



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
โดยกระบวนการอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชัน

Production of Lead-Free Solder Powder

by an Ultrasonic Atomization Process

คณะผู้วิจัย

รศ.ดร.ศิริกุล วิสุทธิ์เมธางกูร

ผศ.ดร.ธวัชชัย ปลุกผล

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากเงินรายได้
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2552

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบ และสร้างเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน เพื่อใช้สำหรับผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว การดำเนินงานเริ่มจากศึกษากรรมวิธีการผลิต การออกแบบ และการสร้างเครื่องผลิตผงโลหะแบบอัลตราโซนิก เครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน ที่สร้างขึ้นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของถังอะตอมไมเซอร์ 80 เซนติเมตร และสูง 185 เซนติเมตร ความถี่ที่ใช้ในการอะตอมไมเซอร์เท่ากับ 20 kHz การลำเลียงน้ำโลหะจากเตาหลอมโลหะไปยังหัวจ่ายน้ำโลหะ และอัตราการป้อนน้ำโลหะจะถูกควบคุมโดยแรงดันของก๊าซไนโตรเจน เตาหลอมโลหะที่ใช้มีความจุประมาณ 10 กิโลกรัม อุณหภูมิหลอมสูงสุดประมาณ 500 องศาเซลเซียส ภายในถังอะตอมไมเซอร์ถูกทำให้เป็นสุญญากาศ และเติมด้วยก๊าซไนโตรเจน ระบบหล่อเย็นของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์จะใช้ลมเย็นมีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสที่ได้จากเครื่องอัดอากาศ และเครื่องทำลมเย็น ในการทดลองได้ศึกษาผลของอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของน้ำโลหะ อัตราการป้อนน้ำโลหะ แอมพลิจูด และอิทธิพลของปริมาณออกซิเจน ที่มีผลต่อการกระจายตัว ขนาดเฉลี่ย และรูปร่างของผงโลหะดิบุก และผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) ที่ผลิตได้ จากการทดลองพบว่า แอมพลิจูด อัตราการป้อนน้ำโลหะ และอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของน้ำโลหะ มีผลต่อการกระจายตัว และขนาดเฉลี่ย ของผงโลหะที่ผลิต กล่าวคือ เมื่ออัตราการป้อนน้ำโลหะต่ำลง และอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทสูงขึ้น จะทำให้ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะที่ได้เล็กลง และมีช่วงการกระจายตัวที่แคบลง และที่แอมพลิจูดต่ำสุดจะทำให้ได้ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะเล็กลง

อิทธิพลของปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์มีผลต่อรูปร่างของผงโลหะที่ผลิตได้ คือ การผลิตภายใต้บรรยากาศที่ไม่ควบคุมปริมาณของออกซิเจน ผงโลหะที่ได้จะมีรูปร่างไม่แน่นอน เช่นมีรูปร่างเป็นหยดน้ำตา และลิกาเมนต์ เป็นส่วนมาก และที่ผลิตภายใต้บรรยากาศควบคุมปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์จะทำให้รูปร่างของผงโลหะเป็นเม็ดกลมเพิ่มมากขึ้น ตามปริมาณของเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่ลดลง

ABSTRACT

The objectives of this research were to design and construct an ultrasonic atomizer for production of lead-free solder powder. The procedures included the study of overall metal powder processes, the design and construction of an ultrasonic atomizer. The designed atomizer vessel has a diameter and a height 80 cm and 185 cm respectively. The ultrasonic wave used in this atomizer was 20 kHz. The molten metal was delivered from the melter provider through the nozzle. Melt feed rate was controlled by compressed nitrogen gas. The melter which is able to use at 500 °C in maximum temperature has a capacity of 10 kg of tin metal. Before atomizing, an atomization vessel was first evacuated to remove internal air and then nitrogen gas was filled to reduce the content of oxygen inside. During atomizing process, the ultrasonic transducer was cooled by the cooling system comprising of air dryer and air compressor. In this work, the influences of superheating temperature, melt feed rate, amplitude of ultrasonic wave and oxygen content in atomizer vessel on the particle size distribution, median particle size and morphology of tin powder and lead-free solder powder (SAC305) were investigated. The experimental results showed that median particle size (D_{50}) of produced powder decreased and size distribution became narrower with increasing superheat temperature and decreasing melt feed rate. In the present work, it was found that the mean size of metal particle would rather smaller with lowering vibrating amplitude.

The oxygen content was found to significantly affect the shape of atomizer powders. The particle atomized at atmosphere condition had tear drop shape and ligament shape whereas the particles processed at lower oxygen content became more rounded.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง “การผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยกระบวนการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน” ได้รับความทุ่มเททั้งแรงกาย และแรงใจอย่างเต็มที่ในการช่วยดำเนินงานวิจัยจาก นายไพโรจน์ สังขพิชญ์ ซึ่งทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณบริษัท ไทยแลนด์สเมตติ้งแอนดรีไฟนิง จำกัด (THAISARCO) แผนกการค้าโลหะผง จังหวัดภูเก็ต ซึ่งข้าพเจ้าได้ไปฝึกงาน แล้วนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน

ขอขอบพระคุณครูถนัด นิมพิล และครูประยูร ศิวศิริ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งช่วยข้าพเจ้าในการสร้างเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน ตลอดจนการใช้สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซอร์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่อนุเคราะห์เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้งบประมาณอุดหนุนการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

		หน้า
	บทคัดย่อ	i
	กิตติกรรมประกาศ	iii
	สารบัญ	iv
	รายการตาราง	viii
	รายการภาพประกอบ	ix
	สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	xiii
	บทที่	
1	บทนำ	1
	1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	1
	1.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
	1.2.1 โลหะบัดกรี	4
	1.2.2 ธาตุเจือที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว	5
	1.2.3 สมบัติของธาตุเจือชนิดต่างๆ	6
	1.2.4 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว	7
	1.3 การหลอมโลหะเพื่อใช้ในการผลิตผงโลหะ	8
	1.3.1 เตาครุชีเบิล และชนิดของเตาครุชีเบิล	8
	1.3.2 เตาอินดักชัน	10
	1.4 คลื่น	11
	1.4.1 คลื่นกล	11
	1.4.2 องค์ประกอบพื้นฐานของคลื่น	13
	1.4.3 อัลตราโซนิก	14
	1.5 กลไกการแตกตัวของน้ำโลหะหลอมเหลวด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก อะตอมไมเซชัน	15
	1.6 กระบวนการคัดแยกขนาดอนุภาค	17
	1.7 Circularity shape factors	21
	1.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
1.9	การสืบค้นฐานข้อมูลสิทธิบัตร	32
1.10	วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	35
1.11	ขอบเขตของโครงการวิจัย	36
1.12	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	36
1.13	สถานที่ทำการวิจัย	36
2	การดำเนินงานวิจัย	37
2.1	การออกแบบ และการสร้างเครื่องอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชัน	37
2.1.1	ออกแบบและสร้างถังอะตอมไมเซอร์	38
2.1.2	การออกแบบและสร้างหัวจ่ายน้ำโลหะ	41
2.1.3	การออกแบบและสร้างเตาหลอมโลหะ	42
2.1.4	การออกแบบและสร้างระบบหล่อเย็นอัลตราโซนิคทรานควิเซอร์	44
2.1.5	การออกแบบและสร้างอัลตราโซนิคโพรบ	45
2.1.6	การออกแบบและสร้างตัวจับยึดเครื่องอัลตราโซนิคภายในถังอะตอมไมเซอร์	46
2.1.7	การออกแบบและสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะ	47
2.2	การทดสอบการทำงานของเครื่องอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชัน	51
2.3	วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	53
2.4	วิธีการทดลอง	54
2.5	การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะ	57
2.6	การตรวจสอบลักษณะรูปร่างของผงโลหะ	58
2.7	การวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนของผงโลหะ	58
3	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	59
3.1	วิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะ	59
3.1.1	ผงโลหะคีนุก	59
3.1.2	ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว	62

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3.2	วิเคราะห์ห้ขนาดเฉลี่ยของขนาดอนุภาคผงโลหะ	65
3.2.1	ผลของอุณหภูมิหลอมน้ำโลหะต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะดีบุก	67
3.2.2	ผลของอัตราการป้อนน้ำโลหะต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะดีบุก	68
3.2.3	ผลของแอมพลิฟิแคตต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะดีบุก	69
3.2.4	ผลของอุณหภูมิหลอมน้ำโลหะต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วภายใต้บรรยากาศไม่ควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน	70
3.2.5	ผลของอัตราการป้อนน้ำโลหะต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วภายใต้บรรยากาศไม่ควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน	71
3.2.6	ผลของอุณหภูมิหลอมน้ำโลหะต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน	72
3.2.7	ผลของอัตราการป้อนน้ำโลหะต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน	73
3.2.8	ผลของแอมพลิฟิแคตต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว	74
3.2.9	ผลของเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว	75
3.3	การวิเคราะห์รูปร่าง	76
3.3.1	ผงโลหะดีบุก	77
3.3.2	ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว	78
3.3.3	Circularity shape factor	80
3.3.4	ปริมาณออกซิเจนในผงโลหะ	83
4	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	85
4.1	สรุปผล	85
4.1.1	อิทธิพลของอุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะ	85
4.1.2	อิทธิพลของอัตราการป้อนน้ำโลหะ	85
4.1.3	อิทธิพลของแอมพลิฟิแคต	86
4.1.4	อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน	86

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
บรรณานุกรม		89
ภาคผนวก ก	ตารางแสดงค่าการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะ	92
ภาคผนวก ข	การคำนวณเบื้องต้น	101
ภาคผนวก ค	การออกแบบเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน	110

รายการตาราง

ตาราง	หน้า	
1.1	สถิติการนำเข้าผงโลหะและโลหะเคลือบบางประเภทจากต่างประเทศ	3
1.2	แสดงธาตุเจือที่มีจุดหลอมเหลวต่ำๆที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อทำเป็นโลหะบัดกรี	5
1.3	แสดงธาตุเจือที่นิยมใช้กันเป็นประจำ	6
1.4	กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180°C	7
1.5	กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180°C ถึง 200°C	7
1.6	กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200°C ถึง 230°C	8
1.7	แสดงตัวอย่างอัตราเร็วของเสียงในตัวกลางต่าง ๆ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	12
1.8	แสดงขนาดมาตรฐานของตะแกรงร่อน	18
1.9	แสดงมาตรฐานการจำแนกขนาดอนุภาคของผงโลหะ	19
1.10	ผลจากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค	20
2.1	แสดงถึงตัวแปรควบคุมต่างๆที่ใช้ในการผลิตผงโลหะดีบุก	52
2.2	แสดงถึงตัวแปรควบคุมต่างๆที่ใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วภายใต้บรรยากาศปกติ	53
2.3	แสดงถึงตัวแปรควบคุมต่างๆที่ใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมออกซิเจน	53
3.1	แสดงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะดีบุกที่ได้จากกระบวนการผลิตที่สภาวะควบคุมของตัวแปรต่างๆ	66
3.2	แสดงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ได้จากการผลิตภายใต้บรรยากาศปกติที่สภาวะควบคุมของตัวแปรต่างๆโดยกำหนดให้แอมพลิฟูดคิงที่ 70 %	66
3.3	แสดงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ที่สภาวะควบคุมของอุณหภูมิหลอมน้ำโลหะ 300 °C และอัตราการป้อนน้ำโลหะ 25 kg/hr	66
3.4	แสดงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ได้จากการผลิตภายใต้บรรยากาศควบคุมออกซิเจน (5-7 %) ที่สภาวะควบคุมของตัวแปรต่างๆ โดยกำหนดให้แอมพลิฟูดคิงที่ 70 %	67
3.5	แสดงค่า circularity shape factor ที่ได้จากการคำนวณ	81
3.6	แสดงค่า oxygen content ของผงโลหะที่ผลิตภายใต้เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนต่างกัน	83

รายการภาพประกอบ

ภาพ	หน้า	
1.1	เตาแบบยกเข้าออก	9
1.2	เตาแบบเททั้งเบ้า	9
1.3	เตาอินดัคชัน	10
1.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มเสียงกับความถี่ที่ระดับต่างๆ	13
1.5	องค์ประกอบพื้นฐานของคลื่น	14
1.6	ส่วนประกอบของเครื่องอัลตราโซนิก	15
1.7	กลไกการแตกตัวของน้ำโลหะหลอมเหลวด้วยวิธีการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน	16
1.8	ลักษณะการฟอรั่มตัวของหยดน้ำโลหะจากคลื่นขนาดเล็ก	16
1.9	การเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ของหยดของเหลวที่หลุดออกจากปลายโพรบ	21
1.10	เครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน	22
1.11	ลักษณะเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันที่ Caccioppoli และคณะได้พัฒนาขึ้น	25
1.12	แบบร่างของเครื่อง ultrasonic standing wave atomization (USWA)	26
1.13	กระบวนการ ultrasonic standing wave atomization (USWA)	29
1.14	ลักษณะการเกิดหยดของเหลวจากยอดคลื่นบนพื้นผิวที่มีการสั่นสะเทือน	31
1.15	เครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน	32
1.16	เครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันที่มีทางเดินน้ำโลหะสองช่องทางภายในรูของอัลตราโซนิก ทรานควิเซอร์	32
1.17	อัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันสำหรับของเหลว	33
1.18	ลักษณะหัวโพรบที่มีปลายแหลม	34
1.19	การอะตอมไมเซชันด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	34
1.20	ลักษณะหัวฉีดที่ใช้ในการอะตอมไมเซชัน	35
1.21	การอะตอมไมเซชันของของเหลวโดยใช้การสั่น	35
2.1	แสดงหลักการเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ของหยดน้ำโลหะ	38
2.2	แบบร่างและส่วนประกอบต่างๆของถังอะตอมไมเซชัน	40
2.3	ขนาดของถังอะตอมไมเซชัน และลักษณะของถังอะตอมไมเซชันที่ได้จัดทำขึ้น	41
2.4	แบบร่างและส่วนประกอบต่างๆของหัวจ่ายน้ำโลหะ	42

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
2.5	ขนาดและลักษณะของหัวจ่ายน้ำโลหะที่ได้จัดทำขึ้น	42
2.6	แบบร่างและส่วนประกอบต่างๆของเตาหลอมโลหะ	43
2.7	ขนาดและลักษณะของเตาหลอมโลหะที่ได้จัดทำขึ้น	43
2.8	แบบร่างและส่วนประกอบต่างๆของชุดหล่อเย็นอัลตราโซนิกทรานควิเซอร์	44
2.9	ขนาดและลักษณะของชุดระบบหล่อเย็นอัลตราโซนิกทรานควิเซอร์ที่ได้จัดทำขึ้น	45
2.10	ขนาดและลักษณะของอัลตราโซนิกโพรบที่ได้จัดทำขึ้น	46
2.11	แบบร่างและส่วนประกอบต่างๆของตัวจับยึดเครื่องอัลตราโซนิกภายในถังอะตอมไมเซอร์	47
2.12	ตัวจับยึดเครื่องอัลตราโซนิกภายในถังอะตอมไมเซอร์ที่ได้จัดทำขึ้น	47
2.13	แบบร่างและส่วนประกอบต่างๆของชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำโลหะ	48
2.14	ขนาด และส่วนประกอบต่างๆของชุดวัด และควบคุมอุณหภูมิที่ได้จัดทำขึ้น	49
2.15	แบบร่างของเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซอร์	50
2.16	เครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซอร์ที่ได้จัดทำขึ้น	50
2.17	วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง	55
2.18	กระบวนการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยวิธีอัลตราโซนิกอะตอมไมเซอร์	56
2.19	ผงโลหะที่ผลิตได้จากกระบวนการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซอร์	57
3.1	กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะดีบุกทุกขนาดที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยใช้ตัวแปรควบคุมของอัตราการป้อนน้ำโลหะ 10, 15 และ 25 kg/hr	60
3.2	กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะดีบุกทุกขนาดที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยใช้ตัวแปรควบคุมของอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ 270, 300 และ 350 °C	61
3.3	กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะดีบุกทุกขนาดที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยใช้ตัวแปรควบคุมของแอมพลิจูดที่ 70, 75 และ 80 %	62
3.4	กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทุกขนาดที่ได้จากการผลิตภายใต้บรรยากาศปกติ (20.9 % O ₂) โดยใช้อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะที่ 270, 300 และ 350 °C	63

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพ	หน้า	
3.5	กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทุกขนาดที่ได้จากการผลิตภายใต้บรรยากาศปกติ (20.9% O ₂) โดยใช้ตัวแปรควบคุมของอัตราการป้อนน้ำ โลหะที่ 10, 15, 20 และ 25 kg/hr	64
3.6	กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทุกขนาดที่ได้จากการผลิตภายใต้บรรยากาศปกติ (20.9% O ₂) โดยใช้ตัวแปรควบคุมของแอมพลิจูดที่ 60, 70, 80 และ 90 %	65
3.7	กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุกที่อุณหภูมิหลอมน้ำโลหะต่างกัน	68
3.8	กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุกที่อัตราการป้อนน้ำโลหะต่างกัน	69
3.9	กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุกที่แอมพลิจูดต่างกัน	70
3.10	กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมน้ำโลหะต่างกันภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน	71
3.11	กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อัตราการป้อนน้ำโลหะต่างกันภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน	72
3.12	กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมน้ำโลหะต่างกันภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน	73
3.13	กราฟแสดงขนาดเฉลี่ย ของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อัตราการป้อนน้ำโลหะต่างกันภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน	74
3.14	กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่แอมพลิจูดต่างกัน	75
3.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนกับค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว	76
3.16	ลักษณะรูปร่างของผงโลหะดีบุกที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงเปรียบเทียบกันระหว่างที่บรรยากาศปกติ 20.9 % ออกซิเจน กับบรรยากาศควบคุมออกซิเจน 2%	77
3.17	ลักษณะรูปร่างของผงโลหะดีบุกที่มีช่วงการกระจายตัวขนาด -45 + 25 ไมครอน ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเปรียบเทียบกันระหว่างที่บรรยากาศปกติ 20.9 % ออกซิเจน กับบรรยากาศควบคุมออกซิเจน 2%	78

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพ	หน้า	
3.18	ลักษณะรูปร่างของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงเปรียบเทียบกันระหว่างที่บรรยากาศปกติ 20.9 % ออกซิเจนกับบรรยากาศควบคุมออกซิเจน 2%	79
3.19	ลักษณะรูปร่างของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีช่วงการกระจายตัวขนาด -45 + 25 ไมครอนถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเปรียบเทียบกันระหว่างที่บรรยากาศปกติ 20.9 % ออกซิเจน กับบรรยากาศควบคุมออกซิเจน 1.8%	80
3.20	ลักษณะรูปร่างของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีช่วงการกระจายตัวขนาด -45 + 25 ไมครอนถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 300 เท่าที่เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนต่างกัน	81
3.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนกับค่า circularity shape factor	82
3.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนกับปริมาณของออกซิเจนในผงโลหะที่ผลิตได้	84

สัญลักษณ์คำย่อ และตัวย่อ

A	พื้นที่ (m^2)
A_s	พื้นที่ผิวของหยดน้ำโลหะ (m^2)
B	บัลค์โมดูลัสของแก๊สหรือของเหลว (GPa)
C_a	axial mode sound velocity (m/s)
C_D	สัมประสิทธิ์ของแรงดึง (N/m^2)
C_T	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (J/K.mol)
d	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของหยดน้ำโลหะ (m)
D_p	ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ (μm)
D_{32}	Sauter mean diameter (μm)
E	young's modulus (GPa)
F	แรงดึง (N/m^2)
f	ความถี่ (Hz)
f_{circ}	Shape factors ของทรงกลม
h	สัมประสิทธิ์การนำพาความร้อนของน้ำโลหะ ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
K	Thermal conductivity of atmosphere ($W/m \cdot ^\circ C$)
L	สัมประสิทธิ์การแพร่ของหยดน้ำโลหะ (J/kg)
m	มวลของหยดของเหลว (kg)
N	จำนวนหยดน้ำโลหะ (droplet/sec)
P	เส้นรอบวง (m)
Q	อัตราการไหลของน้ำโลหะ (m^3/s)
Q_s	ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย (J)
r	รัศมีของหยดน้ำโลหะ (m)
T_s	อุณหภูมิที่ผิวหยดน้ำโลหะ ($^\circ C$)
T_∞	อุณหภูมิบริเวณรอบข้าง ($^\circ C$)
V	ปริมาตรของของเหลวที่ใช้ในการอะตอมไมเซอร์ (m^3/kg)
W	พลังงาน (J)
Y	บัลค์โมดูลัสของแข็ง (GPa)

สัญลักษณ์คำย่อ และตัวย่อ (ต่อ)

Greek letters

μ_{∞}	dynamic viscosity of surrounding (m^2/s)
μ_s	dynamic viscosity of surrounding close to the surface of a droplet (m^2/s)
ρ	ความหนาแน่น (kg/m^3)
v	อัตราเร็วของคลื่นเสียง (m/s)
σ	ความตึงผิวของน้ำโลหะ (N/m)
λ	ความยาวคลื่น (m)
η	ความหนืดของของเหลว ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)

Dimensionless number

I_N	Intensity number
Nu	Nusselt number
Oh	Ohnesorge number or Viscous number
Pr	Prandtl number
Re	Reynolds Number
We	Weber number

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

โลหะกรรมวัสดุผงเป็นกระบวนการที่ประกอบด้วยการผลิตผงโลหะ การจำแนกผงโลหะ และการขึ้นรูปผงโลหะด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนทางวิศวกรรม ซึ่งกรรมวิธีการผลิตชิ้นส่วนทางโลหะผงนั้น มีข้อดีกว่ากระบวนการผลิตแบบอื่นคือ ชิ้นงานที่ได้มีสมบัติเชิงกลสม่ำเสมอทั้งชิ้น ไม่มีปัญหาเรื่องการกระจายตัวของธาตุ อัตราการผลิตสูง ปริมาณการสูญเสียต่ำ ต้นทุนในการผลิตต่ำลง เป็นทางเลือกสำหรับการขึ้นรูป และการแปรรูปวัสดุที่ขึ้นรูปยาก เช่น โลหะหรือโลหะผสมที่ทนความร้อนสูง สามารถผลิตวัสดุชนิดใหม่ และวัสดุที่มีสมรรถนะสูงๆ ได้ จึงมีแนวโน้มในการนำผงโลหะมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเพิ่มมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากปริมาณการใช้ชิ้นส่วนที่ผลิตจากวัสดุผงของอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โทรศัพท์มือถือ อุปกรณ์กีฬา รวมถึงฮาร์ดแวร์ต่างๆ ผงโลหะจึงจัดเป็นวัตถุดิบหลักประเภทหนึ่งที่มีความสำคัญมากในการใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนต่างๆ ในอุตสาหกรรม ซึ่งถ้าจากสถิติการนำเข้าผงโลหะชนิดต่างๆ ของไทยแล้ว (ตารางที่ 1.1) จะเห็นว่ามีแนวโน้มที่สูงขึ้นในทุกปี และจากตัวเลขมูลค่าการนำเข้าผงโลหะในประเทศไทยพบว่ามียอดนำเข้าสูง จึงทำให้ประเทศต้องเสียเงินตราออกนอกประเทศ และยังเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นด้วย ซึ่งหากเราสามารถผลิตวัตถุดิบเหล่านี้ขึ้นใช้ได้เองเพื่อทดแทนการนำเข้า จะมีส่วนช่วยให้ต้นทุนในการผลิตลดลงได้ และยังสามารถช่วยให้เกิดการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกทางหนึ่งด้วย ซึ่งผงโลหะชนิดต่างๆ จะมีวิธีการผลิตที่แตกต่างกันไปตามสมบัติเฉพาะของโลหะแต่ละชนิด โดยทั่วไปจะมีวิธีการผลิตผงโลหะ 4 วิธีคือ วิธีอะตอมไมเซชัน (atomization), วิธีทางเคมี (chemical), วิธีทางกล (mechanical) และวิธีอิเล็กโตไลติก (electrolytic) ซึ่งกระบวนการผลิตผงโลหะนั้นมีความสำคัญมาก เพราะกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อขนาด รูปร่าง และสมบัติทางกายของผงที่ผลิตได้ และวิธีการผลิตผงโลหะที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบันนี้คือวิธีการผลิตผงโดยเทคนิคอะตอมไมเซชัน (atomization) ซึ่งการผลิตผงโลหะด้วยวิธีอะตอมไมเซชันนับเป็นกระบวนการผลิตผงโลหะที่มีกระบวนการซับซ้อนแต่ให้ประสิทธิภาพสูง สามารถใช้ผลิตผงโลหะได้หลายชนิด โดยใช้หลักการทำให้โลหะหลอมเหลวแล้ว แยกตัวเป็นหยด หรือละอองที่มีขนาดละเอียดมาก แล้วทำให้เย็นตัวจนละอองโลหะหลอมแข็งตัวกลายเป็นเม็ดผงโลหะที่

มีขนาดต่างๆกัน การทำให้โลหะหลอมเหลวเป็นละอองนั้นต้องมีแรงมากระทำต่อโลหะหลอมด้วยวิธีต่างๆ เช่น การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ (gas atomization), การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ (water atomization), การอะตอมไมเซชันด้วยแรงหมุนเหวี่ยง (centrifugal atomization) และการอะตอมไมเซชันด้วยอัลตราโซนิก (ultrasonic atomization) เพื่อทำให้เกิดเป็นผงโลหะขึ้น ซึ่งในการทำวิจัยครั้งนี้เลือกใช้วิธีอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน (ultrasonic atomization) ซึ่งกระบวนการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันจะมีข้อดีกว่าการอะตอมไมเซชันด้วยเทคนิคอื่นๆดังนี้

1. พลังงานที่ต้องสูญเสียไปในกระบวนการผลิตผงโลหะ ด้วยวิธีการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอะตอมไมเซชันด้วยแรงหมุนเหวี่ยง การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ และการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำจึงส่งผลต่อค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนในการผลิตที่ต่ำลงด้วย

2. การกระจายตัวของหยดโลหะหลอมเหลวอยู่ในช่วงที่สั้นมากจึงส่งผลให้ขนาดถึงอะตอมไมเซอร์มีขนาดที่ไม่ใหญ่มาก เมื่อเทียบกับวิธีการอะตอมไมเซชันด้วยแรงหมุนเหวี่ยง การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ และการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ

3. การกระจายตัวของขนาดผงโลหะอยู่ในช่วงที่แคบ

4. ขนาดของผงโลหะที่ได้จะถูกควบคุมโดยความถี่ของอัลตราโซนิก

5. ผงโลหะที่ได้จะมีลักษณะกลม

6. กระบวนการผลิตไม่ยุ่งยากซับซ้อน

นอกจากนั้นวิธีการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน เป็นวิธีการที่ให้ประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะกับโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวไม่สูงมากนัก เช่น กลุ่มโลหะบัดกรี (solder) ซึ่งโลหะกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยตัวหลักๆคือ Sn-Ag-Cu หรือ SAC ซึ่งโลหะกลุ่มนี้ในปัจจุบันกำลังเป็นที่ได้รับความนิยมในด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น นำผงโลหะบัดกรีไปทำเป็นครีมโลหะบัดกรีเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมแผงวงจรไฟฟ้า หรือนำไปทำเป็นลวดเชื่อมในวงจรไฟฟ้า (printed circuit board) และโลหะกลุ่ม Sn-Ag-Cu ยังมีข้อดีอีกอย่างหนึ่งคือ เป็นโลหะบัดกรีที่ไม่มีส่วนผสมของตะกั่ว (lead free solder) ที่จะไม่ทำให้ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันนี้ สหภาพยุโรป หรือ EU ได้ออกกฎหมายตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006 เพื่อควบคุมการปนเปื้อนของสารเคมีอันตราย ในสิ่งแวดล้อม 2 ข้อ คือ WEEE (Waste from Electrical and Electronics Equipment) และ RoHS (Restriction on Hazardous Substances) โดยสารพิษหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องใช้ไฟฟ้า คือ ตะกั่ว ซึ่งผสมอยู่ในโลหะบัดกรีที่ใช้เชื่อมต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เข้ากับแผงวงจร (printed circuit board) จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการ

พัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขึ้นมาใช้ทดแทน ประกอบกับบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ในอนาคตมีแนวโน้มที่มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ ดังนั้นการเชื่อมต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระบวนการบัดกรีจึงต้องการขนาดของรอยบัดกรีที่มีขนาดเล็กลงตามไปด้วย ทำให้การใช้โลหะบัดกรีแบบลวดมีแนวโน้มที่ลดลง ในขณะที่โลหะบัดกรีแบบครีมได้ถูกนำมาใช้เพิ่มขึ้น โดยองค์ประกอบหลักของครีมโลหะบัดกรี คือ ผงโลหะบัดกรีนั่นเอง เพื่อเป็นการปรับตัวให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าของประเทศไทยสามารถที่จะแข่งขันและอยู่รอดได้ในสภาวะการค้าเสรีในปัจจุบัน จึงจำเป็นต้องมีการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว เพื่อเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการช่วยพัฒนาอุตสาหกรรมด้านนี้ของประเทศ ดังนั้นทางกลุ่มวิจัยโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วจึงมีความคิดเห็นร่วมกันว่าถ้าหากนำวิธีการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชันจะสามารถผลิตผงได้ขนาดและรูปร่างตามต้องการและสามารถนำผงโลหะที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้

ตารางที่ 1.1 สถิติการนำเข้าผงโลหะและโลหะเคลือบบางประเภทจากต่างประเทศ ระหว่างปี 2548 - กรกฎาคม 2552 (กรมศุลกากร 2548-2552)

ประเภทโลหะ	HS-Code	มูลค่า (บาท)				
		พ.ศ.2548	พ.ศ.2549	พ.ศ.2550	พ.ศ.2551	มค. - กค. พ.ศ.2552
เงิน(Ag)	7106	13,358,012,243	14,406,814,008	17,730,312,818	18,370,802,362	8,902,086,099
ดีบุก(Sn)	8005	4,619,431	4,375,922	-	-	-
สังกะสี(Zn)	7903	163,574,474	307,601,957	364,636,898	337,655,415	105,936,216
นิกเกิล(Ni)	7504	106,706,715	151,760,946	125,616,114	191,672,771	44,618,152
ตะกั่ว(Pb)	7804	23,018,258	17,237,831	25,957,052	32,127,167	19,679,542
อะลูมิเนียม (Al)	7603	91,658,550	109,832,852	116,465,448	141,816,658	47,463,575
ทองแดง (Cu)	7406	165,474,514	280,909,723	686,943,204	523,344,524	118,569,286

1.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเรื่องการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยกระบวนการอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชัน มีวัตถุประสงค์ที่จะออกแบบและสร้างเครื่องอัลตราโซนิคอะตอมไมเซอร์ที่สามารถใช้ผลิตผงโลหะกลุ่มโลหะบัดกรี ซึ่งจะศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมที่มีผลต่อขนาด

รูปร่าง และการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการผลิตด้วยเทคนิคนี้ และในการวิจัยครั้งนี้ จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุมที่สำคัญ 4 ตัวแปร คือ

- อุณหภูมิหลอมเหลวโลหะ (melt temperature)
- อัตราการป้อนน้ำโลหะ (melt flow rate)
- แอมพลิจูด (amplitude)
- ปริมาณออกซิเจน (oxygen content)

ซึ่งทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทนี้แบ่งออกเป็นหัวข้อดังนี้

1. โลหะบัดกรี และ ธาตุเจือที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
2. กระบวนการหลอมโลหะด้วยเทคนิคต่างๆ
3. อัลตราโซนิก และหลักการเกิดคลื่นความถี่
4. กลไกการแตกตัวเป็นละอองของโลหะเหลวด้วยคลื่นอัลตราโซนิก
5. การคัดแยกขนาดอนุภาคผงโลหะ
6. Shape factor ของอนุภาคทรงกลม
7. งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 โลหะบัดกรี (Solder)

โลหะบัดกรีมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมมาเป็นเวลานาน ซึ่งโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb) จะใช้กันมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีข้อดี คือ ราคาถูก มีสมบัติการบัดกรีที่ดีอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วงที่เหมาะสม มีสมบัติทางกายภาพ ทางกล ทางโลหะวิทยาที่ดี และสมบัติต้านทานความล้าที่ดี แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีความเป็นพิษเนื่องจากมีปริมาณของตะกั่วผสมอยู่ในปริมาณที่สูง ส่วนผสมของโลหะบัดกรีที่นิยมใช้กันมากคือ 63Sn-37Pb และ 60Sn-40Pb เป็นต้น ดังนั้น จึงมีการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb) เพื่อลดปัญหาในเรื่องของความเป็นพิษที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นำมาทดแทนนั้นจะต้องมีสมบัติต่างๆใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิดที่มีตะกั่วผสม ซึ่งคุณลักษณะเบื้องต้นของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ใช้เป็นเกณฑ์พิจารณาดังนี้

- อุณหภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb โดยเฉพาะโลหะบัดกรีชนิด 63Sn-37Pb
- มีช่วงความเป็นพลาสติกที่แคบ
- มีสมบัติด้านการเปียกที่ดีเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

- มีสมบัติทางกายภาพไม่ด้อยกว่าโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb
- มีสมบัติต้านทานการล้าที่ดี
- สามารถใช้ได้กับระบบฟลักซ์เหลวที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน
- เมื่อทำเป็นโลหะบัดกรีชนิดคริมจะต้องมีอายุการเก็บยาวนานไม่เสื่อมคุณภาพ
- ต้องไม่เป็นพิษ
- ราคาถูก

1.2.2 วัสดุเจือที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อผลิตเป็นผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โลหะบัดกรีทั่วไปที่ใช้จะมีส่วนผสมของดีบุกเป็นหลัก เนื่องจากดีบุกมีสมบัติการเปียก และการแผ่กระจายตัวเวลานำไปบัดกรีได้ดี ส่วนวัสดุเจือที่นำมาผสมกับดีบุกทำเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วนั้นมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน วัสดุโลหะเจือที่สำคัญๆ ได้แก่ บิสมัท (Bi), แคดเมียม (Cd), อินเดียม (In), สังกะสี (Zn) ทองคำ (Au), ทองแดง (Cu), พลวง (Sb) และ เงิน (Ag) เป็นต้น ซึ่งวัสดุเจือที่มีจุดหลอมเหลวต่ำๆที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อทำเป็นโลหะบัดกรีจะสรุปไว้ในตารางที่ 1.2 และนอกจากนี้วัสดุเจือที่นิยมใช้เป็นประจำจะแสดงในตารางที่ 1.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 1.2 แสดงวัสดุเจือที่มีจุดหลอมเหลวต่ำๆที่ใช้ผสมกับดีบุกเพื่อทำเป็นโลหะบัดกรี

(Lee 2005)

ธาตุ	ความสามารถที่เติมได้ (%)	ช่วงที่เป็นของแข็ง (°C)	ช่วงที่เป็นของเหลว (°C)	ความเป็นพิษ	ราคา	ความเหมาะสมที่จะใช้
Bi	0-100	138	138-270	-	ยอมรับได้	ปานกลาง
Cd	0-100	188	177-320	สูง	ยอมรับได้	ปานกลาง
In	0-100	117-150	117-232	-	ปานกลาง	ต่ำ
Zn	0-90	198	198-400	-	ต่ำ	ดี
Au	0-82	218-310	218-400	-	สูง	ต่ำ
Tl	0-100	165	165-300	สูง	-	ต่ำ
Ga	0-100	18	18-232	-	สูง	ต่ำ
Hg	0-100	140	-40-+232	สูง	สูง	ต่ำ

ตารางที่ 1.3 แสดงธาตุเจือที่นิยมใช้กันเป็นประจำ (Lee, 2005)

ธาตุ	ความสามารถที่เติมได้ (%)	ช่วงที่เป็นของแข็ง (°C)	ช่วงที่เป็นของเหลว (°C)	ความเป็นพิษ	ราคา	ความเหมาะสมที่จะใช้
Ag	10	221	221-300	-	สูง	ปานกลาง
Cu	3	227	227-320	-	ต่ำ	สูง
Sb	5	232-236	236-240	-	ปานกลาง	เหมาะสม

1.2.3 สมบัติของธาตุเจือชนิดต่างๆ

- เงิน (Ag) เป็นโลหะที่ใช้เป็นส่วนผสมในโลหะบัดกรี มีราคาสูง โลหะเงินช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะบัดกรี ทำให้สมบัติการแพร่กระจายดีขึ้น และมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำลง

- อินเดียม (In) เป็นโลหะที่มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับธาตุเจือชนิดอื่นๆ โลหะบัดกรีที่มีอินเดียมผสมจะมีราคาแพง แต่มีข้อดีคือ อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ตัวอย่างเช่น อินเดียมที่เติมลงในโลหะบัดกรีชนิด Sn-Zn สามารถช่วยลดอุณหภูมิหลอมเหลวลง ระยะห่างระหว่างเส้นของแข็งและของเหลวกว้างขึ้น จึงเป็นข้อดีสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์ที่ทนความร้อนได้ต่ำ และยังสามารถในการลดการเกิดออกซิเดชันและเพิ่มสมบัติความเหนียวให้ดีขึ้น

- บิสมัท (Bi) โลหะดีบุกผสมบิสมัทที่อัตราส่วน 42Sn-58Bi มีโครงสร้างแบบยูเทคติก โลหะบัดกรีในกลุ่มนี้มีจุดเด่นคือ มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำมากคือ 139°C จึงเป็นข้อดี คือสามารถใช้งานกับอุปกรณ์ที่ไม่สามารถทนความร้อนในการบัดกรีสูงๆได้ ลักษณะโครงสร้างของโลหะบัดกรีชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นแบบ lamellar มีความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดีมาก แต่มีข้อเสียคือบิสมัทมีราคาสูง

- พลวง (Sb) การเติมพลวงในปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยเพิ่มสมบัติการต้านการคืบและการต้านความล้าของโลหะบัดกรีให้ดีขึ้น แต่พลวงมีข้อเสียคือ ทำให้สมบัติการเปียกและการแพร่กระจายของโลหะบัดกรีน้อยลง

- ทองแดง (Cu) เมื่อผสมดีบุกกับทองแดงในอัตราส่วน 99.3Sn-0.7Cu จะทำให้เกิดโครงสร้างยูเทคติก มีจุดหลอมเหลวที่ 227°C โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส Cu_6Sn_5 ลักษณะเป็นแท่งฝังอยู่ในเนื้อดีบุก ทองแดงจะทำให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ข้อเสียของโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Cu คือการมีธาตุเจือผสมอยู่น้อยจึงอาจเกิดเส้นใยดีบุกขึ้นได้ซึ่งเป็นปัญหาทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร

- สังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่มีจุดเด่นด้านอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำและราคาถูก โลหะบัดกรีชนิดดีบุก-สังกะสีที่จุดยูเทคติก (Sn-9wt.%Zn) มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 199°C ซึ่งใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb) ที่จุดยูเทคติก (183°C) Sn-9wt.%Zn ประกอบด้วย เฟส 2 เฟสคือ เนื้อพื้นดีบุก และ hexagonal Zn ซึ่งรวมตัวกับดีบุกอยู่ในลักษณะสารละลายของแข็งที่ดีบุกน้อยกว่า 1% ของโครงสร้างจุลภาคของ Sn-Zn จะมีลักษณะเป็นแผ่นบางสลับกันระหว่างเฟส Sn กับ Zn ซึ่งทั้งดีบุกและสังกะสีต่างก็สามารถทำปฏิกิริยากับ substrate ที่เป็นทองแดงได้ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Zn มีข้อดีอย่างประการเช่น Zn สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย เกิดเป็นสังกะสีออกไซด์มาก เมื่อใช้งานในกระบวนการบัดกรีแบบ wave soldering นอกจากนี้แล้ว Zn ยังไวต่อปฏิกิริยากับสารเคมีที่ผสมอยู่ในฟลักซ์ที่ใช้กับโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Pb ทำให้เกิดการกัดกร่อน

1.2.4 โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder)

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีการพัฒนาในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา เพื่อทดแทนโลหะบัดกรีชนิดที่มีส่วนผสมของตะกั่ว สามารถที่จะแบ่งกลุ่มตามช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวได้ 3 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 1.4, 1.5 และ 1.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 1.4 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่า 180°C (Lee, 2005)

ระบบโลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt. %)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)
Sn-Bi	Sn-58Bi	138
Sn-In	Sn-52In	118
Sn-In	Sn-50In	118-125
Bi-In	Bi-33In	109

ตารางที่ 1.5 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180°C ถึง 200°C (Lee, 2005)

ระบบโลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt. %)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)
Sn-Zn	Sn-9Zn	198
Sn-Zn-Bi	Sn-8Zn-3Bi	188-189
Sn-Bi-In	Sn-20Bi-10In	143-193

ตารางที่ 1.6 กลุ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 200°C ถึง 230°C
(Lee, 2005)

ระบบโลหะผสม	ส่วนประกอบ (wt. %)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
Sn-Ag	Sn-3.5Ag	221
Sn-Ag	Sn-2Ag	221-226
Sn-Cu	Sn-0.7Cu	227
Sn-Ag-Bi	Sn-3.5Ag-3Bi	206-213
Sn-Ag-Bi	Sn-2Ag-7.5Bi	207-212
Sn-Ag-Cu	Sn-3.8Ag-0.7Cu	217
Sn-Ag-Cu-Sb	Sn-2Ag-0.8Cu-0.5Sb	216-222

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมาก บางชนิดถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ บ้างแล้ว และมีอีกจำนวนมากที่มีเพียงการศึกษาวิจัยเท่านั้น

1.3 การหลอมโลหะเพื่อใช้ในการผลิตผงโลหะ

ในอุตสาหกรรมโลหะผงนั้น กระบวนการหลอมโลหะเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งในปัจจุบันการหลอมโลหะจะนิยมใช้เตาหลอมโลหะ 2 ประเภทคือ เตาครุชีเบิล (crucible furnace) และเตาอินดักชัน (induction furnace)

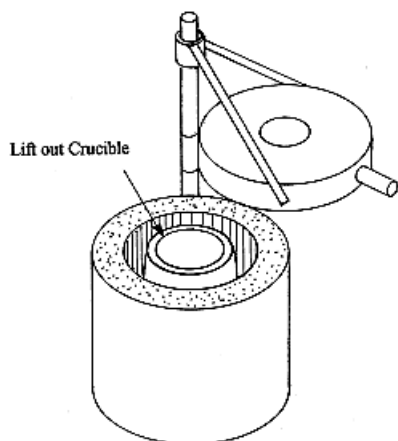
1.3.1 เตาครุชีเบิล และชนิดของเตาครุชีเบิล

เตาหลอมแบบนี้มีความโตและความสามารถในการหลอมแต่ละครั้งได้ตามขนาดของเบ้า ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้ คือ

- แบบที่ใช้ตักน้ำโลหะออก (bail - out) เตาชนิดนี้เหมาะสำหรับการหล่อโลหะที่มีจุดหลอมเหลวไม่สูงมากนัก เช่น อะลูมิเนียมผสม จะใช้เชื้อเพลิงเป็นน้ำมันหรือไฟฟ้าก็ได้ ซึ่งถ้าเป็นการใช้ไฟฟ้า ก็เป็นระบบเดียวกับการใช้ไฟฟ้าในการต้มน้ำ เนื่องจากใช้เบ้าหลอมที่เป็นเหล็ก อาจจะเป็นเหล็กเหนียวหรือเหล็กหล่อก็ได้ และเตาชนิดนี้จะติดอยู่กับที่ การเอาน้ำโลหะออกจะใช้วิธีการตักเอาไปเท มีความเหมาะสมกับการหล่อประเภทที่น้ำโลหะไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติมากนัก เบ้าที่ใช้ในการหลอมมักจะใช้วัสดุทนไฟภายในเบ้า

