน้ำโลหะจะถูกเหวี่ยงออกจากกันกลายเป็นลิกาเมนต์ (Ligament)

จากนั้นจึงแตกตัวต่อเป็นหยดเล็กๆ และด้วยแรงตึงผิวของน้ำโลหะเอง ทำให้น้ำโลหะนั้นก่อตัวเป็นทรงกลม (Droplet) แล้วถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศแข็งตัวเป็นผงโลหะ



รูปที่ 1.5 รูปแบบการฟอร์มตัวของน้ำโลหะที่ขั้วแอโนด [German, 1994]

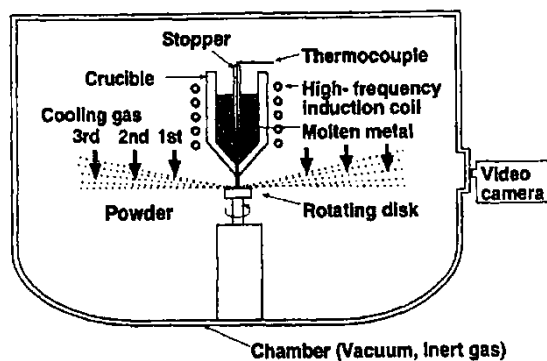
นอกจากรูปแบบที่กล่าวมาแล้วข้างต้นยังมีแบบที่ใช้จานอะตอมไมเซอร์ (Rotating disc) ที่หมุนความเร็วสูง (รูปที่ 1.6) หลักการทำงานคือ เทน้ำโลหะจากเตาพักน้ำโลหะให้ตกลงมากระทบกับจานอะตอมไมเซอร์ที่อยู่ด้านล่าง Miyasaka [Lawley, 2000; อ้างอิงจาก Miyasaka, 1974] ได้ศึกษาพฤติกรรมของน้ำโลหะบนจานอะตอมไมเซอร์ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์และแบ่งบริเวณที่น้ำโลหะกระทบจานอะตอมไมเซอร์เป็นบริเวณต่างๆ ดังนี้

1) Potential region คือ บริเวณที่น้ำโลหะตกกระทบจานอะตอมไมเซอร์ (จุดศูนย์กลางของจานอะตอมไมเซอร์) บริเวณนี้จะถือว่าน้ำโลหะเป็นของเหลวที่ไม่มีความหนืด และโมเมนต์ของน้ำโลหะถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจุดศูนย์กลางจานอะตอมไมเซอร์จึงเรียกว่าจุดหยุดนิ่ง (Stagnant point)

2) Jet boundary layer region คือ บริเวณที่ความหนาของแผ่นฟิล์มน้ำโลหะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของจานอะตอมไมเซอร์ (Radius distance) จนกระทั่งถึงระยะวิกฤติ (Critical radius) ความดันของน้ำโลหะจะเพิ่มตามระยะทางเช่นเดียวกับความหนาของน้ำโลหะ

3) Outer boundary layer region คือ บริเวณที่เลยระยะรัศมีวิกฤติไปจนกระทั่งถึงขอบของจานอะตอมไมเซอร์ เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับอิทธิพลของการกระแทกกันระหว่างน้ำโลหะและจานอะตอมไมเซอร์ ความหนาของฟิล์มน้ำโลหะจะขึ้นอยู่กับ แรงเหวี่ยง ความเฉื่อย และ ความหนืดของน้ำโลหะ บริเวณขอบจานอะตอมไมเซอร์ความตึงผิวของน้ำโลหะมีอิทธิพลต่อฟิล์มน้ำโลหะบริเวณนี้มาก

เมื่อน้ำโลหะหลุดจากขอบจานอะตอมไมเซอร์ไปแล้วจะแตกเป็นละอองละเอียด เช่นเดียวกับกระบวนการอะตอมไมเซชันข้างต้น ต่อจากนั้นจึงถ่ายเทความร้อนให้กับบรรยากาศเย็น ตัวกลายเป็นผงโลหะ



รูปที่ 1.6 การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซอร์ด้วยจานอะตอมไมเซอร์
[German, 1994]

การผลิตผงโลหะวิธีอาศัยแรงหมุนเหวี่ยงนี้สามารถผลิตผงโลหะที่กระจายขนาดในช่วงแคบกว่าการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำและก๊าซ (ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่า) ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ได้จากกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับค่าของความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์ รัศมีของอะตอมไมเซอร์และรูปทรง และอัตราเร็วในการเทน้ำโลหะ

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ น้ำ และแรงหมุนเหวี่ยง [Dunkley and Aderhold, 2007]

Process	Gas	Water	Centrifuge
Deviation of size	1.8-2.3	1.8-2.3	1.3-1.5
Production Yield	50-55%	50-55%	85-90%
Impurity	Moderate	high	Low
Particle morphology	Sphere and ligament	Irregular Shape	Sphere and ligament
Power consumption	~500kW	~50-100kW	5kW
Medium fluid	Air or inert gas	Water/Oils	No

จากสมมูลของความตึงผิวและแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นที่งานอะตอมไมเซอร์ ทำให้ได้สมการสำหรับประมาณขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ (d_{50}) ดังนี้ [German, 1994]

$$d_{50} = \sqrt{\frac{A\gamma}{\rho_m \omega^2 R}} \quad \dots 1.1$$

เมื่อ	γ	คือ ความตึงผิว ($\frac{N}{m}$)
	ρ_m	คือ ความหนาแน่นของน้ำโลหะ ($\frac{kg}{m^3}$)
	ω	คือ อัตราเร็วเชิงมุมของอิเล็กโทรดหรือของ งานถ้วยหมุน ($\frac{rad}{s}$)
	R	คือ รัศมีของขั้วแอโนดหรือของงานอะตอมไมเซอร์ (m)
	A	ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 6

รูปแบบการแตกตัวของฟิล์มน้ำโลหะของการอะตอมไมเซอร์โดยอาศัยแรงหมุนเหวี่ยง สามารถแบ่งเป็น 3 ลักษณะ (Mode หรือ Regime) คือ

- 1) การเกิดละอองน้ำโลหะขนาดเล็กโดยตรง (Direct droplet formation or DDF)
- 2) การเกิดเป็นลิแกเมนต์ (Ligament formation or LF)
- 3) การแตกตัวของแผ่นฟิล์ม (Liquid film disintegration or FD)

จากการศึกษาและวิจัยเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการแตกตัวเป็นละอองของฟิล์มน้ำโลหะภายใต้ปัจจัยทั้งจากภายนอกและจากสมบัติของน้ำโลหะเอง ซึ่งสามารถทำนายการเกิดลักษณะการแตกตัวของน้ำโลหะได้ด้วยอัตราส่วน X ซึ่งเสนอโดย Champagne และ Angers [Lawley, 2000; อ้างอิงจาก Champagne and Angers, 1981; Champagne and Anger, 1984] ดังแสดงในสมการที่ 1.2

$$X = \frac{\left(\frac{Q\omega^{0.60}}{D_a^{0.68}}\right)}{\left(\frac{\gamma^{0.88}}{\mu^{0.17} \rho_m^{0.71}}\right)} \quad \dots 1.2$$

เมื่อ	Q	คือ อัตราเร็วในการเทน้ำโลหะเชิงปริมาตร ($\frac{m^3}{s}$)
	D_a	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วแอโนด หรือเส้นผ่านศูนย์กลางของงานอะตอมไมเซอร์ (m)
	μ	คือ ความหนืดจลน์ของน้ำโลหะ (Pa·s)

จากสมการที่ 1.2 ตัวเศษของอัตราส่วนมีเฉพาะตัวแปรของกระบวนการเท่านั้น ส่วนตัวหารจะมีเฉพาะตัวแปรของสมบัติวัสดุเพียงอย่างเดียว สำหรับการแปรความหมายที่ได้จากการคำนวณคือ เมื่อ X มีค่าเท่ากับ 0.07 การแตกตัวจะเปลี่ยนจากระบบการเกิดละอองน้ำโลหะขนาดเล็ก

โดยตรง เป็นระบบการเกิดเป็นลิกาเมนต์ และเมื่อค่า X มีค่าเท่ากับ 1.33 ระบบการแตกตัวจะเปลี่ยนจากการเกิดเป็นลิกาเมนต์ไปเป็นระบบการแตกตัวของฟิล์มบาง

1.2.4.4 การอะตอมไมเซชันด้วยคลื่นความถี่สูง

คือการใช้อุปกรณ์กำเนิดคลื่นกลความถี่สูงส่งผ่านพลังงานจลน์ให้แก่ น้ำ โลหะที่ปกคลุมปลายอุปกรณ์นำคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic horn) จะก่อตัวเป็นคลื่นขนาดเล็กและเมื่อมีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะแรงตึงผิวของน้ำ โลหะน้ำ โลหะจะหลุดออกกลายเป็นละอองขนาดเล็ก และถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมจนกระทั่งแข็งตัวเป็นผงโลหะ กระบวนการนี้เหมาะกับการผลิตผงโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำและต้องการความบริสุทธิ์ของผงโลหะสูง ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของผงโลหะที่ผลิตด้วยกระบวนการนี้คือ ค่าความถี่และแอมพลิจูดของคลื่นเสียง อัตราเร็วในการเทน้ำโลหะ ลักษณะของปลายอุปกรณ์นำคลื่นความถี่สูง และบรรยากาศขณะผลิต

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tsakiroopoulos และ Li (2000) ศึกษาลักษณะการแตกตัวเป็นละอองของน้ำ โลหะที่ขอบจานอะตอมไมเซชันด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างน้ำ โลหะและจานอะตอมไมเซชันหลังจากที่น้ำ โลหะไหลผ่านรัศมีวิกฤติแล้ว และศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่และการถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศจนกระทั่งกลายเป็นของแข็งอย่างสมบูรณ์ พบว่าลักษณะการแตกตัวเป็นละอองน้ำ โลหะอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือ อัตราเร็วในการเทน้ำ โลหะบนจานอะตอมไมเซชัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซชัน สำหรับวิธีการเคลื่อนที่ของละอองน้ำ โลหะพบว่าความเร็วและอุณหภูมิของละอองน้ำ โลหะจะลดลงอันเป็นผลจากการสัมผัสระหว่างละอองน้ำ โลหะและสิ่งแวดล้อม

Ahmed และ Youssef (2001) ศึกษาอิทธิพลของรูปทรงของจานอะตอมไมเซชัน โดยใช้เครื่อง Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA) วัดค่าความเร็ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาแน่นของละอองน้ำ โลหะ พบว่าจานอะตอมไมเซชันทรงถ้วยจะให้ขนาดละอองน้ำ โลหะโดยเฉลี่ยเล็กกว่าของอะตอมไมเซชันทรงแบน

Xie, *et al.* (2004) ศึกษาอิทธิพลของจานอะตอมไมเซชันและปัจจัยต่างๆของกระบวนการผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน โดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงที่ส่งผลต่อรูปทรงและการกระจายขนาดของผงดิบ พบว่าการก่อตัวของโลหะบนจานอะตอมไมเซชัน (Skull

formation) และสมบัติการเปียกของน้ำโลหะบนงานอะตอมไมเซอร์ที่ไม่ดีเป็นเหตุทำให้การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันมีประสิทธิภาพต่ำ และได้สรุปผลการทดลองดังนี้

- (1) ผงโลหะดีบุกที่ผ่านกระบวนการผลิตภายใต้บรรยากาศปกติมีรูปร่างแบบไม่แน่นอนเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างน้ำโลหะกับออกซิเจน
- (2) ผงโลหะดีบุกที่เตรียมด้วยวิธีอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงจะมีการกระจายขนาดเป็นเส้นตรงเมื่อพล็อตด้วยกราฟชนิด Log-normal
- (3) ปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุกคือ อัตราเร็วเชิงมุมของงานอะตอมไมเซอร์และอัตราเร็วในการเทน้ำโลหะบนงานอะตอมไมเซอร์ โดยขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุกจะเล็กลงเมื่อเพิ่มอัตราเร็วเชิงมุมและลดอัตราเร็วในการเทน้ำโลหะ
- (4) ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุกเล็กลงเมื่อใช้งานอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วยแทนทรงแบน

Ho และ Zhao (2004) ศึกษาโลหะที่แข็งตัวบนงานอะตอมไมเซอร์ (Skull) โดยใช้โปรแกรม Flow-3D พบว่าก้อนโลหะเป็นเหตุให้งานอะตอมไมเซอร์สั้นสะเทือน โดยจะเกิดเมื่อเครื่องเพิ่งเริ่มทำงาน การก่อตัวของก้อนโลหะบนงานอะตอมไมเซอร์มีอัตราคงที่ก่อนเข้าสู่สภาวะการทำงานแบบคงที่ (Steady state) การก่อตัวของก้อนโลหะจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเทน้ำโลหะลงบนงานอะตอมไมเซอร์และเพิ่มอุณหภูมิเริ่มต้นของงานอะตอมไมเซอร์หรือเพิ่มอุณหภูมิเทน้ำโลหะ

Zhao (2004 A) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการก่อตัวเป็นฟิล์มบางของน้ำโลหะขณะที่อยู่บนงานอะตอมไมเซอร์ที่กำลังหมุนด้วยความเร็วสูง การจำลองแบบนี้ใช้สมมติฐานว่าน้ำโลหะจะก่อตัวเป็นฟิล์มอย่างสมบูรณ์บนงานอะตอมไมเซอร์โดยไม่มีการแตกเป็นละอองก่อนที่จะถึงขอบงานอะตอมไมเซอร์ (Premature disintegration of melt) แบบจำลองดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มน้ำโลหะกับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการต่อไปนี้ อัตราเร็วในการเทน้ำโลหะ ความเร็วรอบ ขนาดและรูปร่างของงานอะตอมไมเซอร์ นอกจากนี้ยังได้ประมาณค่าของวิธีการเคลื่อนที่ของละอองน้ำโลหะหลังจากแตกตัวที่ขอบงาน ความหนาของฟิล์มน้ำโลหะเป็นตัวแปรวิกฤติซึ่งสามารถบ่งบอกลักษณะของการแตกเป็นละอองของน้ำโลหะ ซึ่งค่าความหนาดังกล่าวจะลดลงเมื่ออัตราเร็วในการเทน้ำโลหะลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของงานอะตอมไมเซอร์ และรัศมีของงานอะตอมไมเซอร์เพิ่มขึ้น และเมื่อมุมชันของขอบงานอะตอมไมเซอร์ลดลง

Zhao (2004 B) ศึกษาพฤติกรรมของน้ำโลหะที่เกิดขึ้นขณะอยู่บนงานอะตอมไมเซอร์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการแตกตัวของฟิล์มน้ำโลหะก่อนถึงขอบงานอะตอมไมเซอร์ พบว่า “มุมเปียกจลน์” ของน้ำโลหะจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของน้ำโลหะมากขึ้น และเมื่อค่า

ดังกล่าวเท่ากับ “มูมเปียกวิกฤติ” แล้วน้ำโลหะจะแตกตัวด้วยลักษณะการเกิดลิแกนด์หรือการเกิดละอองขนาดเล็กทันทีแม้ว่าจะยังไม่ถึงขอบจางอะตอมไมเซอร์ก็ตาม ค่ามูมเปียกวิกฤติของระบบสามารถเพิ่มขึ้นเมื่อใช้จางอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วยแทนจางทรงแบน ขนาดเฉลี่ยของละอองน้ำโลหะเล็กลงเมื่อเพิ่มขนาดจางอะตอมไมเซอร์ แต่อย่างไรก็ดีการเพิ่มขนาดจางก็ไม่ได้ทำให้ละอองเล็กลงมากนักแต่กลับเพิ่มภาระให้กับมอเตอร์มากขึ้น และการเพิ่มมุมชันของขอบจางอะตอมไมเซอร์ เพิ่มความเร็วรอบ ลดอัตราเทน้ำโลหะ ทำให้ขนาดของละอองน้ำโลหะลดลงแต่ในทางกลับกันก็ทำให้เกิดการแตกตัวก่อนถึงขอบจางหมุนด้วยทำให้ประสิทธิภาพของการอะตอมไมเซอร์ลดลง

Ouyang (2005) ศึกษาพฤติกรรมการสั่นของจางอะตอมไมเซอร์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยสมมติให้จางอะตอมไมเซอร์คือแผ่นแบนที่ถูกกระตุ้นด้วยก้อนโลหะทำให้เกิดการสั่น ผลที่ได้คือ การสั่นของจางอะตอมไมเซอร์เกิดในช่วงความเร็วรอบที่กว้างโดยแปรผันโดยตรงกับเวลา ขนาดของการสั่นสะท้อนจะลดลงได้โดยการเพิ่มความเร็วรอบจางอะตอมไมเซอร์ หรือเพิ่มอัตราเร็วในการเทน้ำโลหะ การสั่นสะท้อนจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงจนกระทั่งอัตราเทน้ำโลหะคงที่

Teunou และ Poncelet (2005) ศึกษาวิธีการเคลื่อนที่ของละอองพาราฟินภายหลังจากแตกเป็นละอองที่ขอบจางหมุน โดยเก็บตัวอย่างผงพาราฟินที่ระยะต่างๆ ไปวิเคราะห์ขนาดเฉลี่ยและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในเบื้องต้นกำหนดให้ไม่มีการไหลที่ผิวของจางอะตอมไมเซอร์ ดังนั้นความเร็วที่ขณะหลุดออกจากขอบจางหมุนมีค่าเท่ากับความเร็วในแนวเส้นสัมผัส แต่ผลจากการคำนวณพบว่าระยะทางที่ละอองน้ำโลหะเคลื่อนที่ได้มีค่ามากกว่าผลการทดลองจึงได้ปรับปรุงแบบจำลองโดยคิดผลจากการไหลและความเร็วในแนวรัศมีทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้น

Zhao (2006) รายงานการออกแบบสร้างจางอะตอมไมเซอร์ได้แนะนำการเลือกชนิดและความเร็วรอบมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ขับจางอะตอมไมเซอร์ สำหรับการออกแบบจางอะตอมไมเซอร์สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและรูปทรงที่เหมาะสม ความแข็งแรงและความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำงาน และพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้สมการการคำนวณในการออกแบบจางอะตอมไมเซอร์ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 2

Sheikhalieva, *et al.* (2008) ศึกษาผลของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศระหว่างผลิตผงโลหะอลูมิเนียมด้วยวิธีอะตอมไมเซอร์แบบอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยง พบว่าเมื่อความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนลดลงขนาดเฉลี่ย ค่าความแปรปรวนของการกระจายขนาด

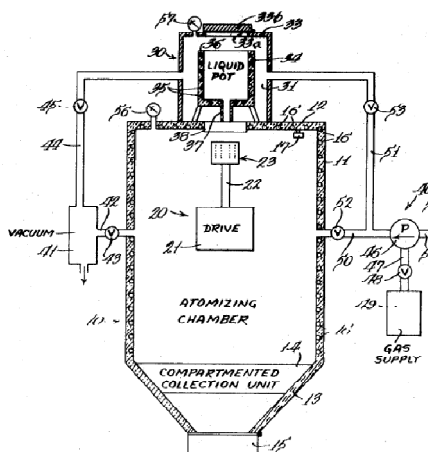
และความหนาแน่นปรากฏมีแนวโน้มลดลง โดยความตึงผิวของน้ำโลหะอลูมิเนียมจะลดลงจาก 1.1 N/m ภายใต้บรรยากาศปกติเป็น 0.825 N/m เมื่อผลิตภายใต้บรรยากาศในโตรเจน ส่งผลให้ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะลดลงจาก 450 μm เป็น 250 μm เมื่อค่าพารามิเตอร์อื่นถูกควบคุมให้เหมือนกัน แต่อย่างไรก็ดีจากสมการที่ 1.1 พบว่าขนาดเฉลี่ยของผงโลหะอลูมิเนียมไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความตึงผิวเพียงอย่างเดียว และพบว่าค่าคงที่ A ในสมการที่ 1.1 สำหรับการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 13 ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะมีการไหลของน้ำโลหะบนผิวงานอะตอมไมเซอร์และความหนาของฟิล์มอลูมินาที่เกิดขึ้น ซึ่งฟิล์มดังกล่าวนอกจากจะกระทบต่อขนาดเฉลี่ยแล้วยังมีผลต่อรูปร่างของผงโลหะอีกด้วย โดยอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคผงโลหะมีค่าระหว่าง 30-50 เมื่อผลิตภายใต้บรรยากาศปกติ และลดลงเหลือ 5-10 เมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนเหลือน้อยกว่า 0.5 vol.%

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่าการผลิตผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซอร์ด้วยแรงหมุนเหวี่ยงยังคงเป็นกระบวนการที่ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีข้อดีหลายประการเช่น ให้กำลังการผลิตที่ค่อนข้างสูง สามารถประยุกต์ใช้กับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างแบบวงแหวน ให้ผงโลหะที่มีรูปร่างกลม เป็นต้น โดยการศึกษาส่วนใหญ่เป็นการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปรากฏการณ์บนงานอะตอมไมเซอร์ซึ่งมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการอะตอมไมเซอร์ด้วยแรงหมุนเหวี่ยงโดยตรง ซึ่งผลจากการจำลองแบบช่วยให้เข้าใจปรากฏการณ์จริงที่เกิดขึ้นในขณะทดลองผลิตผงโลหะมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการกับสมบัติของผงโลหะที่ผลิตได้ย่อมมีค่าที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสมบัติของน้ำโลหะที่ต้องการผลิตเป็นผงละเอียด ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาถึงอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการต่อไปนี้ ความเร็วรอบของงานอะตอมไมเซอร์ อัตราเร็วในการป้อนน้ำโลหะ รูปร่างและขนาดงานอะตอมไมเซอร์ และปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศขณะผลิตผงโลหะ ต่อสมบัติของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 โดยสมบัติพื้นฐานของผงโลหะที่สนใจศึกษามีดังนี้ ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะและลักษณะการกระจายขนาดของผงโลหะ ปริมาณออกซิเจนที่ผิวของผงโลหะ และรูปร่างของผงโลหะ

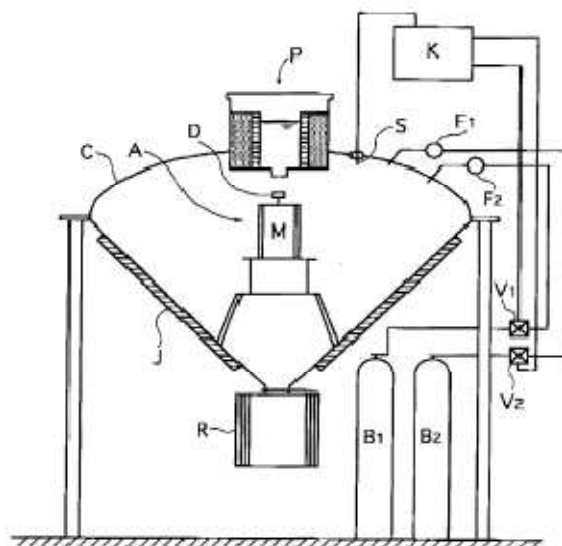
1.4 การสืบค้นฐานข้อมูลสิทธิบัตร

Klahphaak และ Barnes (1973) จัดสิทธิบัตรกระบวนการผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซอร์แบบอาศัยแรงเหวี่ยงดังแสดงในรูปที่ 1.7 งานอะตอมไมเซอร์ที่ใช้มีรูปร่างด้วยผนังด้านข้างของมีรูเล็กๆ ให้น้ำโลหะไหลออกเมื่อหมุนด้วยความเร็วสูง บรรยากาศภายในถังเป็นก๊าซ

ควบคุมที่รักษาอุณหภูมิและอัตราส่วนระหว่างความหนืดต่อความหนาแน่นของก๊าซคงที่ พบว่าหากความดันบรรยากาศในถังอะตอมไมเซอร์เพิ่มจะทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลง



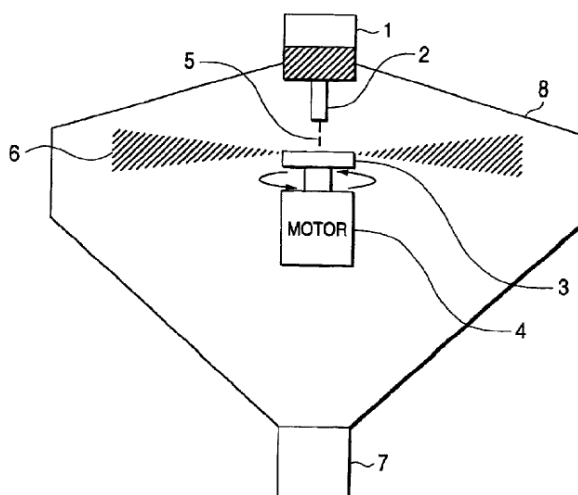
รูปที่ 1.7 เครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซอร์แบบอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงของ Klahphaak และ Barnes ตามสิทธิบัตร U.S.Pat. 3,720,737 [Klahphaak and Barnes, 1973]



รูปที่ 1.8 เครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซอร์แบบอาศัยแรงหมุนเหวี่ยงตามสิทธิบัตร U.S.Pat.5917113 [Suzuki, 1999]

Suzuki (1999) จดสิทธิบัตรกระบวนการผลิตผงโลหะที่มีอนุภาคเป็นแบบทรงกลมด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยแรงเหวี่ยงดังแสดงในรูปที่ 1.8 บรรยากาศภายในถังถูกควบคุมให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนอยู่ในช่วง 3-600 ppm โดยน้ำหนักเพื่อควบคุมการออกซิเดชันที่ผิวของละอองน้ำโลหะ เนื่องจากถ้าออกซิเจนมีความเข้มข้นน้อยกว่า 3 ppm การออกซิเดชันจะเกิดน้อยมาก โดยถ้าละอองน้ำโลหะยังไม่กลายเป็นของแข็งอย่างสมบูรณ์ก่อนชนเข้ากับผนังเครื่องก็จะเกิดการฟอกหรือหากชนเข้ากับอนุภาคอื่นๆ จะทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อน (Agglomeration) เป็นผลให้อนุภาคผงโลหะไม่เป็นทรงกลม ในทางกลับกันหากความเข้มข้นของออกซิเจนมากกว่า 600 ppm ฟิล์มออกไซด์ก็จะเกิดมากทำให้คุณภาพของผงโลหะด้อยลงไม่เหมาะที่จะนำไปทำครีมบัดกรีหรือผสมในสี บรรยากาศที่เหมาะสมต่อการผลิตผงโลหะด้วยการอะตอมไมเซชันวิธีนี้ต้องมีความเข้มข้นของออกซิเจนในช่วง 20-500 ppm อุณหภูมิภายในถังควรรักษาไว้ที่ 25-30°C ด้วยการทำถังแบบที่มีเปลือก 2 ชั้นสำหรับเป็นน้ำช่องทางไหลของน้ำเพื่อการหล่อเย็นถึง ความเร็วรอบที่ใช้ในการผลิตอยู่ในช่วง 25,000-120,000 rpm เพื่อให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก

Konishi (2004) จดสิทธิบัตรเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันด้วยแรงเหวี่ยงสำหรับผลิตผงวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกดังแสดงในรูปที่ 1.9 ส่วนประกอบหลักของเครื่องคือจานอะตอมไมเซอร์ที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบกะทันหันได้ (Thermal shock resistance) ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะ และสามารถใช้ที่ความเร็วรอบสูงโดยไม่เสียรูป เตาหลอมสำหรับเตรียมน้ำโลหะ และท่อทางเดินน้ำโลหะ จานอะตอมไมเซอร์ทำจากซิลิกอนไนไตรด์



รูปที่ 1.9 เครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันตามสิทธิบัตร

U.S.Pat.6808677 B2 [Konishi, 2004]

จากการสืบค้นฐานข้อมูลสิทธิบัตรพบว่าบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์มีอิทธิพลต่อรูปทรงและปริมาณออกซิเจนที่ผิวของผงโลหะเป็นอย่างมาก ดังนั้นถังอะตอมไมเซอร์จึงต้องออกแบบให้สามารถทนต่อความดันที่ต่างกันระหว่างภายนอกถึงกับภายในถังได้ในขณะทำการดูดอากาศออกและเติมก๊าซไนโตรเจนเข้าในถังเพื่อปรับปริมาณออกซิเจน สำหรับการออกแบบถังอะตอมไมเซอร์นั้นต้องออกแบบให้มีขนาดโตเพียงพอที่ละอองน้ำโลหะจะแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ก่อนชนกับผนังของถังอะตอมไมเซอร์ โดยในการออกแบบเครื่องผลิตผงโลหะในการวิจัยครั้งนี้จะตัดระบบหล่อเย็นถังอะตอมไมเซอร์เนื่องจากการทดลองแต่ละครั้งใช้น้ำโลหะในปริมาณน้อยจึงไม่ทำให้บรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์เปลี่ยนแปลงมากนัก

1.5 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.5.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

1.5.2 เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วด้วยวิธีอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยง ดังต่อไปนี้

- ความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์
- อัตราเทน้ำโลหะลงบนจานอะตอมไมเซอร์
- รูปทรงของจานอะตอมไมเซอร์
- ปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศขณะผลิตผงโลหะ

1.5.3 เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้ดังนี้

- ขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
- ปริมาณของออกซิเจนของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
- รูปทรงของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้เครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในระดับห้องปฏิบัติการ โดยสามารถผลิตผงโลหะที่มีขนาดในช่วง $-45+25 \mu\text{m}$ และรูปทรงของผงโลหะมีลักษณะเป็นทรงกลม

1.6.2 ได้องค์ความรู้ในการสร้างเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันแบบอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยง

1.6.3 ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยง

1.7 ขอบเขตการวิจัย

1.7.1 ศึกษาการอะตอมไมเซชันด้วยแรงเหวี่ยงเบื้องต้นเพื่อสรุปแนวทางในการออกแบบเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันแบบอาศัยแรงเหวี่ยงขนาดห้องปฏิบัติการ

1.7.2 ออกแบบและสร้างชุดทดสอบการอะตอมไมเซชันด้วยแรงเหวี่ยง เพื่อทดสอบหาขนาดถังของเครื่องผลิตผงโลหะที่เหมาะสมแล้วนำผลการทดสอบเบื้องต้นที่ได้ไปใช้ในการออกแบบเครื่องระดับห้องปฏิบัติการ โดยการออกแบบจะคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการสร้างภายใต้งบประมาณที่จำกัด

1.7.3 สร้างเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซอร์แบบอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยง และทดสอบการทำงานของเครื่องโดยทดลองผลิตผงดีบุก ศึกษาการกระจายขนาดของผงดีบุกและรูปร่างของผงที่ผลิตได้จากเครื่อง

1.7.4 ทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 ในการทดลองผลิตผงโลหะจะทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการอะตอมไมเซชัน เช่น ความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและรูปทรงของจานอะตอมไมเซอร์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูทางออกของหัวฉีดน้ำโลหะ (อัตราเทน้ำโลหะ) ซึ่งเป็นค่าตัวแปรที่มีผลต่อขนาดของผงโลหะที่ได้

1.8 สถานที่ทำวิจัย

1.8.1 ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1.8.2 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

2.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีการวิจัยซึ่งประกอบด้วยเนื้อหาหลัก 2 ส่วน เนื้อหาส่วนแรกได้แก่การออกแบบสร้างเครื่องผลิตผงโลหะ การสร้างชุดทดสอบผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน โดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเบื้องต้นและเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน โดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยง เนื้อหาส่วนที่สองจะกล่าวถึงวิธีทดลองซึ่งประกอบด้วย วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดสอบผลิตผงโลหะ ขั้นตอนการทดสอบผลิตผงโลหะดิบเบื้องต้น ขั้นตอนการทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว วิธีวิเคราะห์สมบัติกายภาพและเคมี ได้แก่ การวิเคราะห์ขนาดด้วยตะแกรง การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายขนาดของผงโลหะ การวิเคราะห์รูปทรงของผงโลหะ และการวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนของผงโลหะที่ผลิตได้

2.2 การออกแบบและสร้างเครื่องผลิตผงโลหะ

ในหัวข้อนี้กล่าวถึง การออกแบบสร้างเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน โดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงหรือเครื่องผลิตผงโลหะ เริ่มตั้งแต่การคำนวณออกแบบเบื้องต้น (Preliminary design) ส่วนประกอบของชุดทดลองผลิตผงเบื้องต้นเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองอะตอมไมเซชันและผลจากการคำนวณ และส่วนประกอบเครื่องผลิตผงโลหะต้นแบบที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ศึกษาการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

2.2.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบเครื่องผลิตผงโลหะ

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าแม้จะมีผู้ศึกษาการผลิตผงโลหะชนิดต่างๆ ด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน โดยอาศัยหลักการดังกล่าวอยู่มากก็ตาม แต่ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในเชิงของกระบวนการผลิตรวมถึงปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของผงโลหะที่ผลิตได้ แต่สำหรับการออกแบบเครื่องผลิตผงโลหะกลับถูกกล่าวถึงน้อยมาก เนื่องจากการออกแบบและสร้างเครื่องมือ อุปกรณ์ เป็นองค์ความรู้ที่มีคุณค่าทางพาณิชย์จึงมักไม่เป็นที่เปิดเผยถึงรายละเอียดในการออกแบบมากนัก

Zhao (2006) ได้เสนอบทความเรื่อง “Consideration in Design a Centrifugal Atomizer for Metal Powder Production” ซึ่งกล่าวถึงสิ่งที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบเครื่องผลิตผงโลหะแบบอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยง พร้อมทั้งได้แสดงสมการสำหรับคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญไว้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จะใช้แนวทางที่กล่าวไว้ในบทความข้างต้นสำหรับออกแบบเครื่องผลิตผงโลหะ

2.2.1.1 กำลังของมอเตอร์

ในกระบวนการอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงนั้น กำลังของมอเตอร์จะทำให้เกิดการแตกเป็นละอองของน้ำโลหะซึ่งถือเป็นการสร้างพื้นที่ผิวใหม่ให้กับน้ำโลหะ โดยอัตราการสร้างพื้นที่ผิวใหม่ของน้ำโลหะต่อหน่วยเวลา (S) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S = \frac{6Q}{d_{50}} \quad \dots 2.1$$

เมื่อกำหนดให้ ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ (d_{50}) ที่ต้องการคือ 20 μm
 อัตราการไหลของน้ำโลหะ (Q) เท่ากับ 0.5 kg/min ($1.2 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$)

แทนค่าจะได้

$$S = \frac{6(1.2 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}})}{(20 \text{ microns})} = 3.6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

และกำลังของมอเตอร์ที่ใช้ในการอะตอมไมเซชัน (P_a) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_a = \frac{\gamma_m S}{\eta} \quad \dots 2.2$$

เมื่อ γ_m คือ ความตึงผิวของน้ำโลหะ ($\frac{\text{N}}{\text{m}}$)

η คือ ตัวประกอบประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอะตอมไมเซชัน มีค่าเท่ากับ 0.005

เมื่อกำหนดให้ โลหะที่ใช้ในการคำนวณคือ โลหะดีบุกซึ่งมีสมบัติดังต่อไปนี้

อุณหภูมิหลอมเหลว	232 $^{\circ}\text{C}$
ความหนาแน่น	6,970 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
ความหนืดจลน์ของน้ำโลหะ	0.00197 Pa·s
ความตึงผิว	0.57 $\frac{\text{N}}{\text{m}}$

ความจุความร้อนจำเพาะ	0.228	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว	59	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

แทนค่าได้

$$P_a = \frac{(0.57 \frac{\text{N}}{\text{m}})(3.6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}})}{0.005} = 410.4 \text{ W}$$

ค่ากำลังที่คำนวณได้เป็นกำลังที่ใช้ในการผลิตผงโลหะดิบเท่านั้น ยังไม่รวมกำลังในการขับเคลื่อนอะตอมไมเซอร์ และประสิทธิภาพของมอเตอร์

2.2.1.2 งานอะตอมไมเซอร์

งานอะตอมไมเซอร์คืออุปกรณ์สำคัญทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานจลน์จากมอเตอร์ไปยังน้ำโลหะ ทำให้น้ำโลหะแตกเป็นละอองเล็กๆ นับเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญที่สุดของเครื่องผลิตผงโลหะเลยก็ว่าได้ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีนักวิจัยหลายท่านได้พยายามศึกษาถึงอิทธิพลของรูปทรงงานอะตอมไมเซอร์ต่อคุณลักษณะของละอองน้ำโลหะ งานอะตอมไมเซอร์นั้นสามารถออกแบบได้หลากหลายรูปแบบเพื่อให้น้ำโลหะสามารถเกิดเป็นฟิล์มบางบนผิวงานอย่างทั่วถึงและแตกเป็นละอองที่ขอบงานอะตอมไมเซอร์ได้อย่างสมบูรณ์ สำหรับการคำนวณเบื้องต้นถือว่างานอะตอมไมเซอร์มีลักษณะเป็นทรงแบน ค่ารัศมีของงานที่เหมาะสมสำหรับใช้ผลิตผงโลหะให้มีขนาดเฉลี่ย 20 μm ด้วยความเร็วรอบ 20,000 rpm คำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$R = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2P_a}{\rho_m Q}} \quad \dots\dots 2.3$$

เมื่อ ρ_m คือ ความหนาแน่นของน้ำโลหะ ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)

แทนค่าได้

$$R = \frac{1}{2,094 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} \sqrt{\frac{2(410.4 \text{ W})}{(6,970 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(12 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}})}} = 4.7 \text{ cm}$$

การออกแบบงานอะตอมไมเซอร์มีเงื่อนไขที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึง 2 ประการด้วยกันคือ ความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ทำงานอะตอมไมเซอร์ และค่ารัศมีวิกฤติ การพิจารณาเลือกใช้วัสดุเพื่อทำงานอะตอมไมเซอร์สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอย่างมากคือความแข็งแรงของวัสดุเนื่องจากงานอะตอมไมเซอร์ต้องหมุนด้วยความเร็วสูงซึ่งทำให้เกิดความเค้นดึงทั้งในแนวเส้นสัมผัส (σ_r) และแนวรัศมี (σ_θ) สูงมาก โดยความเค้นดึงที่เกิดขึ้นแสดงด้วยสมการต่อไปนี้

แนวรัศมี

$$\sigma_r(r) = \frac{1}{2} \rho_{\text{ato}} \omega^2 (R^2 - r^2) \quad \dots\dots 2.4$$

$$\text{แนวเส้นสัมผัส } \sigma_\theta(r) = \rho_{\text{ato}} \omega^2 r^2 \quad \dots\dots 2.5$$

เมื่อ r คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางงานอะตอมไมเซอร์ถึงตำแหน่งที่สนใจ (m)

ρ_{ato} คือ ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ทำงานอะตอมไมเซอร์ ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)

พิจารณาสมการที่ 1.6 และ 1.7 พบว่าค่าความเค้นในแนวรัศมีจะมีค่าสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของงานอะตอมไมเซอร์และลดลงเรื่อยๆ ตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลางงานอะตอมไมเซอร์ที่เพิ่มจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์เมื่อถึงขอบงานอะตอมไมเซอร์ ในทางกลับกันความเค้นดึงในแนวเส้นสัมผัสจะมีค่าต่ำสุดที่จุดศูนย์กลางงานอะตอมไมเซอร์และเพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของงานอะตอมไมเซอร์เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของความเค้นทั้งสองพบว่าความเค้นในแนวรัศมีมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของความเค้นในแนวเส้นสัมผัสเท่านั้น ดังนั้นเงื่อนไขในการใช้เลือกวัสดุมีดังนี้

$$\sigma_\theta|_{r=R} \leq \frac{\sigma_y}{\text{SF}} \quad \dots\dots 2.6$$

เมื่อ σ_y คือ ค่าความเค้นครากของวัสดุ (Pa)

SF คือ ค่าความปลอดภัย

รัศมีสูงสุดสำหรับวัสดุแต่ละชนิดสามารถทนต่อความเค้นที่เกิดขึ้น ได้คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_{\text{max}} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{\sigma_y}{\text{SF} \cdot \rho_{\text{ato}}}} \quad \dots\dots 2.7$$

เมื่อกำหนดค่า SF มีค่าไม่น้อยกว่า 2 วัสดุที่ใช้ทำงานอะตอมไมเซอร์คือเหล็กเหนียวซึ่งสมมติมีค่าความเค้นครากเท่ากับ 250 MPa และมีความหนาแน่น 7860 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ จะได้ค่า

$$R_{\text{max}} = \frac{1}{2,094 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} \sqrt{\frac{250 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{2(7,860 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}} = 0.06 \text{ m หรือ } 6 \text{ cm}$$

ปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างคือ การไหลอย่างไม่ต่อเนื่องบนงานอะตอมไมเซอร์ (Hydraulic jump) คือ การขาดความต่อเนื่องของการไหลแบบวงกลมของน้ำโลหะบนงานอะตอมไมเซอร์ เนื่องจากความหนาของชั้นน้ำโลหะมากขึ้นในขณะที่ความเร็วในแนวเส้นรัศมีกลับมีค่าต่ำ ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิต่อปรากฏการณ์นี้คือ ความต่อเนื่องและอัตราเร็วในการเทน้ำโลหะบนงานอะตอมไมเซอร์ การไหลของน้ำโลหะภายหลังจากรัศมีวิกฤติ (R_c) จะอยู่ภายใต้อิทธิพลของงานอะตอมไมเซอร์และไม่ได้รับผลกระทบใดๆ จากการเทน้ำโลหะที่ไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นสำหรับการออกแบบงานอะตอมไมเซอร์ควรกำหนดให้งานอะตอมไมเซอร์มีขนาดโตกว่าค่ารัศมีวิกฤติซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$R_c = 0.55 \left(\frac{\rho_m Q^2}{\mu \omega} \right) \quad \dots 2.8$$

แทนค่าในสมการที่ 2.8 ได้

$$R_c = 0.55 \frac{\left(6,970 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(1.2 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)^2}{\left(0.00197 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right) \left(2,094 \frac{\text{rad}}{\text{m}^3} \right)} = 0.001 \text{ m}$$

การไหลของน้ำโลหะบนจานอะตอมไมเซอร์ชนิดจานแบน โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะแตกตัวเป็นละอองหรือเป็นลิแกเมนต์ก่อนที่จะถึงขอบจานอะตอมไมเซอร์เมื่อความหนาของฟิล์มน้ำโลหะบางมากพอ ดังนั้นเพื่อให้ น้ำ โลหะแตกตัวเป็นละอองที่ขอบจานอะตอมไมเซอร์จึงจำเป็นต้องเพิ่มผนังที่ขอบจานอะตอมไมเซอร์ ผนังดังกล่าวช่วยเพิ่มความดันให้กับน้ำ โลหะไม่ให้แตกตัวก่อนไปถึงขอบจานอะตอมไมเซอร์ โดยผนังนี้จะต้องทำมุมกับระนาบจานอะตอมไมเซอร์มุมดังกล่าวจะมีขนาดโตเพียงไรนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติการเปียกของน้ำ โลหะบนจานอะตอมไมเซอร์ กล่าวคือถ้า น้ำ โลหะมีสมบัติการเปียกที่ดีอยู่แล้ว ผนังนั้นก็ไม่ต้องมีมุมชันมากนัก ในทางกลับกันหากน้ำ โลหะมีสมบัติการเปียกที่ไม่ดีนักผนังของจานอะตอม ไมเซอร์ก็จำเป็นต้องมีมุมที่ชันมากเพื่อช่วยให้น้ำ โลหะสามารถแตกตัวที่ขอบจานอะตอมไมเซอร์ได้ ซึ่งจากการทดลอง Xie, *et al.* (2004) พบว่ามุมชันที่ช่วยให้ผนังมีขนาดเล็กลงควรอยู่ในช่วง 60°-70°

2.2.1.3 ถังอะตอมไมเซอร์ (Atomization chamber)

ในการออกแบบเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซอร์แบบอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงขนาดของถังอะตอมไมเซอร์ต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอให้ละอองน้ำ โลหะมีเวลาสำหรับถ่ายเทความร้อนให้กับบรรยากาศและแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ก่อนชนผนังของถัง จากการคำนวณตัวแปรข้างต้นสามารถคำนวณเพื่อประมาณขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำ โลหะย้อนกลับด้วยสมการที่ 1.1 ได้ดังนี้

$$d_{50} = \sqrt{\frac{6(0.57 \frac{\text{N}}{\text{m}})}{\left(6,970 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (0.047 \text{ m}) \left(2,094 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)^2}}$$

$$d_{50} = 70.4 \mu\text{m}$$

กำหนดให้ขนาดที่ 84 wt % เป็นขนาดโตสุดของหยดน้ำ โลหะ จากการกระจายขนาดของผงโลหะแบบล็อกปกติและสำหรับการผลิตผงโลหะ โดยวิธีอะตอมไมเซอร์ด้วยแรง

เหลี่ยมมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($SD_{\log\text{-normal}}$) ในช่วง 1.3-1.5 [Dunkley and Aderhold, 2007] สามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคที่ 84 wt% (d_{84}) จากสมการดังต่อไปนี้ [German, 1994]

$$SD_{\log\text{-normal}} = \frac{d_{84}}{d_{50}} \quad \dots\dots 2.9$$

แทนค่าจะได้ $d_{84} = (70.4 \mu\text{m})(1.5) = 105.6 \mu\text{m}$

การคำนวณหาระยะทางที่ละอองน้ำโลหะต้องใช้ในการเย็นตัวเพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งอย่างสมบูรณ์สามารถประมาณได้ด้วยแบบจำลองการเคลื่อนที่แบบวิถีโค้งอย่างง่ายของอนุภาคเดี่ยว (Simple projectile motion of a single particle) อย่างไรก็ตามการคำนวณได้จะต่ำกว่าความเป็นจริงเนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวไม่ได้คำนึงถึงอิทธิพลแรงจุดเนื่องจากความหนืดของอากาศ ซึ่งมีผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็กลง

ความเร็วของฟิล์มน้ำโลหะบนจานอะตอมไมเซอร์มีอยู่ 2 องค์ประกอบคือความเร็วในแนวเส้นรอบวง (Peripheral speed or circumferential speed) และความเร็วในแนวรัศมี (Radial speed or azimuthal speed) แต่เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาความเร็วของละอองน้ำโลหะที่ขอบจานอะตอมไมเซอร์สามารถสมมติความเร็วสูงสุดของฟิล์มน้ำโลหะที่ขอบของจานอะตอมไมเซอร์มีค่าสูงสุดเท่ากับความเร็วในแนวรัศมี [Zhao, 2006] ซึ่งโดยปกติความเร็วในแนวเส้นสัมผัสจะมีค่าน้อยกว่าความเร็วในแนวรัศมีเนื่องจากเกิดการไถลขึ้น (Slippage) โดยขนาดของการไถลขึ้นอยู่กับรูปทรงของจานอะตอมไมเซอร์และความเร็วเชิงมุม อัตราการไหลของน้ำโลหะ และสมบัติการเปียกของน้ำโลหะบนวัสดุที่ใช้ทำจานอะตอมไมเซอร์ ซึ่งสำหรับการออกแบบเบื้องต้นนั้นไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงเพราะว่าสิ่งที่ต้องการจริงก็คือความเร็วสูงสุดที่จะเกิดขึ้นเมื่อน้ำโลหะแตกตัวเป็นละออง ดังนั้นความเร็วเริ่มต้นของละอองน้ำโลหะภายหลังจากแตกตัวเป็นละอองที่ขอบจานอะตอมไมเซอร์สามารถพิจารณาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\underline{U} = \underline{U}_T + \underline{U}_R = \omega \underline{R} \quad \dots\dots 2.10$$

เมื่อ \underline{U} เวกเตอร์ความเร็วของน้ำโลหะ ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)

\underline{U}_T เวกเตอร์ความเร็วของน้ำโลหะในแนวเส้นสัมผัส ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$) ซึ่งมีค่าเป็นศูนย์

\underline{U}_R เวกเตอร์ความเร็วของน้ำโลหะในแนวรัศมี ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)

\underline{R} คือ เวกเตอร์แสดงตำแหน่งของน้ำโลหะบนจานอะตอมไมเซอร์ (m)

เลขเรย์โนลด์ (Re) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Re = \frac{V_a d}{\nu_a} \quad \dots\dots 2.11$$

เมื่อ V_a คือ ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุที่ขวางการไหล ($\frac{m}{s}$)

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝักโลหะ (m)

ν_a คือ ความหนืดของอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ ($\frac{m^2}{s}$)

ขนาดของแรงฉุดเนื่องจากความหนืดของอากาศ (f_d) ที่กระทำกับละอองน้ำโลหะ ในขณะที่น้ำโลหะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [Munson, *et al.*, 2006]

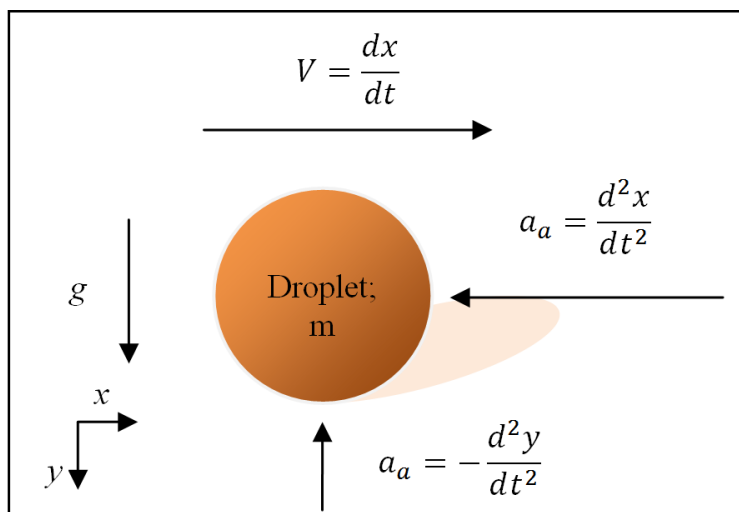
$$f_d = -\frac{1}{2}\rho_a V^2 AC_d = ma_d \quad \dots\dots 2.12$$

เมื่อ ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ ($\frac{kg}{m^3}$)

C_d คือ สัมประสิทธิ์แรงฉุดที่กระทำต่อละอองน้ำโลหะ

สมมติให้ละอองน้ำโลหะมีรูปทรงกลม ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [Teunou and Poncelet, 2005]

$$C_d = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{Re^{\frac{2}{3}}}{6} \right) \quad , \quad 65 \leq Re \leq 300 \quad \dots\dots 2.13$$



รูปที่ 2.1 ภาพอภิสระแสดงการเคลื่อนที่ของละอองน้ำโลหะและแรงกระทำ

เมื่อพิจารณาฝั่งภาพอิสระของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 2.1 สามารถเขียนสมการแสดงการเคลื่อนที่ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{แนวแกนนอน} \quad \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{\rho_a \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 AC_d}{2m_d} \quad \dots\dots 2.14$$

$$\text{แนวแกนตั้ง} \quad \frac{d^2y}{dt^2} = g - \frac{\rho_a \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 AC_d}{2m_d} \quad \dots\dots 2.15$$

เมื่อ g คือ ค่าอัตราเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ $9.81 \frac{m^2}{s}$

A คือ พื้นที่ภาพฉายของวัตถุที่ขวางการเคลื่อนที่ของของเหลวที่กำลังไหล (m^2)

การถ่ายเทความร้อนจากละอองน้ำโลหะสู่สิ่งแวดล้อมสามารถประมาณได้ด้วยการพาความร้อนที่ผิวสัมผัสของวัสดุแบบบังคับ (External forced convection) โดยสมมุติว่าละอองน้ำโลหะขวางอากาศที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง และกำหนดให้อุณหภูมิของน้ำโลหะที่หลุดจากขอบจานอะตอมไมเซอร์มีค่าเท่ากับอุณหภูมิไหลอมเหลว (T_m) ซึ่งสมมุติให้เท่ากับ $232^\circ C$ และอุณหภูมิบรรยากาศ $30^\circ C$ ดังนั้นค่าความร้อนที่ละอองน้ำโลหะต้องถ่ายเทสู่บรรยากาศ (Q_T) คือ ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง (Q_L) มีค่าดังสมการ

$$Q_L = m_d L \quad \dots\dots 2.16$$

ค่าการพาความร้อนจากละอองน้ำโลหะสู่อากาศนั้นคิดเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ย (T_f) ระหว่างอุณหภูมิของน้ำโลหะ (T_m) และอุณหภูมิบรรยากาศ (T_a) ดังสมการ [Cengel, 2004]

$$T_f = \frac{T_m + T_a}{2} \quad \dots\dots 2.17$$

ส่วนค่าการพาความร้อนเฉลี่ยได้จากสมการ

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad \dots\dots 2.18$$

เมื่อ Nu คือเลข Nusselt เป็นเทอมไร้มิติ

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัสดุ ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$)

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ($\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ Nu , Re และ Pr แสดงได้ด้วยสมการของ Whitaker [อ้างอิงจาก Cengel, 2004]

$$Nu = 2 + [0.4 Re^{\frac{1}{2}} + 0.06 Re^{\frac{2}{3}}] Pr^{0.4} \left(\frac{v_a}{v_f}\right)^{\frac{1}{4}} \quad \dots\dots 2.19$$

เมื่อ v_f คือ ความหนืดของอากาศบริเวณรอบขอบเขตสมมติของการพาความร้อน จากวัสดุ
 สู่บรรยากาศโดยรอบ ($\frac{m^2}{s}$)

Pr คือ เลข Prandtl เป็นเทอมไร้มิติซึ่งสามารถคำนวณค่าได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad \dots 2.20$$

สมการที่ 2.19 นี้มีเงื่อนไขในการคำนวณคือ $3.5 \leq Re \leq 80,000$ และ $0.7 \leq Pr \leq 380$

อัตราการพาความร้อนเฉลี่ยจากละอองน้ำโลหะสู่อากาศได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{ave} = hA(T - T_a) \quad \dots 2.21$$

สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

- 1) อนุภาคแต่ละอนุภาคเป็นอิสระต่อกัน
- 2) อนุภาคมีรูปทรงกลมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่าเดิมตลอด
- 3) อนุภาคมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นจึงไม่มีอิทธิพลใดๆ ต่อสิ่งแวดล้อมรอบอนุภาคนั้น

มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ของการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\left. \frac{d^2x}{dt^2} \right|_{t=0} = - \frac{\rho_a \left(\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} \right)^2 AC_d}{2m_d}, \quad \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = \omega R \quad \text{และ} \quad x|_{t=0} = 0$$

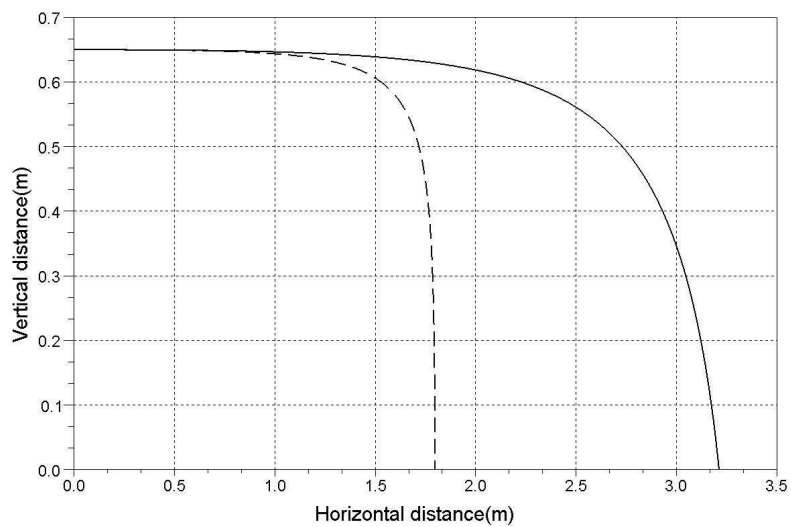
$$\left. \frac{d^2y}{dt^2} \right|_{t=0} = g, \quad \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = 0 \quad \text{และ} \quad y|_{t=0} = 0$$

โดยการคำนวณค่าใช้ Step-size คือ $\Delta t = 0.0001$ s และใช้โปรแกรม Scilab ช่วยในการคำนวณ

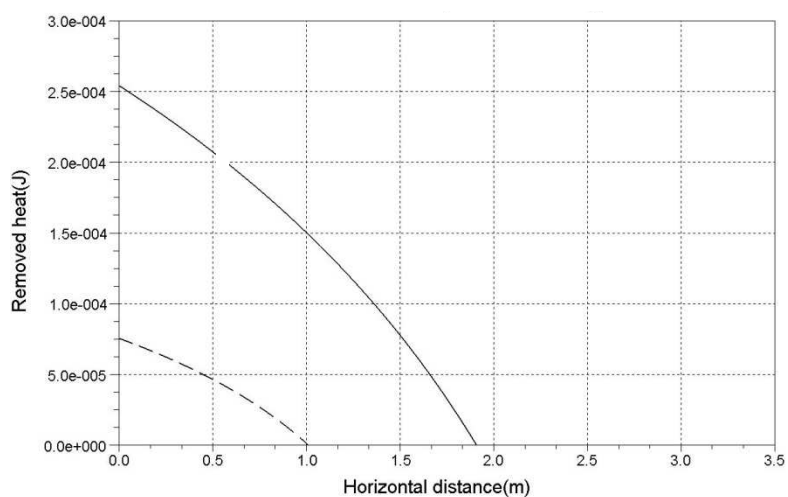
ผลการคำนวณเส้นทางเดินทางของละอองน้ำโลหะและค่าความร้อนแฝงที่สะสมในอนุภาค ณ ตำแหน่งต่างห่างจากจุดที่ละอองน้ำโลหะหลุดจากขอบจานอะตอมไมเซอร์แสดงในรูปที่ 2.2 จากผลการคำนวณพบว่าหากขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะดิบुकมีขนาด $70.4 \mu m$ ต้องใช้ถังอะตอมไมเซอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 3.8 m เพื่อให้มีระยะทางมากพอที่ละอองน้ำโลหะดิบุกที่มีการกระจายขนาดแบบล็อกปกติและมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.5 เย็นตัวได้อย่างสมบูรณ์ก่อนชนผนังของถังอะตอมไมเซอร์

2.2.1.4 สรุปผลการการออกแบบ

ผลจากการคำนวณเมื่อได้เงื่อนไขตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สรุปผลผลิตว่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 ผลการคำนวณ (ก) เส้นทางเดินทางและ (ข) ความร้อนแฝงของการแข็งตัวของละอองน้ำโลหะดีบุกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $70.4 \mu\text{m}$ (เส้นประ) และ $105.6 \mu\text{m}$ (เส้นทึบ) หลังจากหลุดจากขอบจานอะตอมไมเซอร์ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 20,000 rpm

1) ถ้าต้องการผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย $70.4 \mu\text{m}$ ใช้มอเตอร์ที่มีความเร็วรอบ 20,000 rpm ต้องใช้จานอะตอมไมเซอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 9.4 cm โดยมีรัศมีวิกฤติที่จะเกิด Hydraulic jump เท่ากับ 0.1 cm

- 2) ในกรณีที่ใช้เหล็กเหนียวสำหรับทำงานอะตอมไมเซอร์ เส้นผ่านศูนย์กลางของงานอะตอมไมเซอร์ต้องมีค่าไม่เกิน 12 cm เพื่อให้มีค่าความปลอดภัยไม่น้อยกว่า 2
- 3) การอะตอมไมเซชันต้องการมอเตอร์ที่ให้กำลังไม่น้อยกว่า 410 W (ไม่นับรวมกำลังที่ใช้ขับงานอะตอมไมเซอร์ และค่าประสิทธิภาพมอเตอร์) เมื่ออัตราเร็วในการเทน้ำโลหะดิบเท่ากับ $1.2 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ หรือ $30 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
- 4) ระยะทางที่ละอองน้ำโลหะซึ่งมีขนาดเฉลี่ย 70.4 μm และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายขนาดแบบล็อกปกติไม่เกิน 1.5 ต้องการเพื่อให้สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับบรรยากาศและแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ก่อนชนกับผนังของถังอะตอมไมเซอร์ คือ 1.9 m หรือถังอะตอมไมเซอร์ควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 3.8 m

2.2.2 ชุดทดลองผลิตผงโลหะเบื้องต้น

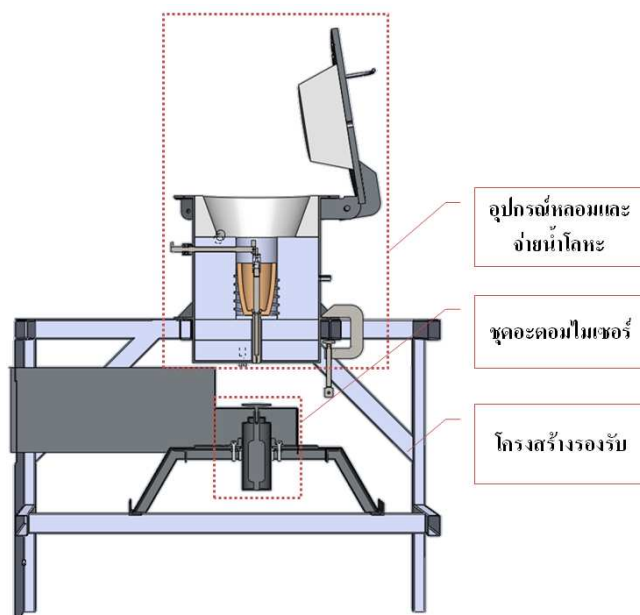
ชุดทดลองผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเบื้องต้นสร้างขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

- 1) ทดลองผลิตผงโลหะและศึกษาอิทธิพลของตัวแปรของกระบวนการต่อสมบัติของผงโลหะดิบ
- 2) ทดลองหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมเทียบกับแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาถึงระยะทางที่ละอองน้ำโลหะถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมกลายเป็นผงโลหะอย่างสมบูรณ์สำหรับเป็นข้อมูลในการสร้างเครื่องผลิตผงโลหะต้นแบบ ชุดทดสอบผลิตผงโลหะเบื้องต้นมีส่วนประกอบที่สำคัญทั้งหมด 3 ส่วน ดังนี้

2.2.2.1 อุปกรณ์หลอมและจ่ายน้ำโลหะ

อุปกรณ์หลอมและจ่ายน้ำโลหะมีหน้าที่หลอมโลหะตามอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ และเทน้ำโลหะลงบนงานอะตอมไมเซอร์เพื่อผลิตเป็นผงโลหะ มีส่วนประกอบคือ

- 1) เตาหลอมโลหะอุณหภูมิเตา (Tundish) เปลือกเตาหลอมทำจากเหล็กแผ่นหนา 0.6 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 cm สูง 40 cm ที่ก้นเตาเจาะรูตรงกลางขนาด 2.5 cm เพื่อเป็นทางออกของท่อจ่ายน้ำโลหะ ปากเตามีหน้าแปลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 40 cm ฝาเตาทำจากเหล็กแผ่นหนา 1.2 cm ภายในเตาบุด้วยแผ่นเซรามิกไฟเบอร์หนา 5 cm จำนวน 2 ชั้นเพื่อเป็นฉนวนความร้อน เข้าหลอมภายในเตามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของชุดทดลองผลิตผงโลหะด้วยวิธีโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเบื้องต้น



รูปที่ 2.4 ชุดทดลองผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซอร์โดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเบื้องต้น

2) ขดลวดความต้านทาน (Heating coil) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อน ประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด คือ (1) ขดลวดกำลัง 1,000 W ทำจากเส้นลวดนิโครทล 80 (80Ni-20Cr) เส้นผ่านศูนย์กลางลวด 0.07 cm ยาว 17.1 m ม้วนเป็นขดเส้นผ่านศูนย์กลาง

ภายนอก 0.6 cm ความต้านทานรวม 1,000 Ω สำหรับให้ความร้อนเพื่อหลอมโลหะ และ (2) ขดลวดกำลัง 500 W ทำจากเส้นลวดนิโครทัล 80 เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด 0.045 cm ยาว 14.1 m ม้วนเป็นขดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.6 cm ความต้านทาน 1,000 Ω เพื่อให้ความร้อนรักษาอุณหภูมิท่อทางเดินน้ำโลหะ

3) เบ้าหลอมกราไฟต์ (Graphite crucible) เบอร์ A2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm สูง 11 cm กั้นเบ้าเจาะรูเพื่อเป็นทางผ่านของท่อส่งน้ำโลหะ ประรอยเจาะด้วยดินเหนียวคาร์บอนซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยแลนด์ สเมลติง แอนด์ รีไฟนิง จำกัด (THAISARCO)

4) ท่อทางเดินน้ำโลหะ (Funnel) เป็นทางผ่านน้ำโลหะจากเบ้าหลอมไปยังหัวฉีดน้ำโลหะ ทำจากเหล็กเหนียวกลึงขึ้นรูปเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.9 cm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 cm ความยาว 13 cm ปลายด้านหนึ่งมีขอบเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ปลายอีกด้านกลึงเกลียวภายในเพื่อใช้ต่อหัวฉีดน้ำโลหะ

5) หัวฉีดน้ำโลหะ (Nozzle) มีหน้าที่จ่ายน้ำโลหะลงบนจานอะตอมไมเซอร์ ทำจากเหล็กเหนียวกลึงขึ้นรูป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 cm ปลายด้านหนึ่งเจาะรูขนาดเล็กไว้เพื่อเป็นทางผ่านน้ำโลหะได้แก่ 0.5, 0.8, 1.0 และ 2.0 mm ปลายอีกด้านกลึงเกลียวนอกสำหรับต่อกับท่อทางเดินน้ำโลหะ



รูปที่ 2.5 หัวฉีดน้ำโลหะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูเปิด (Orifice) 0.5, 0.8, 1.0, และ 2.0 mm จากขวาไปซ้าย

6) อุปกรณ์ควบคุมการไหลของน้ำโลหะ ประกอบด้วยแท่งกราไฟต์ (Graphite rod) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 cm ยาว 11 cm ปลายด้านหนึ่งกลึงให้แหลมทำมุม 45° กับแนวแกนของแท่งกราไฟต์ เพื่ออุดท่อทางเดินน้ำโลหะ และอีกด้านกลึงเกลียวเพื่อต่อกับกลไกเปิด-ปิดสำหรับยกแท่งกราไฟต์ขึ้นเมื่อต้องการเทน้ำโลหะบนจานอะตอมไมเซอร์

7) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control box) ประกอบด้วยตู้ควบคุม 2 ตู้ ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิแบบวงจรมอด (Closed loop controller) ควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอมและท่อทางเดินน้ำโลหะ โดยติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ในเตาหลอมและที่ปลายหัวฉีดน้ำโลหะเพื่อตรวจรู้ค่าอุณหภูมิแล้วส่งสัญญาณกลับไปยังตู้ควบคุมอุณหภูมิ

8) อุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data acquisition or DAQ) ทำหน้าที่ต่อเชื่อมสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลและคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงผล และเก็บบันทึกอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่สนใจที่เวลาต่างๆ โดยอุปกรณ์ต่อเชื่อมที่ใช้รุ่น USB-9211A ยี่ห้อ National Instruments ชนิด 4 ช่องสัญญาณ ความเร็วในการส่งสัญญาณ 24 บิต รับค่าขาเข้าจากเทอร์โมคัปเปิล สำหรับระบบปฏิบัติการวินโดวส์ โดยใช้ร่วมกับโปรแกรม LabView Signal Express เวอร์ชัน 3.0

9) ฉากรับผงโลหะทำจากแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี ติดตั้งที่ด้านหน้าชุดทดสอบ เพื่อจำกัดระยะตกของผงโลหะ



รูปที่ 2.6 ฉากรับผงโลหะที่ติดตั้งที่บริเวณหน้าชุดทดลองผลิตผงโลหะดิบด้วยวิธีอะตอมไมเซชันเบื้องต้น

2.2.2.2 ชุดอะตอมไมเซอร์ (Atomizer unit)

ชุดอะตอมไมเซอร์นับเป็นส่วนที่สำคัญที่ทำให้น้ำโลหะกลายเป็นผงโลหะ ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- 1) มอเตอร์ชนิดยูนิเวอร์แซลความเร็วสูง (High speed motor) คัดแปลงจากเครื่องแต่งขอบไม้ (Trimmer) ยี่ห้อ Crown รุ่น CT 2802 กำลังไฟฟ้าขาเข้า 1,400 W ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เส้นผ่านศูนย์กลางคอลเล็ต (Collet diameter) 1.2 cm ความเร็วรอบสูงสุด 34,000 rpm



รูปที่ 2.7 มอเตอร์ความเร็วสูงติดตั้งงานอะตอมไมเซอร์ทรงเบน



รูปที่ 2.8 อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าเพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

2) หม้อแปลงปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าชนิดกระแสสลับ (Voltage regulator) ขนาด 1000 W ความต่างศักย์ขาเข้า 110/220 V ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก 0-260 V สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

3) จานอะตอมไมเซอร์ (Rotating atomizer) มีหน้าที่ทำให้น้ำโลหะแตกเป็นละอองละเอียดกลิ้งขึ้นรูปจากเหล็กเหนียว มีลักษณะเป็นแผ่นดิสก์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจาน 3, 4 และ 5 cm หนา 0.5 cm ด้านบนจานอะตอมไมเซอร์มี 2 ลักษณะคือ ทรงแบน และ ทรงถ้วย สำหรับทรงถ้วยจะมีผนังสูง 0.5 cm ทำมุมเอียงประมาณ 63.5° กับระนาบผิวจานอะตอมไมเซอร์ ด้านล่างจานอะตอมไมเซอร์มีคู่มือสำหรับใช้สอดเข้ากับคอลเล็คเตอร์ของมอเตอร์เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 cm ยาว 2.5 cm และมีปากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm ยาว 1.5 cm



รูปที่ 2.9 จานอะตอมไมเซอร์ทรงแบน (แถวหน้า) และทรงถ้วย (แถวหลัง) ขนาด 30, 40, 50, 70 และ 100 mm (จากซ้ายไปขวา)

2.2.2.3 โครงสร้างรองรับเครื่อง (Supported structure)

โครงสร้างรองรับทำหน้าที่เป็นโครงสร้างสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมด มีขนาด กว้าง 100 cm ยาว 100 cm สูง 70 cm

2.2.3 เครื่องผลิตผงโลหะ

เครื่องผลิตผงโลหะที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว และศึกษาตัวแปรของกระบวนการที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของผงโลหะที่ผลิตได้ เครื่องผลิตผงโลหะดังกล่าวมีส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วนดังต่อไปนี้ (แบบขึ้นส่วนแสดงในภาคผนวก ก)

2.2.3.1 อุปกรณ์หลอมและจ่ายน้ำโลหะ

อุปกรณ์หลอมและจ่ายน้ำโลหะทำหน้าที่หลอมวัสดุโลหะให้มีอุณหภูมิตามที่ต้องการ แล้วจ่ายน้ำโลหะลงบนใจกลางจานอะตอมไมเซอร์ อุปกรณ์นี้ส่วนใหญ่ติดตั้งอยู่ภายนอกถังอะตอมไมเซอร์ มีส่วนประกอบย่อยที่สำคัญดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.10 เครื่องผลิตผงโลหะด้วยที่สร้างขึ้นสำหรับการวิจัยครั้งนี้

1) เตาหลอมโลหะอุณหภูมิต่ำ (Low temperature tundish) ติดตั้งอยู่บนโครงเหล็กถักซึ่งอยู่บนถังอะตอมไมเซอร์ เปลือกเตาหลอมทำจากเหล็กแผ่นหนา 0.6 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 cm สูง 40 cm ที่ก้นเตาเจาะรูตรงกลางขนาด 2.5 cm เพื่อเป็นทางออกของท่อจ่ายน้ำโลหะ ปากเตามีหน้าแปลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 40 cm ฝาเตาทำจากเหล็กแผ่นหนา 1.2 cm ภายในเตาบุด้วยแผ่นเซรามิกไฟเบอร์หนา 5 cm จำนวน 2 ชั้นเพื่อเป็นฉนวนความร้อน ภายในห้องหลอม (Chamber) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm

2) เบ้าหลอมโลหะ (Crucible) ติดตั้งอยู่ในเตาหลอมน้ำโลหะ ทำจากท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 10 cm สูง 15 cm หนา 0.3 cm ส่วนก้นเบ้าทำเป็นกรวย

เพื่อให้ น้ำ โลหะ ไหล ได้ สะดวก ที่ กั้น เบ้า หลอม มี ท่อ ขนาด เส้น ผ่าน ศูนย์ กลาง 1.2 cm หนา 0.3 cm ยาว 37 cm ปลาย ท่อ กลึง เกลียว เพื่อ ใช้ ต่อ กับ วาล์ว ทน อุณหภูมิ สูง ท่อ ดัง กล่าว ถูก สอด ผ่าน ทาง ด้าน ล่าง ของ เปลือก เต้า และ ต่อ เข้า กับ วาล์ว ควบคุม การ ไหล ของ น้ำ โลหะ

3) วาล์ว เข็ม (High pressure needle valve) ขนาด 1.2 cm สามารถ ทน อุณหภูมิ ได้ สูง สุด 427 °C ความดัน สูง สุด 69 MPa ยี่ห้อ “อพอล โล” เสื่อ วาล์ว หล่อ ขึ้น รูป จาก เหล็กกล้า คาร์บอน ต่อ แบบ inline ทาง เข้า และ ทาง ออก วาล์ว มี เกลียว สำหรับ ติด ตั้ง เข้า กับ ท่อ โดย ติด ตั้ง วาล์ว ต่อ จาก ปลาย ท่อ ของ เบ้า หลอม ที่ สอด ผ่าน ทาง ด้าน ล่าง เต้า หลอม

4) แผ่น ทาง ผ่าน น้ำ โลหะ (Entering plate) ติด ตั้ง อยู่ ใต้ เต้า หลอม โดย ยึด เข้า กับ หน้า แพลน ของ ถัง อะตอม ไมเซอร์ ทำ หน้า ที่ เป็น ทาง เดิน น้ำ โลหะ ต่อ เนื่อง จาก วาล์ว ควบคุม การ ไหล ไป ยัง ท่อ ทาง เดิน น้ำ โลหะ ส่วน ปลาย มี ลักษณะ เป็น แผ่น เหล็ก กลม ขนาด เส้น ผ่าน ศูนย์ กลาง 7.5 cm เจาะ รู ตรง กลาง ขนาด 2 cm ด้าน หนึ่ง มี ท่อ ขนาด 1.2 cm เชื่อม ติด อยู่ ปลาย อีก ด้าน หนึ่ง กลึง เกลียว เพื่อ ต่อ กับ วาล์ว ที่ สัน ของ แผ่น กลม เจาะ รู ขนาด เส้น ผ่าน ศูนย์ กลาง 0.63 cm จำนวน 2 รู สำหรับ สอด ฮีตเตอร์ ชนิด แท่ง เพื่อ รักษา อุณหภูมิ ของ แผ่น ทาง ผ่าน น้ำ โลหะ ป้อง กัน น้ำ โลหะ แข็ง ตัว

5) ท่อ ทาง เดิน น้ำ โลหะ ส่วน ปลาย (Funnel) ติด ตั้ง ต่อ จาก แผ่น ทาง ผ่าน น้ำ โลหะ โดย สอด ผ่าน หน้า แพลน เหล็ก ซึ่ง อยู่ บน ถัง อะตอม ไมเซอร์ เป็น ทาง ผ่าน น้ำ โลหะ จาก แผ่น ทาง เข้า น้ำ โลหะ ไป ยัง หัว ฉีด น้ำ โลหะ ทำ จาก เหล็ก เหนียว กลึง ขึ้น รูป เป็น ท่อ ขนาด เส้น ผ่าน ศูนย์ กลาง ภายนอก 2 cm เส้น ผ่าน ศูนย์ กลาง ภายใน 1 cm ความ ยาว 13 cm ปลาย ด้าน หนึ่ง มี บ่า ขนาด เส้น ผ่าน ศูนย์ กลาง 2.5 cm สำหรับ วาง บน หน้า แพลน เหล็ก หน้า แพลน เหล็ก ปลาย อีก ด้าน กลึง เกลียว ใน เพื่อ ใช้ ต่อ หัว ฉีด น้ำ โลหะ

6) เสื้อ คลุม ท่อ ทาง เดิน น้ำ โลหะ (Heating jacket) ทำ จาก แท่ง เหล็ก มี ขนาด กว้าง 5 cm สูง 8 cm หนา 2.5 cm เจาะ รู ขนาด 1.9 cm ตลอด ความ สูง เพื่อ สอด ท่อ ทาง เดิน น้ำ โลหะ ส่วน ปลาย และ เจาะ รู ขนาด เส้น ผ่าน ศูนย์ กลาง 0.7 cm ตลอด ความ สูง เพื่อ ใช้ สอด ฮีตเตอร์ แบบ แท่ง สำหรับ รักษา อุณหภูมิ ท่อ ทาง เดิน น้ำ โลหะ

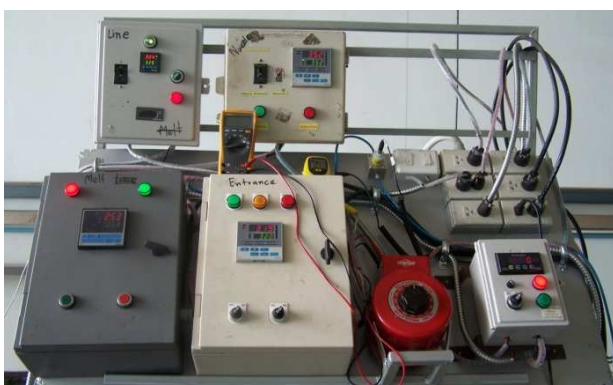
7) หัว ฉีด น้ำ โลหะ (Nozzle) ทำ หน้า ที่ จ่าย น้ำ โลหะ ลง บน จาน อะตอม ไมเซอร์ ทำ จาก เหล็ก เหนียว กลึง ขึ้น รูป ขนาด เส้น ผ่าน ศูนย์ กลาง ภายนอก 2 cm ปลาย ด้าน หนึ่ง เจาะ รู ขนาด เล็ก ไว้ เพื่อ เป็น ทาง ผ่าน น้ำ โลหะ ได้ แก่ ขนาด 0.5, 0.8, 1.0, 2.0 และ 3.0 mm ปลาย อีก ด้าน กลึง เกลียว นอก สำหรับ ต่อ กับ ท่อ ทาง เดิน น้ำ โลหะ

8) ฮีตเตอร์ (Heaters) ทำ หน้า ที่ เป็น แหล่ง กำเนิด ความ ร้อน เพื่อ หลอม น้ำ โลหะ และ รักษา อุณหภูมิ ของ ระบบ ฮีตเตอร์ ที่ ใช้ มี อยู่ 2 ชนิด คือ ฮีตเตอร์ รูป ตัว “T” เส้น ผ่าน

ศูนย์กลาง 0.8 cm ยาว 155 cm ม้วนเป็นขดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm กำลัง 1,000 W สำหรับ หลอมน้ำโลหะ และฮีตเตอร์รูปตัว “T” ซึ่งมีความยาว 60 cm กำลัง 500 W จำนวน 3 แท่ง สำหรับรักษาอุณหภูมิของท่อน้ำโลหะที่ต่อจากเบ้าหลอม วาล์ว และแผ่นทางผ่านน้ำโลหะ และฮีตเตอร์ชนิดแท่ง (Cartridge heater) เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.63 cm ยาว 8 cm กำลังไฟฟ้า 270 W จำนวน 2 แท่งให้ความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิที่แผ่นทางผ่านน้ำโลหะ และฮีตเตอร์แบบแท่งซึ่งมีความยาว 6 cm กำลังไฟฟ้า 300 W จำนวน 2 แท่ง สำหรับให้ความร้อนกับ ทางเดินน้ำโลหะส่วนปลายและหัวฉีดน้ำโลหะ

9) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control box) ประกอบด้วยตู้ควบคุม 4 ตู้ติดตั้งที่แผงควบคุมด้านบนถึงอะตอมไมเซอร์ สำหรับควบคุมอุณหภูมิแบบวงจรปิด ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอม ท่อทางเดินน้ำโลหะ วาล์วเข็ม และหัวฉีดน้ำโลหะ โดยติดตั้งเทอร์โมคัพเปิล (Thermocouple) ไว้ในเตาหลอม ท่อทางเดินน้ำโลหะที่ต่อจากเบ้า หลอม ท่อทางเดินน้ำโลหะที่ต่ออยู่ใต้วาล์วเข็ม และที่ปลายหัวฉีดน้ำโลหะเพื่อตรวจสอบค่า อุณหภูมิแล้วส่งกลับไปยังตู้ควบคุมอุณหภูมิ

10) อุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data acquisition) ทำหน้าที่ต่อเชื่อมสัญญาณจากเทอร์โมคัพเปิลไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลและเก็บบันทึกอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่สนใจ โดย อุปกรณ์ต่อเชื่อมที่ใช้ยี่ห้อ National Instruments รุ่น USB-9211A ชนิด 4 ช่องสัญญาณมีความเร็วในการส่งสัญญาณ 24 บิต รับค่าขาเข้าจากเทอร์โมคัพเปิล สำหรับระบบปฏิบัติการ วินโดวส์ โดยใช้ร่วมกับโปรแกรม LabView Signal Express เวอร์ชัน 3.0



รูปที่ 2.11 แผงวงควบคุมการทำงานของเครื่องผลิตผงโลหะที่สร้างขึ้น

2.2.3.2 ชุดอะตอมไมเซอร์

ชุดอะตอมไมเซอร์ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1) มอเตอร์ชนิดยูนิเวอร์แซลความเร็วสูง ดัดแปลงจากเครื่องแต่งขอบไม้ (Trimmer) ยี่ห้อ Crown รุ่น CT 2802 กำลังไฟฟ้าขาเข้า 1,400 W ใช้กับความต่างศักย์ไฟฟ้า 220 V ชนิดกระแสสลับ เส้นผ่านศูนย์กลางคอลลีต (Collet diameter) 1.2 cm ความเร็วรอบเครื่องเปล่า 34,000 rpm
- 2) หม้อแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าชนิดกระแสสลับ (Voltage regulator) ขนาด 1000 W ความต่างศักย์ขาเข้า 110/220 V ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก 0-260 V สำหรับปรับความเร็วรอบมอเตอร์
- 3) จานอะตอมไมเซอร์ หรือจานหมุน (Rotating atomizer) กิ่งขึ้นรูปจากเหล็กเหนียว มีลักษณะเป็นแผ่นดิสก์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจาน 3, 4 และ 5 cm หนา 0.5 cm ด้านบนจานอะตอมไมเซอร์มี 2 ลักษณะคือ ทรงแบน และทรงถ้วย สำหรับทรงถ้วยจะมีผนังสูง 0.5 cm ทำมุมเอียงประมาณ 63.5° กับระนาบผิวจานอะตอมไมเซอร์ ด้านล่างของจานอะตอมไมเซอร์มีคู่มือสำหรับใช้สอดเพื่อต่อกับมอเตอร์เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 cm ยาว 2.5 cm และมีปากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm ยาว 1.5 cm



รูปที่ 2.12 จานอะตอมไมเซอร์ทรงแบน (แถวหน้า) และทรงถ้วย (แถวหลัง) ขนาด 30, 40 และ 50 mm (จากขวาไปซ้าย) ทั้งหมดผ่านการเคลือบผิวหน้าด้วยโลหะบัดกรีชนิด SAC305

4) อุปกรณ์ตรวจรู้และแสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ (Speed sensor and speed indicator) ประกอบด้วย



รูปที่ 2.13 อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ (ซ้าย) และอุปกรณ์แสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ (ขวา)

- อุปกรณ์ตรวจรู้ความเร็วรอบมอเตอร์แบบพรอกซิมีตีสวิทช์ ยี่ห้อ Efector รุ่น IGW201/IGK3012 ใช้ร่วมกับซ็อกเก็ตรุ่น E10909 ยี่ห้อ Efector ระยะตรวจรู้ 1.2 cm ชนิดสร้างฟลักซ์รอบ ความถี่สูงสุดในการตรวจรู้ 2,000 Hz หรือประมาณ 120,000 rpm ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้า 10-30 V การตรวจรู้จะตรวจโลหะที่ผ่านมาก่อควนสนามแม่เหล็กรอบตัวตรวจรู้และส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์แสดงผลในรูปของสัญญาณพัลส์

- อุปกรณ์จ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ตรวจรู้ความเร็วรอบ (Switching power supply) ยี่ห้อ Union รุ่น UN-50B NED ใช้กับความต่างศักย์ขาเข้า 220 V จ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 24 V 200 mA

- อุปกรณ์แสดงผลความเร็วรอบชนิดติดตั้งบนแผงควบคุม (Panel pulse meter) ยี่ห้อ Digicon รุ่น PM-05-4N มีหน้าที่รับสัญญาณพัลส์จากตัวตรวจรู้และคำนวณเป็นค่าความเร็วรอบ

2.2.3.3 ถังอะตอมไมเซอร์

ถังอะตอมไมเซอร์แยกออกเป็น 2 ส่วนคือ

1) ฝาถังอะตอมไมเซอร์มีลักษณะคล้ายอ่างขนาดใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 m สูง 0.3 m ทำจากแผ่นเหล็กหนา 3 mm ม้วนขึ้นรูปและเชื่อมติดกันด้วยการเชื่อมไฟฟ้า ที่ขอบมีหน้าแปลนกว้าง 5 cm เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm จำนวน 58 รู สำหรับสอดสกรูเพื่อประกอบฝาถังเข้ากับกรวยเหล็ก ด้านในฝาถังเสริมแรงด้วยเหล็กแผ่นและครีบจำนวน 10 ชุดโดยรอบ ด้านบนฝาเสริมแรงด้วยเหล็กเส้น 24 เส้นและมีโครงสร้างเหล็กถักสำหรับเป็นพื้นที่ทำงานด้านบนฝาถังรวมถึงเสริมแรงไม่ให้แผ่นเหล็กแอ่นเมื่อดูดอากาศภายในถังออก และแผงควบคุมเชื่อมติดกับพื้นที่ทำงานสำหรับวางกล่องควบคุมอุณหภูมิ ด้านข้างฝาถังมีรูมอง (Sight hole) สำหรับสังเกตการณ์การทำงานของอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในถัง อะตอมไมเซอร์ พนักด้านในของฝาถังมีแผ่นเหล็กเชื่อมติดไว้สำหรับประกอบคานเหล็กคู่เพื่อติดตั้งชุดอะตอมไมเซอร์และเพื่อช่วยเสริมแรงฝาถัง

2) กรวยเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 m สูง 1.5 m เอียงทำมุมกับพื้นระนาบ 45° ขึ้นรูปด้วยการม้วนแผ่นเหล็กหนา 3 mm ขอบด้านบนมีหน้าแปลนหน้า 1.2 cm กว้าง 5 cm เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm จำนวน 58 รู สำหรับสอดสกรูเพื่อยึดฝาด้านบนให้ติดกับกรวยโดยรองด้วยปะเก็นยางพองน้ำก่อนประกอบทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกันเพื่อป้องกันการรั่วขณะดูดอากาศออก ที่ยอดของกรวยมีช่องเปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm เพื่อให้ผงโลหะไหลลงไปรวมกันขณะผลิตผงโลหะ โดยใช้วาล์วผีเสื้อขนาด 13 cm ควบคุมการเปิด-ปิด กรวยเหล็กมีโครงสร้างที่ทำหน้าที่เป็นขาตั้งรองรับน้ำหนักทั้งหมดซึ่งทำจากเหล็กท่อชนิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ด้านข้างกรวยมีช่องเปิดขนาด 60 cm สำหรับเข้าไปภายในถังเพื่อติดตั้งและซ่อมแซมอุปกรณ์ภายในถัง

2.2.3.4 อุปกรณ์ควบคุมบรรยากาศ

การควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์สำหรับการวิจัยครั้งนี้ หมายถึง การลดปริมาณออกซิเจนจากปกติประมาณ 20.9 vol % โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวปรับปริมาณออกซิเจน ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- 1) ปัมสุญญากาศทำหน้าที่ดูดอากาศและก๊าซผสมภายในถังอะตอมไมเซอร์ออก ทำให้ความดันรวมภายในถังลดลงชนิด Multi-rotary Vane Vacuum Pump ยี่ห้อ Thomas รุ่น 30-3 ใช้มอเตอร์ 3 เฟส กำลัง 2 hp (1490 W) ต่อกับปั๊มดูดอากาศ
- 2) ถังเก็บก๊าซไนโตรเจนพร้อมอุปกรณ์ปรับความดันขาออกทำหน้าที่ป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ถังอะตอมไมเซอร์เพื่อเจือจางก๊าซออกซิเจน



รูปที่ 2.14 อุปกรณ์ตรวจรู้ปริมาณออกซิเจนพร้อมมิเตอร์แสดงผล

3) อุปกรณ์ตรวจรู้ปริมาณออกซิเจน ยี่ห้อ Teledyne Analytical Instruments รุ่น GB300 ช่วงการตรวจวัดปริมาณออกซิเจน 0-100 vol% โดยปริมาตร ความแม่นยำ $\pm 0.1\%$

4) ระบบท่อก๊าซแบ่งเป็น 3 เส้น คือ ท่อดูดอากาศออกเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ใช้บอกลวล้วควบคุมการดูดอากาศและมีมาตรวัดชนิดสูญญากาศแสดงค่าความดันในถึงท่อเติมไนโตรเจนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 cm ใช้บอกลวล้วควบคุมการเติมอากาศ และท่อชักตัวอย่างก๊าซสำหรับวัดความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและปรับความดันภายในถึงหลังจากเติมก๊าซไนโตรเจนแล้ว

2.3 วิธีการทดลอง

2.3.1 วัสดุดิบ

วัสดุดิบที่ใช้ในการทดสอบผลิตผงโลหะประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิด คือ โลหะดีบุก สำหรับทดสอบการผลิตผงโลหะเบื้องต้นและทดสอบสมรรถนะเครื่องผลิตผงโลหะ และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 สำหรับศึกษาการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว รายละเอียดของวัสดุดิบแต่ละชนิดมีดังนี้

1) โลหะดีบุกบริสุทธิ์ (Sn) ความบริสุทธิ์ 99.95 wt% แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ โลหะดีบุกชนิดแท่ง 25 kg ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยแลนด์ สเมลติ้ง แอนด์ รีไฟนิง

จำกัด (THAISARCO) สำหรับทดลองผลิตผงโลหะดีบุกเบื้องต้น และชนิดแท่งน้ำหนัก 0.4 kg (รูปที่ 2.15 (ก)) สำหรับทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผลิตผงโลหะที่สร้างขึ้น



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.15 วัสดุที่ใช้ในการทดลองผลิตผงโลหะ (ก) แท่งโลหะดีบุกความบริสุทธิ์ 99.95 wt% และ (ข) แท่งโลหะบัดกรีชนิด SAC305

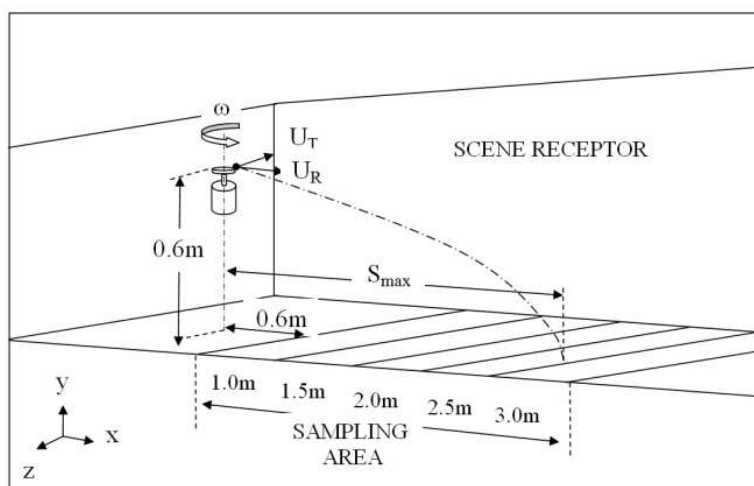
2) โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 (96.5Sn-3.0Ag-0.5Cu) ชนิดแท่งน้ำหนักประมาณ 0.4 kg ต่อแท่งดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข) จาก บริษัท ไทยแลนด์ สเมตติ้ง แอนด์ รีไฟนิง จำกัด (THAISARCO) สำหรับทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ด้วยเครื่องผลิตผงโลหะที่สร้างขึ้น

2.3.2 วิธีทดลองผลิตผงโลหะเบื้องต้น

การทดลองผลิตผงโลหะเบื้องต้นโดยใช้โลหะดีบุกเป็นวัตถุดิบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ติดตั้งหัวฉีดน้ำโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต้องการที่ปลายท่อทางเดินน้ำโลหะส่วนปลาย และประกอบจานอะตอมไมเซอร์เข้ากับคอลเล็กซ์ของมอเตอร์
- 2) เริ่มการทำงานโปรแกรมเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ (วิธีการบันทึกข้อมูลด้วยโปรแกรม LabView Signal Express คู่มือภาคผนวก ง)
- 3) หลอมโลหะดีบุกหนัก 1 kg ในเบ้ากราไฟท์ที่อุณหภูมิ 283°C รอจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำโลหะและที่หัวฉีดคงที่

- 4) เปิดมอเตอร์และปรับความเร็วรอบให้ได้ค่าประมาณ 20,000 rpm โดยใช้ Tachometer ชนิดใช้แสงตรวจรู้ความเร็วรอบของมอเตอร์ พร้อมกับค่อยๆ เพิ่มความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าจนกระทั่งได้ค่าความเร็วที่ต้องการ
- 5) ยกแท่งกราไฟต์ขึ้นเพื่อปล่อยให้ น้ำโลหะตกบนจานอะตอมไมเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ใต้เตาหลอมพร้อมกับเริ่มบันทึกเวลาที่ทันที รอจนกระทั่งน้ำโลหะหมดจึงหยุดบันทึกเวลา
- 6) เก็บตัวอย่างของผงโลหะโดยแยกเก็บที่ระยะทาง 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 m และตัวอย่างรวมทุกระยะ ดังนั้นสำหรับการผลิตผงโลหะ 1 ครั้งจะเก็บตัวอย่างผงโลหะดิบได้ 7 ตัวอย่าง นำตัวอย่างที่ได้ไปชั่งน้ำหนักเพื่อเตรียมวิเคราะห์ขนาดต่อไป
- 7) สำหรับเงื่อนไขในการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.16 แสดงบริเวณที่เก็บตัวอย่างผงโลหะเพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของผงโลหะกับระยะห่างจากจานอะตอมไมเซอร์

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขในการทดลองผลิตผงโลหะดีบุกเบื้องต้น

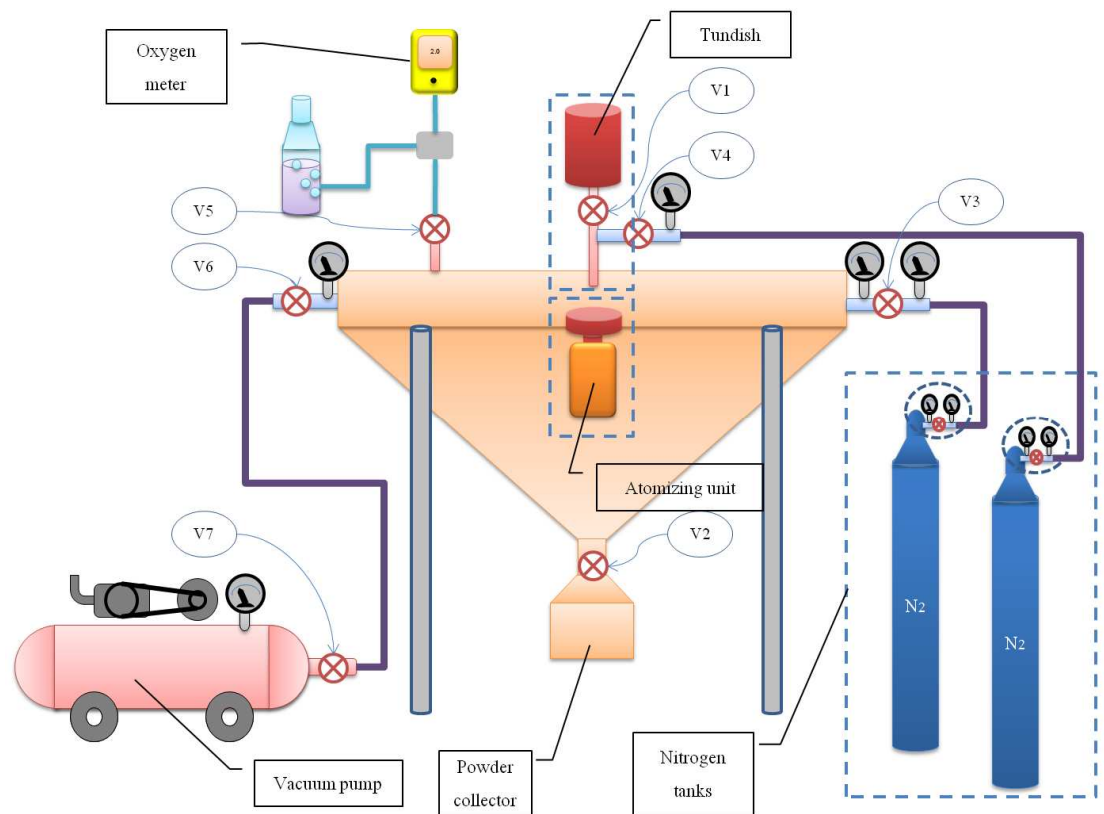
Exp. Number	Angular speed 20,000 rpm	Nozzle opening (mm)				Diameter of atomizer (mm)						Superheating temperature (°C)		
		0.5	0.8	1.0	2.0	Cup			Disc			50	100	150
						30	40	50	30	40	50			
1	•	•										•		
2			•									•		
3				•								•		
4					•							•		
5					•							•		
6					•							•		•
7					•			•				•		
8					•			•				•		
9					•			•				•		•
10					•			•				•		
11			•								•			
12			•					•				•		

2.3.3 วิธีทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305

การทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ติดตั้งหัวฉีดน้ำโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต้องการที่ปลายท่อทางเดินน้ำโลหะส่วนปลาย และประกอบจานอะตอมไมเซอร์เข้ากับคอลเล็คเตอร์
- 2) เริ่มการทำงานโปรแกรม LabView Signal Express เพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ (วิธีการบันทึกข้อมูลด้วยโปรแกรม LabView Signal Express ดูในภาคผนวก ง)
- 3) ปรับบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ตามขั้นตอนต่อไปนี้

(1) ปิดวาล์วทุกตัวเพื่อเตรียมชุดอากาศ เปิดวาล์ว V6 และ V7 เริ่มการทำงานปั๊มดูดอากาศเมื่อชุดอากาศภายในถึงให้จนมีความดันเท่ากับ 15 cmHg (vac) หลังจากนั้นปิดวาล์ว V6 และ V7



รูปที่ 2.17 ระบบท่อควบคุมบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์

(2) ปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ถังอะตอมไมเซอร์ โดยเปิดวาล์ว V3 และเติมก๊าซไนโตรเจนจากถังจ่าย จนกระทั่งความดันภายในถังกลับมาเป็น 0 cmHg(vac) ปิดวาล์ว V3

(3) วัดปริมาณออกซิเจน โดยเปิดวาล์ว V5 เพื่อปล่อยก๊าซผสมให้ไหลผ่านอุปกรณ์ตรวจปริมาณออกซิเจน

(4) ทำซ้ำขั้นตอนที่ (1) (2) และ (3) จนกระทั่งปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ลดลงเท่ากับค่าที่ต้องการ

4) หลอมโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 น้ำหนัก 1 kg ในเบ้าเหล็กที่อุณหภูมิ 318 °C รอจนกระทั่งอุณหภูมิน้ำโลหะ อุณหภูมิวาล์ว V1 และหัวฉีดคงที่

- 5) เปิดมอเตอร์และปรับความเร็วรอบให้ได้ค่าตามที่ต้องการทดลอง โดยอ่านค่าความเร็วรอบจากหน้าจอแสดงผลพร้อมกับค่อยๆ เพิ่มความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า
- 6) เปิดวาล์วเข็ม V4 ให้สุดเพื่อเทน้ำโลหะลงบนจานอะตอมไมเซอร์พร้อมกับเริ่มบันทึกเวลาที่บันทึกเวลาที่ ร่อนกระทั่งน้ำโลหะเกือบหมดปิดวาล์วพร้อมกับหยุดบันทึกเวลา (ไม่ควรเทน้ำโลหะจนหมดเพราะจะทำให้วาล์ว V4 อุดตันได้)
- 7) เก็บตัวอย่างผงโลหะโดยเปิดวาล์วผีเสื้อ V2 ให้ผงโลหะไหลลงมาเก็บในถังเก็บผงโลหะ นำผงโลหะไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาค่าอัตราเร็วในการเทน้ำโลหะเฉลี่ย
- 8) สำหรับเงื่อนไขในการทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขในการทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 โดยทีในแต่ละชุดการทดลองจะทำซ้ำรวม 2 ครั้ง