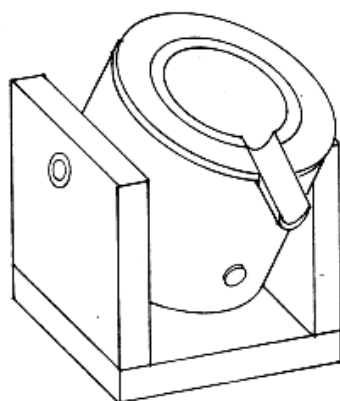
- แบบยกเบ้าออก (lift - out crucible) เตาชนิดนี้ต่างกับเตาชนิดแรก คือ เบ้าหลอมสามารถยกออกได้โดยใช้เครื่องทุ่นแรง ซึ่งเบ้าหลอมจะมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ขึ้นอยู่กับขนาดของ

เตา มีฝาด้านบนเปิดปิดได้เพื่อให้สามารถยกเบ้าออกได้ และเบ้าหลอมทำด้วยแกรไฟต์ ใช้น้ำมัน และก๊าซเป็นเชื้อเพลิง เหมาะสมกับการหล่อทั้งอลูมิเนียมผสม และทองแดงผสม เนื่องจากสามารถ เปลี่ยนเบ้าหลอมได้ง่าย การหลอมโลหะที่มีส่วนผสมต่างๆกันจึงทำได้ดี โดยสับเปลี่ยนเบ้าหลอม ได้ง่าย



รูปที่ 1.1 เตาแบบยกเบ้าออก (lift-out crucible furnace) (Chastain, 2002)

- แบบเททั้งเบ้า (tilting crucible) เตาชนิดนี้มีการทำงานโดยเมื่อหลอมโลหะ ละลายแล้ว สามารถเทน้ำโลหะออกจากเบ้าได้ เหมาะในการหลอมทองแดงผสม ใช้เบ้าซึ่งทำด้วย แกรไฟต์ ใช้น้ำมันและก๊าซเป็นเชื้อเพลิงโดยส่วนมากเป็นเตาขนาดที่ใช้หลอมโลหะตั้งแต่ 150 – 1,000 กิโลกรัมต่อครั้ง และเบ้าด้านบนจะโผล่พ้นผิวหน้าขึ้นมาเล็กน้อย



รูปที่ 1.2 เตาแบบเททั้งเบ้า (tilting crucible furnace) (Chastain, 2002)

- แบบ immersion crucible เตาแบบนี้มีลักษณะพิเศษคือ การให้ความร้อนจากภายในเบ้า ความร้อนจะกระจายออกรอบๆ เบ้าซึ่งมีโลหะอยู่ด้านหนึ่งจะเป็นที่เดิมโลหะ อีกด้านหนึ่งจะเป็นที่ตักน้ำโลหะออก ใช้น้ำมัน และก๊าซเป็นเชื้อเพลิง เหมาะกับการใช้หลอมอะลูมิเนียม ใช้เบ้าหลอมที่ทำจากเหล็ก เตาชนิดนี้สามารถหลอมติดต่อกันได้ และมีข้อดีคือ ประหยัดเชื้อเพลิง และเบ้าใช้งานได้คงทน

1.3.2 เตาอินดักชัน (Induction furnace)

ในการหลอมโลหะชนิดต่างๆให้มีคุณภาพดีนั้นนิยมใช้เตาอินดักชัน เพราะสามารถหลอมโลหะได้อย่างรวดเร็ว ทำงานได้สะดวกสบาย การควบคุมน้ำโลหะ และส่วนผสมก็สามารถทำได้ง่าย ไม่สกปรกในบริเวณพื้นที่ที่ปฏิบัติงาน และมีเสียงเงียบ ซึ่งเตาอินดักชันจะมีทั้งความถี่สูงและความถี่ต่ำ แบบที่มีความถี่ต่ำเหมาะสมและสะดวกในการทำงานมากกว่าแบบที่มีความถี่สูง เพราะสามารถเริ่มทำงานได้ถึงแม้จะมีน้ำโลหะที่แข็งตัวติดอยู่กับเบ้าก็ตาม เตาอินดักชันเหมาะสมกับการหล่อโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงๆ เบ้าที่ใช้ในการหลอมมีทั้งพวกแกรไฟต์ พวกวัสดุทนไฟต่างๆ และเบ้าทำด้วยเหล็กหล่อ เป็นต้น แต่ปัจจุบันนิยมใช้เบ้าที่ทำด้วยวัสดุทนไฟมากกว่าเบ้าที่ทำจากเหล็กหล่อ เพราะเบ้าที่ทำจากเหล็กหล่อบางครั้งอาจทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะทำให้มีจำนวนของธาตุคาร์บอนผสมกับน้ำโลหะ จึงส่งผลทำให้คุณภาพของน้ำโลหะเปลี่ยนไป ส่วนเบ้าที่ทำด้วยแกรไฟต์จะมีข้อเสียตรงที่แตกร้าวได้ง่าย เวลาเคลื่อนย้ายจึงต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างมาก และในการเก็บรักษาเบ้าหลอมนั้น ควรเก็บไว้ในที่อากาศไม่ชื้น และก่อนใช้เบ้าหลอมทุกครั้งควรทำการอุ่นเบ้าให้ร้อนเพื่อทำการไล่ความชื้นก่อนที่จะทำการหลอมโลหะต่อไป



รูปที่ 1.3 เตาอินดักชัน (Yamuna, 2007)

1.4 คลื่น (Wave)

คลื่นเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการรบกวนตัวกลาง พลังงานจากการรบกวนจะถูกถ่ายโอนให้กับอนุภาคตัวกลางอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดคลื่นกลแผ่ออกไป โดยอนุภาคตัวกลางไม่ได้เคลื่อนที่ไปกับคลื่น แต่มีการสั่นรอบตำแหน่งสมดุล ถ้าแอมพลิจูดของการสั่นคงตัวอนุภาคตัวกลางจะมีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

1. แบ่งตามการใช้ตัวกลางจะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

- คลื่นกล (mechanical wave) เป็นคลื่นที่อาศัยตัวกลางในการถ่ายเทพลังงาน เช่น คลื่นผิวน้ำ คลื่นในเส้นเชือก และคลื่นเสียง ฯลฯ

- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) เป็นคลื่นที่ไม่อาศัยตัวกลางในการถ่ายเทพลังงาน แต่อาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า เช่น คลื่นแสง ไมโครเวฟ คลื่นวิทยุ คลื่นความร้อน ฯลฯ

2. แบ่งตามการสั่นของอนุภาคตัวกลาง หรือแหล่งกำเนิด จะแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

- คลื่นตามยาว หมายถึงคลื่นที่มีการสั่นของอนุภาคตัวกลางอยู่ในแนวขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น เช่น คลื่นเสียง คลื่นที่เกิดจากการอัดและขยายตัวในขวดควดสปริง

- คลื่นตามขวาง หมายถึงคลื่นที่มีการสั่นของอนุภาคตัวกลางในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น เช่น คลื่นในเส้นเชือก คลื่นน้ำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1.4.1 คลื่นกล (Mechanical wave)

คลื่นกลเป็นคลื่นที่แผ่กระจายไปโดยอาศัยตัวกลางที่ยืดหยุ่น เช่น คลื่นเสียงซึ่งเป็นคลื่นตามยาวเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่อาจเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ช่วงคลื่นที่หูมนุษย์ปกติจะรับฟังได้จะอยู่ระหว่าง 20-20,000 Hz คลื่นตามยาวที่มีความถี่น้อยกว่านี้ เรียกว่า คลื่นใต้เสียง (infrasonic waves) และคลื่นที่มีความถี่มากกว่าช่วงนี้เรียกว่า คลื่นเหนือเสียง (ultrasonic waves) ซึ่งโดยทั่วไปอัตราเร็วของคลื่นกลในตัวกลางมีรูปแบบเป็น

$$v = \sqrt{\frac{\text{มอดูลัสความยืดหยุ่น}}{\text{ความหนาแน่น}}}$$

ในกรณีของคลื่นตามยาวเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือของแข็ง อัตราเร็วของคลื่นคือ

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (1.1)$$

เมื่อ Y คือ บัลค์โมดูลัสของของแข็ง
 ρ คือ ความหนาแน่นของของแข็ง

คลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ในก๊าซหรือของเหลว มีอัตราเร็วเฟสเท่ากับ

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (1.2)$$

เมื่อ B คือ บัลค์โมดูลัสของก๊าซหรือของเหลว
 ρ คือ ความหนาแน่นของก๊าซหรือของเหลว

สำหรับคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ในอากาศ มีอัตราเร็วเฟสเท่ากับ

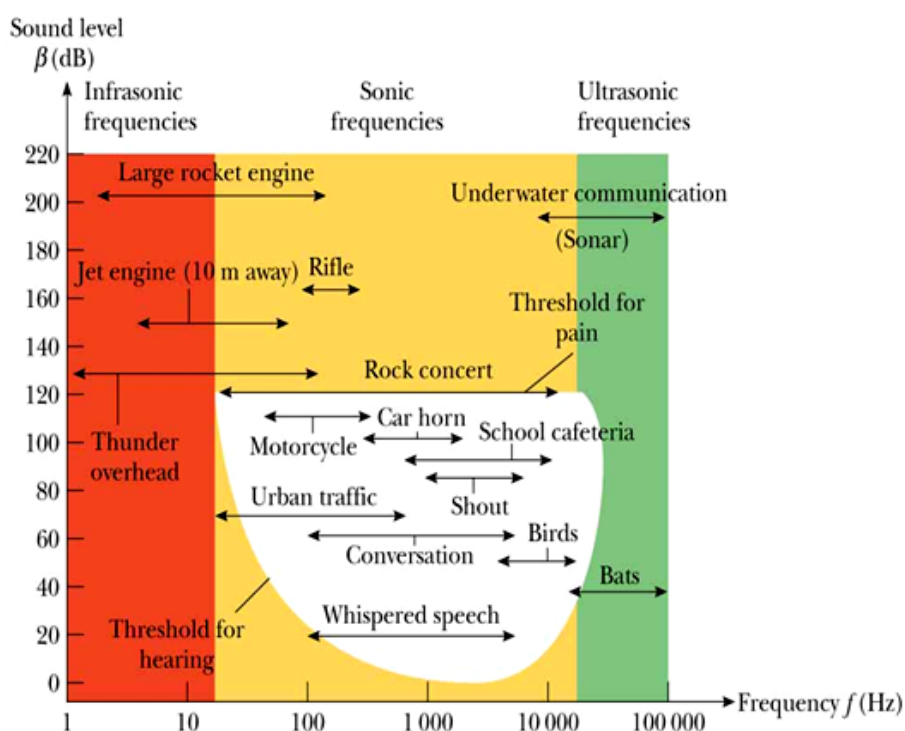
$$v(T) = 331.45 + 0.61T(C^\circ) \quad \text{unit (m/s)} \quad (1.3)$$

ตารางที่ 1.7 แสดงตัวอย่างอัตราเร็วของเสียงในตัวกลางต่าง ๆ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Hodus, 2010)

ตัวกลาง	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	อัตราเร็ว (m/s)
ออกซิเจน	0	317.2
อากาศ	0	331.3
ไฮโดรเจน	0	1286
ฮีเลียม	20	1005
น้ำ	15	1450
น้ำทะเล	20	1560
ตะกั่ว	20	2130
ทองแดง	20	3560
อลูมิเนียม	20	5100
เหล็ก	20	5130

เนื่องจากมนุษย์สามารถได้ยินเสียงที่มีความถี่ระหว่าง 20-20,000 Hertz ถ้าหากความถี่ต่ำหรือสูงกว่านี้ ก็ไม่สามารถได้ยินได้ อย่างไรก็ตามในช่วงความถี่ที่มนุษย์สามารถรับฟังได้ขึ้นอยู่กับความดังของเสียงด้วย เสียงจะต้องมีแอมพลิจูดมากพอที่จะกระตุ้นการได้ยินของหู

รูปที่ 1.4 แกน y แทนระดับความเข้มเสียง และ แกน x แทนความถี่ บริเวณสีขาวแทนบริเวณที่มนุษย์สามารถรับฟังได้ คลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่า 20 Hz (infrasonic frequencies) เรียกว่า คลื่นใต้เสียง (infrasonic frequencies) คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20,000 Hz (ultrasonic frequencies) เรียกว่า คลื่นเหนือเสียง (ultrasonic frequencies)



รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มเสียงกับความถี่ที่ระดับต่างๆ (Hodus, 2010)

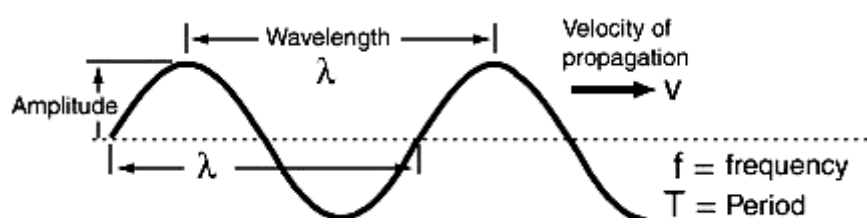
1.4.2 องค์ประกอบพื้นฐานของคลื่น

1. ความยาวคลื่น (wave length) หมายถึง ความยาวของคลื่น 1 คลื่น เป็นระยะทางที่วัดระหว่างจุดสองจุดที่สั้นที่สุดบนคลื่นที่เฟสตรงกัน ในระบบ SI มีหน่วยเป็นเมตร (m)
2. ความถี่ (frequency) หมายถึง จำนวนคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านจุดใด ๆ ในหนึ่งหน่วยเวลาในระบบ SI มีหน่วยเป็น วินาที⁻¹ (s⁻¹) หรือ เฮิรตซ์ (Hz)
3. คาบการเคลื่อนที่ (period) หมายถึง เวลาที่คลื่น 1 คลื่น เคลื่อนที่ผ่านจุดใด ๆ ในระบบ SI มีหน่วยเป็นวินาที (s)
4. อัตราเร็วของคลื่น (speed) หมายถึง ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา และเนื่องจากขณะทีคลื่นเคลื่อนที่ไปด้วย อัตราเร็วค่าหนึ่ง เฟสของคลื่นก็เคลื่อนที่ไปด้วย

อัตราเร็วเท่ากัน ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกว่า อัตราเร็วเฟส (phase speed) ของคลื่น ในระบบ SI มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (ms^{-1})

5. มุมเฟส (phases angle) หมายถึง มุมที่ใช้กำหนดตำแหน่งบนคลื่นขณะที่เคลื่อนที่ โดยมีความสัมพันธ์กับการกระจัดของการเคลื่อนที่ของคลื่น ในระบบ SI มีหน่วยเป็นเรเดียน (Radian; rad)

6. แอมพลิจูด (amplitude) หมายถึง การกระจัดสูงสุดของการสั่นของอนุภาคจากระดับปกติ ค่าของแอมพลิจูดจะบอกค่าพลังงานของคลื่น โดยพลังงานจะแปรโดยตรงกับแอมพลิจูด ในระบบ SI มีหน่วยเป็นเมตร (m)



รูปที่ 1.5 องค์ประกอบพื้นฐานของคลื่น (Phumsakha, 2007)

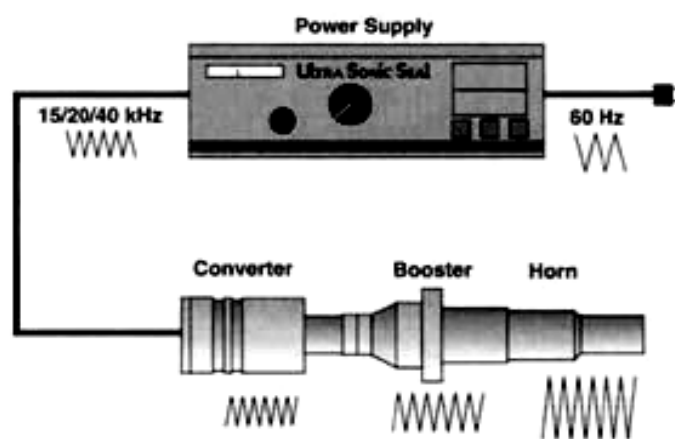
1.4.3 อัลตราโซนิก (Ultrasonic)

เครื่องอัลตราโซนิกสามารถแปลงพลังงานในรูปอื่นให้มาเป็นพลังงานทางกลโดยการสั่นไปมา ซึ่งทำให้เกิดคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิก กระจายไปในอากาศได้หรือแปลงพลังงานทางกลให้มาเป็นพลังงานในรูปอื่นได้นั้น มีชื่อเรียกว่า อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (ultrasonic transducer) ซึ่งอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับหลักการที่ใช้ แบบที่นิยมใช้กันมากได้แก่ แบบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานทางกล เครื่องอัลตราโซนิกจะประกอบด้วย 4 ส่วนหลักๆดังนี้

1. Ultrasonic power supply (generator) ทำหน้าที่ให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้า
2. Converter (transducer) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล
3. Booster (optional) ทำหน้าที่เพิ่มแอมพลิจูด หรือขยายสัญญาณของแอมพลิจูด
4. Probe (horn) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางส่งผ่านคลื่นความถี่ไปยังของเหลว

อัลตราโซนิกเพาเวอร์ซัพพลาย (ultrasonic power supply) เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าแก่เพียโซอิเล็กทริกที่อยู่ภายในคอนเวอร์เตอร์ (converter) จะทำให้เกิดกลไกการสั่นของแอมพลิจูด

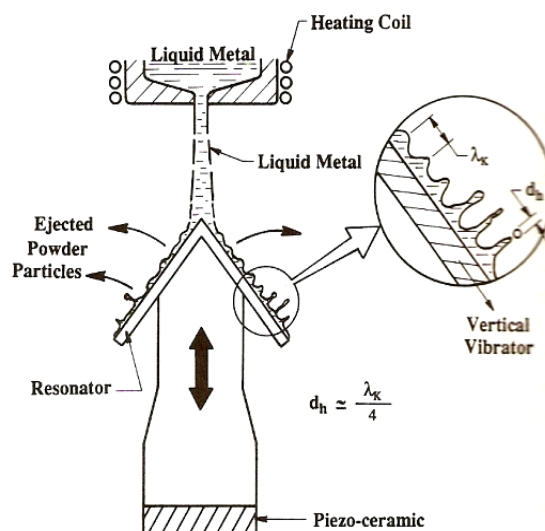
เกิดขึ้นในแนวตามยาวของคอนเวอร์เตอร์ (converter) หัวโพรบ (probe) และส่งผ่านไปยังตัวกลางที่เป็นของเหลว ซึ่งคลื่นอัลตราโซนิกจะประกอบด้วยการอัด และขยายสลับกันไป



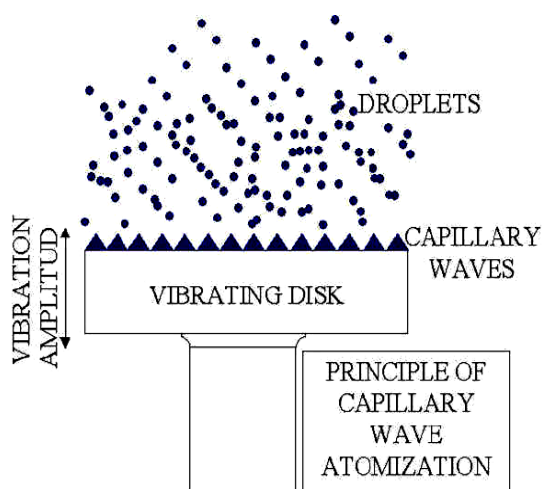
รูปที่ 1.6 ส่วนประกอบของเครื่องอัลตราโซนิก (Wayne Associates & Son Inc., 2006)

1.5 กลไกการแตกตัวของน้ำโลหะหลอมเหลวด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน

กระบวนการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน เป็นเทคนิคในหนึ่งกระบวนการผลิตผงโลหะซึ่งกระบวนการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันจะอาศัยการสั่นของอัลตราโซนิก (vibration) เพื่อทำให้เกิดเป็นผงโลหะขึ้นมาโดยอาศัยหลักการเกิดคลื่นเล็ก ๆ (capillary wave) บนพื้นผิว ซึ่งเริ่มต้นเมื่อมีชั้นของเหลวที่เป็นฟิล์มบางอยู่บนหัวโพรบของอัลตราโซนิก ก็จะให้เกิดการสั่นของของเหลวเกิดขึ้น ซึ่งการสั่นนี้จะทำให้ที่ผิวของเหลวเกิดเป็นคลื่นเล็ก ๆ ขึ้นมา ซึ่งปรากฏการณ์สั่นนี้เกิดจากการการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูด (amplitude) ที่มากกว่าจุดเริ่มต้น เมื่อแอมพลิจูดเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้คลื่นเล็ก ๆ (capillary wave) สูงขึ้นจนเกิดเป็นยอดคลื่นขึ้นมาซึ่งยอดคลื่นนั้นจะเริ่มฟอร์มตัวเป็นหยดขึ้น และเมื่อสามารถที่จะเอาชนะแรงตึงผิวบริเวณนั้นได้ก็จะทำให้เกิดเป็นหยดเล็กๆ หลุดออกมาดังแสดงในรูปที่ 1.7 และรูปที่ 1.8 ตามลำดับ



รูปที่ 1.7 กลไกการแตกตัวของน้ำโลหะหลอมเหลวด้วยวิธีการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน (Bose, 1995)



รูปที่ 1.8 ลักษณะการฟอร์มตัวของหยดน้ำโลหะจากคลื่นขนาดเล็ก (TPS Inc., 2010)

การอะตอมไมเซชันด้วยวิธีการอัลตราโซนิกนั้นสามารถที่จะควบคุมขนาดของผงที่ผลิตได้ และขนาดการกระจายตัวของผงจะอยู่ในช่วงที่แคบกว่าการอะตอมไมเซชันด้วยเทคนิคอื่นๆ ซึ่งขนาดของผงเฉลี่ยที่ได้จากกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรดังต่อไปนี้

- ความถี่ที่ใช้ในกระบวนการอะตอมไมเซอร์
- อัตราการไหลของน้ำโลหะหลอมเหลว
- อุณหภูมิซูเปอร์ฮีทของน้ำโลหะหลอมเหลว

จากสมมูลความตึงผิวและความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นของอะตอมไมเซอร์นั้นทำให้ได้สมการสำหรับประมาณขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ (D_p) ดังต่อไปนี้

$$D_p = 0.34 \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (1.4)$$

โดยที่	D_p	คือ ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะ (μm)
	σ	คือ ความตึงผิว (N/m)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)
	f	คือ ความถี่ (Hz)

กระบวนการอัลตราโซนิคอะตอมไมเซอร์เป็นกระบวนการผลิตที่ให้ประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะกับโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวไม่สูงมากนัก เช่น กลุ่มโลหะบัดกรี (solder) ซึ่งโลหะกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยตัวหลักๆคือ Sn-Ag-Cu เป็นต้น เนื่องจากว่าเครื่องอัลตราโซนิคจะมีข้อจำกัดเกี่ยวกับช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานซึ่งปกติแล้วจะใช้งานอยู่ในช่วงไม่เกิน $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพราะถ้าเกิดว่าอุณหภูมิเกินช่วงนี้ไปจะส่งผลทำให้ตัวทรานสดิวเซอร์ที่อยู่ในเครื่องอัลตราโซนิคเสื่อมสภาพ และทำให้อายุการใช้งานสั้นลง นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดอีกอย่างหนึ่งคือ หัวโพรบของอัลตราโซนิคเมื่อใช้งานในสถานะที่น้ำโลหะมีจุดหลอมเหลวสูงหลายๆครั้ง จะทำให้หัวโพรบของอัลตราโซนิคเกิดการสึกหรอขึ้น จึงต้องมีการเปลี่ยนหัว โพรบใหม่ซึ่งจะส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนที่สูงขึ้นด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้กระบวนการอัลตราโซนิคอะตอมไมเซอร์เหมาะสมที่จะใช้ผลิตผงโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำๆมากกว่านั่นเอง

1.6 กระบวนการคัดแยกขนาดอนุภาค (Screening process)

การวิเคราะห์ขนาดหรือคัดขนาดของอนุภาคของแข็งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยกรร่อน (Sieve) โดยเริ่มจากการวางตะแกรงร่อนซ้อนกันเป็นชั้นๆ โดยเรียงขนาดช่องของตะแกรงที่ใหญ่ไว้ด้านบน และขนาดลดลงจากบนลงล่างตามลำดับ ตะแกรงเหล่านี้อาจติดอยู่กับที่หรือเคลื่อนไหวได้ ช่องบนตะแกรงเกิดจากการนำขนาดต่าง ๆ กัน มาสานเป็นช่อง และบอกความกว้างของช่องตะแกรงเป็นเมช (mesh) ซึ่งหมายถึงจำนวนช่องของตะแกรงที่มีอยู่ในความยาว 1 นิ้ว

เช่น ตะแกรงขนาด 10 เมช (mesh) ในความยาว 1 นิ้ว จะมีช่องอยู่ 10 ช่อง และช่องหนึ่งจะมีความยาวกว้าง 0.1 นิ้ว หักออกด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด ซึ่งตะแกรงมาตรฐานที่นิยมใช้ได้แก่ ตะแกรงแบบอังกฤษ (british standard) ตะแกรงแบบไทเลอร์ (tyler standard) และตะแกรงแบบอเมริกัน (ASTM) เป็นต้น โดยในเมช (mesh) เบอร์เดียวกันของตะแกรงมาตรฐานแต่ละแบบ อาจจะมีขนาดของช่อง (aperture size) ที่ต่างกันก็ได้ ตัวอย่างเช่น ตะแกรงขนาดเมช (mesh) 100 แบบไทเลอร์มีขนาดช่อง 0.147 มม. แบบอังกฤษมีขนาดช่อง 0.152 มม. และแบบอเมริกันมีขนาดช่อง 0.149 มม. ดังนั้นในตะแกรงมาตรฐานทุกแบบจะต้องแสดงรายละเอียดทั้งขนาดเมช (mesh) และขนาดช่องในแผ่นป้ายด้านข้างตะแกรง การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคสามารถที่จะทำได้ 2 วิธี คือ การวิเคราะห์แบบแห้ง (dry) และการวิเคราะห์แบบใช้น้ำช่วย (wet) ซึ่งวิธีหลังนี้จะเติมน้ำลงไปเพื่อช่วยให้ของแข็งที่มีขนาดเล็กลอดผ่านช่องตะแกรงได้ดีกว่าแบบแห้ง ของแข็งที่มีขนาดใหญ่เกินขนาด (oversize) จะค้างอยู่บนตะแกรง ส่วนของแข็งที่เล็กเกินขนาด (undersize) จะลอดผ่านช่องตะแกรงไปได้ การใช้เครื่องมือช่วยให้ตะแกรงเคลื่อนไหวหรือสั่น จะช่วยให้การร่อนมีประสิทธิภาพดีขึ้น นอกจากนั้นเทคนิคทางตะแกรงร่อนนี้จะมีปัจจัยหลายอย่างที่สามารถส่งผลกระทบต่อความสามารถของอนุภาคในการลอดผ่านช่องของตะแกรง เช่น การกระจายขนาดอนุภาคของผง ปริมาณของผงทดสอบบนตะแกรง สมบัติทางกายภาพของอนุภาค (พื้นผิว) กรรมวิธีการสั่นตะแกรง รูปร่างและลักษณะของอนุภาค รูปทรงทางเรขาคณิตของผิวหน้าตะแกรง เป็นต้น ซึ่งขนาดมาตรฐานของตะแกรงร่อนที่นิยมใช้ในปัจจุบันนี้สามารถแบ่งได้ดังตารางที่ 1.8

ตารางที่ 1.8 แสดงขนาดมาตรฐานของตะแกรงร่อน (German, 1994)

ขนาดช่องตะแกรง (mesh size)	ขนาดรูเปิด (μm) (Opening)	ขนาดช่องตะแกรง (mesh size)	ขนาดรูเปิด (μm) (Opening)
18	1000	100	150
20	850	120	125
25	710	140	106
30	600	170	90
35	500	200	75
40	425	230	63
45	355	270	53
50	300	325	45
60	250	400	38

ตารางที่ 1.8 (ต่อ)

ขนาดช่องตะแกรง (mesh size)	ขนาดรูเปิด (μm) (Opening)	ขนาดช่องตะแกรง (mesh size)	ขนาดรูเปิด (μm) (Opening)
70	212	450	32
80	180	500	25
-	-	600	20

นอกจากนี้วัสดุผงที่ได้ภายหลังจากผ่านตะแกรงร่อน สามารถที่จะจำแนกตามมาตรฐานของขนาดอนุภาคได้ดังตารางที่ 1.9

ตารางที่ 1.9 แสดงมาตรฐานการจำแนกขนาดอนุภาคของผงโลหะ (AMTECH Inc., 2000)

Powder Type	Less than 1% larger than	At least 95% Between	5% maximum less than
Type 2	75 microns	75-45 microns	45 microns
Type 2A	53 microns	53-38 microns	38 microns
Type 3	45 microns	45-25 microns	25 microns
Type 4	38 microns	38-25 microns	25 microns
Type 5	32 microns	25-15 microns	15 microns
Type 6	25 microns	20-10 microns	10 microns

หลังจากที่ทำการร่อนคัดแยกขนาดของอนุภาค ของแข็งแต่ละขนาดที่ค้างบนแต่ละตะแกรงจะถูกนำมาชั่งน้ำหนักและบันทึกผลดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1.10

ตารางที่ 1.10 ผลจากการวิเคราะห์ห้ขนาดอนุภาค (Results from sieve analysis)

(1) Sieve size Range (μm)	Sieve fractions		(4) Nominal Aperture size (μm)	(5) Cumulative % undersize	(6) Cumulative % oversize
	wt ⁽²⁾ (g)	% ⁽³⁾ wt			
+ 250	0.02	0.1	250	99.9	0.1
- 250 + 180	1.32	2.9	180	97.0	3.0
- 180 + 125	4.23	9.5	125	87.0	12.5
-180 + 90	9.44	21.2	90	66.3	33.7
- 90 + 63	13.10	29.4	63	36.9	63.1
- 63 + 45	11.56	26.0	45	10.9	89.1
- 45	4.87	10.9	-	-	-

หมายเหตุ : ความหมายของช่อง 1- 6 ในตารางมีดังต่อไปนี้

1. แสดงช่วงขนาดตะแกรงที่ใช้ เช่น - 250 + 180 ไมครอน หมายถึงช่วงที่มีขนาดเล็กกว่า 250 ไมครอน แต่ใหญ่กว่า 180 ไมครอน และ - 45 ไมครอน หมายถึงช่วงที่มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน เป็นต้น

2. น้ำหนักสารในแต่ละตะแกรง เช่น 1.32 กรัมของสารที่ลอดผ่านตะแกรง 250 ไมครอน แต่ค้างบนตะแกรง 180 ไมครอน ดังนั้น สารจึงมีขนาดอยู่ในช่วง - 250 + 180 ไมครอน

3. น้ำหนักของสารในแต่ละช่วงขนาดโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักทั้งหมด

4. ขนาดช่อง (aperture size) ของตะแกรง

5. เปอร์เซนต์สะสมของสารที่ลอดผ่านตะแกรง หรือ cumulative undersize เช่น 87.5 % ของสารมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 125 ไมครอน ดังนั้น ขนาด 125 ไมครอน เรียกว่า 87.5 % passing size

6. เปอร์เซนต์สะสมของสารที่ค้าง (retained) บนตะแกรง หรือ cumulative oversize การรายงานผลจาก sieve analysis มีหลายวิธีแต่ที่ใช้มากที่สุดคือการพล็อตระหว่าง cumulative undersize (หรือ over size) กับขนาดอนุภาคหรือขนาดช่อง (aperture size) ซึ่งเรียกว่า cumulative analysis แต่ถ้าเป็นการพล็อตระหว่างสัดส่วนน้ำหนัก (weight retained) กับขนาดอนุภาคหรือขนาดช่อง (aperture size) จะเรียกว่า differential analysis การพล็อตอาจทำในกระดาษกราฟธรรมดา หรือกระดาษกราฟแบบ semi-log ก็สามารทำได้

1.7 Circularity shape factors

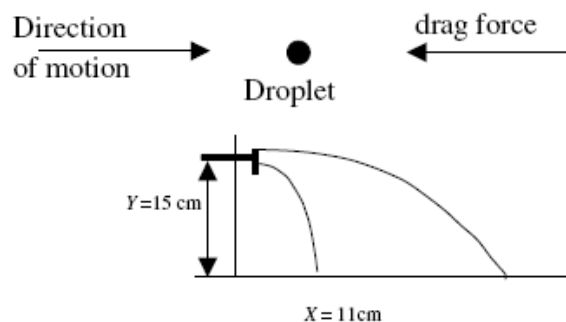
ค่า circularity shape factors เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย ที่บ่งบอกถึงลักษณะรูปร่างของทรงกลมโดยทั่วไปจะมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จาก การวัดขนาด เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, ความยาว, พื้นที่ และเส้นรอบวง (perimeter) ของโครงสร้างต่างๆ เช่น ขนาดของเกรนในโครงสร้างทางโลหะวิทยา หรือโครงสร้างของเซรามิกส์ ซึ่งสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (Yule and Dunkley 1994)

$$\phi = \frac{P^2}{4\pi A} \quad (1.5)$$

เมื่อ	ϕ	คือ Circularity shape factors
	A	คือ พื้นที่ (m^2)
	P	คือ เส้นรอบวง (m)

1.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Arraru และคณะ ศึกษาถึงความเร็วของหยดของเหลวที่พุ่งออกจากหัวโพรบของอัลตราโซนิค ซึ่งได้ประมาณความเร็วของหยดของเหลวที่เกิดขึ้นเมื่อเริ่มหลุดออกจากปลายโพรบของอัลตราโซนิค และหยดของเหลวจะถูกดันโดยอากาศ ซึ่งสังเกตได้จากการเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ (projectile) ดังรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 การเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ของหยดของเหลวที่หลุดออกจากปลายโพรบ (Arraru et al., 2006)

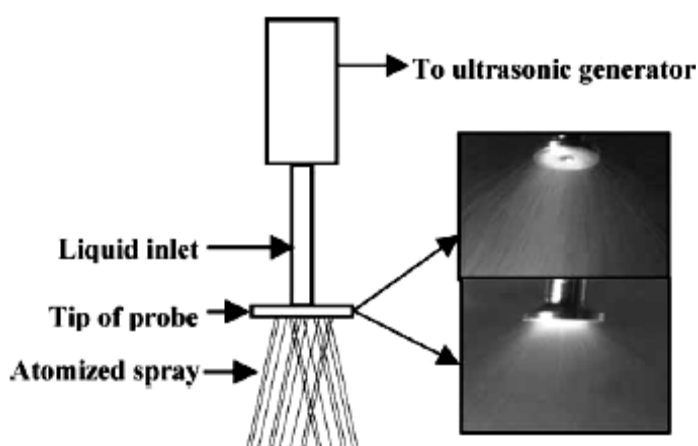
ซึ่ง แรงที่พุ่งออก – แรงต้านอากาศ = net force เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$0 - \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A_P = m \left(\frac{dv}{dt} \right), \text{เมื่อ } a = \left(\frac{dv}{dt} \right)$$

$$F = \left(-\frac{1}{2} \rho v^2 C_D A_P \right) / m \quad (1.6)$$

เมื่อ	v	คือ ความเร็วที่หยดของเหลวกระเด็นออกจากปลายโพรบ (m/s)
	C_D	คือ สัมประสิทธิ์ของแรงดึง (drag coefficient)
	A_P	คือ พื้นที่ของหยดของเหลว (m^2)
	m	คือ มวลของหยดของเหลว (kg)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของหยดของเหลว (kg/m^3)
	F	คือ แรงต้านอากาศ (drag force) (N/m^2)

Arraru ได้แสดงถึงลักษณะของเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 1.10 ซึ่งจะศึกษาใน 2 ช่วงความถี่ คือความถี่ขนาด 20 kHz จะใช้หัวโพรบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.45 เซนติเมตร และความถี่ขนาด 40 kHz จะใช้หัวโพรบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร อัตราการไหลของของเหลวที่ใช้ในการทดลองจะใช้ปั๊มเป็นตัวขับของเหลวให้ไหลผ่านท่อขนาด 2.5 มิลลิเมตร และกำลังที่ใช้ในการอะตอมไมเซชัน 130 วัตต์



รูปที่ 1.10 เครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน (Arraru et al., 2006)

Barreras และคณะ (2002) ศึกษาการใช้คลื่นความถี่สูงในวิธีการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ ซึ่งทดลองโดยการนำน้ำไปวางไว้บนอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์เพียงเล็กน้อย ซึ่ง ทรานสดิวเซอร์จะทำจากแผ่นเพียโซเซรามิก (PZT) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm และหนา 1.3 mm และความถี่เรโซแนนซ์ของแผ่น PZT วัดได้ 1.65 MHz และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้โดยไม่ทำความเสียหายแก่เซรามิก 50 โวลต์ สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่า 15 โวลต์ ไม่ได้ศึกษาในการอะตอมไมเซชัน และได้ศึกษาการกระจายตัวของหยดของเหลวสามารถคำนวณโดย Malvern diffractometer และความเร็วยของหยดของเหลวที่หลุดออกไปวัดโดยใช้ particle image velocimetry (PIV) ซึ่งพบว่า การกระจายตัวของขนาดหยดของเหลว จะอยู่ในช่วง 3-5 ไมครอน แต่ที่แรงดันไฟฟ้าสูงๆ จะทำให้ได้การกระจายตัวของขนาดของหยดอยู่ในช่วงที่กว้างขึ้น 60 ไมครอน

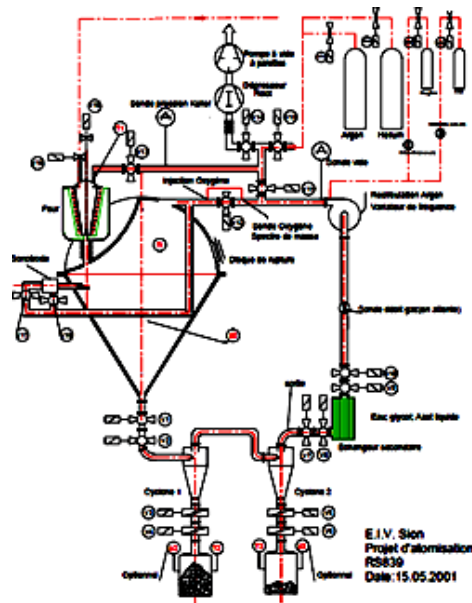
Faraday ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงสมบัติของคลื่นที่ผิวที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของความถี่ ซึ่งเขาได้พบว่า การสั่นในหนึ่งรอบคลื่นบนชั้นของของเหลวบางนั้น จะทำให้เกิดพื้นผิวที่สั่นขึ้นสองครั้งในหนึ่งรอบ (Faraday, 1831) ซึ่งผลที่เขาศึกษานี้ได้รับการยืนยันในภายหลังจากที่ได้มีการตรวจสอบ และการทดลองวิจัยอื่นๆ หลังจากนั้นในปี 1896 Rayleigh ได้อธิบายถึงขนาดของแรงดึงผิวของของเหลวที่เกิดขึ้นจากการก่อรูปคลื่นขนาดเล็กๆ บนพื้นผิวที่มีการสั่น ซึ่งเขาได้พัฒนาสมการเพื่อหาถึงความสัมพันธ์ของความยาวคลื่น ความถี่ของการสั่น และแรงดึงผิวของของเหลว ซึ่งถูกอธิบาย โดย Lang (1962) ในการทำนายขนาดเฉลี่ยของหยดของเหลวที่เกิดขึ้นจากยอดคลื่นขนาดเล็ก ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของเหลว (D_p) และความยาวคลื่น (λ) นี้จะมีค่าประมาณ $D_p = 0.34\lambda$ และในปี 1957, Sorokin ได้ตีพิมพ์งานวิจัยในรูปแบบของการเกิดคลื่นต่อเนื่อง (standing waves) บนผิวของของเหลวเมื่อแอมพลิจูดของการสั่นเพิ่มมากขึ้นกว่าค่าเริ่มต้น และเมื่อแอมพลิจูดของการสั่นเพิ่มมากขึ้นจะเกิดการฟอรัมตัวของหยดเกิดขึ้นที่ยอดคลื่นและจะกระเด็นหลุดออกมา ซึ่งในการศึกษานี้เขาได้ใช้ความถี่ระหว่าง 10- 30 Hz หลังจากนั้นในปี 1959, Eisenmenger ได้ตรวจสอบถึงกลไกที่ทำให้เกิดคลื่นขนาดเล็กๆ (capillary waves) และเงื่อนไขของการเกิดหยด (droplets) ซึ่งเขาได้ใช้ความถี่ในช่วง 10-150 kHz จากงานของ Sorokin's และ งานของ Eisenmenger's พบว่าพื้นผิวของของเหลวจะเกิดคลื่นขนาดเล็กๆ และมีการกระเด็นออกของหยด (droplets) ซึ่งจากผลงานวิจัยของเขาทั้งสองคนทำให้รู้ว่า ค่าที่น้อยที่สุดของแอมพลิจูดที่ทำให้เกิดการสั่นจะมีความจำเป็นสำหรับการเริ่มก่อรูปของหยด สำหรับความถี่ 10-30 Hz การก่อตัวของหยดจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อแอมพลิจูด 7-8 เท่า และที่ความถี่ 10 kHz - 150 kHz การก่อตัวของหยดจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อแอมพลิจูด 4 เท่า

Caccioppoli และคณะ (2002) ศึกษาถึงกระบวนการผลิตผงโลหะด้วยวิธีการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน ซึ่ง Giulio ได้อธิบายหลักการคลื่นเล็กๆ (capillary wave) ของอะตอมไมเซชันซึ่งเกิดจากเมื่อมีชั้นของเหลวที่เป็นฟิล์มบางอยู่บนหัวโพรบของอัลตราโซนิก ก็จะทำให้เกิดการสั่นของของเหลวเกิดขึ้น ซึ่งการสั่นนี้จะทำให้ที่ผิวของเหลวเกิดเป็นคลื่นเล็กๆขึ้นมา ซึ่งปรากฏการณ์การสั่นนี้เกิดจากการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูด (amplitude) ที่มากกว่าจุดเริ่มต้น เมื่อแอมพลิจูดเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้คลื่นเล็กๆ (capillary wave) สูงขึ้นจนเกิดเป็นยอดคลื่นขึ้นมาซึ่งยอดคลื่นนั้นจะเริ่มฟอร์มตัวเป็นหยดขึ้น และเมื่อสามารถที่จะเอาชนะแรงตึงผิวบริเวณนั้นได้ก็จะทำให้เกิดเป็นหยดเล็กๆหลุดออกมา ซึ่งมีสมการที่ใช้อธิบายขนาดของหยดที่เกิดขึ้นจากการเกิดคลื่นเล็กๆ ดังนี้

$$D = k\lambda = k(8\pi\sigma / \rho_l f^2)^{1/3} \quad (1.7)$$

เมื่อ	D	คือ ขนาดของหยด (μm)
	λ	คือ ความยาวคลื่น (m)
	σ	คือ แรงตึงผิวของโลหะเหลว (N/m)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)
	f	คือ ความถี่ของการสั่น (Hz)
	k	คือ ค่าที่ได้จากการทดลองของแต่ละของเหลวและแต่ละช่วงความถี่

เครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันที่ Caccioppoli และคณะได้พัฒนาขึ้นจะมีลักษณะดังรูปที่ 1.11 ซึ่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์อัลตราโซนิกที่มีทรานสดิวเซอร์อยู่ภายนอกถึงอะตอมไมเซชัน เนื่องจากจุดหลอมเหลวของวัสดุที่ใช้ในการอะตอมไมเซชันจะเกินข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการนี้ และจะใช้เตาอินดักชัน (induction furnace) เป็นเตาหลอมโลหะซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่ด้านบนของถังอะตอมไมเซชัน นอกจากนั้นภายในถังอะตอมไมเซชันจะเป็นบรรยากาศอาร์กอนหรือฮีเลียม จึงทำให้หยดน้ำโลหะมีอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 1.11 ลักษณะเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันที่ Caccioppoli และคณะได้พัฒนาขึ้น (Caccioppoli et al., 2002)

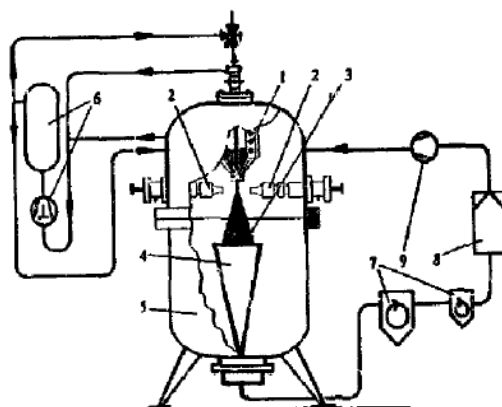
ผลที่ได้จากการอะตอมไมเซอร์ของแมกนีเซียมอัลลอยด์ AZ63 (magnesium alloy) ได้ผงที่กลม (spherical) ขนาดอนุภาคที่ได้ต่ำกว่า 1 ไมครอนทำภายใต้บรรยากาศอาร์กอน (Ar), อุณหภูมิซูเปอร์ฮีท 150 °C และใช้ตัวสั่นสะเทือน (resonator) ทำจากไทเทเนียมอัลลอยด์ (Ti-6Al-4V)

Jungmyoung และคณะ (2008) ศึกษาการเกิดคลื่นอะคูสติกบนผิว (SAW) ของการอะตอมไมเซอร์ที่ความถี่ในช่วง 50 MHz ถึง 95 MHz ปรากฏว่าทำให้ได้เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของหยด (droplets) ที่ได้จากการอะตอมไมเซชันประมาณ 5.7 ไมครอนที่ความถี่ 50 MHz, 4.4 ไมครอนที่ความถี่ 75 MHz และ 2.7 ไมครอนที่ความถี่ 95 MHz ตามลำดับ ซึ่งขนาดของหยดจะมีความสัมพันธ์กับความถี่ที่ใช้ในกระบวนการอะตอมไมเซอร์ ซึ่งเป็นไปตามสมการของ Lang's ตามสมการที่ 1.8 ดังนี้

$$D_p = 0.34 \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (1.8)$$

Bauchage และคณะศึกษากระบวนการทำให้เกิดผงโดยการใช้คลื่นที่ต่อเนื่องของอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน ซึ่งการทดลองจะใช้โซโนโทรด (sonotrodes) 2 ตัว ขนาด 20 kHz

และใช้ของเหลวที่หนืดมากๆ หรือของเหลวที่มีค่าความตึงผิวสูงๆ ซึ่งการทดลองจะทำให้เกิดเป็นหยดเล็กๆ ขึ้น และเมื่อเย็นตัวลงจะกลายเป็นผงที่มีลักษณะกลม ซึ่งเทคนิคชนิดใหม่นี้เป็นส่วนสำคัญสำหรับที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการอะตอมไมเซชันของของเหลวหนืดหรือโลหะหลอมเหลว และจะมีอัตราการแข็งตัวอย่างรวดเร็วสำหรับผงโลหะ (ขนาดอนุภาคของคีนุกที่ได้จากเทคนิคนี้โดยเฉลี่ยน้อยกว่า 10 ไมครอน)



รูปที่ 1.12 แบบของเครื่อง ultrasonic standing wave atomization (USWA) (Bauckhage et al., 1996)

จากรูปที่ 1.12 เครื่อง USWA จะประกอบไปด้วย 1) เบ้าหลอม (crucible), 2) โซโนโทรด (sonotrodes), 3) สเปรย์โคน (spray cone), 4) อุปกรณ์ดูด (suction device), 5) ตัวรับ (recipient), 6) สถานีจ่ายก๊าซ (gas filling station), 7) ไซโคลนและเครื่องคัดขนาด (cyclones, sieve), 8) ตัวกรอง (filter) และ 9) เครื่อง compressor

Lozano และคณะ (2003) ศึกษาถึงวิธีการกระตุ้นเพื่อให้เกิดการสั่นของอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชันด้วยความถี่สูง พบว่า วิธีการอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชันเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการทำให้เกิดเป็นละอองที่มีขนาดเล็กมากๆ จากผลการทดลองพบว่าการกระจายตัวของขนาดหยดของเหลว อยู่ในช่วงที่แคบมากๆ และเป็นส่วนสำคัญสำหรับค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งค่าเหล่านี้จะถูกควบคุมโดยการกระตุ้นด้วยความถี่ โดยทั่วไปหยดของเหลวที่ต้องการจะอยู่ในระดับไมครอน เมื่อใช้คลื่นความถี่อยู่ในระดับเมกะเฮิรต์ (MHz) และ แรงดันไฟฟ้าประมาณ 30 โวลต์ ซึ่งเมื่อแปลงไปเป็นกำลังที่ใช้ประมาณ 10 วัตต์

Kurosawa และคณะ (1977) ศึกษาลักษณะการอะตอมไมเซชันของของเหลวโดยการใช้คลื่นเสียงพบว่าวิธีการนี้เหมาะสมกับการผลิตผงที่มีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้จะเป็น

แผ่นเพียโซ อิเล็กทริก (LiNbO₃) ขนาด 4 x 8 x 0.6 mm³ โดยใช้ความถี่สูงที่ 48 MHz เพื่อให้เกิดการสั่นโดยการใส่ทรานสดิวเซอร์เป็นตัวที่ทำให้เกิดการสั่น ซึ่งจะทำได้อนุภาคของของเหลวที่มีขนาดเล็กมากๆ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 5 ไมครอน และอัตราการอะตอมไมเซชัน 170 ไมโครลิตรต่อนาที ที่กำลัง 2.3 วัตต์ และนอกจากนี้ยังได้ศึกษาพลังงานที่ต้องใช้ในการอะตอมไมเซชัน เพื่อนำไปสู่การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของการอะตอมไมเซชัน ดังสมการต่อไปนี้

$$W = \sigma N \times 4\pi r^2 = \frac{\sigma V}{\frac{4}{3}\pi r^3} \times 4\pi r^2 = \frac{3\sigma V}{r} \quad (1.9)$$

เมื่อ	W	คือ พลังงาน (J)
	V	คือ ปริมาตรของของเหลวที่ใช้ในการอะตอมไมเซชัน (m ³ /kg)
	r	คือ รัศมีของหยดน้ำโลหะ(μm)
	N	คือ จำนวนหยดน้ำโลหะ (droplet/sec)
	σ	คือ ความตึงผิวของของเหลว (N/m)

จากการทดลองพบว่าที่ความถี่ 9.6 MHz และปริมาณของการอะตอมไมเซชัน 0.58 มิลลิลิตรต่อนาที ที่กำลัง 9.3 วัตต์ และค่าแรงตึงผิวของน้ำเท่ากับ 7.3×10^{-2} J/m² และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 10.6 ไมครอน จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการอะตอมไมเซชันประมาณ 0.0043 % (Kurosawa et al. 1997)

Rajan และคณะ (2001) ศึกษาสมมติฐานความสัมพันธ์ของขนาดหยดน้ำโลหะในกระบวนการอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชัน ซึ่งได้รวบรวมสมการต่างๆที่เกี่ยวข้องในการทำนายเพื่อหาความสัมพันธ์ของขนาดของหยดน้ำโลหะที่เกิดขึ้น ซึ่งการทำนายขนาดของหยดน้ำโลหะโดยเฉลี่ยสามารถประมาณได้จากสมการของ Lang ดังนี้

$$D_p = 0.34 \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (1.10)$$

ในกรณีที่อัตราการไหลสูงๆสามารถเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$D_p = 31.7 \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{0.354} \eta^{0.303} Q^{0.139} \quad (1.11)$$

เมื่อ	η	คือ ความหนืดของของเหลว (kg/m.s)
-------	---	---------------------------------

Q คือ อัตราการไหล (m^3/s)

ซึ่งอัตราการไหลสามารถคำนวณได้จาก $Q = \frac{\sigma}{f\rho}$ และจากการที่ Rajan ได้

ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำโลหะ พบว่านอกจากความหนาแน่น ความตึงผิวของน้ำโลหะ และความถี่ (Lang's, 1962) ที่ส่งผลต่อขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำโลหะแล้ว ยังพบว่ายังมีปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องคือ อัตราการไหลของน้ำโลหะ ความหนืดของน้ำโลหะ และการสั่นของแอมพลิฟิวด์ ดังสมการที่ 1.12

$$D_p = \left(\frac{\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{0.33} \left[1 + A(We)^{0.22} (Oh)^{0.166} (I_N)^{-0.0277} \right] \quad (1.12)$$

เมื่อ We คือ Weber number สามารถคำนวณได้จาก $We = \frac{fQ\rho}{\sigma}$

Oh คือ Ohnesorge number or Viscous number สามารถคำนวณได้จาก $Oh = \frac{\eta}{fA_m^2\rho}$

I_N คือ Intensity number สามารถคำนวณได้จาก $I_N = \frac{f^2 A_m^4}{\zeta Q}$

ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำโลหะ และความหนืดเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำโลหะเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันเมื่อแอมพลิฟิวด์เพิ่มขึ้น ขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำโลหะจะลดลง ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$D_p \sim Q^{0.248}$$

$$D_p \sim \eta^{0.166}$$

$$D_p \sim A_m^{-0.0277}$$

นอกจากนี้ยังมีทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายเพื่อใช้หาความสัมพันธ์ของขนาดหยดน้ำโลหะซึ่ง Pohlman และ Heisler ได้เสนอแนวคิดเรื่องการก่อรูปของหยดโลหะ ซึ่งจะใช้การสั่นของอัลตราโซนิก และคำนวณหาแอมพลิฟิวด์เริ่มต้นที่ทำให้เกิดการสั่นได้จากสมการต่อไปนี้

$$Am_{crit} = \left(\frac{2\eta}{\rho} \right) \left(\frac{\rho}{\pi\sigma f} \right)^{1/3} \quad (1.13)$$

จากสมการที่ 1.13 แอมพลิฟิวด์เริ่มต้นสำหรับอะลูมิเนียมหลอมเหลวประมาณ 40 μm และเมื่อได้แอมพลิฟิวด์เริ่มต้นจึงสามารถหาค่าการกระจายตัวของกำลังต่อหน่วยน้ำหนัก (power

dissipated per unit mass, P_m) ซึ่งนิยามโดย *Davies* เพื่อที่จะนำไปทำนายขนาดของหยดโลหะที่โตที่สุดที่สามารถเป็นไปได้

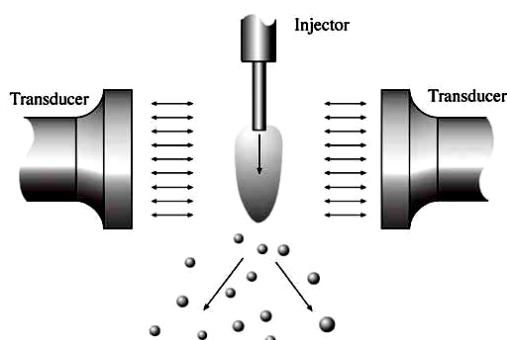
$$P_m = \frac{1}{2} V A m_{crit} (2\pi f)^2 \quad (1.14)$$

ดังนั้นขนาดหยดน้ำโลหะที่โตที่สุดที่มีความเป็นไปได้สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$D_{max} = k \left(\sigma + \frac{\mu V}{4} \right)^{0.6} \rho^{-0.6} P_m^{-0.4} \quad (1.15)$$

เมื่อ	k	คือ ค่าคงที่ของ <i>Davies</i>
	μ	คือ ค่าความหนืดของน้ำดีบุก (N/m)
	V	คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำโลหะ (m/s)

Reipschlager และคณะ (2002) ศึกษากระบวนการอะตอมไมเซชันแบบ ultrasonic standing wave atomization (USWA) ซึ่งในการทดลองจะทรานสดิวเซอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร จำนวน 2 ตัว เป็นตัวให้กำเนิดความถี่ขนาด 20 kHz ระยะห่างระหว่างทรานสดิวเซอร์ประมาณ 22.5 มิลลิเมตร ซึ่งจะวัดจากขอบของแผ่นทรานสดิวเซอร์ หลังจากนั้นจะทำการฉีดสารพวกพอลิเมอร์ด้วยอัตรา 100 g/min ผ่านช่องของ ทรานสดิวเซอร์ที่เกิดการสั่นของคลื่น (resonance) จะทำให้ได้เป็นผงขนาดเล็กออกมา แอมพลิฟายด์ที่ใช้ในการทดลองเกิน 60 ไมครอน และขนาดอนุภาคที่ได้จะมีขนาดเล็กประมาณ 5-50 ไมครอน



รูปที่ 1.13 กระบวนการ ultrasonic standing wave atomization (Reipschlager et al., 2002)

Tsai และคณะศึกษากระบวนการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันโดยใช้หัวฉีด (nozzle) ที่มีปลายแหลมที่ทำจากซิลิกอน (silicon) ซึ่งการทำให้เกิดการกระจายตัวของหยดของเหลวในวิธีอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันโดยใช้ระบบ Microelectromechanical เป็นหลัก และขนาดของหัวฉีด (nozzle) $3.66 \times 0.38 \times 0.11 \text{ cm}^3$ และมีช่องทางเดินน้ำขนาด 200 ไมครอน \times 200 ไมครอน ของเหลวที่เป็นฟิล์มบางจะเกิดบนปลายของหัวฉีดที่มีการสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ 486.5 kHz ผลที่เกิดขึ้นคือจะเกิดการก่อรูปของคลื่นเล็ก ๆ บนผิวของฟิล์มบาง ซึ่งเมื่อการสั่นของแอมพลิจูดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เป็นหยดละอองหลุดออกมา ซึ่งวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของเหลวได้ 7.0 ไมครอน

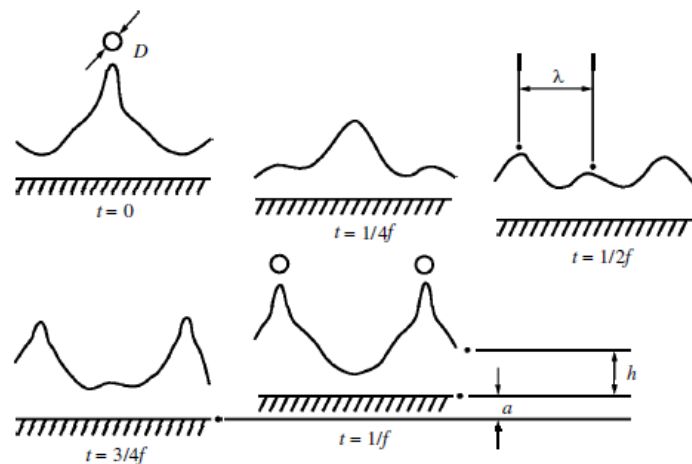
Shchikaliev และคณะ (1984) ศึกษาการผลิตผงโลหะโดยวิธีอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน พบว่าการผลิตด้วยเทคนิคนี้ ทำให้ได้ผงที่มีคุณภาพสูง สำหรับโลหะบัดกรี (solder) และครีมลวดเชื่อมโลหะบัดกรี (soldering paste) และได้มีการนำวิธีการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ซึ่งวิธีการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ และพวกสารอินทรีย์ (organic) หรือสารอนินทรีย์ (inorganic) บางชนิดจะใช้คลื่นอัลตราโซนิก แต่อย่างไรก็ตามความรู้เกี่ยวกับอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันของโลหะเหลว ยังคงมีน้อยมาก ๆ และคุณสมบัติต่างๆ ทั้งทางด้านกายภาพ และทางเคมี สมบัติเหล่านี้จะมีผลต่อการก่อรูปของ ขนาดหยด (droplets) และรูปร่างของผงที่ได้ เช่น ค่าความหนาแน่น (density) ความตึงผิว (surface tension) เป็นต้น

Sindayihubura และคณะ (2009) ศึกษาการเกิดฟิล์มบางของของเหลวในกระบวนการอัลตราอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน ชั้นของเหลวที่เป็นฟิล์มบางนี้จะเกิดเป็นคลื่นที่ผิวขึ้น และก่อรูปเป็นหยดของเหลว ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดของเหลว และความยาวคลื่น (wavelength) ที่ทำให้เกิดคลื่นที่ผิวขึ้นวัดโดยการใช้ของเหลวที่แตกต่างกัน ซึ่งสมบัติของของเหลวทั้งสองชนิดจะมีผลต่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดของเหลว และความเร็วของหยดของเหลว นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการกระจายตัวของขนาดหยดของเหลว ซึ่งพบว่าช่วงของการกระจายตัวจะแคบ (ที่ความถี่ 50 kHz) แสดงว่าขนาดของหยดที่ได้จะมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน และยังได้ศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดที่ได้ดังนี้

- ความถี่ (effect of working frequency) พบว่าเมื่อความถี่สูงขึ้น (kHz) จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดมีขนาดเล็กลงตามค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้น
- อัตราการไหล (effect of the liquid flow rate) พบว่าเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น (l/h) จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดมีขนาดที่โตขึ้น

– สมบัติของของเหลว (effect of the liquid properties) ซึ่งจากการทดลองได้ศึกษาค่าความหนืดของของเหลว (viscosity) และค่าความตึงผิว (surface tension) ซึ่งทั้งสองค่านี้จะมีความสัมพันธ์กัน เมื่อของเหลวที่มีความหนืดสูงจะทำให้ค่าความตึงผิวสูงด้วย ซึ่งจากการทดลองของ Sindayihubura พบว่าเมื่อความหนืดและความตึงผิวของของเหลวสูงขึ้นจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดสูงขึ้นตามลำดับ

Yule และคณะ (2000) ศึกษาการก่อรูปของหยด (droplets) ที่เกิดจากคลื่นเล็ก ๆ (capillary wave) บนผิวที่เกิดการสั่นสะเทือน (รูปที่ 1.14) พบว่าละอองเล็กๆที่เกิดขึ้นจากผิวที่สั่นสะเทือนของฟิล์มของเหลว โดยการใช้อัลตราโซนิกอะตอมไมเซอร์ สำหรับประยุกต์ใช้งานในกระบวนการทางโลหะผง (metal powder) ซึ่งขนาดเฉลี่ยของหยดที่เกิดขึ้นบนผิวของยอดคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Lang ดังนี้



รูปที่ 1.14 ลักษณะการเกิดหยดของเหลว (droplets) จากยอดคลื่นบนพื้นผิวที่มีการสั่นสะเทือน (Yule et al., 2000)

$$D_{32} \approx 0.34\lambda \quad (1.16)$$

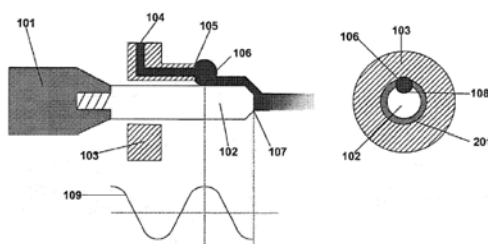
เมื่อ D_{32} คือ Sauter mean diameter ซึ่ง $\lambda = (8\pi\sigma / \rho_l f^2)^{1/3}$

จากการทดลองพบว่าที่ความถี่ 39.5 MHz ในการผลิตผงโลหะบัดกรี (solder) ด้วยวิธีการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซอร์ การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลจะไปทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 50 ไมครอน เป็น 60 ไมครอน ซึ่งจะสอดคล้องกับช่วงของการกระจายตัวของอนุภาคที่กว้างขึ้น

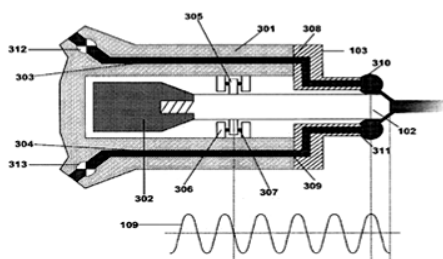
จากการศึกษาถึงงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน ซึ่งเป็นการศึกษาถึงปรากฏการณ์การเกิดคลื่นที่ผิวและก่อรูปขึ้นเป็นหยดของเหลวขึ้น และศึกษาถึงอิทธิพลต่างๆที่ส่งผลต่อขนาดของหยดของเหลว พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยของหยดของเหลวจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ในการอะตอมไมเซชัน ค่าความหนืดและแรงตึงผิวของเหลว ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการเบื้องต้นที่เสนอโดย Lang ในปีพ.ศ. 1962 และมีตัวแปรที่สำคัญอีกคือ อัตราการไหลของของเหลวที่จะส่งผลต่อขนาดของหยดของเหลว ซึ่งจากงานวิจัยที่กล่าวมาเบื้องต้น สามารถนำตัวแปรต่างๆมาใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยกระบวนการนี้ได้

1.9 การสืบค้นฐานข้อมูลสิทธิบัตร

Babaev และคณะจดสิทธิบัตรวิธีการอะตอมไมเซชันด้วยอัลตราโซนิกและกระบวนการไหลแยก หลักการทำงานของเครื่องอะตอมไมเซชันคือ จะป้อนน้ำโลหะผ่านหัวของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ ที่มีช่องทางเดินน้ำโลหะดังรูปที่ 1.15 และ 1.16 ตามลำดับ



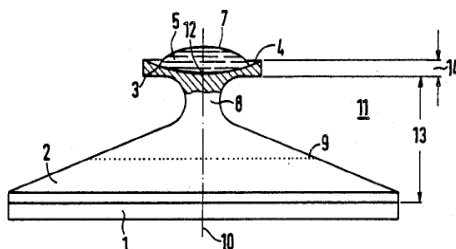
รูปที่ 1.15 เครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน, สิทธิบัตร U.S.Pat.20080093473A1 (Babaev et al., 2008)



รูปที่ 1.16 เครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันที่มีทางเดินน้ำโลหะสองช่องทางภายในรูของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์, สิทธิบัตร U.S.Pat.20080093473A1 (Babaev et al., 2008)

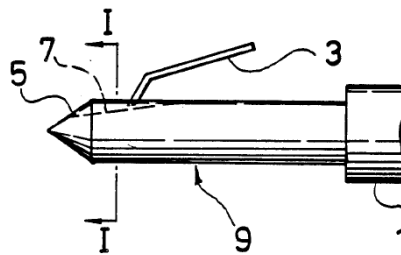
รูปที่ 1.16 น้ำโลหะจะถูกส่งไปยังปลายหัวของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ จากนั้นจะได้รับพลังงานในการกระตุ้นในรูปของคลื่นความถี่แล้วแตกตัวเป็นหยดขนาดเล็ก ซึ่งกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยกระบวนการนี้จะไม่ขึ้นกับความดันของสิ่งแวดลอม ทำให้สามารถสร้างสเปรย์ออกมาได้แม้ว่าความดันของสิ่งแวดลอมภายนอกจะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม เนื่องจากที่รูดังกล่าวสามารถจ่ายน้ำโลหะไปที่หัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ได้สองช่องทาง ทำให้สามารถผลิตสเปรย์ผสมของสารสองชนิดได้ หรือสามารถแยกของเหลวออกจากก๊าซ ของแข็งและของเหลวด้วยกันได้

Drews และคณะ (1990) จดสิทธิบัตรการทำให้เกิดการสั่นของอัลตราโซนิก (MHz) สำหรับการทำอะตอมไมเซชันของของเหลวดังแสดงในรูปที่ 1.17 โดยมีแผ่นเพียโซเซรามิก (piezoceramic) หมายเลข 1 เป็นตัวที่ทำให้เกิดการสั่น และหมายเลข 9 จะเป็นกรวยของอะตอมไมเซชันซึ่งจะมีของเหลวอยู่บนกรวยหมายเลข 5 ซึ่งปริมาตรของของเหลวในการอะตอมไมเซชันด้วยวิธีนี้จะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 μl ($V \leq 15 \mu\text{l}$) ในช่วงของความถี่ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 1 MHz และน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 MHz ($1 \text{ MHz} \leq f \leq 5 \text{ MHz}$) และกำลังไฟฟ้าที่ใช้จะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 W ($P \leq 30 \text{ W}$) ซึ่งจะทำให้ได้ขนาดหยดที่น้อยกว่า 40 ไมครอน



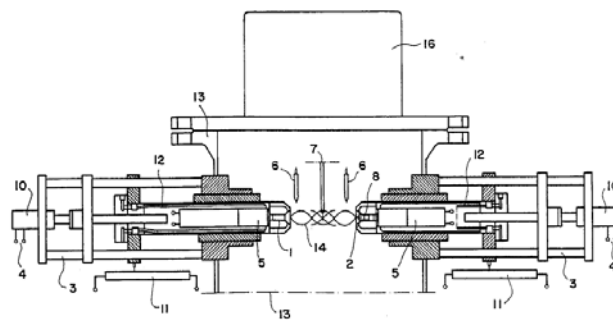
รูปที่ 1.17 อัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันสำหรับของเหลว, สิทธิบัตร U.S.Pat.4912357 (Drews et al., 1990)

Kurokawa และคณะ (1990) จดสิทธิบัตรการออกแบบหัวโพรบที่มีลักษณะปลายแหลม (horn) ที่ทำให้เกิดการสั่นจากอัลตราโซนิก สำหรับการทำอะตอมไมเซชันของของเหลวดังรูปที่ 1.18 ซึ่งขนาดของละอองที่แพร่ออกมาจะขึ้นอยู่กับการออกแบบช่องว่างของหัวโพรบ ซึ่งหัวโพรบของอัลตราโซนิกที่เกิดการสั่นนั้นจะต่ออยู่กับทรานสดิวเซอร์ (electroacoustic transducer) หมายเลข 1 และหมายเลข 3 จะเป็นท่อที่ต่อเพื่อป้อนให้ของเหลวไหลเข้าไปยังหัวโพรบที่มีลักษณะปลายแหลม (horn)



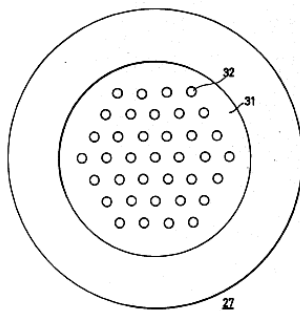
รูปที่ 1.18 ลักษณะหัวโพรบที่มีปลายแหลม (horn) ของอัลตราโซนิก, สิทธิบัตร U.S.Pat.4844343 (Kurokawa et al., 1990)

Lierke และคณะ (1990) จดสิทธิบัตรอะตอมไมเซชันที่มีลักษณะดังรูปที่ 1.19 โดยการใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่สร้างจากหัวอัลตราโซนิกทรานสมิตเตอร์สองหัวซึ่งมีความถี่ที่เท่ากันทำให้เกิดการกำรระหว่างคลื่นจากแหล่งกำเนิดทั้งสอง โดยแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของตัวกลาง หรือมีการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรอื่นๆของกระบวนการก็ตาม ก็จะไม่ส่งผลกระทบใดๆต่อคลื่นความถี่สูง และมีอุปกรณ์เสริมที่ช่วยสร้างสนามคลื่นคือท่อจ่ายก๊าซตัวกลาง การป้อนน้ำโลหะจะป้อนจากทางด้านบนของสนามคลื่นความถี่สูง

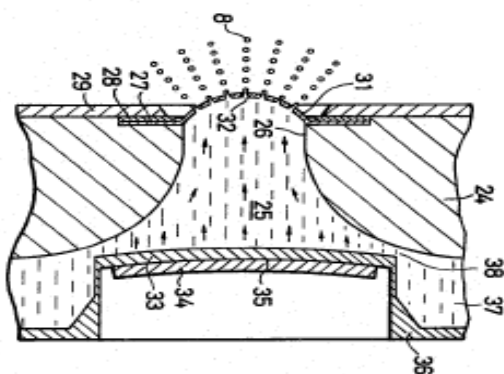


รูปที่ 1.19 การอะตอมไมเซชันด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ของสิทธิบัตรU.S.Pat.4981425 (Lierke et al., 1990)

Maehara และคณะ (1990) จดสิทธิบัตรการอะตอมไมเซอร์ของของเหลวโดยใช้การสั่น ซึ่งอะตอมไมเซอร์จะประกอบไปด้วยหัวฉีดที่มีรูเปิดหลายๆรู ดังรูปที่ 1.20 และจะอาศัยการกระตุ้นโดยใช้การสั่นจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ดังรูปที่ 1.21 โดยที่ของเหลวจะไหลไปตามช่องทางใต้การบีบอัดด้วยความดัน (หมายเลข 25) จากนั้นจะไปออกยังหัวฉีดได้เป็นหยดของเหลว (หมายเลข 8)



รูปที่ 1.20 ลักษณะหัวฉีดที่ใช้ในอะตอมไมเซอร์, สิทธิบัตร U.S.Pat.4465234 (Machara et al., 1990)



รูปที่ 1.21 อะตอมไมเซอร์ของของเหลวโดยใช้การสั่น, สิทธิบัตร U.S.Pat.4465234 (Machara et al., 1990)

จากการทบทวนถึงสิทธิบัตรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน พบว่ามีการออกแบบช่องทางเดินของของเหลวอยู่หลายแบบด้วยกันเช่น ได้ออกแบบให้มีการป้อนของเหลวผ่านหัวของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ และมีการออกแบบหัวโพรบในลักษณะเป็นปลายแหลมและเจาะรูเพื่อต่อท่อไว้สำหรับป้อนให้ของเหลวไหลเข้าไปยังหัวโพรบ ซึ่งขนาดของละอองที่ได้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบช่องว่างที่หัวโพรบ นอกจากนั้นยังได้มีการออกแบบหัวฉีดที่มีรูเปิดหลายๆรูเพื่อให้ของเหลวไหลไปตามช่องรูเปิดออกไปยังหัวฉีดทำให้ได้เป็นหยดของเหลว ซึ่งจากสิทธิบัตรที่กล่าวมาเบื้องต้น สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบหัวโพรบของเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อใช้ในการอะตอมไมเซชันในงานวิจัยนี้ได้

1.10 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อออกแบบ และสร้างเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน สำหรับผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วให้ได้ขนาดอนุภาค 40 ไมครอน ซึ่งอยู่ในช่วง Type 3 (45-25 μm)

2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุมที่มีผลต่อลักษณะจำเพาะของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตโดยวิธีอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันซึ่งตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการทดลองนี้มี 4 ตัวแปร ดังนี้
 - อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะ (melt temperature)
 - อัตราการป้อนน้ำโลหะ (melt flow rate)
 - แอมพลิจูด (amplitude)
 - ปริมาณออกซิเจน (oxygen content)

1.11 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน (ultrasonic atomization)
2. ทดลองผลิตผงโลหะที่มีจุดหลอมเหลวไม่เกิน 660°C เช่น โลหะบัดกรี (solder) โดยมีตัวแปรในการผลิตคือ อุณหภูมิซูปเปอร์ฮีท อัตราการไหล และ แอมพลิจูด
3. ตรวจสอบลักษณะของผงโลหะที่ผลิตได้ และศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ

1.12 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้พื้นฐานความรู้ที่จะออกแบบ และสร้างเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันที่ใช้ผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว
2. ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ใช้ในการผลิตผงกับลักษณะจำเพาะของผงที่ผลิตได้
3. สามารถเลือกสภาวะการผลิตผงโลหะที่เหมาะสมสำหรับผลิตผงโลหะให้ได้ลักษณะจำเพาะตามที่ต้องการ
4. เป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการถ่ายทอดสู่อุตสาหกรรม

1.13 สถานที่ทำการวิจัย

1. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
3. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทที่ 2

การดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะออกแบบ และสร้างเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันเพื่อที่จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุมที่มีผลต่อขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะจากการผลิตโดยวิธีอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน ซึ่งตัวแปรควบคุมดังกล่าวได้แก่

- อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะ (melt temperature)
- อัตราการป้อนน้ำโลหะ (melt flow rate)
- แอมพลิจูด (amplitude)
- ปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์ (oxygen content in the atomizer

chamber)

ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานการวิจัยดังต่อไปนี้

1. ออกแบบ และสร้างเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน
2. การทดสอบการทำงานของเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน

2.1 การออกแบบ และสร้างเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน

การดำเนินงานในขั้นตอนนี้เป็นการออกแบบเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันซึ่งได้ประยุกต์นำเอาหลักการของคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้ในการทำให้เกิดการอะตอมไมเซชัน และได้ศึกษาจากงานวิจัย และสิทธิบัตรต่างๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันให้มีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่วางเอาไว้ ซึ่งการดำเนินงานในขั้นตอนนี้แบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

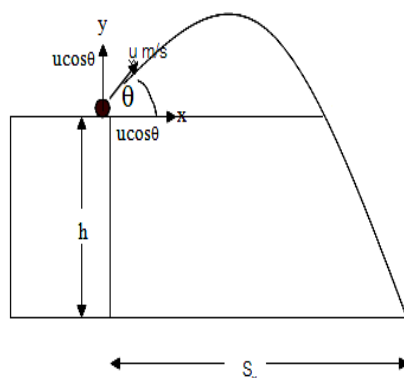
- การออกแบบและสร้างถังอะตอมไมเซอร์ (atomizer chamber)
- การออกแบบและสร้างหัวจ่ายน้ำโลหะ (nozzle)
- การออกแบบและสร้างเตาหลอมโลหะ (melter)
- การออกแบบและสร้างชุดหล่อเย็นของอัลตราโซนิก (ultrasonic housing)
- การออกแบบและสร้างอัลตราโซนิกโพรบ (ultrasonic probe)
- การออกแบบและสร้างชุดควบคุมเตาหลอมโลหะ (melter controller)

2.1.1 ออกแบบและสร้างถังอะตอมไมเซอร์

ในการออกแบบถังอะตอมไมเซอรื้นจะต้องคำนึงถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของถังอะตอมไมเซอร์เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากจะส่งผลต่อการแห้งตัว และรูปร่างของผงโลหะที่ผลิตด้วยเทคนิคนี้ ซึ่งในการออกแบบนั้นจะพิจารณาถึงทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของน้ำโลหะ (heat transfer of the droplet) และวิถีทางของน้ำโลหะ (trajectory of the droplet) ที่กระเด็นออกจากหัวโพรบโดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ (projectile motion) มาใช้ในการออกแบบครั้งนี้

- วิถีทางของน้ำโลหะ

ในการคำนวณหาขนาดของถังอะตอมไมเซอร์จะพิจารณาถึงความเร็วเริ่มต้นที่น้ำโลหะกระเด็นออกจากหัวโพรบของอัลตราโซนิกโดยที่ไม่คำนึงถึงแรงต้านของอากาศ (drag force) ที่อยู่บริเวณรอบๆ เพื่อหาระยะทางที่หยดน้ำโลหะกระเด็นไปได้ไกลมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงหลักการเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ของหยดน้ำโลหะ

- การถ่ายเทความร้อนของหยดน้ำโลหะ

ในระหว่างที่น้ำโลหะเคลื่อนที่อยู่ในอากาศนั้นจะเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังบริเวณรอบข้าง และน้ำโลหะจะเกิดการแห้งตัวขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปความร้อนจะถูกถ่ายเทให้กับบรรยากาศภายในถังอะตอมไมเซอร์ และสูญเสียไปในระหว่างการก่อรูปเป็นหยดของน้ำโลหะบนหัวโพรบของอัลตราโซนิก ซึ่งในการคำนวณจะพิจารณาเฉพาะความร้อนที่ถ่ายเทไปยังบริเวณรอบข้าง ในที่นี้คือความร้อนแฝงของการหลอมละลาย (latent heat of fusion) ซึ่งค่าการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดจากที่น้ำโลหะกระเด็นออกจากหัวโพรบสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = mL \quad (2.1)$$

เมื่อ	Q	คือ ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย (Joule)
	L	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของหยดน้ำโลหะ (J/kg)
	m	คือ น้ำหนักของหยดน้ำโลหะ (kg)

ซึ่งพฤติกรรมการนำพาความร้อนของน้ำโลหะที่กระเด็นออกจากหัวโพรบไปยังบริเวณรอบข้างนั้นจะแสดงอยู่ในรูปของ Nusselt number ซึ่งเป็น Dimensionless Number ค่าหนึ่งที่ใช้อธิบายการถ่ายเทความร้อน (heat convection) โดย (Cengel, 2004)

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (2.2)$$

เมื่อ	h	คือ สัมประสิทธิ์การนำพาความร้อนของน้ำโลหะ ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
	d	คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของหยดน้ำโลหะ (m)
	k	คือ Thermal conductivity of atmosphere ($W/m \cdot ^\circ C$)

จากสมการดังกล่าวนี้ได้มีการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง *Reynolds Number, Nusselt number and Prandtl number* ซึ่งเสนอโดย Whitaker ได้ดังนี้

$$Nu = \frac{hd}{k} = 2 + [0.4 Re^{1/2} + 0.06 Re^{2/3}] Pr^{0.4} \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_{sn}} \right)^{1/4} \quad (2.3)$$

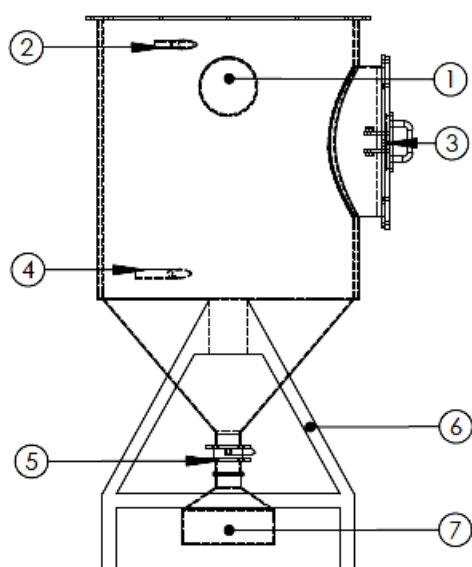
เมื่อ	μ_∞	คือ dynamic viscosity of surrounding (m^2/s)
	μ_s	คือ dynamic viscosity of surrounding close to the surface of a droplet (m^2/s)
	Re	คือ Reynolds Number
	Pr	คือ Prandtl number

และสามารถหาอัตราการนำพาความร้อนจากหยดน้ำโลหะไปยังบริเวณรอบข้างได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{convec} = hA_s (T_s - T_\infty) \quad (2.4)$$

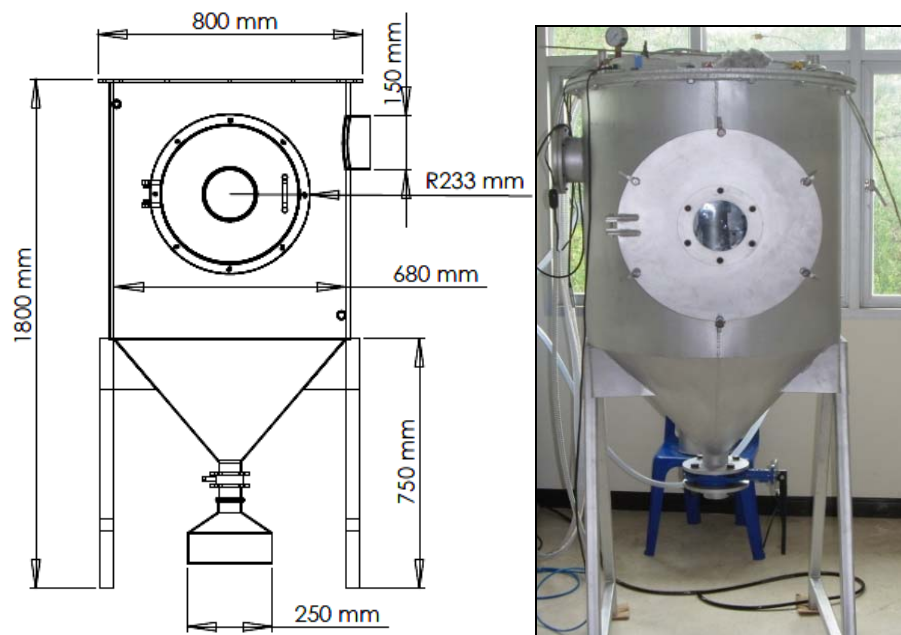
เมื่อ	A_s	คือ พื้นที่ผิวของหยดน้ำโลหะ (m^2)
	T_s	คือ อุณหภูมิที่ผิวหยดน้ำโลหะ ($^{\circ}C$)
	T_{∞}	คือ อุณหภูมิบริเวณรอบข้าง ($^{\circ}C$)

ซึ่งจากการคำนวณหาขนาดของถังอะตอมไมเซอร์ โดยอาศัยทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของถังอะตอมไมเซอร์ประมาณ 80 เซนติเมตร และสูง 185 เซนติเมตร และในการออกแบบจะใช้เหล็กที่มีความหนา 3 มิลลิเมตรทำเป็นผนัง 2 ชั้น เพื่อให้มีระบบหล่อเย็นที่ผนังของถังอะตอมไมเซอร์ ซึ่งระยะห่างระหว่างผนังชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ประมาณ 1 นิ้ว เพื่อให้สามารถไหลเวียนอยู่ได้ในขณะที่ทำการอะตอมไมเซอร์ ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ และขนาดของถังอะตอมไมเซอร์แสดงในรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 ตามลำดับ



No.	Part
1	ช่องมองกระจก
2	ท่อทางออกน้ำหล่อเย็น
3	ฝาเปิด-ปิด
4	ท่อทางเข้าน้ำหล่อเย็น
5	วาล์วผีเสื้อ
6	ขาตั้งถังอะตอมไมเซอร์
7	ถังเก็บผงโลหะ

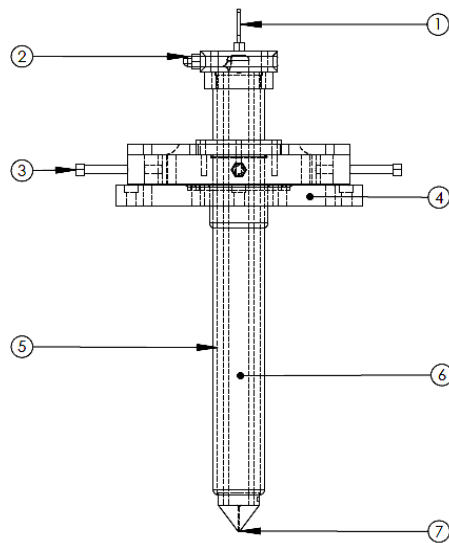
รูปที่ 2.2 แบบร่างและส่วนประกอบต่างๆของถังอะตอมไมเซอร์



รูปที่ 2.3 ขนาดของถังอะตอมไมเซอร์ และลักษณะของถังอะตอมไมเซอร์ที่ได้จัดทำขึ้น

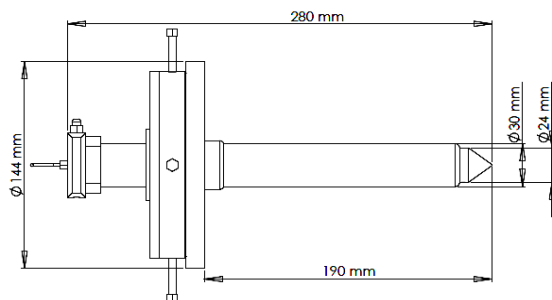
2.1.2 การออกแบบและสร้างหัวจ่ายน้ำโลหะ

ในการออกแบบหัวจ่ายน้ำโลหะจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ปลอกหุ้มฮีตเตอร์ของท่อทางเดินน้ำโลหะ และท่อทางเดินน้ำโลหะ ซึ่งในการป้อนน้ำโลหะจะอาศัยแรงดันของก๊าซไนโตรเจนที่อัดเข้าไปภายในเตาหลอมโลหะเป็นตัวขับน้ำโลหะให้ไหลผ่านหัวฉีด ซึ่งหัวฉีดจะมีขนาดตั้งแต่ 0.5, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ และจะใช้ฮีตเตอร์ขนาด 500 วัตต์ เป็นตัวให้ความร้อนแก่ท่อทางเดินน้ำโลหะเพื่อป้องกันการแข็งตัวของน้ำโลหะในระหว่างที่เดินทางอยู่ภายในท่อ นอกจากนั้นหัวจ่ายน้ำโลหะยังสามารถที่จะปรับมุมทิศทางได้ 360 องศา เพื่อใช้ในการปรับหาศูนย์กลางระหว่างหัวจ่ายน้ำโลหะกับหัวโพรบของอัลตราโซนิก ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ และขนาดของหัวจ่ายน้ำโลหะแสดงในรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 ตามลำดับ



No.	Part
1	เทอร์โมคัพเปิด
2	ช่องจ่ายน้ำโลหะ
3	ตัวปรับศูนย์กลางหัวฉีด
4	ตัวจับยึดหัวฉีด
5	ปลอกหุ้มฮีทเตอร์
6	ช่องทางเดินน้ำโลหะ
7	หัวจ่ายน้ำโลหะ

รูปที่ 2.4 แบบร่างและส่วนประกอบต่างๆของหัวจ่ายน้ำโลหะ

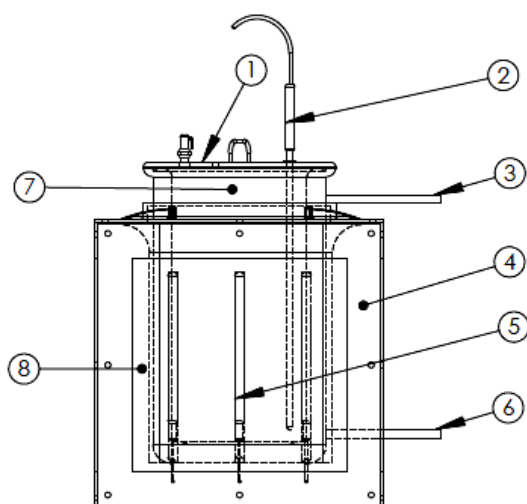


รูปที่ 2.5 ขนาดและลักษณะของหัวจ่ายน้ำโลหะที่ได้จัดทำขึ้น

2.1.3 การออกแบบและสร้างเตาหลอมโลหะ

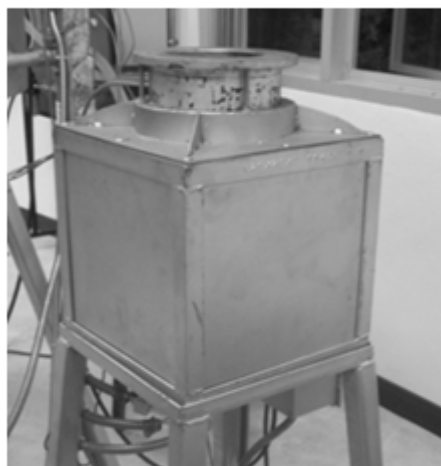
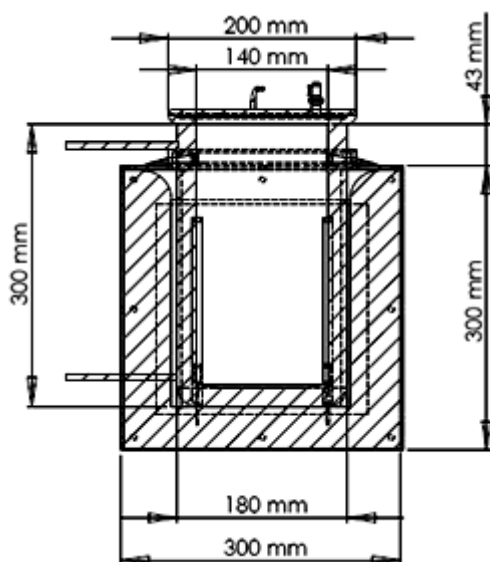
เตาหลอมโลหะที่ได้ออกแบบ และสร้างขึ้นนั้นจะมีรูปร่างเป็นทรงสี่เหลี่ยมด้านเท่า ซึ่งมีขนาด 30 x 30 เซนติเมตร และใช้เบ้าหลอมที่ทำจากโลหะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร หนา 2.5 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร ซึ่งภายในเบ้าหลอมนั้นจะเจาะรูเพื่อฝังฮีทเตอร์ลงไป ในเนื้อของเบ้าหลอม โดยจะใช้ฮีทเตอร์ขนาด 2,000 วัตต์ เป็นตัวให้ความร้อนแก่เบ้าหลอม เพื่อให้โลหะเกิดการหลอมเหลว ซึ่งอุณหภูมิที่จะใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 270-350 องศาเซลเซียส และนอกจากนั้นเตาหลอมโลหะจะต่อกับท่อไนโตรเจน เพื่อใช้เป็นแรงดันในการขับ

น้ำโลหะให้จ่ายไปยังหัวฉีด และเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ของน้ำโลหะ ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ และขนาดของเตาหลอมโลหะแสดงในรูปที่ 2.6 และ รูปที่ 2.7 ตามลำดับ



No.	Part
1	ฝาปิดเตา
2	เทอร์โมคัปเปิ้ล
3	ท่อความดัน
4	ผนังเตา
5	ฮีทเตอร์
6	ท่อจ่ายน้ำโลหะ
7	เบ้าหลอม
8	ฉนวนกันความร้อน

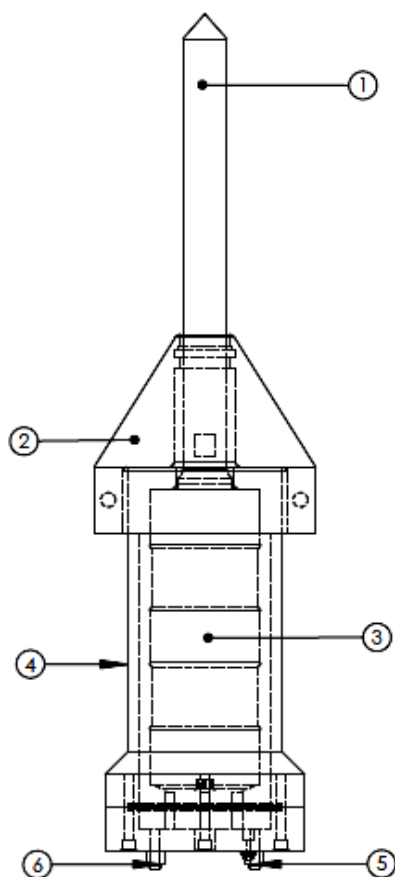
รูปที่ 2.6 แบบร่างและส่วนประกอบต่างๆของเตาหลอมโลหะ



รูปที่ 2.7 ขนาดและลักษณะของเตาหลอมโลหะที่ได้จัดทำขึ้น

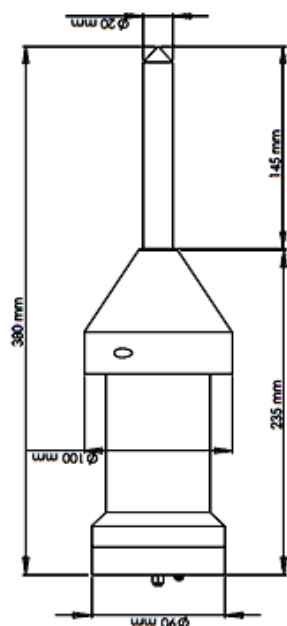
2.1.4 การออกแบบและสร้างระบบหล่อเย็นอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

ระบบหล่อเย็นของเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซอร์นั้นมีความสำคัญมาก เนื่องจากว่า ทรานสดิวเซอร์ที่อยู่ภายในเครื่องอัลตราโซนิกนั้นจะมีข้อจำกัดในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ ซึ่งจะใช้งานได้อยู่ในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส ถ้าเกินข้อจำกัดนี้จะส่งผลให้อายุการใช้งานของทรานสดิวเซอร์สั้นลง ดังนั้นในการออกแบบระบบหล่อเย็นของทรานสดิวเซอร์จะต้องคำนึงถึงจุดนี้เป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ ฝาปิดปลอกหุ้มทรานสดิวเซอร์ ปลอกหุ้มทรานสดิวเซอร์ (housing) และตัวป้องกันน้ำโลหะ ซึ่งในระบบหล่อเย็นนี้จะใช้ลมเย็นเป็นตัวกลางที่คอยรักษาระดับอุณหภูมิภายในของทรานสดิวเซอร์ ซึ่งจะอาศัยวิธีการไหลเวียนของลมเย็นเข้า และออกอยู่ตลอดเวลาในระหว่างที่ทำการอะตอมไมเซอร์ โดยจะใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดและควบคุมอุณหภูมิของทรานสดิวเซอร์ ไม่ให้เกินข้อจำกัดที่ตั้งเอาไว้ ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ และขนาดของระบบหล่อเย็นอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แสดงในรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9 ตามลำดับ



No.	Part
1	หัวโพรบ
2	ตัวป้องกันน้ำโลหะ
3	ทรานสดิวเซอร์
4	ปลอกหุ้มทรานสดิวเซอร์
5	ช่องอากาศเข้า
6	ช่องอากาศออก

รูปที่ 2.8 แบบร่างและส่วนประกอบต่างๆของชุดหล่อเย็นอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์



รูปที่ 2.9 ขนาดและลักษณะของชุดระบบหล่อเย็นอัลตราโซนิกทรานควิวเซอร์ที่ได้จัดทำขึ้น

2.1.5 การออกแบบและสร้างอัลตราโซนิกโพรบ

ในการออกแบบและสร้างหัวโพรบของอัลตราโซนิกนั้นมีความสำคัญมากทั้งในเรื่องของขนาด รูปทรง และวัสดุที่จะใช้ในการผลิต ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัตินำคลื่นความถี่ของอัลตราโซนิก ดังนั้นในการออกแบบจึงได้ทำการศึกษาจากงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง และการใช้โปรแกรม (power ultrasonics program) เพื่อช่วยในการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมให้สามารถนำคลื่นความถี่ได้ดีที่สุด และเกิดการเรโซแนนซ์ที่ปลายหัวโพรบพอดี (full wavelength) ในการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อขนาดความยาวของหัวโพรบจะขึ้นอยู่กับค่า Young's modulus (young's modulus) และความถี่ที่ใช้ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันดังสมการต่อไปนี้

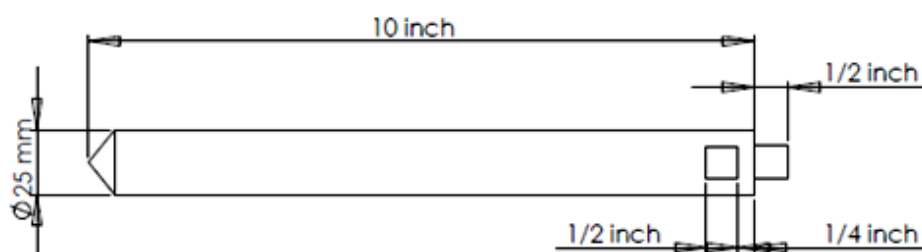
$$\lambda = \frac{C_a}{f} ; C_a = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.5)$$

เมื่อ	λ	คือ wavelength (mm)
	C_a	คือ axial mode sound velocity (m/s)
	E	คือ young's modulus (GPa)
	ρ	คือ density (kg/m^3)
	f	คือ frequency (Hz)

ดังนั้นขนาดความยาวของหัวโพรบสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (2.6)$$

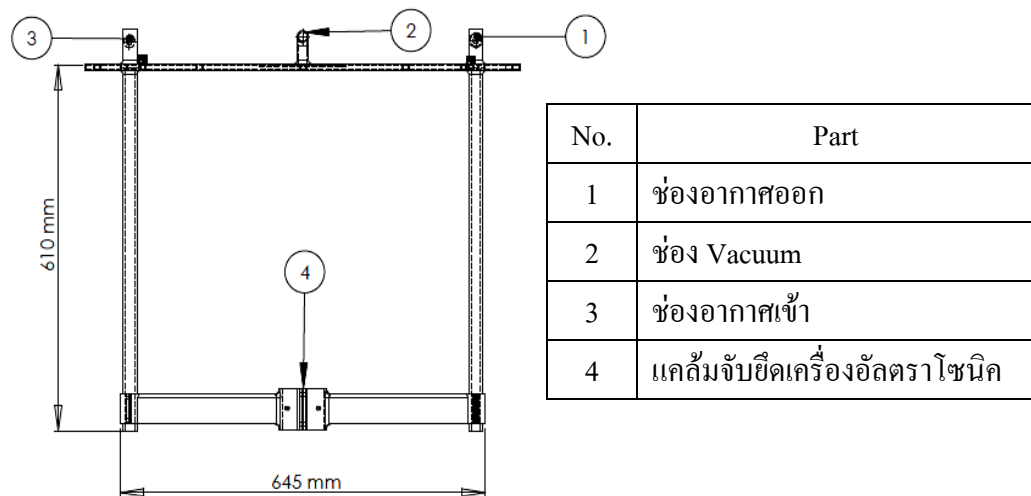
จากการคำนวณจะได้ขนาดความยาวของหัวโพรบประมาณ 10 นิ้ว มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ขนาดของความถี่ที่ใช้ 20 kHz และใช้โลหะไทเทเนียมเกรด 5 (Ti-6Al-4V) เป็นวัสดุในการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ขนาดและลักษณะของอัลตราโซนิกโพรบที่ได้จัดทำขึ้น

2.1.6 การออกแบบและสร้างตัวจับยึดเครื่องอัลตราโซนิกภายในถังอะตอมไมเซอร์

ตัวจับยึดเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซอร์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนั้น จะประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักๆ คือ ช่องลำเลียงลมเย็นที่ใช้ในการหล่อเย็นทรานสดิวเซอร์ที่อยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์, ช่องลำเลียงลมออก, ช่องสำหรับระบบดูดอากาศออก (vacuum) และแกล้มจับยึดเครื่องอัลตราโซนิก ซึ่งในการออกแบบตัวจับยึดนั้น สามารถที่จะปรับระดับสูง-ต่ำได้ เพื่อให้ได้ระยะที่เหมาะสมระหว่างหัวจ่ายน้ำโลหะกับหัวโพรบของเครื่องอัลตราโซนิก ซึ่งปกติจะอยู่ในช่วงไม่เกิน 25 มิลลิเมตร ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ และขนาดของตัวจับยึดเครื่องอัลตราโซนิกแสดงในรูปที่ 2.11 และรูปที่ 2.12 ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 แบบร่างและส่วนประกอบของตัวจับยึดเครื่องอัลตราโซนิกภายในถังอะตอมไมเซอร์



รูปที่ 2.12 ตัวจับยึดเครื่องอัลตราโซนิกภายในถังอะตอมไมเซอร์ที่ได้จัดทำขึ้น

2.1.7 การออกแบบและสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะ

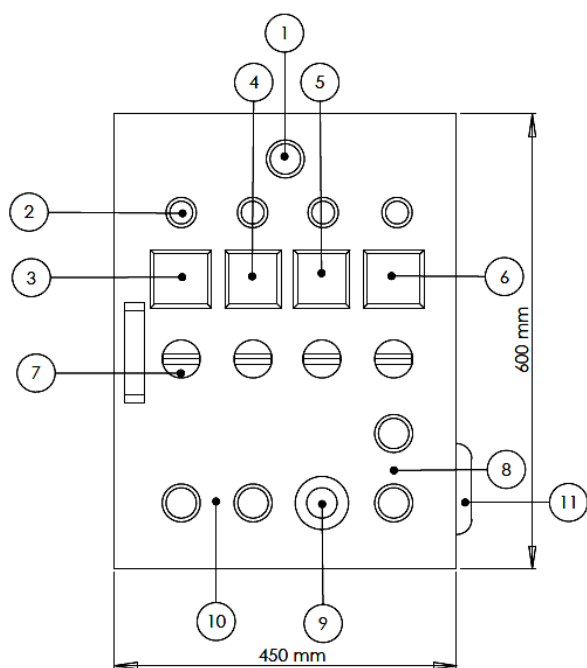
ในการออกแบบชุดควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอมโลหะ ท่อทางเดินน้ำโลหะ และหัวจ่ายน้ำโลหะจะคำนึงถึงขนาดของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดของระบบเพื่อที่จะเลือกใช้ตัววัด และควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม ซึ่งจากการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดประมาณ 3,500 วัตต์ หลังจากนั้นวางระบบของตัววัดและควบคุมอุณหภูมิแยกออกเป็นชุดๆ ดังนี้

ชุดที่ 1 ระบบวัด และควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอมโลหะ จะประกอบไปด้วยเทอร์โมคัปเปิล Type K 2 ตัว และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ประมาณ 2,200 วัตต์

ชุดที่ 2 ระบบวัด และควบคุมอุณหภูมิของท่อทางเดินน้ำโลหะ จะประกอบไปด้วย เทอร์โมคัพเบิล Type K 2 ตัว และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ประมาณ 500 วัตต์

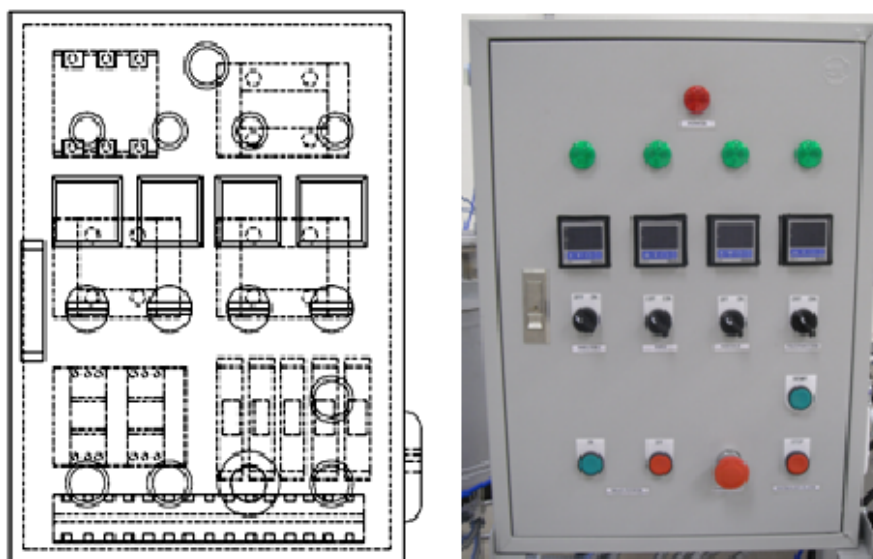
ชุดที่ 3 ระบบวัด และควบคุมอุณหภูมิของหัวจ่ายน้ำโลหะ จะประกอบไปด้วย เทอร์โมคัพเบิล Type K 2 ตัว และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ประมาณ 800 วัตต์

ชุดที่ 4 ระบบวัด และควบคุมอุณหภูมิของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ จะประกอบไปด้วย เทอร์โมคัพเบิล Type K 1 ตัว ซึ่งจะคอยควบคุมอุณหภูมิของทรานสดิวเซอร์ไม่ให้เกิน 50 °C นอกจากนี้ยังมีระบบที่สำคัญอื่นๆอีก เช่น ระบบการหยุดจ่ายน้ำโลหะฉุกเฉิน ซึ่งจะถูกควบคุมโดย โซลีนอยด์วาล์ว และระบบหยุดการทำงานฉุกเฉินของเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซอร์ ซึ่งมี ส่วนประกอบต่างๆ และขนาดของชุดควบคุมอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14 ตามลำดับ



No.	Part
1	Main power lamp
2	Heater lamp
3	Control temperature of furnace
4	Control temperature of pipe
5	Control temperature of nozzle
6	Control temperature of ultrasonic transducer
7	On/Off switch of control temperature
8	On/Off switch of solenoid valves
9	Emergency
10	On/Off switch of power
11	Receptacle

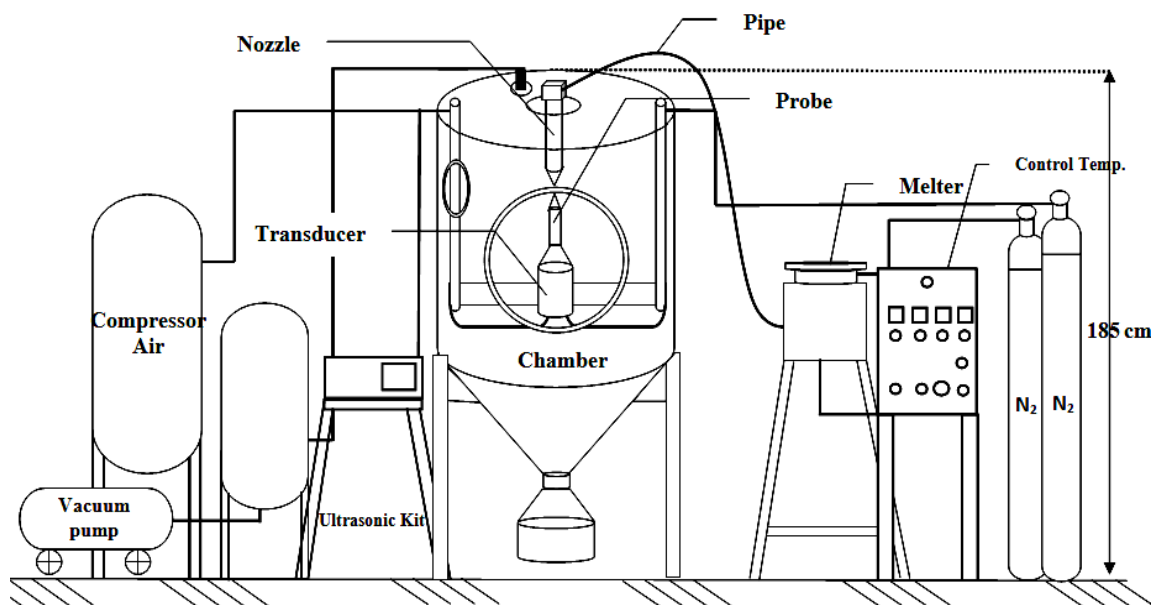
รูปที่ 2.13 แบบร่างและส่วนประกอบต่างๆของชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำโลหะ



รูปที่ 2.14 ขนาด และส่วนประกอบต่างๆของชุดวัด และควบคุมอุณหภูมิที่ได้จัดทำขึ้น

นอกจากนี้เครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันยังมีส่วนประกอบอื่นๆ ที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ระบบ vacuum pump จะใช้เป็นตัวดูดอากาศออกจากภายในถังอะตอมไมเซอร์ที่ประมาณ 50-65 cmHg ก่อนที่จะทำการอะตอมไมเซอร์ (กรณีที่ทำการศึกษาภายใต้ระบบสุญญากาศ)
2. ระบบหล่อเย็นถังอะตอมไมเซอร์ จะใช้น้ำเป็นตัวกลางในการหล่อเย็นโดยใช้ปั๊มน้ำเป็นตัวขับให้น้ำไหลวนอยู่บริเวณผนังของถังอะตอมไมเซอร์
3. ระบบหล่อเย็นอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ จะใช้ลมเย็นที่ได้จากเครื่องอัดอากาศ (air compressor) ซึ่งจะต่ออยู่กับเครื่องทำลมเย็น (air dryer) ซึ่งจะทำหน้าที่กรองความชื้นที่อยู่ในอากาศออก ทำให้ลมที่ผ่านออกไปปราศจากความชื้น และมีอุณหภูมิประมาณศูนย์องศาเซลเซียส
4. ระบบเก็บข้อมูลของอุณหภูมิ (DAQ) ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลของอุณหภูมิแต่ละจุดที่ต้องการวัด เช่น ในน้ำโลหะ, ท่อทางเดินน้ำโลหะ และหัวจ่ายน้ำโลหะ เป็นต้น เพื่อให้ทราบถึงอุณหภูมิที่แน่นอน และแม่นยำ ก่อนที่จะทำการอะตอมไมเซอร์
5. ตัวตรวจวัดออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ (oxygen sensor) จะทำหน้าที่คอยควบคุมเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ไม่ให้เกินที่กำหนดซึ่งส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันได้แสดงดังรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16 ตามลำดับ



รูปที่ 2.15 แบบร่างของเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน



รูปที่ 2.16 เครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันที่ได้จัดทำขึ้น

2.2 การทดสอบการทำงานของเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน

จากการดำเนินการออกแบบและสร้างเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันเพื่อใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ดังรายละเอียดที่กล่าวผ่านมาแล้ว ในหัวข้อนี้จะเป็นขั้นตอนการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วด้วยเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันที่ได้จัดสร้างขึ้น ผงโลหะที่ทำการทดลองผลิตคือ ดีบุก (tin) และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (lead-free solder) เช่น SAC305 โดยได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่างๆ ที่มีผลต่อขนาดรูปร่าง และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะจากการผลิตด้วยวิธีการนี้ ซึ่งตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการทดลองดังกล่าวคือ

- อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะ (melt temperature)
- อัตราการป้อนน้ำโลหะให้แก่หัวฉีด (melt feed rate)
- แอมพลิจูด (amplitude)
- ปริมาณออกซิเจนในถังอะตอมไมเซอร์ (oxygen content in the atomizer chamber)

วิธีการทดลอง ได้กำหนดแผนการทดลองเพื่อให้สอดคล้องกับตัวแปรควบคุมที่จะทำการศึกษาโดยมีลำดับการทดลองดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะคงที่ ปรับระดับแอมพลิจูด และปรับระดับอัตราการป้อนน้ำโลหะ
2. กำหนดให้อุณหภูมิการหลอมของน้ำโลหะ และปรับระดับอัตราการป้อนน้ำโลหะ
3. กำหนดให้อัตราการป้อนน้ำโลหะคงที่ ปรับระดับอุณหภูมิการหลอมของน้ำโลหะ และปรับระดับแอมพลิจูด
4. ผลิตผงโลหะภายใต้บรรยากาศที่ไม่ควบคุมปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์เปรียบเทียบกับการผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์

ในการทดสอบการทำงานของเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันเบื้องต้นจะทำการผลิตผงโลหะดีบุก เนื่องจากดีบุกมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ มีความหนืดที่ต่ำกว่าโลหะบัดกรีชนิดอื่น และมีราคาถูก จึงสามารถทำการอะตอมไมเซชันได้ง่ายกว่าโลหะชนิดอื่น ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบการทดลองเพื่อใช้ในการผลิตผงโลหะดีบุกจะแสดงดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงถึงตัวแปรควบคุมต่างๆที่ใช้ในการผลิตผงโลหะดีบุก

Materials	Melt temperature (°C)	Amplitude (%)								
		Melt feed rate (kg/hr)								
	70	75			80					
Tin	270	10	15	25	10	15	25	10	15	25
	300	10	15	25	10	15	25	10	15	25
	350	10	15	25	10	15	25	10	15	25

หมายเหตุ ค่าตัวแปรควบคุมต่างๆที่กำหนดใช้เป็นค่าที่พิจารณาตามหลักเหตุผลดังนี้

- ค่าของแอมพลิจูดที่ใช้ในการทดลองจะเลือกใช้ใน ช่วงที่สูง 70-80 % เพราะน้ำโลหะดิบก็มีความหนืดมากเมื่อเทียบกับสารละลายชนิดอื่นๆ ซึ่งสามารถทำการทดลองได้ที่แอมพลิจูดต่ำๆซึ่งถ้าแอมพลิจูดต่ำเกินไปจะส่งผลถึงการแตกตัวของน้ำโลหะ ทำให้น้ำโลหะไม่สามารถแตกตัวออกเป็นผงได้
- ค่าของอุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะที่ใช้ในการทดลองจะเลือกใช้ใน ช่วง 270-350 °C เพราะที่อุณหภูมิหลอมน้ำโลหะสูงๆจะสามารถช่วยลดค่าความหนืดและแรงตึงผิวของน้ำโลหะลงได้ จึงส่งผลทำให้ความสามารถในการแตกตัวของน้ำโลหะเพิ่มขึ้นได้
- ค่าอัตราการป้อนน้ำโลหะที่ใช้ในการทดลองจะเลือกให้อยู่ในช่วง 10-25 kg/hr. เพราะอัตราการป้อนน้ำโลหะที่สูงมากเกินไป จะทำให้น้ำโลหะไปปกคลุมที่หัวโพรบของอัลตราโซนิกในปริมาณที่มากเกินไปทำให้ความสามารถในการแตกตัวของน้ำโลหะลดลง และน้ำโลหะจะไหลเยิ้มตกลงภายในถังอะตอมไมเซอร์

ในขั้นตอนการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC 305) จะทำการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่างๆ ที่มีผลต่อขนาด รูปทรง รูปร่าง และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะ ซึ่งวิธีการทดลองได้กำหนดแผนการทดลองเพื่อให้สอดคล้องกับตัวแปรควบคุมที่จะทำการศึกษาโดยมีลำดับการทดลองดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้แอมพลิจูดที่ใช้ในการทดลองคงที่ ปรับระดับอุณหภูมิที่ใช้หลอมน้ำโลหะ และปรับระดับอัตราการป้อนน้ำโลหะ
2. ทำการศึกษาเปรียบเทียบกันระหว่างการอะตอมไมเซอร์ภายใต้บรรยากาศปกติ กับภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมออกซิเจน

ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบการทดลองเพื่อใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วจะแสดงดังในตารางที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 แสดงถึงตัวแปรควบคุมต่างๆที่ใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วภายใต้บรรยากาศปกติ

Materials	Amplitude (%)	Melt temperature (°C)	Melt feed rate (kg/hr)			
			10	15	20	25
SAC 305	70	270	10	15	20	25
		300	10	15	20	25
		350	10	15	20	25

ตารางที่ 2.3 แสดงถึงตัวแปรควบคุมต่างๆที่ใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมออกซิเจน

Materials	Amplitude (%)	Melt temperature (°C)	Melt feed rate (kg/hr)		
			15	20	25
SAC 305	70	270	15	20	25
		300	15	20	25
		350	15	20	25

2.3 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ในหัวข้อการวิจัยนี้จะกล่าวถึงวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.3.1 วัสดุ และอุปกรณ์

- แ่งดีบุกมีความบริสุทธิ์ 99.5 % และแ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC 305) จากบริษัท ไทยแลนด์สเมตติ้งแอนดรีไฟนิง จำกัด (THAISARCO)
- ก๊าซไนโตรเจน (N₂) และชุดควบคุมความดันก๊าซ (regulator)
- อุปกรณ์ safety ต่างๆ เช่น หน้ากาก, ถุงมือกันความร้อน และรองเท้าหนัง เป็นต้น

2.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันขนาด 20 kHz, 1500 วัตต์ ยี่ห้อ Sonic รุ่น VCX 1500
- Vacuum pump รุ่น ACCUVAC RD-021

- Air compressor & Air dryer รุ่น Ningbo Xinda “S” Series Oli Spray Screw Compressor
- Oxygen sensor รุ่น GB-300 Teledyne Analytical Instruments
- เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (DAQ) รุ่น TC-08 ยี่ห้อ Pico
- กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopy) รุ่น BH2 – UMA ยี่ห้อ Olympus
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกลาด (SEM) รุ่น Quanta 400, FEI
- เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค (sieve shaker) ยี่ห้อ OCTAGON DIGITAL, ASTM E11
- เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง รุ่น P600 ยี่ห้อ SARTORIUS
- เครื่องวัดปริมาณออกซิเจน (Oxygen content analysis) รุ่น RO-400 ยี่ห้อ LECO

2.4 วิธีการทดลอง

ในการขั้นตอนการทดลองจะใช้ดีบุกเป็นวัสดุต้นแบบ เนื่องจากดีบุกมีจุดหลอมเหลวต่ำ มีความหนืดน้อย และมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีชนิดอื่น ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

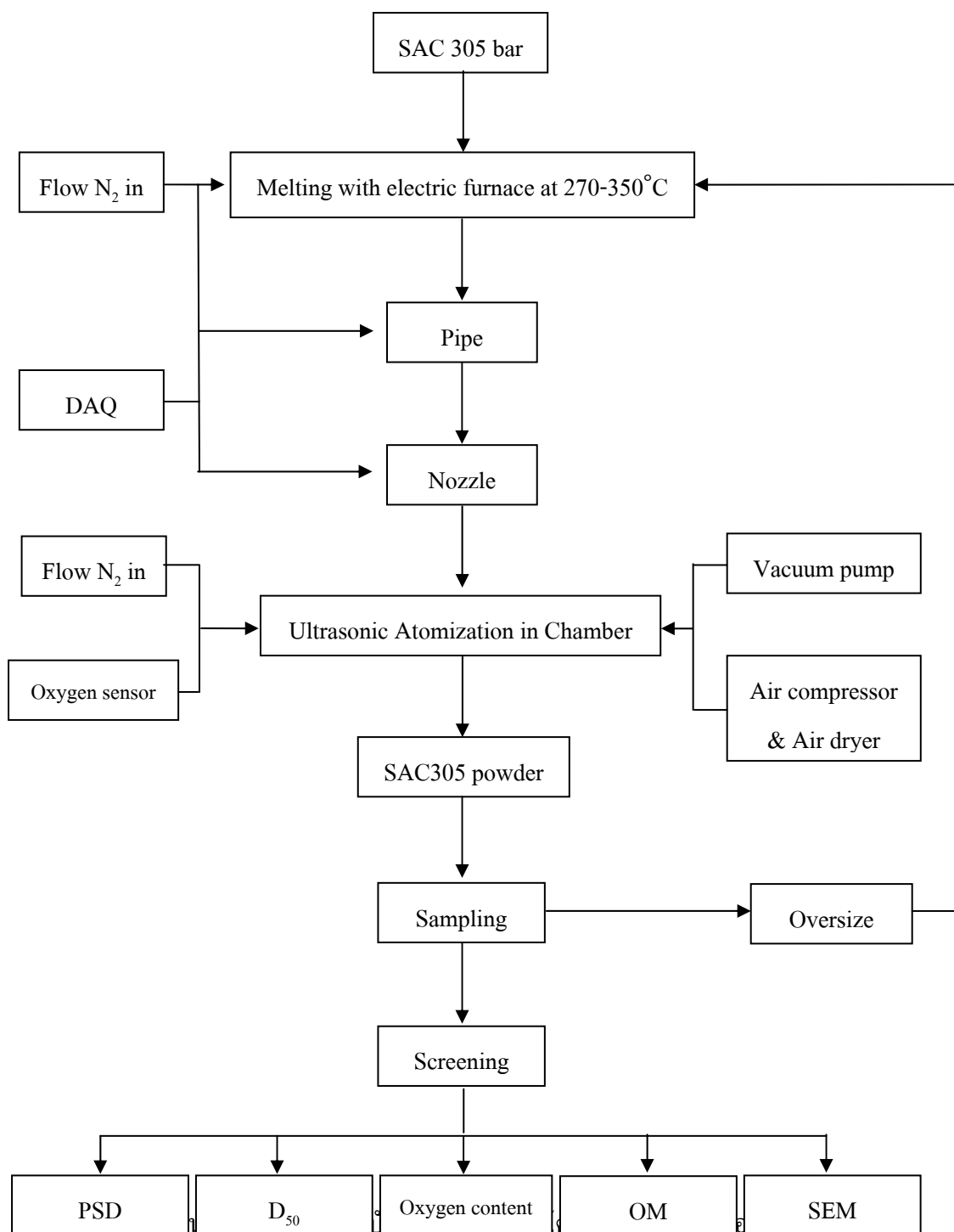
- นำแท่งดีบุก (tin bar) ไปหลอมในเตาหลอมโลหะขนาด 2000 วัตต์ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมประมาณ 270 - 350 °C
- เปิดชุดควบคุมอุณหภูมิของระบบลำเลียงน้ำโลหะซึ่งประกอบไปด้วย ท่อทางเดินน้ำโลหะ และหัวจ่ายน้ำโลหะให้ได้อุณหภูมิประมาณ 270 - 350 °C
- เปิดระบบวัดและเก็บข้อมูลของอุณหภูมิในระหว่างที่ทำการอะตอมไมเซชัน
- เปิดระบบ vacuum เพื่อดูดอากาศออกจากภายในถังอะตอมไมเซชัน (กรณีที่ทำการศึกษาภายใต้ระบบสุญญากาศ)
- เปิดระบบไนโตรเจนเพื่อ flow เข้าไปภายในถังอะตอมไมเซชัน (กรณีที่ทำการศึกษาภายใต้ระบบสุญญากาศและควบคุมเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซชัน)
- เปิดระบบเซ็นเซอร์เพื่อทำการตรวจวัดเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซชัน (กรณีที่ทำการศึกษาภายใต้ระบบสุญญากาศและควบคุมเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซชัน)

- เปิดระบบ air compressor & air dryer เพื่อนำลมไปหล่อเย็นอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ ซึ่งจะต้องควบคุมอุณหภูมิภายในทรานสดิวเซอร์ไม่ให้เกิน 50 °C
- เปิดเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อทำการอุ่นหัวโพรบให้ร้อน (preheat) พร้อมทั้งจะใช้ในการอะตอมไมเซอร์
- เปิดระบบหล่อเย็นถึงอะตอมไมเซอร์
- ทำการจ่ายน้ำโลหะให้แก่หัวฉีดโดยอาศัยแรงดันจากก๊าซไนโตรเจนจากภายนอกที่ต่อเข้าไปภายในเตาหลอมโลหะ ซึ่งอัตราการไหลของน้ำโลหะจะถูกควบคุมโดย flow meter ของหัวจ่ายก๊าซ
- หลังจากการอะตอมไมเซชัน นำผงโลหะดิบที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะ (particle size distribution), ค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะ (median particle size) ด้วยเครื่อง sieve analysis และวิเคราะห์รูปร่างรูปร่างของผงดิบ (morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscopy, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ตามลำดับ ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง 1) แท่งดิบ และ 2) แท่งโลหะบัดกรี SAC 305

ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วจะมีขั้นตอนการผลิตที่แตกต่างไปจากการผลิตผงโลหะดิบในส่วนที่มีการควบคุมบรรยากาศภายในถึงอะตอมไมเซอร์ โดยมีการป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าไปภายในถึงอะตอมไมเซอร์ ในระหว่างที่ทำการอะตอมไมเซชัน และแสดงถึงการนำผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้ไปศึกษาถึงสมบัติในด้านต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



2.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะ

ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะภายหลังจากการอะตอมไมเซชันมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค (sieve) ให้พร้อมที่จะใช้งาน
2. นำผงที่ได้จากกระบวนการอะตอมไมเซชันทั้งหมดไปชั่งตัวอย่างประมาณ 200 กรัม
3. นำผงโลหะที่ผ่านการชั่งตัวอย่างมาใส่ในเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค (sieve) ซึ่งใช้เวลาในการคัดแยกขนาดอนุภาคประมาณ 10 นาทีต่อครั้งการทดลอง และความถี่ที่ใช้ในการสั่น 8 %
4. นำผงโลหะที่ได้หลังจากกระบวนการคัดแยกขนาดอนุภาค (sieve) ใส่ถุงซิบบแยกตามขนาดเบอร์เมช (mesh) และนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่งพร้อมบันทึกข้อมูล
5. นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟด้วยโปรแกรม sigma plot 2000 เพื่อหาค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะ ซึ่งจะแสดงผลออกมาในรูปแบบของกราฟ



รูปที่ 2.19 ผงโลหะที่ผลิตได้จากกระบวนการอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชัน

2.6 การตรวจสอบลักษณะรูปร่างของผงโลหะ

ในการตรวจสอบรูปร่างของผงโลหะภายหลังจากที่ได้จากการอะตอมไมเซชันมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำผงโลหะที่ได้หลังจากกระบวนการคัดแยกขนาดอนุภาค (sieve) อยู่ในช่วง - 45 +25 ไมครอน (type 3) ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscopy) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) ตามลำดับ
2. นำภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ไปหาค่า circularity shape factor ของอนุภาคผงโลหะตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 1.7

2.7 การวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนของผงโลหะ

การวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนในผงโลหะที่ผลิตได้ สามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจน (oxygen content analysis) ยี่ห้อ LECO รุ่น RO-400 ใช้วิธีวัดค่าแบบ Inert gas fusion ตามมาตรฐาน ASTM E1409 และ E1937 ซึ่งมีหลักการคือ การหลอมโลหะตัวอย่างในเบ้ากราไฟท์ที่มีความบริสุทธิ์สูงที่อุณหภูมิ 3,000°C อย่างรวดเร็วภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อยเช่น ฮีเลียม เป็นต้น ออกซิเจนในตัวอย่างจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจากเบ้า กราไฟท์ได้เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ ส่วนไนโตรเจนจะถูกปล่อยออกมาและอยู่ในรูปโมเลกุล (N_2) จากนั้นอุปกรณ์ตรวจรู้ชนิดคลื่นอินฟราเรด (infrared detector) ซึ่งสามารถตรวจรู้ปริมาณของออกซิเจนทั้งในรูปคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์จะตรวจหาปริมาณของออกซิเจน ส่วนโมเลกุลไนโตรเจนจะถูกตรวจจับโดยเทอร์มัลคอนดักติวิตีเซลล์ (thermal conductivity cell) ซึ่งในการวิเคราะห์จะเลือกผงโลหะที่ผลิตภายใต้เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนในระหว่างการอะตอมไมเซชันต่าง ๆ กันดังนี้คือ 20.9, 10, 5, 2 และ 1.8 % ออกซิเจน ตามลำดับ ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังนี้

1. นำผงโลหะที่ได้ภายหลังจากการการอะตอมไมเซชันบรรจุใส่ถุงอะลูมิเนียมทันที เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ที่จะส่งผลทำให้ปริมาณของออกซิเจนในผงโลหะเพิ่มขึ้น
2. เติมสารดูดออกซิเจน (oxygen absorber) ลงในถุงอะลูมิเนียมเพื่อช่วยป้องกันการเกิดออกไซด์กับผงโลหะ และช่วยยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาผงโลหะไว้ได้นานยิ่งขึ้น
3. นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจน ผลของปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จะแสดงออกมาในหน่วย ppm.