Exp. number	Angular speed (rpm)						Atomizer						Nozzle opening (mm)				Oxygen content (%)				
							Disc (mm)			Cup (mm)											
	5,000	10,000	15,000	20,000	25,000	30,000	30	40	50	30	40	50	0.5	0.8	1.0	2.0	21	10	5	2	
1				
2					
3						
4							
5								
6									
7							
8							
9							
10							
11							

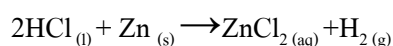
ตารางที่ 2.2 (ต่อ) เงื่อนไขในการทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 โดยที่ในแต่ละชุดการทดลองจะทำซ้ำรวม 2 ครั้ง

Exp. number	Angular speed (rpm)					Atomizer						Nozzle opening (mm)				Oxygen content (%)					
						Disc (mm)			Cup (mm)												
	5,000	10,000	15,000	20,000	25,000	30,000	30	40	50	30	40	50	0.5	0.8	1.0	2.0	21	10	5	2	
12				•				•						•				•			
13				•				•					•					•			
14						•					•			•				•			
15						•					•			•					•		
16						•					•			•						•	
17						•					•			•							•

2.3.3.1 การเตรียมสารเคมีสำหรับเคลือบผิวงานอะตอมไมเซอร์

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าสมบัติการเปียกที่ดีของน้ำโลหะกับวัสดุที่ใช้ทำงานอะตอมไมเซอร์เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซอร์ประสบความสำเร็จ โดยสามารถเพิ่มการเปียกของน้ำโลหะได้โดยเคลือบผิวงานอะตอมไมเซอร์ด้วยโลหะชนิดเดียวกับโลหะที่จะผลิตเป็นผง [Xie, *et al.*, 2004] โดยสารเคมีที่ใช้สามารถเตรียมได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) ตวงกรดเกลือเข้มข้น (Concentrate hydrochloric acid) 50 mL ใส่ในบีกเกอร์
- 2) ใส่ชิ้นโลหะสังกะสีลงในกรดเข้มข้นครึ่งละหนึ่งชิ้นกวนด้วยแท่งแก้วคน รอจนโลหะละลายหมดจึงใส่ชิ้นถัดไป ทำจนกระทั่งชิ้นโลหะสังกะสีไม่ละลายต่อ ระหว่างที่ละลายชิ้นโลหะจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนตามปฏิกิริยาต่อไปนี้



- 3) ตวงน้ำกลั่น 50 mL ใส่ในบีกเกอร์ จากนั้น นำสารละลายที่เตรียมไว้ไปกรองและนำมารินใส่ในบีกเกอร์น้ำซ้ๆ ก็จะได้น้ำยาบัดกรีสำหรับเคลือบผิวงานอะตอมไมเซอร์

2.3.3.2 การเคลือบผิวหน้างานอะตอมไมเซอร์

การเคลือบผิวหน้าของงานอะตอมไมเซอร์ที่ทำจากเหล็กเหนียวด้วยโลหะบัดกรีชนิด SAC305 โดยใช้ น้ำยาบัดกรีที่เตรียมตามข้อ 2.3.3.1 สามารถทำได้ดังนี้

- 1) นำงานอะตอมไมเซอร์ไปทำความสะอาดผิวหน้าโดยขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 200, 500 และ 1000 ตามลำดับ
- 2) ใช้ฟู่กันจุ่มน้ำยาบัดกรีทาที่ผิวหน้างานอะตอมไมเซอร์ จากนั้นอุ่นงานอะตอมไมเซอร์จนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีไว้สารตะกั่วชนิด SAC305
- 3) นำชิ้นโลหะบัดกรีรูปที่ผิวหน้างานอะตอมไมเซอร์เพื่อให้โลหะบัดกรีหลอมและเปียกผิวงาน ใช้ฟู่กันเกลี่ยให้เรียบสม่ำเสมอ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็น



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.18 (ก) ผิวหน้าของงานอะตอมไมเซอร์ที่ขัดด้วยกระดาษทราย และ (ข) ผิวหน้างานอะตอมไมเซอร์ที่เคลือบด้วยโลหะบัดกรีชนิด SAC305

2.3.4 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ขนาดผงโลหะด้วยตะแกรง

เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองผงโลหะจะไหลลงมารวมกันในถังเก็บผง (ผงโลหะบางส่วนจะค้างที่ผนังเครื่องผลิตผงโลหะจำเป็นต้องใช้แปรงทาสีกวาดเพื่อให้ไหลเข้าไปเก็บในถังเก็บผงโลหะ) ผงโลหะที่เก็บได้จะต้องนำไปชั่งตัวอย่างแล้วคัดขนาดด้วยตะแกรงดังขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) นำผงโลหะทั้งหมดมาชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปกรองผ่านตะแกรงเบอร์ 16 เพื่อคัดเอาเกล็ดโลหะออก

2) นำผงโลหะที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 มาชั่งตัวอย่างโดยแบ่งผงโลหะออกเป็น 4 กอง เลือกมา 2 กองผสมให้เข้ากัน จากนั้นแบ่งอีกครั้งให้ได้ 4 กอง เลือกมา 2 กองเพื่อนำไปคัดขนาดด้วยตะแกรง



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.19 (ก) ชุดตะแกรงมาตรฐาน ASTM E11 เบอร์ต่างๆ วางเรียงซ้อนบนถาดรอง และ (ข) เครื่องสั่นตะแกรง

3) เรียงซ้อนตะแกรงที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยลมอัดโดยเริ่มจากถาดรอง จากนั้นเรียงตะแกรงเบอร์ใหญ่ไว้ก่อนแล้วจึงซ้อนเบอร์ที่เล็กกว่าขึ้นไปแล้วใส่ผงโลหะลงในตะแกรงเบอร์ที่อยู่บนสุด สำหรับการวิจัยครั้งนี้ใช้ตะแกรงเบอร์ต่างๆ ดังนี้ 20, 30, 50, 70, 100, 140, 200, 270, 325, 400 และ 500 โดยเป็นตะแกรงตามมาตรฐาน ASTM E11 ผลิตโดยบริษัท ENDECOTTS จำกัด ลอนดอน ประเทศอังกฤษ ขนาดรูเปิดของตะแกรงมาตรฐานเบอร์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.3

4) นำตะแกรงวางบนเครื่องสั่นยี่ห้อ Octagon ผลิตโดยบริษัท ENDECOTTS จำกัด ลอนดอน ประเทศอังกฤษ ปรับความแรงในการสั่นระดับ 8 ใช้เวลา 10 นาที เมื่อครบตามเวลายกตะแกรงออกจากเครื่องสั่น

5) เทผงโลหะที่ค้างตะแกรงแต่ละชั้นออก นำไปชั่งน้ำหนัก

6) นำข้อมูลที่ได้พล็อตด้วยกระดาษกราฟล็อกปกติเพื่อหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และพิจารณาลักษณะการกระจายขนาดของผงโลหะ

ตารางที่ 2.3 ขนาดรูเปิดของตะแกรงมาตรฐาน ASTM E11 ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ในหน่วยไมครอนเทียบกับเบอร์เมช

Mesh number	Aperture (μm)
16	1,180
20	850
30	600
50	300
70	212
100	150
140	106
200	75
270	53
325	45
400	38
500	25

2.3.5 การวิเคราะห์รูปร่างของผงโลหะ

1) สุ่มเก็บผงโลหะที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 400 และ 500 ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง $-45+38 \mu\text{m}$ และ $-38+25 \mu\text{m}$ ตามลำดับ นำไปเกลี่ยบนแผ่นสไลด์แก้วและใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงยี่ห้อ Olympus รุ่น BH2-UMA ตรวจสอบรูปร่างของอนุภาคผงโลหะ

2) สุ่มเก็บผงโลหะที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 400 และ 500 ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง $-45+38 \mu\text{m}$ และ $-38+25 \mu\text{m}$ ตามลำดับ นำไปตรวจสอบรูปร่างของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-5800 LV

3) นำภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่ผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่ต่างกันมาตรวจวัดค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลม (Circularity shape factor, ϕ) ตามสมการที่ 2.22 [Yule and Dunkley, 1994]

$$\phi = \frac{P^2}{4\pi A} \quad \dots 2.22$$

เมื่อ	P	คือ	ความยาวเส้นรอบวง (Perimeter) ของอนุภาคผงโลหะ
	A	คือ	พื้นที่ภาพฉายของอนุภาคผงโลหะ

2.3.6 การเตรียมตัวอย่างเพื่อส่งวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนของผงโลหะ

1) สุ่มเก็บผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 มาบางส่วน จากนั้นนำมาคัดขนาดด้วยชุดตะแกรงมาตรฐาน ASTM E11 ประกอบด้วยฝาครอบ ตะแกรงเบอร์ 325 และ 500 เมช และ ถาดรองผง ตามลำดับจากบนลงล่าง จากนั้นเทผงโลหะตัวอย่างลงไป นำไปสั่นด้วยเครื่องสั่นตะแกรงเป็นเวลา 10 นาที โดยปรับระดับความแรงไปที่ระดับ 8

2) นำผงโลหะที่ได้ไปบรรจุในซองอลูมิเนียมและปิดปากซองเพื่อส่งตรวจวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจน

3) นำผงโลหะไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจน (Oxygen content analysis) ยี่ห้อ LECO รุ่น RO-400 ใช้วิธีวัดค่าแบบ Inert gas fusion ตามมาตรฐาน ASTM E1409 และ E1937 [ที่มา: www.leco.com] ซึ่งมีหลักการคือ หลอมโลหะตัวอย่างในเบ้ากราไฟต์ที่มีความบริสุทธิ์สูงที่อุณหภูมิ 3,000°C อย่างรวดเร็วภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อยเช่น ฮีเลียม เป็นต้น ออกซิเจนในตัวอย่างจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจากเบ้ากราไฟต์ได้เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ ส่วนไนโตรเจนจะถูกปล่อยออกมาและอยู่ในรูปโมเลกุลคู่ (N_2) จากนั้นอุปกรณ์ตรวจชนิดคลื่นอินฟราเรด (Infrared detector) ซึ่งสามารถตรวจรู้ปริมาณของออกซิเจนทั้งในรูปคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์จะตรวจหาปริมาณของออกซิเจน ส่วนโมเลกุลไนโตรเจนจะถูกตรวจจับโดยเทอร์มัลคอนดักติวิตีเซลล์ (Thermal conductivity cell)

จากการทดลองพบว่า ปฏิกิริยาการนี้ เกิดขึ้นมากในช่วงเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง และหลังจากนั้น ปริมาณของสารที่เกิดขึ้นจะคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงอีกต่อไป ซึ่งระยะเวลาและความรุนแรงของปฏิกิริยาการนี้ จะไม่เท่ากันในแต่ละครั้ง ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น อุณหภูมิ ความดันของแก๊ส และรูปร่างของจาน

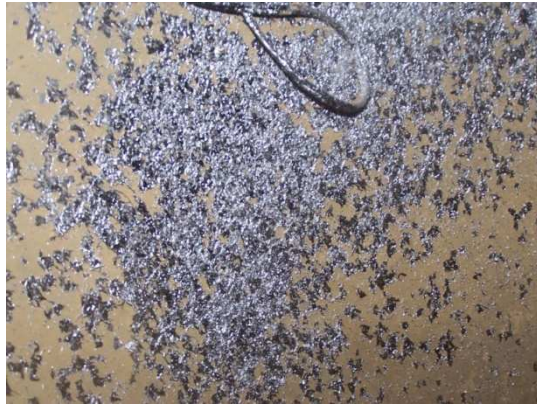


รูปที่ 3.21 ผนัง ของจานอะตอมไมเซอร์ ทรงแบนซึ่งมี ก้อนโลหะดีบุก เกาะ



รูปที่ 3.22 ก้อนโลหะดีบุก ที่แข็งตัวบนผนัง ของจานอะตอมไมเซอร์ขนาดแบบ 50 mm ซึ่งถูกเหวี่ยงออกจากจานอะตอมไมเซอร์

อัตราส่วนของโลหะเป็นอ็อกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการนี้ โดยเมื่ออุณหภูมิของโลหะสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาการนี้จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาการนี้ จะลดลงในช่วงเวลาที่สั้นๆ ก่อนโลหะที่ถูกเหวี่ยงออกจากจานอะตอมไมเซอร์ แสดงในรูปที่ 3.23 ตรงกันข้ามหากอุณหภูมิของโลหะสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาการนี้ จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ผลให้ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้ สูงกว่าปกติถึง 10% ซึ่งมีสิ่งสกปรกมาก



รูปที่ 3.4แผ่นโลหะชุบ คกรีน ชนิด SAC305 เกาะที่ผนัง กระจกเว้าเครื่องผลิต ตวงโลหะ



รูปที่ 3.5ก้อนโลหะที่ ' อยู่ ' รอบๆ งานอะตอมไมเซอร์ เนื่องจากไม่สะอาดการ
ไมเซอร์ น



รูปที่ 3.6ผงโลหะชุบ คกรีน ชนิด SAC305 ผลิต ตัด ด้วยเครื่องผลิต ตวงโลหะที่ ส
ภายใต้ กระจกปริ บปรุ งสมบัติ การเป็ ยกระหวั างผิ วของในอะต
เซอร์ และนํ ้าโลหะแล้ว

3.2.2 สมบัติการเปียกระหว่างจานอะตอมไมเซอร์และน้ำโลหะ

ช่วงแรกของการทดลองผลิต ตวงโลหะบับ ดกรี ชนิด SAC305พบว่าโลหะที่ เทลงบนจานอะตอมไมเซอร์ ไม่ได้ เปลี่ยนเป็น นละองน้ำ โลหะที่เปียกจนโลหะเกาะติด ผ่น ึ่งของกรวยด้ ึ่งแสดงในรูปที่ 3.4 บางส่วนเปลี่ยนเป็น น้ำ อนโลหะเกาะกับอะตอมไมเซอร์ ด้ ึ่งแสดงในรูปที่ 3.5 ปรากฏการณ์ เหล่า นี้ ้ไม่ พบว่า เกิด คี อธิบายถึงสาเหตุที่โลหะดี บุก ึ่งจากการ ทบทวนวรรณกรรมพบว่า สาเหตุ ก็ อสมบัตื การเปีย กที่นี้ มี ึ่งเกิดบนผิ วจานอะตอมไมเซอร์ โดยสมบัตื การเปีย ก (Wetting) ก็ อ สมบัตื ทางอุ ณหพลศาสตร์ที่บ่ ึ่งตอบอกว่า ึ่งของเหลวสามารถแผ่ กระจายบนของแข็ง ได้ ดี ึ่งเพื่ ยงใด [German,2005] ในกรณีนี้ ึ่งได้ ึ่งปรับปรุ ึ่งสมบัตื การเปีย กระหว่าง ึ่งน้ำ โลหะและจานอะตอมไมเซอร์ โดยการเคลือ บจานอะตอมไมเซอร์ ด้ ึ่งด้วย สดุ ชนิด เดียวกับ บัว ตตุ ด้ ึ่งบลั ึ่งสำหรับ ึ่งผลิต ตวงโลหะ ผลที่ได้ ึ่งที่ ึ่งถูกน้ำ โลหะ ึ่งกลายเป็ นละองและ ึ่งกลายเป็ นผงละเอียด (รูปที่ 3.6) ตกกระจายที่ ึ่งผ่น ึ่งกรวยด้ ึ่งตามมี ึ่งปรับปรุ ึ่งสมบัตื การเปีย กแล้ว ึ่งถึงที่ ึ่งตามมาก็ ึ่งอเก ึ่งค้ ึ่งอนโลหะแข็ง ึ่งด้ ึ่งบนจานอะตอมไมเซอร์ ึ่งแต่ ึ่งสามารถลดความรึ ึ่งนแรงได้ ึ่งโดยอู ึ่งบนจานอะตอมไมเซอร์ ึ่งอเนริ ึ่งมผลิ ตตามที่ ึ่งกล่าวในห้ ึ่งว้ ึ่งอที่ ึ่งผ่ ึ่งานมา



(ก)

(ข)

รูปที่ 3. ปรากฏการณ์ ที่ ึ่งน้ำ โลหะไหลและแตกด้ ึ่งบนจานอะตอมไมเซอร์ ึ่งที่ ึ่งกั ึ่งหมุ ึ่งนด้ ึ่งวยความเร็ว ึ่งว 30,000 rpm เมื่ออ้ ึ่งตราเทณ ึ่งน้ำ โลหะ ึ่ง (ก)
 ช่วงแรกกั ึ่งอนระบบเข้ ึ่งาสู ึ่งสมดุ ึ่งลและ (ข)เมื่อระบบเข้ ึ่งาสู ึ่งสมดุ ึ่งล



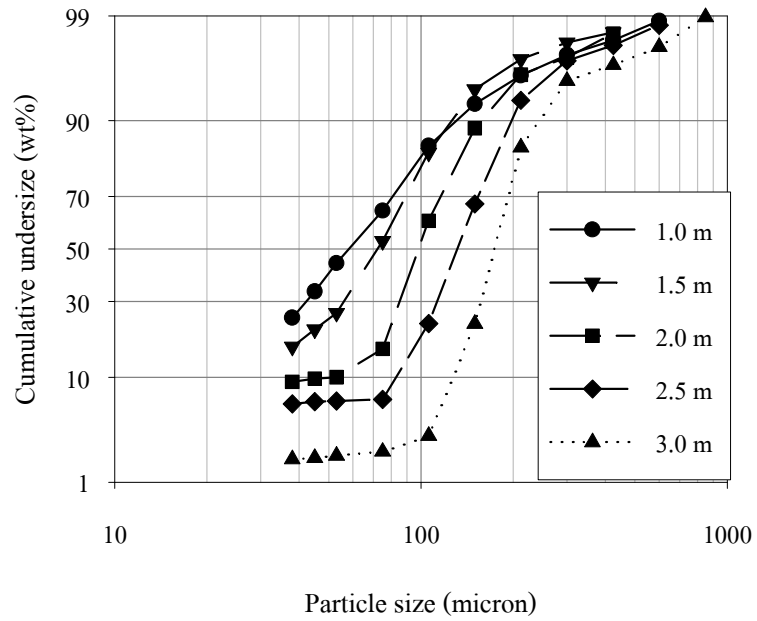
(ก)

(ข)

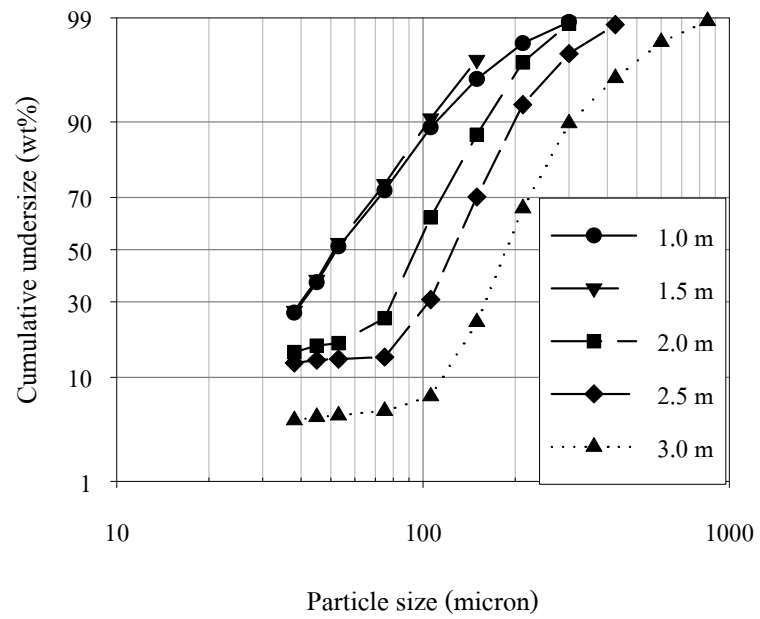
รูปที่ 3.8 ปรากฏการณ์ ที่นี้ โลหะไหลและแตกตัว บนจานอะตอมที่ กำลัง หมุนด้วยความเร็ว 30,000 rpm เมื่ออัตราเท่น โลหะ $\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ ชั่งวงแรกก่อนระบบเข้าสู่ สมดุล และ (ข) เมื่อระบบเข้าสู่ สมดุล

3.2.3 ปรากฏการณ์ไฮดรอลิกจัมพ์

ตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 สาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์ไฮดรอลิกจัมพ์คืออัตราและความต่อเนื่องในการเท่น โลหะไม่สมดุลกับอัตราเร็วของชั้น boundary layer region จากการทดลองพบว่าเมื่อเท่น โลหะด้วยอัตรา $1.261 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ ชั่งวงแรกจะสังเกตเห็นก่อนโลหะเกาะบนจานอะตอมไมเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ก) เมื่อเวลาผ่านไปชั้นโลหะหนาดังกล่าวจะหายไป การไหลของน้ำ โลหะบนจานอะตอมไมเซอร์ จะระบบและแตกตัวเป็นละอองที่ขอบจานดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ข) แต่เมื่อเพิ่มอัตราเท่นเป็น $184 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ หรือ $10.29 \times 10^3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ พบว่าในช่วงแรกเท่น โลหะลงบนจานอะตอมไมเซอร์ จะไหลออกไปรอบๆ เป็นระยะทางสั้นๆ แล้วจึงยกตัวขึ้นจากผิวของจานอะตอมไมเซอร์ และพ่นออกมาเป็นหยดน้ำขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ก) จากรูปที่ 3.8 (ก) ได้เห็นว่าไม่มีขอบเขตที่ชัดเจนกับรูปที่ 3.7 (ก) เมื่อเวลาผ่านไป ลักษณะหนึ่ง ความรุนแรงของการยกตัวขึ้นจะลดลงแต่ได้พบอยู่ ซึ่งจากรูปที่ 3.8 (ข) เห็นได้ว่า หยดน้ำ โลหะยังคงมีอยู่ แต่มีลักษณะที่ 3.8 (ก) นี้ โลหะบางส่วนสามารถไหลจนกระทั่งถึงขอบของจานอะตอมไมเซอร์ และแตกตัวเป็นละอองลอยภายใต้การทดลองพบว่า มีเกิด โลหะเกาะติดกับจานอะตอมไมเซอร์ เป็นแผ่นบางที่ชัดเจนในรูปที่ 3.4

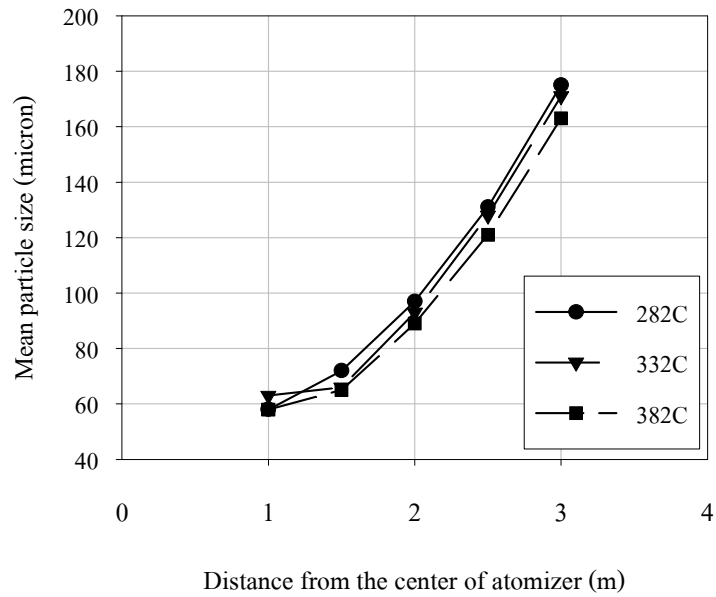


(ก)

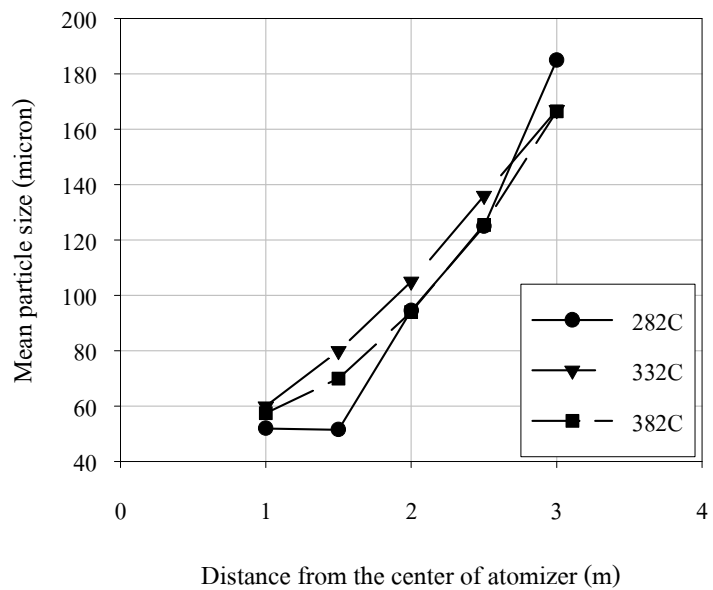


(ข)

รูปที่ 3. การกระจายขนาดของผงโลหะดีบุกที่ระยะห่างจากจานอะตอมของ
 ต่ วงกั น เมื่ อใช้ จานอะตอมไมเซอร์ ขนาด 50 mm (ก) ทรงกลม
 ทรงถึ วย ความเร็ว วนรอบ 20,000 rpm อี ตรีแทน ้า โลหะ 150 กก หนัก มี
 282°C



(ก)



(ข)

รูปที่ 3. ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากจุดศูนย์กลางงานอะตอมไมเซอร์ กับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุกเมื่อใช้ (ก) อะตอมไมเซอร์ ทรงกลมขนาด 50 mm และ (ข) งานอะตอมไมเซอร์ ทรงถึวขนาด 50 mm ความเร็วรอบ 20,000 rpm อัตราเทน้ำโลหะ $\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิ มีที่ 282°C, 332°C และ 382°C

3.3 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของผงโลหะ

3.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากจานอะตอมไมเซอร์กับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ ดีบุก

ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุก ที่ระยะห่างต่าง ๆ วั ดยที่กวดูดจากจานอะตอมไมเซอร์ แสดงในรูปที่ 3.9 (ก) และ (ข) พบว่า การกระจายขนาดของผงโลหะดีบุก ที่ระยะห่าง 1.0 และ 1.5 m มีลักษณะเป็นเส้นตรงโดยที่ปลายด้านบนที่ ระยะห่าง 2.0, 2.5 และ 3.0 m กราฟมีลักษณะคล้ายกราฟ 2 เส้นแรกแต่ปลายด้านล่างที่ ระยะห่าง 2.0, 2.5 และ 3.0 m มีความไม่ สม่ าสมของขนาด กล่าวคือ ปลายที่งอที่ ึ่งด้ ้นบนแสดงให้ เห็นว่า ผงโลหะดังกล่าวมี การกระจายขนาดอยู่ ด้ วยกัน 3 กลุ่ม คือ กลุ่มโลหะดีบุก มหยาบ และเมื่อพิจารณาเฉพาะช่วงกลางของกราฟแต่ละเส้นพบว่า ที่ระยะห่าง ความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้น หรือ กล่าว อีกนัยหนึ่งคือ ผงโลหะกระจายที่ อยู่บ่ลใน ระยะห่าง มากขึ้น และกราฟแต่ละเส้น เรียงจากระยะห่างนี้ ไปหาระยะห่างมากขึ้น ไปทางซ้าย สามารถสรุปได้ ว่า ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างที่มากขึ้น แสดงในรูป (ก) และ (ข)

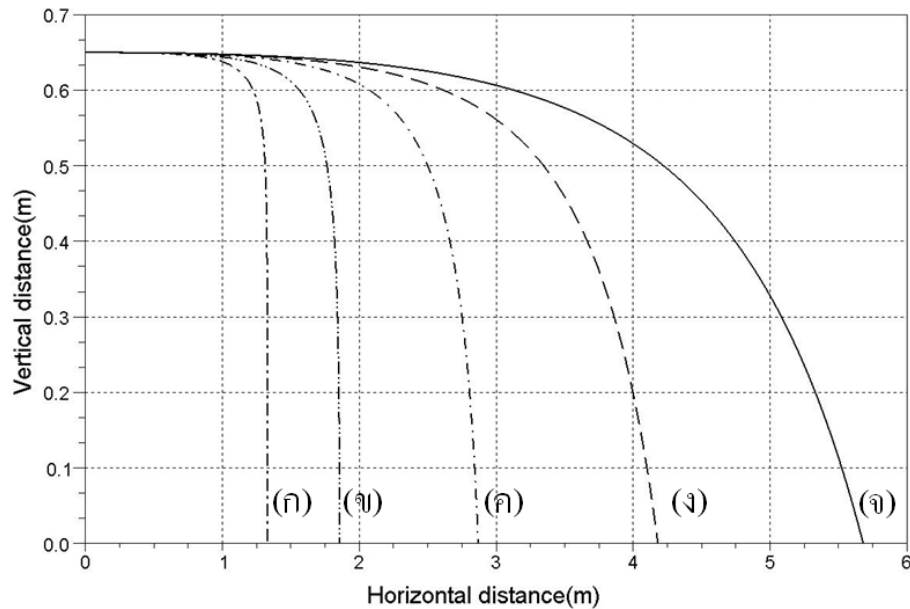
ผลการคำนวณวิถีการเดินทางของละอองน้ำโลหะดีบุก

จากบทที่ 2 การคำนวณหาระยะทางไกลสุด ดที่ ละอองน้ำ โลหะที่ กวดูดของแข็ง อยู่ ังสมบุ รณ์ เพื่อตรวจสอบผลจากการคำนวณจึง ได้ ออกผลของผลิต ผงโลหะดีบุก ซึ่งมีเงื่อนไขในการผลิต ดังนี้

- (1) ความเร็ว ีวรอบของจานอะตอมไมเซอร์ 20,000 rpm
- (2) ขนาดของจานอะตอมไมเซอร์ 50 mm
- (3) อัตราเท่น้ำ โลหะ $\frac{159 \text{ kg}}{\text{hr}}$
- (4) จานอะตอมไมเซอร์ ทรงแบน
- (5) อุณหภูมิ เเท่น้ำ โลหะ 283, 332 และ 382 °C

ค่าเฉลี่ยของผงโลหะที่ ผลิต ด้ ้วยเงื่อนไขดังกล่าวที่ ระยะห่าง แสดงในรูปที่ 3.10 (ข) มาคำนวณหาวิถี การเดินทางของละอองน้ำ โลหะดีบุกสมการที่ แสดงไว้ ในบทที่ 2 พบว่า ระยะทางจากการคำนวณมี ค่า สูง ังกว่า ผลการทดลองที่ กระจายด้ ้วยผลิต 3.11 เมื่อเริ่มแตก ด้ ้วยที่ ขอบจานอะตอมไมเซอร์ ละอองน้ำ โลหะทุก ขนาดมี รัศมี บ่กว่า ัน แต่ เมื่อผ่านไปสั กครู่

ละอองน้ำ โลหะที่มี ขนาดเล็ก กว่ จะลดระดับ บความสูงของกษเดี นทางอนุ ภาคขนาด 58 และ 72 μm ตกกลงมาในแนวคิ่งไม้ ได้ เป็ นวิ ถี ใ้ ก้ งเหมี อกั บอนุ ภาคที่ มีาขนาดใหญ กว

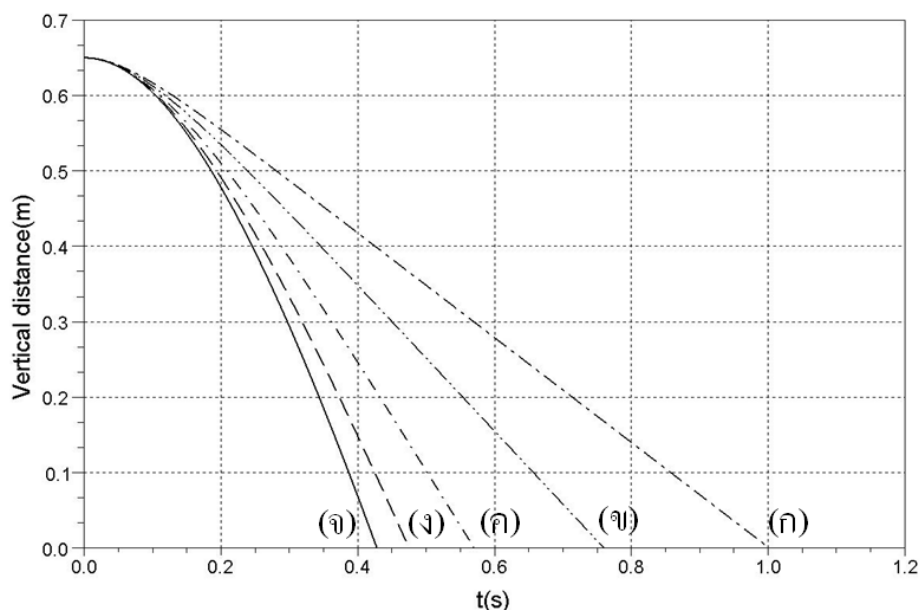


รูปที่ 3. ความสัมพันธ์ ระหว่าง ระยะทางในแนวคิ่งกับ ระยะทางในแนวระ ของละอองน้ำ โลหะคิ่ง นุ กซึ่ง มี ขนาด (ก) 58 (ข) 72 (ค) 197 และ (ง) 175 μm

ความสัมพั นธ์ ระหว่าง ระยะทางในแนวคิ่งของละอองน้ำ โลหะคิ่งลิตาต์ ่างๆ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.12 พบว่า ละอองน้ำ โลหะที่มี ขนาดเล็กกว่ ที่ น้ ก่อนละอองน้ำ โลหะที่มี ขนาดเล็ก ก่ นกราฟของละอองน้ำ โลหะขนาด 58 และ μm ในช้ วงประมาณ 0.1 s กราฟที่ ึ่ง 2 ี่ นมี ล้ กษณะเป็ นเส้น คิ่งแต่ หลั งจากเวลาประมาณ 0.15 s เป็ นเส้น ึ่งของอนุ ภาค 58m มี ล้ กษณะเป็ นเส้น นตรงมี ความชันคิ่งที่ ในขณะที่ ี่ เส้น กราฟของขนาด 175 μm ึ่งใช้ เวลานานกว่า ความเร็ว วิ จี ึ่งจะคิ่งที่ (จากรูปประมาณ 0.3 วิ ึ่งที่)ของการคิ่ง นทางกราฟทุ กเส้น นมี ล้ กษณะเป็ นเส้น นตรงแต่ มี ความชันคิ่ง น้ ึ่งไป กราฟที่ ึ่งอนุ ภาคใหญ่ ึ่งจะมีความชันสูง ึ่งกว่า ึ่งของอนุ ภาคขนาดเล็ก กเวลาที่ ึ่งอนุ ภาคขนาดโตกว่ ึ่งใช้ ในการคิ่ง น้ ึ่งอนุ ภาคที่ ขนาดเล็ก กกว่า ึ่งภายใต้ ึ่งเอนไขการตกอย้ ึ่งอิ สระที่ ระดับ บความสูง ึ่งามเร็วกว่ ึ่งคิ่ง ที่ ึ่งของแต่ ละอนุ ภาคก่อนตก ถึง ึ่งที่ ึ่งสามารถประมาณได้ จากค่า ความชันของเส้น กราฟแต่ ละเส้น ึ่งเป็ นเส้น ึ่งตรง

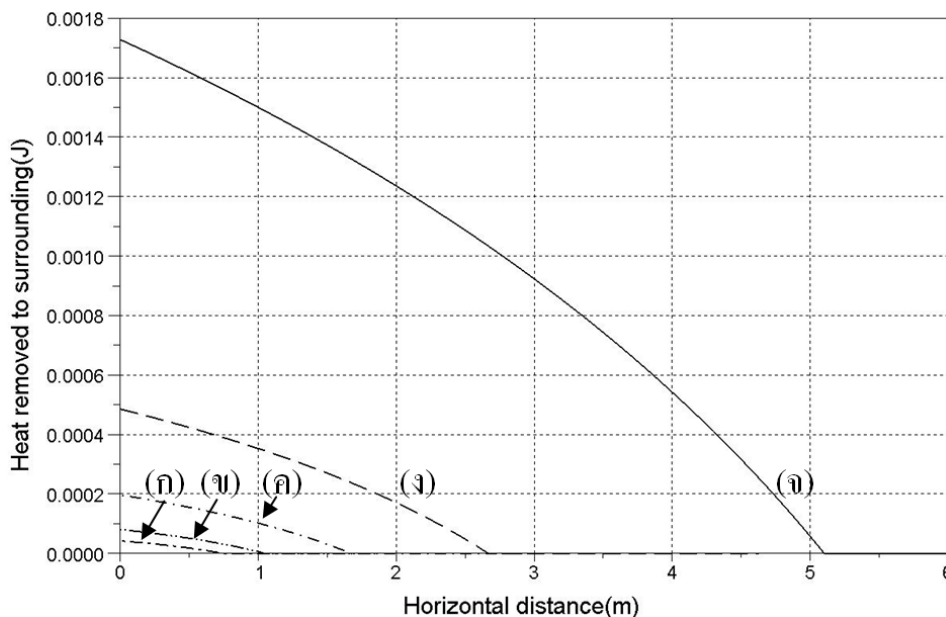
ล้ าหรับ บค้ า ความรู้ ึ่งอื่นที่ ละอองน้ำ โลหะคิ่ง นุ กค้ ึ่งจะกษณะที่ ึ่งเปลี่ยนแปลง สถานะจากของเหลวเป็ นของแข็ง ึ่งอย้ ึ่งสมมุ ึ่งร์ ึ่งถึ ึ่งเป็ นเป็ นสัญญานที่ ึ่งสำ รอกแบบบถ้ ึ่งจะตอม

ไมเซอร์ กล่าวไว้ อหากออกแบบให้ มี ขนาดเล็ก ก่เกิ นไป จะได้ออกน้ำ โลหะไม่ สามารถถ่ายเท ความรู้ ่อนเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็ นของแข็ง ย่อย ่างสมบู รณ์ ก่เกิ นนี้ ก่ าหนดให้ อุณหภูมิ ของ ละอองน้ำ โลหะที่แตกตัวบริ เวณขอบจานอะตอมไมเซอร์, แทนที่ ขั้วลอมเหลวของโลหะและ มีสถานะเป็ นของเหลวที่ ังหมดด้ ังนี้ น้ าคำความรู ่อนที่อ่ านได้ขนาดอนุ ะพี 53 มีค่าเท่ากับ ปริมาณความรู้ ่อนแฝงของการหลอมเหลวของอนุ ภาคแต่ ละขนาดนี้ น้ าคำความรู ่อนเรื่ มต้ นจึงไม่ เท่ ากั น ด้ ำ ำแห่ง สดุ คที่ ายที่ กราฟแต่ ละเส้ นด้ ำ ำขนาดที่ อนุ ภาคแต่ ละขนาดใช้ เพื่อเปลี่ยนสถานะเป็ นของแข็ง ย่อย ่างสมบู รณ์ ช้ ำ ำการคิ งนิ ทางของละอองน้ำ โลหะที่มี ขนาด 58, 72 และ 97 μm มี ล้ ำ ำขณะเป็ นเส้ น ำ ำได้ ำ ำความซ้ นเปลี่ยนแปลงนี้ อย ำ ำเมื่อ ำ ำ ความซ้ นมี ค่า สดุ ำ ำงี้ ำ ำเรื่ อยๆ แต่ ส้ ำ ำหรั บอนุ ภาคขนาด μm ำ ำพว่ ำ ำล้ ำ ำขณะที่ ำ ำความซ้ น ค้ ำ ำ ำ ำเพิ่มในช้ ำ ำวงเรื่ วมออกเคิ นทาง (หล้ ำ ำงจากหลุ ด้ ำ ำจากขอย ำ ำในออร์) ำ ำรากฏให้ ำ ำเห็นเพื่ ยง ช้ ำ ำวงล้ ำ ำ ำ ำหล้ ำ ำงจากน้ ำ ำความซ้ นของกราฟจ้ ำ ำงเพิ่มจ้ ำ ำ ำน้อย ำ ำงรวดเรื่ ำ ำ



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ ระหว่าง ระยะทางในแนวตั้งของละอองโลหะดีบุก ขนาด (ก) 58 (ข) 72 (ค) 97 (ง) 131 และ (จ) 175 μm ณ เวลาที่ ำ ำงๆ

จากรูปที่ 3.13 สามารถสรุปได้ ว่า เมื่ออุณหภูมิ แทน โลหะที่เก็บก่อนในภา ในการผลิตเหมื่ ำ ำนอ ำ ำภาคที่มี ขนาดโตกว่ ำ ำด้ ำ ำองใ ำ ำการคิ งนิ ทางเพื่อถ่ายเทความรู้ ่อนสู ล้ ำ ำงแวดล้ ำ ำอมมากกว่า ำ ำอนุ ภาคที่มี ขนาดเล็ก กว่ ำ ำเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็ นของสมบู รณ์



รูปที่ 3.13. ภาพแสดงค่า ความร้อนที่ ละอองน้ำ โลหะดีบุก ขนาด (ก) 250 μm (ข) 97 (ง) 131 และ (จ) 175 μm ถัด ายเทส ' ลี ' ง แวดล ' อมเพื่อเป็ล ' ยนสถานะจากของเหลวเป็ นของแข็ง กั บระยะทางในแนวระนาบ

3.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทน้ำโลหะกับขนาดเฉลี่ยผงโลหะดีบุก

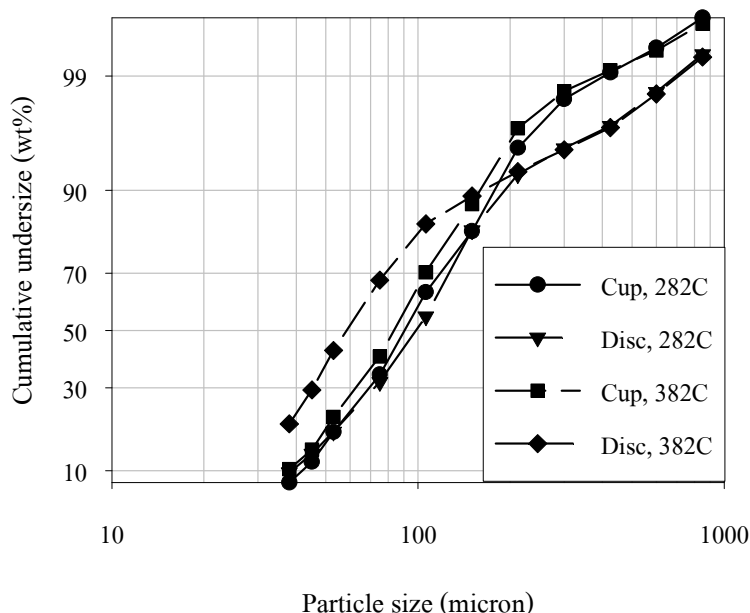
การกระจายขนาดของผงโลหะดีบุก ที่ผลิตด้วยงานอะตอมไมเซอร์ที่ อุณหภูมิ 282 และ 332°C (รูปที่ 3.14) กราฟที่ กั้นกันที่ เกิดขึ้นก็ เป็นเส้นตรง 2 ช่วง ประกอบด้วยขนาดละเอียดซึ่งอยู่ ' ในช่วง -200-300 μm และขนาดหยาบซึ่งอยู่ ' ในช่วง -850-1000 μm น้ำหนักสะสมร้อยละ 90 และขนาดหยาบที่อยู่ที่ เทสสูงได้ กกว่า ที่ อุณหภูมิ เทต่ำ กว่า ได้ กนั้น ซึ่งที่ ผลิตด้วยงานอะตอมไมเซอร์ ทรงแบนพบว่า มี การกระจายขนาดด้วยกับ ผงโลหะที่ ผลิต จากงาน อีทเซอร์ ทรงด้วยโดยเฉพาะ ผงโลหะที่มี อุณหภูมิ เทต่ำ แต่ ที่ อุณหภูมิ สูง ซึ่ง มี ขนาดที่ สกปรกกว่า ก็ อ -10 μm เป็น น้ำหนักสะสมร้อยละ 80 และที่ เหลือ เป็นขนาดหยาบซึ่ง 850-1000 μm

ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ อุณหภูมิ เทต่ำ ่างๆ สามารถค้ ในตัวสมการที่ 1.1 โดยสมการที่ ใช้ ประมาค้ ความตึงผิว (γ_{sn}) (และความหนาแน่น ρ_{sn}) ของน้ำ โลหะดีบุก ที่ อุณหภูมิ ต่ ่างๆ มี ดั งต่อไปนี้

$$\gamma_{sn} = 0.580 - 6.5 \times 10^{-5} (T + 273) \quad \dots 3.1 \text{ (ที่ มา: โปรแกรม SURDAT)}$$

$$\rho_{sn} = 7,276.522 - 0.6389 (T + 273) \quad \dots 3.2 \text{ (ที่ มา: โปรแกรม SURDAT)}$$

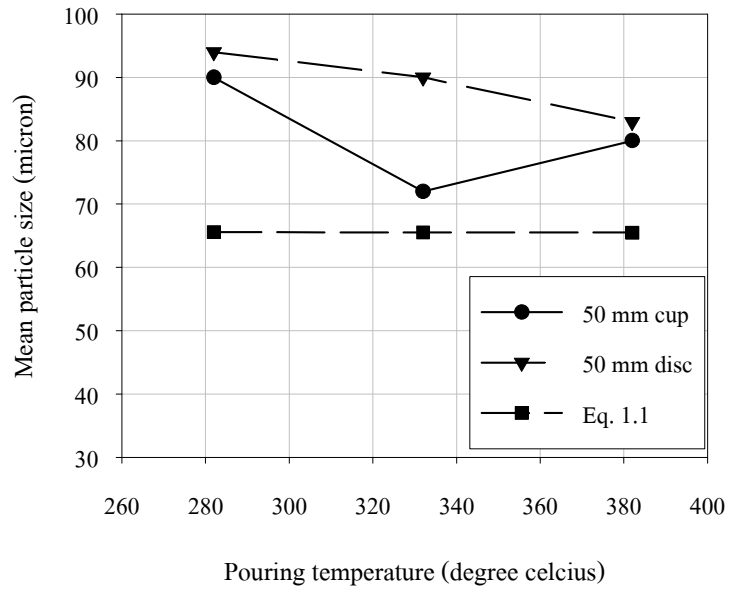
เมื่อ T คือ อุณหภูมิ ของน้ำ โลหะดีบุก ($^{\circ}\text{C}$)



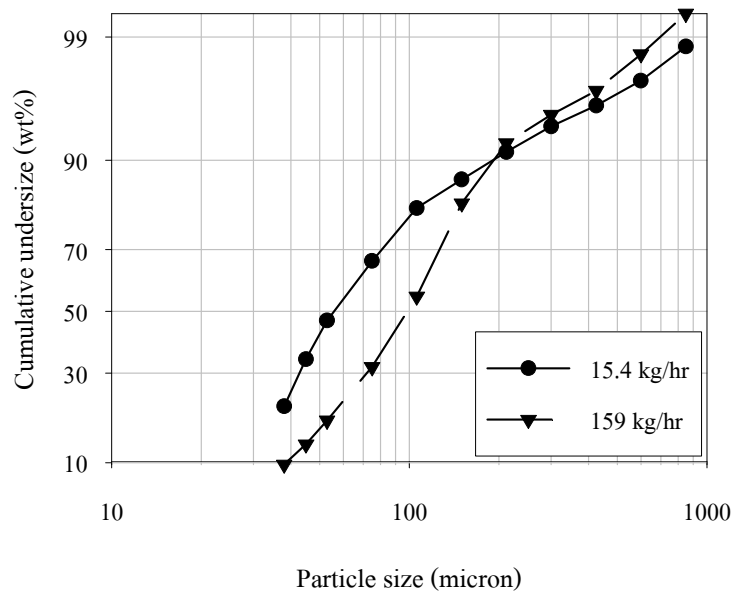
รูปที่ 3.14 การกระจายขนาดของผงโลหะดีบุก ที่ผลิตด้วยไมเซอร์ ทรง
ถ้วยและทรงแบนขนาด 50 mm ความเร็ว วนรอบ 20,000 rpm อัตรา
โลหะ $150 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$

ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุก ที่ได้ จากผลการคำนวณปริมาตรที่แสดง
แสดงในรูปที่ 3.15 พบว่า ขนาดเฉลี่ยที่ได้ จากสมการที่ 1.1 นั้น ากว่า ขนาดที่ได้ จากผลการทดลอง
โดยเมื่ออุณหภูมิ สูงขึ้น จาก 282°C เป็น 382°C ขึ้นได้ ผลสมการที่ 1.1 แต่พบไม่
เปลี่ยนแปลง แต่ ขนาดเฉลี่ยจากการทดลองกลับลดลงประมาณ 1.1 เท่าที่ได้ จากงานอะตอม
ไมเซอร์ ทรงแบนและทรงถ้วย