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง ซึ่งได้แก่ผลของอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่างๆ เช่น อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะ อัตราการป้อนน้ำโลหะ แอมป์ลิจูด และเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจน ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และรูปร่างของผงโลหะ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 วิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะ (Particle size distribution)

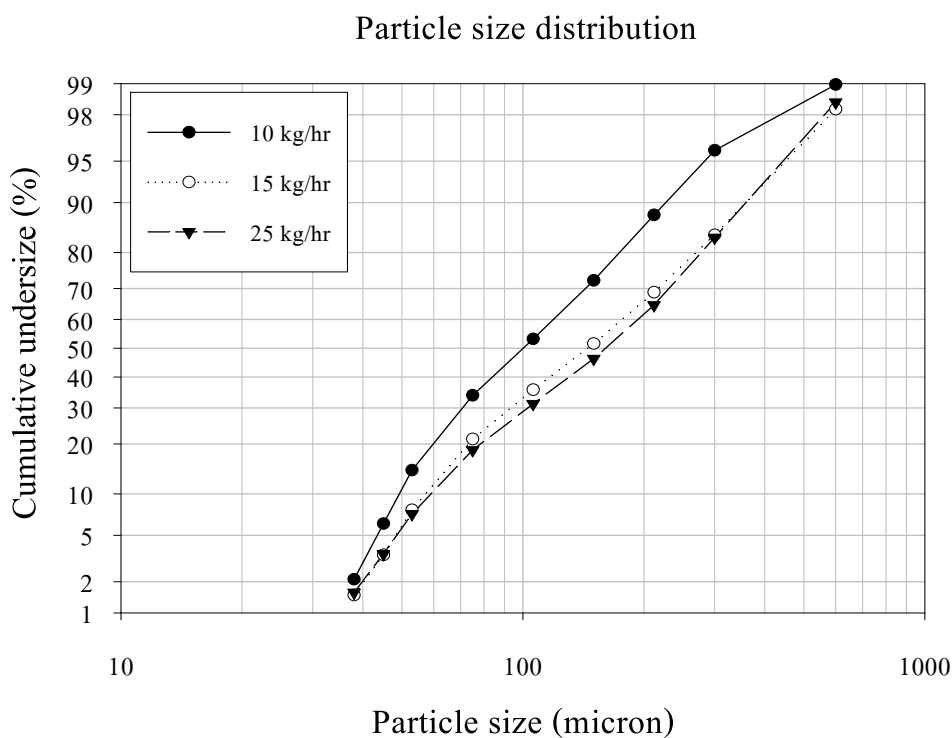
ผงโลหะที่ผลิตได้จากเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อการทำวิจัยนี้ มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันออกไปตามสมบัติเฉพาะของโลหะแต่ละชนิด และตัวแปรควบคุมต่างๆที่ใช้ในการทดลอง การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคผงโลหะกระทำโดยใช้ชุดตะแกรงตามมาตรฐาน ASTM E 11 ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะผลิตโลหะดีบุก และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) ตามลำดับ

3.1.1 ผงโลหะดีบุก

จากการศึกษาถึงตัวแปรควบคุมต่างๆที่ใช้ในการผลิตผงโลหะดีบุก ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะ ตัวแปรที่ใช้ในการผลิต คืออุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะที่ 270, 300 และ 350 °C โดยใช้อัตราการป้อนน้ำโลหะ 10, 15, 25 kg/hr และแอมป์ลิจูด 70, 75, 80 % ตามลำดับ ซึ่งในการนำเสนอข้อมูลของการกระจายตัวของขนาดอนุภาค จะทำการเปรียบเทียบกันระหว่างตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลอง และนำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์โดยใช้โปรแกรม sigma plot ซึ่งกำหนดให้แกน x เป็น log normal และแกน y เป็นเปอร์เซ็นต์ของ cumulative undersize ตามลำดับ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะดีบุกทุกขนาดที่ได้จากกระบวนการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน โดยใช้ตัวแปรควบคุมของอัตราการป้อนน้ำโลหะที่ 10, 15, 25 kg/hr อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะ 300 °C และแอมป์ลิจูด 75 % พบว่าเมื่ออัตราการป้อนน้ำโลหะสูงขึ้นจาก 10, 15 และ 25 kg/hr การกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะมีแนวโน้มกว้างขึ้นตามลำดับพิจารณาได้จากความชันของเส้นกราฟที่อัตราการป้อนน้ำโลหะ 10 kg/hr จะมีความชันมากที่สุด

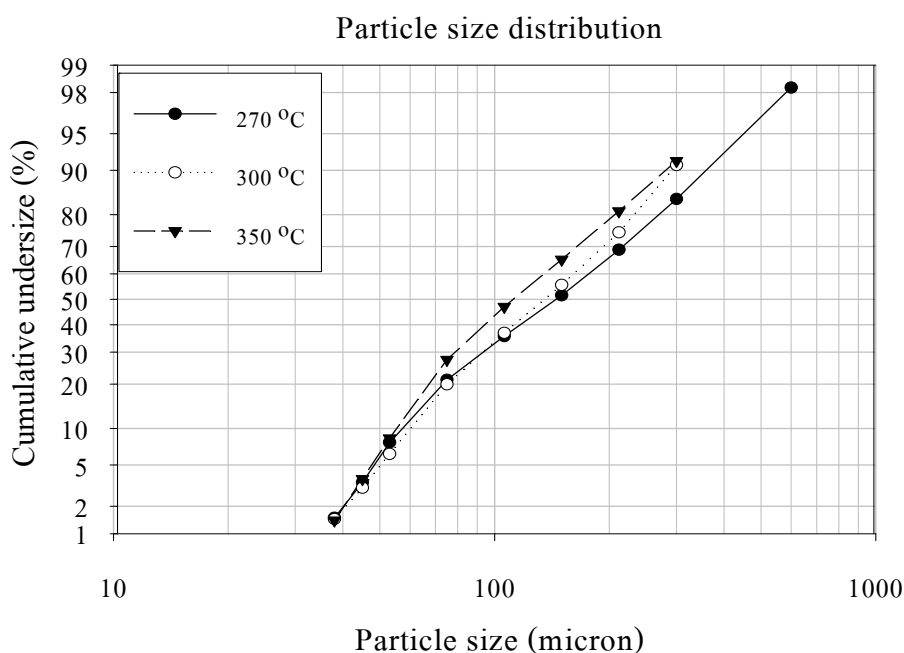
และที่อัตราการป้อนน้ำโลหะ 25 kg/hr จะมีความชันน้อยที่สุด แสดงว่าอัตราการป้อนน้ำโลหะจะมีผลต่อค่าการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะดิบที่ผลิตได้ด้วยกระบวนการนี้ และผงโลหะดิบที่ผลิตได้จะมีช่วงการกระจายตัวเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคหยาบใหญ่กว่า 20 ไมครอน และกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคละเอียดเล็กกว่า 20 ไมครอน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจจะเกิดจากความสามารถของตะแกรงร้อนที่ไม่สามารถแยกผงโลหะที่มีความละเอียดออกได้ หรืออาจจะเกิดการอุดตันของตะแกรงร้อน (sieve blocked) ส่งผลทำให้ผงขนาดเล็กไม่สามารถผ่านไปได้ จึงทำให้ปริมาณผงโลหะในช่วงนี้หายไปดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะดิบทุกขนาดที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยใช้ตัวแปรควบคุมของอัตราการป้อนน้ำโลหะ 10, 15 และ 25 kg/hr ตามลำดับ

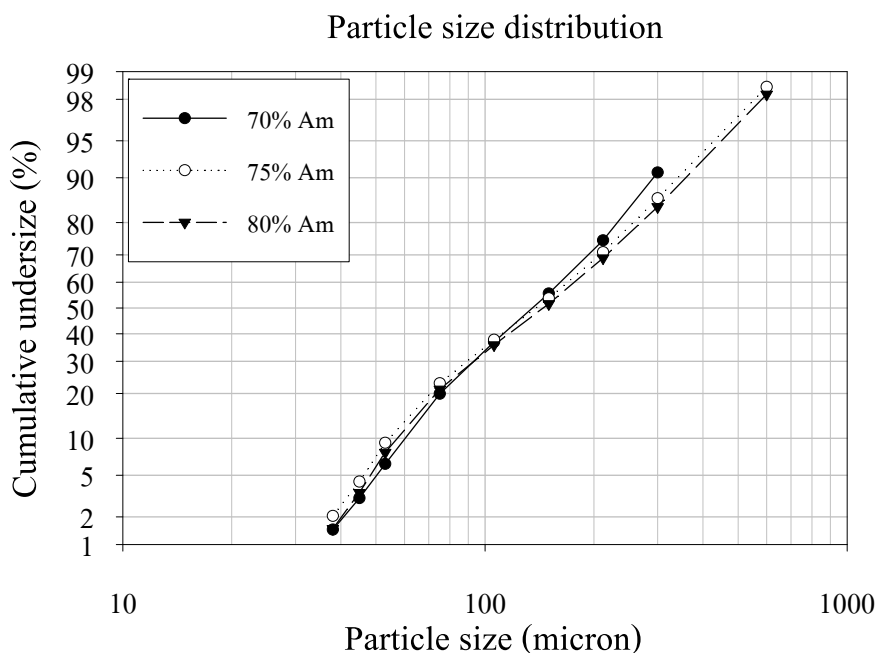
การวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะดิบโดยใช้อุณหภูมิกการหลอมน้ำโลหะที่ 270, 300 และ 350 °C อัตราการป้อนน้ำโลหะ 15 kg/hr และแอมพลิจูด 75 % ดังแสดงในรูปที่ 3.2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้หลอมน้ำโลหะสูงขึ้น การกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะดิบจะมีช่วงการกระจายตัวที่แคบลง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟ และผงโลหะดิบ

ที่ผลิตได้จะแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคหยาบใหญ่กว่า 30 ไมครอน และกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคละเอียดเล็กกว่า 30 ไมครอน ดังนั้นแสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมน้ำโลหะมีผลต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะดิบที่ผลิตได้



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะดิบทุกขนาดที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยใช้ตัวแปรควบคุมของอุณหภูมิซูเปอร์ฮีทที่ 270, 300 และ 350 °C ตามลำดับ

การวิเคราะห์ผลของแอมพลิฟิเคชันที่ใช้ในการทดลองต่อค่าการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะดิบที่ผลิตได้โดยใช้ตัวแปรควบคุมของแอมพลิฟิเคชันที่ 70, 75 และ 80 % อัตราการป้อนน้ำโลหะ 15 kg/hr และที่อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะ 300 °C ดังแสดงในรูปที่ 3.3 พบว่าเมื่อแอมพลิฟิเคชันเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะดิบที่ผลิตได้จะมีช่วงการกระจายตัวที่กว้างขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความชันของเส้นกราฟที่แตกต่างกัน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจจะเกิดจากการใช้พลังงานที่สูงจนเกินไปในระหว่างการอะตอมไมเซชัน จึงทำให้หยดน้ำโลหะที่กระเด็นออกจากหัวโพรบของอัลตราโซนิกเกิดการ satellites ขึ้นจึงทำได้ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะที่กว้างขึ้น (ลักษณะการเกิด satellites ในผงโลหะดูได้จากภาพถ่าย OM ในหัวข้อที่ 3.3.1) และผงโลหะที่ผลิตได้จะมีช่วงการกระจายตัวเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 20 ไมครอน และกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 20 ไมครอน

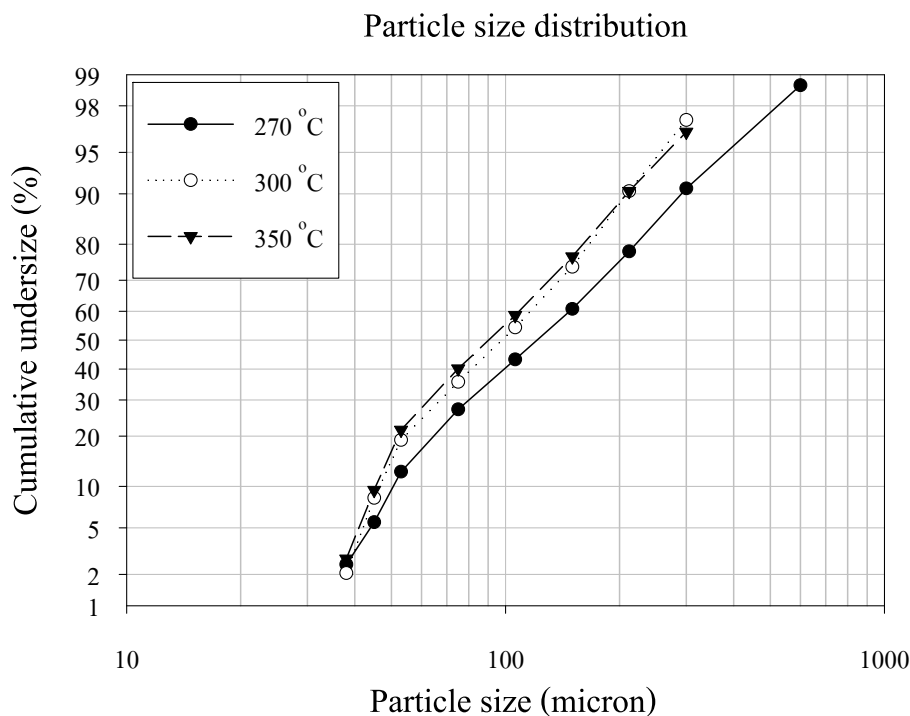


รูปที่ 3.3 กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะดีบุกทุกขนาดที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยใช้ตัวแปรควบคุมของแอมพลิจูดที่ 70, 75 และ 80 % ตามลำดับ

3.1.2 ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305)

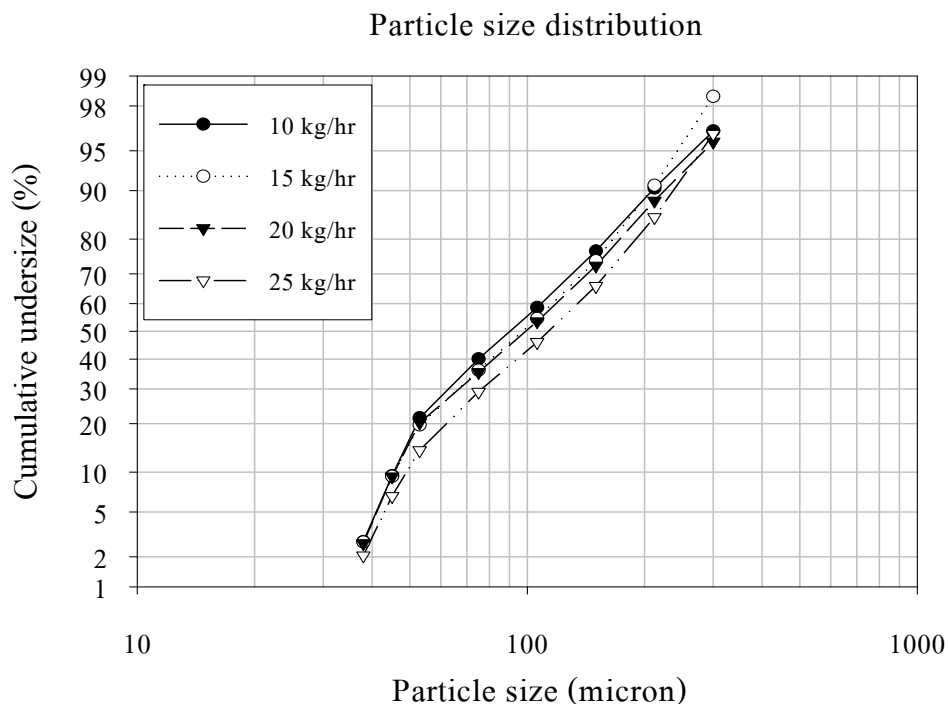
ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) จะทำการผลิตที่บรรยากาศปกติ โดยไม่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ (20.9 %) และผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ (5-7 %) ในที่นี้จะแสดงผลการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตภายใต้บรรยากาศไม่ได้มีการควบคุมปริมาณออกซิเจน โดยใช้ตัวแปรควบคุมของอุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะที่ 270, 300 และ 350 °C อัตราการป้อนน้ำโลหะ 10 kg/hr และแอมพลิจูด 70 % พบว่าเมื่ออุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะเพิ่มขึ้นจาก 270 เป็น 350 °C การกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้จะมีช่วงการกระจายตัวที่แคบลง พิจารณาได้จากความชันของเส้นกราฟที่แตกต่างกัน พบว่าที่อุณหภูมิหุ้ปเปอร์อีทสูงสุด 350 °C กราฟความชันมากที่สุด และที่อุณหภูมิ 270 °C กราฟจะมีความชันน้อยที่สุด และผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้จะมีช่วงการกระจายตัวเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 25 ไมครอน และกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 25 ไมครอน สาเหตุอาจจะเกิดจากความสามารถของตะแกรงร้อนที่ใช้ในการคัดแยกขนาดอนุภาค ที่ไม่สามารถแยกผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีความละเอียดออกได้ หรืออาจจะเกิดการอุดตันของตะแกรงร้อน

ส่งผลทำให้ผงขนาดเล็กไม่สามารถผ่านรูเปิดของตะแกรงร้อนไปได้ จึงทำให้ปริมาณผงโลหะในช่วงนี้หายไปดังแสดงในรูปที่ 3.4



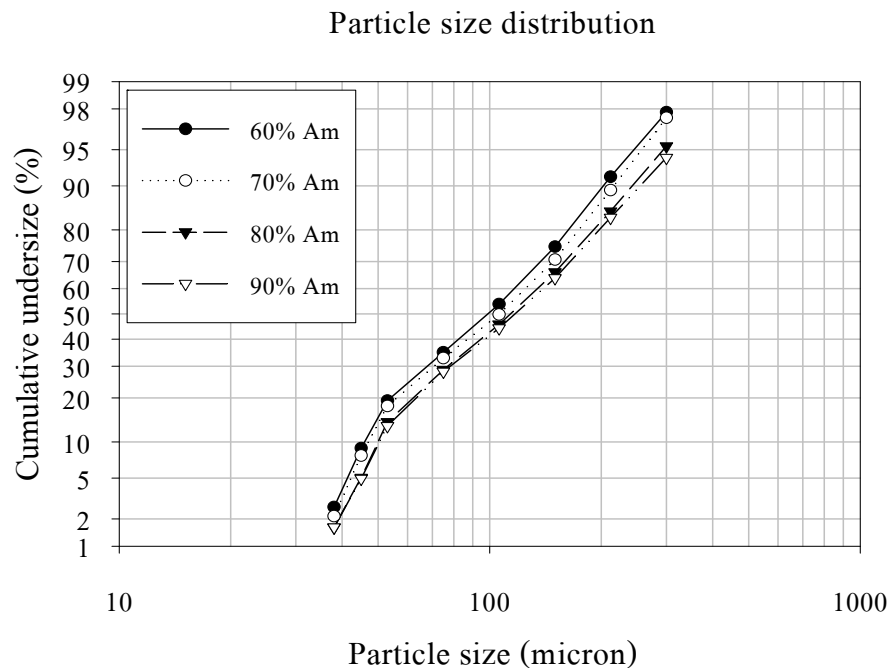
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) ทุกขนาดที่ได้จากการผลิตภายใต้บรรยากาศปกติ (20.9 % O_2) โดยใช้อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะที่ 270, 300 และ 350 °C ตามลำดับ

การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้ต่ออัตราการป้อนน้ำโลหะที่ใช้ในการทดลองที่ 10, 15, 20 และ 25 kg/hr โดยใช้อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะ 350 °C และแอมพลิจูด 70 % พบว่าเมื่ออัตราการป้อนน้ำโลหะสูงขึ้นการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้จะมีช่วงการกระจายตัวที่กว้างขึ้น พิจารณาได้จากความชันของเส้นกราฟที่แตกต่างกัน คือที่อัตราการป้อนน้ำโลหะ 10 kg/hr จะมีความชันมากที่สุด และที่อัตราการป้อนน้ำโลหะ 25 kg/hr จะมีความชันน้อยที่สุด และผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้จะมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 20 ไมครอน และกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 20 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) ทุกขนาดที่ได้จากการผลิตภายใต้บรรยากาศปกติ (20.9% O_2) โดยใช้ตัวแปรควบคุมของอัตราการป้อนน้ำโลหะที่ 10, 15, 20 และ 25 kg/hr ตามลำดับ

ผลของการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตภายใต้ตัวแปรควบคุมของแอมพลิจูดที่ 60, 70, 80 และ 90 % โดยใช้อัตราการป้อนน้ำโลหะ 25 kg/hr และอุณหภูมิในการหลอมน้ำโลหะ 300 °C พบว่าเมื่อแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นจาก 60 % เป็น 90 % การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้จะมีช่วงการกระจายตัวที่กว้างขึ้นเล็กน้อย ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของแอมพลิจูดที่ใช้ในการทดลองจะส่งผลต่อค่าการกระจายตัวของผงโลหะที่ผลิตได้น้อยมาก เนื่องจากว่าในกระบวนการอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชัน การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ในการอะตอมไมเซชัน อัตราการป้อนน้ำโลหะ และอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมน้ำโลหะเป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อค่าการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้ ซึ่งผลจากการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย อาจเกิดจากการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการอะตอมไมเซชัน จึงทำให้น้ำโลหะเกิดการ satellites ขึ้น จึงทำให้ได้ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะที่กว้างขึ้นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการกระจายตัวของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) ทุกขนาดที่ได้จากการผลิตภายใต้บรรยากาศปกติ (20.9% O_2) โดยใช้ตัวแปรควบคุมของแอมพลิจูดที่ 60, 70, 80 และ 90 % ตามลำดับ

3.2 วิเคราะห์ขนาดเฉลี่ยของขนาดอนุภาคผงโลหะ (Median particle size)

ในการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรควบคุมต่างๆที่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะ โดยในปี 1962, Lang's ได้ศึกษาพบว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวของน้ำโลหะ (surface tension) ความหนาแน่นของน้ำโลหะ (density) และความถี่ที่ใช้ในการอะตอมไมเซชัน และในปี 2001, Rajan และ Pandit ได้ศึกษาเพิ่มเติมพบว่านอกจากที่ Lang's ได้กล่าวเอาไว้ ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย คืออัตราการป้อนน้ำโลหะ (melt feed rate) ความหนืดของน้ำโลหะ (viscosity) และการสั่นของแอมพลิจูด (vibrational amplitude) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาอุณหภูมิการหลอมของน้ำโลหะที่จะส่งผลต่อค่าความหนืด อัตราการป้อนน้ำโลหะ และแอมพลิจูดที่ใช้ในการอะตอมไมเซชันตามลำดับ ค่าที่ได้จากการทดลองของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้จากกระบวนการอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชันนี้จะแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะดีบุกที่ได้จากกระบวนการผลิตที่สภาวะควบคุมของตัวแปรต่างๆ

Type	Median particle size (D_{50} , μm)								
	Melt temperature ($^{\circ}\text{C}$)			Melt feed rate (kg/kr)			Amplitude (%)		
	270	300	350	10	15	25	70	75	80
Tin	145	138	115	102	142	145	138	145	145
	142	130	102	115	140	145	130	140	142

ตารางที่ 3.2 แสดงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ที่ได้จากการผลิตภายใต้บรรยากาศปกติที่สภาวะควบคุมของตัวแปรต่างๆ โดยกำหนดให้แอมพลิจูดคงที่ 70 %

Median particle size (D_{50} , μm)				
Melt temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Melt feed rate (kg/kr)			
	10	15	20	25
270	85	90	112	106
	120	113	100	110
	103	104	108	108
300	100	92	103	106
	96	107	102	105
	98	96	100	105
350	90	98	100	105
	95	94	99	105
	90	100	100	100

ตารางที่ 3.3 แสดงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ที่สภาวะควบคุมของอุณหภูมิหลอมน้ำโลหะ 300 $^{\circ}\text{C}$ และอัตราการป้อนน้ำโลหะ 25 kg/hr

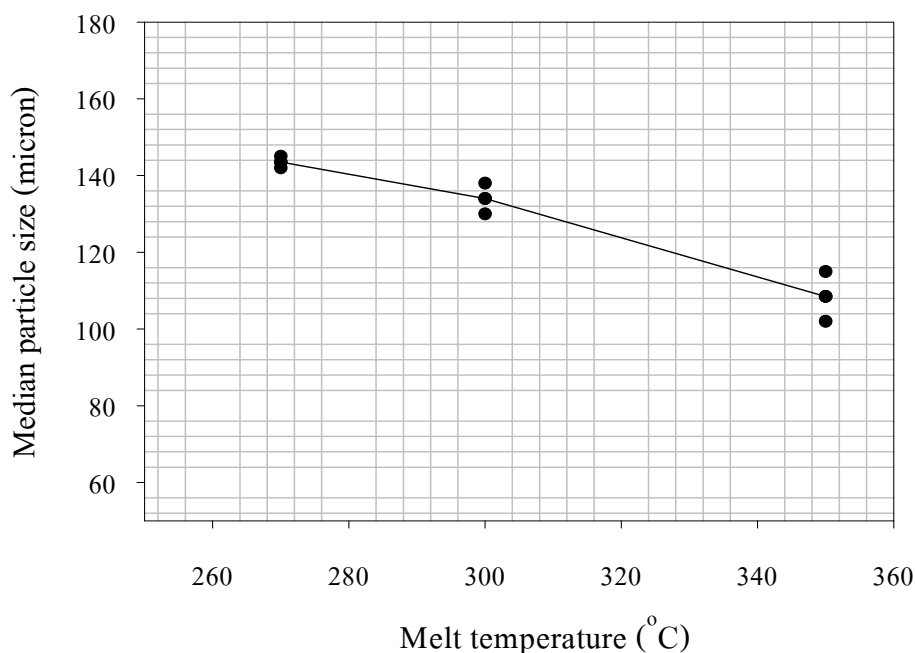
Median particle size (D_{50} , μm)				
Type	Amplitude (%)			
	60	70	80	90
SAC305	100	105	115	117
	98	105	115	117

ตารางที่ 3.4 แสดงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ที่ได้จากการผลิตภายใต้บรรยากาศควบคุมออกซิเจน (5-7 %) ที่สภาวะควบคุมของตัวแปรต่างๆ โดยกำหนดให้แอมพลิฟูดคองที่ 70 %

Median particle size (D_{50} , μm)			
Melt temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Melt feed rate (kg/kr)		
	15	20	25
270	110	135	140
	115	140	145
300	114	125	135
	115	126	138
350	110	125	130
	110	125	132

3.2.1 ผลของอุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะดีบุก

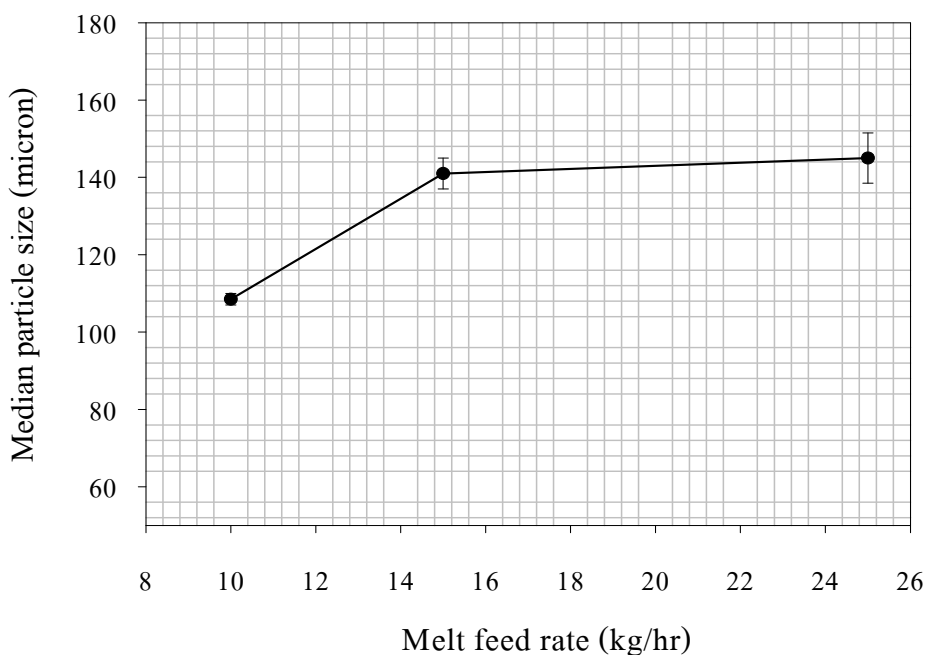
จากการศึกษาตัวแปรควบคุมของอุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะดีบุกที่ 270, 300 และ 350 $^{\circ}\text{C}$ โดยใช้อัตราการป้อนน้ำโลหะ 10-15 kg/hr และแอมพลิฟูด 75 % พบว่าเมื่ออุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะสูงขึ้น จะทำให้ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะดีบุกที่ผลิตได้มีค่าลดลง เช่นที่อุณหภูมิการหลอม 270 $^{\circ}\text{C}$ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ได้ประมาณ 143 ไมครอน และที่อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะ 350 $^{\circ}\text{C}$ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ได้ประมาณ 108 ไมครอน สาเหตุเนื่องจากเมื่อน้ำโลหะมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงขึ้น ความหนืดและแรงตึงผิวของน้ำโลหะจะลดลง จึงส่งผลทำให้น้ำโลหะที่ได้รับการกระตุ้นด้วยความถี่สามารถแตกตัวออกเป็นหยดที่มีขนาดเล็กเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ได้ผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง ซึ่งผลที่ได้จะมีความสอดคล้องกับสมการของ Lang's ที่เสนอไว้ว่าขนาดเฉลี่ยของผงโลหะจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นและแรงตึงผิวของน้ำโลหะลดลงดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุกที่อุณหภูมิหลอมน้ำโลหะต่างกัน

3.2.2 ผลของอัตราการป้อนน้ำโลหะต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะดีบุก

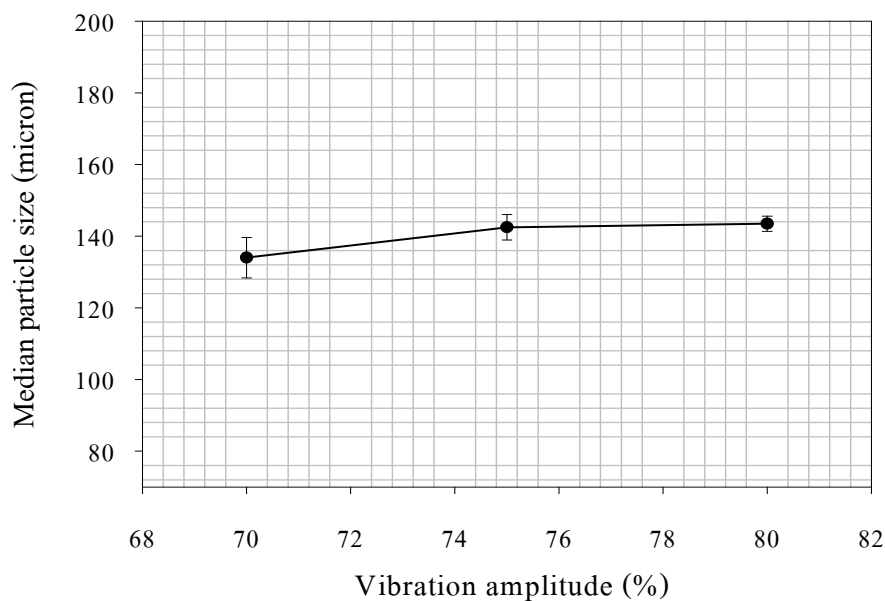
จากการศึกษาตัวแปรของอัตราการป้อนน้ำโลหะที่ 10, 15 และ 25 kg/hr โดยใช้ อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะ 300 °C และแอมพลิจูด 75 % พบว่าเมื่ออัตราการป้อนน้ำโลหะสูงขึ้น ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะดีบุกที่ผลิตได้จะมีค่า ตัวอย่างเช่น ที่อัตราการป้อนน้ำโลหะ 10 kg/hr ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้ประมาณ 108 ไมครอน และที่อัตราการป้อนน้ำโลหะ 25 kg/hr ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้ประมาณ 145 ไมครอน ซึ่งสาเหตุอาจจะเกิดจากเมื่ออัตราการป้อนน้ำโลหะสูงขึ้น จะทำให้น้ำโลหะไปปกคลุมที่ปลายหัวโพรบของอัตราไซคลิกเพิ่มขึ้น และเกิดเป็นฟิล์มที่หนาขึ้น จึงส่งผลทำให้ความสามารถในการแตกตัวออกเป็นหยดที่มีขนาดเล็กของน้ำโลหะลดลง จึงส่งผลทำให้ได้ผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นเมื่อมีการป้อนน้ำโลหะมากขึ้น ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุกที่อัตราการป้อนน้ำโลหะต่างกัน

3.2.3 ผลของแอมพลิฟิเคชันต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะดีบุก

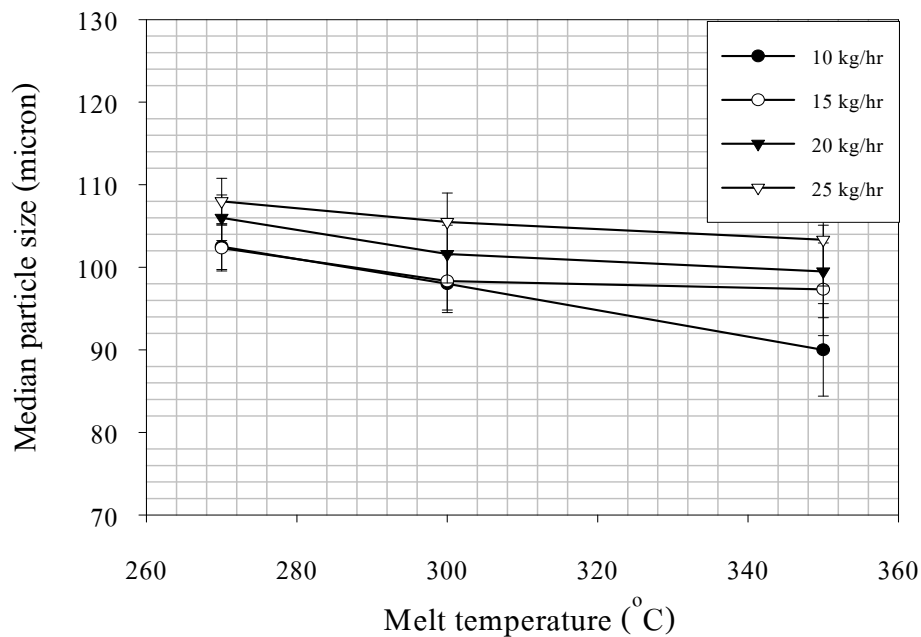
จากการศึกษาตัวแปรของแอมพลิฟิเคชันที่ใช้ในการอะตอมไมเซชันที่ 70, 75 และ 80 % โดยใช้อุณหภูมิหลอมน้ำโลหะ 300 °C และอัตราการป้อนน้ำโลหะ 15 kg/hr พบว่าเมื่อแอมพลิฟิเคชันเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเล็กน้อย ยกตัวอย่าง เช่นที่แอมพลิฟิเคชัน 70% ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้ประมาณ 134 ไมครอน และที่แอมพลิฟิเคชัน 80% ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้ประมาณ 143 ไมครอน ซึ่งหากพิจารณาในทางทฤษฎีเกี่ยวกับโลหะผงแล้วพบว่าขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เพราะตัวแปรที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ ค่าความหนืด แรงตึงผิวของน้ำโลหะ และอัตราการป้อนน้ำโลหะเป็นสิ่งสำคัญ ส่วนอิทธิพลของแอมพลิฟิเคชันที่ใช้ในการทดลองจะส่งต่อขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้น้อยมาก ซึ่งผลจากการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยอาจจะเกิดจากการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการอะตอมไมเซชัน จึงทำให้หยดน้ำโลหะเกิดการ satellites ขึ้น จึงทำให้ได้ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะดีบุกที่แอมพลิจูดต่างกัน

3.2.4 ผลของอุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC 305) ภายใต้บรรยากาศไม่ควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน

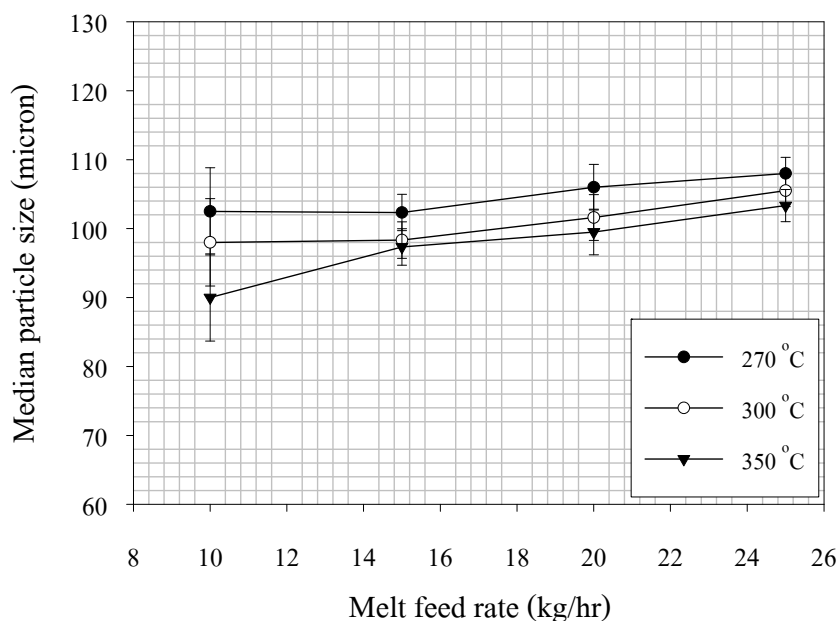
ในการศึกษาถึงตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการผลิตผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมน้ำโลหะ 270, 300 และ 350 °C โดยใช้อัตราการป้อนน้ำโลหะ 10, 15, 20 และ 25 kg/hr และใช้แอมพลิจูดในการอะตอมไมเซชัน 70 % ภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์สามารถแสดงดังรูปที่ 3.10 จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิหลอมน้ำโลหะเพิ่มขึ้น ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้จะมีค่าลดลง ตัวอย่างเช่นพิจารณาที่อัตราการป้อนน้ำโลหะ 10 kg/hr เท่ากัน ที่อุณหภูมิหลอมน้ำโลหะ 270 °C ขนาดเฉลี่ยผงโลหะที่ผลิตได้ประมาณ 102 ไมครอน และที่อุณหภูมิหลอมน้ำโลหะ 350 °C ขนาดเฉลี่ยผงโลหะที่ผลิตได้ประมาณ 90 ไมครอน สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อน้ำโลหะมีอุณหภูมิการหลอมที่สูงขึ้น ความหนืดและแรงตึงผิวของน้ำโลหะจะลดลง จึงทำให้น้ำโลหะสามารถที่จะแตกตัวออกเป็นหยดที่มีขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ได้ผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง เมื่ออุณหภูมิหลอมน้ำโลหะเพิ่มขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) ที่อุณหภูมิหลอมน้ำโลหะต่างกันภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน

3.2.5 ผลของอัตราการป้อนน้ำโลหะต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC 305 ภายใต้บรรยากาศไม่ควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน

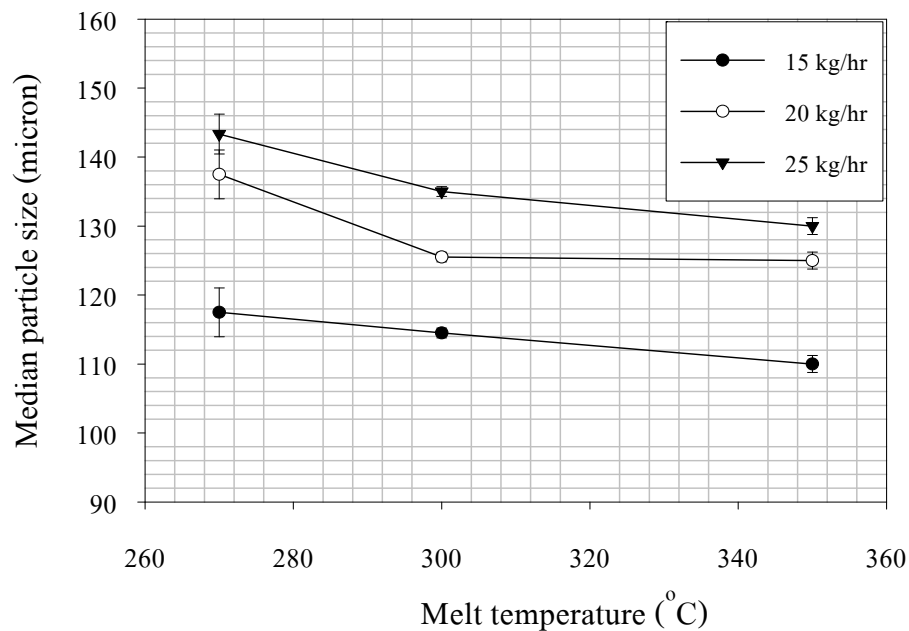
จากการศึกษาตัวแปรของอัตราการป้อนน้ำโลหะที่ 10, 15, 20 และ 25 kg/hr ที่อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะ 270, 300 และ 350 °C โดยใช้แอมพลิฟิแคชัน 70 % พบว่าเมื่ออัตราการป้อนน้ำโลหะเพิ่มขึ้น ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะเท่ากัน 350 °C ที่อัตราการป้อนน้ำโลหะ 10 kg/hr ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้ประมาณ 90 ไมครอน และที่อัตราการป้อนน้ำโลหะ 25 kg/hr ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้ประมาณ 104 ไมครอน ซึ่งอธิบายว่าเมื่ออัตราการป้อนน้ำโลหะสูงขึ้น จะทำให้น้ำโลหะไปปกคลุมที่ปลายหัวโพรบของอัตราโซนิกเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดเป็นฟิล์มที่หนาขึ้น จึงส่งผลทำให้ความสามารถในการแตกตัวออกเป็นหยดที่มีขนาดเล็กของฟิล์มน้ำโลหะลดลง จึงทำให้ได้ผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น เมื่ออัตราการป้อนน้ำโลหะเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อัตราการป้อนน้ำโลหะต่างกัน ภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน

3.2.6 ผลของอุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC 305 ภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน

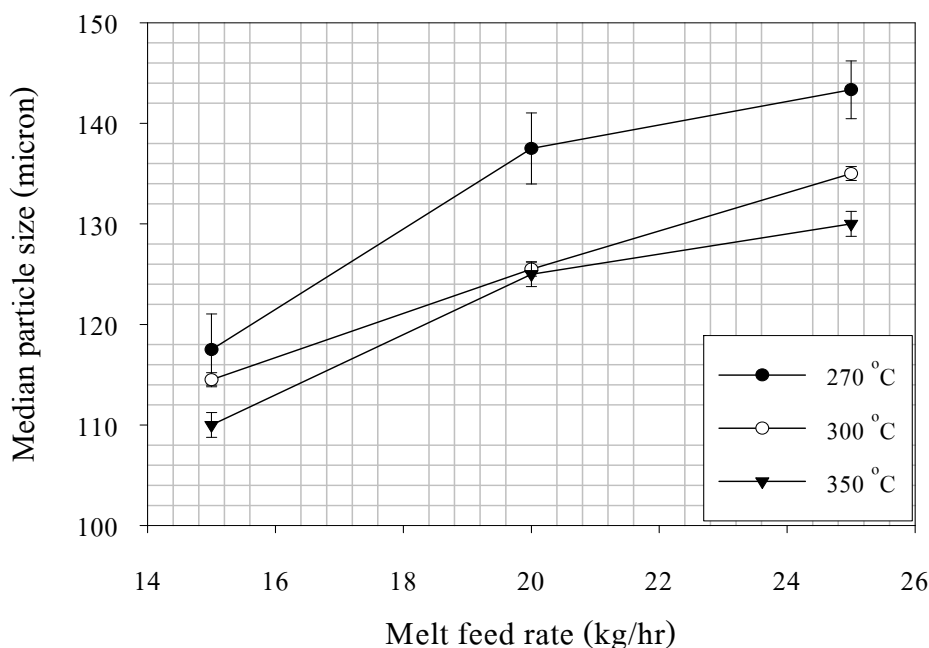
จากการศึกษาตัวแปรของอุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะที่ 270, 300 และ 350 °C โดยใช้แอมป์ลิจูด 70 % และอัตราการป้อนน้ำโลหะ 15, 20, 25 kg/hr พบว่าเมื่ออุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะเพิ่มขึ้น ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้มีค่าลดลง ยกตัวอย่างเช่น ที่อัตราการป้อนน้ำโลหะเท่ากับ 20 kg/hr ที่อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะ 270 °C ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้ประมาณ 138 ไมครอน และที่อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะ 350 °C ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้ประมาณ 125 ไมครอน ซึ่งสาเหตุอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใช้ในหลอมน้ำโลหะที่สูงขึ้น จึงทำให้ความหนืดของน้ำโลหะและแรงตึงผิวของน้ำโลหะมีค่าน้อยลง ส่งผลทำให้น้ำโลหะสามารถที่จะแตกตัวออกเป็นหยดที่มีขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้โดยกระบวนการนี้มีขนาดอนุภาคที่เล็กลง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมน้ำโลหะเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อุณหภูมิหลอมน้ำโลหะต่างกันภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน

3.2.7 ผลของอัตราการป้อนน้ำโลหะต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว SAC 305 ภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน

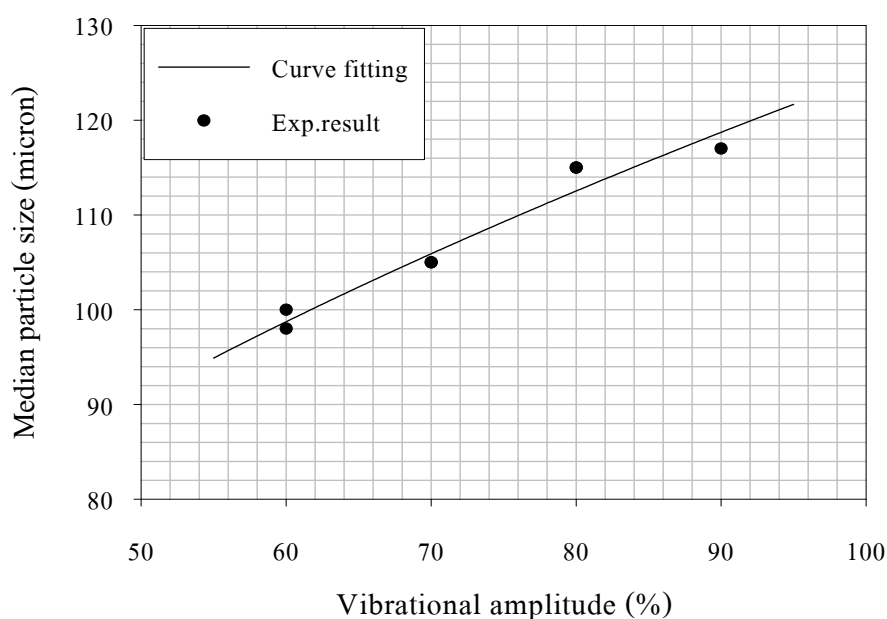
จากการศึกษาตัวแปรของอัตราการป้อนน้ำโลหะที่ 15, 20 และ 25 kg/hr ที่อุณหภูมิหลอมน้ำโลหะ 270, 300 และ 350 °C โดยใช้แอมพลิฟิแคชัน 70 % พบว่าเมื่ออัตราการป้อนน้ำโลหะเพิ่มสูงขึ้น ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้จะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น ยกตัวอย่างเช่นที่อุณหภูมิหลอมน้ำโลหะเท่ากันที่ 350 °C ที่อัตราการป้อนน้ำโลหะ 15 kg/hr ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้ประมาณ 110 ไมครอน และที่อัตราการป้อนน้ำโลหะ 25 kg/hr ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้ประมาณ 130 ไมครอน สาเหตุเกิดจากเมื่ออัตราการป้อนน้ำโลหะเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้น้ำโลหะไปปกคลุมที่ปลายหัวโพรบของอัตราไซนิคเพิ่มมากขึ้น และเกิดเป็นฟิล์มที่หนาขึ้น จึงส่งผลทำให้ความสามารถในการแตกตัวของฟิล์มน้ำโลหะลดลง จึงทำให้ได้ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่ออัตราการป้อนน้ำโลหะสูงขึ้น ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงได้รูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 กราฟแสดงขนาดเฉลี่ย ของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่อัตราการป้อนน้ำโลหะต่างกัน ภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน

3.2.8 ผลของแอมพลิฟูดต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305)

ในการศึกษาถึงตัวแปรของแอมพลิฟูดที่ใช้ในการอะตอมไมเซชันที่ 60, 70, 80 และ 90 % โดยใช้อุณหภูมิหลอมน้ำโลหะที่ 300 °C และมีอัตราการป้อนน้ำโลหะ 20 kg/hr ซึ่งทำการทดลองภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีการควบคุมเปอร์เซ็นต์ภายในถังอะตอมไมเซชัน พบว่าเมื่อแอมพลิฟูดเพิ่มขึ้น ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้มีขนาดอนุภาคที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เช่นที่แอมพลิฟูด 60% ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 100 ไมครอน และที่แอมพลิฟูด 90% ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 117 ไมครอน เนื่องจากในกระบวนการอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชัน ตัวแปรที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ ค่าความหนืด แรงตึงผิวของน้ำโลหะ และอัตราการป้อนน้ำโลหะเป็นหลัก ส่วนอิทธิพลของแอมพลิฟูดที่ใช้ในการทดลองจะส่งผลต่อขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้น้อยมาก ซึ่งจากผลการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยอาจจะเกิดจากการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการอะตอมไมเซชัน จึงทำให้หยดน้ำโลหะเกิดการ satellites ขึ้น จึงทำให้ได้ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.14

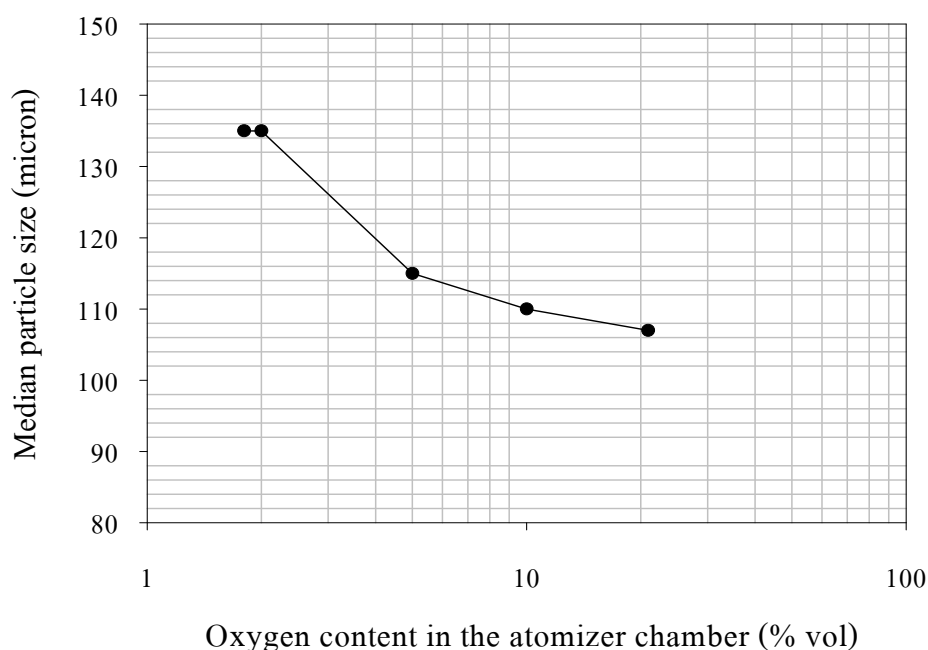


รูปที่ 3.14 กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) ที่แอมพลิจูดต่างกัน

3.2.9 ผลของเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนต่อค่าเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์กับค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้จากการะบวนการนี้ โดยใช้อุณหภูมิหลอมเหลวน้ำโลหะ 300 °C อัตราการป้อนน้ำโลหะ 25 kg/hr และแอมพลิจูด 70 % พบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนลดลง ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ที่ผลิตได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ตัวอย่างเช่นที่ 20.9 % O₂ ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้ประมาณ 110 ไมครอน และที่ 1.8 % O₂ ขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้ประมาณ 135 ไมครอน เนื่องจากผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตภายใต้บรรยากาศควบคุมเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์นั้น โดยส่วนใหญ่จะมีรูปร่างเป็นเม็ดกลม (spherical shape) และผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตภายใต้บรรยากาศปกติไม่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์นั้นจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (irregular shape) เช่นมีรูปร่างเป็นหยดน้ำ (tear drop), ลิกาเมนต์ (ligament) (สามารถดูภาพประกอบได้ในหัวข้อที่ 3.3) ถ้าหากเปรียบเทียบกันระหว่างความสามารถในการลอดผ่านรูเปิดของตะแกรงร่อน (sieve) ของอนุภาคทรงกลมกับอนุภาคที่มีรูปร่างไม่แน่นอนนั้น ผงโลหะที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมจะสามารถลอดผ่านรูเปิดของตะแกรงร่อนได้ยากกว่าผงโลหะที่มีรูปร่างไม่

แน่นอน เพราะอนุภาคทรงกลมจะมีพื้นที่ที่เท่ากันทุกด้าน ส่วนอนุภาคที่มีรูปร่างไม่แน่นอนจะมีพื้นที่ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ในระหว่างการคัดแยกขนาดอนุภาคนั้น ผงโลหะที่มีรูปร่างไม่แน่นอนสามารถที่จะลอดผ่านรูเปิดของตะแกรงร่อนได้ง่ายกว่า จึงส่งผลทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตภายใต้บรรยากาศที่ไม่ได้ควบคุมปริมาณออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์นั้นมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าผงโลหะที่ผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจน ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.15



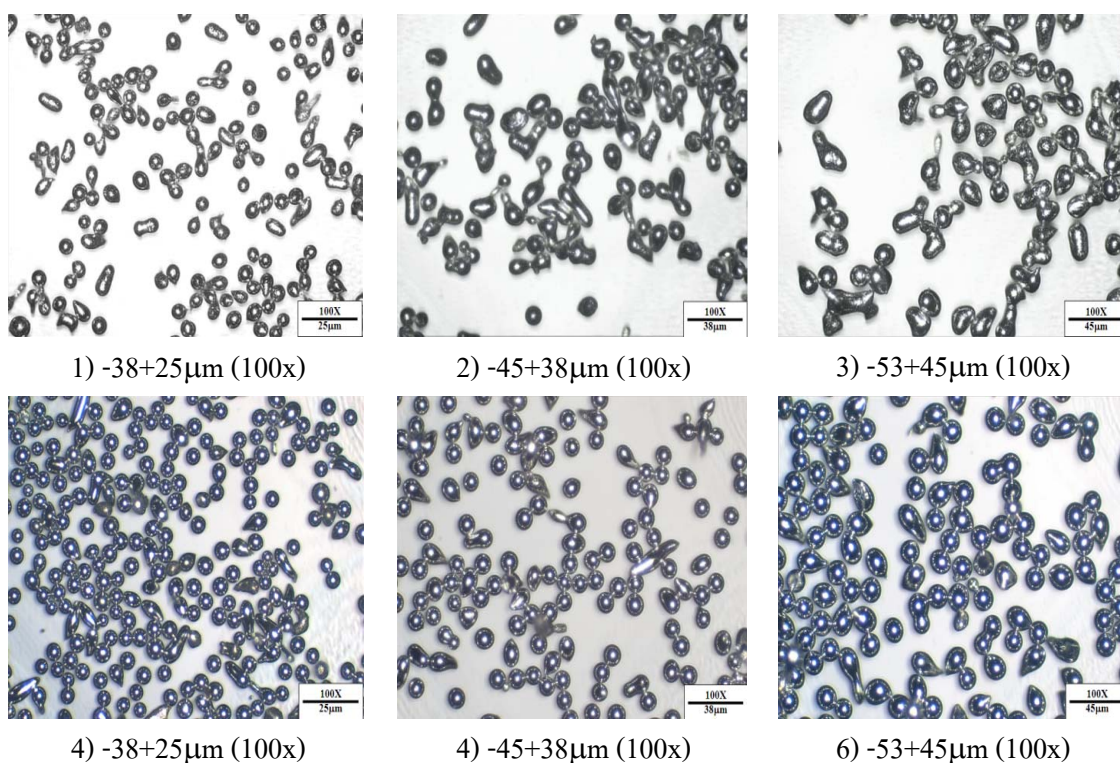
รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนกับค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305)

3.3 การวิเคราะห์รูปร่าง

ผงโลหะแต่ละชนิดที่ได้จากการผลิตด้วยเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซอร์ หลังจากกระบวนการคัดแยกขนาดอนุภาคแล้วได้นำมาวิเคราะห์รูปร่าง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (optical microscopy) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy) ดังนี้

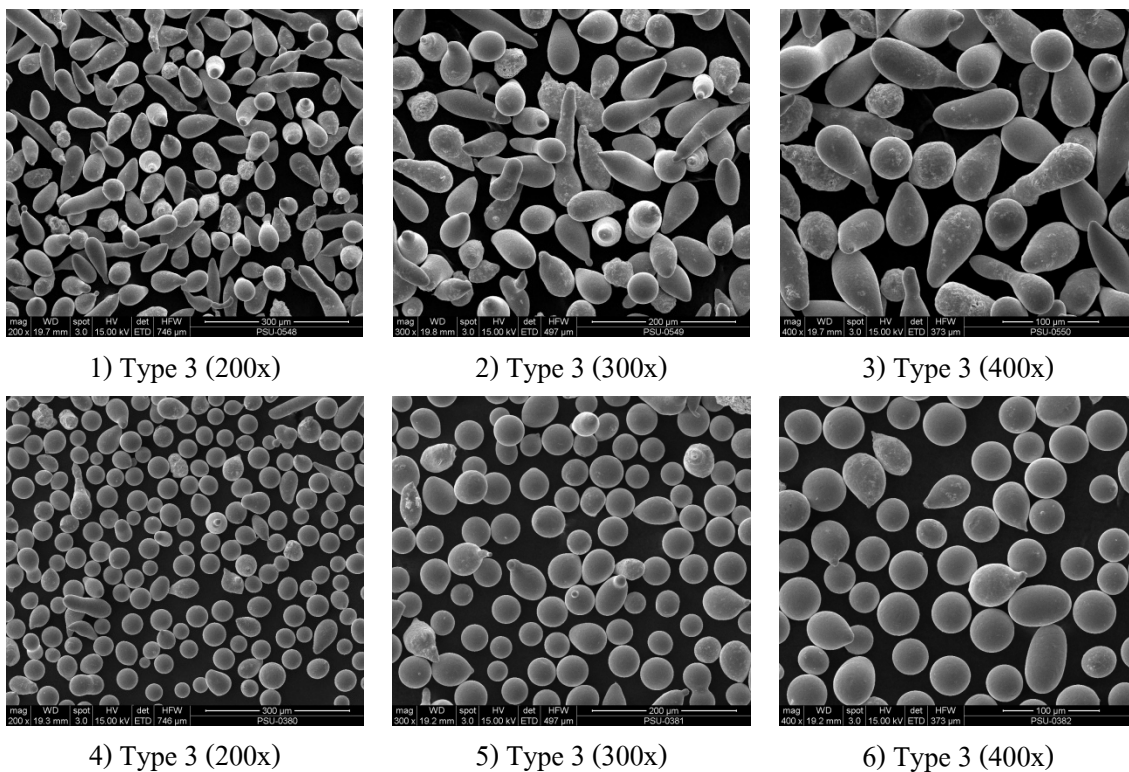
3.3.1 ผงโลหะดีบุก

รูปร่างของผงโลหะดีบุกที่ได้จากการผลิตด้วยวิธีการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันนั้นจะมีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซชันเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากถ้าปริมาณของออกซิเจนสูงในระหว่างที่มีการฟอร์มตัวเป็นเม็ดผงโลหะนั้นจะมีฟิล์มออกไซด์ไปปกคลุมที่ผิวของน้ำโลหะ ทำให้ไม่สามารถฟอร์มตัวเป็นเม็ดกลมได้ ส่งผลทำให้ได้รูปร่างที่ไม่แน่นอน (irregular shape) เช่นมีรูปร่างเป็นหยดน้ำ (tear drop) ลิกามেন্ট (ligament) และทรงกลม (spherical) ปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย และพื้นผิวของอนุภาคผงที่ได้จะมีลักษณะที่ขรุขระไม่เรียบ ไม่มันวาว เนื่องจากมีฟิล์มของออกไซด์ปกคลุมอยู่ที่ผิวนั่นเอง (รูปที่ 3.16) และผงโลหะดีบุกที่ผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมปริมาณของออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซชันนั้น (ในการทดลองกระทำภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และวัดปริมาณออกซิเจนได้ต่ำที่สุด 2 %) จะมีรูปร่างเป็นเม็ดกลมมากขึ้น เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนลดลงทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ที่ผิวของน้ำโลหะน้อยลง จึงส่งผลทำให้ความสามารถในการฟอร์มตัวเป็นเม็ดกลมเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ลักษณะรูปร่างของผงโลหะดีบุกที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เปรียบเทียบกันระหว่างที่บรรยากาศปกติ 20.9 % ออกซิเจน (1-3) กับ บรรยากาศควบคุมออกซิเจน 2% (4-6)

ภายหลังจากการวิเคราะห์ลักษณะรูปทรง รูปร่างของผงโลหะดีบุกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง นำผงโลหะดีบุกไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปทรงที่ชัดเจนขึ้น ซึ่งผงโลหะที่นำไปศึกษานั้นจะมีขนาดการกระจายตัวอยู่ในช่วง $-45+25$ ไมครอน (type 3) แสดงดังรูปที่ 3.17

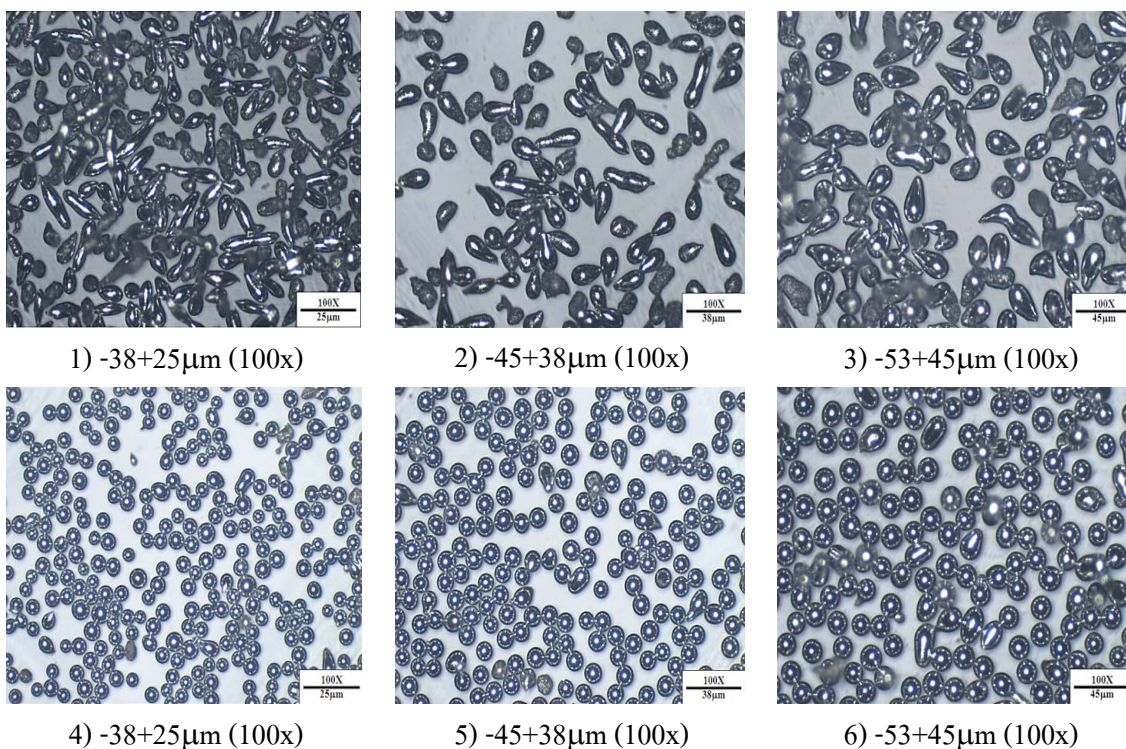


รูปที่ 3.17 ลักษณะรูปร่างของผงโลหะดีบุกที่มีช่วงการกระจายตัวขนาด $-45 + 25$ ไมครอน (type 3) ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เปรียบเทียบกันระหว่างที่บรรยากาศปกติ 20.9 % ออกซิเจน (1-3) กับบรรยากาศควบคุมออกซิเจน 2% (4-6)

3.3.2 ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305)

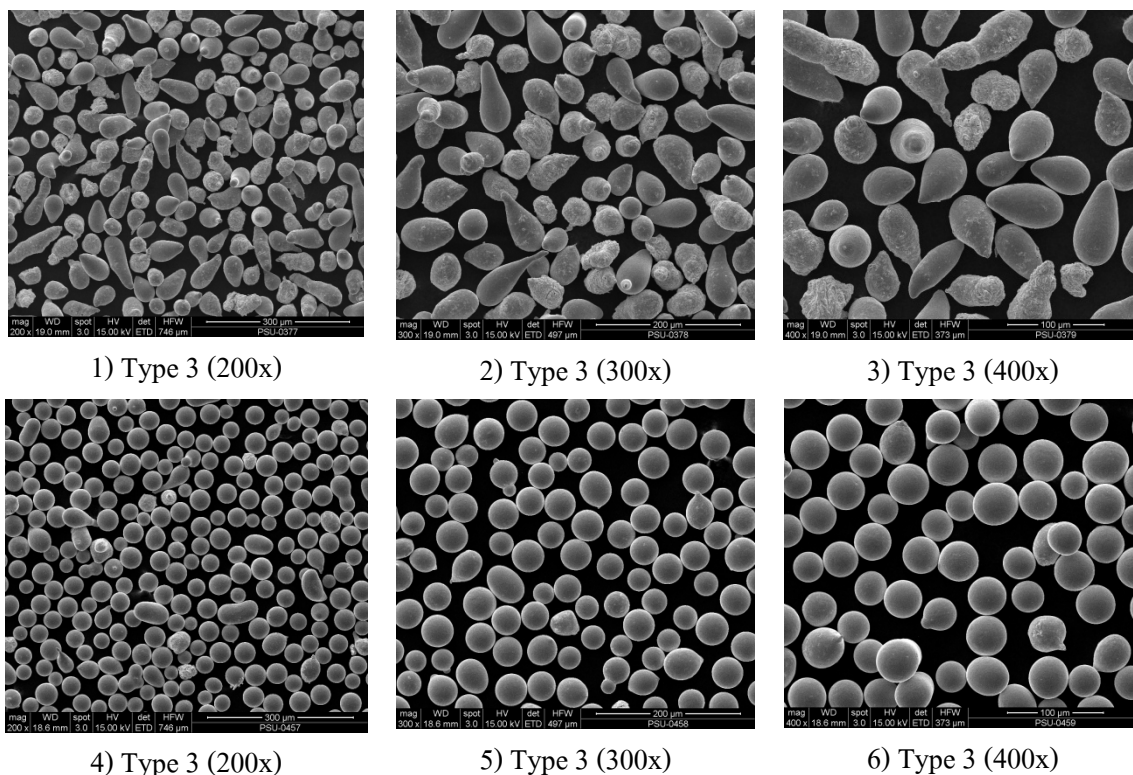
รูปร่างของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ได้จากการผลิตด้วยวิธีการอัดตราโซนิกอะตอมไมเซชันนั้นจะมีลักษณะเหมือนกันกับผงโลหะดีบุก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซชันเป็นสิ่งสำคัญ จากการทดลองพบว่าที่ผลิตภายใต้บรรยากาศปกติ (20.9 % ออกซิเจน) ผงโลหะที่ผลิตได้จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน เช่น มีรูปร่างเป็นหยดน้ำ ลิกามেন্ট และทรงกลม ปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย เนื่องจากอิทธิพลของออกซิเจนที่ทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ไปปกคลุมที่ผิวของน้ำโลหะ ในระหว่างที่มีการฟอร์มตัวเป็นเม็ดผงโลหะ จึงส่งผลทำให้ไม่สามารถฟอร์ม

ตัวเป็นเม็ดกลมได้ (รูปที่ 3.18) และผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมปริมาณของออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์นั้น (ในการทดลองกระทำภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และวัดปริมาณออกซิเจนได้ต่ำที่สุด 1.8 %) จะมีรูปร่างเป็นเม็ดกลม เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนลดลงทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ที่ผิวของน้ำโลหะน้อยลง จึงส่งผลทำให้สามารถฟอร์มตัวเป็นเม็ดกลมได้เพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ลักษณะรูปร่างของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (optical microscopy) เปรียบเทียบกันระหว่างที่บรรยากาศปกติ 20.9 % ออกซิเจน (1-3) กับบรรยากาศควบคุมออกซิเจน 2% (4-6)

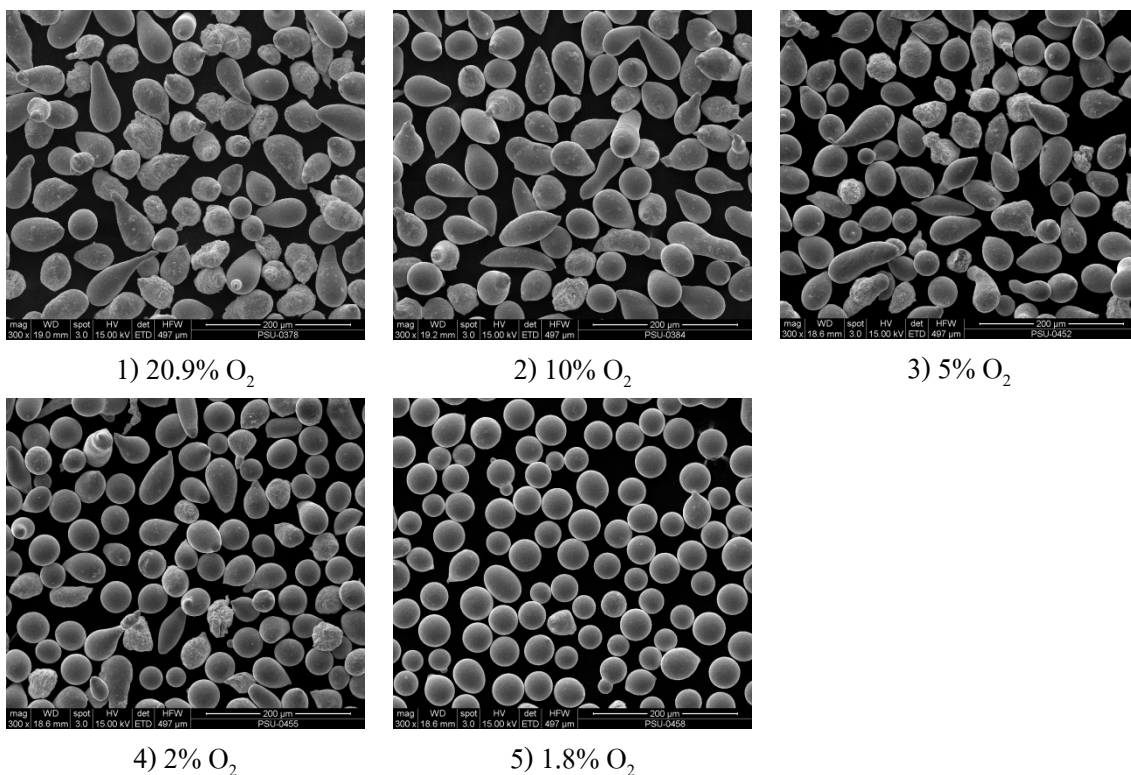
ภายหลังจากการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง รูปร่างของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง นำผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปร่างที่ชัดเจนขึ้น ซึ่งผงโลหะที่นำไปศึกษานั้นจะมีขนาดการกระจายตัวอยู่ในช่วง -45+25 ไมครอน (type 3) แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ลักษณะรูปร่างของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) ที่มีช่วงการกระจายตัวขนาด $-45 + 25$ ไมครอน (type 3) ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เปรียบเทียบกันระหว่างที่บรรยากาศปกติ 20.9 % ออกซิเจน (1-3) กับบรรยากาศควบคุม ออกซิเจน 1.8% (4-6)

3.3.3 Circularity shape factor

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอิทธิพลออกซิเจนที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) โดยจะศึกษาถึงค่า circularity shape factor โดยใช้สมการที่ 1.5 (ในหัวข้อที่ 1.7) คำนวณค่า circularity shape factor ซึ่งจะพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจน 20.9, 10, 5, 2 และ 1.8 % ตามลำดับ โดยใช้ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า ดังรูปที่ 3.20 และใช้โปรแกรม image tool เพื่อหาพื้นที่ (area) และเส้นรอบวง (perimeter) ของขนาดอนุภาค ซึ่งค่า circularity shape factor ที่ได้จากการคำนวณโดยเฉลี่ยจะแสดงดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.20 ลักษณะรูปร่างของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) ที่มีช่วงการกระจายตัวขนาด -45 + 25 ไมครอน (type 3) ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 300 เท่าที่เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนต่างกัน

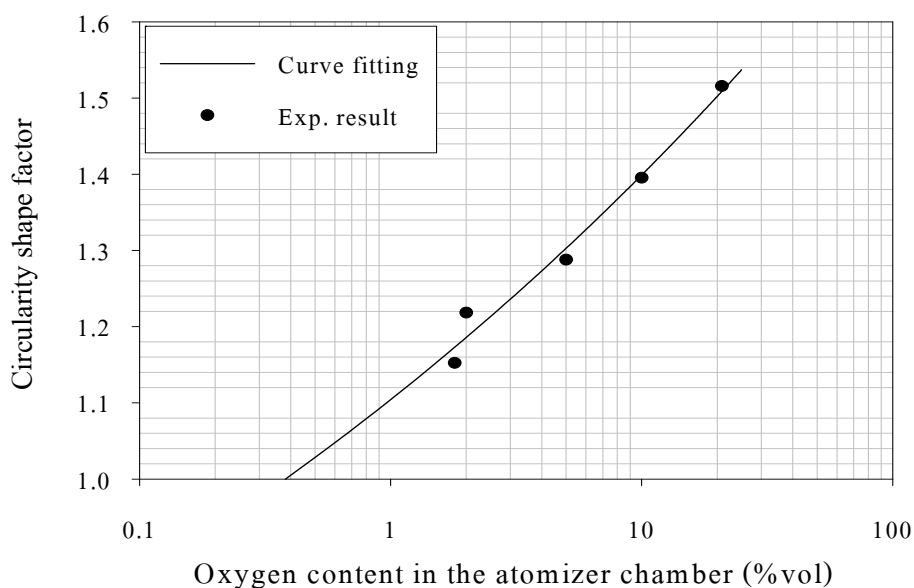
ตารางที่ 3.5 แสดงค่า circularity shape factor ที่ได้จากการคำนวณ

Number	Circularity shape factor				
	1.8% O ₂	2% O ₂	5% O ₂	10% O ₂	20.9% O ₂
1	1.11	1.22	1.28	1.3	1.89
2	1.20	1.05	1.13	1.49	2.51
3	1.11	1.41	1.41	1.45	1.22
4	1.17	1.11	1.31	1.45	1.59
5	1.12	1.19	1.32	1.29	1.34
6	1.14	1.18	1.02	1.26	1.26
7	1.19	1.38	1.27	1.15	1.30
8	1.11	1.23	1.39	1.54	1.57

ตารางที่ 3.5 (ต่อ)

Number	Circularity shape facto				
	1.8% O ₂	2% O ₂	5% O ₂	10% O ₂	20.9% O ₂
9	1.17	1.34	1.57	1.25	1.84
10	1.12	1.12	1.28	1.97	1.33
Average	1.15	1.21	1.28	1.39	1.51

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ในตารางที่ 3.5 ไปพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนกับค่า circularity shape factor ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ซึ่งพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนลดลงที่ 1.8 % ค่า circularity shape factor เท่ากับ 1.15 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุดเมื่อเทียบกับค่า circularity shape factor ที่เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนสูงๆที่ 2, 5, 10 และ 20.9 ตามลำดับ โดยทางทฤษฎีแล้วค่า circularity shape factor ของอนุภาคทรงกลมจะมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าที่ 1.8% ออกซิเจน ผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) ที่ผลิตได้จะมีรูปร่างเป็นเม็ดกลมมากที่สุด เนื่องจากในระหว่างการอะตอมไมเซชันปริมาณของออกซิเจนในถังอะตอมไมเซออร์มีค่าต่ำสุดที่ 1.8 % น้ำโลหะจึงเกิดฟิล์มออกไซด์ปกคลุมที่ผิวน้อย ทำให้สามารถที่จะฟอร์มตัวเป็นเม็ดกลมได้มากขึ้น จึงส่งผลทำให้ค่า circularity shape factor ของอนุภาคทรงกลมมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนกับค่า circularity shape factor

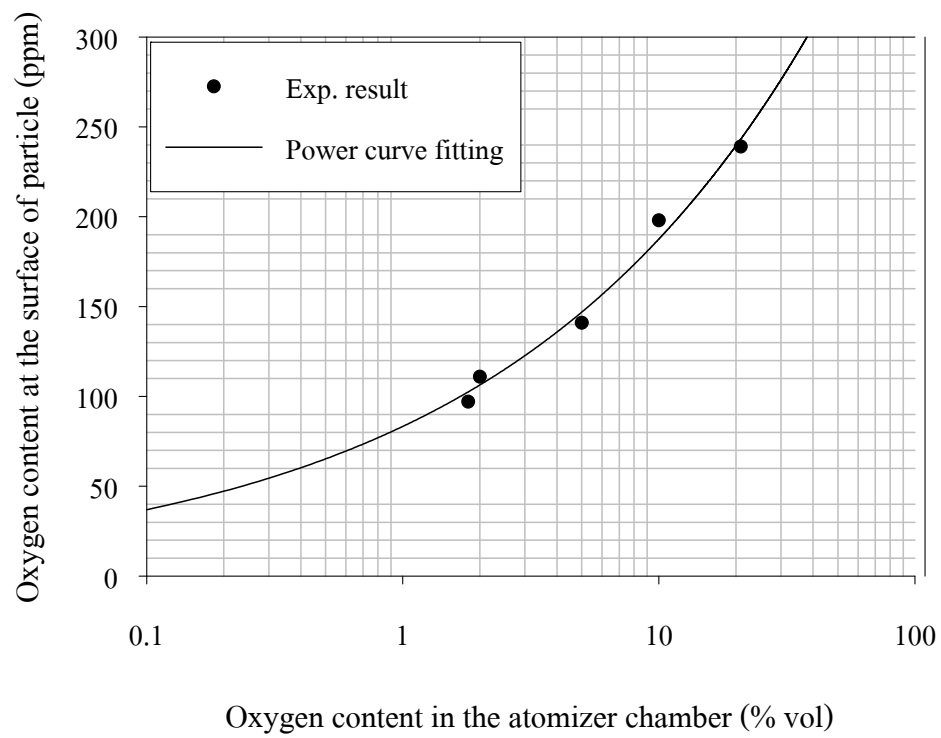
3.3.4 ผลของปริมาณออกซิเจนในผงโลหะ

อิทธิพลของปริมาณออกซิเจนในระหว่างการอะตอมไมเซอร์นั้น มีผลต่อลักษณะรูปร่างของผงโลหะที่ผลิตได้เป็นอย่างมากดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.3.3 และยังส่งผลต่อปริมาณออกซิเจนในผงโลหะที่ผลิตได้อีกด้วย ซึ่งในการทดลองได้ศึกษาที่เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนต่างกันคือ 20.9, 10, 5, 2 และ 1.8 % ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของออกซิเจนในผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตได้ แสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าปริมาณออกซิเจนในผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ผลิตภายใต้เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนต่างกัน

Oxygen content in atomizer chamber (%)	Oxygen content at the surface of particle (ppm)
20.9	239
10	198
5	141
2	111
1.8	97.10

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ในตารางที่ 3.6 ไปพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนกับปริมาณของออกซิเจนในผงโลหะที่ผลิตได้ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ซึ่งพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนลดลงที่ 1.8 % ปริมาณของออกซิเจนในผงโลหะที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 97.1 ppm และเมื่อเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนเพิ่มขึ้นเป็น 20.9 % ปริมาณของออกซิเจนในผงโลหะที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 239 ppm ซึ่งจะมีความสอดคล้องกัน เพราะการผลิตที่เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนต่ำๆ ย่อมทำให้ปริมาณของออกซิเจนในผงโลหะที่ผลิตได้มีค่าน้อยลงไปด้วย ในทางการค้าผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC 305) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะต้องควบคุมปริมาณออกซิเจนไม่ให้เกิน 100 ppm (Thaisarco, Ltd.) หากพิจารณาจากเส้นแนวโน้มในกราฟรูปที่ 3.22 มีความเป็นไปได้ที่จะลดปริมาณของออกซิเจนในผงโลหะไม่ให้เกิน 100 ppm โดยการควบคุมปริมาณของออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ในระหว่างการอะตอมไมเซอร์ให้อยู่ในระดับ ppm ตัวอย่างเช่นที่ 0.01 % O₂ (\approx 100 ppm) ปริมาณออกซิเจนในผงโลหะมีค่าประมาณ 20 ppm ตามลำดับ



รูปที่ 3.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์กับปริมาณของออกซิเจนในผงโลหะที่ผลิตได้

บทที่ 4

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผล

4.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะ (effect of melt temperature)

ในการทดลองผลิตผงโลหะทั้งสองชนิดคือ ผงโลหะดีบุก และผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) โดยวิธีการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน ซึ่งใช้อุณหภูมิในการหลอมน้ำโลหะที่ 270, 300 และ 350 °C ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะสูงสุดที่ 350 °C จะทำให้ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคของผงโลหะทั้งสองชนิดมีการกระจายตัวแคบที่สุด และทำให้ได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะทั้งสองชนิดเล็กที่สุด เนื่องจากเมื่อน้ำโลหะมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงขึ้น ความหนืดและแรงตึงผิวของน้ำโลหะจะลดลง จึงส่งผลทำให้น้ำโลหะสามารถแตกตัวออกเป็นหยดที่มีขนาดเล็กเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ได้ผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิการหลอมน้ำโลหะลดลง คือเข้าใกล้จุดหลอมเหลวมากขึ้น จะส่งผลทำให้ความหนืด และแรงตึงผิวของน้ำโลหะเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการแตกตัวออกเป็นหยดที่มีขนาดเล็กของน้ำโลหะลดลง จึงทำให้ได้ผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น

4.1.2 อิทธิพลของอัตราการป้อนน้ำโลหะ (effect of melt feed rate)

อัตราการป้อนน้ำโลหะที่ใช้ในการผลิตผงโลหะดีบุก และผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) จะใช้ที่ 10, 15, 20, และ 25 kg/hr ตามลำดับ ซึ่งอัตราการป้อนน้ำโลหะจะถูกควบคุมโดยแรงดันของก๊าซไนโตรเจน ในการทดลองพบว่าที่อัตราการป้อนน้ำโลหะสูงๆ การกระจายตัวของอนุภาคของผงโลหะทั้งสองชนิดมีการกระจายตัวกว้างกว่าที่อัตราการป้อนน้ำโลหะต่ำๆ และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะทั้งสองชนิดที่ผลิตได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนน้ำโลหะสูงขึ้น จะทำให้น้ำโลหะไปปกคลุมที่ปลายหัวโพรบของอัลตราโซนิกเพิ่มขึ้น และเกิดเป็นฟิล์มที่หนาขึ้น ทำให้ความสามารถในการแตกตัวออกเป็นหยดที่มีขนาดเล็กของน้ำโลหะลดลง ทำให้อนุภาคผงโลหะที่ได้มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น จึงส่งผลทำให้การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะทั้งสองชนิดมีการกระจายตัวที่กว้างขึ้น ในทางกลับที่อัตราการป้อนน้ำโลหะต่ำๆ จะทำให้การแตกตัวเป็นละอองที่มีขนาดเล็กของน้ำโลหะเกิดขึ้นได้มากกว่าการใช้อัตราการป้อนน้ำโลหะสูงๆ จึงส่งผลทำให้ได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงโลหะที่เล็กลง และมีขนาดการกระจายตัวที่แคบลง

4.1.3 อิทธิพลของแอมพลิจูด (effect of amplitude)

ในการทดลองผลิตผงโลหะทั้งสองชนิดคือ ผงโลหะดีบุก และผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) โดยวิธีการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน แอมพลิจูดที่ใช้ในการทดลอง 60, 70, 80 และ 90 % ตามลำดับ พบว่าเมื่อแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะทั้งสองชนิด มีช่วงการกระจายตัวที่กว้างขึ้นเล็กน้อย และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใหญ่ขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากในกระบวนการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชันตัวแปรที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาค และขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ ค่าความหนืด แรงตึงผิวของน้ำโลหะ และอัตราการป้อนน้ำโลหะเป็นหลัก ส่วนอิทธิพลของแอมพลิจูดที่ใช้ในการทดลองจะส่งต่อการกระจายตัวของอนุภาค และขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้น้อยมาก ซึ่งจากผลการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยอาจจะเกิดจากการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการอะตอมไมเซชัน จึงทำให้หยดน้ำโลหะเกิดการ satellites ขึ้น จึงทำให้ได้ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะและขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่ผลิตได้มีการเปลี่ยนแปลงไป

4.1.4 อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (effect of percent oxygen)

ในการทดลองผลิตผงโลหะทั้งสองชนิดคือ ผงโลหะดีบุก และผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (SAC305) โดยวิธีการอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน จะทำการผลิตภายใต้บรรยากาศปกติ ซึ่งไม่ได้มีการควบคุมปริมาณของออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ และการผลิตภายใต้การควบคุมปริมาณของออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ก๊าซไนโตรเจนเข้าแทนที่ภายหลังจากการดูดอากาศ ออกจากถังอะตอมไมเซอร์ ซึ่งพบว่าการผลิตภายใต้บรรยากาศปกติที่มีเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนประมาณ 20.9 % จะทำให้ได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เล็กกว่าการผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจน (1.8%) และผงโลหะทั้งสองชนิดที่ผลิตได้จะมีรูปร่างไม่แน่นอน เช่นมีรูปร่างเป็นหยดน้ำ ลิกาเมนต์ และทรงกลม ปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย และปริมาณของออกซิเจนในผงโลหะที่ผลิตได้มีค่าที่สูง ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของปริมาณออกซิเจนที่สูงจึงทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ไปปกคลุมที่ผิวของน้ำโลหะ ในระหว่างที่มีการฟอร์มตัวเป็นเม็ดผงโลหะ จึงส่งผลทำให้ไม่สามารถฟอร์มตัวเป็นเม็ดกลมได้ ส่วนการผลิตภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนได้ต่ำที่สุดประมาณ 1.8 % จะทำให้ได้รูปร่างของผงโลหะที่เป็นเม็ดกลม และปริมาณของออกซิเจนในผงโลหะที่ผลิตได้มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนลดลงทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ที่ผิวของน้ำโลหะน้อยลง จึงส่งผลทำให้สามารถฟอร์มตัวเป็นเม็ดกลมได้เพิ่มมากขึ้น (สามารถพิจารณาได้จากค่า circuitry shape factor ของอนุภาคทรงกลม ในหัวข้อ 3.3.3 ที่ 1.8 % ออกซิเจนจะมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด)