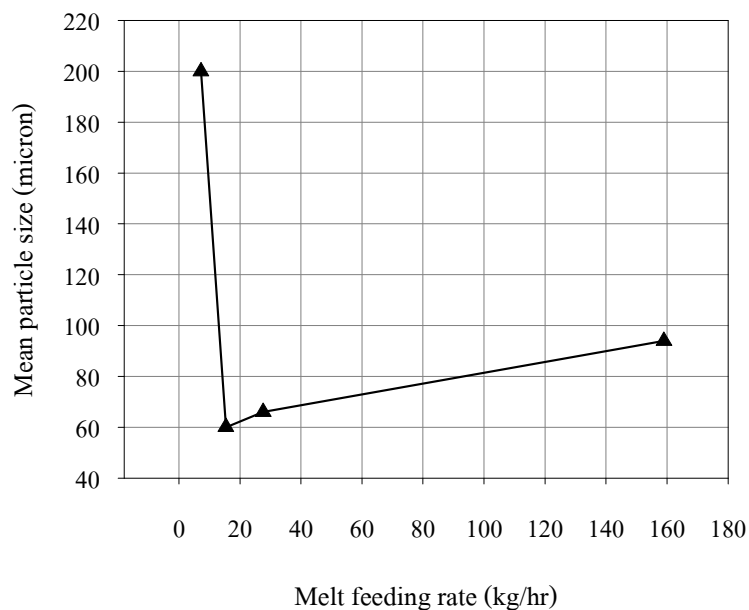
ผงโลหะที่ผลิตด้วยงานอะตอมไมเซอร์ ทรงแบนมีขนาดเฉลี่ยที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ เท
สูงขึ้น แต่ ผลจากงานอะตอมไมเซอร์ ทรงถ้วยที่ผลิตโดยอุณหภูมิ เท 332°C
ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้ เล็กกว่า ผงโลหะที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ เท 382°C แต่ ก็ สามารถสรุป
ได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เทให้สูงขึ้น ผงโลหะที่ผลิตได้ จะมีแนวโน้มที่ขนาด
เฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตด้วยงานอะตอมไมเซอร์ ทรงถ้วยที่อุณหภูมิ เท 332°C นั้นพบว่า ผงที่ได้ มี
ขนาดเล็กกว่า ที่ผลิตจากงานอะตอมไมเซอร์ ทรงแบน



รูปที่ 3. ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุกกับอุณหภูมิหล่อโลหะเมื่อรูปทรงของจานอะตอมไมเซอร์เป็นทรงแบนและของถ้วยขนาด 50 mm ความเร็วรอบ 20,000 rpm อัตราเทน้ำโลหะ $\frac{kg}{hr}$



รูปที่ 3. การกระจายขนาดของผงโลหะดีบุกเมื่ออัตราเทน้ำโลหะ 15.4 $\frac{kg}{hr}$ จานอะตอมไมเซอร์ ทรงแบนขนาด 50 mm ความเร็วรอบ 20,000 rpm อุณหภูมิ มีเท 282°C



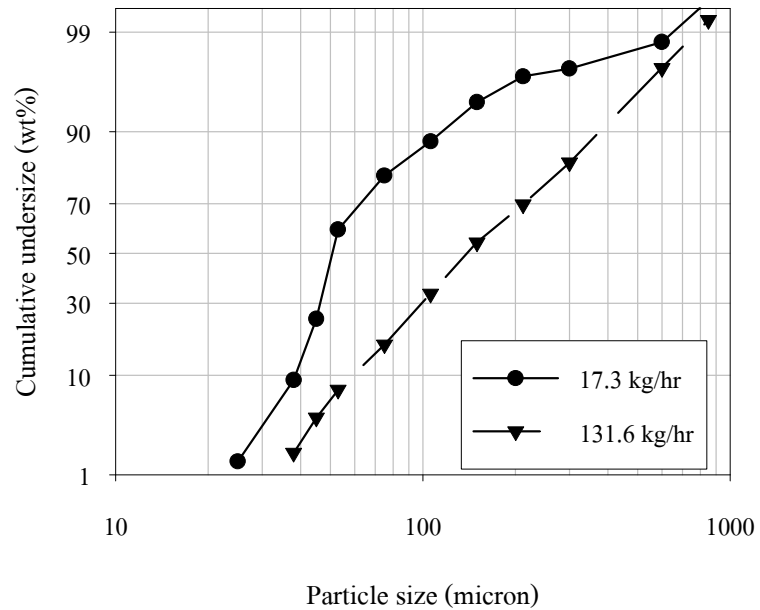
รูปที่ 3. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำโลหะกับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ใช้จานอะตอมไมเซอร์ ทรงแบนขนาด 50 mm ความเร็วรอบ 20,0 rpm อุณหภูมิ มีที่ 282°C

3.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำโลหะกับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ

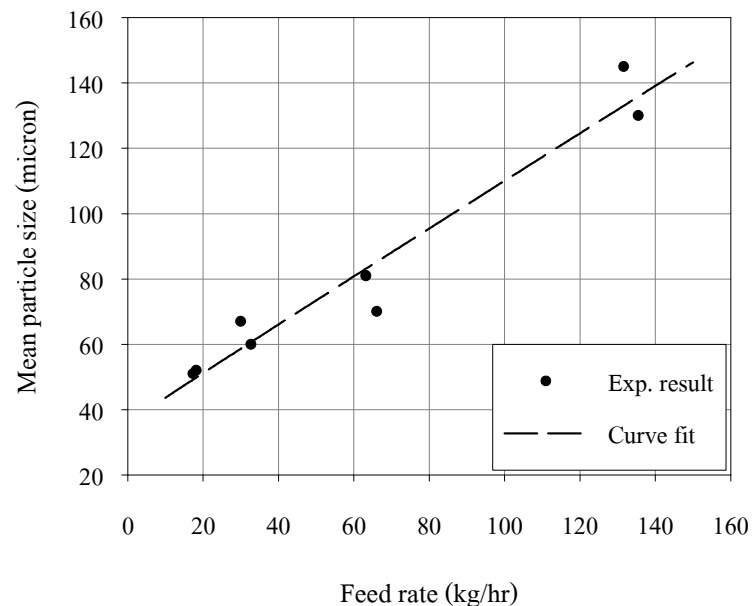
ผงโลหะดีบุก

สำหรับการกระจายขนาดของผงโลหะดีบุกที่อัตราการไหล 5.5 (รูปที่ 3.16) ให้ผงโลหะ 2 ช่ว ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุกอยู่ในช่วง $10-38 \mu\text{m}$ เป็นน้ำหนักสะสมร้อยละ 80 ที่เหลือเป็นขนาดหยาบซึ่งอยู่ในช่วง $50-100 \mu\text{m}$ เมื่ออัตราการไหลเป็น 1.59 ผงโลหะดีบุกมีช่วงที่กว้างขึ้นคือ $2-38 \mu\text{m}$ เป็นน้ำหนักสะสมร้อยละ 90 แต่ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ได้มีค่าสูงกว่าอัตราการไหลที่ต่ำกว่า

ผลการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำโลหะกับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะพบว่าขนาดเฉลี่ยของผงโลหะเล็กลงเมื่อลดอัตราการไหลที่รูปที่ 3.17 แต่เมื่ออัตราการไหลของน้ำโลหะลดต่ำเหลือเพียง $7.2 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ ขนาดเฉลี่ยกลับสูงขึ้นมากโดยผงโลหะที่เก็บได้มีลักษณะเป็นใหญ่ หยาบและพบก้อนโลหะแข็งตัวเกาะผิวจานอะตอมไมเซอร์เป็นจำนวนมาก



รูปที่ 3.1 การกระจายขนาดของผงโลหะบับ คกรีน ซี ค SAC305 เมื่อใช้ อัตราเท โลหะเท กั บ $17.3 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ และ $131.63 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ งานอะตอมไมเซอร์ ทรงแบน ขนาด 50 mm ความเร็ว วนรอบ 20,000 rpm อุณหภูมิ มี เท 318°C



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ ระหว่าง อัตราเท โลหะเท กั บขนาดเฉลี่ยของผง โลหะบับ คกรีน ซี ค SAC305 เมื่อใช้ งานอะตอมไมเซอร์ ทรงแบน ขนาด 50 mm ความเร็ว วนรอบ 20,000 rpm อุณหภูมิ มี เท 318°C

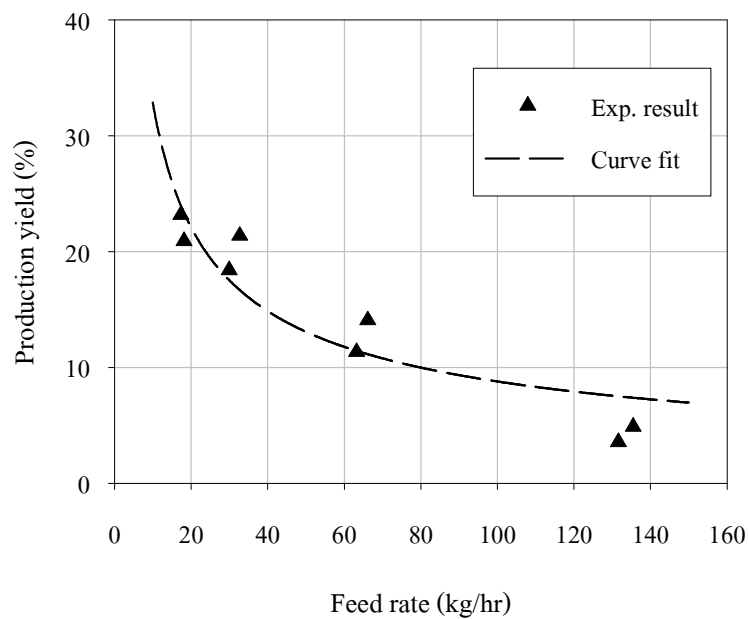
ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305

การกระจายขนาดของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 เมื่ออัตราเท
 นั้ าโลหะเทเท กั บ 17.3 และ $13 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ แสดงในรูปที่ 3.18 ที่อัตราเร็วในการเทที่พบว่า กราฟแสดง
 การกระจายขนาดมีลักษณะเป็นเส้นตรง 3 เส้น มาต่อกันและได้ค่าความชันที่ต่างกันไป
 โดยสามารถแบ่งเป็นช่วงที่ 1-3 ดังนี้ คือ ช่วงที่ 1 คือ 0-53 μm คี ดเป็นั นั้ าหนั กสะสมร้ อยละ 60 ชั วงขนาดที่ 2 คือ 53 -
 150+53 μm คี ดเป็นั นั้ าหนั กสะสมร้ อยละ 34 และที่ เหลือ อยุ่ 0+150 μm - 60 คี ตั หารั บ
 อัตราเร็ว ในการเทเท กั บ $13 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ พบว่า เส้น กราฟที่ได้ เป็นเส้นตรงมีความชันเพิ่มขึ้นจากเดิม
 หมายความว่า ขนาดของผงโลหะกระจายตัว ร้อย รงสมั าสมอตการกระจายขนาดแบบลึ ออกปกติ
 หากสังเกตความแปรปรวนของการกระจายขนาดพบว่า ที่อัตราเทที่ นผงโลหะที่ได้ มีการกระจาย
 ขนาดที่ไม่ สมั าสมอ แต่ ขนาดเฉลี่ยจะเล็กกว่าที่อัตราเทที่ นั้ าโลหะสูง งกว่า

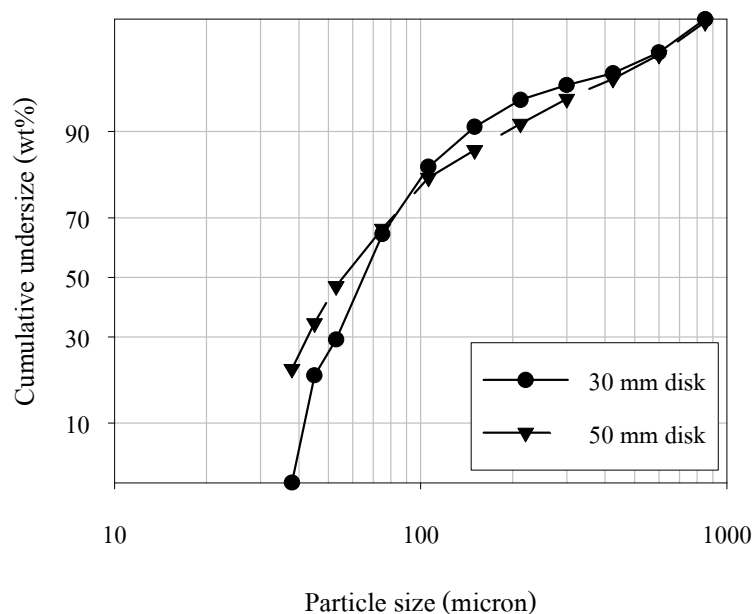
ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่ผ่านการบดการ
 อะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงสามารถคำนวณค่าที่ 1.1 โดยสมบัติ ที่ใช้ ใน
 การคำนวณคือ ค่าความหนาแน่น และความตึงผิว ของนี้ คี ดั านะบิ ด SAC305 สามารถ
 เทียบเคียงได้ โดยใช้ ข้อมูล จากโปรแกรม SURDAT ซึ่งได้ คำนวณค่า ความ
 หนาแน่น และความตึงผิว ของ (Ag₃₅Sn₆₅X Cu และใช้ วิธี การประมาณค่า เชิงเส้น (Interpolatio
 ซึ่งได้ คัด งนี้

- 1) ความหนาแน่น ของนั้ าโลหะ SAC305 ที่ 318 °C เท กั บ $7.9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- 2) ความตึงผิว ที่ อุณหภูมิ คัด งกั าวเท กั บ 0.53 N·m

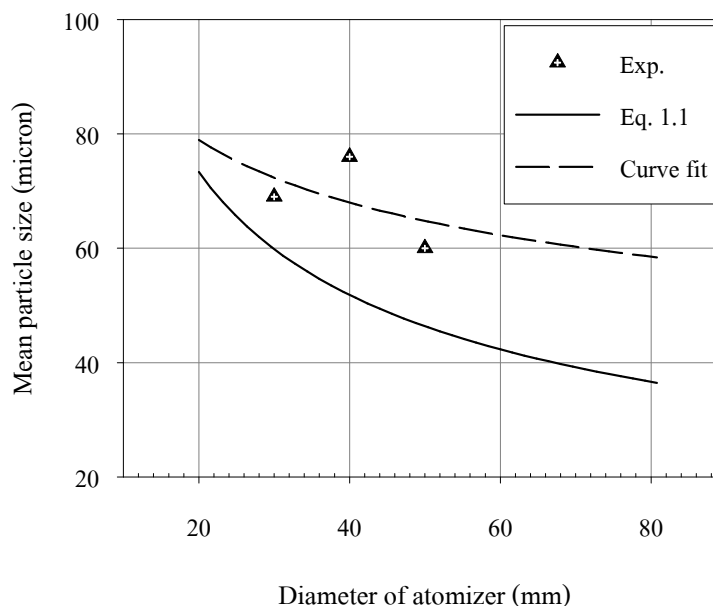
จากรูปที่ 3.19 แสดงให้เห็นว่า ผงโลหะมีขนาดเฉลี่ยลดลงเมื่ออัตราการเท
 นั้ าโลหะ ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้ มีแนวโน้มที่ดีขึ้นที่อัตราเท (รูปที่ 3.20) เมื่ออัตรา
 เทนั้ าโลหะเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกับผลผลิตผงโลหะบด คกริ ชนิด SAC305 ที่ บอ๊ ตรา ในการเทน้ำ โลหะ เมื่อใช้ จานอะตอมไมเซอร์ ทรงแบนขนาด 50 ความเร็ว วนรอบ 20,000 rpm อุณหภูมิ มี เท 318°C



รูปที่ 3.21 การกระจายขนาดของผงโลหะดีบุก ที่ ผลิต จากจานอะตอมไมเซอร์ ทรงแบนขนาด 30 และ 50 mm ความเร็ว วนรอบ 20,000 rpm อ๊ ตรา บอ๊ โลหะ 15.4 $\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิ มี เท 282°C

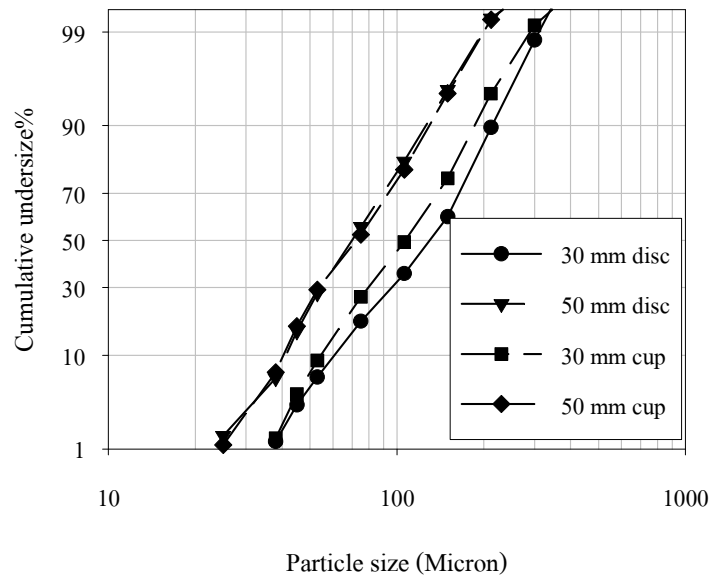


รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดกับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุก เมื่อความเร็วรอบ 20,000 rpm ความหนาแน่นโลหะ 15.4 $\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิ มีเท 282°C

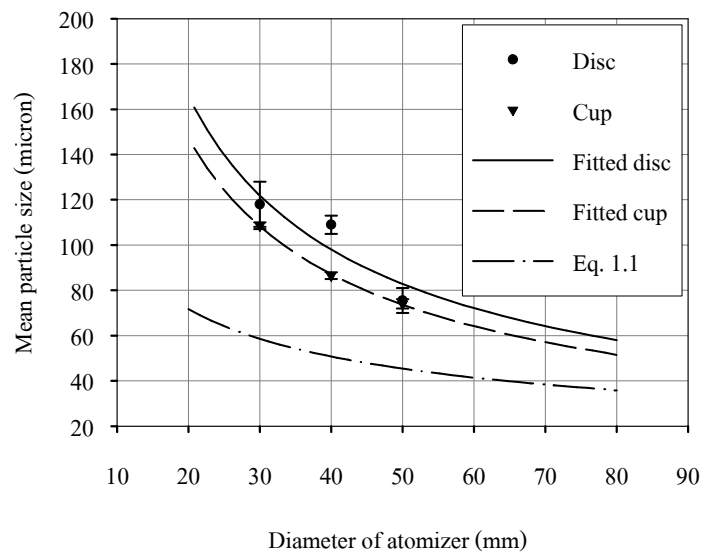
3.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดกับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุก

การกระจายขนาดของผงโลหะที่ผลิตด้วยงานอะตอมไมเซอร์ ขนาดที่แสดงในรูปที่ 3.21 พบว่า กราฟที่ได้ มีลักษณะคล้ายกับเส้นกราฟเส้นขนาดที่แสดงจากงานแบนขนาด 30 mm จะแสดงลักษณะที่กว้างกว่าเส้น 50 mm หรือเส้น 30 mm มีความชันสูงกว่าเส้น 50 mm หรือเส้น 30 mm ซึ่งการกระจายขนาดของผงโลหะที่ผลิตจากงานแบน 30 mm แคบกว่า จากงานแบนขนาด 50 mm และขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ได้จากงานขนาด 30 mm โดกกว่า

จากรูปที่ 3.22 พบว่า ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะลดลงเมื่อใช้หัวฉีดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะมีแนวโน้มคล้ายกับที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 1.1 โดกกว่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 1.1



รูปที่ 3.23 การกระจายขนาดของผงโลหะบัตกรี ชนิด SAC305 ใช้ งานอะตอมไมเซอร์ ทรงแบนขนาด 30 และ 50 mm และทรงถ้วยขนาด 30 และ 50 mm ความเร็ว วนรอบ 20,000 rpm อัตราเร็ว วนการเท $6 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิ มี เท 318°C

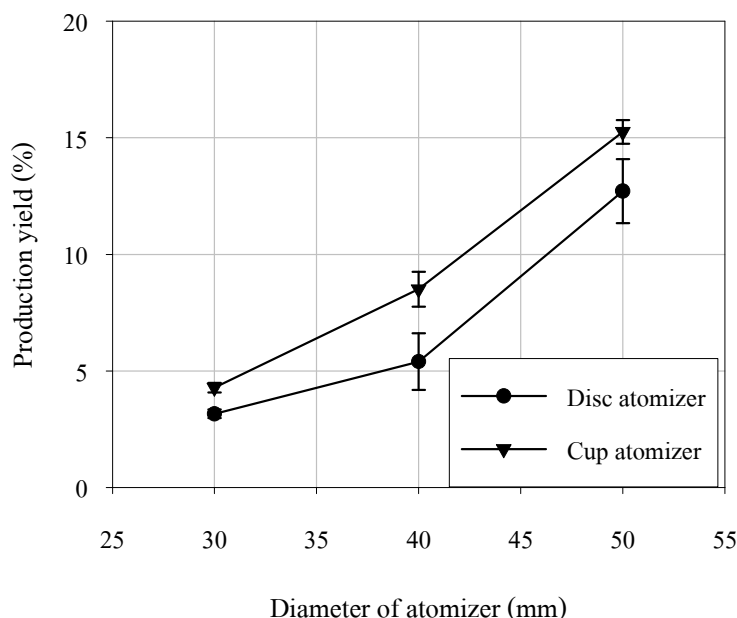


รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ ระหว่าง ขนาดและรูปทรงของอะตอมไมเซอร์ กับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัตกรี ชนิด SAC305 เปรียบเทียบกับสมการที่ 1.1 ความเร็ว วนรอบ 20,000 rpm อัตราเร็ว วนการเทโลหะ $63.3 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิ มี เท 318°C

ผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305

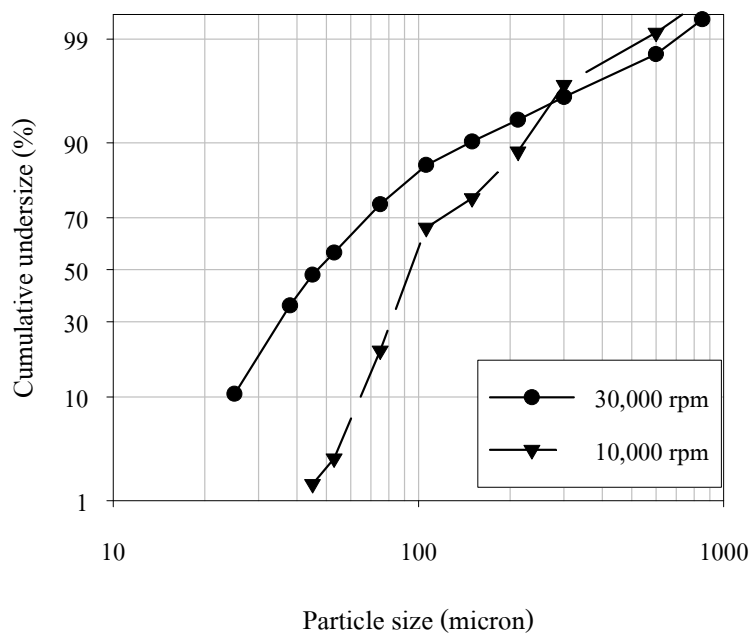
การกระจายขนาดของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 แสดงในรูปที่ 3.23 ลักษณะของกราฟที่ 4 เส้นนี้ค่อนข้างเป็นเส้นตรงโดยขนาดของผงโลหะที่ผลิตด้วยจานอะตอมไมเซอร์ ทั้งทรงแบนและทรงถ้วยขนาด 50 mm มีค่าเฉลี่ยเชิงเกย์มากกว่าจนแทบจะหนักันทำให้ค่าเฉลี่ยของขนาดผงโลหะใกล้เคียงกันเท่ากับค่าเฉลี่ยของจานอะตอมไมเซอร์ ทั้งทรงแบนและทรงถ้วยซึ่งมีขนาด 30 mm แยกจากกันอันเนื่องมาจากการกระจายขนาดของผงโลหะที่ 4 เส้นนี้มีค่าความชันที่ใกล้เคียงกัน

อิทธิพลของขนาดจานอะตอมไมเซอร์ต่อขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ (รูปที่ 3.24) ผลการทดลองที่ 2 เส้นนี้และผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 1 นั้นเหมือนกันคือเมื่อเพิ่มขนาดจานอะตอมไมเซอร์ผงโลหะที่ผลิตได้จะมีความละเอียดมากขึ้นผงโลหะที่ผลิตด้วยจานอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วยให้ผงที่ละเอียดกว่าจานอะตอมไมเซอร์แบนเมื่อเปรียบเทียบขนาดเฉลี่ยที่ผลิตได้จริงกับผลจากการคำนวณด้วยสมการที่ 1 ผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดโตกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจากการทดลอง



รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตผงโลหะ SAC305 ชนิดแบนชนิด และขนาดจานอะตอมไมเซอร์ ความเร็วรอบ 20,000 rpm อัตราการไหลของโลหะ $63.3 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิ 318°C

ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตผงโลหะบดกรีไรต์ สารตะกั่วชนิด SAC305 ของงานอะตอมไมเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.25 พบว่า ผลผลิตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอะตอมไมเซอร์ที่มีขนาดโตขึ้น โดยงานอะตอมไมเซอร์ ทรงถี่ วยให้ ผลผลิตลดลงจนประมาณ 2.3% เมื่อเปรียบเทียบกับที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง กลางเท่ากัน

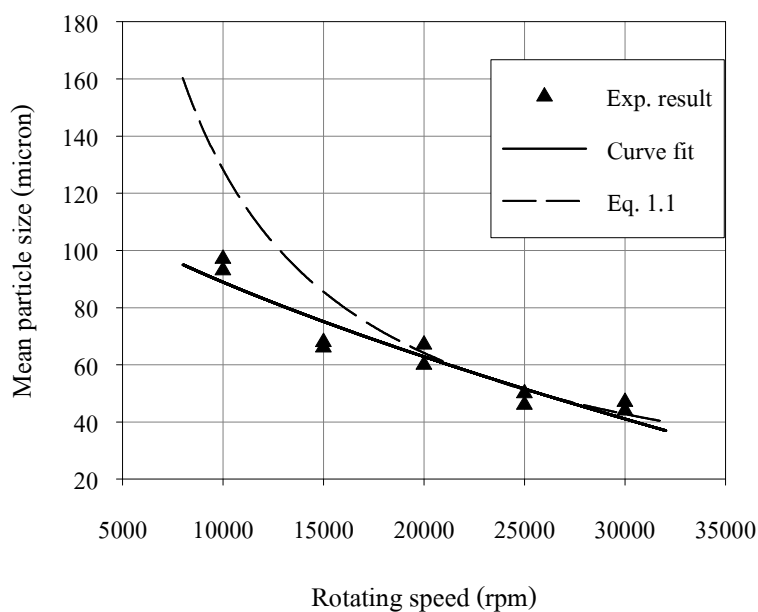


รูปที่ 3.26 กระจายขนาดของผงโลหะบดกรีไรต์ ชนิด SAC305 ที่ใช้เครื่องอะตอมไมเซอร์ ทรงแบนขนาด 50 mm หมุนด้วยความเร็ว รอบ 10,000 และ 30,000 rpm อัตราเทน้ำ โลหะ $\frac{kg}{hr}$ อุณหภูมิ มี ที่ 318°C

3.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของงานอะตอมไมเซอร์กับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบดกรีไรต์ชนิด SAC305

การกระจายขนาดของผงโลหะบดกรีไรต์ ชนิด SAC305 เมื่อความเร็วรอบของงานอะตอมไมเซอร์ เท่ากับ 10,000 rpm แสดงในรูปที่ 3.26 ที่มี ความชัน ต่ำ ว่างกัน น้อย ว่าง 3 ชั่วโมง ว่าง เห็นได้ชัดคือ ว่างขนาด μm คคือ เป็น น้อย ว่าง กสะสมร ว่างละ 70 ถ คมาคือ ว่าง ว่าง 300+1 μm คคือ เป็น น้อย ว่าง กสะสมร ว่างละ 15 และที่ เหลือ อมี ขนาด μm ว่างแสดงว่า ว่างโลหะ ประกอบด้ ว่าง 3 ชั่วโมง ว่างขนาดปะปนกัน น้อย ว่าง แต่ เมื่อความเร็ว ว่างของงานอะตอมไมเซอร์ เป็น 30,000 rpm เส้นกราฟประกอบด้ ว่าง ชั่วโมงที่ เป็น เส้นตรงคือ ว่าง ว่าง 25 μm คคือ เป็น น้อย ว่าง กสะสมร ว่างละ 85 ที่ เหลือ อมี ขนาดใหญ่ ว่าง μm โดยความชัน ของกราฟด้ ว่างกล่าวคือ ว่างๆ เปลี่ยนที่ ละน้อย ว่างทำ ว่างให้

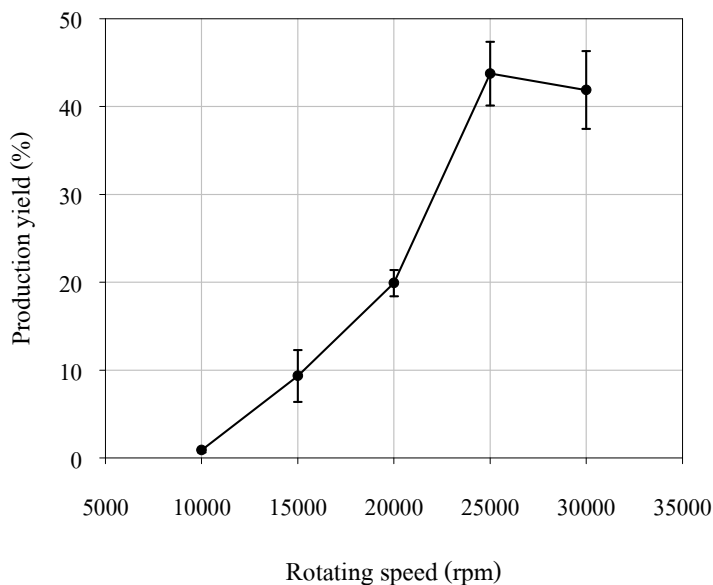
กราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง เมื่อเปรียบเทียบเส้นกราฟที่แสดงมาข้างต้น จะเห็นว่าค่าของฟังก์ชัน 2 เส้นปรากฏว่าที่ความเร็วที่ต่ำกว่า กราฟมีความชันสูงกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคจะลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น



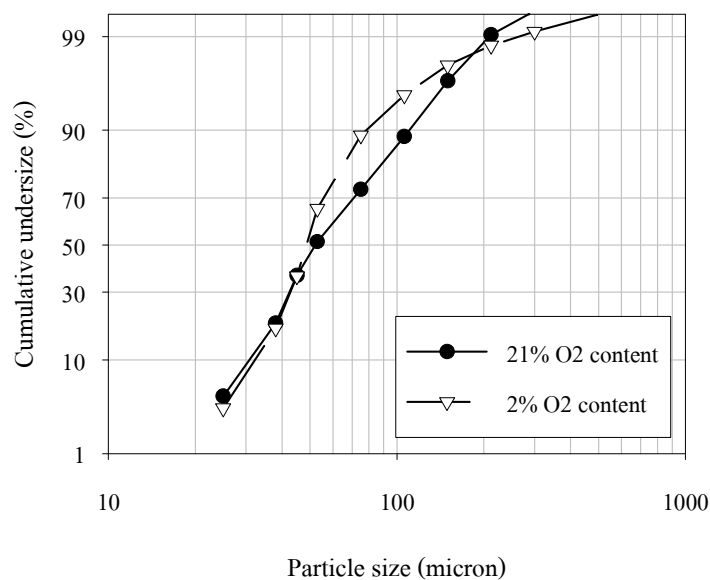
รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของจานอะตอมกับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305 เปรียบเทียบกับค่าทำนายจากสมการที่ 1.1 เมื่อใช้จานอะตอมไมเซอร์ ขนาด 50 mm อัตราเทน้ำโลหะ $\frac{32 \text{ kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิ 318°C

จากรูปที่ 3.27 พบว่าผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดเฉลี่ยที่ต่ำกว่าความเร็วรอบจานอะตอมไมเซอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ เช่น 10,000, 15,000 rpm ผงโลหะมีขนาดเฉลี่ยที่ต่ำกว่าขนาดเฉลี่ยซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1.1 และเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น 2 มีแนวโน้มที่จะลูเข้าหากัน แสดงว่าที่ความเร็วรอบสูงขนาดเฉลี่ยที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ 1.1

ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตผงโลหะกับความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์แสดงในรูปที่ 3.28 พบว่าผลผลิตมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 10,000 rpm ถึง 25,000 rpm แต่เมื่อความเร็วรอบเพิ่มเป็น 30,000 rpm ค่าผลผลิตตกลงมาเล็กน้อย



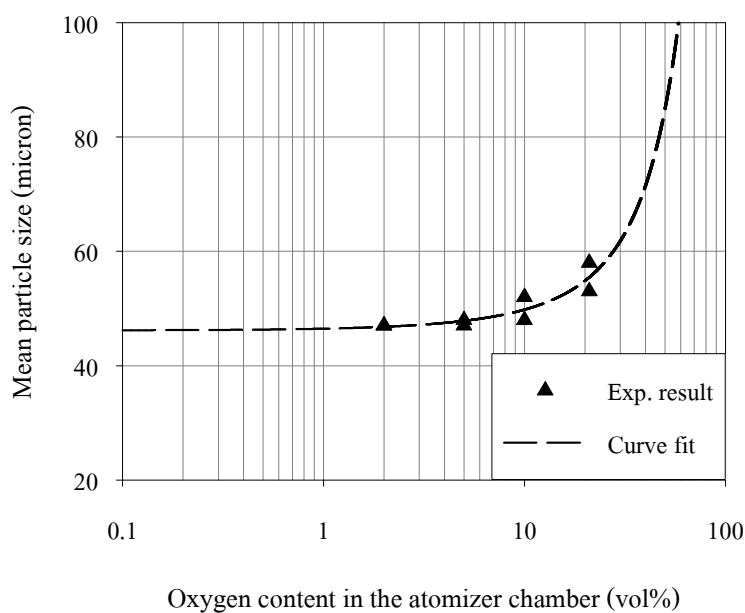
รูปที่ 3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตผงโลหะบีดกรีซซีว
 รอบของจานอะตอมไมเซอร์ ทรงแบนขนาด 50 mm อัตราเทน้ำ 32 $\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
 อุณหภูมิ 282°C



รูปที่ 3.29 กระจายขนาดของผงโลหะบีดกรีซซีว SAC305
 เซอร์ ทรงแบนขนาด 50 mm ความเร็วรอบ 30,000 rpm อัตราเทน้ำ 32 $\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
 อุณหภูมิ 282°C โดยผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำ

3.3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศขณะผลิตกับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีชนิด SAC305

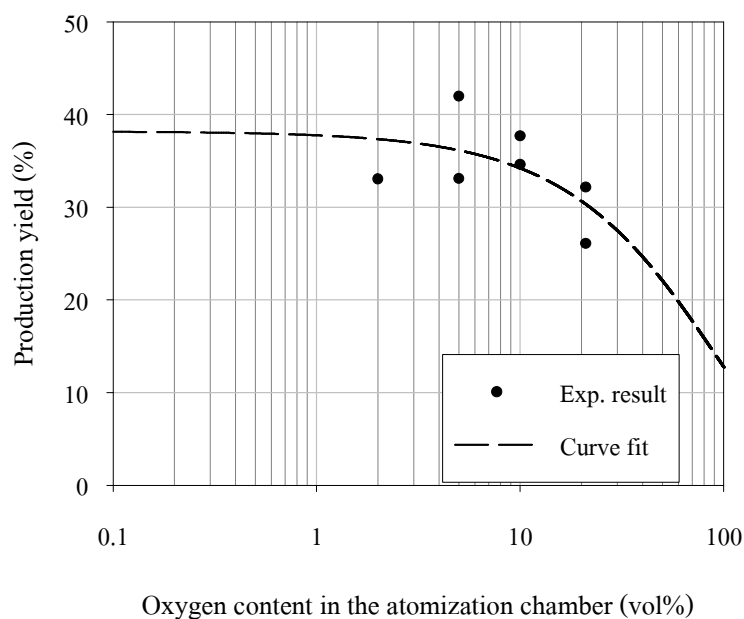
กราฟการกระจายขนาดของผงโลหะที่ผลิต ภายใต้บรรยากาศความชื้นที่มี ปริมาณออกซิเจนต่ำ ปรากฏในรูปที่ 3.29 พบว่า การกระจายขนาดของผงโลหะที่ผลิต ภายใต้บรรยากาศปกติ ค่าเฉลี่ย ใกล้เคียงกับ การกระจายขนาดของผงโลหะที่ผลิต ภายใต้บรรยากาศความชื้นต่ำ ใกล้เคียงกัน ที่ขนาดผงโลหะมี ค่าเฉลี่ย ใกล้เคียงกัน ปรากฏการกระจายขนาดจากการทดลองซึ่งมีการควบคุมบรรยากาศจะมี ความชื้น น้อยกว่าการควบคุมบรรยากาศ แสดงถึง ระยะเวลาของการกระจายขนาดแบ่ง เป็น 2 กลุ่ม มี ค่าเฉลี่ย ใกล้เคียงกัน -106+25 μm ก็ คือ เป็น น้ำหนัก สะสมร้อยละ 95 และที่เหลือ เป็น น้ำหนัก ขนาดหยาบที่ 106 μm ในเชิง ทั่ว



รูปที่ 3.30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศผลิตผงโลหะกับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ใช้จานอะตอมไมเซอร์ ทรงกลม 40 mm ความเร็ว 1000 rpm อัตราเทน้ำ โลหะ 32 $\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิ 318°C

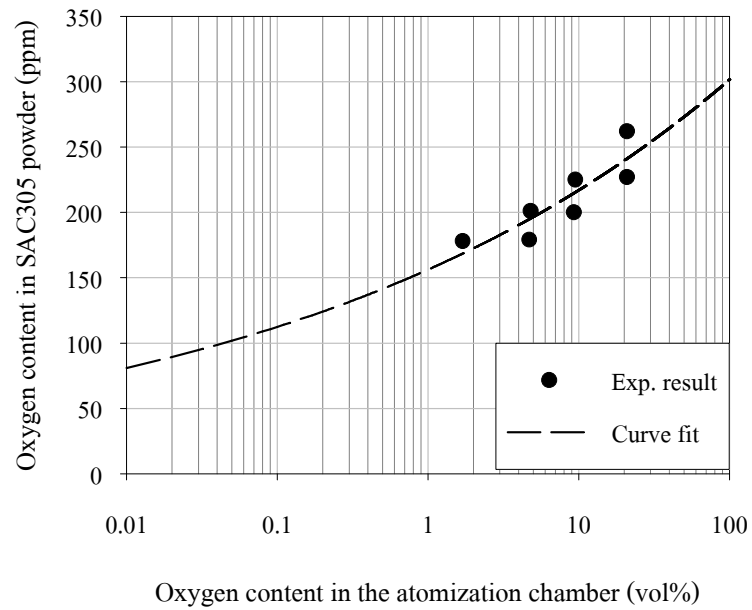
ถ้าหากความชื้นสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศผลิตผงโลหะกับขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 แสดงในรูปที่ 3.30 พบว่าขนาดเฉลี่ยของผงโลหะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณออกซิเจนและอุณหภูมิลดลง การ

เปลี่ยนแปลงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะอยู่ ในช่วงแคบๆ ประมาณ 40 และเมื่ออัตราการเกิดจากเส้น แสดงแนวโน้มพบว่า เมื่อปริมาตรออกซิเจนลดลงต่ำกว่า 10% นั้นแนวโน้มกราฟจะดู 'เข้าสู่อะกาศ' ค่าคงที่ ประมาณ 46 μm ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปริมาตรออกซิเจนในบรรยากาศขณะผลิตผงโลหะมีผลต่อเฉลี่ยของผงโลหะนี้ อย่มากเมื่อปริมาตรออกซิเจนต่ำมากๆ



รูปที่ 3.31 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตผงโลหะกับปริมาตรออกซิเจนในบรรยากาศขณะผลิตผงโลหะที่ต่ำมากนั้น เมื่อใช้อุณหภูมิเซอร์ทริงที่ 40 mm ความเร็วรอบ 30,000 rpm อัตราไหลโลหะ 32 $\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ อุณหภูมิ 318°C

ผลผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ภายใต้สภาวะที่ปริมาตรออกซิเจนที่ต่ำมากนั้นแสดงในรูปที่ 3.31 พบว่า ผลผลิตมีค่าประมาณ 15% เมื่อปริมาตรออกซิเจนลดลงจาก 20.9% เหลือ 5% เส้นแสดงแนวโน้มของผลผลิตลักษณะเป็นเส้นโค้ง 'เข้าสู่อะกาศ' ค่าคงที่ประมาณ 38% แสดงให้เห็นว่า ผลผลิตดังกล่าวมีค่าที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามความเข้มข้นออกซิเจนจากบรรยากาศปกติเหลือประมาณ 1% ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศขณะผลิตผงโลหะมีผลต่อผลผลิตของการผลิตผงโลหะโดยตรงเช่นเดียวกับการลดลงของขนาดเฉลี่ยของผงโลหะชนิด SAC305 เมื่อลดปริมาตรออกซิเจน



รูปที่ 3.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนของผงโลหะที่ผลิตด้วยเทคนิค SAC305 กับปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศขณะผลิตของโลหะเมื่อใช้จานอะตอมไมเซอร์ ทรงรี วยขนาด 40 mm ความเร็ว 30,000 rpm อัตราเทน้ำโลหะ $\frac{kg}{hr}$ อุณหภูมิ มีที่ 318°C



รูปที่ 3.33 ผงออกไซด์ ละเอียดยด (Dross) ที่เหลือจากกระบวนการผลิตได้กลับมามาหลอมใหม่

ปริมาณออกซิเจนของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้

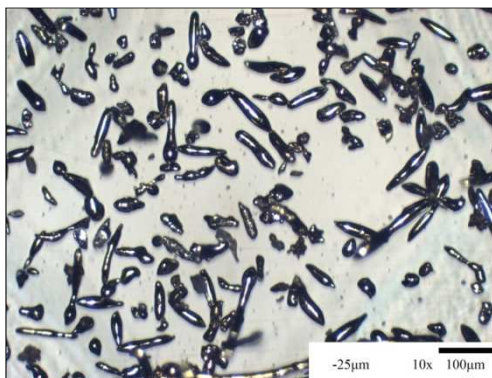
จากรูปที่ 3.32 พบว่า ปริมาณออกซิเจนของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้ SAC305 ลดลงเมื่อปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศระหว่งกระบวนการผลิตผงโลหะมีค่าลดลง โดยลดจาก 262 ppm เหลือ 178 ppm เมื่อปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศลดจาก 21% เหลือ 2% เส้นแนวโน้มนที่แสดงให้เห็นว่า หากต้องการลดปริมาณออกซิเจนที่ติดหลงให้เหลืออยู่น้อยกว่า 100 ppm จึงจำเป็นต้องควบคุมบรรยากาศขณะผลิตผงโลหะให้เหลือปริมาณน้อยกว่า 10.04 vol% หรืออยู่น้อยกว่า 400 ppm ปัญหาที่เกิดขึ้นจากฟิล์มออกไซด์ที่ก่อตัวขึ้นในการหลอมผงโลหะเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และต้องเสียเงินซื้อโลหะจำนวนมากในรูปของตะกั่ว (Dross) ดังแสดงในรูปที่ 3.33



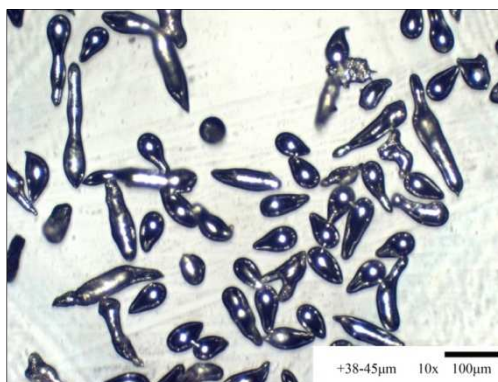
รูปที่ 3.34 ผงโลหะดีบุก ขนาด -45µm รูปทรงแบบหยดน้ำ, ลิแกเมนต์ และรูปทรงไม้แนนอนปะปนกัน



รูปที่ 3.35 ผงโลหะดีบุก ขนาด -38µm รูปทรงแบบหยดน้ำ, ลิแกเมนต์ และรูปทรงไม้แนนอนปะปนกัน



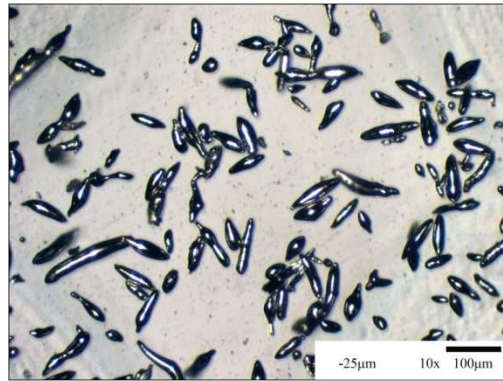
รูปที่ 3.36 ผงโลหะดีบุก ชั่ว วงขนาด 25µm รูป ปทรงแบบหยดน้ำ, ลิแกเมนต์, และรูป ปทรงไม้แน่นนอนปะปนกัน



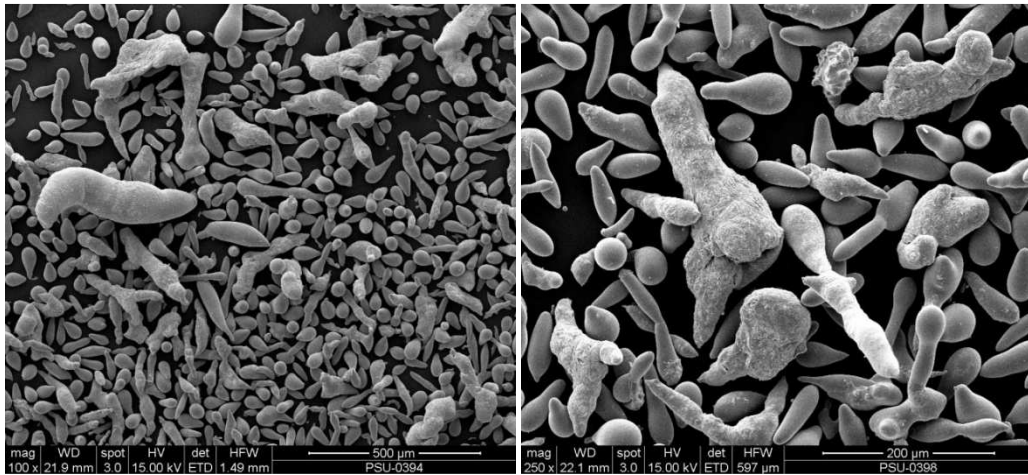
รูปที่ 3.37 ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ชนิด SAC305 ชั่ว วงขนาด 45µm รูป ปทรงแบบหยดน้ำ, ลิแกเมนต์ และเกล็ดปะปนกัน



รูปที่ 3.38 ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ชนิด SAC305 วงขนาด 38-45µm มีรูป ปทรงแบบหยดน้ำ และลิแกเมนต์ปะปนกัน



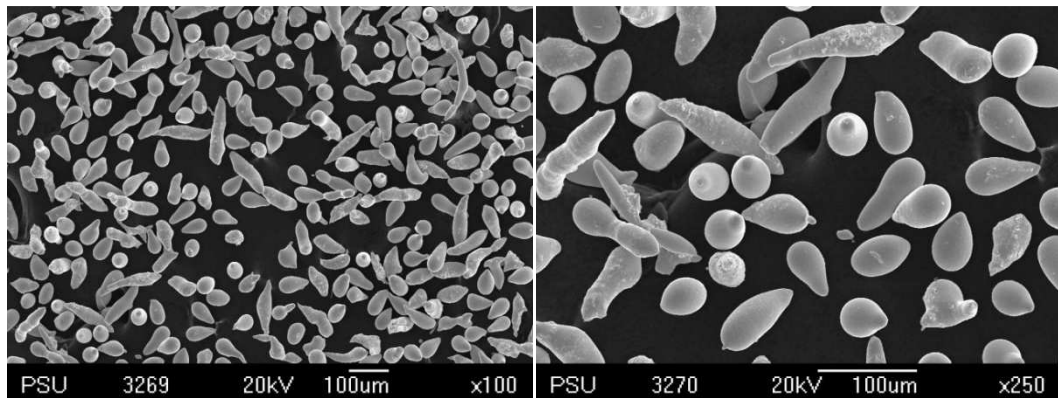
รูปที่ 3.39 ผงโลหะบับ คกรี่ ไร้ สารตะกั่ววชนิ ค SAC305 ช่ วงขนาด ๑๕๒ ปทรง
แบบหยดน้ำ และ ลิ กามেন্ট ปะปนกัน



(ก)

(ข)

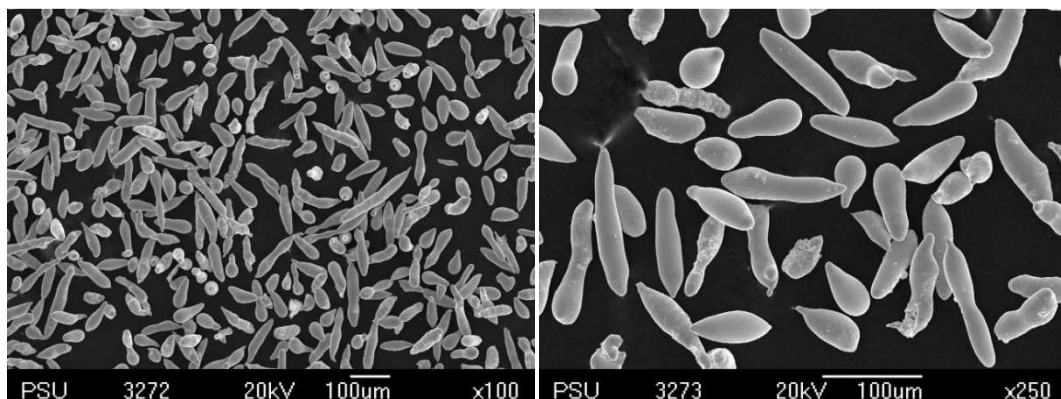
รูปที่ 3.40 ภาพอิ เล็ก ตรอนไมโครกราฟผงโลหะบับ คกรี่ ไร้ สารตะกั่ววชนิ ค SAC305
ก่อนค้ ดขนาดด้ วยตะแกรง อนู ภาคที่ พบส่ว นใหญ่ มี รูปทรงแบบหยด
และ ลิ กามেন্ট ปะปนกัน (ก) ก้ ด้ ังขยาย 100 เท้า และ (ข) ๒๕



(ก)

(ข)

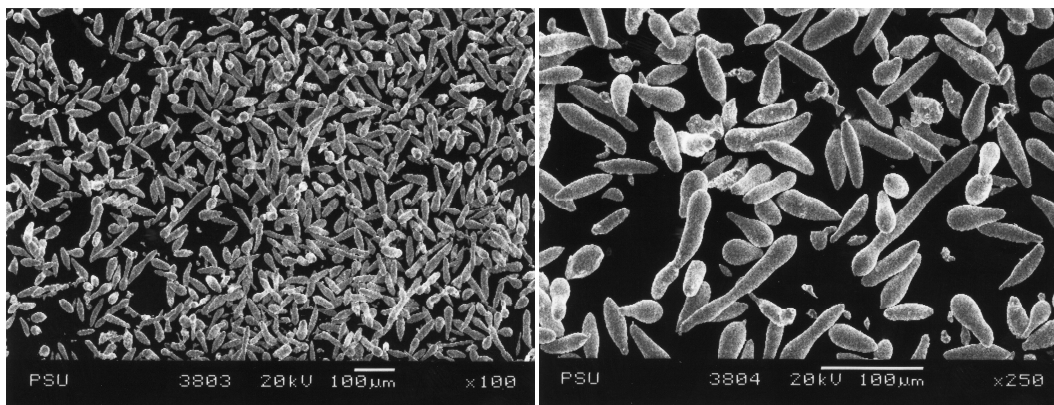
รูปที่ 3.41 ภาพอิเล็คตรอนไมโครกราฟผงโลหะบัดกรีสังเคราะห์ชนิด SAC305
 ช่วงขนาด $-45+38\mu\text{m}$ มีรูปทรงแบบหยดน้ำ และลิแกเมนต์ปะปนกัน
 (ก) กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) 250 เท่า



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.42 ภาพอิเล็คตรอนไมโครกราฟผงโลหะบัดกรีสังเคราะห์ชนิด SAC305
 ช่วงขนาด $-38+25\mu\text{m}$ มีรูปทรงแบบหยดน้ำ และลิแกเมนต์ปะปนกัน
 (ก) กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) 250 เท่า



(ก)

(ข)

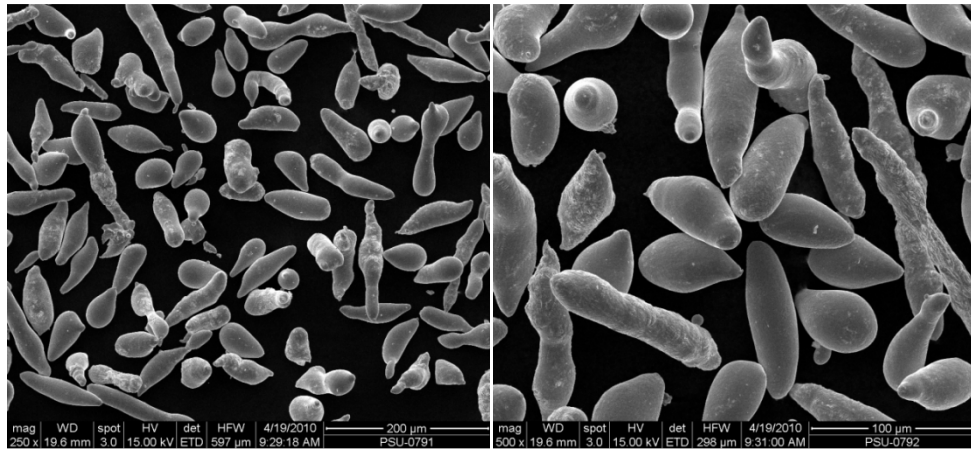
รูปที่ 3.43 ภาพอิเล็คตรอนไมโครกราฟของโพลีเอทิลีนไกลคอล SAC305 ขนาด -25µm มีรูปร่างแบบหยดน้ำ และลิแกเมนต์ปะปนกัน (ก) กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) 250 เท่า

3.4 รูปร่างของผงโลหะ

ภายหลังจากคัดขนาดผงโลหะแล้ว วิจัยนำผงโลหะมาตรวจรูปร่างของจุลทรรศน์แบบใช้แสงและด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

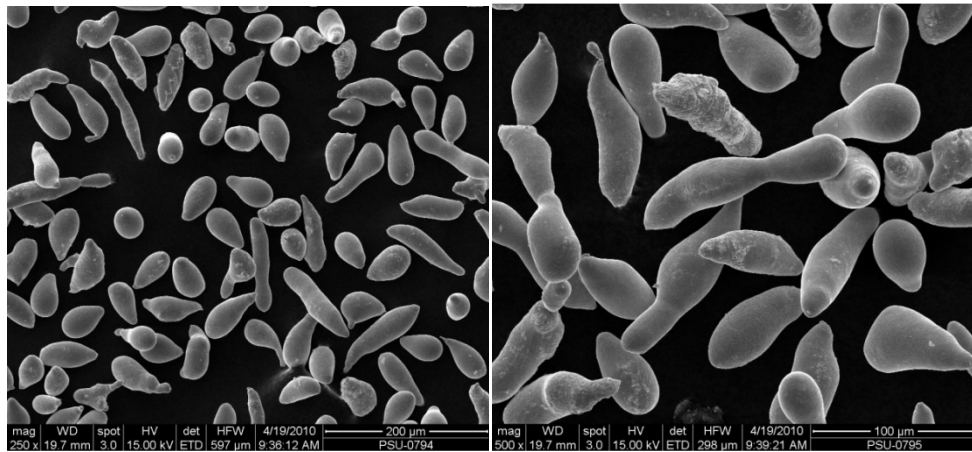
รูปร่างของผงโลหะดีบุก

รูปร่างของผงโลหะดีบุกในขนาดที่สนใจส่วนใหญ่จะเป็นลิแกเมนต์ (Ligament) หยดน้ำ (Tear drop) และรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular) ปะปนกัน รูปร่างแบบหยดน้ำมีพบมากในขนาด -45+38µm สำหรับขนาด -38+25µm พบว่ามีรูปร่างหยดน้ำน้อยลง และมีรูปร่างลิแกเมนต์มากขึ้น และสำหรับผงโลหะที่มีขนาด 25µm มีลักษณะแบบลิแกเมนต์เป็นจำนวนมาก บางอนุภาคมีความยาวมากกว่า 100µm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 25µm จึงสามารถลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 500 ได้



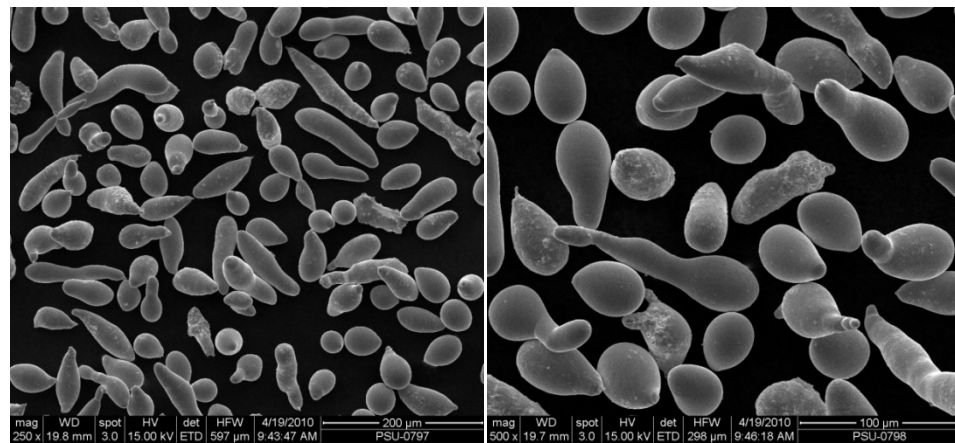
(g)

(h)



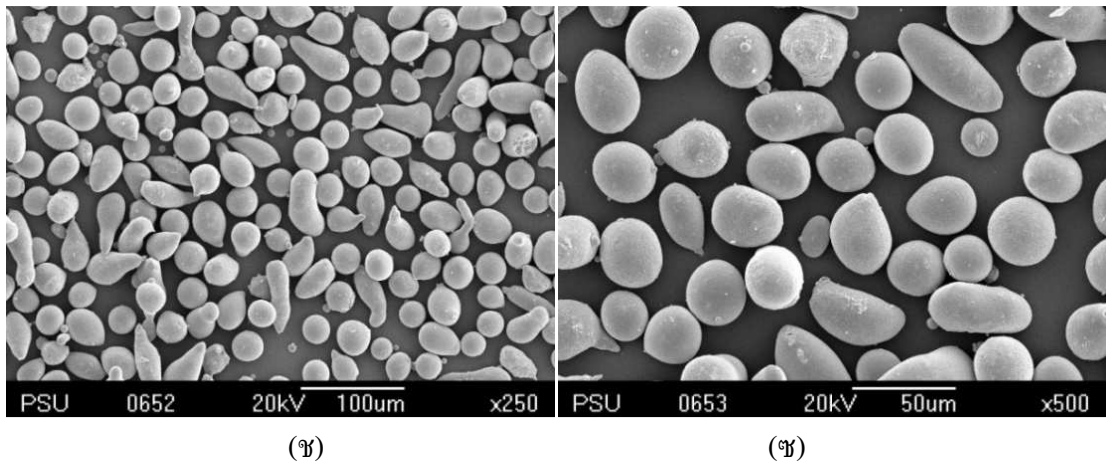
(i)

(j)

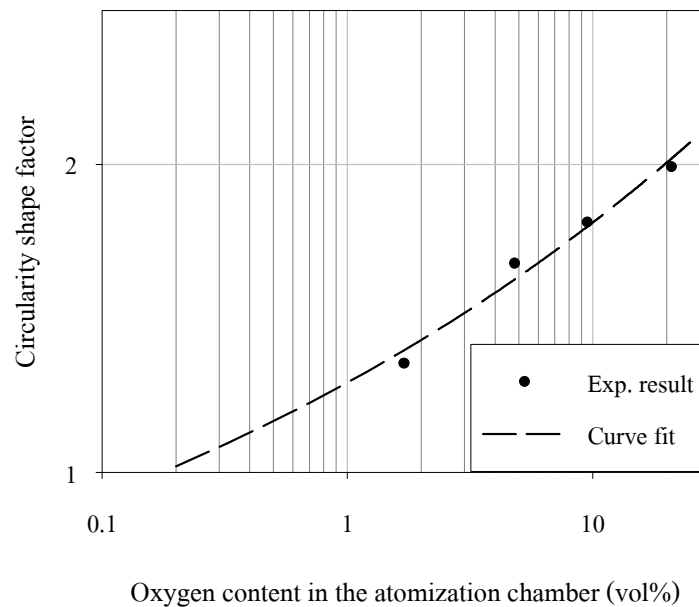


(k)

(l)



รูปที่ 3.44 ภาพถ่ายอิเล็กตรอนไมโครกราฟที่กล้องขยาย 500 เท่าของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่มีขนาดในขนาด 5-8 หรือ Type IV ที่ผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนคือ (ก) และ (ข) 21%, (ค) และ (ง) 10%, (จ) และ (ฉ) 5% และ (ช) และ (ซ) 2% โดยปริมาตร



รูปที่ 3.45 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศอะตอมไมเซชันกับตัวประกอบความเบ้ทรงกลมของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 เมื่อใช้จานอะตอมไมเซชันทรงกลมขนาด 40 mm ความเร็วรอบ 30,000 rpm อัตราเทน้ำโลหะ 2 kg/hr อุณหภูมิ 318°C

รูปทรงของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305

ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC305 ที่ผลิตได้ มีรูปร่างไม่โลหะดีบุก กล่าวคือ ผงโลหะมีรูปร่างแบบลิแกเมนต์ หยดสั้น และรูปร่างแบนราบและพบรูปร่างแบบหยดสั้น ที่ช่วงขนาด $-38 \mu\text{m}$ มากกว่า ช่วงขนาดอื่นๆ สำหรับ ช่วงขนาด $-38+25$ และ $-25 \mu\text{m}$ ส่วนใหญ่ มีรูปร่างแบบลิแกเมนต์ พบรูปร่างกลมนี้ ออมาก

จากภาพถ่ายอิเล็คตรอนไมโครกราฟพบว่า รูปร่างของอนุภาคของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ในช่วงขนาด $-45+38 \mu\text{m}$ มีรูปร่างแบบหยดสั้น มากกว่า แบบลิแกเมนต์ ช่วงขนาด $-38+25 \mu\text{m}$ มีทั้งแบบหยดสั้น และลิแกเมนต์ และที่ช่วงขนาด $-25 \mu\text{m}$ มีรูปร่างแบบลิแกเมนต์ และยังพบว่า มีลักษณะที่อนุภาคขนาดเล็กกับอนุภาคขนาดใหญ่ อยู่ด้วยกัน (Satellite) สำหรับ ผิวของอนุภาคบางอนุภาคมีผิวเว้า ขยายถึงขั้นเว้าหายมาก และพบว่า รูปร่างแบบลิแกเมนต์ แม้ว่าจะมีความยาวมากกว่า 200 nm เนื่องจากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมาก จึงสามารถลอดผ่านตะแกรงเบอร์ละเอียดได้

สำหรับการผลิตผงโลหะที่มีการควบคุมบรรยากาศระหว่างการผลิต พบว่า เมื่อปริมาตรออกซิเจนในบรรยากาศการอะตอมไมเซชันลดลง รูปร่างของผงโลหะบัดกรี ในช่วงขนาด $-38+25 \mu\text{m}$ รูปร่างแบบลิแกเมนต์ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเส้น จะมีลักษณะขาดลด รูปร่างแบบหยดสั้น มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.44 (ก) และ (ข) และ (ค) ที่ $5\% \text{ O}_2$ เมื่อเทียบกับ รูปร่างที่ 3.44 (ก) และ (ข) ซึ่งผลิตภายใต้บรรยากาศพบว่า มีผงโลหะรูปร่างกลมนี้ ออมาก แต่เมื่อปริมาตรออกซิเจนลดเหลือ 2% ปรากฏให้เห็นได้ (รูปที่ 3.44 (ข) และ (ค)) มีรูปร่างลิแกเมนต์ เหลืออยู่น้อยมาก ผงโลหะส่วนใหญ่มีรูปร่างแบนและทรงกลม เมื่อวัดค่าตัวประกอบความเป็ นทรงกลมของอนุภาคพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์เป็น นทรงกลมของผงโลหะที่ผลิต ภายใต้บรรยากาศซึ่งมี ปริมาตรออกซิเจนที่ต่ำกว่า (รูปที่ 3.45) หรือ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ อนุภาคมีลักษณะเป็น นทรงกลมมากขึ้น แสดงให้เห็น ได้ พบว่า ค่าตัวประกอบความเป็ นทรงกลมมีค่าใกล้เคียง 1.0 เมื่อควบคุมบรรยากาศขณะผลิต ผงโลหะให้ มี ปริมาตรออกซิเจนเหลือ น้อยกว่า 10.2%

3.5 การอภิปรายผลการทดลอง

3.5.1 ปราบปรามการกระทำ บณผิ วจานอะตอมไมเซอร์ ขณะทดลอง

ปรากฏการณ์ บณผิ วหน้า ำของจานอะตอมไมเซอร์ ที่พบในครั้งวิ ัจนี้ ได้ แก่ การเกิด ก้อนโลหะแข็ง งด้ วบณผิ วจานอะตอมไมเซอร์ การเกิด ำของอะตอมไมเซอร์ ก้ บณผิ วโลหะ และปรากฏการณ์ ไฮดรอลิก กัจ มพ์ ซึ ่งเป็ นการสั งเกตกำรเกิดและกหายหลั งการทดลอง ปรากฏการณ์ เหล่ นั้ ส ่วนใหญ่ มี ผลการศึ กษาด้ วยแบบศึ กษาอรรถศาสตร์ วอย่ างเช่ นการศึ กษาการเกิด ก้อนโลหะแข็ง งด้ วบณผิ วจานอะตอมไมเซอร์ ด้ วยบทวิ ัจของฉนิ ตศาสตร์ ของ Ho และ Zhao (2004) การศึ กษาการไหลของน้ ำโลหะด้ บู กบนจานอะตอมไมเซอร์ ด้ วยแบบจ้ ำลอง ฉนิ ตศาสตร์ เพื่ ออธึ บายความสั มพั นธ์ ระหว่ างค่าสัมประสิ ญ์ กัจโลหะกั บการแตกเป็ นละอองของ Zhao (2004) และการศึ กษาการเกิด ก้อนโลหะแข็ง ฉนิ ตศาสตร์ของอะตอมไมเซอร์ ของ Xia, *al.* (2004) เป็ นต้ น ซึ ่งผลที่ ได้ เหล่ นั้ ทำ ำให้ เชื่ อใจถึ กอภิ ยการทงในการลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ ที่ ก่อ ำวซึ ่งต้ น และช้ วยให้ การผลิต ผงโลหะอะตอมไมเซอร์ ช้ นโดยอาศัย หลั กการหมุนเหวี่ ยงมี ประสิ ทธิ ภาพมากชึ ่น

3.5.2 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของผงโลหะ

- 1) ความสั มพั นธ์ ระหว่ างขนาดเฉลี่ยของผงโลหะด้ บู กกับ ำของจานอะตอมไมเซอร์

ผลที่ ได้ จากการทดลองเพื่ อศึ กษาความสั มพั นธ์ ระหว่ างค่าสัมประสิ ญ์ กัจโลหะด้ บู กกับ ำของจานอะตอมไมเซอร์ สอดคล้ องกั บศึ กษาของ Teunou และ Poncelet (2005) ซึ ่งพบว่า ำเมื่อผลิต ผงพาราไฟ นด้ วยจานอะตอมไมเซอร์กำรหมุนรอบ 2,000 rpm ผงที่มี ขนาดเล็ก จะตกใกล้ กั บจานอะตอมไมเซอร์ ส ่วนผงที่ มีขนาดเล็ กจะสามารถไป ได้ ำไกลกว่า เนื่ องจากอ้ ตราส ่วนระหว่ างแรงจล ดจากอากาศต่อ อมวลขนาดเล็ ก ำมวลขนาดใหญ่ พิ ัจจนาสมการการเคลื่อนที่ ของอนุ ภาคที่ 2.14 และ 2.15 พบว่า ำน่ามของอนุ ภาคเนื่ องจากแรงจล ดอากาศแปรผกผัน กั บมวลของอนุ ภาค เมื่อเปรี ียบเที ยบผลกการระหว่ างของอนุ ภาคพบว่า ำกั ำจากการค ำนวนมี ค่า สูง งกว่า ผลการทดลองมากเนื่ องจึ กได ำให้ ผลของการไหลของน้ ำโลหะบนจานอะตอมไมเซอร์ ทำ ำให้ ความเร็ว ำวศึ กที่ ำยของละอองน้ ำโลหะที่ ำมอยู่ ผจริ ง

ในส ่วนของอ้ ตราการถ้ ำยเทควมเร็ว ำนของอนุ ภาคในการศึ กษึ ญ์ ำนี้ ำงสมมติ ฐานไว้ ว่า ำอนุ ภาควิ ัจของน้ ำโลหะมี ค่า ำเท่า กั บอ ำของโลหะขณะของน้ ำโลหะเป็ น

ของเหลวที่ทั้งหมดและไม่ คิ ผลจากการถ่ายเทความร้อนของโลหะโดยการแผ่รังสี ความร้อนทำให้ระยะทางที่ได้จากการคำนวณ จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้จริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนของโลหะต่างๆ สมมุติฐานดังกล่าวก็ยังสามารถใช้ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนของโลหะที่น้อยกว่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราไหลเชิงมวลของน้ำที่ไหลอยู่รอบๆ ที่ได้ ก็เป็นเพียงค่าประมาณไม่ได้ เกิดจากการวัดค่าอุณหภูมิจริงของโลหะที่คำนวณเพียงแต่บอกถึงค่าระยะทางขั้นต้นเท่านั้น ในการออกแบบต้องไม่ใช้จริงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้ ควรมาจากการทดลองมากกว่า และอาจต้องแก้ไขระยะทางนี้ด้วยเพราะเมื่อผลิตลงไปใช้ กระบวนการนี้ อุณหภูมิภายในจะต่อไม่เซอร์ จะมีพื้นที่สูงซึ่งคืนการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป

2) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของโลหะกับขนาดเฉลี่ยของโลหะดีบุก

แนวโน้มจากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของโลหะทำให้ขนาดเฉลี่ยของผลึกของผลึกโลหะที่ผลิตได้ แต่ผลการคำนวณขนาดเฉลี่ยของผลึกโลหะจากการที่ 1.1 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความหนาแน่นของผลึกโลหะต่ำลงแต่ก็ไม่มากนัก ซึ่งในทางปฏิบัติ การเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยให้ความหนาแน่น ความหยาบและความตึงผิวของโลหะที่ผลิตได้ลดลง จึงมีโอกาสมากขึ้นที่จะผลิตโลหะที่มีขนาดเฉลี่ยของผลึกโลหะที่ผลิตได้มีขนาดเล็กกว่าที่คำนวณได้ ซึ่งจะช่วยลดข้อบกพร่องของงานอะตอมไมเซอร์ อันเนื่องมาจากการเกิดก้อนโลหะแข็งตัวเกาะบนผิวงานอะตอมไมเซอร์ไม่ส่งผลให้ผลึกโลหะที่ผลิตได้มีความละเอียดมากขึ้น

อย่างไรก็ดี การเพิ่มอุณหภูมิของโลหะก็จะมีข้อเสียที่บางส่วนของโลหะต้องใช้เวลาในการขึ้นรูปของโลหะขึ้นรูปในกรณีของถังอะตอมไมเซอร์ ที่ไม่สามารถขยายออกได้ อาจเป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดโพรงที่ผนังของเครื่องมากขึ้น ซึ่งอาจก่อให้เกิดการเสียหายที่ผิวของผลึกโลหะที่ผลิตได้ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ผิวของโลหะที่ผลิตได้มีขนาดเฉลี่ยของผลึกที่ตามมาคือผลึกโลหะที่ผลิตได้มีปริมาณออกซิเจนสูงไม่เหมาะสมกับการใช้ อันที่จริงการเพิ่มอุณหภูมิที่ต่ำลงการเพิ่มอุณหภูมิที่ผิววัดได้ (<100 ppm) ผลกระทบที่หนึ่งของฟิล์มออกไซด์คือการไปขัดขวางกระบวนการแตกตัวขั้นต้นของอุณหภูมิของโลหะและกระบวนการขึ้นรูป

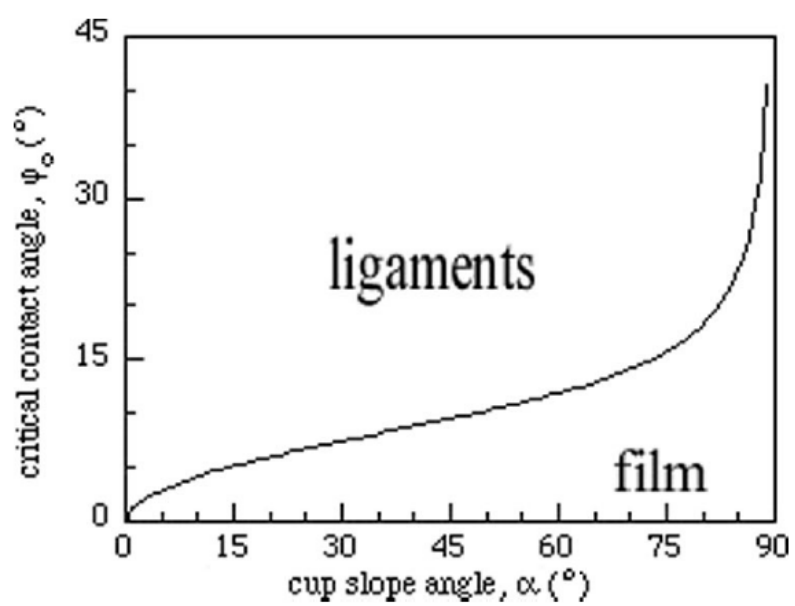
3) ความสัมพันธ์ ระหว่าง อัตราแทน^๑ วัลโหะกับ ขนาดเฉลี่ย^๑ของผงโลหะ

แนวโน้ม จากผลการทดลองที่ได้^๑ ที่ได้จากผงโลหะดีบุก และผงโลหะดีบุก และผงโลหะดีบุก ชนิด SAC305 เหมือนกัน คือ เมื่ออัตราแทน^๑ วัลโหะลงผงโลหะที่^๑ จะมี ขนาดเฉลี่ย^๑ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษากายของ Xie et al. (2004) แนวโน้ม จากผลการศึกษาค้นคว้าแสดงว่า อัตราแทน^๑ วัลโหะส่งผลกระทบต่อ ขนาดเฉลี่ย^๑ของผงโลหะดีบุก และผงโลหะดีบุก ชนิด SAC305 จากผลการศึกษากายของ Zhao (2004 A) สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์^๑ระหว่าง อัตราแทน^๑ วัลโหะบนจานอะตอมไมเซอร์ และขนาดของละออง^๑ วัลโหะที่แตกตัว^๑จากการเพิ่มอัตราแทน^๑ วัลโหะจะส่งผลให้ ปริมาณ^๑ วัลโหะที่ขอบจานมีความหนาแน่น^๑ของผลึก^๑ละออง^๑ วัลโหะที่เกิดขึ้น^๑มีขนาดโตตามไปด้วยและอัตราแทน^๑ วัลโหะที่สูง^๑จึงทำให้ ปริมาณ^๑ วัลโหะบนจาน^๑ด้วย ทำให้ ความเร็ว^๑ของละออง^๑ วัลโหะหลังจากหลุด^๑จากขอบ^๑และจากการเพิ่มอัตราแทน^๑ วัลโหะยัง^๑เป็นการเพิ่ม^๑การเกิด^๑การแตกตัว^๑ของผลึก^๑ วัลโหะที่^๑แตกตัว^๑จากการเพิ่มอัตราแทน^๑ วัลโหะจะส่งผลให้ ประสิทธิภาพ^๑การเปลี่ยนแปลง^๑ของพลังงาน^๑จลน์^๑จาก^๑พลังงาน^๑สำหรับการแตกตัว^๑เป็น^๑ละออง^๑ที่^๑ลดลง^๑ในทางกลับกัน^๑หาก^๑อัตรา^๑แทน^๑ วัลโหะ^๑มากเกินไป^๑ก็^๑อาจ^๑ทำให้^๑ระยะเวลา^๑ในการเกิด^๑ก้อน^๑โลหะ^๑แข็ง^๑ตัว^๑ที่^๑ผิว^๑หน้า^๑ของ^๑จาน^๑อะตอม^๑ไมเซอร์^๑นอกจาก^๑นี้^๑ยัง^๑เป็น^๑การเพิ่ม^๑โอกาส^๑ให้^๑เกิด^๑การแตกตัว^๑เป็น^๑ละออง^๑ของ^๑ฟิล์ม^๑ วัลโหะ^๑ที่^๑เกาะ^๑อยู่บน^๑จาน^๑อะตอม^๑ไมเซอร์ Zhao (2004 B)

4) ความสัมพันธ์ ระหว่าง รัศมี^๑ของอนุภาค^๑กลางจาน^๑อะตอม^๑ไมเซอร์^๑กับ^๑ขนาดเฉลี่ย^๑ของผงโลหะ

จากผลการทดลองในการศึกษาครั้งนี้ พบว่า ขนาดของผงโลหะ^๑จะมี^๑ลักษณะ^๑เส้น^๑ผ่าน^๑ศูนย์กลาง^๑ของ^๑จาน^๑อะตอม^๑ไมเซอร์^๑โดย^๑ที่^๑ซึ่ง^๑ใน^๑กรณี^๑ที่^๑ผง^๑โลหะ^๑ดีบุก^๑และ^๑ผง^๑โลหะ^๑ดีบุก^๑ชนิด^๑SAC305^๑เนื่อง^๑จาก^๑แรง^๑เหวี่ยง^๑หนี^๑ศูนย์กลาง^๑ที่^๑ฟิล์ม^๑ วัลโหะ^๑มี^๑ค่า^๑เพิ่ม^๑ขึ้น^๑ตาม^๑ระยะ^๑ห่าง^๑จาก^๑ศูนย์กลาง^๑ที่^๑เพิ่ม^๑ขึ้น^๑ดังนั้น^๑พื้นที่^๑ที่^๑กั้น^๑กั้น^๑ระหว่าง^๑จาน^๑อะตอม^๑ไมเซอร์^๑ที่มี^๑ขนาด^๑เส้น^๑ผ่าน^๑ศูนย์กลาง^๑จะ^๑สามารถ^๑สร้าง^๑แรง^๑เหวี่ยง^๑หนี^๑ศูนย์กลาง^๑ที่^๑ทำ^๑ให้^๑ความเร็ว^๑ขณะ^๑แตก^๑ตัว^๑ของ^๑ผง^๑โลหะ^๑สูง^๑กว่า^๑ที่^๑ส่งผล^๑ให้^๑โอกาส^๑เกิด^๑การ^๑แตก^๑ตัว^๑ของ^๑ฟิล์ม^๑ วัลโหะ^๑สูง^๑จึง^๑มี^๑ผง^๑โลหะ^๑ที่^๑ได้^๑จึง^๑มี^๑ขนาด^๑เฉลี่ย^๑ของ^๑ผง^๑โลหะ^๑ดีบุก^๑ชนิด^๑SAC305^๑พบ^๑ว่า^๑เมื่อ^๑ใช้^๑จาน^๑อะตอม^๑ไมเซอร์^๑ทรง^๑ก้น^๑วาล์ว^๑แทน^๑จาน^๑อะตอม^๑ไมเซอร์^๑ทรง^๑แบน^๑ขนาด^๑เฉลี่ย^๑ของ^๑ผง^๑โลหะ^๑จะ^๑ประมาณ^๑11%^๑ซึ่ง^๑การ

ลดลงด้วยค่า α ที่มีค่าต่ำกว่า α_{crit} (Xiao, 2004) ได้ รายงานไว้ ซึ่งใช้ งานอะตอมไมเซอร์ ทรงกึ่งมุมที่มี 67.5 องศาและวัสดุคือ อนุภาคละเอียดของโลหะดีบุกซึ่งมี $\frac{kg}{hr}$ อัตราการกระจายตัวที่น้อยกว่านี้ ใช้ งานอะตอมไมเซอร์ ทรงกึ่งมุมที่มีมุม 63.5 องศาและใช้ โลหะบัดกรีที่ไร้ตะกั่วชนิด SAC305 เทดด้วยอัตรา 63.3 $\frac{kg}{hr}$ ซึ่งมีค่าความตึงผิวและความหนาแน่นสูงกว่า โลหะดีบุก โลหะที่อุณหภูมิ 100°C เหนือจุดหลอมเหลวที่กั้นจากสมบัติดังกล่าวของโลหะบัดกรีชนิดนี้ มีขนาดเฉลี่ยที่โตกว่า เมื่อมีเงื่อนไขในการผลิตที่เหมือนกัน และด้วยค่าความตึงผิวที่ต่ำกว่า ทำให้ต้องใช้เวลาสูงกว่า เมื่ออัตราเทน้ำโลหะเท่ากันเพื่อทำให้โลหะบัดกรีชนิดนี้เกาะติดบนผิวของงาน



รูปที่ 3.46 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมชันของขอบจานอะตอมไมเซอร์กับมุมเปียกวิกฤติของอนุภาคละเอียดของโลหะดีบุกบนผิวงานอะตอมไมเซอร์ที่มีงานอะตอมไมเซอร์ เทน้ำที่ 30 mm อัตราเทน้ำโลหะ $\frac{m^3}{s}$ และความเร็วยรอบ 15,000 rpm [Zhao, 2004 B]

ผลจากการศึกษาของ Zhao (2004 B) พบว่ามุมชันของขอบจานอะตอมไมเซอร์ช่วยทำให้ค่ามุมเปียกวิกฤติของอนุภาคละเอียดของโลหะบนผิวงานอะตอมไมเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.46) โดยในระหว่งที่อนุภาคละเอียดที่บนผิวงานอะตอมไมเซอร์มีความเร็วที่สูงขึ้นตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของงานอะตอมไมเซอร์ ค่ามุมเปียกของอนุภาคละเอียดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น และเมื่อมีค่าเท่ากับค่ามุมเปียกวิกฤติของอนุภาคละเอียดนั้นแล้วอนุภาคนั้นจะหลุดออกจาก

ออกซิ เจน น้อย ารวดเร็ว วก ำให้ ละอองน้ำ โลหะที่ ผลิต นั้ อติ กามেন্ট ไม่ สามารถ ฟอรั มต์ วกถึ บเป็ นทรงกลมและขั งทำ ำให้ ความสามารถในกำนทุ ดิ ญู มิ (Secondary Disintegration) ของน้ำ โลหะลดลง [Xiet al., 2004] คั งนี้ ันการลดปริ มาณออกซิ เจนภายในถึ ง อะตอมไมเซอร์ กั ่อนการผลิ ตผงโลหะจึ งขั วยลดพิ ลั มออกไซด์ นั้ ะการที่ลดลงว้ คคั ำความ ดี งมิ วจของอลู มิ เน็ ยมในบรรยากาศปกติ และบรรยากาศในออร์บ Heikhaliev, et al. (2008) พบว้ ำความดี งมิ วดลดลงจากเด็ ม 25 % และเมื่ อพิ จารณที่สภาพพบว้ ำขนาดเฉลี่ย ะของผงโลหะ แปรผัน นโดยตรงกั บรากที่ 2 ของความดี งมิ วด คั งนี้ ันการมีอิทธิพล ลั มออกไซด์ ลดลงและคั ำ ความดี งมิ วดลดลงจึ งทำ ำให้ ขนาดของผงโลหะบ้ ดกรี ไร้ สารตะกั ๋วชนิด SAC305 ในการวิ จั ยครั้ ง นี้ ันได้ ำ คคั ำความดี งมิ วดที่เปลี่ ยนแปลงไปของโลหะบ้ ดกรี ไร้ ไม่ พบว้ ำมีการรายงานผล การที่ กษาศมบ้ ดิ คั งกลั ำวอัย งไรก็ ดี หากเปรี ะยเทึ ยบกั บผลการที่ ะหว้ นผลการทดลอง เทนั ำโลหะที่ อู ฌหญู มิ ตั ำงๆ พบว้ ำคั ำที่ ได้ ำจากการคั ำขนาดนี้ ันการเปลี่ ยนเปลี่ นความดี งมิ วด และความหนาแน่น ันน้ำ โลหะลดลงตามอู ฌหญู มิ เทที่ ะเพิ่มขึ้ ำการที่ ะเพิ่มความเข้ มขั นของกำ ำช ออกซิ เจนไม่ ได้ ำทำ ำให้ ความหนาแน่น ะของน้ำ โลหะลดลงขั ะขั ะไม่ ะระยะเวลาในการเข้ งตั ำ ของละอองน้ำ โลหะจากอู ฌหญู มิ เทที่ ะเพิ่มขึ้ ันคั ำเปลี่ ะนั้ ำขนาดของผงโลหะจาก เจ็ ่อนไขการควบคุม บรรยากาศนั้ อยกว้ ำการเพิ่มอู ฌหญู มิ ะแทนเปลี่ ะนั้ ำขนาดในขั ะวงแคบๆ เท้ ำนั้ ันกลั ำวคั ำการลดลงของขนาดเฉลี่ย ะจะลดเมื่ อคั ำขั ะขั ะออกซิ เจนถู กควบคุม ำให้ ะลดลง ถึ งคั ำๆ นั้ ะงเท้ ำนั้ ัน หลั ำจากนั้ ันขนาดเฉลี่ย ะและรวมถึ ะจนถึงขั ะขั ะ

3.5.3 ผลผลิ ตผงโลหะบ้ ดกรี ไร้ สารตะกั ๋วชนิด SAC305

ผลผลิ ตผงโลหะบ้ ดกรี ไร้ สารตะกั ๋วชนิด SAC305 ที่ ะใช้ ะทดลองครั้ งนี้ ันมี คั ำสุ งสุ ดไม่ ะเกิน 50 % เมื่ อเปรี ะยเทึ ยบกั บขั ะขั ะ 1.5 ในขั ะวงกลั ำวว้ ำกระบวนการผลิ ตผง โลหะดั ำยวิ ธี อะตอมไมเซซั นโดยอากั ะยหลั ำการหมุน ะนั้ ะการที่ ะให้ ะผลผลิ ตสุ งถึ ง 85-90% [Dunkley and Aderhold, 2007] พบว้ ำผลจากการทดลองที่ ะได้ ำนั้ ันมี คั ำคั ำกว้ ำที่ ะระบุ ำไว้ มากที่ ะงนี้ ันเนื่อง ำจากในการทดลองครั้ งนี้ ันกำ ำหนดขั ะวงขนาดที่ ะสนั ำ $45+25\mu m$ ขั ะงจึ ะเป็ นผงโลหะ Type III โดยในทางทฤษฎี หากใช้ ำความเร็ว ะรอบ 20,000 rpm ะจะผลิ ตผงโลหะที่ ะมี ำขนาดเฉลี่ย ะ 64 μm (คั ำ ำนวนจากสมการที่ 1.1) และเมื่ ออู ฌดั ำยคั ำ ำมาตรฐานการกระจายขนาดเท้ ำกั บ 1.5 ขนาด ของผงโลหะที่ ะนั้ ำหนั กสะสม 84 % มี คั ำเท้ ำ $64\mu m$ ะแสดงให้ ะเห็น ำว้ ำคั ำความเร็ว ะดั ำงกลั ำว ะเหมาะที่ ะจะใช้ ำผลิ ตผงโลหะที่ ะมี ำขนาดเฉลี่ย ะมากกว่า ำถึ ำหากต้ ำองการผลิ ตผงโลหะที่ ะมี ำขนาดอยู่ ำ ในขั ะวง $-45+25\mu m$ และมี คั ำ ำมาตรฐานการกระจายขนาดเท้ ำกั บ 1.5 จึ ะเป็ นที่ ะสมควร ะเร็ว ะรอบ จาก 20,000 rpm ให้ ำสุ งจึ ะนั้ ะเป็ น 43,000 rpm

3.5.4 รูปร่างของผลโลหะ

ในการทดลองครั้งนี้ พบว่า ผลโลหะที่ผลิตได้ ส่วนใหญ่มีลักษณะแบน หยดน้ำ แก๊ส และรูปร่างไม่แน่นอน เมื่อผลิตตกภายใต้ปฏิกิริยาเหตุที่ทำให้ผลโลหะมีรูปร่างแบบต่างๆ แทนที่จะเป็นรูปร่างกลมเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิวของโลหะตามทีกล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมาจากผลการศึกษากาผลผลิตตผลดีของไมเซชันอินทรีย์ของ Xiet al. (2004) พบว่า รูปร่างของผลโลหะที่ผลิตได้ส่วนใหญ่เป็นรูปที่พบในการทดลองครั้งนี้ และสอดคล้องกับผลการศึกษากาผลผลิตของ (2008) ที่นำเสนอผลการทดลองเปรียบเทียบรูปร่างของผลโลหะอลูมิเนียมที่ผลิตโดยวิธีปกติ รูปร่างของอนุภาคไม่เป็นทรงกลมแต่สำหรับผลโลหะที่ผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนลดลง ความยาวของอนุภาคที่มีรูปร่างแบบลิแกเมนต์มีขนาดที่ใกล้เคียงรูปร่างหยดน้ำมากที่สุด และยังผลให้ค่าตัวประกอบความเป็นทรงกลมมีค่าลดลงผลโลหะที่มีลักษณะกลมมากที่สุดเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนเท่ากับ 2%

นอกจากนี้แล้ว ยังพบลักษณะที่อนุภาคขนาดเล็กเปลี่ยนแปลงโดยที่ที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือที่เรียกว่า Satellite (รูปที่ 3.4) ซึ่งลักษณะแบบนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างอะตอมไมเซชันโดยโลหะขนาดเล็กซึ่งแข็งและเคลื่อนที่ช้ากว่าอนุภาคโลหะขนาดใหญ่ที่แข็งตัวแล้วบางส่วนจึงเข้าชนกับอีกอนุภาคติดกัน [German, 2005] การเกิด Satellite นี้ อาจมีผลทำให้ขนาดเฉลี่ยของผลโลหะที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น

บทที่ 4

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองผลิตผงโลหะดีบุกด้วยชุดทดสอบผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน โดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยง และการทดลองผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC30 ด้วยเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน โดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1) ก้อนโลหะที่แข็งตัวเกาะบนผิวหน้าจานอะตอมไมเซอร์จะเกิดมากในช่วงที่เริ่มเทน้ำโลหะลงบนจานหมุนแล้วจึงค่อยๆ ลดลงและจะเกิดในอัตราที่คงที่เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลทางความร้อน ก้อนโลหะดังกล่าวทำให้จานอะตอมไมเซอร์สั่นสะเทือนอย่างรุนแรง และอาจเป็นสาเหตุให้มอเตอร์ได้รับความเสียหายได้ ปรากฏการณ์นี้สามารถลดได้โดยการเพิ่มอัตราเร็วในการเทน้ำโลหะ เพิ่มอุณหภูมิเทน้ำโลหะ หรือเพิ่มอุณหภูมิเริ่มต้นของจานอะตอมไมเซอร์ก่อนเริ่มผลิตผงโลหะ (Preheating)

2) สมบัติการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 บนผิวจานอะตอมไมเซอร์ซึ่งทำจากเหล็กเหนียวสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตผงโลหะโดยวิธีการเคลือบผิวหน้าของจานอะตอมไมเซอร์ด้วยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ก่อนนำไปใช้งาน

3) ขนาดเฉลี่ยผงโลหะดีบุกสามารถควบคุมให้เล็กลงได้โดย การเพิ่มความเร็วรอบของจานอะตอมไมเซอร์ การลดอัตราเร็วในการเทน้ำโลหะ การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจานอะตอมไมเซอร์ และการเพิ่มอุณหภูมิเทน้ำโลหะ

4) แบบจำลองวิธีการเคลื่อนที่และพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนระหว่างละอองน้ำโลหะดีบุกกับสิ่งแวดล้อมแสดงให้เห็นว่าผงโลหะที่มีขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงต่ำกว่าและตกลงสู่พื้นเร็วกว่าละอองน้ำโลหะที่มีขนาดเล็ก โดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ต้องการระยะทางเพื่อถ่ายเทความร้อนสูงกว่าอนุภาคขนาดเล็ก หากต้องการผลิตผงโลหะดีบุกที่มีขนาดเฉลี่ยเล็กกว่า 72 μm จะต้องออกแบบให้ถังอะตอมไมเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 3.0 m

5) ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 สามารถควบคุมให้เล็กลงได้โดย การเพิ่มความเร็วยรอบของจานอะตอมไมเซอร์ การลดอัตราเร็วในการเทน้ำโลหะ และการเพิ่มขนาดจานอะตอมไมเซอร์

6) สำหรับการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตโดยใช้จานอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วยจะมีขนาดเล็กกว่าที่ผลิตจากจานอะตอมไมเซอร์ทรงแบนประมาณ 11%

7) ผลผลิตของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ด้วยวิธีอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดของจานอะตอมไมเซอร์ให้โตขึ้น ใช้จานอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วยแทนทรงแบน หรือลดอัตราเร็วในการเทน้ำโลหะ

8) การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการเพื่อควบคุมขนาดของโลหะให้ได้ขนาดตามที่ต้องการจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆเช่น การปรับเพิ่มความเร็วยรอบที่สูงมากอาจทำให้น้ำโลหะแตกตัวก่อนถึงขอบจานอะตอมไมเซอร์ ขนาดของจานอะตอมไมเซอร์หากเพิ่มให้สูงขึ้นจะเพิ่มระยะเวลาในการเกิดก้อนโลหะแข็งตัวที่ผิวจานและทำให้เกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงเป็นสาเหตุให้มอเตอร์ได้รับความเสียหาย อัตราเทน้ำโลหะหากสูงเกินไปทำให้เกิดปรากฏการณ์ไฮดรอลิกจัมพ์หรือหากต่ำเกินไปจะทำให้เกิดก้อนโลหะนานขึ้นและเพิ่มโอกาสเกิดการแตกตัวก่อนถึงขอบจาน และอุณหภูมิเทน้ำโลหะหากต่ำเกินไปจะทำให้ผงโลหะมีการกระจายที่แปรปรวนมาก หรือหากสูงเกินไปก็ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการหลอมโลหะมากขึ้น ดังนั้นในการผลิตผงโลหะชนิดใดชนิดหนึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จึงจำเป็นต้องปรับตั้งให้ได้ค่าที่ดีที่สุดสำหรับเครื่องผลิตผงโลหะแต่ละเครื่อง

9) ขนาดเฉลี่ยและผลผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 เปลี่ยนแปลงดีขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศขณะผลิตลดลงเหลือ 1.7% ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนนั้น ไม่มีอิทธิพลต่อขนาดเฉลี่ยและผลผลิตผงโลหะ โดยตรง แต่จะมีอิทธิพลเป็นอย่างสูงต่อการปนเปื้อนของก๊าซออกซิเจนที่ผิวของอนุภาคผงโลหะ หากต้องการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่มีปริมาณออกซิเจนของผงโลหะไม่เกิน 100 ppm จะต้องควบคุมให้บรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ขณะทำการผลิตให้มีออกซิเจนในปริมาณที่ต่ำกว่า 0.04% หรือ 400 ppm

10) ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตด้วยวิธีอะตอมไมเซชันโดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงมีรูปทรงแบบหยดน้ำ ลิกาเมนต์ เกล็ด และ รูปทรงไม่แน่นอน ในการผลิต

สามารถทำให้ผงโลหะมีรูปร่างกลมขึ้น โดยการลดปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศภายใน ถังอะตอมไมเซอร์ขณะที่ทำการผลิตผงโลหะ

4.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรพัฒนาและปรับปรุงระบบการเทน้ำโลหะใหม่โดยใช้วิธีอัดด้วยก๊าซเฉื่อยหรือก๊าซไนโตรเจนควบคุมการไหลของน้ำโลหะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมอัตราเร็วในการเทน้ำโลหะให้คงที่

2) ในการออกแบบท่อจ่ายน้ำโลหะควรออกแบบให้สามารถถอดประกอบได้จากภายนอก เพื่อให้สามารถถอดออกมาทำความสะอาดได้หากเกิดการอุดตันระหว่างการผลิตผงโลหะ

3) ควรออกแบบให้ถังอะตอมไมเซอร์ส่วนที่เป็นทรงกระบอกมีความสูงมากขึ้น เพื่อป้องกันการพอกของผงโลหะที่ผนังด้านบนถังอะตอมไมเซอร์เนื่องจากการใช้งานอะตอมไมเซอร์ ทรงด้วยซึ่งทำให้วิถีทางเดินของละอองน้ำโลหะเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้งก่อนเล็กน้อยแล้วจึงตกอย่างอิสระ

4) ควรออกแบบอุปกรณ์เป่าลมร้อนเพื่อใช้อุ่นงานอะตอมไมเซอร์ใหม่ให้สามารถใช้งานได้ทันที โดยอาจใช้ฮีตเตอร์รูปตัว I แบบมีกริบบแทนเส้นลวดด้านทานที่เสียหายได้ง่ายเมื่อใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลานาน

5) ความหนาของเหล็กแผ่นที่ใช้ทำถังอะตอมไมเซอร์ควรมีความหนามากกว่า 6.35 mm หรือ 0.25 in ในกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือน้อยกว่าเครื่องผลิตผงโลหะที่สร้างขึ้นในโครงการวิจัยนี้ เพื่อความแข็งแรงและป้องกันถังอะตอมไมเซอร์ยุบตัวขณะดูดอากาศออกด้วยปั๊มสูญญากาศในการปรับลดความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์

6) ควรมีการเสริมแรงถังอะตอมไมเซอร์ในส่วนของกรวยเพิ่ม (ส่วนทรงกระบอกขนาด 3 m ได้เสริมแรงไว้แล้ว) เพื่อช่วยลดการเสียรูปของถังอะตอมไมเซอร์ขณะดูดอากาศออกจากถังอะตอมไมเซอร์ และไม่ควรรูดอากาศออกจนกระทั่งความดันในถังมีค่าน้อยกว่า 20 cmHg (vac)

7) ในการทดลองไม่ควรเทน้ำโลหะออกจากเตาหลอมน้ำโลหะจนหมด ควรเหลือไว้บางส่วนเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกไปอุดตันที่วาล์วควบคุมน้ำโลหะ

8) สำหรับการเทน้ำโลหะ ในกรณีที่มีสิ่งสกปรกอุดตันที่หัวฉีด จะต้องปิดวาล์วควบคุมน้ำโลหะก่อนแล้วจึงปล่อยก๊าซไนโตรเจนที่มีความดันสูง 3-5 บาร์ (เกจ) เพื่อเป่าสิ่งอุดตันออก ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำโลหะไหลย้อนกลับไปยังเบ้าหลอมโลหะ

9) ในการทดลองทุกครั้งควรสวมใส่ชุดที่รัดกุมเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นระหว่างการทดลองและควรสวมใส่หน้ากากกรองอนุภาคที่สามารถกรองอนุภาคที่มีขนาด 5 μm หรือต่ำกว่าได้ขณะที่ปฏิบัติงานในถังอะตอมไมเซอร์

10) ในกรณีที่ทำการทดลองผลิตผงโลหะซึ่งต้องควบคุมบรรยากาศเมื่อต้องการเข้าไปในถังอะตอมไมเซอร์หลังการทดลองต้องเปิดฝาดังออกแล้วใช้พัดลมเป่าอากาศเข้าไปชำระระยะหนึ่งก่อนแล้วจึงเข้าไปปฏิบัติงาน เพื่อป้องกันการหมดสติเนื่องจากออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์มีน้อยเกินไป

11) ควรปิดสวิทช์หลักและแต่งกายอย่างรัดกุมและ สวมถุงมือหนังทุกครั้งที่ต้องเข้าไปปฏิบัติงานในถังอะตอมไมเซอร์ เพื่อป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าลัดวงจร

12) สำหรับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและเกิดการออกซิเดชันได้ง่ายเช่น โลหะบัดกรี SAC305 หรือ โลหะดีบุก เป็นต้น ควรทำทดลองภายใต้บรรยากาศควบคุมซึ่งมีความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนไม่เกิน 5% เพื่อป้องกันการสูญเสียเนื้อโลหะจากการเกิดฟิล์มออกไซด์ สำหรับผงโลหะที่ต้องการนำกลับมาใช้ใหม่ ไม่ควรทิ้งไว้นานเพราะเมื่อนำไปหลอมใหม่จะเกิดตะกรัน (Dross) จำนวนมาก

บรรณานุกรม

- กระทรวงพาณิชย์. 2553. “สินค้าส่งออกที่สำคัญของไทย”, กระทรวงพาณิชย์ <www.moc.go.th/> (17 กุมภาพันธ์ 2553)
- นภิสพร มีมงคล. 2548. โลหะกรรมวัสดุผง. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หาดใหญ่, สงขลา.
- Centers for Disease Control and Prevention. 2009. “Fact sheet: Lead”, <www.cdc.gov/> (Feb. 17, 2010).
- Abteu, M. and Selvaduray, G. 2000. “Lead-free Solder in Microelectronics”, Materials Science and Engineering, Vol. 27, 95-141.
- Ahmed, M.A. and Youssef, M.S. 2001. “Effect of Geometry of Rotating Disks and Cups on Spray Characteristics”, Proceedings of the ILASS-Europe, Zurich.
- Cengel, Y.A. 2004. “External Heat Convection”, Heat Transfers: A Practice Approach Second Edition in SI Units. McGraw Hill, Singapore 367-418.
- Dunkley, J.J. and Aderhold, D. 2007. “Centrifugal Atomisation of Metal Powders”, Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 26-31.
- Dunkley, J.J., Mais, B. and Ruthardt R. 2003. “Metal Powders”, Group VIII: Advanced Materials and Technologies Volume 2. Springer-Verlag, New York.
- Teunou, E. and Poncelet, D. 2005. “Rotary Disc Atomization for Microencapsulation Applications-prediction of the Particle Trajectories”, Journal of Food Engineering, Vol. 71, 345-353.
- German, R. M. 1994. Powder Metallurgy Science 2nd edition. Metal Powder Industries Federation, 105 College Road East, Princeton, New Jersey.
- German, R. M. 2005. A-Z of Powder Metallurgy. Elsevier Advanced Technology, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, UK.
- Ho, K.H. and Zhao, Y.Y. 2004. “Modeling Thermal Development of Liquid Metal Flow on Rotating Disc in Centrifugal Atomization”, J. Materials Science and Engineering A, Vol. 365, 336-340.
- Lawley, A. 2000. “Metal Powder Production via Melt Atomization”, Liquid Metal Atomization: Fundamentals and Practice (ed. Cooper, K.P., Anderson, I.E., Ridder, S.D. and

- Biancaniello, F.S.), The 2000 TMS Annual Meeting in Nashville, Tennessee, 3-21.
- Lee, S. 2009. "Introduction to Solidification and Alloy System", <www.eng.ubu.ac.th> (Feb. 17, 2010)
- Munson, B.R., Young, D.F. and Okiishi T.H. 2006. "External Flow Past Bodies", Fundamentals of Fluid Mechanics, 5th Edition, John Wiley and Sons, Inc., 614-683.
- Ouyang, H. 2005. "Vibration of an Atomizing Disc Subjected to a Growing Distributed Mass", J. the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 53, 1000-1014.
- Sheikhaliev, M.S., Sheikhaliva Z.I. and Dunkley J.J. 2008. "Spin Atomisation Makes Tighter, Safer Aluminium", Metal Powder Report, Vol. 63, 28-30.
- Tsakiropoulous, P. and Li, H. 2000. "Centrifugal Atomization of Alloys", Liquid Metal Atomization: Fundamentals and Practice (ed. Cooper, K.P., Anderson, I.E., Ridder, S.D. and Biancaniello, F.S.), Proceeding of the 2000 TMS Annual Meeting in Nashville, Tennessee, 145-155.
- Xie, J.W., Zhao, Y.Y. and Dunkley, J.J. 2004. "Effect of Processing Conditions on Powder Particle Size and Morphology in Centrifugal Atomization of Tin", J. Powder Metallurgy, Vol. 47, 168-172.
- 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, Vol. 12, 959-971.
- 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, Vol. 12, 973-983.
- Zhao, Y.Y. 2006. "Consideration in Designing of a Centrifugal Atomizer for Metal Powder Production", Materials and Design, Vol. 27, 745-750.