4.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินโครงการวิจัยมีข้อจำกัดของเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่นำมาใช้ในการสร้างและใช้งานร่วมกับเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซอร์หลายประการดังนี้

4.2.1 เครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้ในการอะตอมไมเซอร์ขนาด 20 kHz จึงส่งผลทำให้ขนาดเฉลี่ยอนุภาคของผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดใหญ่ ซึ่งหากต้องการขนาดเฉลี่ยของผงโลหะที่เล็กลงควรจะใช้เครื่องอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูงกว่านี้ เช่น 40 หรือ 60 kHz เป็นต้น

4.2.2 เครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้จะมีข้อจำกัดในเรื่องของการทำงานที่อุณหภูมิสูงๆ ซึ่งจะมีช่วงอุณหภูมิการทำงานไม่เกิน 60 °C จึงไม่สามารถที่จะผลิตผงโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงๆ ได้ ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงออกแบบระบบหล่อเย็นทรานซิลเวเตอร์ ที่อยู่ภายในเครื่องอัลตราโซนิกให้ดียิ่งขึ้น เพื่อให้สามารถผลิตผงโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงๆได้ในอนาคต

4.2.3 ระบบหล่อเย็นถึงอะตอมไมเซอร์ควรใช้น้ำที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 20 °C เพื่อป้องกันน้ำโลหะที่ยังไม่แข็งตัวกระเด็นไปติดกับผนังของถังอะตอมไมเซอร์ ซึ่งในการวิจัยที่ผ่านมาได้ใช้น้ำธรรมดาที่อุณหภูมิห้อง จึงส่งผลทำให้ยังมีผงโลหะบางส่วนกระเด็นไปติดกับผนังของถังอะตอมไมเซอร์อยู่

4.2.4 ในการที่จะผลิตผงโลหะให้ได้รูปร่างเป็นเม็ดกลมทั้งหมดนั้น ควรที่จะควบคุมปริมาณของออกซิเจนภายในถังอะตอมไมเซอร์ให้เหลือน้อยที่สุด (ในระดับ ppm) และทำการอะตอมไมเซอร์ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน (N₂) หรือ อาร์กอน (Ar) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถควบคุมได้ในระดับเปอร์เซ็นต์เท่านั้น เพราะไม่มีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่สามารถวัดในหน่วย ppm ได้ จึงส่งผลทำให้ผงโลหะที่ผลิตได้มีรูปร่างที่ไม่เป็นเม็ดกลมทั้งหมด เนื่องจากยังมีปริมาณออกซิเจนเหลืออยู่ภายในถังอะตอมไมเซอร์

4.2.5 หัวจ่ายน้ำโลหะควรจะใช้ฮีทเตอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าสูงกว่านี้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อยู่ 500 วัตต์ ส่งผลทำให้มีความร้อนที่ไม่เพียงพอในการถ่ายเทไปยังบริเวณรอบข้างของหัวจ่ายน้ำโลหะ ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการตันของน้ำโลหะภายในหัวฉีด นอกจากนั้นควรแยกตัววัดและตัวควบคุมอุณหภูมิออกเป็นชุดๆ ไม่ควรใช้ควบคุมหลายๆจุดพร้อมกันเพราะจะทำให้อุณหภูมิของหัวจ่ายน้ำโลหะในแต่ละจุดไม่เท่ากัน

4.2.6 ในการควบคุมแรงดันก๊าซที่จ่ายเข้าไปภายในเตาหลอมโลหะนั้น ควรมีการติดตั้งเกจวัดความดัน (pressure gate) ที่เตาหลอมโลหะเพิ่มเติม เพราะจะได้ทราบถึงแรงดันแน่นอนที่ใช้ในการขับน้ำโลหะภายในเตาหลอมไปยังหัวจ่ายน้ำโลหะ เพื่อที่จะทำให้สามารถควบคุมอัตราการป้อนของน้ำโลหะได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

4.2.7 ก๊าซเฉื่อยที่ใช้ในการอะตอมไมเซอร์แต่ละครั้งจะสิ้นเปลืองมากเนื่องจากถังอะตอมไมเซอร์มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และก๊าซที่ใช้มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นควรมีการออกแบบระบบการปรับสภาพของก๊าซที่ใช้แล้วให้สามารถนำก๊าซกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง

บรรณานุกรม

- Lee, C. (2005). "Getting Ready for Lead-Free Solder." *Lead-Free Solder*, <http://www.indium.com/pbfree/documents/techpapers/Getting_Ready.pdf> (March. 21, 2010).
- Chastain, S. (2002). "Build an Oil Fired Tilting Furnace." *Types and Efficiencies of Typical Furnaces*, <<http://www.metalwebnews.com/howto/furnace2/furnace.html>> (March. 21, 2010).
- Yamuna, A. C. (2007). "Foundry Shop." *Induction furnace*, <<http://yamunapistons.com/infrastructure.html>> (March.21, 2010).
- Hodus, S. (2010). "Doppler effect." *Sound*, <<http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~hsatreer/data/doc/.../wave.doc>> (March. 2, 2010).
- Phumsakha, K. (2007). "Wave type." *Component of wave*, <http://www.sa.ac.th/winyoo/mechanics/wave/wave_typ.htm> (March. 2, 2010)
- Wayne Associates & Son, Inc. (2006). "A single Source for Product Printing, Decorating and Identification Processes-Equipment-Supplies-Auxiliary Products." *What is ultrasonic assembly*, < <http://www.wayneassoc.com/tech.htm> > (Jan. 15, 2010).
- Bose, A. (1995). *Advances in Particulate Materials*, Butterworth-Heinemann, USA, 112-114.
- TPS, Inc. (2010). "Spray Nozzle Index by design and application." *Ultrasonic atomization*, <<http://www.fluidproducts.com/ultrason.htm>> (Jan. 2, 2010).
- German, R. M. (1994). *Powder Metallurgy Science*, 2nd Ed, MPIF, USA, 37-38.
- AMTECH, Inc. (2000). "AMT Solder Powder." *Powder Size Distribution*, < <http://www.amtechsolder.com/pdf/solder-20powder-20TDS2.pdf> > (Jan. 2, 2010).
- Yule, J., and Dunkley, J. (1994). *Atomization of Metal for Powder Production and Spray Deposition*, Colset Pte Ltd, Singapore typeset, 73-76.
- Avvaru, B., Patil, N., Gogate, R., and Pandit, B. (2006). "Ultrasonic Atomization: Effect of Liquid Phase Properties." *Ultras*, 44, 146-158.
- Barreras, F., Amaveda, H., and Lozano, A. (2002). "Transient High-Frequency Ultrasonic Water Atomization." *Exp. Fluids*, 33, 405-413.

- Faraday, M. (1831). "On a Peculiar Class of Acoustical Figures and on Certain Forms Assumed by Groups of Particles upon Vibrating Elastic Surfaces." *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 121, 299.
- Lang, R. J. (1962) "Ultrasonic Atomization of Liquids." *J. Acoust. Soc. Am*, 34(1), 6-8.
- Sorokin, V. I. (1957). "The Effect of Fountain Formation at the Surface of a Vertically Oscillating Liquid." *Sov. Phys. Acoust*, 3, 281-291.
- Eisenmenger, W. (1959). "Dynamic Properties of the Surface Tension of Water and Aqueous Solutions of Surface-Active Agents with Standing Capillary Waves in the Frequency Ranged from 10 KHz to 1.5 MHz." *Acoust*, 9(4), 327-340.
- Caccioppoli, G., Clausen, B., Bonjour, C., and Pralong, P. (2002). "Fabrication of Metal Powders by Ultrasonic Atomization." *Mater*, 1-4.
- Jungmyoung, J., Yamagata, Y., Ohmori, H., and Higuci, T. (2008). "High-Frequency Surface Acoustic Wave Atomizer." *Sens. Actuators. A*, 145-146, 437-441.
- Bauckhage, K., Andersen, O., Hansmann, S., Reich, W., and Schreckenber, P. (1996). "Production of Fine Powder by Ultrasonic Standing Wave Atomization." *Powder Technol*, 86, 77-86.
- Lozano, A., Amaveda, H., Barreras, F., Jorda, X., and Lozano, M. (2003). "High-Frequency Ultrasonic Atomization with Pulsed Excitation." *J. Fluids Eng*, 125, 941-945.
- Kurosawa, M., Futami, A., and Higuchi, T. (1997). "Characteristics of Liquids Atomization using Surface Acoustic Wave." *Trans*, 97, 801-804.
- Rajan, R., and Pandit, A. B. (2001). "Correlation to Predict Droplet Size in Ultrasonic Atomization." *Ultras*, 39, 235-255.
- Reipschlager, O., Bothe, D., Warnecke, H.-J., Monien, B., Prüss, J., and Weigand, B. (2002). "Modelling and Simulation of the Disintegration Process in an Ultrasonic Standing Wave Atomizer." *Proc, 15th Annu. Conf. Liquid Atomization and Spray Systems*, Americas, Madison, USA.

- Tsai, C., Song, L., Tsai, S., Chou, F., and Cheng, H. (2006). "Ultrasonic Atomization using MHz Silicon-Based Multiple-Fourier Horn Nozzles." *Appl. Phys. Lett.*, 88, 014102, 1-3.
- Sheikhaliev, Sh. M., and Popel, S. I. (1984). "Production of Metal Powder by Ultrasonic Atomization of Melts." <<http://www.springerlink.com/content/m2q2875n5347737t/fulltext.pdf?page=1>> (March. 21, 2010).
- Sindayihebura, D., Dobre, M., and Bolle, L. (2009). "Experimental Study of Thin Liquid Film UltrasonicAtomization" <<http://sites.uclouvain.be/term/recherche/ultrasonique/art0197.pdf>> (March. 21, 2010).
- Yule, A. J., and Suleimani, Y. AL. (2000). "On Droplet Formation from Capillary Waves on a Vibrating Surface." *R. Soc. London. Ser. A*, 456, 1069-1085.
- Babaev, E., and Minnetonka, M. N. (2008). "Ultrasonic Atomization and Separation Methods" U.S.Pat.20080093473A1.
- Drews, W. D., Linden, K.V., and Aktiengesellschaft, S. (1990). "Ultrasonic MHz Oscillator in Particular for Liquid Atomization" U.S.Pat.4912357.
- Kurokawa, H., Nakayama, K., Takenaka, H., and Kaisha, T. N. K. K. (1989). "Ultrasonic Vibrator Horn" U.S.Pat.4844343.
- Lierke, E. G., Luhmann, K., Jonsson, S., Hofmann, F., and Gaa, R. (1991). "Device for Ultrasonic Atomization of a Liquid Medium." U.S.Pat.4981425.
- Maehara, N., and Takashi, Uno. (1984). "Liquid Atomizer including vibrator" U.S.Pat.4465234.
- Cengle, Y. A. (2004). *Heat Transfer*. 2nd Ed, McGraw Hill, Singapore, 367-418.

ภาคผนวก ก
ค่าการกระจายตัวของผงโลหะ

ตารางที่ ก1 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะดีบุกที่ได้จากการผลิตซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมของอุณหภูมิชุบเปอร์อิตต่ำสุด 270 °C อัตราการป้อนน้ำโลหะต่ำสุด 10 kg/hr และแอมพลิจูด 75 % ได้ผงโลหะขนาดต่างๆดังนี้

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
20	850	0	0	100
30	600	0.74	0.74	99.25
50	300	10.25	10.99	89.00
70	212	17.40	28.40	71.59
100	150	20.00	48.40	51.59
140	106	18.89	67.30	32.69
200	75	15.41	82.72	17.27
275	53	11.61	94.33	5.66
325	45	3.01	97.35	2.64
400	38	1.36	98.71	1.28
500	25	0.78	99.50	0.49
pan	-----	0.49	100	0

ตารางที่ ก2 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะดีบุกที่ได้จากการผลิตซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมของอุณหภูมิชุบเปอร์อิตสูงสุด 350 °C อัตราการป้อนน้ำโลหะต่ำสุด 10 kg/hr และแอมพลิจูด 75 % ได้ผงโลหะขนาดต่างๆดังนี้

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
20	850	0	0	100
30	600	1.02	1.02	98.97
50	300	3.06	4.09	95.90
70	212	7.99	12.08	87.91
100	150	15.47	27.55	72.44
140	106	19.18	46.73	53.26

ตารางที่ ก2 (ต่อ)

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
200	75	19.37	66.11	33.88
275	53	19.69	85.80	14.19
325	45	8.05	93.86	6.13
400	38	4.02	97.89	2.10
500	25	1.47	99.36	0.63
pan	-----	0.63	100	0

ตารางที่ ก3 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะดิบที่ได้จากการผลิตซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมของ
อัตราการป้อนน้ำโลหะสูงสุด 25 kg/hr อุณหภูมิชุบเปอร์อิต 300 °C อัตราและ
แอมพลิจูด 75 % ได้ผงโลหะขนาดต่างๆดังนี้

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
20	850	0	0	100
30	600	1.53	1.53	98.46
50	300	15.00	16.53	83.46
70	212	18.72	35.25	64.74
100	150	18.41	53.67	46.32
140	106	15.10	68.77	31.22
200	75	12.70	81.47	18.52
275	53	11.27	92.75	7.24
325	45	3.72	96.47	3.52
400	38	1.93	98.41	1.58
500	25	1.02	99.43	0.56
pan	-----	0.56	100	0

ตารางที่ ก4 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะดีบุกที่ได้จากการผลิตซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมของแอมพลิจูดสูงสุด 80 % อัตราการป้อนน้ำโลหะสูงสุด 15 kg/hr และอุณหภูมิซุบเปอร์ฮีท 300 °C ได้ผงโลหะขนาดต่างๆดังนี้

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
20	850	0	0	100
30	600	1.77	1.77	98.22
50	300	14.17	15.95	84.04
70	212	15.16	31.11	68.88
100	150	17.26	48.38	51.61
140	106	15.86	64.24	35.75
200	75	14.55	78.80	21.19
275	53	13.43	92.23	7.76
325	45	4.30	96.53	3.46
400	38	1.96	98.50	1.49
500	25	0.98	99.48	0.51
pan	-----	0.51	100	0

ตารางที่ ก5 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ได้จากการผลิตซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมของอุณหภูมิซุบเปอร์ฮีทสูงสุด 350 °C อัตราการป้อนน้ำโลหะต่ำสุด 10 kg/hr และแอมพลิจูด 70 % ได้ผงโลหะขนาดต่างๆดังนี้

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
20	850	0	0	100
30	600	0.79	0.79	99.20
50	300	2.61	3.40	96.59
70	212	6.18	9.58	90.41
100	150	13.62	23.21	76.78
140	106	18.14	41.36	58.63

ตารางที่ ก5 (ต่อ)

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
200	75	18.54	59.90	40.09
275	53	18.54	78.44	21.55
325	45	12.12	90.57	9.40
400	38	6.65	97.22	2.77
500	25	2.06	99.28	0.71
pan	-----	0.71	100	0

ตารางที่ ก6 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ได้จากการผลิตซึ่งใช้ตัวแปร
ควบคุมของอุณหภูมิชุบเปอร์อิตต่ำสุด 270 °C อัตราการป้อนน้ำโลหะต่ำสุด 10 kg/hr
และแอมป์ลิจูด 70 % ได้ผงโลหะขนาดต่างๆดังนี้

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
20	850	0	0	100
30	600	0.79	0.79	99.20
50	300	2.61	3.40	96.59
70	212	6.18	9.58	90.41
100	150	13.62	23.21	76.78
140	106	18.14	41.36	58.63
200	75	18.54	59.90	40.09
275	53	18.54	78.44	21.55
325	45	12.12	90.57	9.42
400	38	6.65	97.22	2.77
500	25	2.06	99.28	0.71
pan	-----	0.71	100	0

ตารางที่ ก7 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ได้จากการผลิตซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมของอุณหภูมิชุบเปอร์อิตสูงสุด 350 °C อัตราการป้อนน้ำโลหะสูงสุด 25 kg/hr และแอมพลิจูด 70% ได้ผงโลหะขนาดต่างๆดังนี้

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
20	850	0	0	100
30	600	0.40	0.40	99.59
50	300	2.74	3.14	96.85
70	212	9.83	12.97	87.02
100	150	18.29	31.27	68.72
140	106	18.94	50.22	49.77
200	75	17.57	67.79	32.20
275	53	15.23	83.03	16.96
325	45	8.62	91.65	8.34
400	38	6.00	97.66	2.33
500	25	1.77	99.43	0.56
pan	-----	0.56	100	0

ตารางที่ ก8 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ได้จากการผลิตซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมของอุณหภูมิชุบเปอร์อิตต่ำสุด 270 °C อัตราการป้อนน้ำโลหะสูงสุด 25 kg/hr และแอมพลิจูด 70% ได้ผงโลหะขนาดต่างๆดังนี้

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
20	850	0	0	100
30	600	0.32	0.32	99.67
50	300	1.89	2.21	97.78
70	212	9.42	11.64	88.35
100	150	19.03	30.67	69.32
140	106	20.66	51.33	48.66

ตารางที่ ก8 (ต่อ)

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
200	75	17.62	68.96	31.03
275	53	14.76	83.73	16.26
325	45	9.31	93.04	6.95
400	38	5.04	98.09	1.90
500	25	1.46	99.55	0.44
pan	-----	0.44	100	0

ตารางที่ ก9 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ได้จากการผลิตภายใต้
บรรยากาศควบคุมออกซิเจนที่ 5 % ซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมของอุณหภูมิซูเปอร์
ฮีทต่ำสุด 270 °C อัตราการป้อนน้ำโลหะต่ำสุด 15 kg/hr และแอมพลิฟูด 70 % ได้ผง
โลหะขนาดต่างๆดังนี้

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
20	850	0	0	100
30	600	0.62	0.62	99.37
50	300	6.52	7.15	92.84
70	212	13.01	20.16	79.83
100	150	17.18	37.34	62.65
140	106	17.76	55.11	44.88
200	75	15.65	70.76	29.23
275	53	15.55	86.31	13.68
325	45	7.58	93.90	6.09
400	38	3.93	97.83	2.16
500	25	1.58	99.42	0.57
pan	-----	0.57	100	0

ตารางที่ ก10 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ได้จากการผลิตภายใต้
บรรยากาศควบคุมออกซิเจนที่ 5 % ซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมของอุณหภูมิชุบเปอร์อิต
ต่ำสุด 270 °C อัตราการป้อนน้ำโลหะสูงสุด 25 kg/hr และแอมพลิจูด 70 % ได้ผงโลหะ
ขนาดต่างๆดังนี้

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
20	850	0	0	100
30	600	0.48	0.48	99.51
50	300	10.42	10.91	89.08
70	212	16.85	27.76	72.23
100	150	19.02	46.78	53.21
140	106	17.33	64.12	35.87
200	75	14.43	78.56	21.43
275	53	13.18	91.74	8.25
325	45	4.34	96.08	3.91
400	38	2.31	98.40	1.59
500	25	1.11	99.51	0.48
pan	-----	0.48	100	0

ตารางที่ ก11 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ได้จากการผลิตภายใต้
บรรยากาศควบคุมออกซิเจนที่ 5 % ซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมของอุณหภูมิชุบเปอร์อิต
สูงสุด 350 °C อัตราการป้อนน้ำโลหะต่ำสุด 15 kg/hr และแอมพลิจูด 70 % ได้ผงโลหะ
ขนาดต่างๆดังนี้

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
20	850	0	0	100
30	600	0.68	0.68	99.31
50	300	4.13	4.82	95.17
70	212	11.85	16.68	83.31
100	150	17.80	34.48	65.51
140	106	17.98	52.47	47.52

ตารางที่ ก11(ต่อ)

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
200	75	16.45	68.93	31.06
275	53	14.85	83.78	16.21
325	45	8.61	92.39	7.60
400	38	4.95	97.35	2.64
500	25	1.87	99.22	0.77
pan	-----	0.77	100	0

ตารางที่ ก12 แสดงค่าการกระจายตัวของผงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ได้จากการผลิตภายใต้
บรรยากาศควบคุมออกซิเจนที่ 5 % ซึ่งใช้ตัวแปรควบคุมของอุณหภูมิชุบเปอร์อิต
สูงสุด 350 °C อัตราการป้อนน้ำโลหะสูงสุด 25 kg/hr และแอมพลิฟูด 70 % ได้ผง
โลหะขนาดต่างๆดังนี้

Sieve number (mesh)	Sieve opening (micron)	wt % Retained	Cumulative Retained wt %	Cumulative passing wt %
20	850	0	0	100
30	600	0.54	0.54	99.45
50	300	8.25	8.80	91.19
70	212	14.97	23.78	76.21
100	150	19.20	42.98	57.01
140	106	17.50	60.49	39.50
200	75	15.38	75.87	24.12
275	53	14.05	89.93	10.06
325	45	5.83	95.76	4.23
400	38	2.86	98.63	1.36
500	25	1.05	99.69	0.30
pan	-----	0.30	100	0

ภาคผนวก ข
การคำนวณเบื้องต้น

1. การคำนวณค่าตัวแปรของเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน (Ultrasonic atomization)

เมื่อกำหนดให้

ขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำโลหะ	(d_p)	38.2 μm
อัตราการไหลของน้ำโลหะ (Flow rate)	(Q_{Sn})	0.42 kg/min ($1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$) = (25 kg/hr.)
ความถี่ที่ใช้	(f_{atom})	40 kHz
อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลว (Super heat) T_{Sh}		80 °C
อุณหภูมิเทน้ำโลหะ (T_p) = $T_m + T_{Sh}$		232 + 80 = 312 °C
ประสิทธิภาพของการอะตอมไมเซชัน(η)		0.015
<u>คุณสมบัติของดีบุก</u>		
ความหนาแน่น ณ จุดหลอมเหลว (ρ_{Sn})		6,970 kg/m ³
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_T)		27.112 J/K.mol
Specific Heat (C_p)		227 J/kg.K
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (K_m)		66.8 W/m.K
อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m)		232 °C
Dynamics viscosity (μ_{Sn})		0.141 kg/m.s
ความตึงผิว (γ_{Sn})		0.63 N/m

ขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำโลหะ (Mean droplets diameter, d_p) สามารถประมาณได้ดังนี้

$$\text{จาก Lang's equation} \quad D_p = 0.34 \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

$$\text{แทนค่าจะได้} \quad D_p = 0.34 \left(\frac{8\pi(0.63 \text{ N/m})}{(6970 \text{ kg/m}^3)(40,000 \text{ Hz})^2} \right)^{1/3}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad D_p = 38.2 \mu\text{m}$$

คำนวณหาความเร็วของเสียงในของเหลว (Velocity of sound in liquid, V) จากสมการที่ 2

$$V = f\lambda \quad (2)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \lambda = (8\pi\sigma / \rho_L f^2)^{1/3} \quad (3)$$

$$\text{แทนค่า } \lambda \text{ ลงในสมการที่ 2 จะได้} \quad V = f(8\pi\sigma / \rho_L f^2)^{1/3} \quad (4)$$

$$V = (40,000 \text{ Hz}) \left[\frac{8\pi(0.63 \text{ N/m})}{(6,970 \text{ kg/m}^3)(40,000 \text{ Hz})^2} \right]^{1/3}$$

ดังนั้น $V = 4.49 \text{ m/s}$

คำนวณหาแอมพลิจูดเริ่มต้นที่ใช้ในการทำให้เกิดการก่อรูปของคลื่น (Critical amplitude for wave formation, Am_{crit}) จากสมการที่ 5 ของ Pohlman and Heisler ได้ดังนี้

$$Am_{Cric} = \left(\frac{2\eta}{\rho} \right) \left(\frac{\rho}{\pi\sigma f} \right)^{1/3} \quad (5)$$

$$Am_{Cric} = \left[\frac{2(0.141 \text{ kg/m.s})}{(6970 \text{ kg/m}^3)} \right] \left[\frac{6970 \text{ kg/m}^3}{\pi(0.63 \text{ N/m})(40,000 \text{ Hz})} \right]^{1/3}$$

ดังนั้น $Am_{Cric} = 17.99 \mu\text{m}$

คำนวณหาการกระจายของกำลังที่ใช้ต่อหน่วยน้ำหนัก (Power dissipated per unit mass, P_m) เพื่อที่จะนำค่าไปคำนวณหาขนาดหยดน้ำโลหะที่โตที่สุดที่มีความเป็นไปได้ จากสมการที่ 6 ของ Rajan ได้ดังนี้

$$P_m = \frac{1}{2} V Am_{Cric} (2\pi f)^2 \quad (6)$$

$$P_m = \frac{1}{2} (4.49 \text{ m/s}) (1.799 \times 10^{-5} \text{ m}) [2\pi(40,000 \text{ Hz})]^2$$

ดังนั้น $P_m = 2.55 \times 10^6 \text{ W/kg}$

จากนั้นนำไปคำนวณหาขนาดของหยดน้ำโลหะที่โตที่สุดที่มีความเป็นไปได้จากสมการที่ 7 ได้ดังนี้

$$D_{\max} = k \left(\sigma + \frac{\mu V}{4} \right)^{0.6} \rho^{-0.6} P_m^{-0.4} \quad (7)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ (0.3)

μ คือ ค่าความหนืดของน้ำดิบูก

V คือ ค่าความเร็วต้นของน้ำโลหะหลอมเหลวซึ่งคำนวณได้จากสมการ $v_{Sn} = \sqrt{2gh}$

การหาความเร็วต้นของน้ำโลหะ (Threshold velocity, V_{Sn}) จากสมการ Bernoulli ได้ดังนี้

$$v_{Sn} = \sqrt{2gh} \quad (8)$$

กำหนดให้ $g = 9.78 \text{ m/s}^2$
 $h = 20 \text{ cm} = 0.2 \text{ m}$ (คิดจากความยาวหัวฉีด 15 cm + ระยะระหว่างปลายหัวฉีด กับปลายโพรบ 2 cm + น้ำโลหะที่กระเจิง 3 cm)

$$v_{Sn} = \sqrt{2(9.78 \text{ m/s}^2)(0.2 \text{ m})}$$

ดังนั้น $v_{Sn} = 1.97 \text{ m/s}$

แทนค่าลงในสมการที่ 7 จะได้

$$D_{\max} = 0.3 \left(0.63 \text{ N/m} + \frac{(0.141 \text{ kg/m}\cdot\text{s})(1.97 \text{ m/s})}{4} \right)^{0.6} (6970 \text{ kg/m}^3)^{-0.6} (2.55 \times 10^5 \text{ W/kg})^{-0.4}$$

$$D_{\max} = 82.3 \text{ }\mu\text{m}$$

จำนวนหยดน้ำโลหะที่เกิดขึ้นต่อวินาที (*Number of drops being generated per second, N*) จากสมการที่ 9 ดังนี้

$$N = Q / (\pi / 6) D_{\max}^3 \quad (9)$$

$$N = (1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}) / (\pi / 6) (82.3 \times 10^{-6} \text{ m})^3$$

ดังนั้น $N = 3,426,114.49 \text{ drops/second}$

คำนวณหากำลังที่ใช้ในการอะตอมไมเซชันตามเงื่อนไขที่กำหนด จากอัตราการสร้างพื้นที่ผิวต่อหน่วยเวลา (*Rate of creation of new surface, \xi*) จากสมการที่ 10 ได้ดังนี้

$$\xi = N \pi D_{\max}^2 \quad (10)$$

$$\xi = \pi (3,426,114.49 \text{ drops/second}) (82.3 \times 10^{-6} \text{ m})^2$$

ดังนั้น $\xi = 0.07 \text{ m}^2 / \text{s}$

คำนวณหาอัตราการเกิดพลังงานพื้นผิว (*Rate of generation of surface energy, E_s*) จากสมการที่ 11 ได้ดังนี้

$$E_s = \xi \sigma \quad (11)$$

$$E_s = (0.07 \text{ m}^2 / \text{s}) (0.63 \text{ N/m})$$

ดังนั้น $E_s = 0.05 \text{ J/s}$

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณกำลังที่ใช้ในการอะตอมไมเซชันจากสมการที่ 12 ได้ดังนี้

$$P = (\gamma_{Sn} \xi) / \eta \quad (12)$$

$$P = (0.63 \text{ N / m})(0.07 \text{ m}^2 / \text{s})(0.015)$$

ดังนั้น

$$P = 3.06 \text{ Watt}$$

2. พิจารณาในส่วนของการถ่ายเทความร้อนของน้ำโลหะ (Heat transfer)

การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนจากละอองน้ำโลหะสู่สิ่งแวดล้อมนั้นสามารถคำนวณได้จากค่าการพาความร้อนที่ผิวสัมผัสของวัสดุ (External convection) จากสมการของ Cengel ได้ดังนี้

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (13)$$

เมื่อ T_f = อุณหภูมิของฟิล์มน้ำโลหะ (film temperature) °C

T_s = อุณหภูมิของหยดน้ำโลหะที่กระเจิงออกจากหัวโพรบของอัลตราโซนิคมีค่าเท่ากับ 312 °C

T_∞ = อุณหภูมิของอากาศภายในถังมีค่าเท่ากับ 80 °C

ดังนั้น

$$T_f = \frac{312 + 80}{2} = 196 \text{ } ^\circ\text{C}$$

เมื่อได้ $T_f = 196 \text{ } ^\circ\text{C}$ นำไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของอากาศที่ 1 atm พบว่าที่ $T_f = 196 \text{ } ^\circ\text{C}$ ไม่สามารถที่จะอ่านค่าได้แต่ค่า $T_f = 196 \text{ } ^\circ\text{C}$ จะอยู่ในช่วง 180-200 °C ดังนั้นจึงสามารถหาค่า $T_f = 196 \text{ } ^\circ\text{C}$ ได้ ดังแสดงในตารางที่ ข1

T_f (°C)	Density, ρ (kg/m ³)	Specific heat C_p (J/kg. °C)	Thermal conductivity K, (W/m. °C)	Dynamic viscosity μ , (kg/m.s)	Kinetic viscosity ν , (m ² /s)	\square randtl No Pr
196	0.7525	1022	0.0375	2.562×10^{-5}	3.406×10^{-5}	0.6977

เมื่อได้อุณหภูมิเฉลี่ยแล้วก็นำไปหาค่า Reynolds number จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Re} = \frac{V_{Sn} D_{\max}}{\nu} \quad (14)$$

ในที่นี้ ν คือค่าความเร็วต้นของหยดน้ำโลหะที่หลุดออกจากหัวโพรบของอัลตราโซนิคมีค่าเท่ากับ 3.37 m/s

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{Re} = \frac{(3.37 \text{ m/s})(82.3 \times 10^{-6} \text{ m})}{(3.406 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})}$$

$$\text{Re} = 8.14$$

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient) จากสมการ Nusselt number ดังนี้

$$\text{Nu} = \frac{hd}{k} \quad (14)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหยดโลหะ (m)
 k คือ ค่าการนำความร้อน ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)

ซึ่งได้มีการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง *Reynolds number*, *Nusselt number* and *Prandtl number* ซึ่งเสนอโดย Whitaker ดังนี้

$$\text{Nu} = \frac{hd}{k} = 2 + [0.4 \text{Re}^{1/2} + 0.06 \text{Re}^{2/3}] \text{Pr}^{0.4} \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_{Sn}} \right)^{1/4} \quad (15)$$

แทนค่าจะได้

$$\text{Nu} = 2 + [0.4(8.142)^{1/2} + 0.06(8.142)^{2/3}] (0.6977)^{0.4} \left(\frac{2.562 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}}{0.141 \text{ kg/m.s}} \right)^{1/4}$$

$$\text{Nu} = 2.14$$

จากสมการที่ 14

$$\text{Nu} = \frac{hd}{k}$$

จัดสมการใหม่จะได้

$$h = \frac{\text{Nu} \cdot k}{D_{\max}}$$

แทนค่าจะได้

$$h = \frac{(2.14)(0.0375 \text{ W/m.s})}{(82.3 \times 10^{-6} \text{ m})}$$

ดังนั้น

$$h = 975.26 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

ในการประมาณเวลาที่ใช้ทั้งหมดในการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนกระทั่งหยดน้ำโลหะแข็งตัว จะคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของอัตราการถ่ายเทความร้อนจากกฎการถ่ายเทความร้อนของนิวตันโดยใช้พื้นที่ผิวเฉลี่ย (A) โดยที่ A คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของทรงกลมสามารถหาได้ดังนี้

พื้นที่ผิวทั้งหมดของทรงกลม $A = \pi D_{\max}^2$ (16)

ดังนั้น $A = \pi (82.3 \times 10^{-6} \text{ m})^2$

$$A = 2.13 \times 10^{-8} \text{ m}^2$$

ความร้อนที่ผิวของน้ำโลหะเกิดจากการพา และการแผ่รังสี (Newtonian cooling) ดังนั้นจึงสามารถหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (Q_{ave}) จากหยดโลหะไปสู่ถังได้ดังสมการนี้

$$Q_{ave} = Q_{Conv} + Q_{rad} \quad (17)$$

$$Q_{ave} = hA_s (T_s - T_\infty) + \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4)$$

แทนค่าจะได้ $Q_{ave} = (975.26 \text{ W / m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) (2.13 \times 10^{-8} \text{ m}^2) [232^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C}] +$
 $(0.05) (5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4) (2.13 \times 10^{-8} \text{ m}^2) [(505\text{K})^4 - (353\text{K})^4]$

ดังนั้น $Q_{ave} = 3.16 \times 10^{-3} \text{ J / s}$

จากนั้นหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Q_{total}) จากหยดโลหะที่อุณหภูมิ 312°C ไปจนถึงอุณหภูมิ 232°C เพื่อใช้ในการประมาณเวลารวมของการถ่ายเทความร้อนเพื่อทำให้หยดโลหะเกิดการแข็งตัว

จาก $m = \rho v = \frac{1}{6} \pi \rho D_{\max}^3$ (18)

แทนค่าจะได้ $m = \frac{1}{6} \pi (6970 \text{ kg / m}^3) (82.3 \times 10^{-6} \text{ m})^3$

ดังนั้น $m = 2.03 \times 10^{-9} \text{ kg}$

อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด $Q_{total} = m C_p (T_2 - T_1)$ (19)

$$Q_{total} = (2.03 \times 10^{-9} \text{ kg}) (227 \text{ J / kg} \cdot \text{K}) (585 \text{ K} - 505 \text{ K})$$

ดังนั้น $Q_{total} = 3.68 \times 10^{-5} \text{ J}$

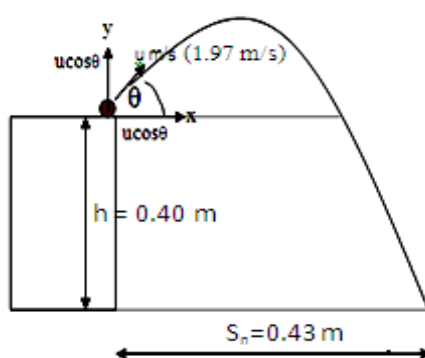
เวลารวมของการถ่ายเทความร้อน $\Delta t = \frac{Q_{total}}{Q_{ave}}$ (20)

แทนค่าจะได้ $\Delta t = \frac{(3.68 \times 10^{-5} \text{ J})}{(3.16 \times 10^{-3} \text{ J / s})}$

ดังนั้น $\Delta t = 0.01 \text{ s}$

3. การคำนวณหาระยะทางและความเร็วทั้งหมดของหยดโลหะที่จะเดินทางตกกระทบถึงพื้น

หลักการคำนวณเกี่ยวกับโปรเจกไทล์อาศัยการแยกความเร็วของวัตถุออกในแนวราบ (แกน x) และในแนวตั้ง (แกน y) แล้วคำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่ต้องการทราบโดยไม่คำนึงถึงแรงต้านอากาศ (drag force) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเคลื่อน เพื่อให้หยดน้ำโลหะสามารถกระเด็นไปได้ไกลที่สุดก่อนที่จะตกกระทบพื้น โดยที่หยดน้ำโลหะมีความเร็วต้น 1.97 m/s ความสูงของหัวโพรบอัลตราโซนิก 0.4 เมตร และทำมุม 45 องศา (มุม 45 องศาหยดน้ำโลหะจะสามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลมากที่สุด) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ ข1 แสดงการเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ของหยดน้ำโลหะ

พิจารณาในแนวแกน x

เนื่องจากในแนวแกน x วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ $V_x =$ ค่าคงที่ และ $g = 0$ ดังนั้นสมการที่เกี่ยวข้องจึงมีสมการเดียวคือ

$$V_x = v \cos \theta \quad (21)$$

$$V_x = (1.97 \text{ m/s})(\cos 45^\circ)$$

$$V_x = 1.39 \text{ m/s}$$

พิจารณาในแนวแกน y; เนื่องจากในแนวแกน y หยดน้ำโลหะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ (g)

$$V_y = v \sin \theta + gt$$

แทนค่าจะได้

$$V_y = (1.97 \text{ m/s}) \sin 45^\circ + (9.78 \text{ m/s}^2)(t)$$

$$V_y = 1.39 \text{ m/s} + (9.78 \text{ m/s}^2)t \quad (22)$$

หาเวลา (t) ในแนวแกน y โดยกำหนดให้ความเร็วต้น 1.97 m/s และความสูงในแนวแกน y เท่ากับ 0.4 เมตร จากสมการ

$$S_y = v_y t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (23)$$

แทนค่าจะได้

$$0.4 = (1.97 \text{ m/s} \cdot \sin 45^\circ) t + \frac{1}{2} (9.78 \text{ m/s}^2) t^2$$

$$0.4 = 1.39 t + 4.93 t^2$$

$$4.93 t^2 + 1.39 t - 0.4 = 0$$

ดังนั้น

$$t = \frac{-(1.39) \pm \sqrt{(1.39)^2 - 4(4.93)(-0.4)}}{2(4.93)}$$

$$t = 0.17 \text{ s}$$

แทนค่า t ในสมการที่ (22) จะได้ความเร็วในแนวแกน y ดังนี้

$$V_y = 1.39 \text{ m/s} + (9.78 \text{ m/s}^2)(0.17 \text{ s})$$

$$V_y = 3.05 \text{ m/s}$$

ดังนั้นความเร็วทั้งหมดของหยดน้ำโลหะสามารถหาประมาณได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_{total} = \sqrt{(1.39 \text{ m/s})^2 + (3.05 \text{ m/s})^2}$$

$$V_{total} = 3.37 \text{ m/s}$$

ระยะทางที่น้ำโลหะตกกระทบได้ไกลที่สุดสามารถประมาณได้จากสมการต่อไปนี้

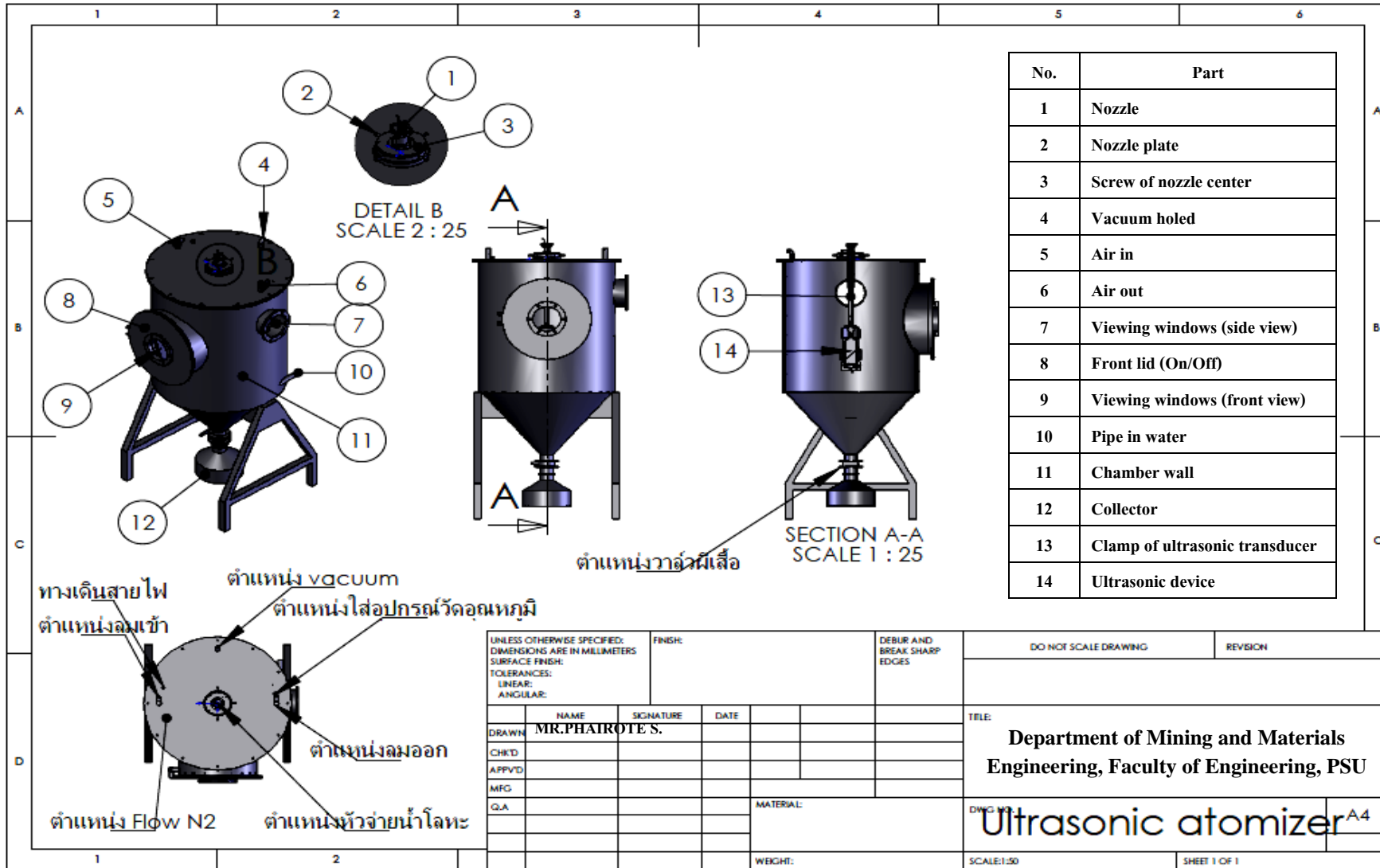
$$S_x = v_{total} \cos 45^\circ \times t \quad (24)$$