ลึทธิบัตร

- Klaphaak, D.J. and Barnes, L.G. 1973. "Method of Centrifugal Atomization" U.S. Pat 3,720,737 March 13, 1973.

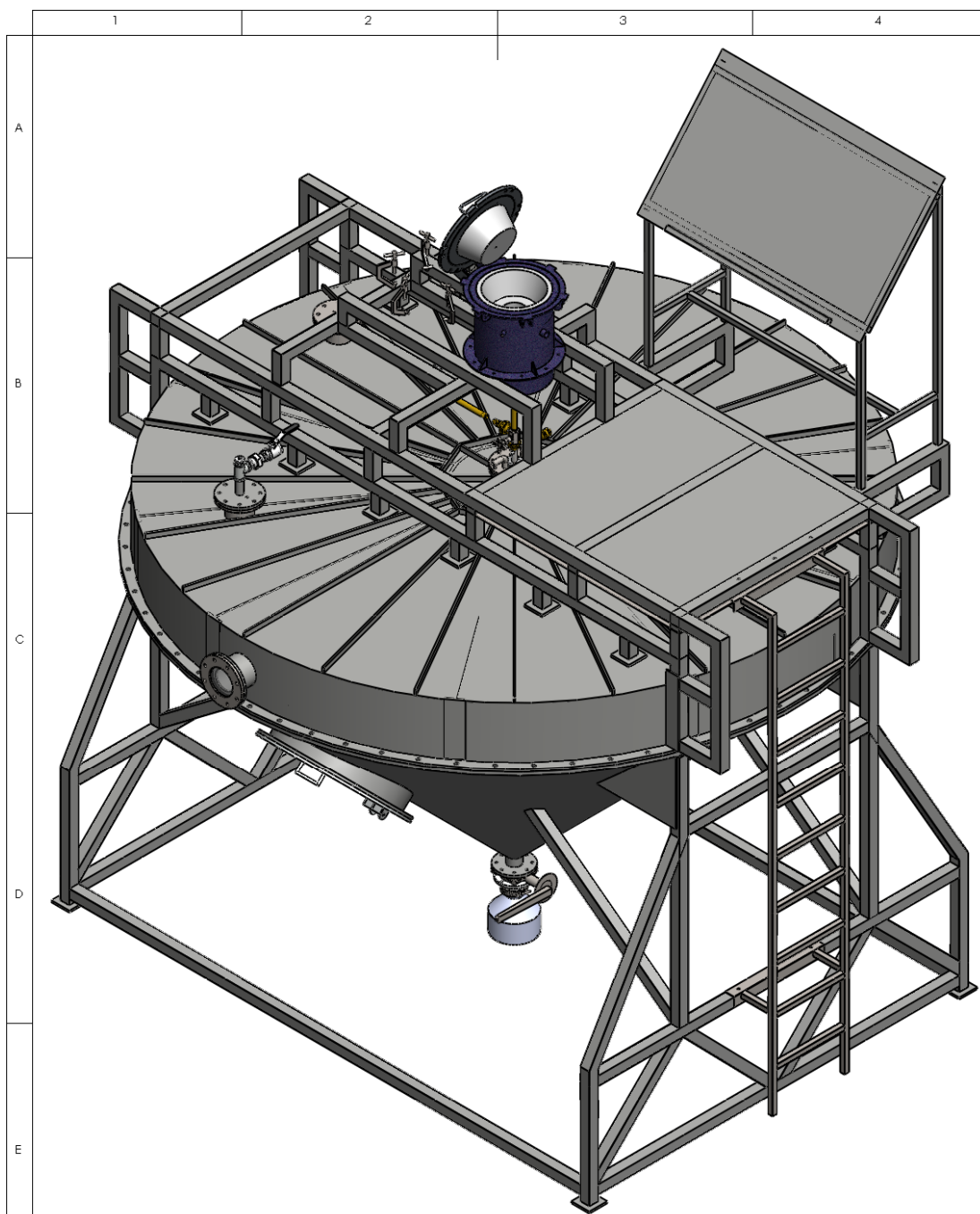
- Konishi, A. 2004. "Apparatus for Fabrication Powdery Thermoelectric Material and Method of Fabricating Powdery Thermoelectric Material Using the Same" U.S. Pat 6,808,677 B2. Oct. 26, 2004.
- Suzuki, G. 1999. "Process for Producing Spherical Metal Particles" U.S. Pat 5,917,113. Jun. 29, 1999.

ภาคผนวก

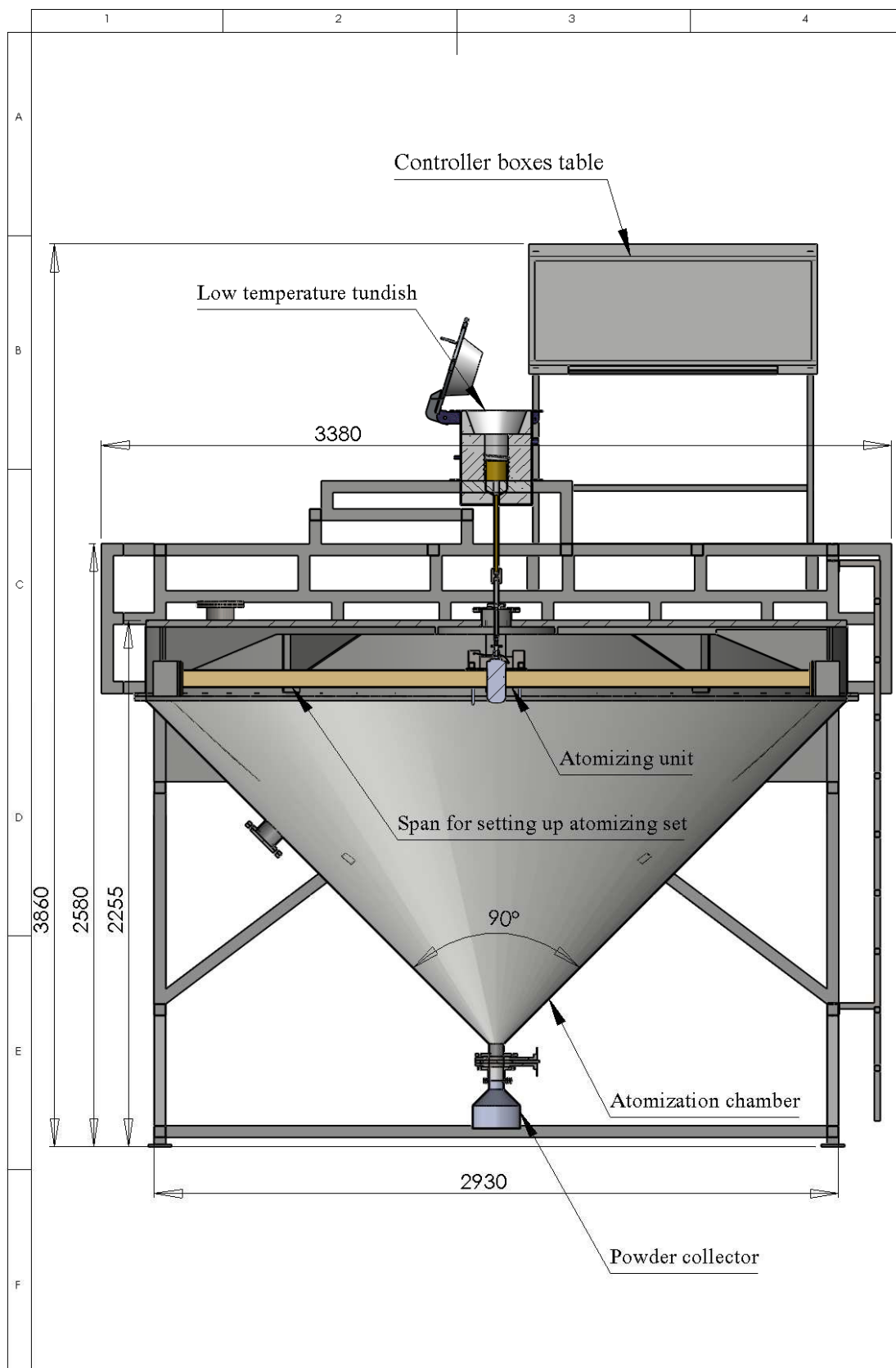
ภาคผนวก ก

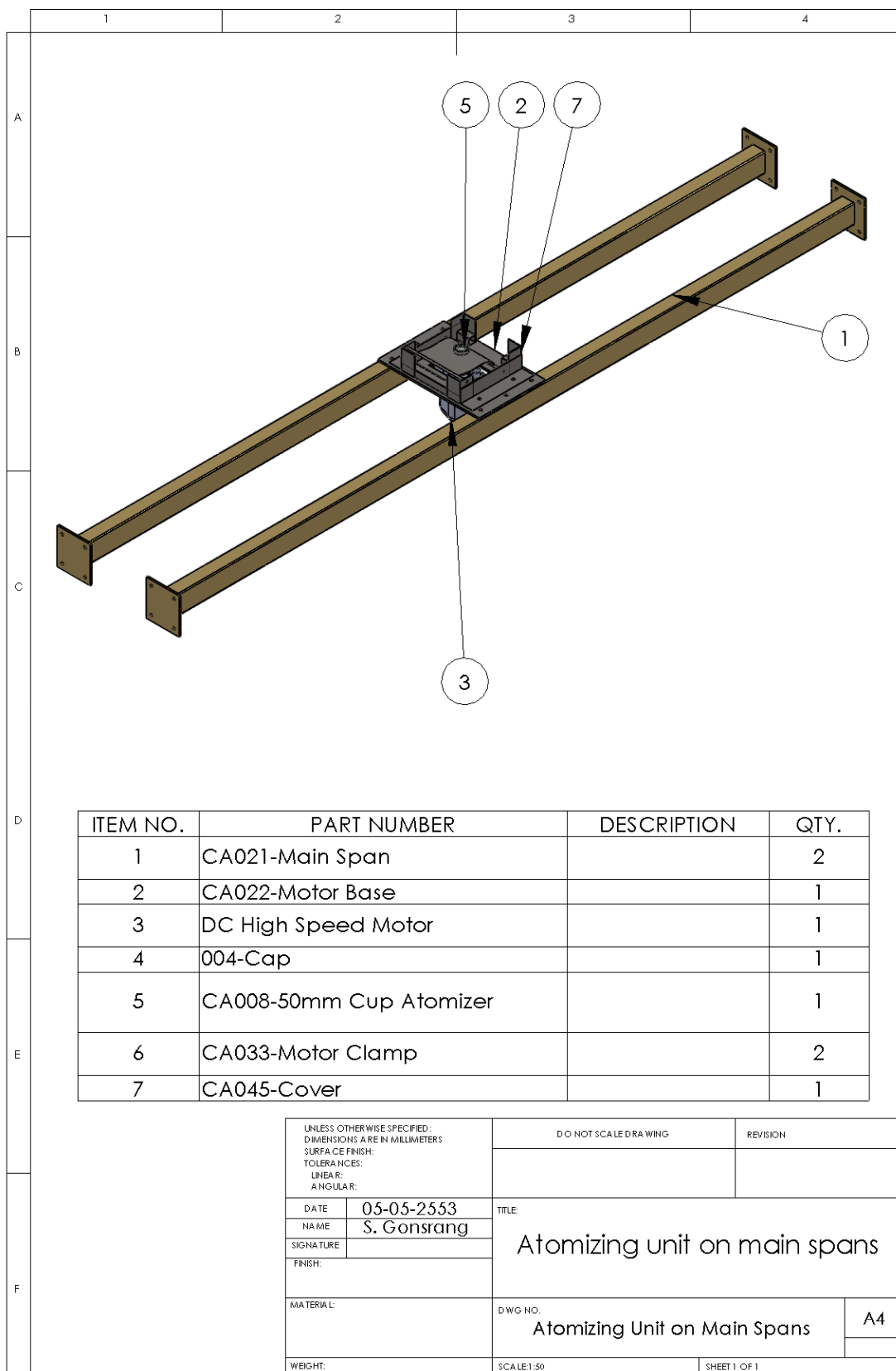
แบบชิ้นส่วนเครื่องผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน

โดยอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยง



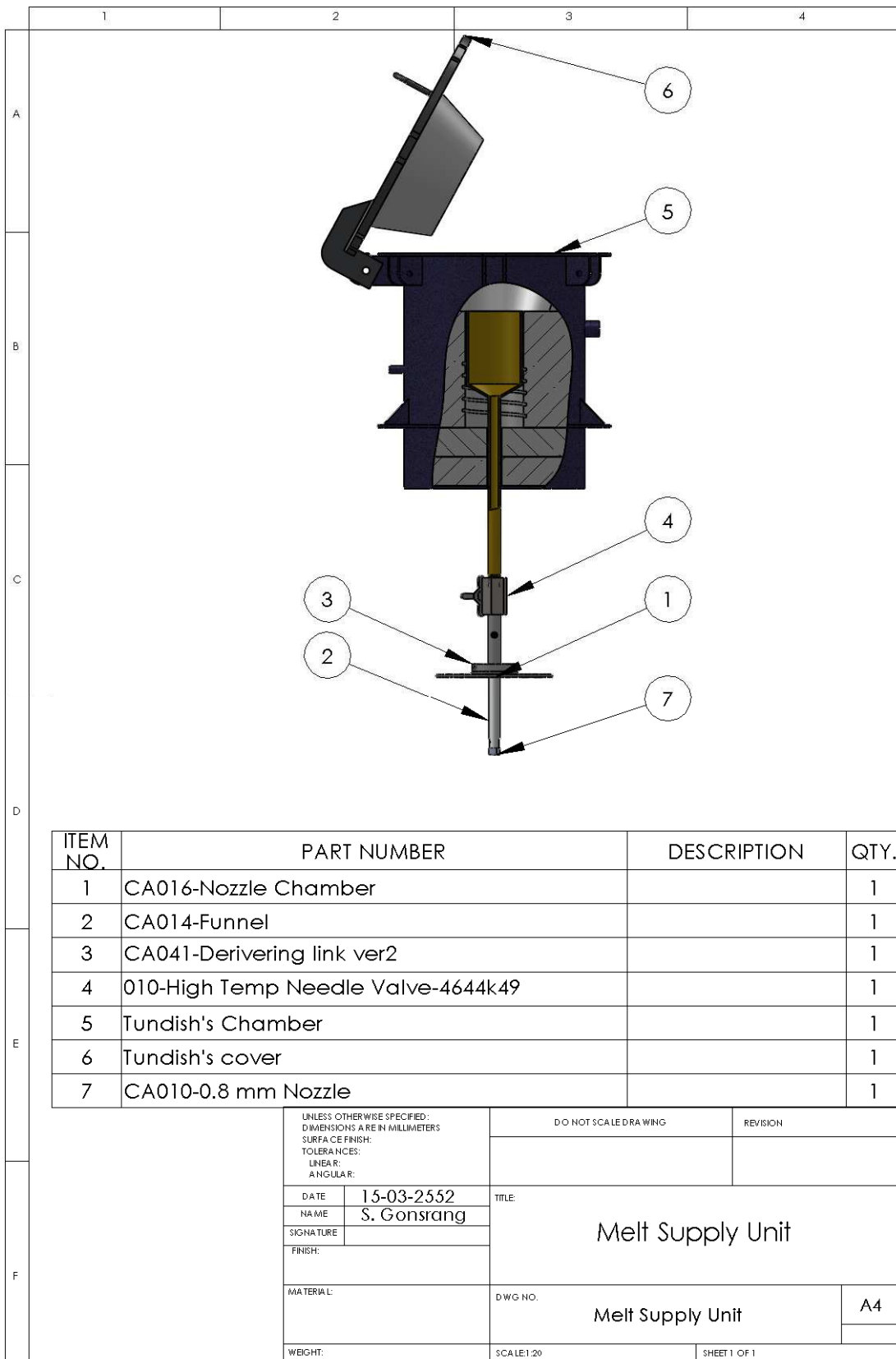
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DATE	13-05-2552	TITLE: CA-Iso	
NAME	S. Gonsrang		
SIGNATURE			
FINISH:		DWG NO. CA Iso	
MATERIAL:			
WEIGHT:		SCALE:1:100	SHEET 1 OF 1
			A4





ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	CA021-Main Span		2
2	CA022-Motor Base		1
3	DC High Speed Motor		1
4	004-Cap		1
5	CA008-50mm Cup Atomizer		1
6	CA033-Motor Clamp		2
7	CA045-Cover		1

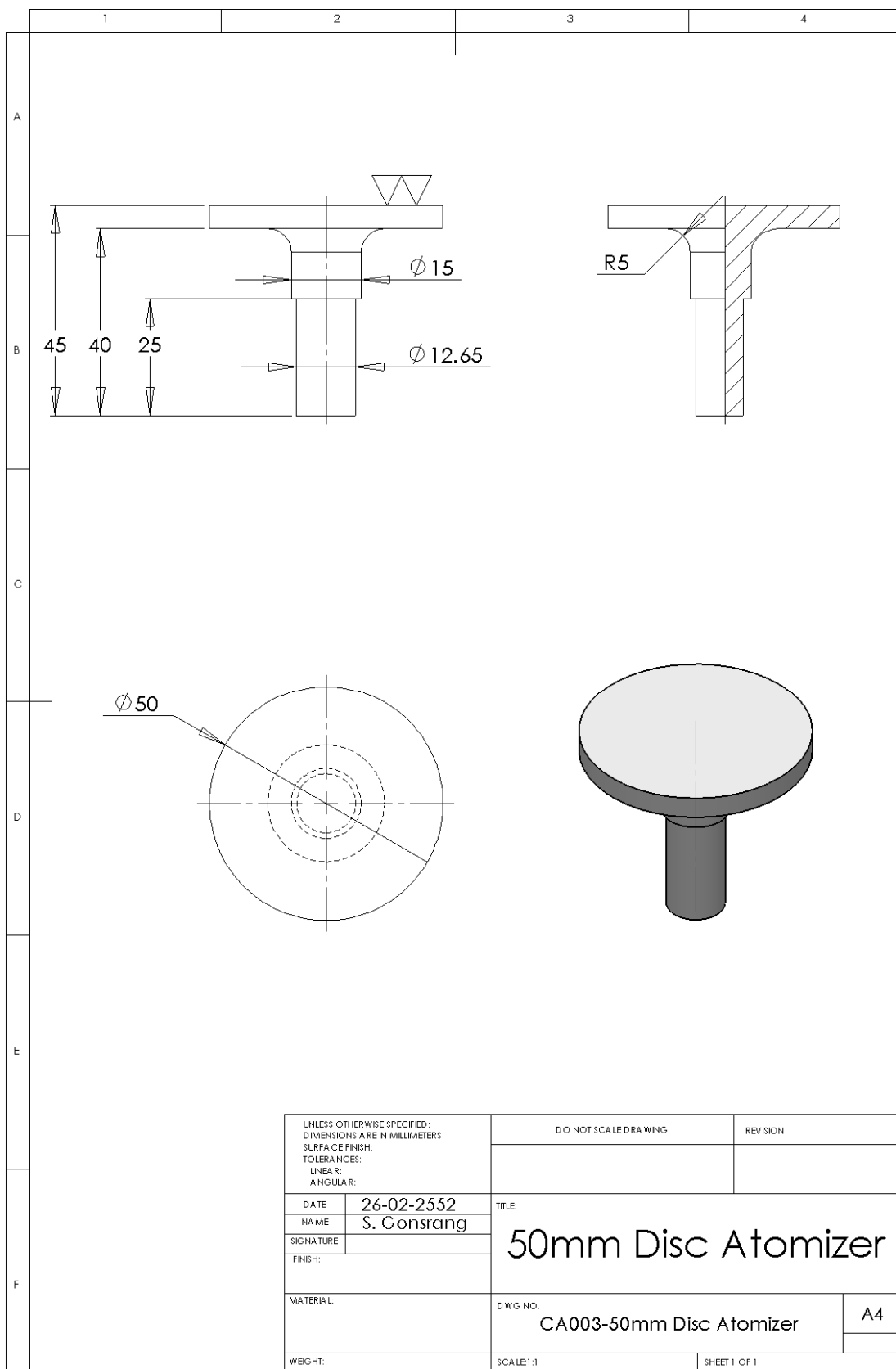
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DATE	05-05-2553	TITLE Atomizing unit on main spans			
NAME	S. Gonsrang				
SIGNATURE		DWG NO.		A4	
FINISH:		Atomizing Unit on Main Spans			
MATERIAL:		SCALE: 1:50		SHEET 1 OF 1	
WEIGHT:					



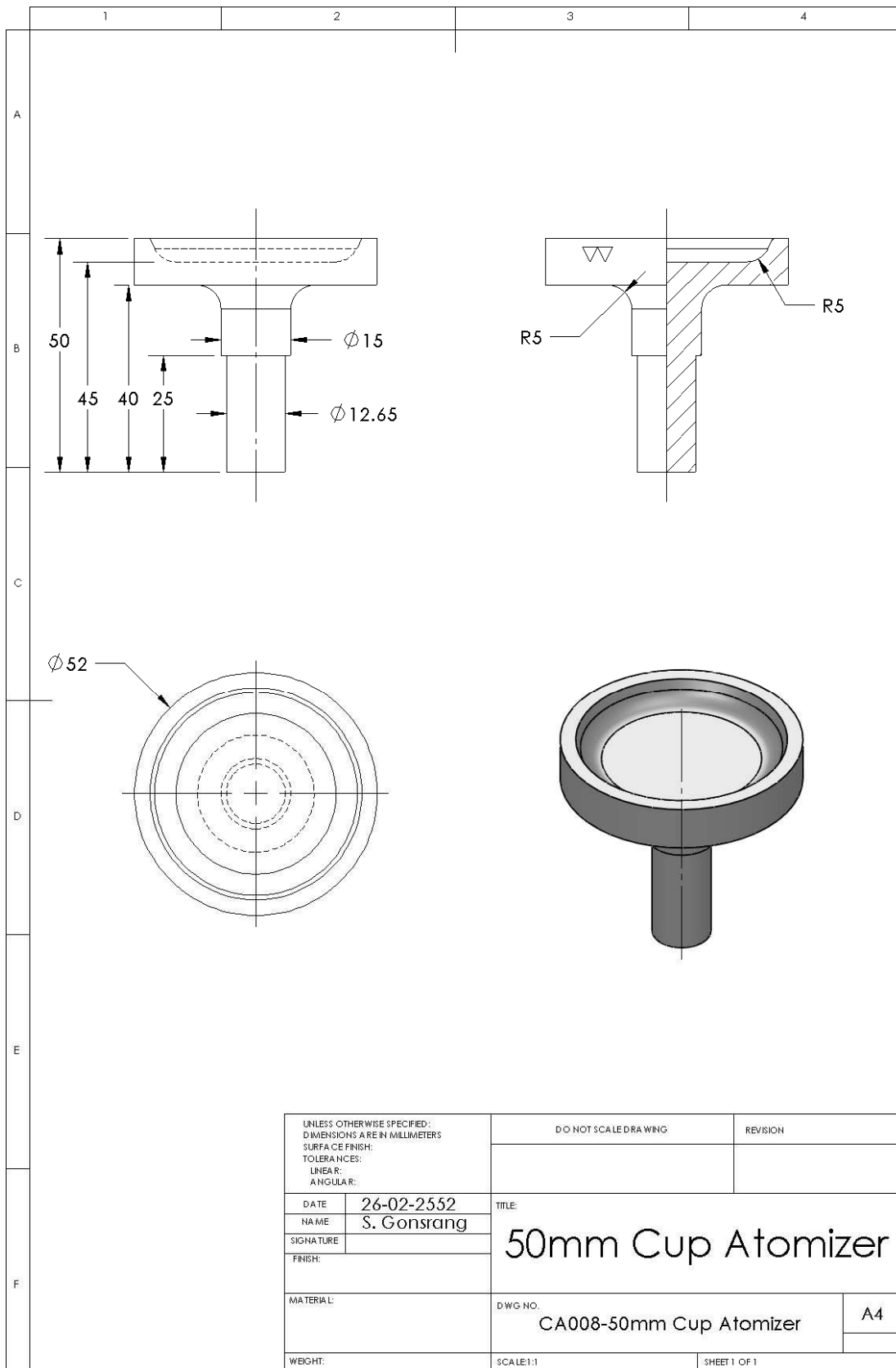
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	CA016-Nozzle Chamber		1
2	CA014-Funnel		1
3	CA041-Derivering link ver2		1
4	010-High Temp Needle Valve-4644k49		1
5	Tundish's Chamber		1
6	Tundish's cover		1
7	CA010-0.8 mm Nozzle		1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DATE	15-03-2552	TITLE: Melt Supply Unit	
NAME	S. Gonsrang		
SIGNATURE			
FINISH:			
MATERIAL:		DWG NO.	Melt Supply Unit
WEIGHT:		SCALE:1:20	SHEET 1 OF 1

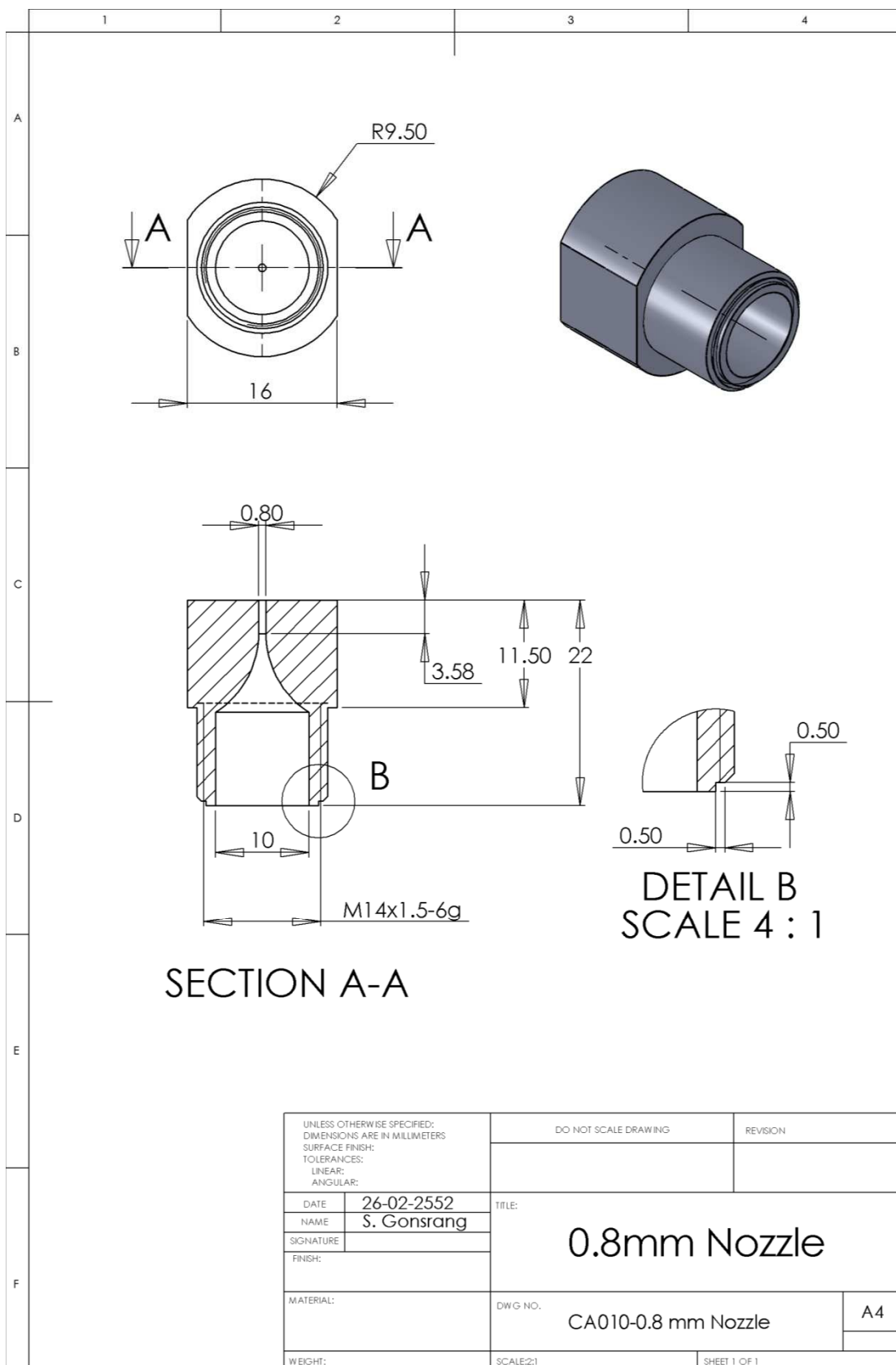
A4

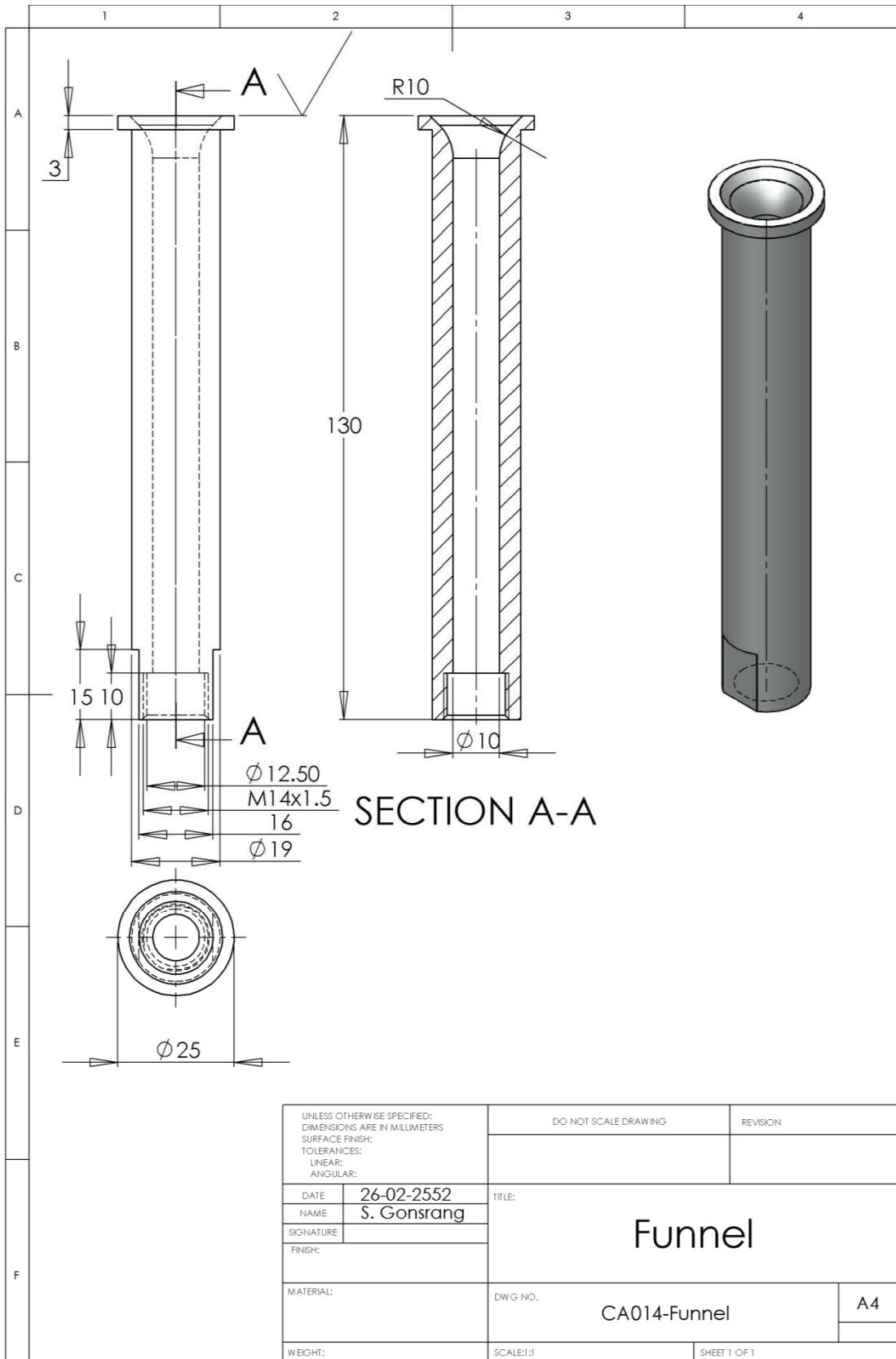


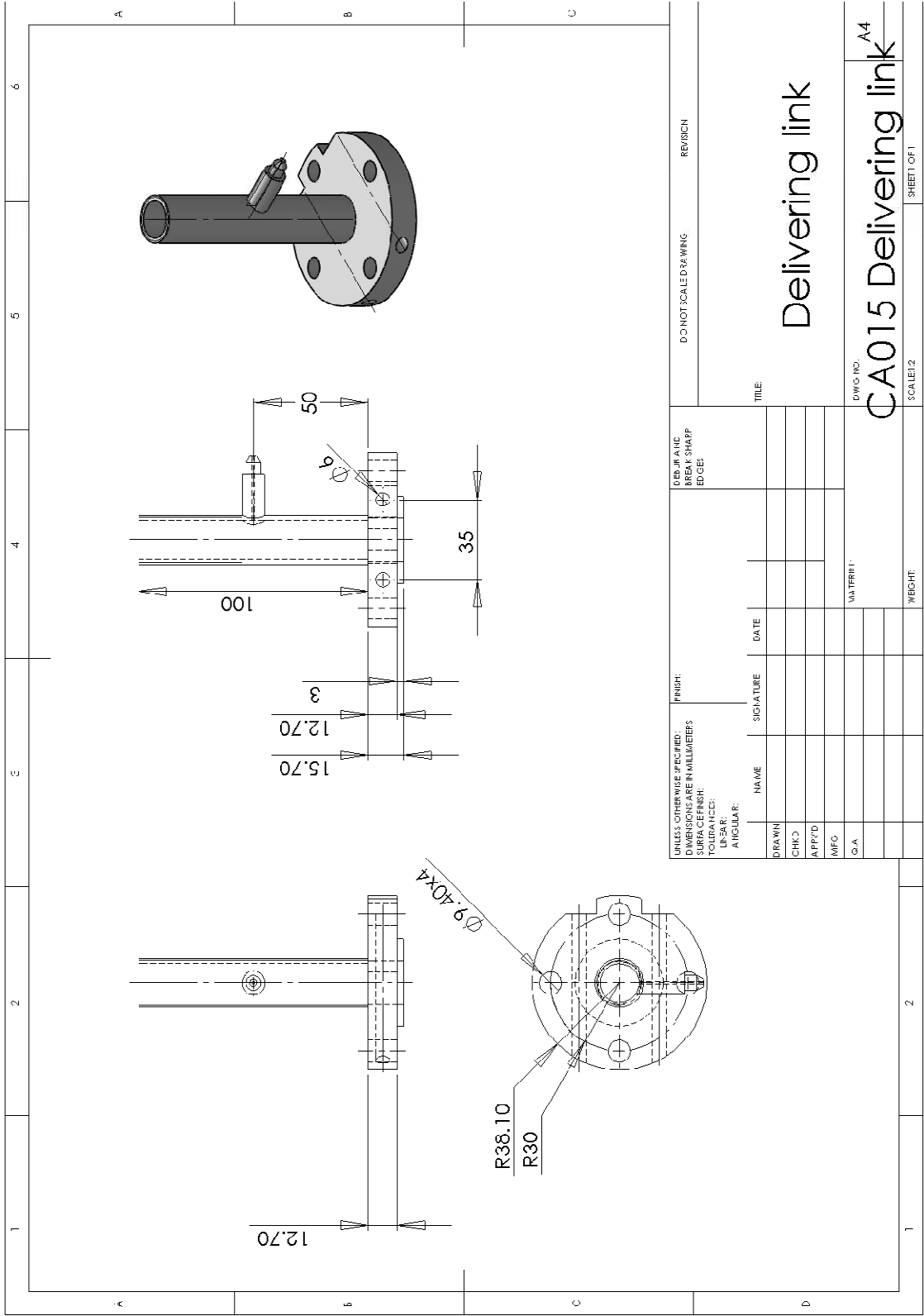
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DATE	26-02-2552	TITLE:			
NAME	S. Gonsrang	50mm Disc Atomizer			
SIGNATURE					
FINISH:		DWG NO.		A4	
MATERIAL:		CA003-50mm Disc Atomizer			
WEIGHT:		SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1		

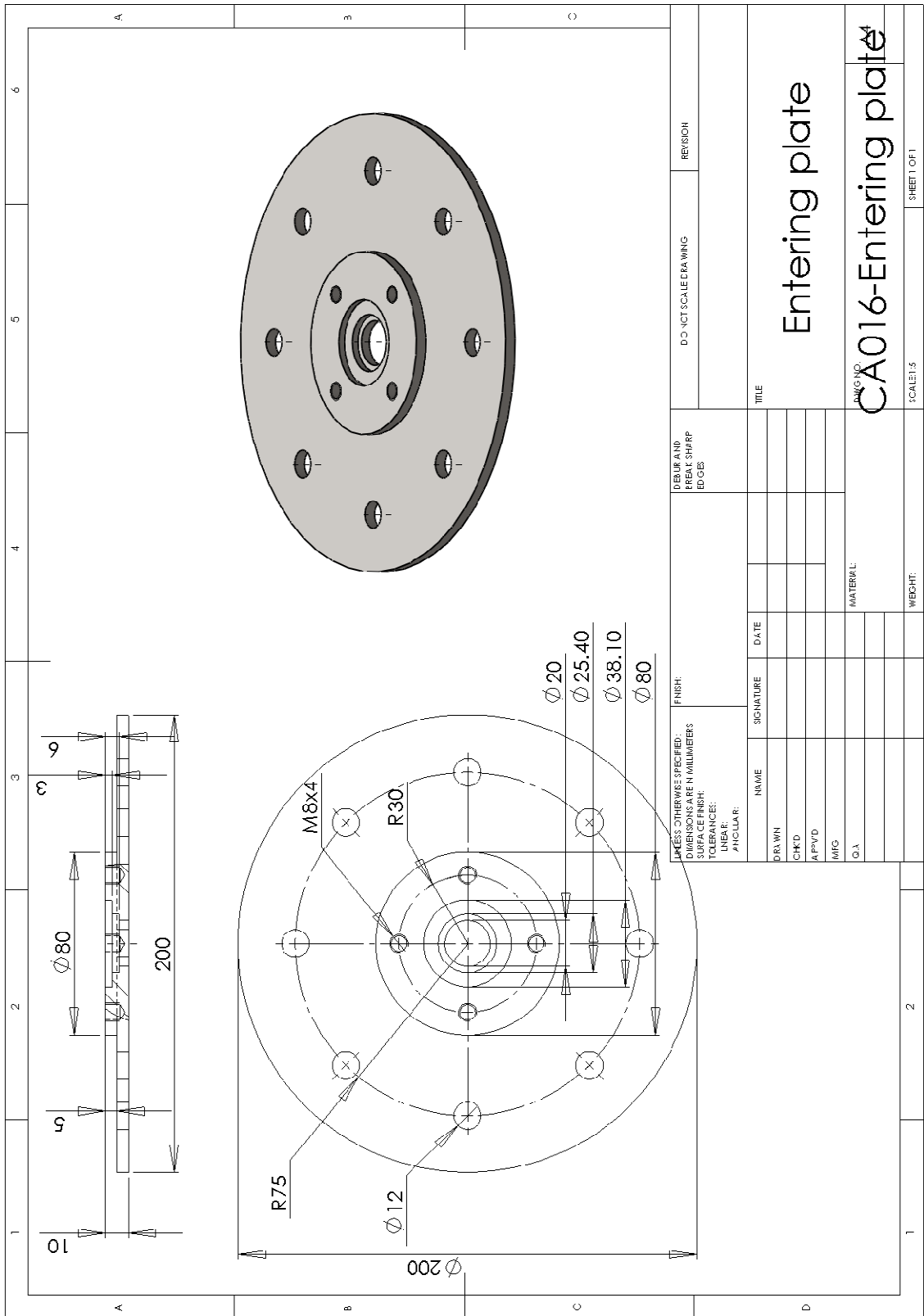


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:					
DATE	26-02-2552	TITLE:			
NAME	S. Gonsrang	50mm Cup Atomizer			
SIGNATURE					
FINISH:					
MATERIAL:		DWG NO.		A4	
		CA008-50mm Cup Atomizer			
WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	





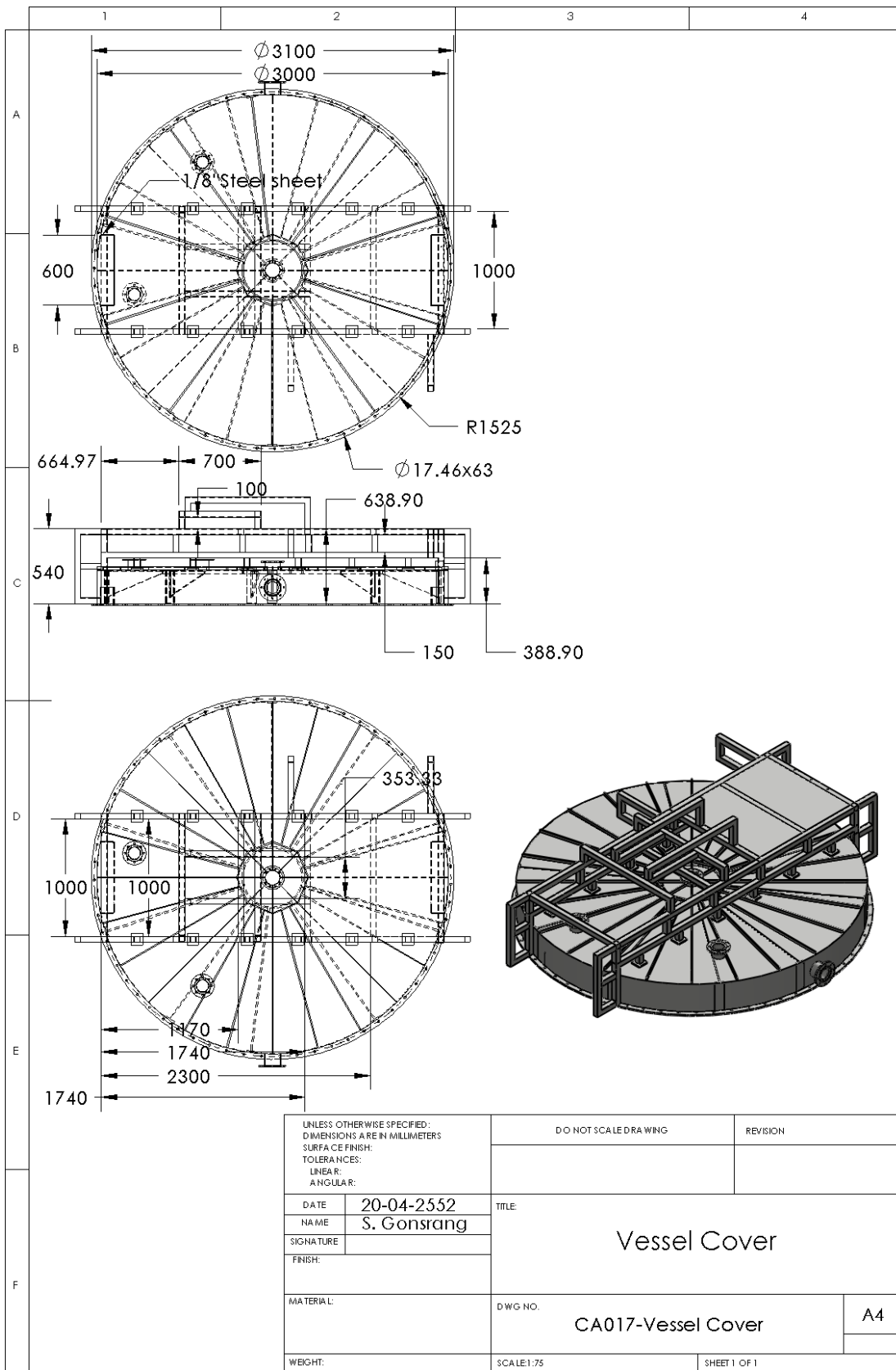


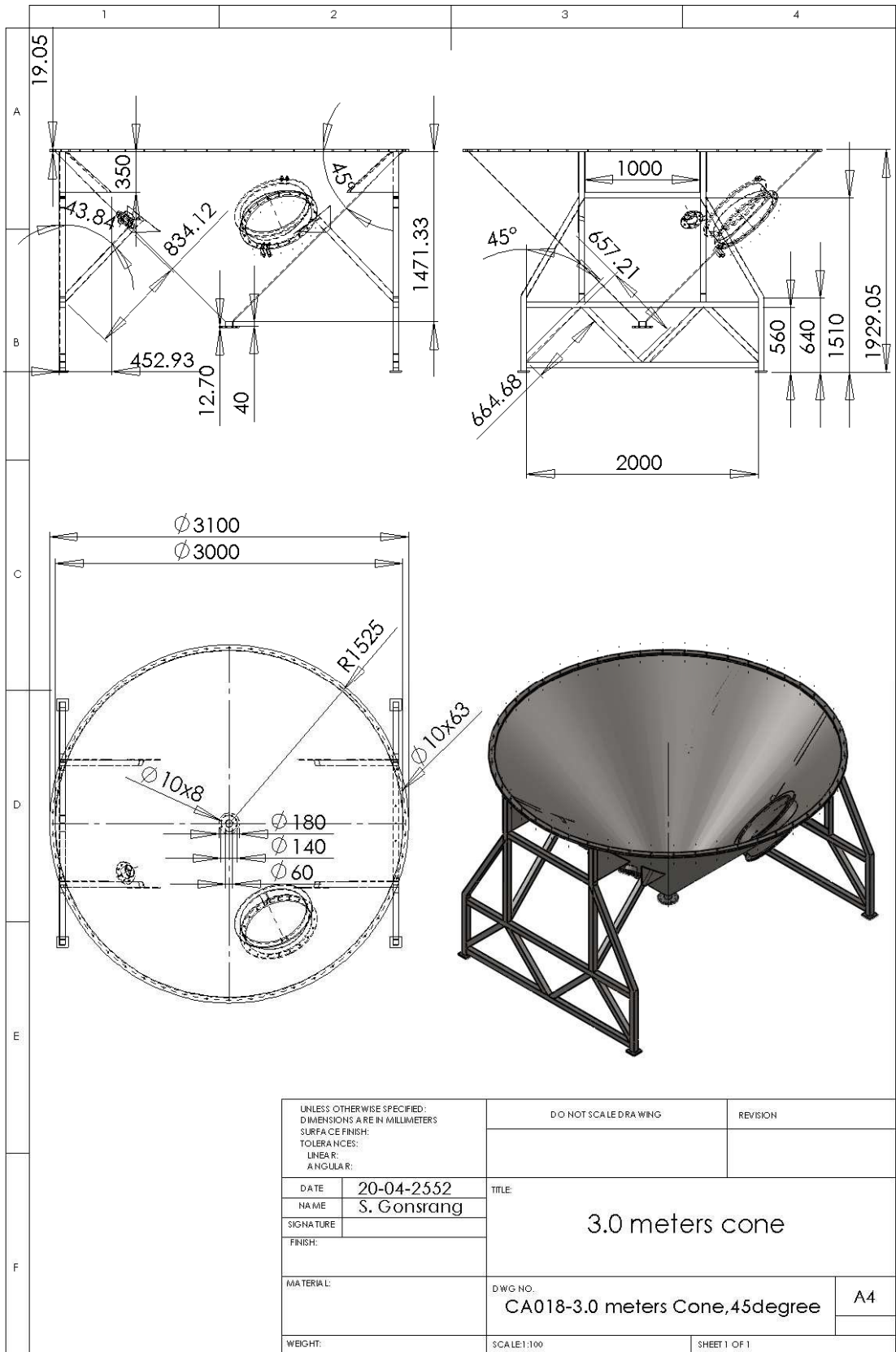


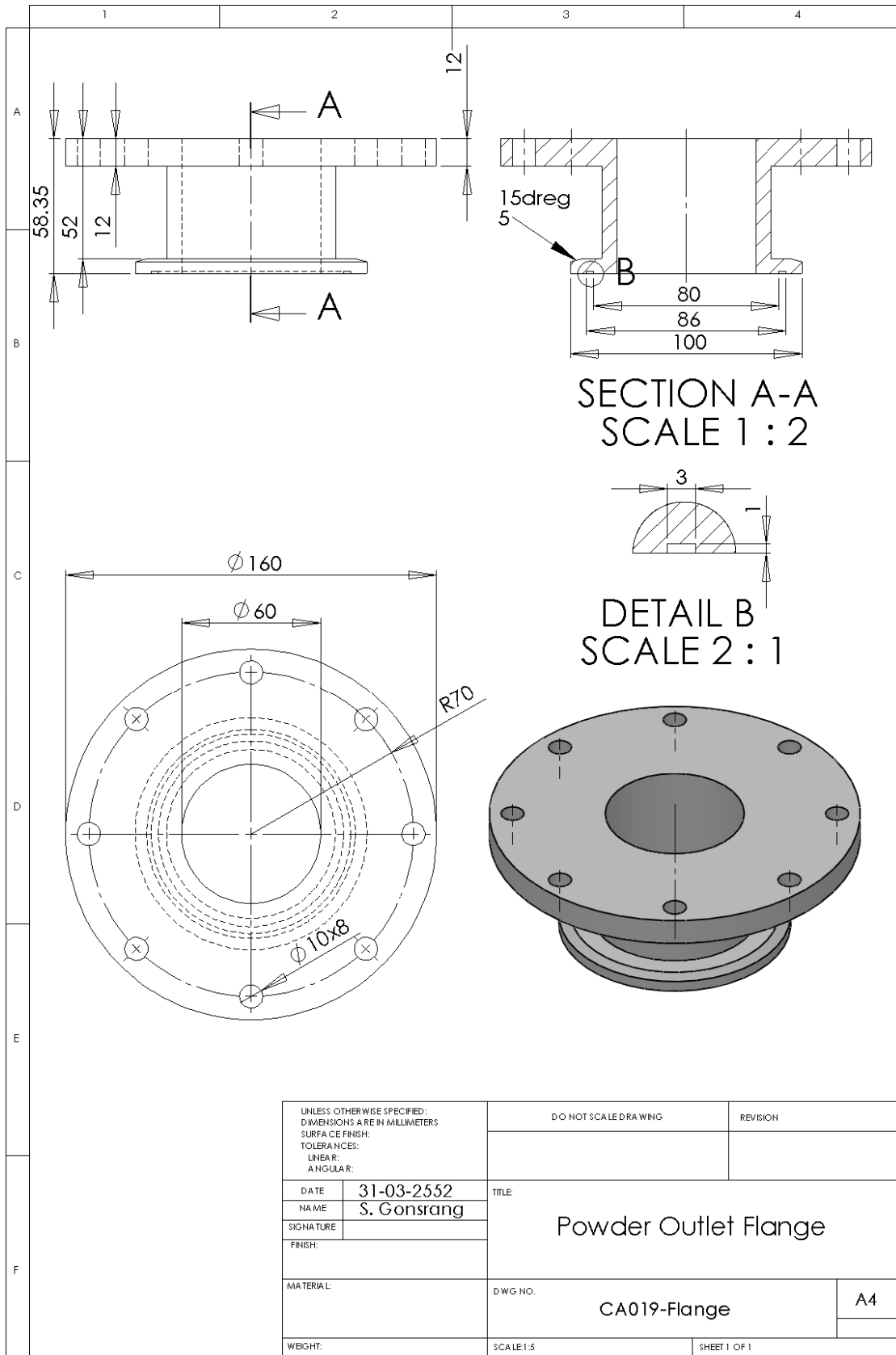
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
TOLERANCES: FINISH: UNRAE: HOLLOW:		NAME		SIGNATURE		DATE	
TITLE		DRAWN		CHK'D		APPR'D	
MATERIAL		MFG		Q.A.		WEIGHT:	
SCALE: 1:5		SHEET 1 OF 1		WEIGHT:		WEIGHT:	

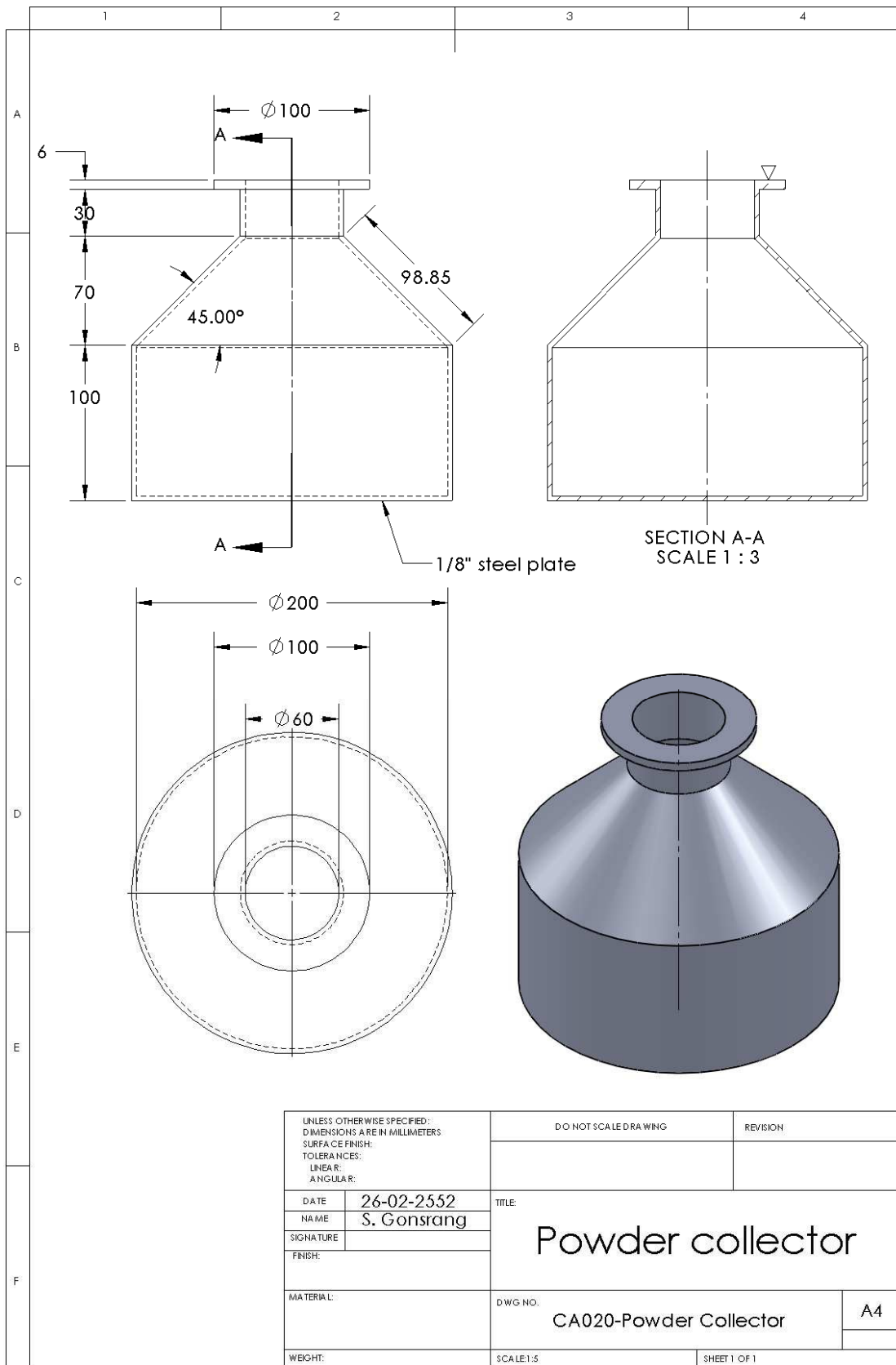
Entering plate

CA016-Entering plate

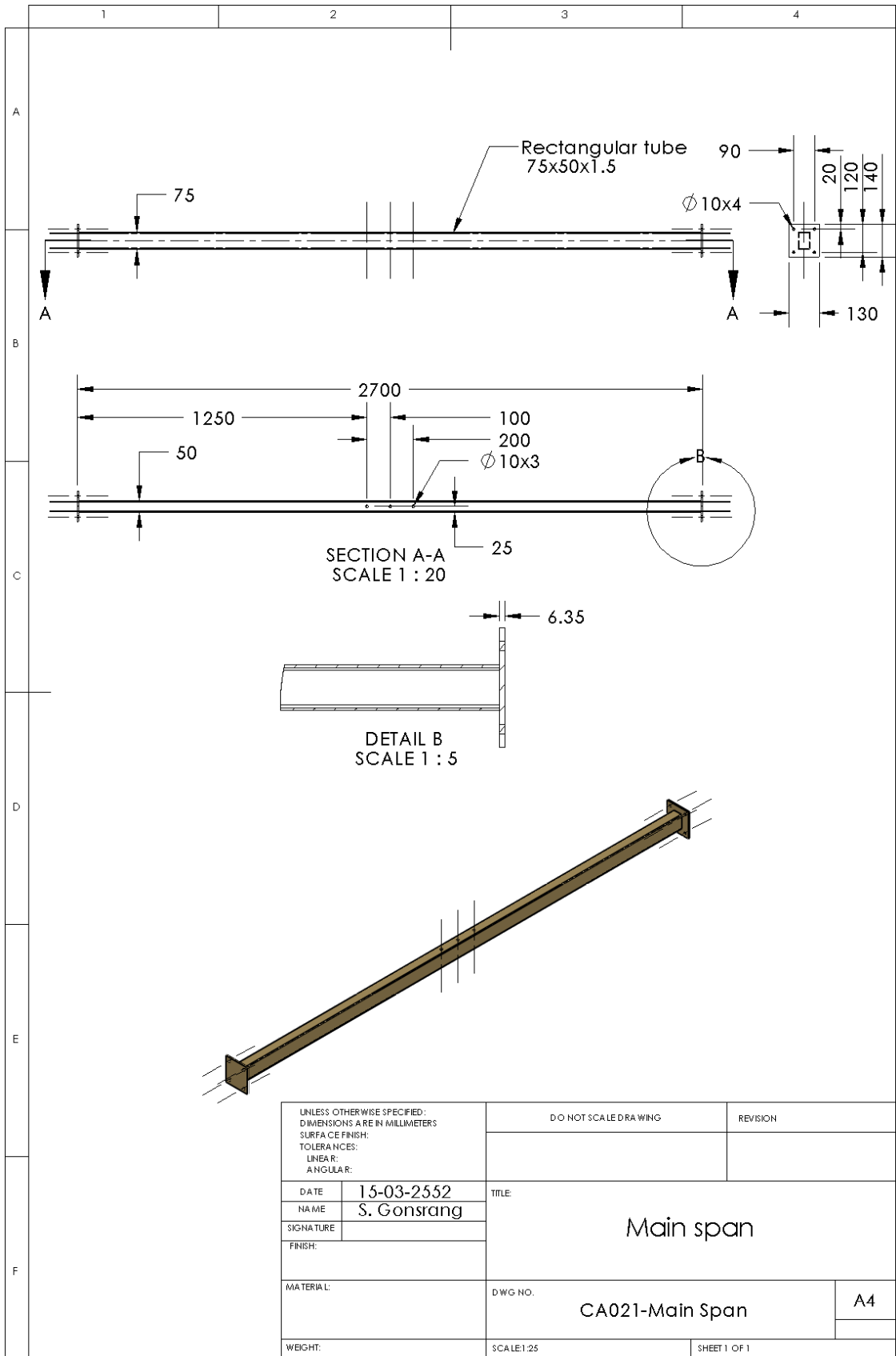




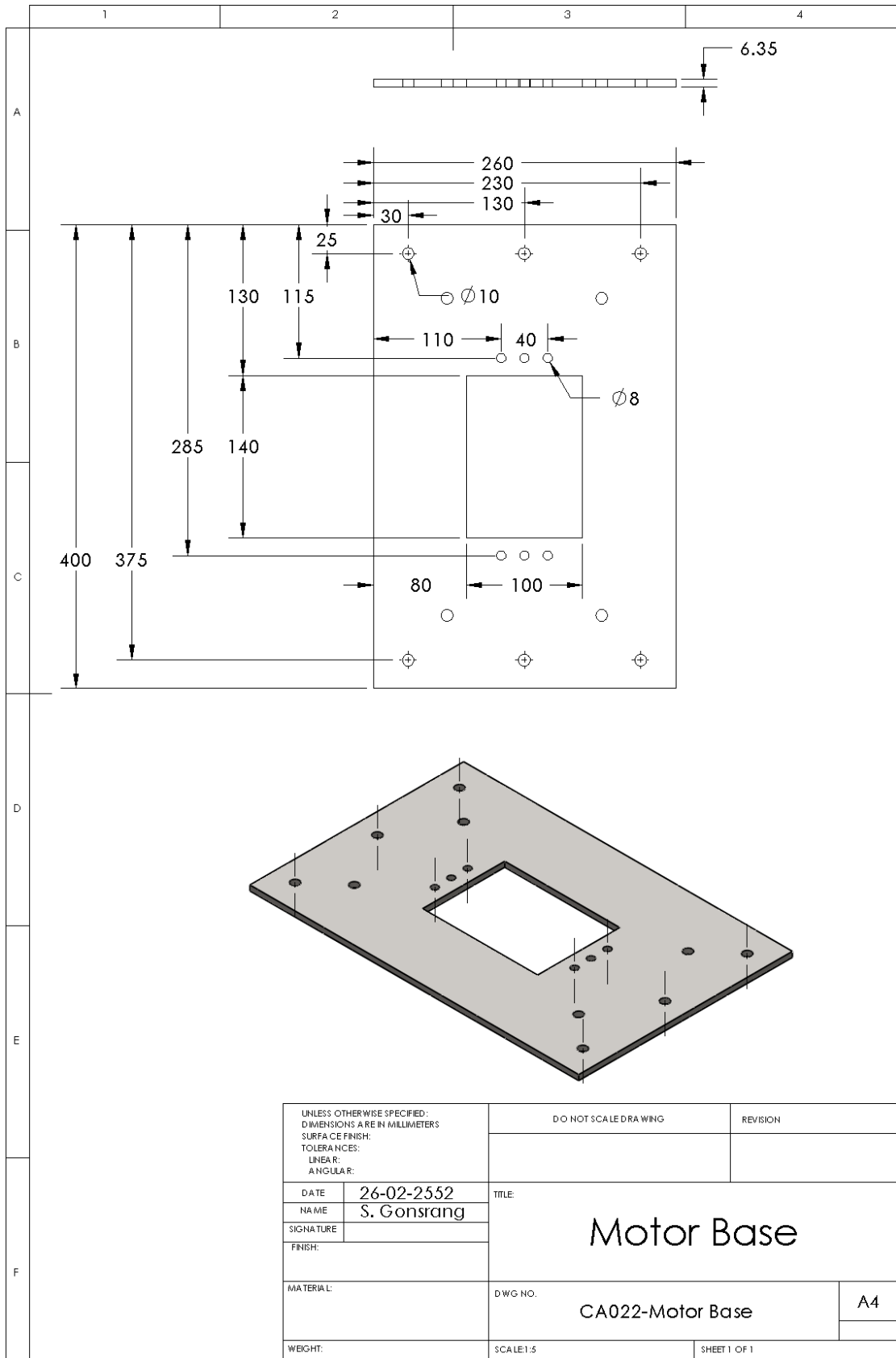


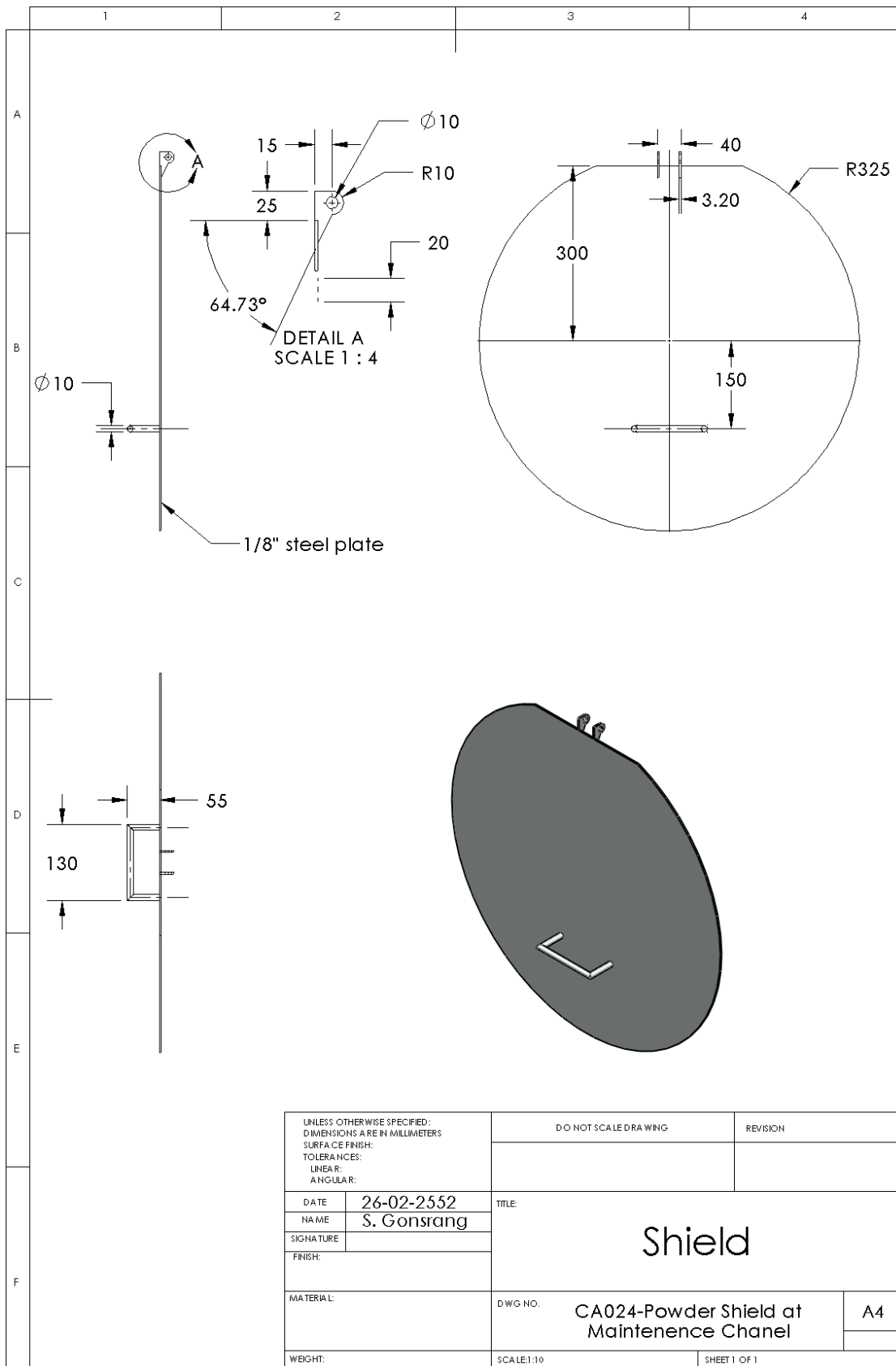


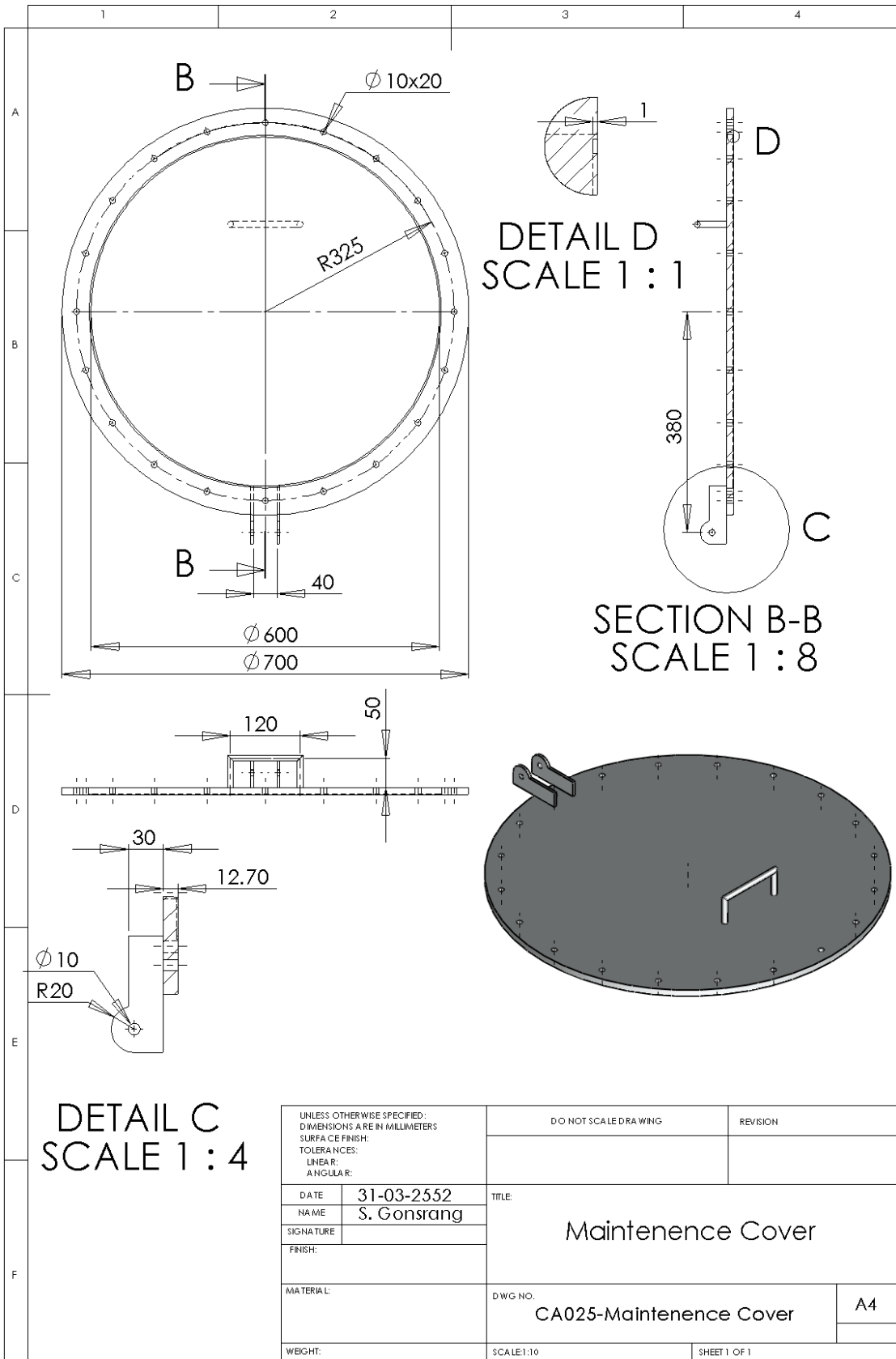
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DATE	26-02-2552	TITLE: Powder collector	
NAME	S. Gonsrang		
SIGNATURE			
FINISH:		DWG. NO.	A4
MATERIAL:		CA020-Powder Collector	
WEIGHT:		SCALE: 1:5	SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
DATE: 15-03-2552	TITLE: Main span		
NAME: S. Gonsrang			
SIGNATURE:			
FINISH:			
MATERIAL:	DWG NO. CA021-Main Span	A4	
WEIGHT:	SCALE: 1:25	SHEET 1 OF 1	





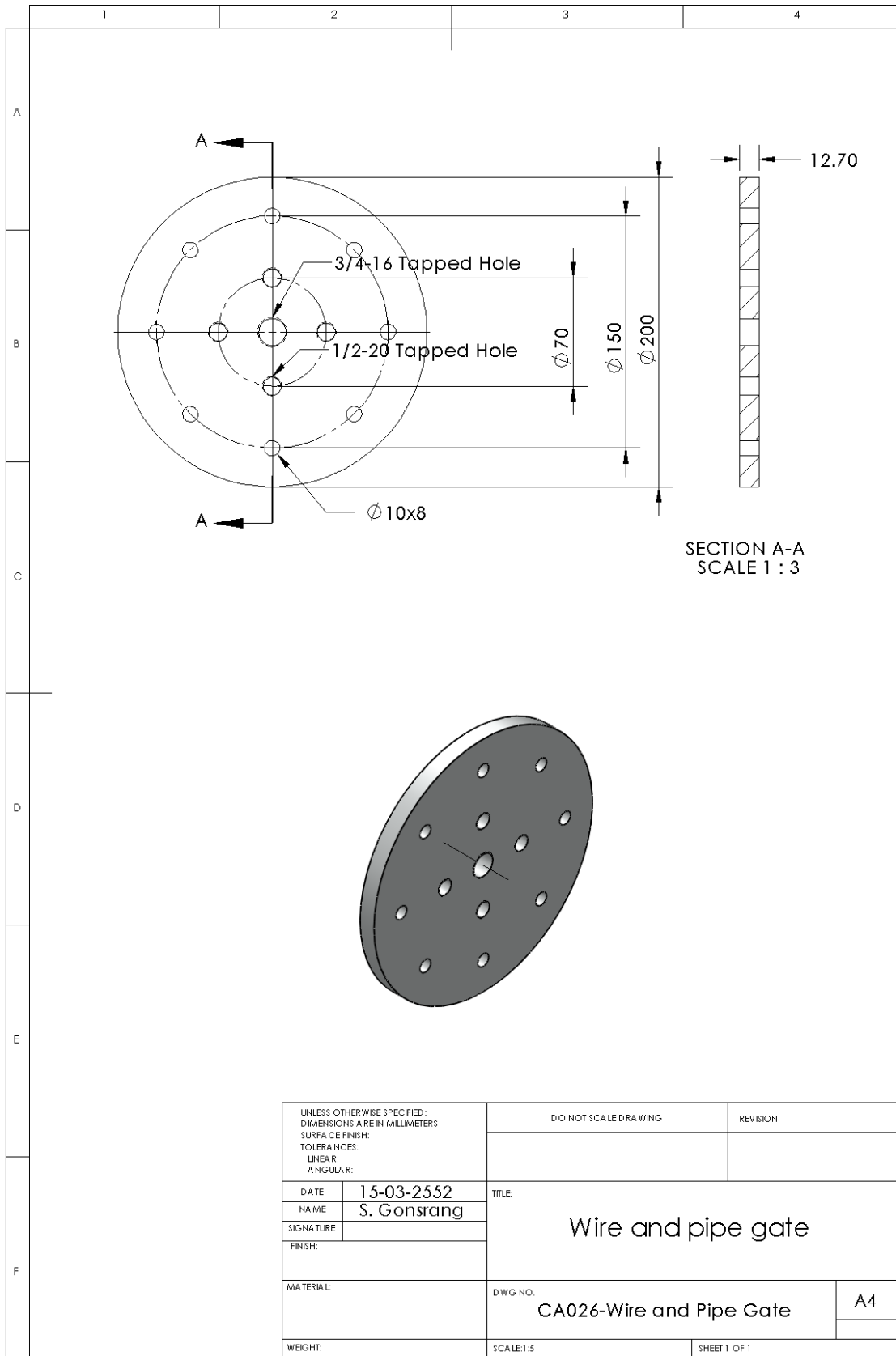


DETAIL C
SCALE 1 : 4

DETAIL D
SCALE 1 : 1

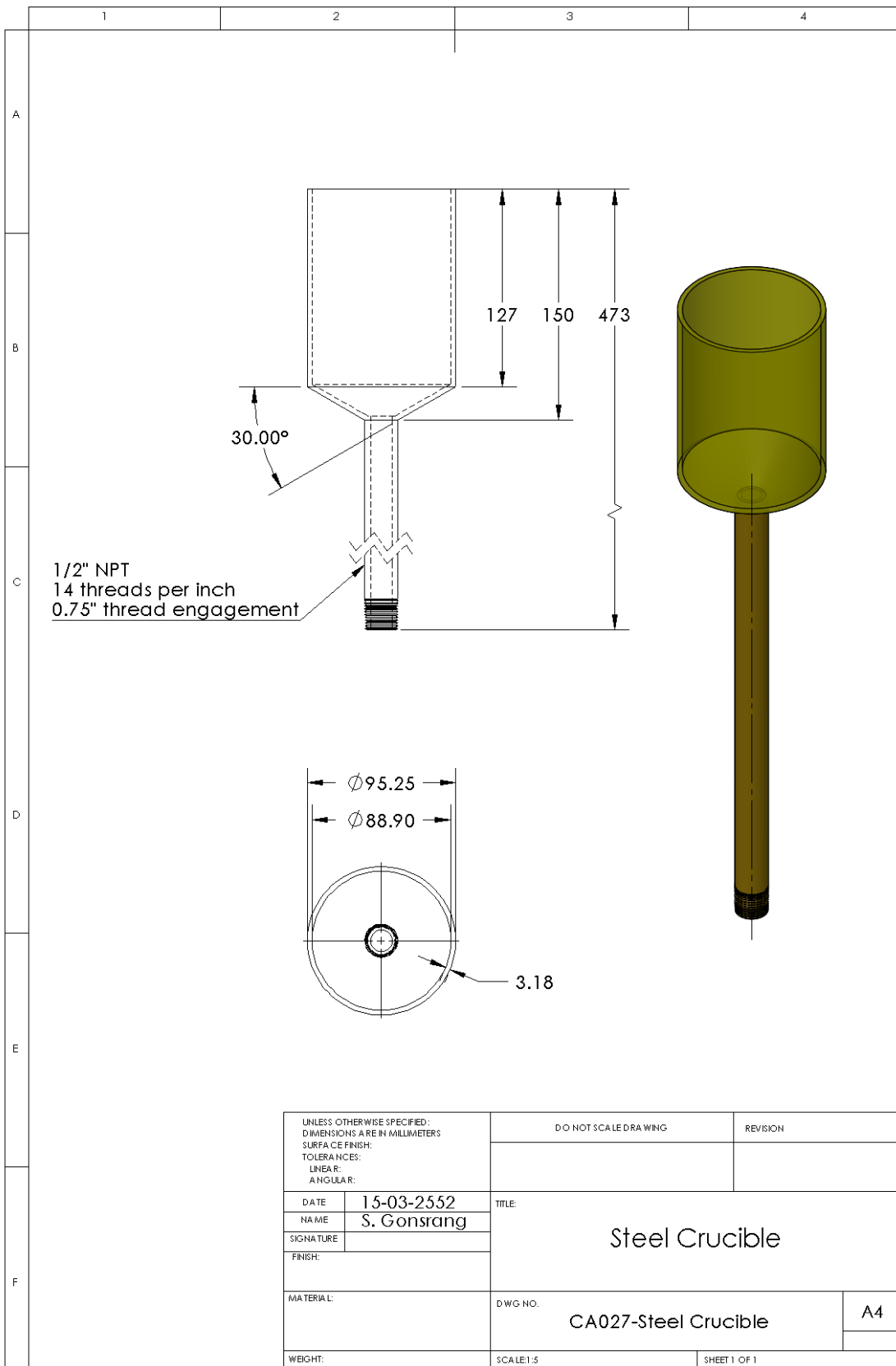
SECTION B-B
SCALE 1 : 8

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
SURFACE FINISH:			
TOLERANCES:			
LINEAR:			
ANGULAR:			
DATE	31-03-2552	TITLE: Maintenance Cover	
NAME	S. Gonsrang		
SIGNATURE			
FINISH:			
MATERIAL:		DWG NO. CA025-Maintenance Cover	A4
WEIGHT:		SCALE: 1:10	SHEET 1 OF 1

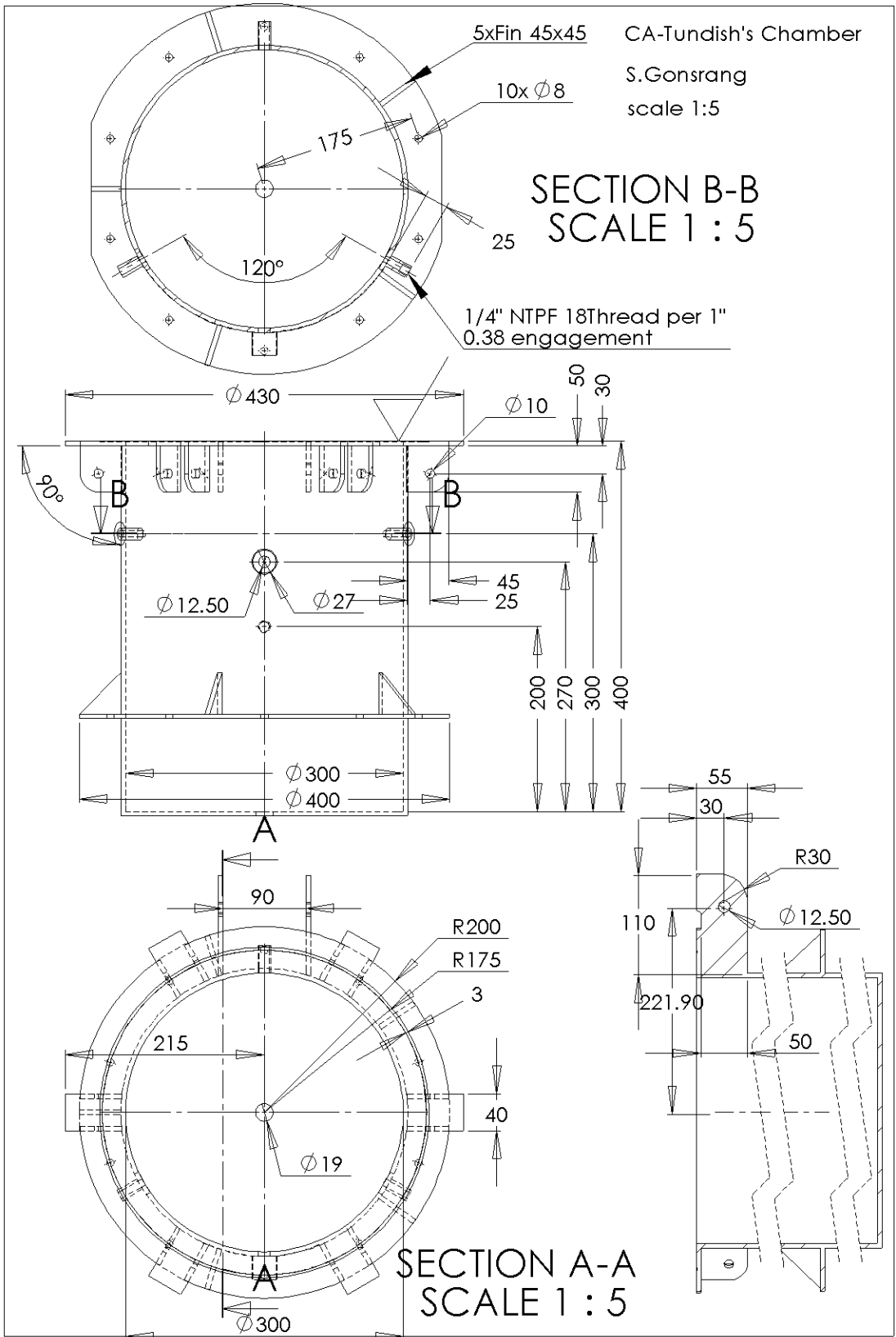


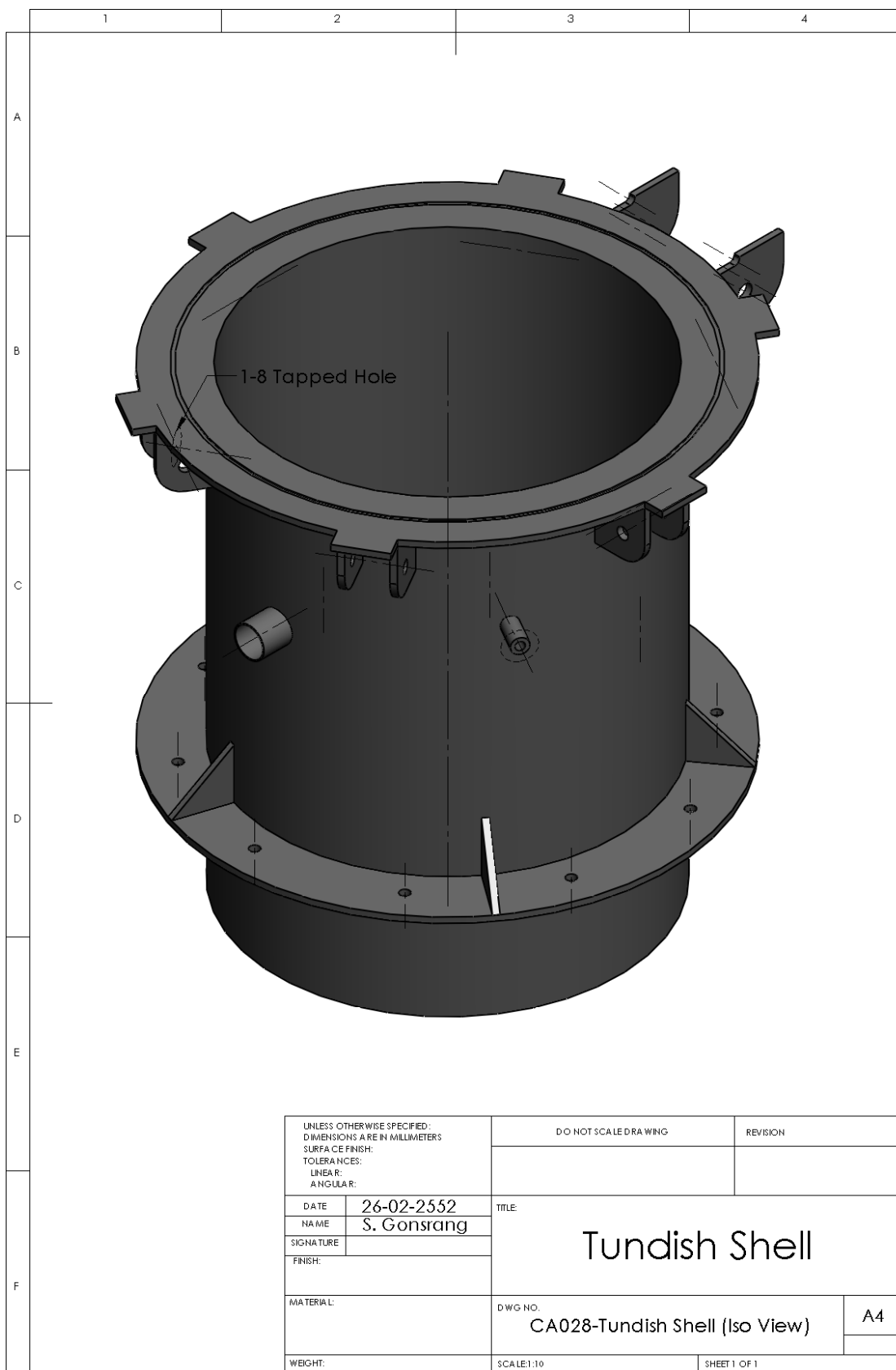
SECTION A-A
SCALE 1 : 3

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DATE	15-03-2552	TITLE: Wire and pipe gate	
NAME	S. Gonsrang		
SIGNATURE			
FINISH:			
MATERIAL:		DWG NO. CA026-Wire and Pipe Gate	A4
WEIGHT:		SCALE 1:5	SHEET 1 OF 1

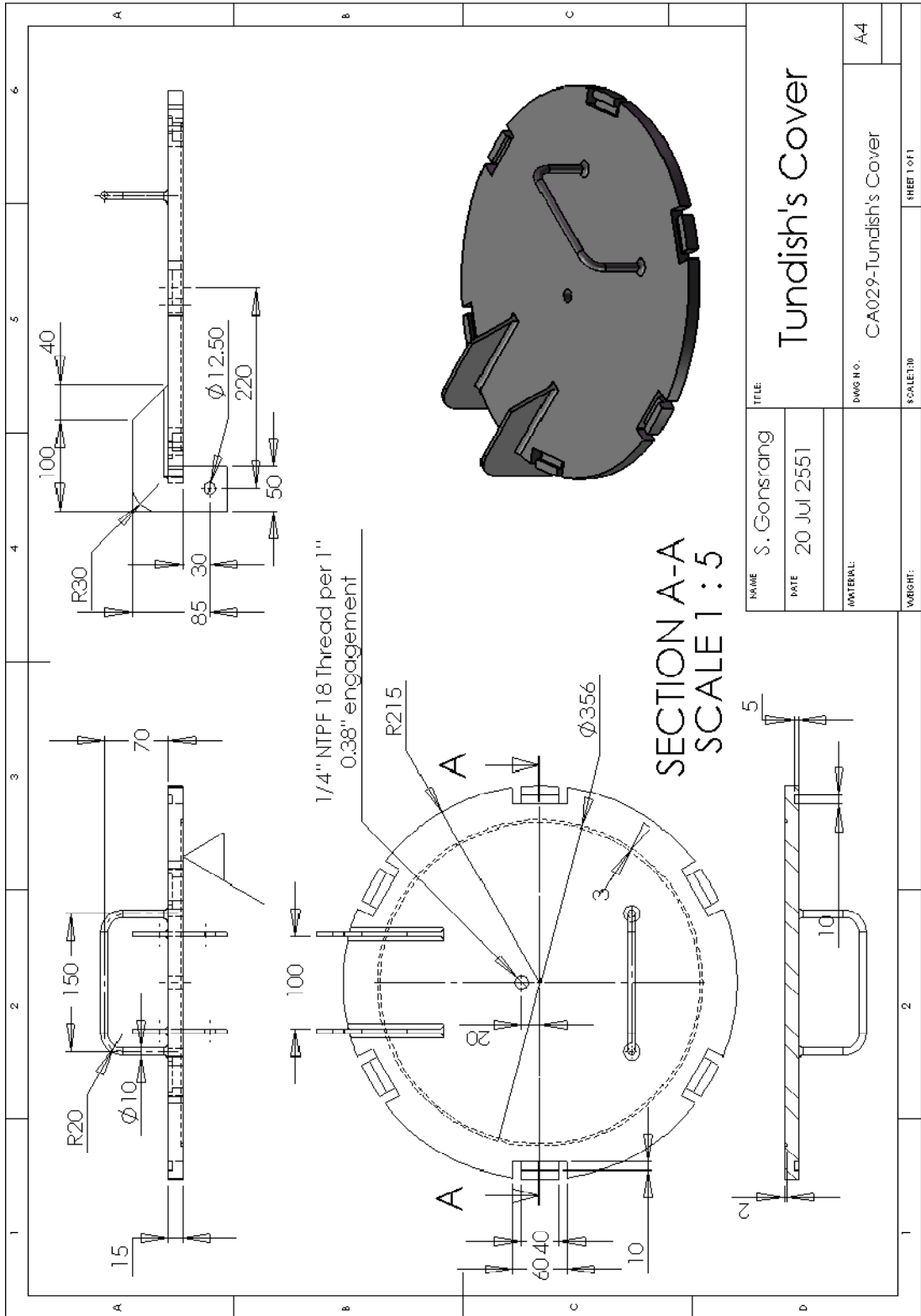


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:					
TOLERANCES:					
LINEAR:					
ANGULAR:					
DATE	15-03-2552	TITLE: Steel Crucible			
NAME	S. Gonsrang				
SIGNATURE					
FINISH:					
MATERIAL:		DWG NO. CA027-Steel Crucible		A4	
WEIGHT:		SCALE: 1:5		SHEET 1 OF 1	



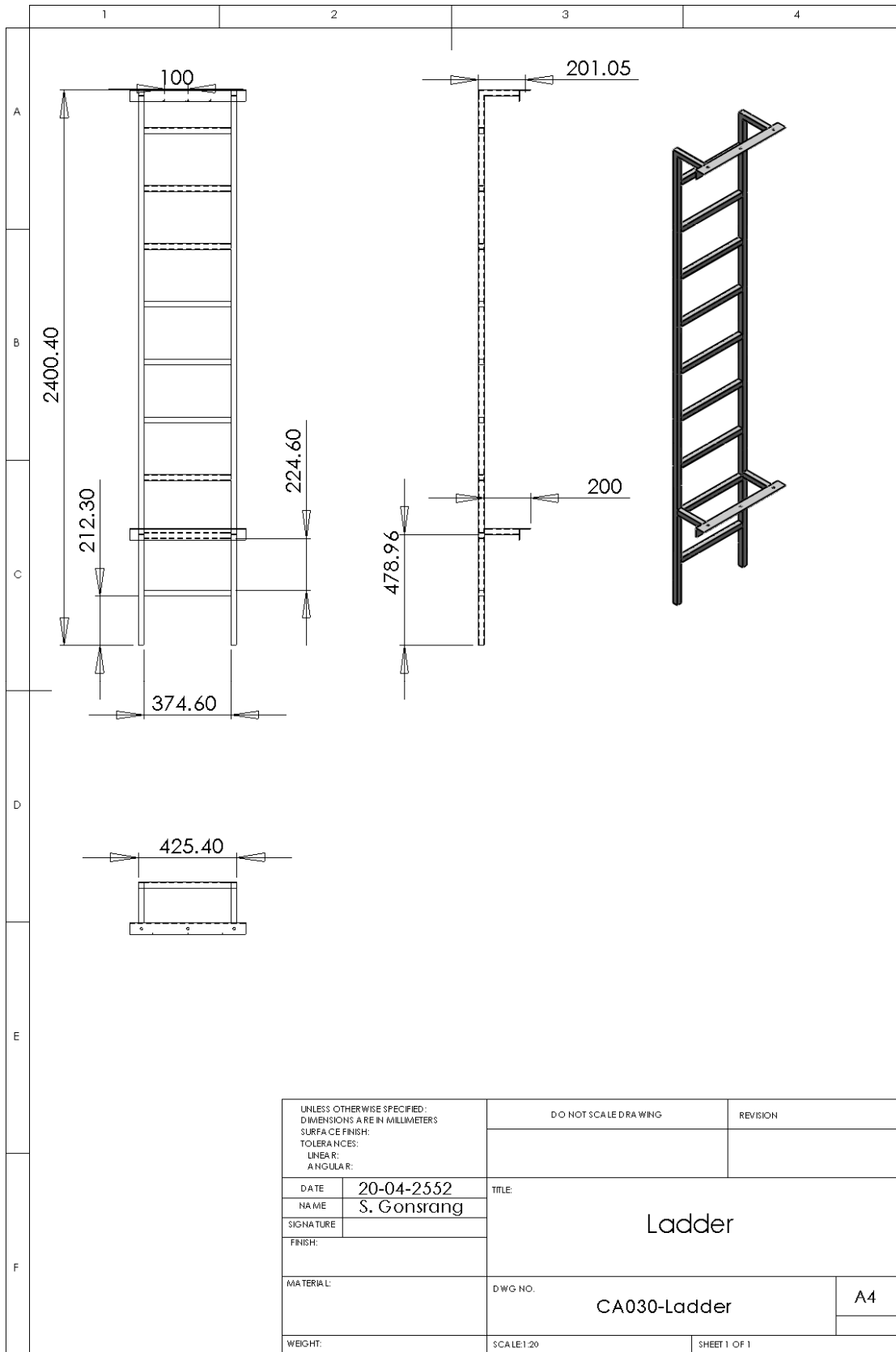


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DATE	26-02-2552	TITLE: Tundish Shell	
NAME	S. Gonsrang		
SIGNATURE			
FINISH:			
MATERIAL:		DWG NO. CA028-Tundish Shell (Iso View)	A4
WEIGHT:		SCALE:1:10	SHEET 1 OF 1