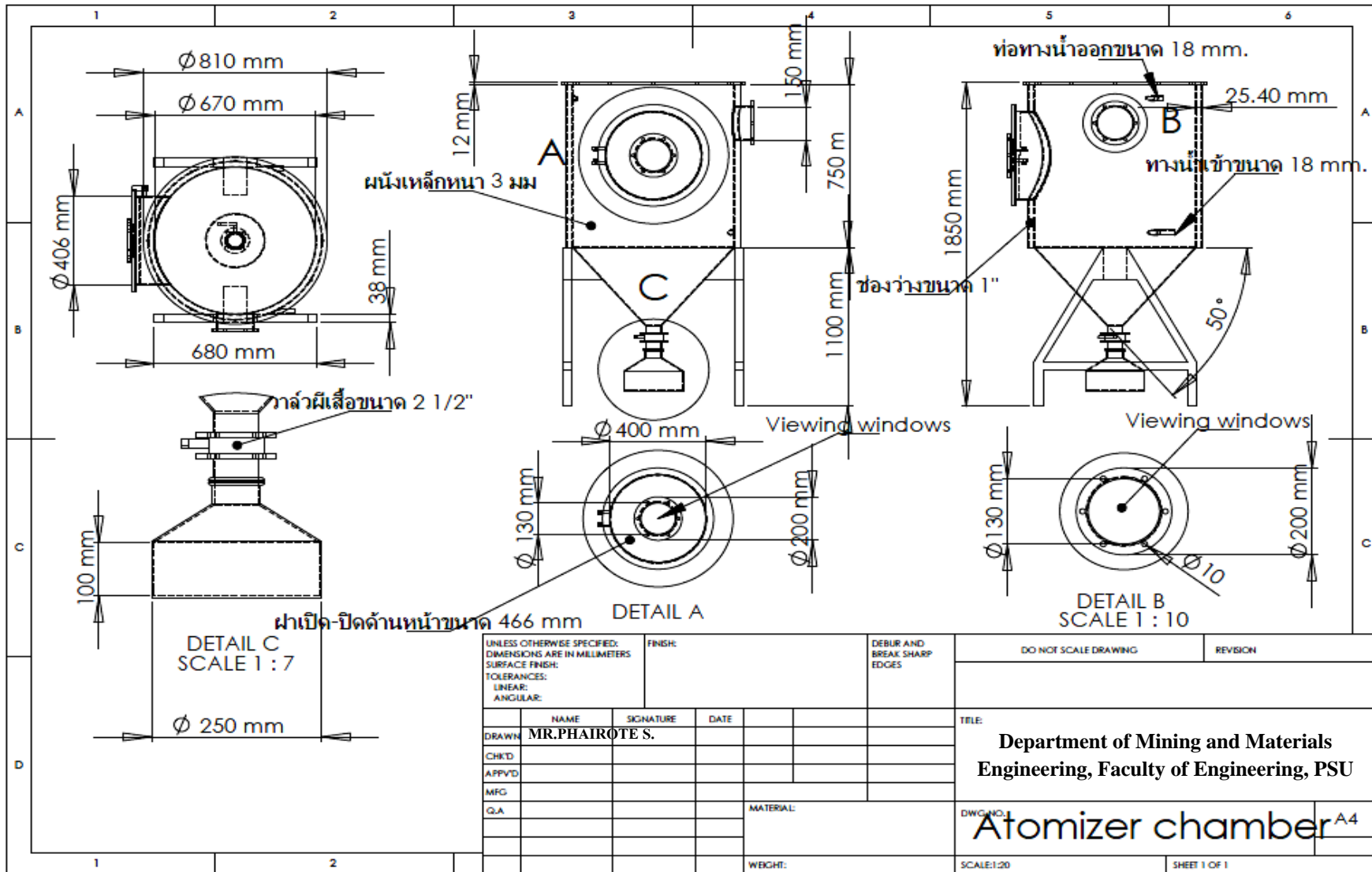
$$S_x = (3.37 \text{ m/s})(0.70)(0.17 \text{ s})$$

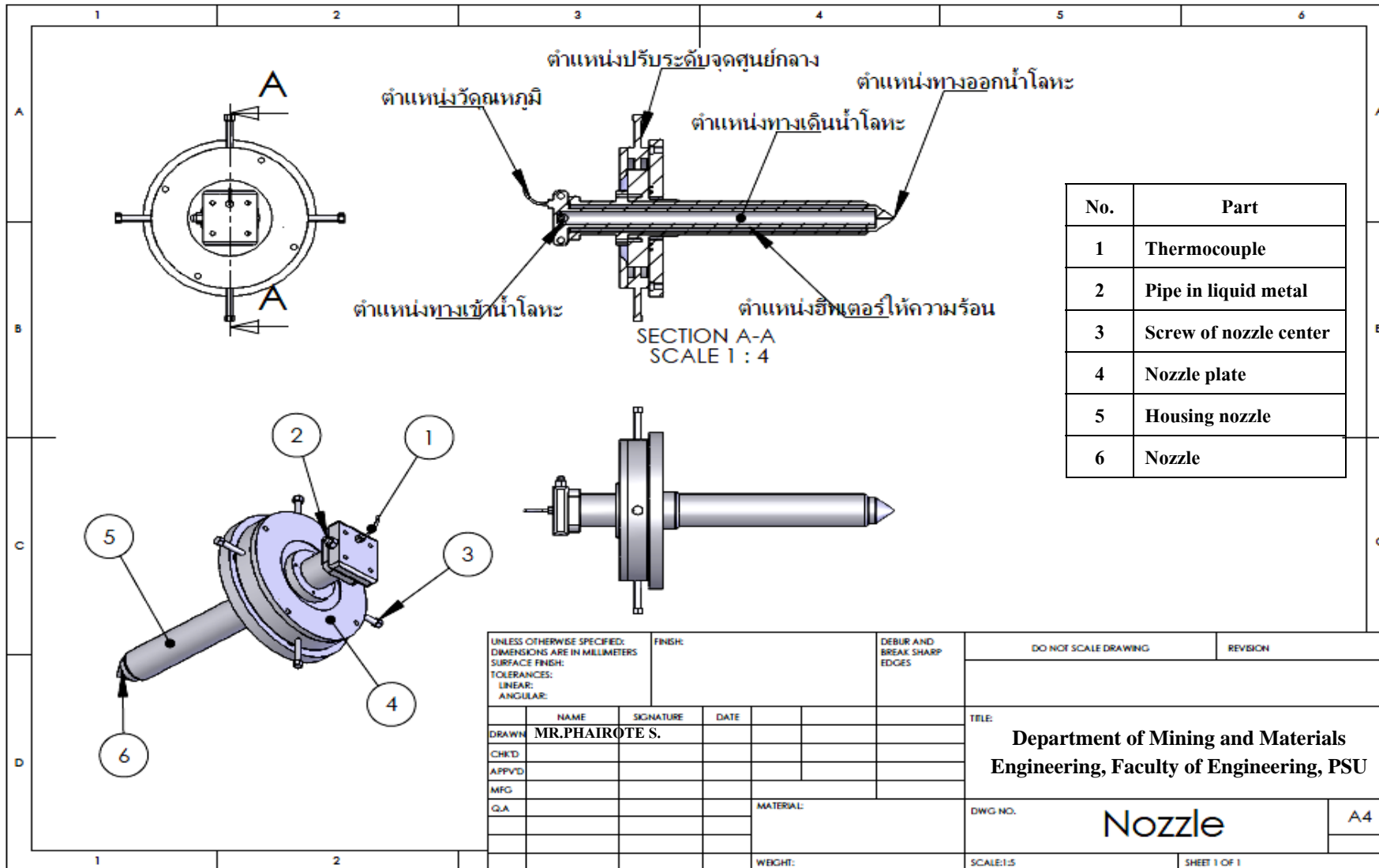
$$S_x = 0.40 \text{ m}$$

ค่า S_x ที่คำนวณได้คือระยะทางในแนวแกน x ทั้งหมดที่หยดน้ำโลหะสามารถกระเด็นไปได้ไกลที่สุด ซึ่งสามารถนำมาคำนวณขนาดของถังอะตอมไมเซอร์ได้ โดยประมาณว่าค่า S_x ที่คำนวณได้คือรัศมีของถังอะตอมไมเซอร์ ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของถังอะตอมไมเซอร์ทั้งหมดเท่ากับ $0.40 \times 2 = 0.80 \text{ m}$.

ภาคผนวก ก
การออกแบบเครื่องอัลตราโซนิกอะตอมไมเซชัน

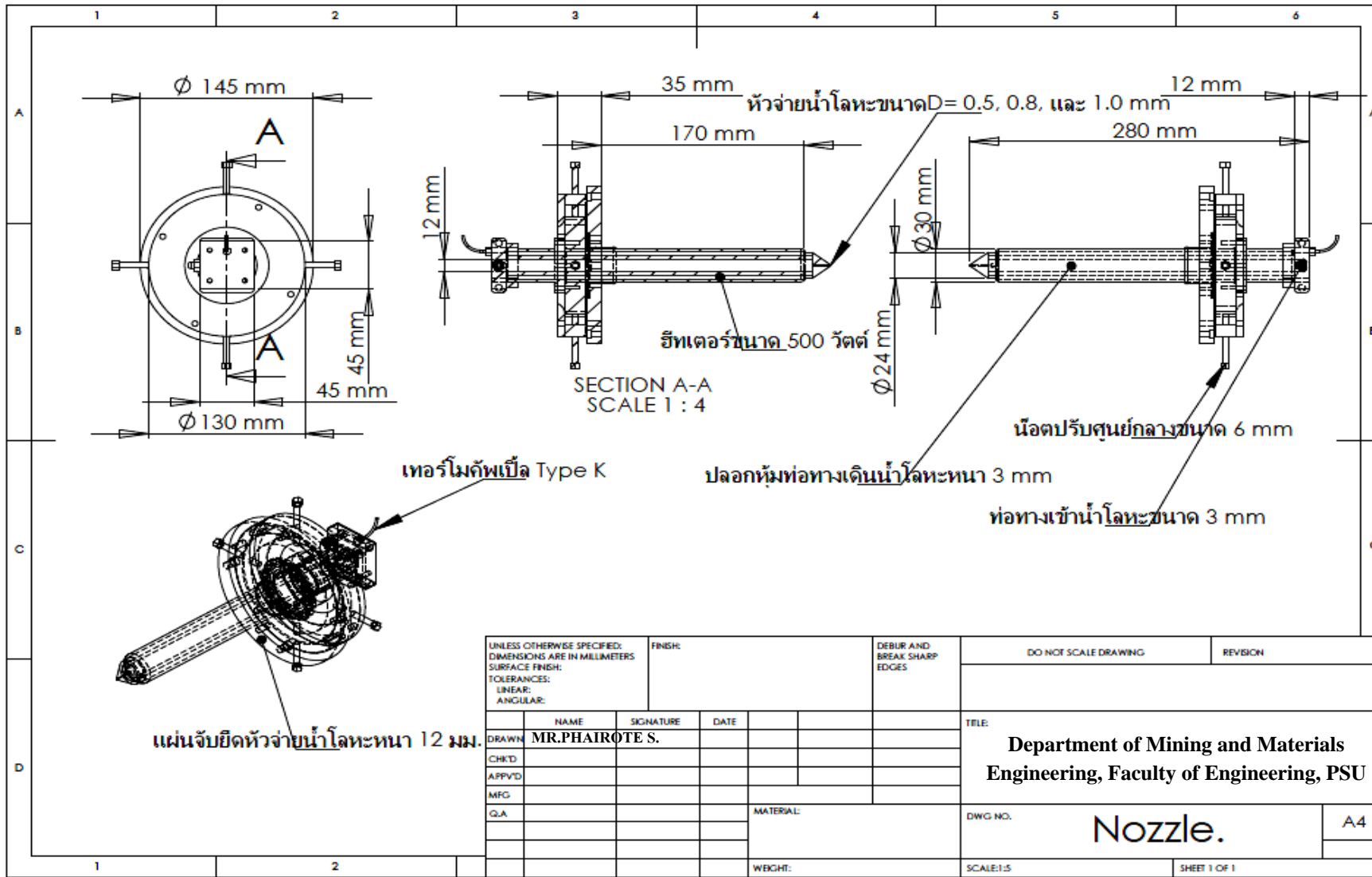




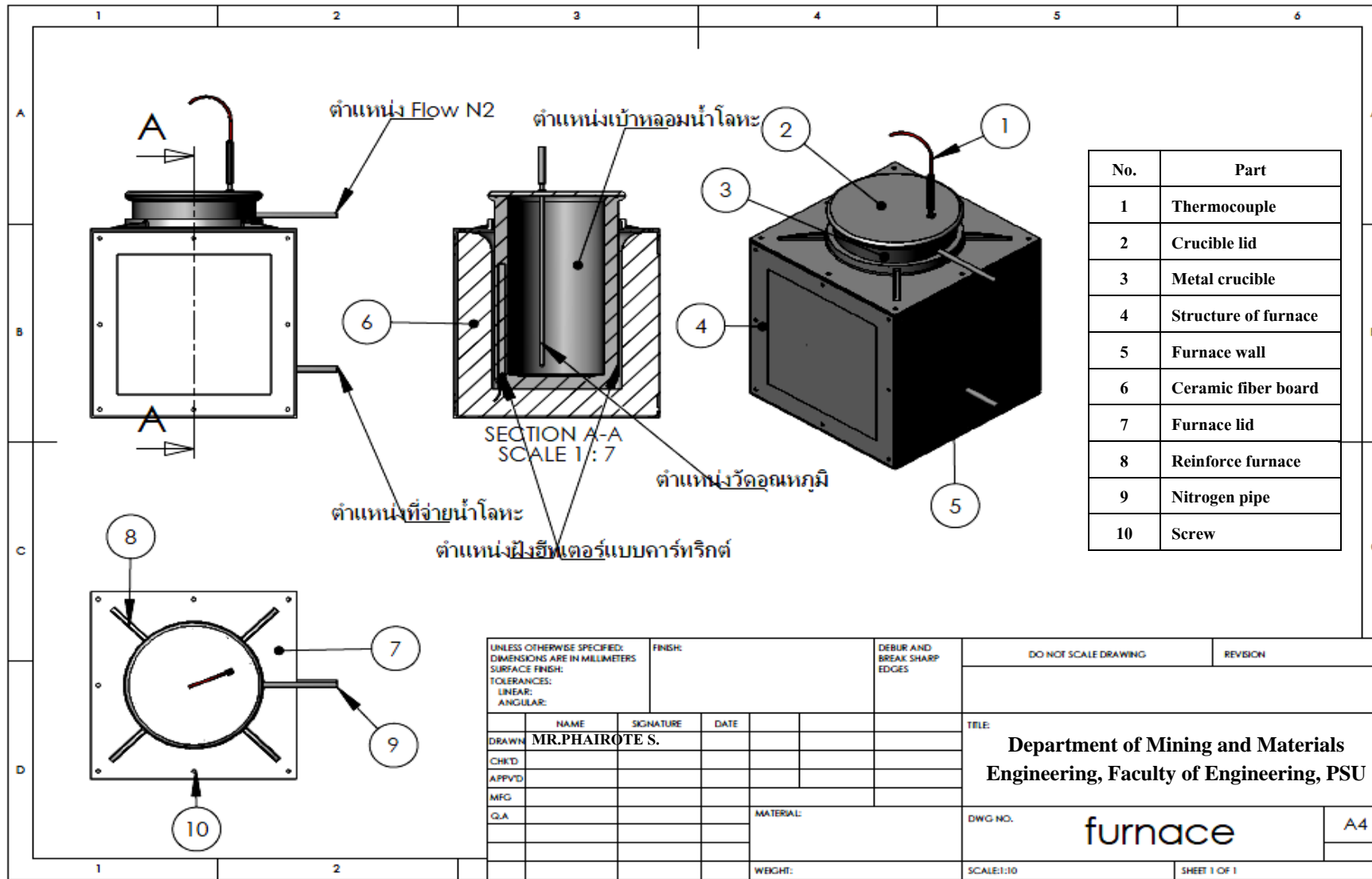


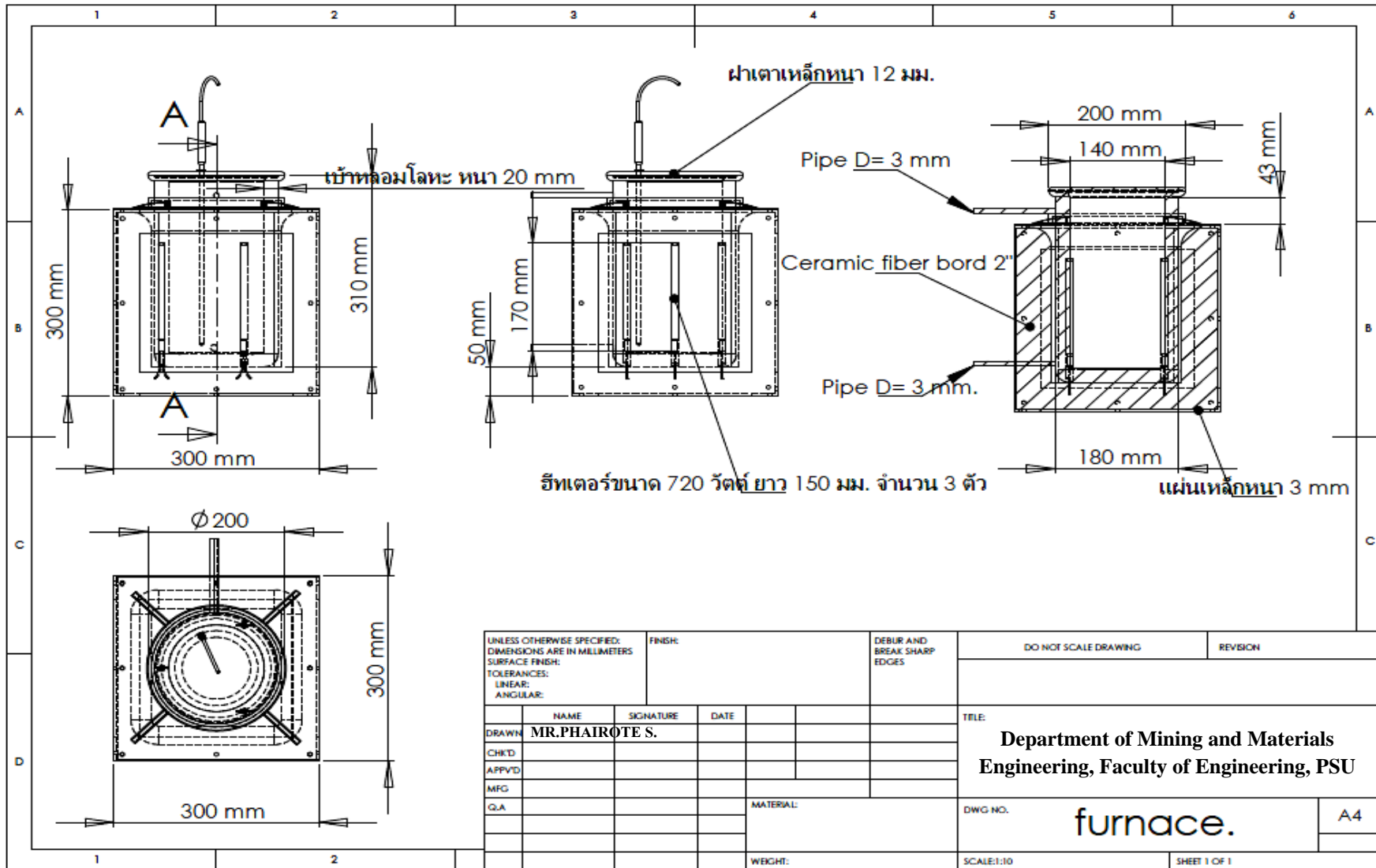
No.	Part
1	Thermocouple
2	Pipe in liquid metal
3	Screw of nozzle center
4	Nozzle plate
5	Housing nozzle
6	Nozzle

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:	
CHK'D	MR.PHAIROTE S.			Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU	
APP'VD				DWG NO.	A4
MFG				Nozzle	
Q.A.				MATERIAL:	
				WEIGHT:	
				SCALE:1:5	SHEET 1 OF 1

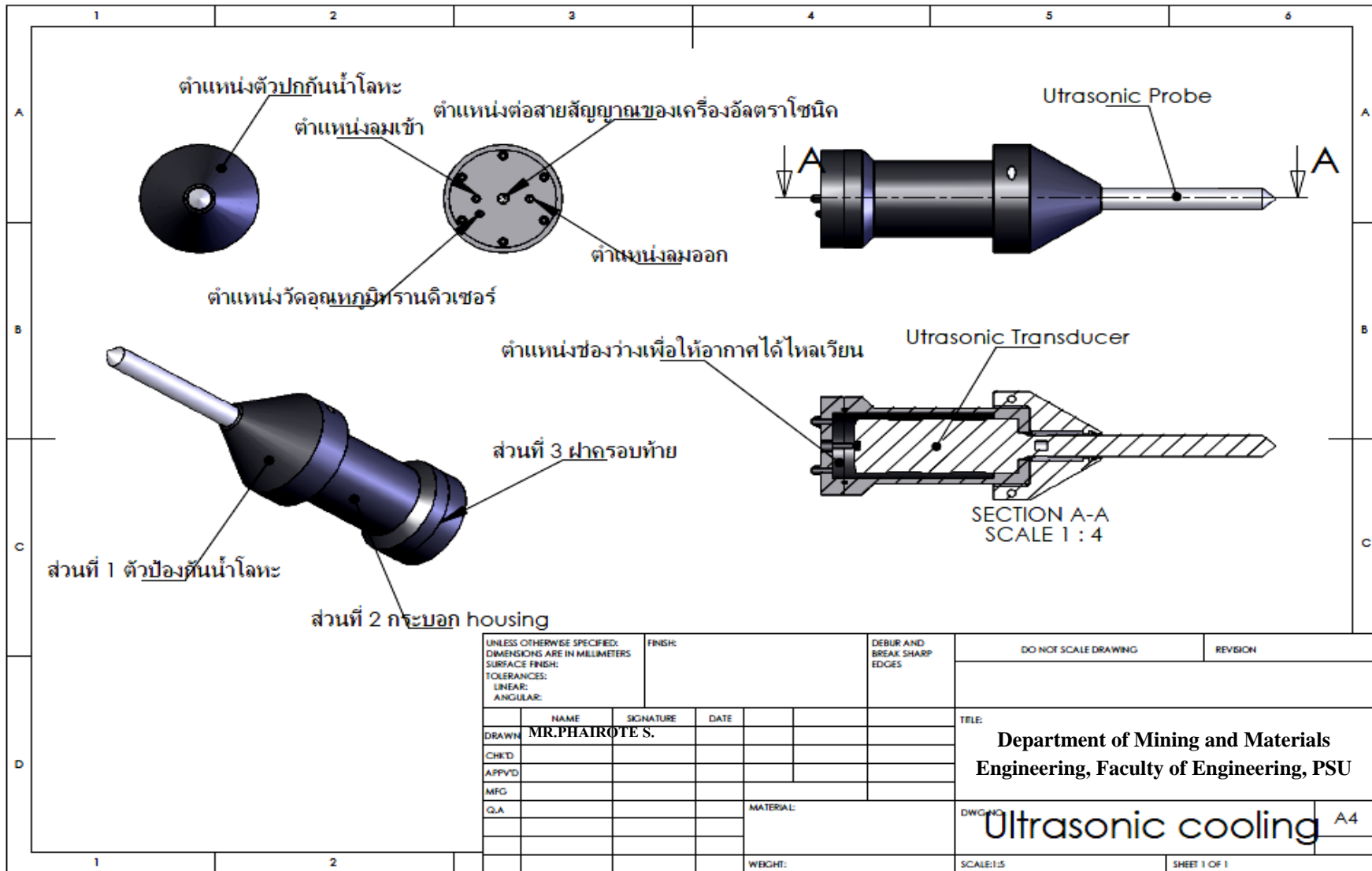


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
MR.PHAIROTE S.								Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU	
MFG								DWG NO.	
Q.A								Nozzle.	
								A4	
								SCALE:1:5	
								SHEET 1 OF 1	

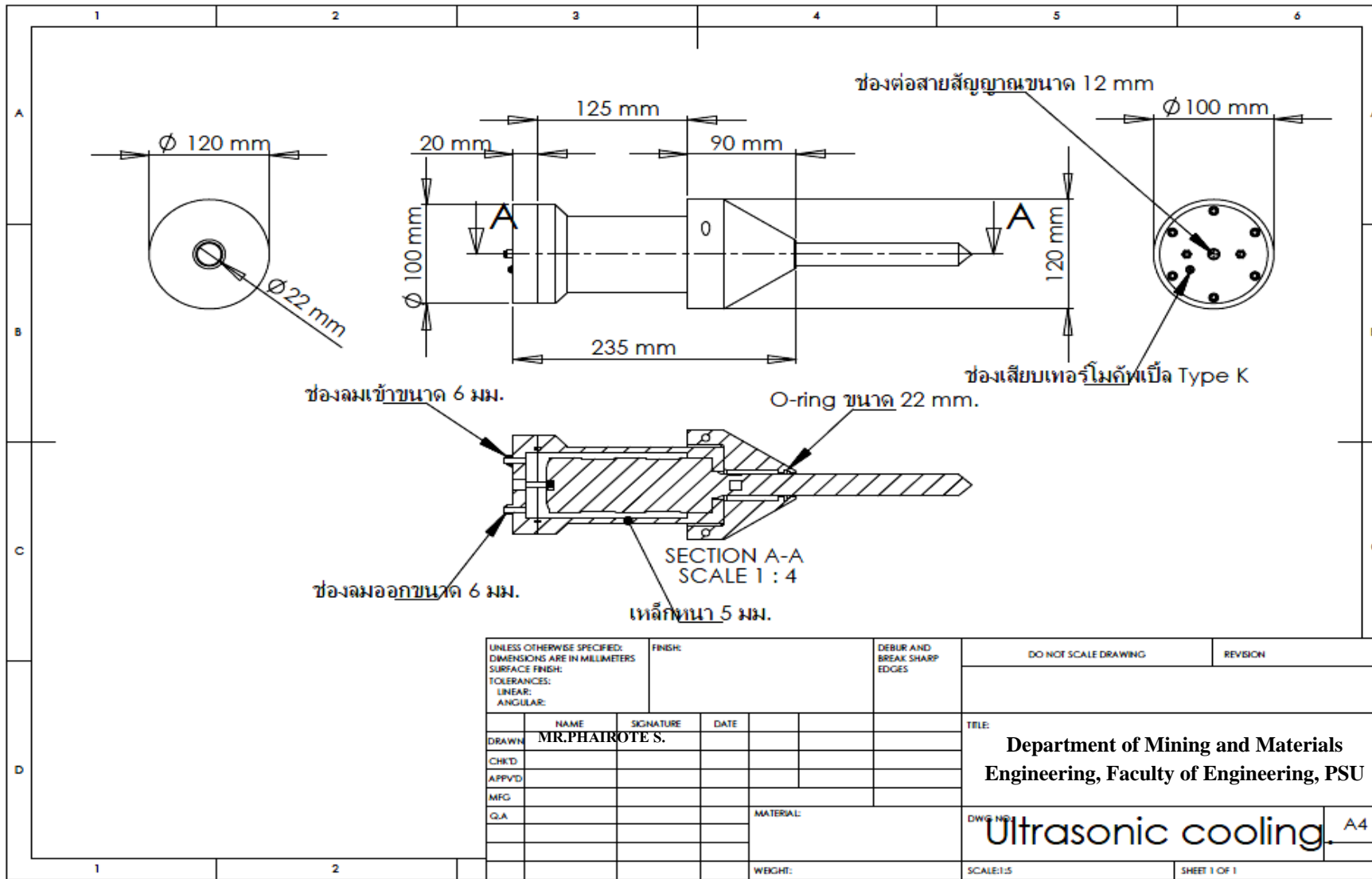




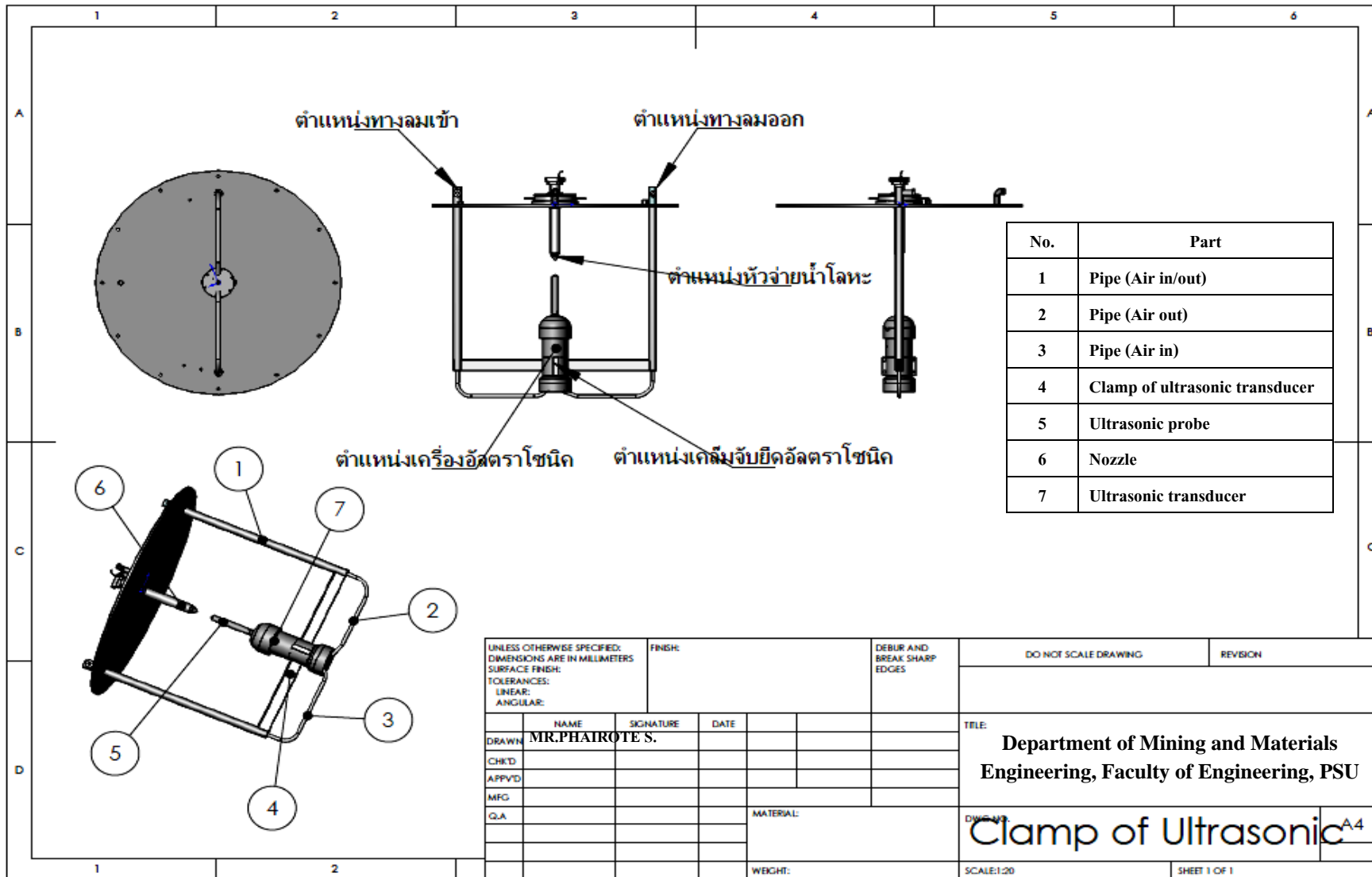
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
CHKD	MR.PHAIROTE S.				Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU	
APPVD					DWG NO.	A4
MFG				MATERIAL:	furnace.	
Q.A				WEIGHT:	SCALE:1:10	SHEET 1 OF 1

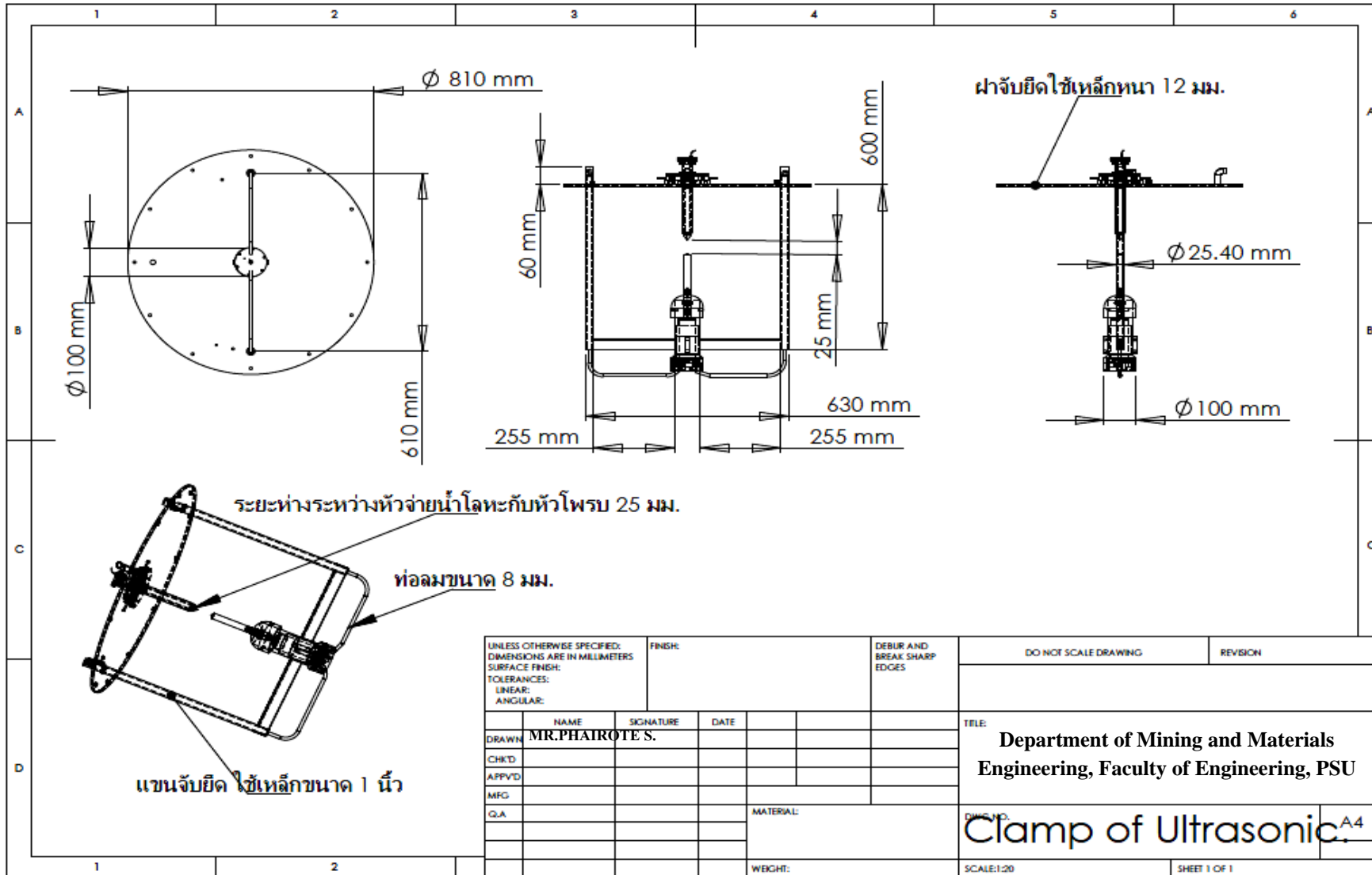


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN: MR. PHAIROTE S.		SIGNATURE		DATE		TITLE:		Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU	
CHK'D:						DWG. NO:		A4	
APP'VD:						SCALE: 1:5		SHEET 1 OF 1	
MFG:						MATERIAL:			
QA:						WEIGHT:			

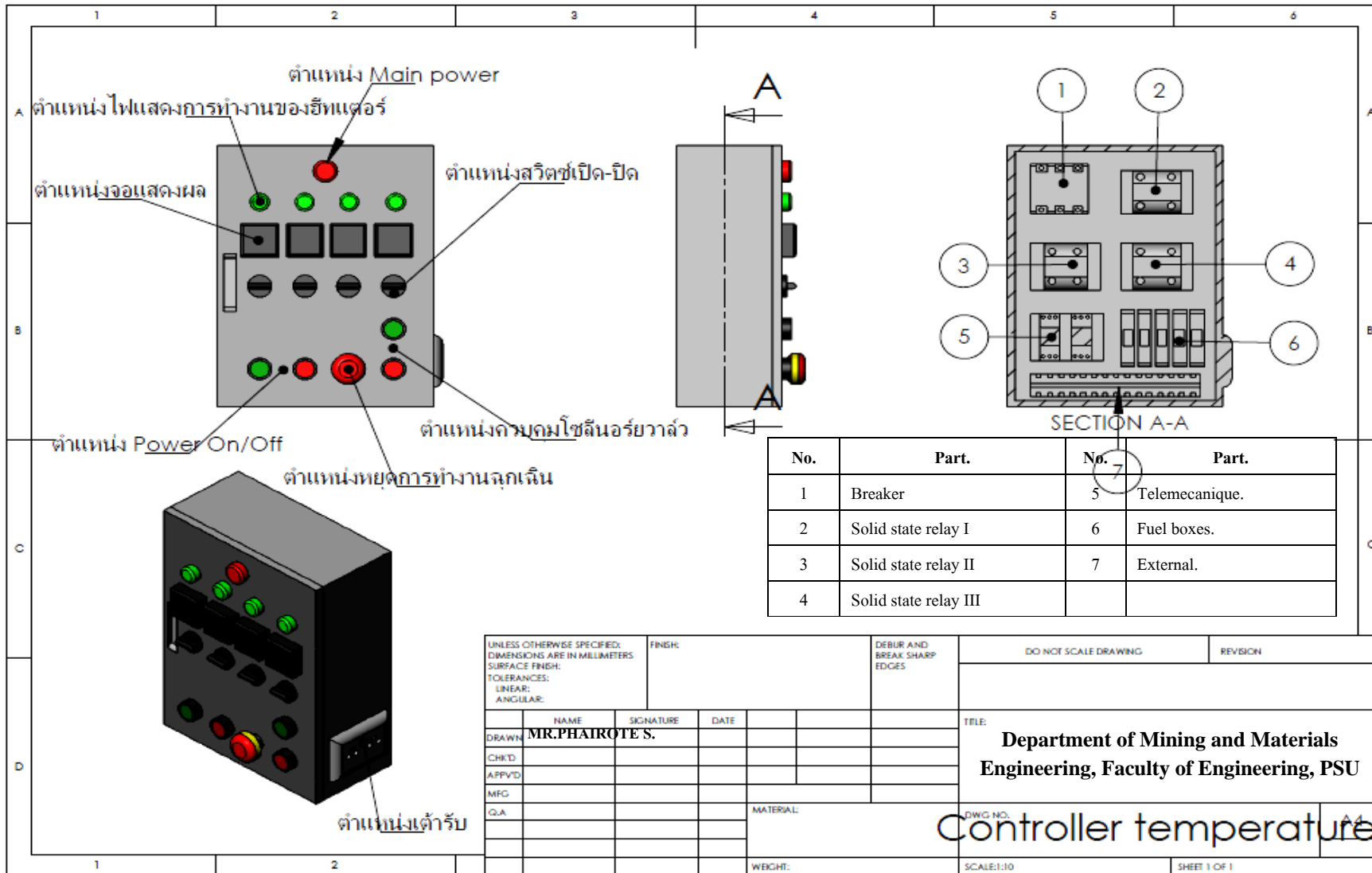


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHK'D		MR.PHAIROTE S.						Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU	
APP'VD									
MFG									
Q.A									
						MATERIAL:		DWG. NO. Ultrasonic cooling A4	
						WEIGHT:		SCALE: 1:5 SHEET 1 OF 1	





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
CHK'D	MR.PHAIROTE S.				Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU	
APP'VD					DWS NO. Clamp of Ultrasonic. A4	
MFG				MATERIAL:	SCALE: 1:20	
QA					SHEET 1 OF 1	
				WEIGHT:		



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND BREAK SHARP EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

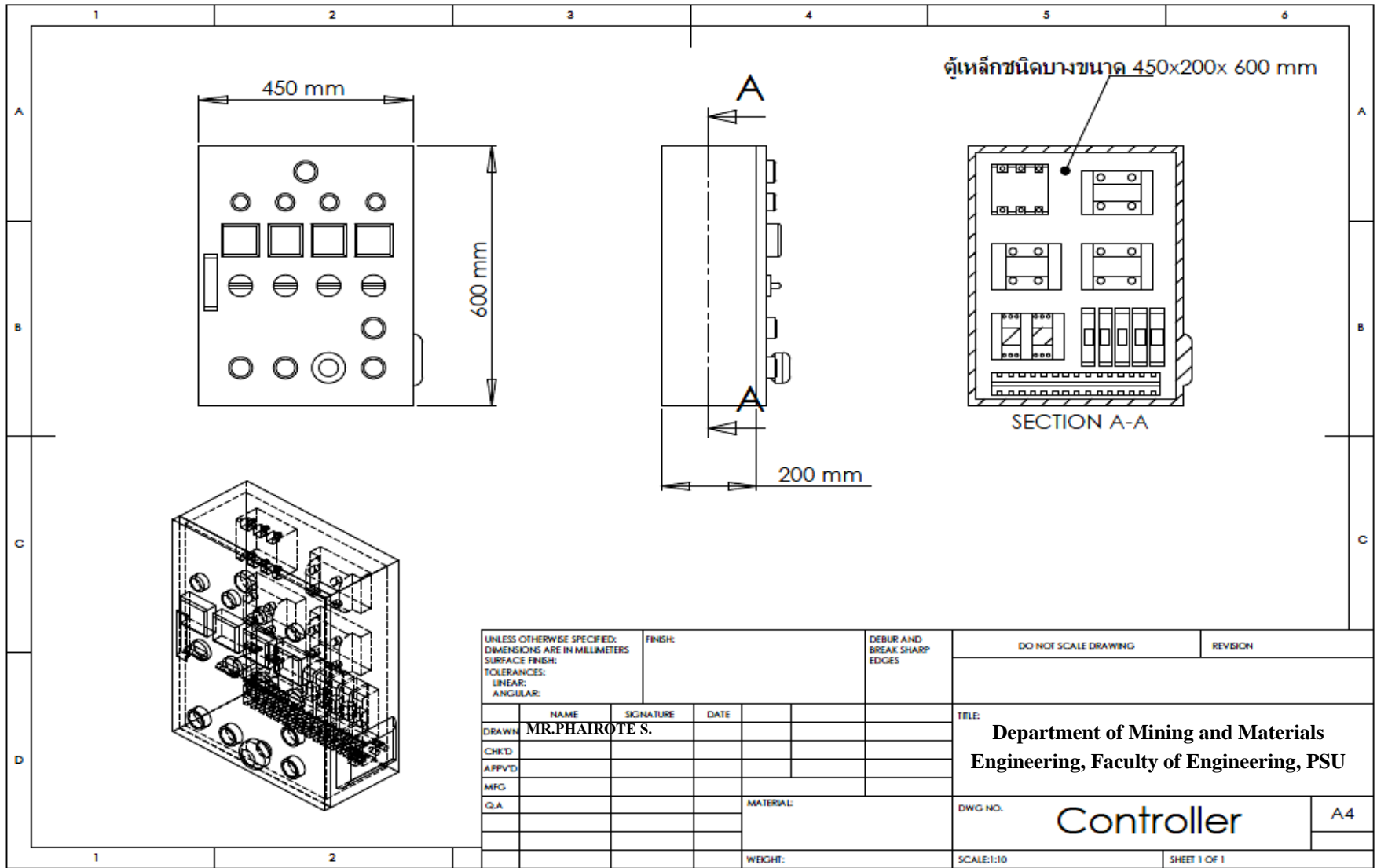
NAME	SIGNATURE	DATE
MR. PHAIROTE S.		
CHK'D		
APP'VD		
MFG		
Q.A		

TITLE: **Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU**

DWG. NO. **Controller temperature**

SCALE: 1:10

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
CHK'D	MR.PHAIROTE S.				Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU	
APP'VD					DWG. NO.	A4
MFG				MATERIAL:	Controller	
Q.A					SCALE:1:10	SHEET 1 OF 1
				WEIGHT:		