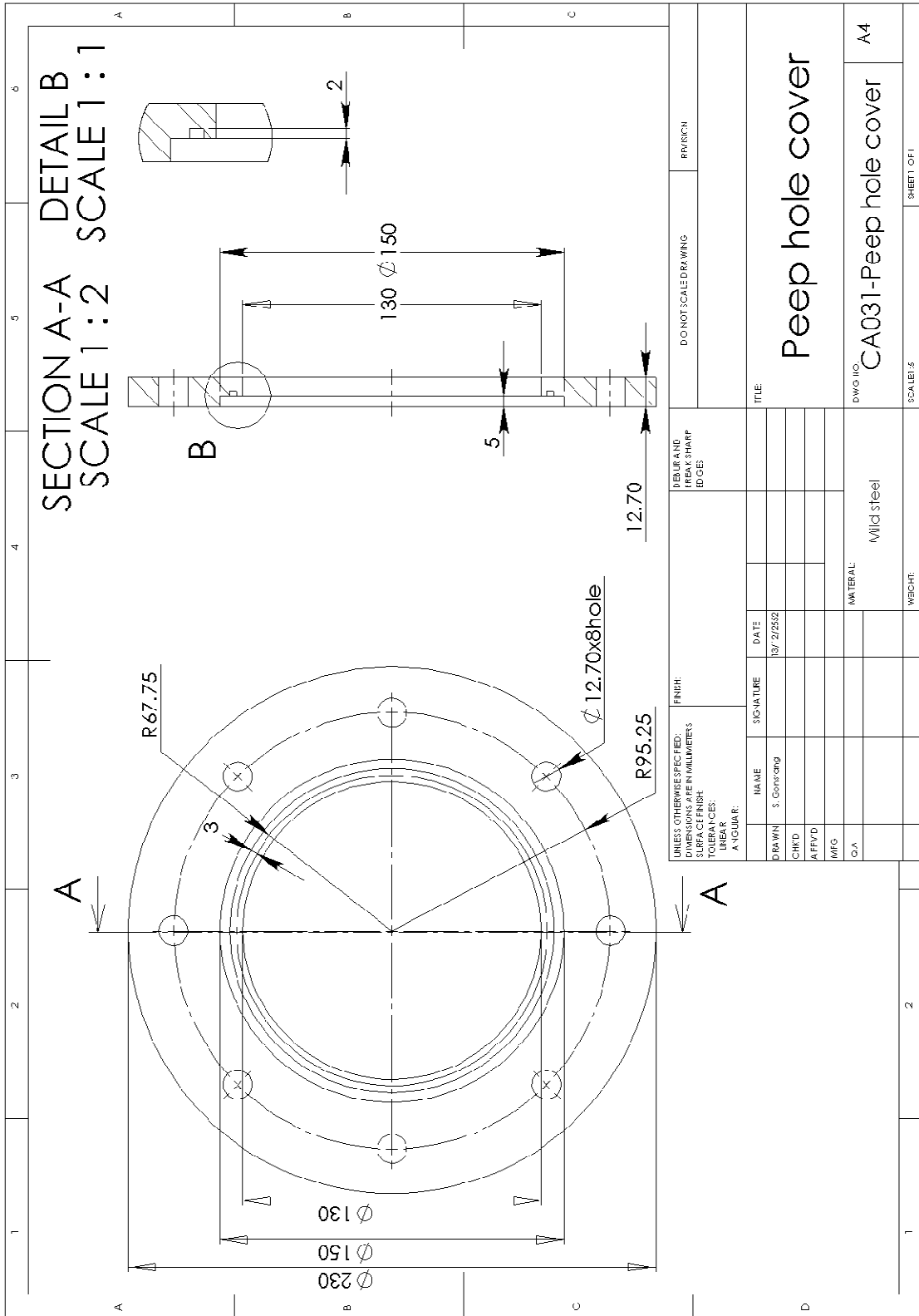


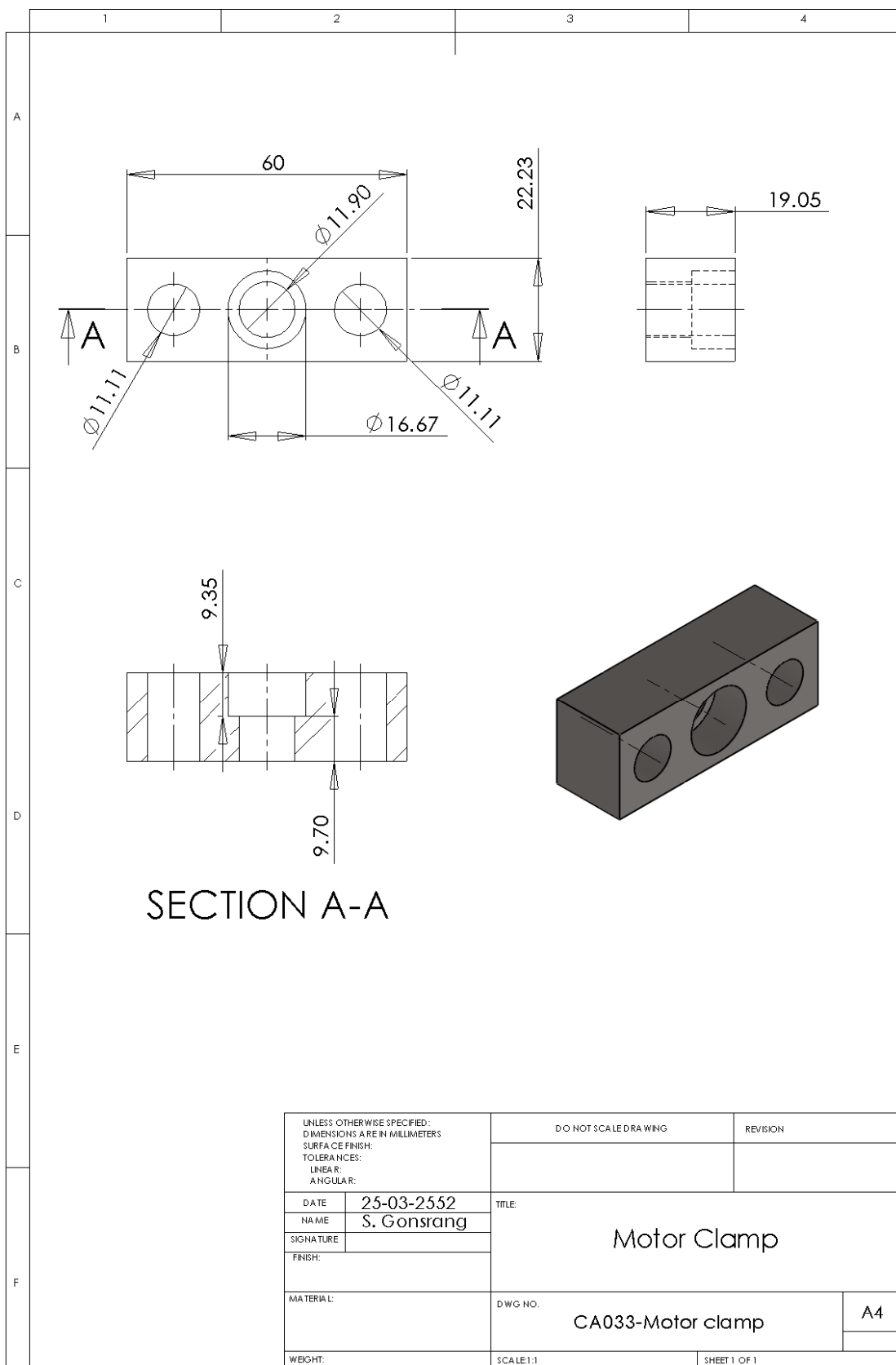
SECTION A-A
SCALE 1 : 5

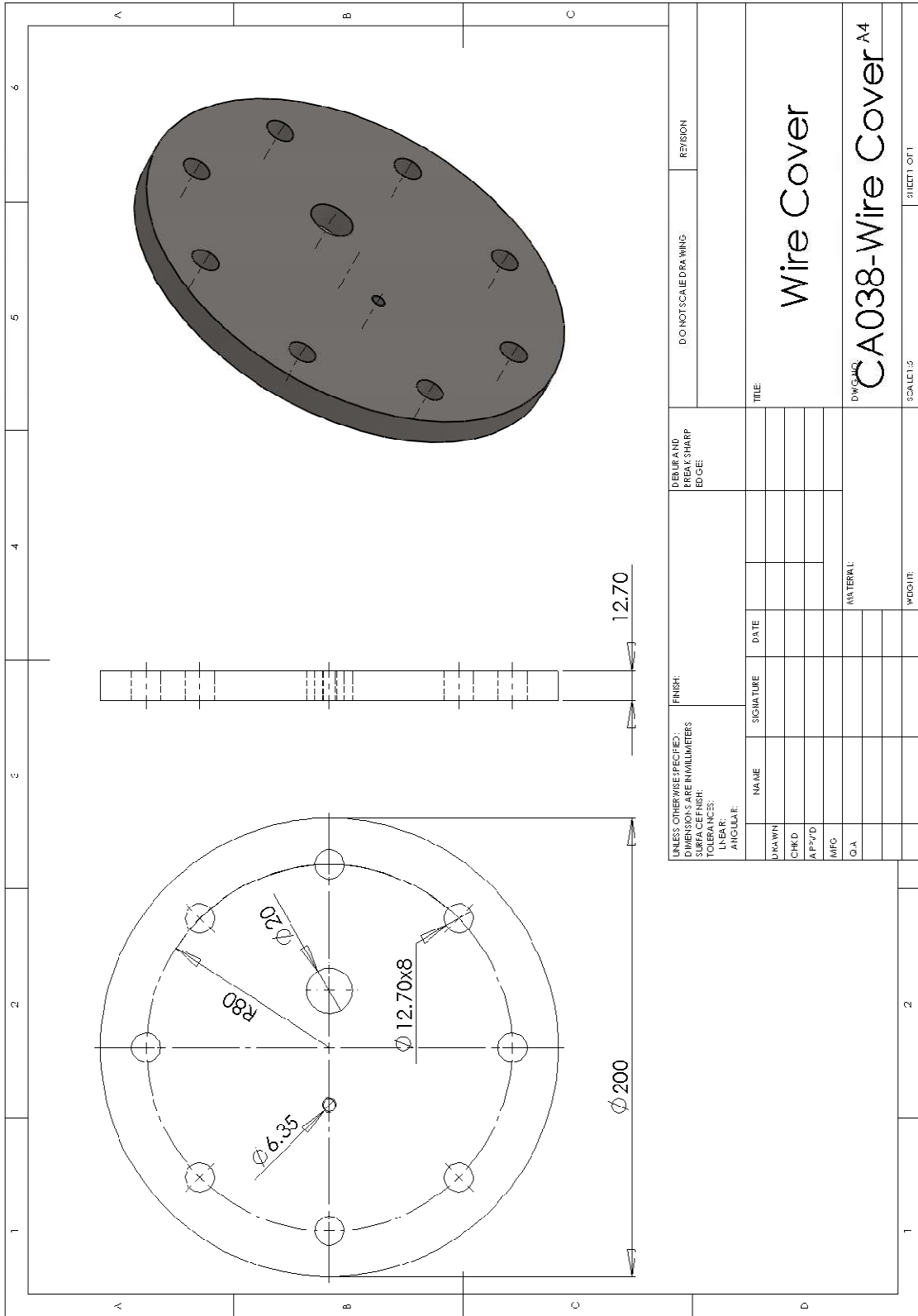
NAME	S. Gonsrang	TITLE	Tundish's Cover	
DATE	20 Jul 2551	DWG NO.	CA029-Tundish's Cover	
MATERIAL		SCALE: 1:5	SHEET 1 OF 1	
WEIGHT			A4	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DATE	20-04-2552	TITLE Ladder	
NAME	S. Gonsrang		
SIGNATURE			
FINISH:		DWG NO. CA030-Ladder	
MATERIAL:		A4	
WEIGHT:		SCALE: 1:20	SHEET 1 OF 1







UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		REQUIREMENTS: PREPARE SHARP EDGES		REVISION	
SURFACE FINISH:		NAME		SIGNATURE		DO NOT SCALE DRAWING	
TOLERANCES:		DATE		DATE			
LINEAR:		SIGNATURE		DATE			
ANGULAR:		DATE		DATE			
		DRAWN		DATE		TITLE	
		CHKD		DATE		Wire Cover	
		APP'D		DATE		DWG NO. CA038-Wire Cover A4	
		MFG		DATE		SCALE: 1:1	
		G.A.		DATE		SHEET 1 OF 1	
		MATERIAL:		DATE			
		WEIGHT:		DATE			

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการบันทึกผลการทดลอง

ตัวอย่างการบันทึกผลการทดลอง

ตัวอย่างการบันทึกผลการทดลอง

การผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305

การทดลองที่ CA068SAC

ทำการทดลองวันที่ 15-4-53

เงื่อนไขการผลิต

- 1) งานอะตอมไมเซอร์ทรงถ้วย ขนาด 40 mm (อุณหภูมิเริ่มต้น 180°C)
- 2) ความเร็วรอบงานอะตอมไมเซอร์ 30,000 rpm
- 3) หัวฉีดน้ำโลหะขนาด 0.8 mm
- 4) อุณหภูมิน้ำโลหะ 318°C
- 5) ปริมาณออกซิเจนในถัง 1.7%

อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ก่อนการผลิตผงโลหะเวลา 21:06 น.

T_{MS} (Setting melt temperature) = 250°C T_M (Actual melt temperature) = 318.5 °C

T_{LS} (Setting line temperature) = 300°C T_V (Actual valve temperature) = 338.6 °C

T_{EPS} (Setting entering plate temperature)= 320°C T_{NS} (Setting nozzle temperature) = 350 °C

T_N (Actual nozzle temperature) = 321.2°C T_{Amb} (Temperature inside chamber)= 43.3 °C

เปิดลมร้อนเวลา 21:07 น. (อุ่นงานประมาณ 5 min ก่อนเริ่มผลิตผงโลหะ)

เปิดมอเตอร์เวลา 21:12 น.

เปิดวาล์วเทน้ำโลหะเวลา 21:13 น.

เวลารวมในการผลิต 2 min 20 s (t=140 s)

น้ำหนักผงโลหะที่เก็บได้ 1,104 g

อัตราเทน้ำโลหะเฉลี่ย 28.4 $\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$



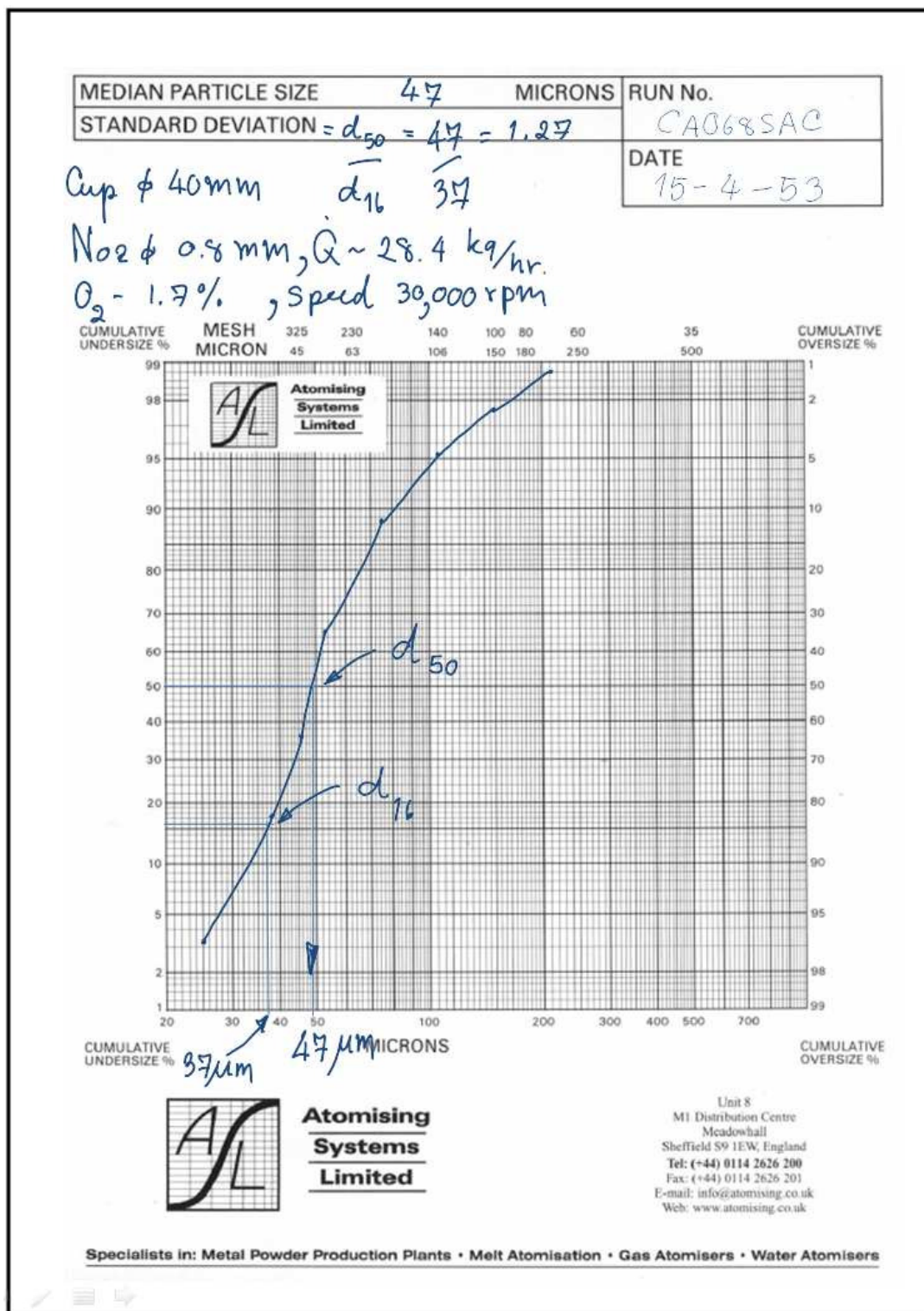
รูปที่ ผข.1 ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิด SAC305 ที่คัดขนาดด้วยชุดตะแกรงมาตรฐาน ASTM E11 แล้ว

ตารางที่ ผข.1 ตัวอย่างการบันทึกน้ำหนักผงโลหะที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานแต่ละเบอร์จากการทดลองที่ CA068SAC น้ำหนักรวมผงโลหะ 260.06 g

Mesh number	Size range (μm)	Retained weight (g)
20	-1,180+850	0.55
30	-850+600	0.52
50	-600+300	1.17
70	-300+212	1.13
100	-212+150	2.46
140	-150+106	6.42
200	-106+75	16.39
270	-75+53	60.35
325	-53+45	76.26
400	-45+38	48.88
500	-38+25	36.99
Pan	-25	8.94

ตารางที่ ผข.2 ข้อมูลน้ำหนักผงโลหะสำหรับนำไปพล็อตกราฟการกระจายขนาด
ของผงโลหะจากการทดลองที่ CA068SAC

Mesh number	Retained weight on sieve (g.)	Cum. Wt. retained (g.)	Cum. wt. retained (%)	Cum. wt. passing (%)
20	0.55	0.55	0.21	99.79
30	0.52	1.07	0.41	99.59
50	1.17	2.24	0.86	99.14
70	1.13	3.37	1.30	98.70
100	2.46	5.83	2.24	97.76
140	6.42	12.25	4.71	95.29
200	16.39	28.64	11.01	88.99
275	60.35	88.99	34.22	65.78
325	76.26	165.25	63.54	36.46
400	48.88	214.13	82.34	17.66
500	36.99	251.12	96.56	3.44
pan	8.94	260.06	100.00	0.00
Total weight	260.06			



รูปที่ ผข.2 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลจากการทดลองที่ CA068SAC ลงบนกระดาษกราฟแบบล็อกปกติ และการหาค่าขนาดเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ภาคผนวก ค

ชุดคำสั่งแบบจำลองวิธีการเคลื่อนที่และการถ่ายเทความร้อนของละอองน้ำโลหะสำหรับ
ทำงานบนโปรแกรม SciLab

ชุดคำสั่งแบบจำลองวิธีการเคลื่อนที่และการถ่ายเทความร้อนของละออง น้ำโลหะสำหรับทำงานบนโปรแกรม SciLab

```

ms=[70.5,105.6] //diameter of single droplet
for i=1:2, d=ms(i);

//Define constants
d50=(d)*10**-6; //Particle size (m)
A=%pi*(d50**2)/4; //Projected area of droplet
Dsn=6970; //Density of Sn-droplet
m=Dsn*(4/3)*%pi*(d50**3)/8 //mass of droplet
L=59220; //heat of fusion
Q0=L*m //Initial heat that droplet has to transfer to surrounding

//Initial temperature
Ts=232; //Temperature of droplet
Ta=30; //Temperature of surrounding air

//Air properties
Da=0.87595 //Surrounding gas density
 $\nu_{is}$ =0.00001608 //Kinematic viscosity of air at room temperature
Pr=0.7057; //Prandlt number of air at 232C@1atm
 $\nu_{isf}$ =0.000026335; //Kinematic viscosity of air at film temperature, Tf
k=0.033045; //Air conductivity

//Acceleration due to gravitation
g=9.81;

//Initial speed
N =20000*(%pi)/30 //Rotating speed of atomizer

```

```

D=0.05;           //diameter of atomizer
speed = N*D/2     //Angular speed of atomizer

//Initial x-distance
H0=0.65;

//Define function [F]: horizontal displacement
function[F]=x(t,x)
    F(1)=x(2);
    Rex=d50*x(2)/is;
        if Rex==0 then Cd = 0; else f1=24/Rex;
        f2=1+(1/6)*Rex**(2/3); Cd=f1*f2; end;
    F(2)= -0.5*Da*x(2)**2*A*Cd/m
endfunction

//Define function: vertical displacement
function[G]=y(t,y)
    if y(1)<H0 then
        G(1)=y(2);
        Rey=d50*y(2)/is;
        if Rey==0 then Cd = 0; else f3=24/Rey;
        f4=1+(1/6)*Rey**(2/3); Cd=f3*f4; end;
        G(2)= g-0.5*Da*y(2)**2*A*Cd/m;
    else y(1)==H0; G(1)=0; G(2) =0; end;
endfunction

//Define step-size
t0=0; DT=0.0001; tf=2; t=[t0:DT:tf];

//Define process of-variable x

```

```

x(1)=0; x(2)=speed; x0=[x(1);x(2);]; x=ode(x0,t0,t,□x);

//Define process of-variable y
y(1)=0; y(2)=0; y0=[y(1);y(2);]; y=ode(y0,t0,t,□y);

//Display
for i=1:tf/DT+1,
    if H0-y(1,i)<0 then
        Y(1,i)=%nan;Y(2,i)=%nan;X(1,i)=%nan;X(2,i)=%nan;
    else Y(1,i)=H0-y(1,i);Y(2,i)=y(2,i);X(1,i)=x(1,i);X(2,i)=x(2,i);
    end
end

//Defining equations describing thermal history of a single droplet
vx=x(2,):**2; //Horizontal velocity
vy=y(2,):**2; //□ertical velocity
□=(vy+vx)**0.5; //Mean velocity of a single droplet
Re=□*d50/□isf; //Reynolds's number

//Defining Nusselt number
f5=0.4*Re**0.5; f6=0.06*Re**(2/3); f7=Pr**0.4; f8=(□is/□isf)**0.25;
Nu=2+(f5+f6)*f7*f8;
h=Nu*k/d50;
q(1,:)=h*A*(Ts-Ta);
for i=1:1+tf/DT, q(2,i)=Q0-sum(q(1,1:i)*DT); end //Removed heat
for j=1:1+tf/DT,
    if q(2,j)>=0 then Q(1,j)=q(2,j);
    elseif q(2,j)<0 then Q(1,j)=%nan; end
end

//Display

```

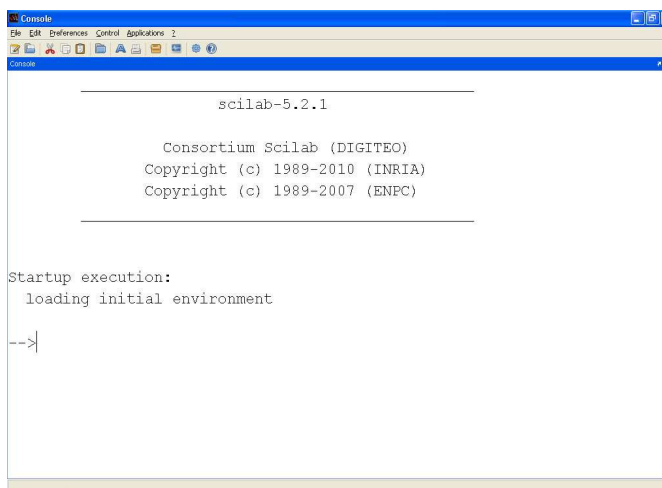
```
xset('window',1);          //Calling for 1st window
plot(X(1,:),Y(1,:));xgrid()
xtitle('Prediction of trajectories of droplets after setting off from rotating
atomizer', 'Horizontal distance(m)', 'Vertical distance(m)');
```

```
xset('window',2);          //Calling for 2nd window
plot(t,(X(2,:)**2+Y(2,:)**2)**0.5);xgrid(1)
xtitle('Velocity of droplet at different time', 'Time(s)', 'Velocity(m/s)');
```

```
xset('window',3);          //calling for 3rd window
plot(X(1,:),Q(1,:));xgrid()
xtitle('Heat removing from droplet to surrounding', 'Horizontal
distance(m)', 'Removing heat(joules)');end;
```

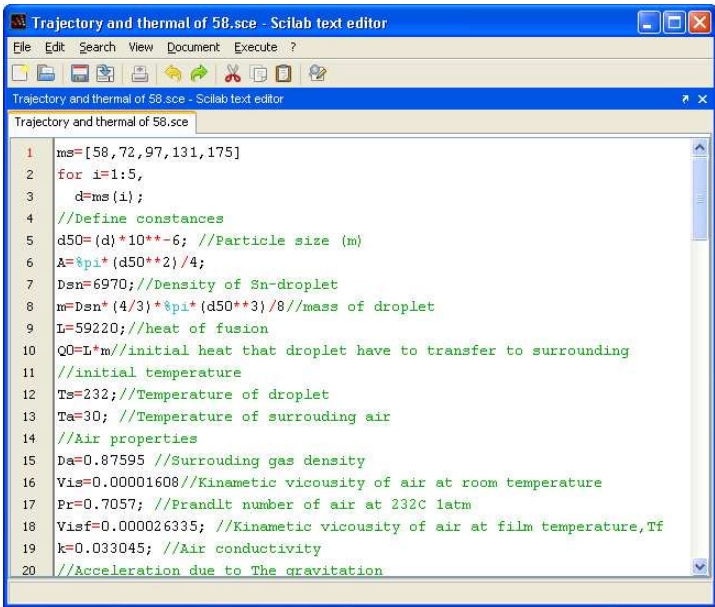
ขั้นตอนการใช้โปรแกรมเบื้องต้นสำหรับคำนวณแบบจำลอง

- 1) เริ่มการทำงาน โดยคลิก Start> All Programes> scilab-5.2.1> scilab-5.2.1



รูปที่ ผค.1 หน้าต่าง Console ของโปรแกรม SciLab

- 2) เปิดหน้าต่าง text editor เพื่อพิมพ์ชุดคำสั่งลงในโปรแกรมโดยกดปุ่ม Lunch Scilab editor ได้เมนูบาร์



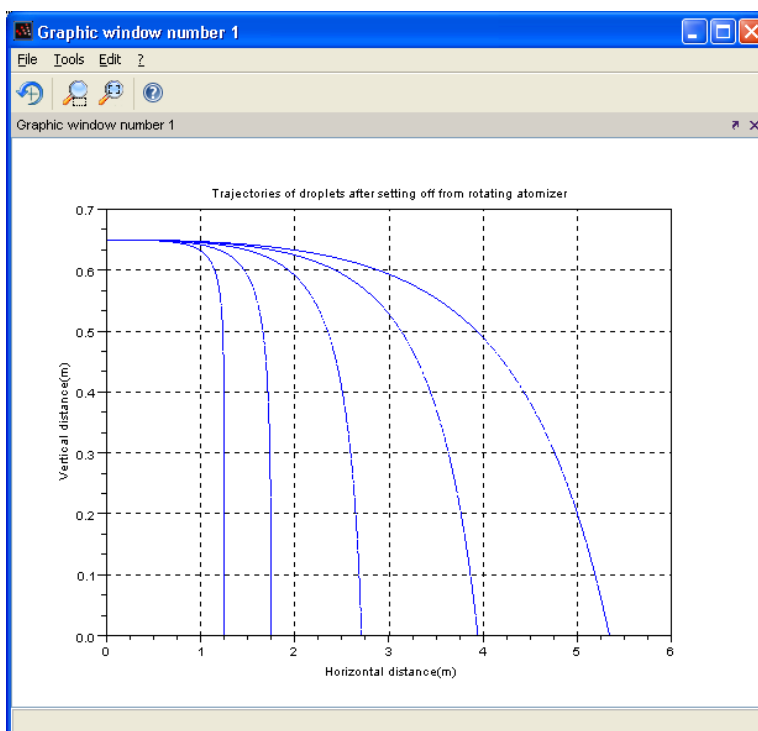
```

1 ms=[58,72,97,131,175]
2 for i=1:5,
3   d=ms(i);
4   //Define constances
5   d50=(d)*10**-6; //Particle size (m)
6   A=%pi*(d50**2)/4;
7   Dsn=6970; //Density of Sn-droplet
8   m=Dsn*(4/3)*%pi*(d50**3)/8 //mass of droplet
9   L=59220; //heat of fusion
10  Q0=L*m //initial heat that droplet have to transfer to surrounding
11  //initial temperature
12  Ts=232; //Temperature of droplet
13  Ta=30; //Temperature of surrounding air
14  //Air properties
15  Da=0.87595 //Surrounding gas density
16  Vis=0.00001608 //Kinametic viscosity of air at room temperature
17  Pr=0.7057; //Prandlt number of air at 232C latm
18  Visf=0.000026335; //Kinametic viscosity of air at film temperature, Tf
19  k=0.033045; //Air conductivity
20  //Acceleration due to The gravitation

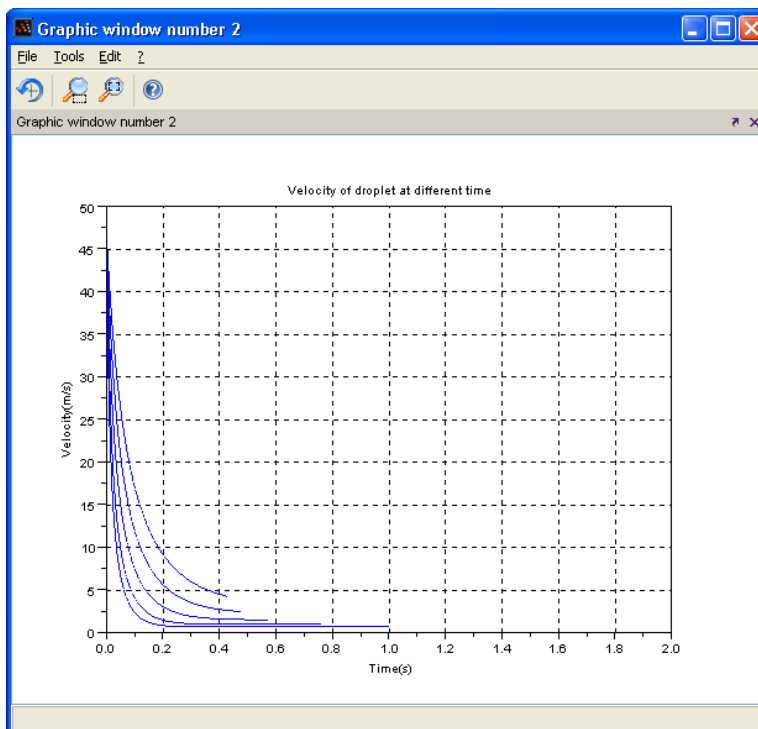
```

รูปที่ ผค.2 หน้าต่าง Scilab text editor ที่พิมพ์ชุดคำสั่งเรียบร้อยแล้ว

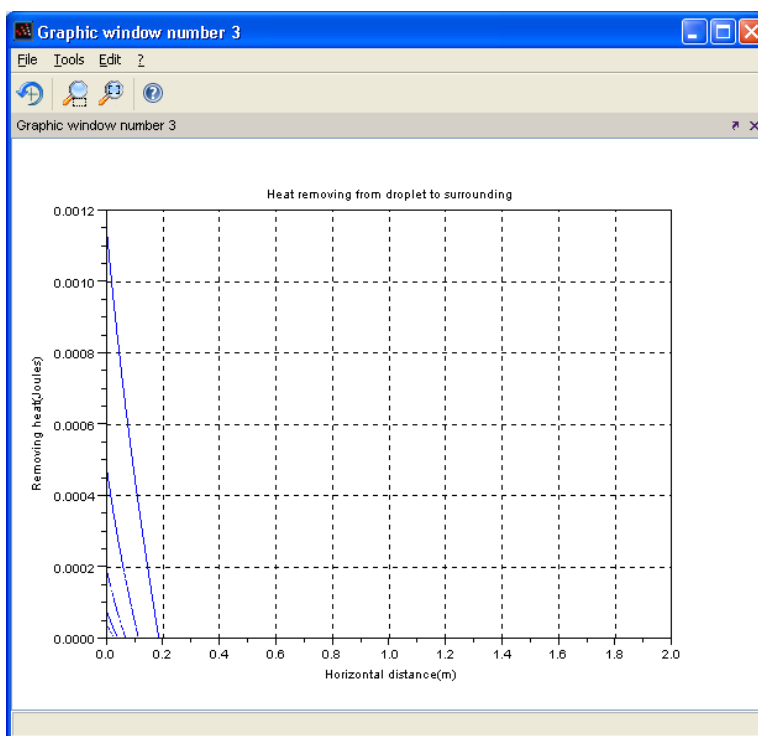
- 3) บันทึกชุดคำสั่งที่พิมพ์เสร็จแล้วโดยเลือก File ที่เมนูบาร์ของหน้าต่าง Scilab text editor ตั้งชื่อชุดคำสั่งและเลือกไดเรกทอรีสำหรับบันทึกข้อมูล แล้วกดปุ่ม **SAVE** เพื่อบันทึก
- 4) เริ่มการคำนวณชุดคำสั่งโดยเลือก **Execute > Execute File Into Scilab** หรือกดปุ่ม **Ctrl+E** จากนั้นโปรแกรมจะโหลดชุดคำสั่งไปยังหน้าต่าง Console พร้อมกับเริ่มการทำงานตามชุดคำสั่ง ในการคำนวณอาจต้องใช้เวลาคำนวณขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของชุดคำสั่งและค่า step size ของชุดคำสั่ง
- 5) เมื่อโปรแกรมคำนวณเสร็จเรียบร้อยแล้วจะมีหน้าจอแสดงผลในรูปแบบเส้นกราฟขึ้นมา สำหรับชุดคำสั่งนี้จะมีหน้าต่างแสดงผลทั้งหมด 3 หน้าต่างโดยแสดงวิธีการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคโลหะ ณ เวลาต่างๆกัน ค่าความร้อนที่ถ่ายเทจากอนุภาคโลหะ ณ เวลาต่างๆกัน
- 6) เมื่อคำนวณเสร็จแล้วสามารถบันทึกผลการคำนวณได้โดยเลือก **File > save** ที่เมนูบาร์



(f)



(g)



(ค)

รูปที่ ผค.3 แสดงหน้าต่างแสดงผลของชุดคำสั่งแสดงวิธีการเคลื่อนที่และการถ่ายเทความร้อนของละอองน้ำโลหะ (ก) วิธีการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ (ข) ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคโลหะ ณ เวลาต่างๆ กัน และ (ค) ค่าความร้อนที่ถ่ายเทจากอนุภาคโลหะ ณ เวลาต่างๆกัน

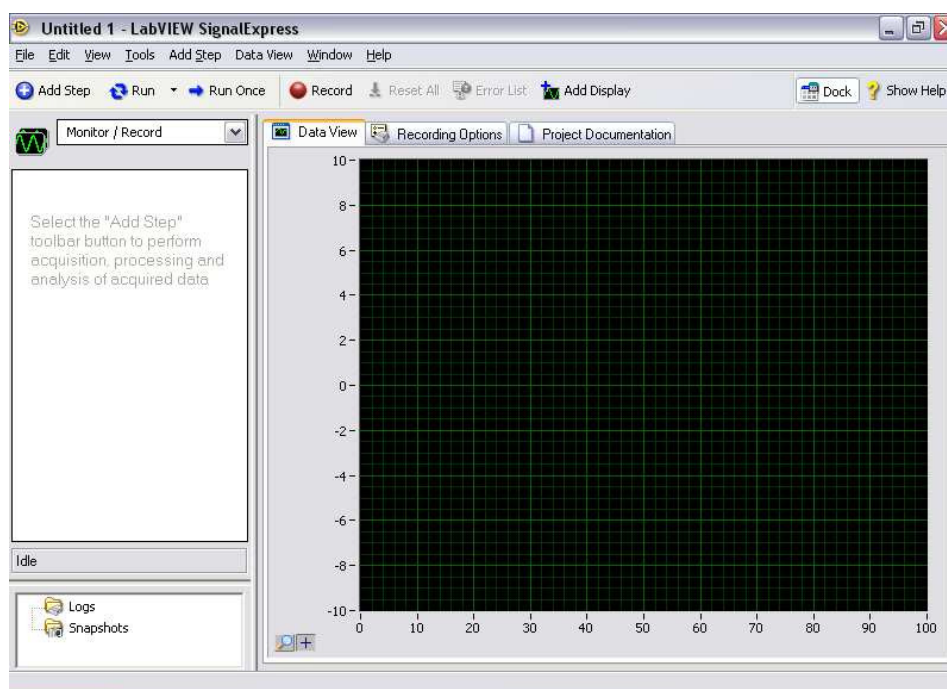
ภาคผนวก ง

การบันทึกอุณหภูมิด้วยโปรแกรม

LabView Signal Express

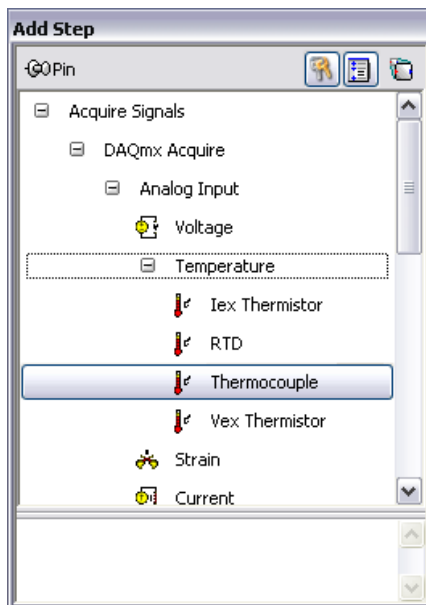
ขั้นตอนการกำหนดค่าและใช้โปรแกรม LabVIEW Signal Express สำหรับบันทึกค่าอุณหภูมิระหว่างการทดลองผลิตผงโลหะ

- 1) เลือก Start> All Programs> National Instruments> LabVIEW Signal Express> LabVIEW Signal Express เพื่อเปิดหน้าต่างโปรแกรม LabVIEW Signal Express
- 2) เลือก File> New Project หรือ กดปุ่ม Ctrl+N เพื่อสร้างหน้าต่างใหม่สำหรับการเริ่มการทำงาน

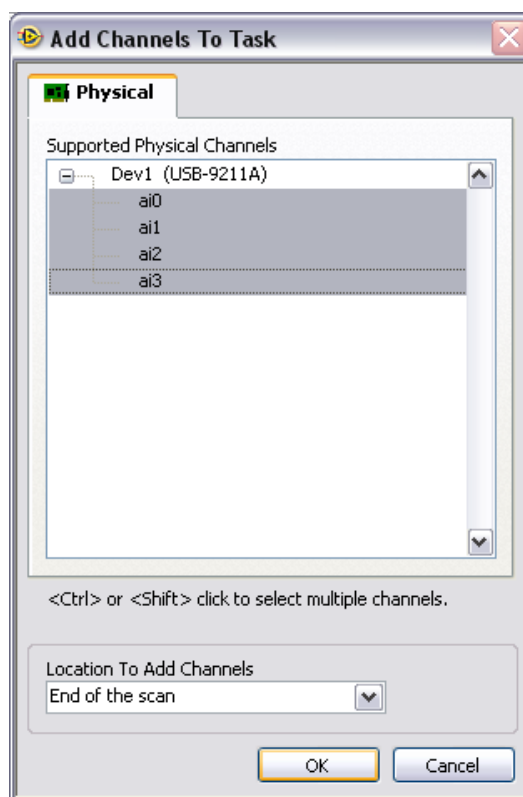


รูปที่ ผง.1 หน้าต่าง New Project ของโปรแกรม LabVIEW Signal Express

- 3) เลือก Add Step> Acquire Signals> DAQmx Acquire> Analog Input> Temperature> Thermocouple เพื่อเลือกชนิดของอินพุต (ก่อนทำขั้นตอนนี้ต้องต่อ Hi-Speed USB Carrier ก่อนเพื่อเป็น interface เชื่อมต่อสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลกับคอมพิวเตอร์)
- 4) จากนั้นกล่อง Add Channels To Task จะปรากฏขึ้นมาเพื่อให้เลือกช่องสัญญาณที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างเทอร์โมคัปเปิลกับ USB interface สามารถเลือกได้ตั้งแต่ 1-4 ช่อง จากนั้นกด OK เพื่อยอมรับการเลือกช่องสัญญาณ

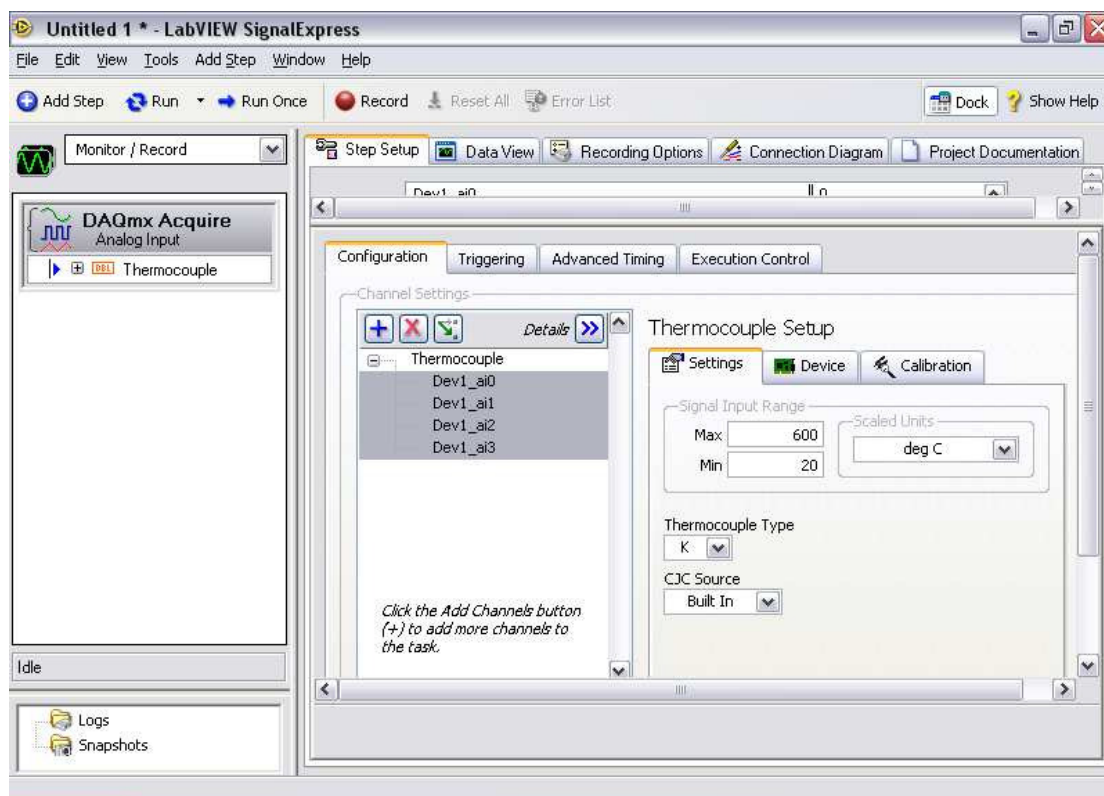


รูปที่ ผง.2 กล่อง Add Step สำหรับการตั้งค่า New project โดยการกำหนดลักษณะสัญญาณขาเข้า และกำหนดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าสัญญาณขาเข้า



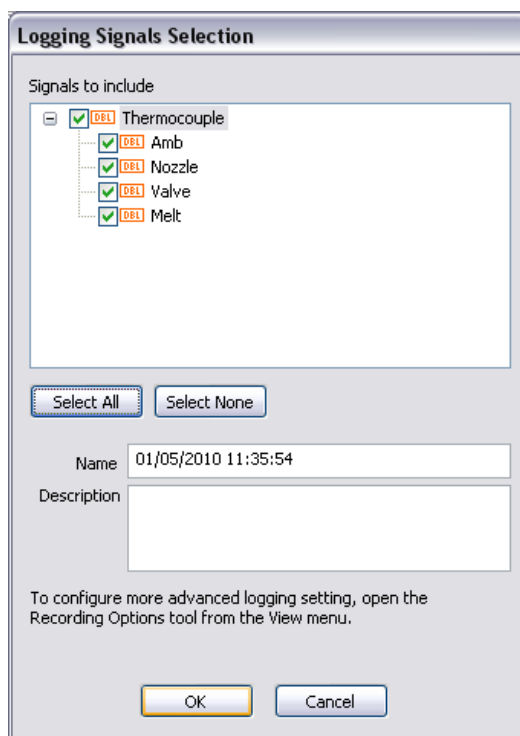
รูปที่ ผง.3 กล่อง Add Channels To Task สำหรับเลือกช่องสัญญาณขาเข้าที่รับมาจากอุปกรณ์ Hi speed USB carrier

5) เลือก Step Setup ตรงหน้าจอส่วนแสดงผล เลือกแท็บ Configuration เพื่อตั้งค่าการแปลงสัญญาณที่รับจาก interface โดยเลือกช่องสัญญาณที่ต้องการจะตั้งค่า จากนั้นไปที่ช่อง setting ป้อนค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของการวัด เลือกหน่วยในการวัด เลือกชนิดของเทอร์โมคัพเปิ้ล (Thermocouple type) และเลือกช่อง CJC Source เป็น Built in และตั้งค่า Sample Period



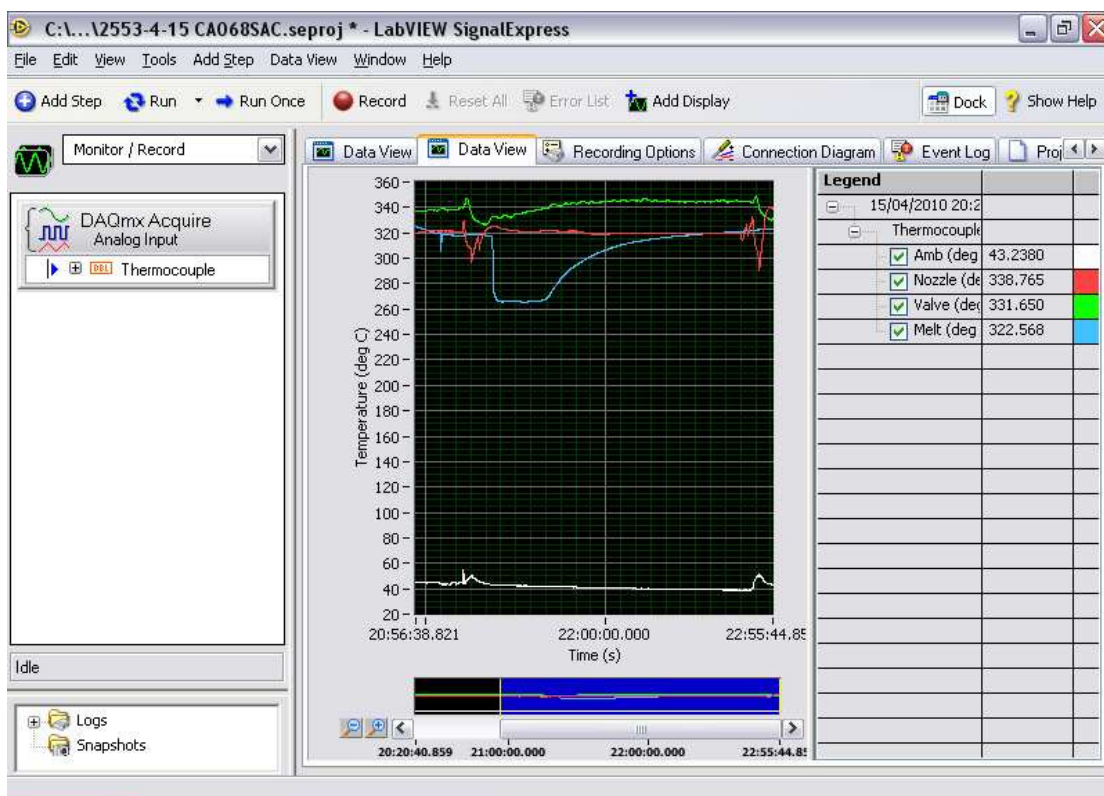
รูปที่ ผง.4 หน้าต่าง New Project ของโปรแกรม LabVIEW Signal Express โดยเริ่มต้นที่ค่าที่ Configuration ก่อนเพื่อปรับแต่งค่าการแสดงผลของโปรแกรม

6) เลือก Edit > Run เพื่อให้โปรแกรมเริ่มทำงาน และกดปุ่ม Record เพื่อบันทึกค่าข้อมูล โดยจะปรากฏกล่อง Logging Signals Selection เลือกช่องสัญญาณที่ต้องการบันทึก หรือกด Select All เพื่อบันทึกทุกช่องสัญญาณ กดปุ่ม OK เพื่อยอมรับการเลือก หลังจากนั้นเพื่อให้หน้าจอแสดงค่าอุณหภูมิ ไปที่กล่อง DAQmx Acquire คลิกซ้ายค้างที่ข้อมูลชื่อ Thermocouple แล้วลากมาวางที่กล่อง Data view ในส่วนของกล่องแสดงผลค่าของอุณหภูมิจะแสดงเป็นเส้นกราฟซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา



รูปที่ ผง.5 กล่อง Logging Signals Selection ซึ่งจะปรากฏก่อนที่โปรแกรมจะเริ่มบันทึกค่าเพื่อถามถึงช่องสัญญาณที่ต้องการบันทึก

7) เมื่อสิ้นสุดการใช้งานกดปุ่ม Record เพื่อยกเลิกการบันทึกข้อมูล จากนั้นเลือก File> Save Project หรือกดปุ่ม Ctrl+S เลือกที่อยู่ (Directory) ตั้งชื่อแฟ้มข้อมูลและกดปุ่ม OK เพื่อยอมรับการเลือก จากนั้น เลือก File> Exit หรือ กดปุ่ม Ctrl+F4 เพื่อหยุดการทำงานของโปรแกรม
Lab VIEW Signal Express



รูปที่ ผง.6 หน้าต่างโปรแกรมขณะกำลังแสดงผลค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆขณะทดลอง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายสรราช โคนสร้าง

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5110120115

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

ทุนผู้ช่วยวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี พ.ศ. 2551-2552

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Gonsrang, S., Plookphol, T. and Wisutmethangoon, S. “Design and Development of Centrifugal Atomizer for Lead-free Solder Powder Processing”, 4th International Conference on Engineering Technologies – ICET 2009, Novi Sad, Serbia, 28-30 April, 2009

Gonsrang, S., Plookphol, T. and Wisutmethangoon, S. “The Effect of Rotating Atomizer Geometry on the SAC305 Lead-free Solder Powder Production”, International Conference & Exhibition on Powder Metallurgy in Processing of Particulate Materials and Products & 36th Annual Technical Meeting, Jaipur, India, 28-30 January 2010